

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Porovnání mechanických vlastností  
vybraných kompozitních materiálů na  
bázi polyamidu 12 vyrobených metodou  
Selective Laser Sintering**

Comparison of Mechanical Properties of  
Selected Composite Material Based on  
Polyamide 12 Produced by Selective Laser  
Sintering

Student: Bc. Luděk Vyhnánek

Osobní číslo: VYH0019

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Štefek, MBA

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Luděk Vyhnánek**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: Porovnání mechanických vlastností vybraných kompozitních materiálů na bázi polyamidu 12 vyrobených metodou Selective Laser Sintering  
Comparison of Mechanical Properties of Selected Composite Material Based on Polyamide 12 Produced by Selective Laser Sintering  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Rozbor problematiky.
3. Návrh metodologie pro vyhodnocení vzorků.
4. Technické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

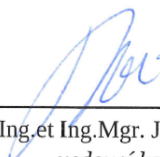
KOZIOR T.; KUNDER C. *Evaluation of the Influence of Parameters of FDM Technology on the Selected Mechanical Properties of Models*, In Procedia Engineering, Volume 192, 2017, Pages 463-468.  
GIBSON, Ian a David W. ROSEN. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, c2010, 459 p. ISBN 978-1-4419-1119-3.  
KOZLOV, Nikita. *Technologie 3D tisku v procesní technice*. Bakalářská práce. Praha 2017. ČVUT.  
Vedoucí bakalářské práce: Jiří Moravec.  
Marketing research. *The State of 3D Printing*. Sculpteo. Edition 2017. dostupné on-line <[www.sculpteo.com](http://www.sculpteo.com)>.  
Internetové zdroje [www.3d-tisk.cz](http://www.3d-tisk.cz), [www.3dhubs.com](http://www.3dhubs.com), [www.thingiverse.com](http://www.thingiverse.com), [www.sculpteo.com](http://www.sculpteo.com) aj.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Štefek, MBA**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.



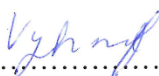
.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.



.....

Podpis studenta

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Vyhnánek, L. Porovnání mechanických vlastností vybraných kompozitních materiálů na bázi polyamidu 12 vyrobených metodou Selective Laser Sintering: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, XX s. Vedoucí práce: Štefek, P.

Diplomová práce se zabývá porovnáním mechanických vlastností kompozitního materiálu na bázi polyamidu 12 se skleněnými kuličkami. Práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou. Teoretická část se zabývá použitím a základním principem v 3D tisku, vlivem aditivních technologií na čtvrtou průmyslovou revoluci a enviromentální dopad. Dále teoretická část uvádí základní rozdělení a představení některých technologií, materiálů a aplikací v 3D tisku. Praktická část zahrnuje vyhodnocení mechanických vlastností kompozitního materiálu se skleněnými kuličkami. Vzorky jsou tištěny technologií Selective Laser Sintering s různou orientací a následně analyzovány zkouškou na tah. Výsledné mechanické vlastnosti jsou porovnány s hodnotami od výrobce, zda dosahují požadovaných parametrů.

## ANNOTATION OF MASTER'S THESIS

Vyhnánek, L. Comparison of Mechanical Properties of Selected Composite Material Based on Polyamide 12 Produced by Selective Laser Sintering: diplomová práce. Ostrava: VSB – Technical Univerzity of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering. Department of machining, assembly and engineering metrology, 2020, XX s. Thesis supervisor: Štefek, P.

This master's thesis deals with the comparison of mechanical properties of composite material on the basis of polyamide 12 with glass balls. The thesis is divided into the theoretical part and practical part. The theoretical part focuses on the use of 3D printing and its basic principle and the impact of additive technologies on the Fourth Industrial Revolution as well as its environmental impact. The theoretical part also includes the basic division and introduction of some of the technologies, materials, and use in 3D printing. The practical part deals with the evaluation of the mechanical properties of composite material with glass balls. The samples are printed with Selective Laser Sintering technology with different orientations. Subsequently, these samples are analyzed with a tensile test. The resulting mechanical properties are compared with the values provided by the producer whether it complies the required parameters.

## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	8
Seznam použitých zkratk.....	9
Úvod.....	10
1. Aditivní technologie (3D tisk) .....	11
1.1. Princip 3D tisku .....	12
1.2. Aditivní technologie pro průmysl 4.0 .....	12
1.3. Enviromentální potenciál v 3D tisku .....	14
2. Rozdělení základních technologií pro 3D tisk .....	17
2.1. Powder Bed Fusion .....	18
2.1.1. SLM.....	19
2.1.2. SLS .....	21
3. Materiály využívané v aditivní výrobě .....	23
3.1. Kovy.....	23
3.2. Keramika.....	24
3.3. Polymery.....	25
3.3.1. Termoplasty .....	25
3.3.2. Termosety .....	25
3.4. Kompozity .....	26
3.4.1. Polymerní kompozity .....	27
3.4.2. Kompozit na bázi polyamidu 12.....	27
3.4.3. Keramické kompozity .....	30
3.4.4. Kovové kompozity .....	30
4. Aplikace 3D tisku.....	31
4.1. Průmyslová aplikace .....	31
4.2. Aplikace v medicíně .....	32
4.3. Aplikace ve stavebnictví.....	33
5. Návrh metodiky experimentálních prací.....	34
6. Provedení experimentálních prací.....	35
6.1. Příprava a tisk vzorků .....	35
6.2. Zařízení TESTOMETRIC M500-50CT.....	38

6.3. Stanovení tahových vlastností .....	39
6.4. Experimentálně zjištěné hodnoty tahové zkoušky .....	39
6.4.1. Tahová zkouška vzorků skupiny A1 .....	41
6.4.2. Tahová zkouška vzorků skupiny B1 .....	43
6.4.3. Tahová zkouška vzorků skupiny D1 .....	45
6.4.4. Tahová zkouška vzorků skupiny E1 .....	47
6.4.5. Tahová zkouška vzorků skupiny H1 .....	49
6.5. Vyhodnocení experimentu .....	51
Závěr.....	53
Seznam použité literatury .....	56

**Seznam použitých značek a symbolů**

<b>Značka</b>	<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>
A	Podélná poměrná deformace	%
E	Modul pružnosti v tahu	MPa
F <sub>b</sub>	Síla při přetržení	N
ε <sub>B</sub>	Prodloužení při přetržení	%
σ <sub>B</sub>	Pevnost v tahu	MPa
σ <sub>y</sub>	Mez kluzu v tahu	MPa
ρ	Hustota	kg/cm <sup>3</sup>
l <sub>u</sub>	Upínací vzdálenost mezi čelistmi	mm
tl.	Tloušťka	mm



**Seznam použitých zkratk**

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
BJ	Binder Jetting
CAD	Computer-aided design
CNC	Počítačem řízený obráběcí stroj
DED	Direct Energy Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
LOM	Laminated Object Manufacturing
LENS	Laser Engineered Net Shaping
MEAM	Material Extrusion Additive Manufacturing
MJ	Material Jetting
MLS	Micro laser sintering
PA	Polyamid
PBF	Powder Bed Fusion
PEEK	Polyetheretherketon
PLA	Polylactid Acid – kyselina polymléčná
PS	Polystyren
PVA	polyvinylalkohol
SLA	Stereolitografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SHS	Selective heat sintering
UV	Ultra violet – ultrafialové

## Úvod

Nacházíme se v době, kdy dochází k velkému rozvoji a pokroku v aditivní výrobě. Je to díky širokému spektru využití. Ve srovnání s konvenčními metodami výroby má 3D tisk výhody, jakými jsou návrhy nových geometrií, kterých by bylo velmi obtížné nebo nemožné jinak dosáhnout. Tyto nové geometrie mohou vést ke snížení váhy, neboť není zapotřebí spojovacích komponentů. Další výhodou je snížení enviromentální stopy při výrobě součástí tím, že sníží kovový odpad a ušetří energii na výrobu a provoz. Třetí výhodou je použití vlastních materiálů, které mají specifické vlastnosti. Proto je důležité tyto technologie a materiály blíže studovat a testovat, aby byly dostupnější.

Kompozitní materiál je spojení více složek, které se vzájemně propojí. Každá složka má jiné specifické vlastnosti, ale teprve vhodnou kombinací vznikne materiál, který vytvoří unikátní vlastnosti. Mezi hlavní výhody patří především velká pevnost na poměr jeho plošné hmotnosti a dobré dielektrické vlastnosti za přítomnosti skelných vláken.

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část má za cíl představit aditivní výrobu a její místo v průmyslu 4.0 a dopad na životní prostředí. Dále představuje rozdělení 3D technologií a uvádí některé z nich. Následně pojednává o materiálech, kterými můžeme tisknout a v jakých oblastech výroby je lze použít.

Praktická část diplomové práce se zabývá porovnáním mechanických vlastností kompozitního materiálu na bázi polyamidu 12 se skleněnými kuličkami. Ploché vzorky byly tisknuty technologií Selective Laser Sintering na 3D tiskárně EOS P396 a následně byly zkoumány mechanické vlastnosti v tahové zkoušce. Do budoucna má tento materiál velký potenciál a jeho vlastnosti se stále zlepšují. V dnešní době kompozitní materiál zaznamenává rozmach ve zdravotnictví, kde je používán pro výrobu lékařských pomůcek, dále v leteckém a automobilovém průmyslu nebo v oblasti sportovních pomůcek. Kompozitní materiál vykazuje anizotropní mechanické vlastnosti. Záleží tedy v jakém směru vzhledem k ose Z stroje jsou tisknuty součásti. A proto je tedy zapotřebí získávat neustále nové poznatky, nejen o tomto materiálu, ale i o správné přípravě před tiskem.

## 1. Aditivní technologie (3D tisk)

Vývoj 3D tisku začíná už v 80. letech 20. století, představením prvního patentu Dr. Kodiami. Ten ale nepřišel v platnost, a tak byl o šest let později uveden první platný patent na stereografický přístroj (SLA) Charlesem Hullem. Tím vznikla významná společnost 3D Systems Corporation, která působí na trhu do současnosti. Další významnou společností je 3D Systems, která koupila patent na technologii Selective Laser Sintering (SLS). Ten samý rok vznikla i společnost Stratasys s její technologií Fused Deposition Modeling (FDM). V Evropě vnikla společnost EOS GmbH, která se zabývala technologií Direct Metal Laser Sintering (DMLS).<sup>2,3</sup>

K dalšímu velkému průlomů došlo s vývojem projektu RepRap, který měl za úkol snížit ceny tiskáren formou open source. Lidé dostali možnost sestavit si vlastní tiskárnu doma. Tímto se 3D tisk dostal do širšího povědomí a došlo k rychlejšímu vzestupu této oblasti výroby předmětů.<sup>2</sup>



Obrázek 1 - 3D tiskárna Markforge X7<sup>24</sup>

V průmyslové oblasti se nazývá 3D tisk spíše jako „Additive Manufacturing“. To v překladu může znamenat tzv. aditivní nebo doplňková výroba. Tato technologie výroby má velmi široké využití. Mimo 3D tisku plastů, které je nejrozšířenější, se do popředí dostává

tisk kovů a kompozitních materiálů. Ve srovnání s konvenčními výrobními metodami, jako je vstřikování, tváření za tepla, odlévání, obrábění a kování, má významné výhody. První z nich je návrh nových geometrií, kterých by bylo velmi obtížné nebo nemožné dosáhnout bez 3D tisku. Tyto nové geometrie mohou vést ke zlepšení výkonu a snížení váhy, neboť není zapotřebí spojovacích komponentů (nýtů, šroubů apod.). Například v leteckém průmyslu je použití nových komponentů zásadní ke snížení spotřeby paliva. Druhou výhodou je snížení enviromentální stopy při výrobě součástí tím, že se sníží kovový odpad, vyhne se použití forem a snížení energií na výrobu a provoz s tím spojené. Třetí výhodou je použití vlastních materiálů. Tento atribut umožňuje vytvořit výslednou součást se specifickými vlastnostmi, které nejsou tradiční výrobou proveditelné. <sup>1,2,4</sup>

## 1.1. Princip 3D tisku

Technologií 3D tisku lze zpracovávat velké množství druhů materiálu, jako jsou polymery, keramika, kompozity a kovy. Výsadou od klasických technologií je, že výroba součástí probíhá po jednotlivých tenkých vrstvách, které jsou na sebe kladeny jako je tomu u technologií FDM a SLA. <sup>9</sup>

Princip pro technologie Laser fusion je vysoce výkonný laser k roztavení práškových médií. Tyto technologie lze použít pro plasty, kompozity (SLS) a kovy (SLM/DMLS). Stroje jsou spíše pro průmyslové využití, kvůli výkonným laserům a obtížné manipulovatelnosti s práškovými materiály. <sup>9</sup>

Celý proces aditivní výroby můžeme rozdělit na několik po sobě jdoucích kroků, bez ohledu na danou technologii tisku. V první fázi je vytvoření 3D modelu za pomoci CAD systému. Takto vytvořený model exportujeme do programu slicer. Takový nástroj slouží k nastavení tiskových parametrů (tloušťka vrstev, rychlost tisku, typ materiálu, teplota tisku atd.). Výsledkem je soubor pro tisk nebo-li G-kód, který slouží jako srozumitelná informace pro tiskárnu. Z takto vygenerovaného G-kódu, přichází samotný tisk předmětu. V případě složitých součástí následuje postprocessing, při kterém dochází k odstranění podpor, úpravě povrchu či dalším nezbytným operacím. <sup>9</sup>

## 1.2. Aditivní technologie pro průmysl 4.0

4. průmyslová revoluce neboli průmysl 4.0 je moderní trend zaměřující se na technologii inteligentní automatizace. V této nové éře je pro dosažení ekonomické konkurenceschopnosti důležité umět využít dovednosti moderní výroby a také začleňovat neobvyklé informační technologie. <sup>25</sup>

Průmysl 4.0 mění oblast průmyslu, obchodu, energetiky, společnosti a hospodaření. Nová průmyslová revoluce transformuje výrobu z automatizovaných jednotek na plně integrovanou, automatizovanou a kontinuálně optimalizovanou. Využití do každodenní praxe vyžaduje řadu nezbytných kroků, které jsou nezbytné pro udržení technologického pokroku.<sup>10</sup>

Ačkoli počet inovativních procesů aditivní výroby značně roste, tyto procesy mají své základy v již osvědčených a zavedených základních technologiích. Je pravděpodobné, že společně s technickými pokroky v aditivních technologiích bude vyvíjeno i více zdokonalených a vylepšených procesů. Nicméně většina těchto procesů bude vyvinuta pro obvyklé materiály k tisku jako polymery, které nejsou obecně určeny a využívány pro odvětví průmyslu. Jelikož nejvyužívanějším materiálem v odvětví průmyslu jsou kovové slitiny a kompozity je v poslední době věnována velká pozornost právě problematice aditivní výroby z kovů. Navíc se očekává, že budoucnost výroby v odvětví bude směřovat k použití těchto procesů dohromady.<sup>25</sup>

Tuto novou oblast nazýváme „hybridní technologie“ a spočívá v tom, že kombinuje metody substraktivní technologie s aditivními. To napomáhá zhotovit lepší produkty se zvýšenou kvalitou povrchu, lepší odolností atd. V současné době vede zvýšený zájem o hybridní výrobu mimo aditivní procesy právě k různým kombinacím různých výrobních procesů.<sup>25</sup>

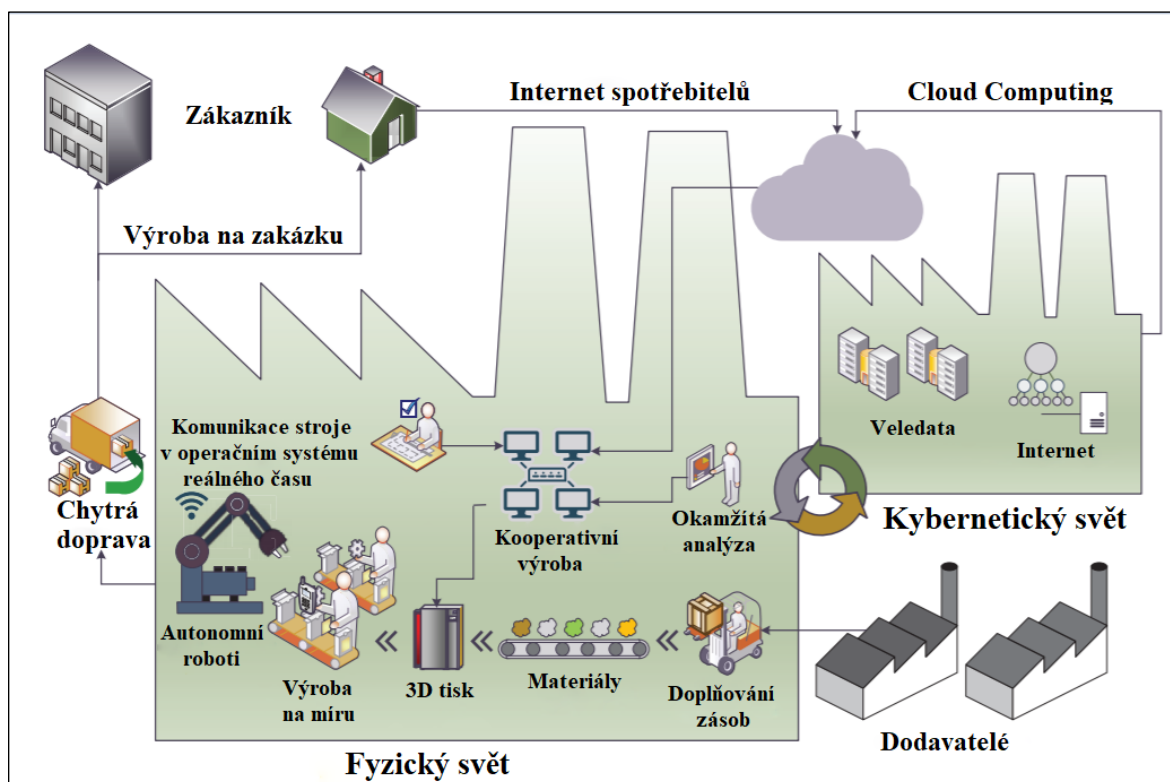
V posledním desetiletí získal Průmysl 4.0 pozornost také ve sféře průmyslového odvětví, a to hlavně proto, že může přinést velkou změnu paradigmatu celé výroby. Aditivní výroba je klíčovou technologií v revoluci, která nás na poli výroby čeká a má obrovský potenciál za předpokladu, že v blízkém čase dokáže překonat určité překážky.<sup>25,26</sup>

Pokud jde o budoucnost aditivní technologie, v oblasti udržitelnosti může hrát velkou roli. A to hlavně díky snižování odpadového materiálu a snižování nákladů na výrobu díky uplatňování skladovací metody just-in-time. A co víc, lze očekávat, že 3D tisk a digitální výroba mohou mít pozitivní dopad na společnost. Za prvé dojde ke změně role zaměstnance jako takového. Zaměstnanci v této oblasti budou moci být spíše konstruktéry a projektanty než obyčejnou pracovní silou. Za druhé, díky oblíbeným populárním platformám jako je „DIY“ umožní uživatelům být součástí konstrukční a výrobní fáze.<sup>25</sup>

Je pravděpodobné, že aditivní výroba nebude využívána v klasických průmyslových továrnách, které se zaměřují na hromadnou výrobu. Zde totiž může být nedostatkem aditivní výroby její přesnost, rychlost, opakovatelnost a v neposlední řadě také náklady.<sup>25,26</sup>

Na jedné straně, pokrok v oblasti informačních technologií urychluje přechod do nadcházející průmyslové éry. Existence 4. průmyslové revoluce značně závisí na potenciálu a možnostech aditivní výroby. Na druhou stranu, kvůli rozdělení výrobních činností do mnoha míst jako jsou malá pracoviště, budou role konstruktérů, továren

a zákazníků značně redefinovány a dojde ke změnám. Dá se říct, že současné překážky hromadné výroby budou překonány osobním přístupem a výrobou, která bude přizpůsobena



Obrázek 2 - Schéma chytré továrny s prvky průmyslu 4.0<sup>25</sup>

na míru každého požadavku. V současnosti se hledají nové materiály, které se hodí pro aditivní výrobu jako například chytré materiály nebo kompozitní komponenty, aby bylo co nejlépe dosaženo požadovaných vlastností.<sup>25</sup>

### 1.3. Enviromentální potenciál v 3D tisku

Aditivní technologie přináší technologický vývoj výroby nejen ve strojírenském průmyslu, avšak otázkou je jaké ekologické náklady to přináší. Výhodou je, že při 3D tisku dochází k velmi značnému snížení odpadu, a navíc lze tento materiál po použití recyklovat.<sup>13, 15</sup>

Odpad materiálu a velké množství oxidu uhličitého při průmyslové výrobě tradičním výrobním procesem jako jsou např. nekonvenční metody obrábění je obrovský. Pokud aditivní technologie zařadíme mezi tradiční výrobní technologie, ušetříme náklady za dopravu, balení výrobků a celkový čas za výrobu a manipulaci s tím spojené. Dalším pozitivem je také to, že není potřeba skladovat velké zásoby materiálu.<sup>13, 15</sup>

Pokud se zaměříme na komplexně na celý cyklus procesu 3D tisku, karbonová stopa může být snížena i během fáze projektování výrobku. Struktura součásti se navrhne, a poté

jednoduše schválí a následně už dochází k výrobě. Veškeré úpravy a modifikace tak lze dělat před začátkem samotného tisku ve fázi návrhu. <sup>15</sup>

FDM může mít zanedbatelný odpad, pokud model při tisku nevyžaduje podpurný materiál. Další výhodou je možnost tisku více než 90 % dutých částí, které snižují spotřebu materiálu a spotřebu energie. Jednou z největších výhod 3D tisku je, že takto vytisknuté součásti snižují hmotnost automobilu či letadla. To má za následek výraznou spotřebu paliva. <sup>13</sup>

Tiskárny lze využít k vytváření velké rozmanitosti složitých součástí, aniž by došlo k podstatným změnám nastavení stroje. Na rozdíl od CNC stroje, kde je při výrobě různých dílů potřeba měnit součásti, nástroje a nastavení. To eliminuje spotřebu energie při volnoběhu. Tisknout lze téměř kdekoli, takže v budoucnu bude méně nutné přepravovat hotové zboží z jednoho místa do druhého. To může snížit náklady na dopravu a emise s tím spojené. Výhodou je využití velkého množství recyklovatelných materiálů při tisku. <sup>13</sup>

Tabulka níže zobrazuje různé varianty technologií 3D tisku a předpokládaný dopad každé z nich na životní prostředí. Každá z uvedených technologií (přičemž většina z nich využívá plastové materiály) negativně přispívá k tvorbě skleníkových plynů, kvůli velké spotřebě energie. Pokud jde o spotřebu nerostných surovin, tak u těchto vybraných technologií je dopad pozitivní, a to zejména díky použití méně materiálu na výrobu běžných součástí. K znečištění odpadních vod nedochází přímo téměř vůbec, protože není využito žádných emulzí či chladících kapalin při tisku. <sup>14</sup>

Tabulka 1 – Přímý dopad vybraných aditivních technologií na životní prostředí. <sup>14</sup>

Technologie	Skleníkové plyny	Spotřeba nerostných surovin	Znečištění odpadních vod
PLS – na bázi prášku	X	✓	✓
MLS - na bázi prášku	X	✓	✓
Stereolitografie	X	✓	✓
MJ	X	✓	✓
BJ	X	✓	✓
Sheet Lamination	X	✓	✓
Directed Energy Deposition	X	✓	✓
Extrusion - based	X	✓	✓
✓ - pozitivní dopad; X – negativní dopad			

Ačkoli existuje spousta výhod 3D tisku, existují i takoví vědci, kteří dávají do popředí i jiný názor na tuto technologii. Někteří z nich tvrdí, že při 3D tisku nemusí nutně docházet ke snižování odpadového materiálu, a ne vždy lze tento materiál recyklovat. Nevýhodou 3D tiskáren z pohledu environmentálního je rozhodně spotřeba energie ve srovnání s CNC nebo jinými technologiemi. Například při porovnání 3D tisku s technologií vstřikování plastů dochází k padesátkrát až stokrát vyšší spotřebě energie při výrobě výrobku stejné váhy.<sup>15</sup>

Laserová nebo tepelná technologie používaná k tavení materiálu vyžaduje velké množství energie, a to může mít vliv na životní prostředí, zejména v zemích, kde se fosilní palivo používá k výrobě elektřiny.<sup>13</sup>

Je tedy jasné, že 3D tisk má své výhody v souvislosti s dopadem na životní prostředí, jakým jsou například malé množství odpadového materiálu, dále není potřeba mít k dispozici žádné speciální nástroje pro výrobu, životní cyklus produktu se snižuje atd. Ale i nevýhody ve velké spotřebě energie. Na druhou stranu je tato nová technologie zkoumána teprve krátkou dobu a je potřeba se jí více dopodrobna věnovat, aby došlo k odhalení dalších benefitů ale i potenciálních hrozeb, které tato oblast skýtá.<sup>15, 27</sup>



## 2. Rozdělení základních technologií pro 3D tisk

Základním rozdělením, dle kterého se dělí všechny možné technologie, a tedy i aditivní výroba, je rozdělení podle zpracovaného materiálu:

- keramika,
- kov,
- polymer,
- kompozit.<sup>9</sup>

Následný výrobní proces se může lišit a tato norma kategorizuje aditivní výrobu podle dodávky výchozího materiálu nebo morfologie. Dle normy ISO/ASTM 52900:2015 radíme aditivní výrobu do 7 sekcí jejich rozdělení je následující:<sup>9, 11</sup>

Tabulka 2 – Rozdělení aditivní výroby dle normy ISO/ASTM 52900:2015<sup>11</sup>

Název procesu	Charakteristika procesu	Technologie
<b>Blinder Jetting</b>	Při tomto procesu dochází tryskami k nanášení tekutého pojiva ve formě kapiček na základní materiál v podobě prášku. Pojivo působí jako adhezivum mezi jednotlivými vrstvami prášku.	BJ
<b>Directed Energy Deposition</b>	Využívá soustředěnou tepelnou energii pro roztavení a spojení materiálu, který je ve formě prášku nebo drátu. Tepelný zdroj laser nebo elektronový paprsek.	LENS, EBAM
<b>Material Extrusion</b>	Materiál je veden přes trysku, která jej nanáší na platformu. Při průchodu tryskou dochází k ohřátí a roztavení materiálu ještě před nanesením.	FDM
<b>Material Jetting</b>	Selektivní nanášení malých kapek na stavební platformu. Běžně se používají fotosenzitivní termosetové polymery. Každá vrstva vytvrzena.	MJ, NPJ, DOD
<b>Powder Bed Fusion</b>	Při tomto procesu dochází k vystavení celé plochy naneseného materiálu tepelnému zdroji, jenž umožní spojení výchozího práškového produktu. Tepelný zdroj je laser nebo elektronový paprsek.	MJF, SLS, SLM, EBM
<b>Sheet Lamination</b>	U tohoto procesu je každá vrstva tvořena tenkým plátem či listem materiálu. Při každém nanesení dojde ke slepení vrstvy, resp. Listu s předchozím a k vyřezání tvarových kontur.	LOM
<b>Vat Polymerization</b>	Pomocí ultrafialového laseru se v nádrži s tekutou fotosenzitivní pryskyřicí mění struktura materiálu na pevnou látku. K tomuto vytvrzování dochází vždy po vrstvách v konkrétních místech působení ultrafialového světla.	SLA, DLP, CDLP

Další rozdělení se týká povahy výchozího materiálu. Tímto rozdělením zjistíme, jaké vlastnosti materiálu můžeme tisknout příčnou technologií. Dělení je následující:

- materiály na bázi fotopolymerů (příkladem technologie je Stereolitografie)
- materiály na bázi pevných struktur (příkladem technologie je FDM)
- materiály na bázi prášku (příkladem technologie je SLS) <sup>9</sup>

Tabulka 3 - Přehled procesů, technologií a materiálů k nim patřící <sup>9, 11</sup>

Typ výrobního procesu	Technologie	Materiál
Tryskání pojiva	3D tisk Ink-jetting S-print M-print	Kov Polymer Keramika
Řízená energetická depozice	Direct Metal Deposition Laser Deposition Laser Consolidation Electron Beam Direct Melting	Kov: prášek a drát
Vytlačování	Fused Deposition Modeling	Polymer Kompozit
Spékání	Selective Laser Sintering Selective Laser Melting Electron Beam Melting	Kov Polymer Keramika Kompozit
Tryskání materiálu	Polyject Ink-jetting Thermojet	Fotopolymer Vosk
Listová laminace	Ultrasonic Consolidation Laminated Object Manufacture	Hybridy Kov Keramika
Kádřová fotopolymerizace	Stereolithography Digital Light Processing	Fotopolymer Keramika

Dvě nejrozšířenější AM technologie v produkci polymerů a kompozitů jsou SLS (Selective Laser Sintering), FDM (Fused Deposition Modeling) a SLA (Stereolithography). Větší předpoklady pro rozšíření v odvětví průmyslu je metoda SLS a to díky přesnosti a komplexnosti vyrobených dílů a dobré mechanické pevnosti. <sup>12</sup>

## 2.1. Powder Bed Fusion

Powder Bed Fusion zkráceně PBF je proces, ve kterém se materiál ve formě prášku taví nebo spéká, aby vytvořil součást za použití laseru, elektronového paprsku nebo tepelný zdroj tepla jako zdroj energie. Všechny PBF systémy mají 3 zásadně důležité komponenty –

laserovou, respektive skenovací jednotku, která soustředí zdroj energie nutný ke spojení materiálu, stavební komoru s inertní atmosférou (dusík nebo argon), kde se součást tiskne a surovinu, která vyplňuje modelovací komoru. U technologie jako je SLS je ve stavební komoře udržována konstantní teplota. Teplota je vždy pod bodem tání vybraného druhu materiálu. Důvodem je spotřeba energie, snížení celkové doby tisku a také, aby se předcházelo deformaci součásti z důvodu nahromaděného napětí způsobené nerovnoměrnou tepelnou roztažností a kontrakcí. Naopak u technologie SLM teplota v komoře udržovaná není a je tam pouze přehřev substrátu. <sup>27</sup>

V první vrstvě je modelovací komora spuštěna do výchozí polohy ( $z = 0$ ) a je nanášena první vrstva práškového materiálu a pak dochází ke spékání, jako je tomu u technologie SLS. U technologie SLM dochází už v poloze jedna k tavení a navařování na substrát. V závislosti na technologii je na práškový materiál směřován zdroj tepla, aby se prášek spekl nebo stávil dohromady. Jakmile je první vrstva vytištěna, stavěcí komora je mírně snížena a válec nebo čepel dodává čerstvý prášek z podavače a proces se opakuje. <sup>27</sup>

Jelikož je surovina při tisku s termoplastickými prášky, jako jsou plasty, nylon, polyamid atd., v práškové formě, není třeba přidávat další podpůrnou strukturu pro podepření převisů, protože nepoužitý okolní prášek poskytuje podporu součásti. Tento princip neplatí při tisku kovovým práškem, jakým je například nerezová ocel, slitina titanu, kobalt, slitina niklu atd. A to z toho důvodu, že kovový prášek má vyšší hustotu než termoplastické prášky a samotný prášek by nedokázal udržet tisknutou součást ve statické poloze. Proto je nutné přidat podpůrné struktury, které zabrání, aby se součást zdeformovala svou vlastní vahou. <sup>27</sup>

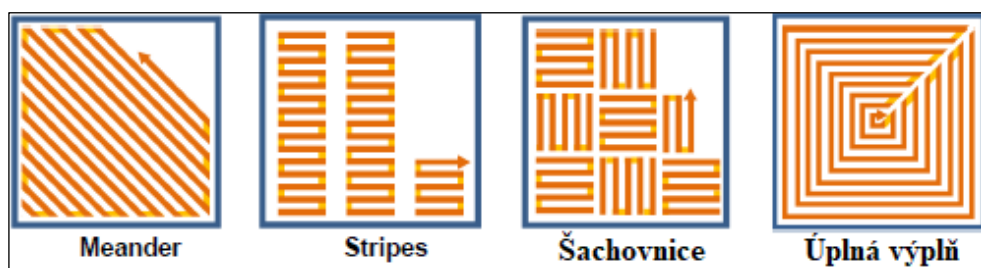
Podle využití zdroje energie zpravidla rozdělujeme 5 různých druhů metod PBF:

1. Selective laser melting (SLM)
2. Elektron beam melting (EBM)
3. Selective laser sintering (SLS)
4. Selective heat sintering (SHS)
5. Direct metal laser sintering (DMLS) <sup>27</sup>

### **2.1.1. SLM**

U technologie Selective Laser Melting je zdrojem energie vláknový laser a celý proces se provádí v komoře naplněné inertním plynem (obvykle argonem nebo dusíkem – dle reaktivity tisknutého atomizované kovové slitiny). Inertní plyn zajišťuje vyšší čistotu a homogenitu ve vyrobených částech, protože minimalizuje kyslík v komoře a tím snižuje zachycení vodíku na vytištěné součásti. Vláknový laser u technologie SLM pracuje obvykle o výkonu od 100-1000 W s různým průměrem bodu (tzv. spot size), v závislosti

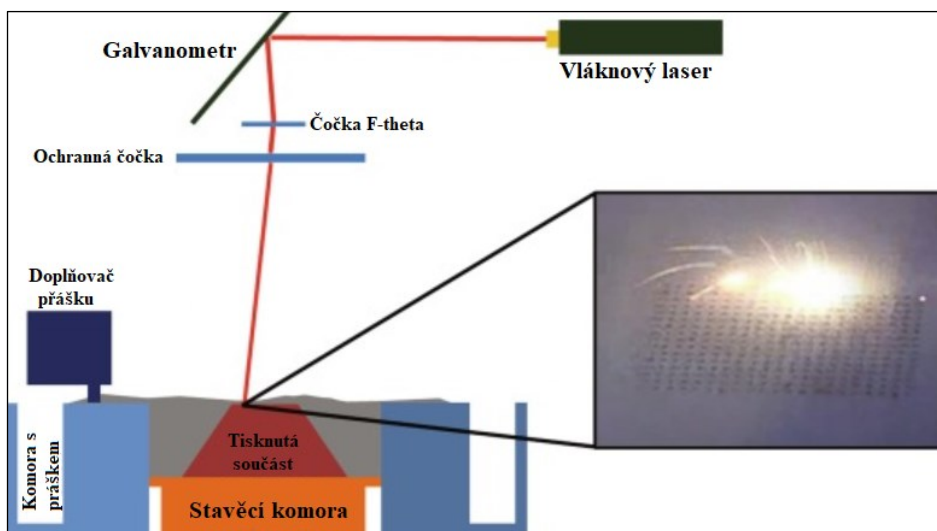
na laserovém modulu nainstalovaném v systému. Zaměření paprsku podél sestavy platformy a ostření paprsku řídí galvanometr a soustava zrcadel s optikou laseru. Prášková vrstva má obvykle 20-50  $\mu\text{m}$  a během procesu se rozprostírá na stavební platformě. Pak je použit laser k selektivnímu roztavení části práškové vrstvy na základě geometrie definované STL modelem, respektive jeho alternativou rozřezanou na jednotlivé vrstvy, které jsou následně exponovány. Při tavení laserem dochází k tzv. jevu nazývaném melt pool, kde dochází k roztavení i okolního materiálu, každá taková expozice vytvoří taveninu kovu, která se podobá 3D Gaussovy křivky. Postup, jakým je obvykle roztavena vrstva tisknuté součásti je dána strategií tisku. Musíme tedy brát v úvahu, že expozice je prováděna s ohledem na zvolený typ strategie (meander, stripes, šachovnice nebo úplná výplň), které jsou znázorněny na obrázku 3. Po dvou krocích tavícího procesu se nanese další vrstva prášku. Tento proces pokračuje, až do úplného vytisknutí požadované součásti. Po dokončení následují dokončovací operace (obrábění, omílání atd.).<sup>28, 46</sup>



Obrázek 3 - Typy strategií tisku technologií SLM<sup>46</sup>

Výhodami procesu SLM je, že umožňuje výrobu z velké řady tavitelných neželezných a železných kovů. Umožňuje velkovýrobu funkčních součástí vysoké kvality a složitosti. Nevýhodou procesu SLM je omezení tisknutých geometrií. Převlé geometrie vyžadují podpůrné struktury. Podpory zvyšují rozsah proveditelných geometrií, avšak prodlužují dobu výroby, zvyšují drsnost povrchu, ohrožuje funkčnost součásti, jestliže je odstranění omezeno přístupem. Dalším omezením je geometrie, která má nadměrnou odolnost proti přenosu tepla. To má za následek přehřátí během výroby.<sup>29, 30</sup>

V neposlední řadě je důležité zmínit bezpečnost, která by měla provázet každý takový proces. Nezbytnou součástí při přípravě stroje a při manipulaci s kovovým práškem jsou osobní ochranné pomůcky (gumové rukavice, respirátor, brýle), jelikož prášek může způsobovat iritaci kůže nebo očí. Při nechtěném vdechnutí dochází usazování práškového materiálu na plicích, proto je nutné dbát na prevenci a podstupovat alespoň jednou do roka funkční vyšetření plic. Dále je vhodné zmínit, že laboratoř musí mít antistatický povrch a odolnost proti rozpouštědlům, místnost musí být klimatizovaná na 18 - 22 °C a v případě požáru nesmí být prášek hašen stlačeným hasícím přístrojem ani vodou. Dále je každá laboratoř opatřena hlásičem úniku argonu. Při poklesu koncentrace kyslíku ve vzduchu pod 19,5 %, se automaticky spustí senzor signalizace.<sup>47</sup>

Obrázek 4 - Selective Laser Melting <sup>28</sup>

### 2.1.2. SLS

Selective Laser Sintering (SLS) je technologie, která využívá laser jako zdroj energie k spékání prášku vrstvu po vrstvě na požadovanou geometrii, tvar a okolní materiál slouží jako podpora. Nejprve dochází k nanesení vrstvy polymerního prášku, poté dochází k spékání neboli slinování prášku dle zdrojových dat. Pro vytvoření následující vrstvy se posuvná deska posune typicky 60 až 200  $\mu\text{m}$  v ose se směrem dolů a za pomoci tzv. recoateru s nanášecím nožem dochází k nanesení další vrstvy práškového materiálu. Tento proces se opakuje do vytvoření součásti. V poslední fázi může následovat post-processing (např. obrábění pro kompozity typu polyamidu s přídavkem hliníkové slitiny). <sup>6</sup>

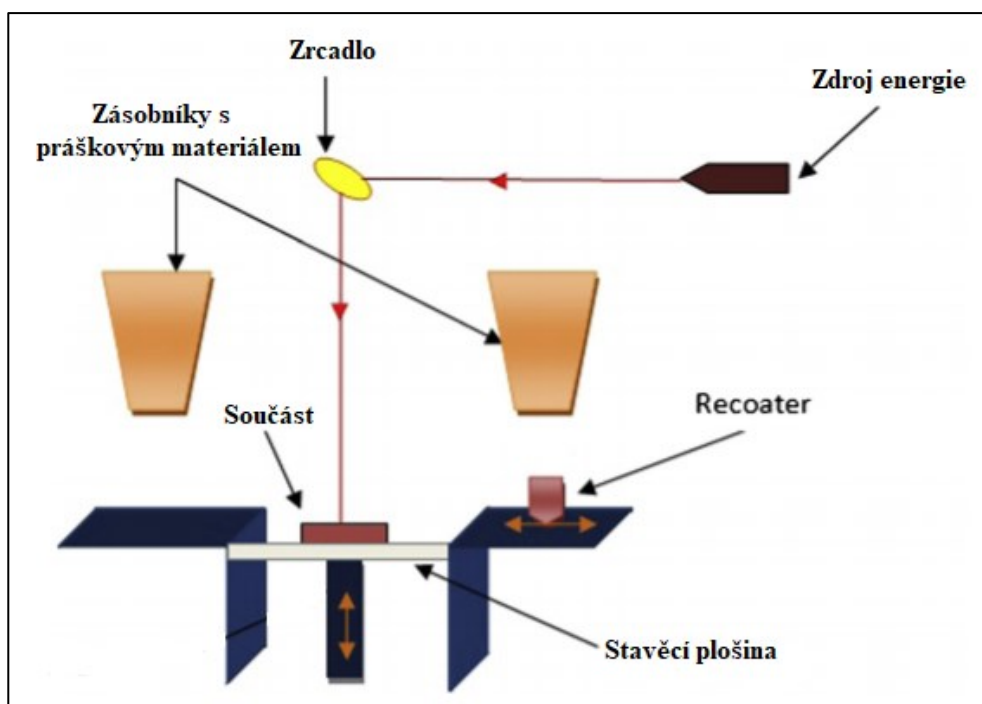
Metodou SLS lze také vyrábět několik typů kompozitních materiálů. Jedná se typicky o kombinaci PA11, PA12 se skelnými elementy, uhlíkovým mikro vláknem, hliníkovou slitinou. Dalšími používanými materiály jsou pak elastomery (např. TPU), nebo materiály pro výrobu jader forem pro odlévání. Velikost a struktura zrn je klíčovou podmínkou výsledných mechanických vlastností výrobků. Typické rozložení částic práškové frakce je mezi 60-180  $\mu\text{m}$ . Stroje s technologií SLS mají vyhřívanou komoru blízko teploty tavení tisknutého materiálu. Vyšší teplota ve stavební komoře způsobuje snížení tepelně indukovaného napětí, zkracuje dobu zpracování a redukuje zkreslení během tuhnutí vrstvy. <sup>32,33</sup>

Aplikace funkčních finálních dílů, které jsou více namáhané vyrobené technologií SLS jsou stále omezené, a to částečně z důvodu špatných mechanických vlastností. Součásti z polymeru tištěné technologií SLS vykazují nižší pevnost a kratší životnost, ve srovnání s díly polymeru, vyrobeného vstřikovacím litím. Vznikání napěťových mostů ovlivňuje nejen distribuci částic, ale i parametry jako je tloušťka vrstvy, rychlost skenování, výkon

laseru nebo teplota. Dalším negativním jevem, který ovlivňuje výsledné vlastnosti výrobku je vznik póru mezi jednotlivými slinutými částicemi. Ty mají za následek snížení mechanických vlastností výrobku. <sup>6, 31</sup>

Pro slinutí práškového materiálu je využito CO<sub>2</sub> laseru k natavení tenkých vrstev. Zadané parametry jako je například výkon laseru, výška vrstvy, typ expozice ovlivňují výsledné rozlišení výtisku. <sup>6</sup>

Technologii lze uplatnit v sériové i kusové výrobě a lze jí docílit velmi dobré produktivity. S větší složitostí součásti obvykle stoupá i ekonomická efektivita využití aditivní výroby. Využívá se v oblastech jako je automobilový průmysl, letecký průmysl, vojenský průmysl, biomedicína a architektura. Je několik odvětví průmyslu, která tento proces využívají k tisknutí prototypů pro testování. Dalšími nezbytnými výhodami je nízká pořizovací cena materiálu a možnost použití přebytečného prášku pro další součást. <sup>6, 27</sup>



Obrázek 5 - Selective Laser Sintering <sup>31</sup>

### 3. Materiály využívané v aditivní výrobě

Mezi základní typy materiálů používané ve výrobě jsou kovy, polymery, keramika a kompozity. Dalšími materiály, s kterými aditivní výroba dokáže pracovat, jsou například dřevo, papír a pískovec. Sekundární neboli podpůrné materiály můžeme pro tisk použít PVA a vosk. Do speciální skupiny materiálů můžeme zařadit karbonové a grafénové materiály, tkaniny, ale i cukr a čokoláda. Důležité je zvolit vhodnou formu materiálu, které máme práškové, strunové, plátové anebo tekuté. Daný typ a formu materiálu volíme dle použité technologie a výsledným vlastnostem, které od výsledné součásti očekáváme. <sup>16</sup>

Následující tabulka uvádí některé typy komerčních materiálů používané v aditivní výrobě a možnosti využití v daných technologiích. <sup>16</sup>

Tabulka 4 - Přehled metod a jejich využití v technologiích aditivní výroby. <sup>16</sup>

	Amorní	Semi-krytalický	Termoset	Vytlačování materiálu	Vat polymerization	Material jetting	Powder bed fusion	Binder jetting	Sheet lamination	Directed energy deposition
ABS [Acrylonitrile Butadiene Styrene]	X			X						
Polycarbonate	X			X						
PC/ABS Blend	X			X						
PLA [Polylactic Acid]	X			X						
Polyetherimid (PEI)	X			X						
Acrylics			X		X	X				
Acrylates			X		X	X				
Epoxies			X		X	X				
Polyamide (Nylon) 11 and 12		X					X			
Čistý		X					X			
Se sklem		X					X			
S uhlíkem		X					X			
S hliníkem		X					X			
Plněno polymerem	X	X		X						
Polystyren	X						X			
Polypropylen		X					X			
Polyester ("Flex")							X			
Polyetheretherkeyton (PEEK)		X		X			X			
Thermoplastic polyurethan (Elastomer)				X			X			
Čokoláda		X		X						
Papír									X	
Slitina hliníku							X	X	X	X
Co-Cr slitina							X	X		X
Zlato							X			
Slitina niklu							X	X		X
Stříbro							X			
Nerezová ocel							X	X	X	X
Titan							X	X	X	X
Ti-6Al-4V							X	X	X	X
Nástrojová ocel							X	X		X

#### 3.1. Kovy

Charakteristické vlastnosti kovů a jejich slitin jsou pevnost, odolnost, vysoká tepelná a elektrická vodivost. Jejich využitelnost v průmyslu je stále vysoká, a proto se tisk kovových slitin dostává do většího popředí s rostoucí kvalitou aditivních technologií.

Nejčastějším zpracovávaným materiálem technologií SLM a EBM je kovová slitina, která je běžně používaná v průmyslu. Jako pojivo se v některých technologiích používá polymer. Ten je po dokončení zcela odstraněn.<sup>16</sup>

Zvolený výrobní postup výroby kovových prášků rozhoduje o výsledných vlastnostech prášku jako je morfologie částic, chemické složení nebo velikost částic. Pro výrobu se nejčastěji používají zavedené metody, jako je atomizace vodou, plazmou nebo plynem. Zejména v oblasti slitin titanu jsou levné elektrolytické, metalotermické (TIRO) a hybrid-dehydridové procesy. Zvolenou správnou metodou je důležité docílit relativně vysoké hustoty, dobých homogenních a tokových vlastností. Pokud se jedná o úspěšnou zpracovatelnost prášků pro tisk, je pro jejich nastávající fúzi nutné, aby měly potřebné parametry jako je svařitelnost, obrobitelnost nebo parametry pro odlévání.<sup>16, 17</sup>

Mezi nejpoužívanějších materiály patří nerezová ocel (316L, 17-4HP), vysokopevnostní ocel, titan a jeho slitiny (Ti-6Al-4V), slitiny Al-Si-10Mg a Co-Cr-Mo, superslitiny na bázi niklu (Inconel 718, Inconel 625) atp.<sup>16</sup>

Během zpracování ocelí je důležitá kontrola teploty chlazení. Ta ovlivňuje výsledné mikrostruktury oceli. A to na jedné straně nabízí alotropie slitin kombinací s vysokoteplotním gradientem potenciál vytvořit jedinečné mikrostruktury. Na druhé straně oceli s různým fázovým složením s návaznosti na rychlosti chlazení.<sup>17</sup>

Zpracování dílů z hliníkových slitin, je oproti těm z titanu, poměrně omezené. A to z důvodu např. špatné svařitelnosti. Některé slitiny obsahují nestálé prvky jako je zinek, a to pak vede např. k pórovitosti nebo enormnímu tavení a takové slitiny jsou pro aditivní technologie prozatím nepoužitelné.<sup>17</sup>

Titan a jeho slitiny jsou díky svým vlastnostem jako je teplotní stabilita, různorodost slitin, alotropie mikrostruktur a vysoké teplotní stálosti jsou nejvíce využívané kovy pro aditivní technologie v průmyslovém odvětví.<sup>17</sup>

### 3.2. Keramika

Kombinace zpracování keramických materiálů v oblasti 3D tisku, ale i u klasických metod je vysoká teplota tání a nízká houževnatost, proto je keramika nejčastěji v práškovém skupenství s pomocí pojiva sintrována. Tisknuté keramické součásti jsou vždy s póry, tudíž nelze dosáhnout 100 % hustoty výtisku.<sup>16</sup>

Zástupcem nejčastějších keramických materiálů jsou aluminy, které zpracováváme ve formě prášku technologií DED a PBF. U listové laminace se používají materiály jako nitrid a karbid křemíku a kombinace aluminy a zirkonia. Tyto materiály se ve formě jemných keramických částic míchají do stereolitografické pryskyřice, která slouží jako pojivo. Takto



je připravená směs pro technologii SLA, kde je důležité při míchání suspenze, aby se nesesedimentovala a částice byly co nejmenší. <sup>16</sup>

### 3.3. Polymery

Polymery lze klasicky rozdělit na termoplasty a termosety. Rozdělení polymerních materiálů je založené na jejich struktuře, od které se odvozují i jejich vlastnosti. Z velké části se jedná o materiály syntetického původu. <sup>16</sup>

#### 3.3.1. Termoplasty

Pro většinu procesů aditivní výroby využíváme termoplasty, které lze opakovaně používat, jelikož nedochází k vytváření příčných vazeb mezi jednotlivými řetězci. Termoplasty se dále rozdělují na amorfnní a semikrystalické. Skupina amorfnních termoplastů nachází uplatnění u metody MEAM, zatímco semikrystalické termoplasty využíváme spíše u technologií typu PBF. <sup>16</sup>

Pro vytlačování materiálu jsou výhodné amorfnní termoplasty, a to díky jejich tavným vlastnostem. Nejpoužívanějšími zástupci materiálů je ABS a PLA, jak je uvedeno v tabulce 4. Mezi jednotlivými vrstvami extrudovaného materiálu jsou obvykle mezery. V tomto důsledku mohou být mechanické vlastnosti a anizotropické účinky špatné. <sup>16</sup>

Termoplasty pro fúzi s práškovým ložem využívá IR laser (obvykle 10  $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> laser) nebo IR či UV zdroje tepla pro tavení a fúzi semikrystalického prášku. Nejpoužívanější semikrystalický materiál je polyamid 12 neboli nylon. K rekrystalizaci nakonec dochází rovnoměrně po dokončení, aby se minimalizovala tvorba zbytkového napětí. <sup>16</sup>

#### 3.3.2. Termosety

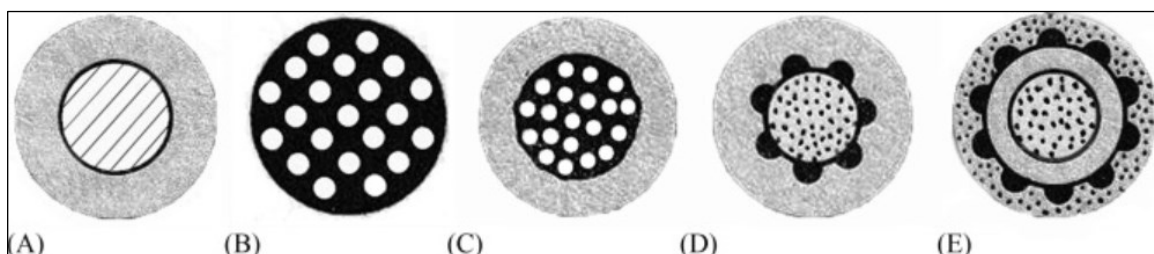
Termosety jsou zcela nerecyklovatelné, a to kvůli nutnému vytvrzování pro dosažení požadovaných vlastností. K vytvrzování dochází k vytvoření příčných vazeb mezi jednotlivými polymerními řetězci. Aditivní technologie dokážou využívat termosety v široké škále, a to jako základní stavební materiál, pojivo či jako antioxidant. Mechanické vlastnosti termosetů je, že mají značnou variabilitu v tahu a vykazují anizotropii. Tato anizotropie vykazuje dobré výsledky v rovnoběžném směru sestavení (orientace Z). Naopak špatné anizotropické vlastnosti vykazuje tisk ve směru mezi 40° až 60° podél směru XZ.

Výraznější vliv na vlastnosti má smyk podél konstrukční roviny než napětí kolmé na konstrukční rovinu. <sup>16</sup>

### 3.4. Kompozity

Kompozitní materiál je složený ze dvou nebo více materiálů odlišných vlastností, které jsou fyzicky oddělené. Dvě základní složky kompozitu jsou matrice a pojivo. Matrice slouží pro zajištění stálosti tvaru výrobku a rovnoměrnému rozdělování pojiva. Pojivo se přidává kvůli zvýšení mechanických vlastností nebo z důvodu snížení ceny výrobku. Kombinací jednotlivých materiálů dochází ke kombinaci a vylepšování jejich vlastností nebo to může vést ke vzniku úplně nových vlastností, které kovy, keramika ani polymery nedokážou. Je možné vytvořit kompozity, které budou odolné, pevné, a zároveň lehké. Nevýhodou je jejich vysoká cena, nákladná a zdlouhavá výroba a možnost chemické degradace výrobků. Rozdělení kompozitních materiálů spočívá na primárním druhu materiálu, a to na kovové, keramické a polymerní. Jejich sekundárním materiálem, který se považuje za posilující složku může být kov, keramika, polymer, sklo anebo prvek jako uhlík, bór. Mezi primárním a sekundárním materiálem je velmi silná adheze, ale nejsou rozpustné jedna složka ve druhé. Pro správnou kombinaci materiálů musí být ve stejné formě, a to například prášek, vločky, vlákna. <sup>16, 18</sup>

Způsoby výroby kompozitních prášků jsou rozděleny na dvě skupiny. První skupinou je přímá výroba neboli primární metoda. Druhou skupinou je modifikace stávajících prášků, tu můžeme zařadit do odvozené metody. Způsob první skupiny (obrázek 6A) skýtá tvorbu práškových částic v průběhu procesu (mechanické legování, atomizace, redukce oxidů a solí atd.) Druhá skupina (obrázek 6B) je překrývání částic. U zbývajících třech skupin se jedná o kombinaci dvou předchozích způsobů. Skupinu nazýváme hybridní struktury (obrázek 6C, D, E). <sup>34</sup>



Obrázek 6 - Struktury částic kompozitních prášků. <sup>34</sup>

### 3.4.1. Polymerní kompozity

Polymerní kompozity mají své nezastupitelné místo v průmyslové oblasti a jen zřídka je jde nahradit. Zejména je to díky svým vlastnostem jako je nízký bod tání, nízká cena, hmotnost a vysoká flexibilita. Dosažením geometrické komplexity při zachování funkčnosti a mechanických vlastností je dosaženo spojení více materiálů, tj. vytvoření polymerního kompozitu.<sup>16,19</sup>

Varianta, jak využít polymer pro výrobu kompozitu, je více. Jednou z možností je distribuce částic materiálu uvnitř polymeru matrice. Tato varianta je výhodná z hlediska nízké ceny polymeru a snadné distribuce částic. Používáme pro technologie SLA, SLS, MEAM. Částice volíme dle požadovaných výsledných vlastností a cílové aplikace. Pro zvýšení odolnosti proti opotřebení použijeme hliníkové slitiny a oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ ). Pro zvýšení modulu použijeme železné, skleněné nebo měděné částice. Částice mohou být v různých tvarech například kulovité, válcové, krychlové. Další použití kompozitu je z důvodu zlepšení tiskových vlastností, například přídavek železa vylučuje zborcení vytisknuté součásti. Kombinací železnatých a mědnatých částic společně s akrylobutadienstyrenem se snižuje koeficient délkové teplotní roztažnosti.<sup>16,19</sup>

Další formou plniva používanou při zpracování polymerních kompozitu jsou vlákna. Metoda využívaná k tomuto principu extruze materiálu je nejčastěji FDM. Nevýhodou je, že před nanášením na podložku dochází k mísení polymeru s vláknem a tato směs je teprve dávkována do extrudéru. Problematika nastává v mísení prášku nejčastěji u sekaného vlákna (sklo, uhlík). Výsledné vlastnosti ovlivňuje orientace vláken uvnitř struktury. Namáhání ve směru vláken je dosaženo maximálních mechanických vlastností. Pro technologii FDM je nutné dodržet stupeň plnění (40 hm %) pro správnou extruzi materiálu, při vyšší hodnotě směsi dochází k ucpávání extrudéru.<sup>16,19</sup>

### 3.4.2. Kompozit na bázi polyamidu 12

Termoplast na bázi polyamidu 12 je zdaleka nejpoužívanějším materiálem vyrobeným technologií SLS, který tvoří více než 95 % vyrobených součástí. A to díky kombinaci snadné zpracovatelnosti s relativně nízkými náklady. Z mechanického hlediska ve srovnání se vstřikováním je jejich nevýhoda v prodloužení při přetržení, avšak pevnost v tahu a modul pružnosti je srovnatelně kvalitní.<sup>9,23</sup>

Ve srovnání s jinými termoplasty a polyamidy má materiál PA12 velmi dobrou houževnatost, odolnost proti únavě a vysokou chemickou odolnost. Tyto mechanické vlastnosti, zlepšení práškových materiálů a optimalizace procesu SLS vedly k použití

v biomedicinském, automobilovém a leteckém průmyslu. Materiály založené na PA11 jsou levnější, avšak méně kvalitní alternativa.<sup>9,23</sup>

PA12 je semi-krystalický polymer, který s rostoucí teplotou nad skelný přechod neměkne. A to v důsledku existence krystalové části, která zabraňuje amorfním částem v pohybu. Po zahřátí na teplotu tání dojde ke zkapalnění krystalů do roztaveného stavu s nízkou viskozitou taveniny, proto má polymer vysokou rychlost sintrování a vytištěné části mohou dosáhnout vysoké hustoty.<sup>35</sup>

S cílem vyvinout materiály pro funkční prototypy a rychlé výrobní aplikace byly vyvíjeny kompozity na bázi polyamidu 12 s různými sekundárními složkami, těmi mohou být skleněné kuličky, nanočástice aluminy, vločky z hliníkových slitin, uhlíkové nasekané mikro vlákno atd. Tyto sekundární složky poskytují významná zlepšení, pokud jde o tuhost, pevnost a tepelnou stabilitu na úkor snížení pružnosti a prodloužení při přetržení. Vhodnou impregnací lze docílit vodotěsného povrchu.<sup>9</sup>

Kompozitní materiál s označením ALM PA 640 GSL, který se skládá z polyamidu 12 a lehkých skleněných dutých mikrokuliček nebo uhlíková vlákna má stejné vlastnosti jako plnivo sklem, ale se sníženou hmotností. Základními vlastnostmi materiálu jsou: hustota vyrobeného dílu je  $0,82\text{g/cm}^3$ , konečná pevnost v tahu v ose XY je 49MPa a v ose Z 33MPa, modul pevnosti v ohybu XY je 5,04MPa a v ose Z 4,313MPa. Materiál je zejména vhodný v SLS technologii pro součástky pro letectví, automobily a kosmonautiku, sportovní vybavení a v případech, kde je vyžadující rovnováha síly a nízké hmotnosti beze změny velikosti součástí.<sup>44,45</sup>



**Obrázek 7 - Vytištěné vozidlo společnosti Sabic. Z části použitý materiál PA640 GLS.<sup>44</sup>**

Na trhu jsou dva materiály PA12 od dvou výrobců. První je pod názvem Duraform PA12 od společnosti 3D Systems a druhý PA2200 od společnosti EOS. Oba produkty jsou založeny na stejném základním prášku PA12 Vestosint. Tabulka 5 přináší srovnání skupiny materiálů PA12 s různými plnivy i bez nich, a i další alternativy jako je PA6, PA11, PEEK

atd. Odpovídající mechanické vlastnosti jsou založeny na technických informacích poskytnutými dodavatelem materiálu.<sup>9</sup>

Tabulka 5 - Srovnání práškových materiálů používaných pro technologie SLS<sup>9</sup>

Výrobní jméno	Dodavatel	Polymer	Plnivo	E [MPa]	$\sigma_B$ [MPa]	$\epsilon_B$ [%]
Duraform PA	3D Systems	PA-12	Bez plniva	1586	43	14
NyTek 1200 PA	Stratasys	PA-12	Bez plniva	1700	46	15
PA 2201	EOS	PA-12	Bez plniva	1700	48	15
PA 650	ALM	PA-12	Bez plniva	1700	48	24
Duraform GF	3D Systems	PA-12	Skleněné kuličky	4068	26	1,4
NyTek 1200 GF	Stratasys	PA-12	Sklo	3585	44	3
PA 615 - GS	ALM	PA-12	Sklo	4100	31	1,6
PA 616 - GS	ALM	PA-12	Sklo	4100	31	1,45
PA 3200 GF	EOS	PA-12	Skleněné kuličky	3200	51	9
Carbon Mide	EOS	PA-12	Karbonové vlákno	6100	72	4,1
NyTek 1200 CF	Stratasys	PA-12	Karbon	3654	60	5,7
NyTek 1100	Stratasys	PA – 11	Bez plniva	1647	47	21
PA 1101	EOS	PA – 11	Bez plniva	1600	48	45
PA – 850 NAT	ALM	PA – 11	Bez plniva	1517	48	47
Sinterline Glassfilled	Solvay	PA – 6	Skleněné kuličky	6300	-	-
PEEK – HP3	EOS	PEEK	Bez plniva	4250	90	2,8
Prime Part ST PEBA 2301	EOS	TPE	Bez plniva	75	8	200
Cast Form PS	3D Systems	PS	Bez plniva	1604	2,84	-
Prime Cast 101	EOS	PS	Bez plniva	1600	5,5	0,4

E – Youngův modul;  $\sigma_B$  – Pevnost v tahu;  $\epsilon_B$  – Prodloužení při přetržení

### 3.4.3. Keramické kompozity

Využití keramických kompozitů zpracovaných aditivními technologiemi je zejména v oblasti biomedicíny. Technologie, která nejčastěji zpracovává keramické kompozity je SLS a materiál je dodáván ve formě prášku. Výhodou takto zpracovaných součástí v medicíně je zvládnutí i velmi složitých geometrických tvarů a složitých struktur pro vytvoření scafolldů, tedy struktury pro vyplnění mezibuněčných prostor.<sup>16, 20, 21</sup>

Pro širokou škálu strojírenských aplikací se využívá keramika s křemíkem (Si-SiC). Tento materiál vykazuje vynikající mechanické vlastnosti v kombinaci s vysokou chemickou stabilitou za vysokých teplot. Keramika s objemovým podílem křemíku 10 až 15 % vykazuje pevnost v ohybu 350 MPa, lomovou houževnatost  $4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , Youngův modul 350 GPa. Kvůli snadné kontrole hustoty výrobku během zpracování musí být keramika ve formě prášku, z tohoto důvodu nemůžeme zpracovávat suspenze, kde je součástí UV vytvrditelný polymer.<sup>20, 21</sup>

### 3.4.4. Kovové kompozity

Kompozity s kovovou maticí jsou zpracovávány ve formě prášku, vlákna nebo laminátu. U kompozitu ve formě prášku dochází ke spojení s kapalnou složkou (polymer), aby se navázal materiál matrice a sekundární materiál a poté následuje sintrování, kde je matrice odstraněna a zůstane pouze čistý kov. Výjimkou může být kompozit typu WC-Co/Cu, kde částice karbidu wolframu jsou rozpouštěny v kobaltu. Jako posilující aditivum se používá měď nebo bronz. Další přísadou, kterou je možné použít ke snížení povrchového napětí, pro kontrolu růstu zrna, úpravu koeficientu tepelné roztažnosti, či zlepšení spékání, je oxid lanthanitý.<sup>16</sup>

Abychom zabránili reziduálním napětí a rozpadu atomů, můžeme použít ultrazvuk pro vytvoření kompozitních struktur v pevném stavu. Zajistíme tak vytvoření složitých 3D struktur s komplexní geometrií a vysokou přesností, a to díky použití nízkých teplot tavení, které se pohybují cca na polovině teploty tání kovu. Protože tato technika nedosahuje vysokých teplot, nedochází ani k žádným rozměrovým chybám v důsledku smrštění nebo zbytkových napětí z chlazení. Lze využít kovové fólie nebo kovové vlákno do kovové matrice. Zásadní je správný návrh složení kompozitu, aby se zabránilo defektům, které nakonec ovlivňují mechanické výhody spojené s touto technologií.<sup>16</sup>

## 4. Aplikace 3D tisku

Teoreticky lze aditivní výrobu aplikovat v jakékoli oblasti, ovšem ne vždy je 3D technologie vhodné použít. Důvodem mohou být některé technické nedostatky nebo výsledná cena. V této kapitole budou přestaveny oblasti, ve kterých se 3D tisk používá, anebo kde má potenciál do budoucnosti.<sup>27, 36</sup>

### 4.1. Průmyslová aplikace

Aditivní výroba se v průmyslovém odvětví používá zejména na prototypování, ale v poslední době se dostává do popředí i ve výrobě. Jako součást procesu návrhu je v automobilovém a leteckém průmyslu 3D tisk už samozřejmostí. To umožňuje konstruktérům urychlení procesu. U automobilů se v poslední době využívá tištění 3D dílů pro komponenty jako jsou například sestavy přístrojových desek nebo ozdobné prvky. 3D tiskárny jsou užitečné i pro restaurátory starých vozů. Ti vyrábí skutečně přizpůsobené díly na automobily, které už nejsou k dostání.<sup>27, 37</sup>

Další hojně využívanou oblastí je letecký průmysl. A to kvůli mnoha výhodám v nákladech, rychlosti, přesnosti a úsporu hmotnosti. Jako příklad lze uvést letadlo s označením A350 XWB. Letadlo má přes tisíc vytištěných částí jako jsou rámy sedadel, opěrky rukou, podpěry křídel atd. Na obrázku 9 je znázorněn držák Airbusu 350 XWB, kde jeden je vyroben klasickými technologiemi a spodní aditivními technologiemi. Snížení výsledné váhy letadla mělo dopad na úsporu paliva a zmenšení uhlíkové stopy.<sup>37</sup>



Obrázek 8 - Držák křídla A350 XWB.<sup>38</sup>

## 4.2. Aplikace v medicíně

Jednou s nejvíce rozvinutých oblastí je medicína. Aditivní výroba dokáže vyrábět tvarově složité součásti s dostatečně dobrými mechanickými vlastnostmi a z různých materiálů, a to přímo na míru dle požadavku a potřeb lékaře. Existuje celá řada aplikací aditivní technologie pro výrobu biomedicínských produktů, jako jsou tkáně, orgány, umělá kůže, léky.<sup>27, 39</sup>

Použitím aditivních technologií pro tisk autologních orgánů, eliminuje čekání na správného dárce nebo použití imunosupresivních léků. Další výhodou je potencionální ukončení nezákonného trhu s lidskými orgány. Nejběžnějšími orgány tisknuté na 3D tiskárně jsou srdeční chlopně, játra, páteře a uši, které byli poškozené infekcí, při nehodě nebo vrozenými vadami.<sup>40</sup>

Využití 3D snímků umožňuje výrobu identických kostních náhrad. Tím dochází ke zvýšení pohodlí pacienta a zamezuje riziku dodatečných úprav, jako je tomu u běžně používaných metod výroby. Důležitým aspektem je správně zvolit materiál, který musí splňovat požadavky jakými jsou biokompatibilita a bioinertnost.<sup>9</sup>

Další využití mají aditivních technologie v medicíně, a to pro výrobu nástrojů a pomůcek pro lékaře. Jeden z úspěšných prototypů můžeme vidět na obrázku 9. Jedná se o neurochirurgickou pomůcku tištěnou z polyamidu 12 pro odstranění nádoru na mozku. Pomůcka je přímo vytištěná na míru pacienta a usnadňuje lékaři průběh operace. Tato pomůcka se dá aplikovat i na kloubní části člověka, například při vrtání kolene, kyčle apod.<sup>9</sup>



Obrázek 9 - Neurochirurgická pomůcka vytištěná technologií SLS z materiálu P12.<sup>9</sup>



### 4.3. Aplikace ve stavebnictví

První myšlenkou použití 3D tisku ve stavebnictví je tisk betonu. Technologie byla pojmenována 3D Concrete Printing. Tento inovativní způsob konstrukce se ukázal jako výhodný z hlediska optimalizace doby výstav, flexibility designu, nákladů a v neposlední řadě z ekologického hlediska. Beton, který vytéká z tiskové trysky se vrství na sebe ve 2D vrstvách, jejichž opakování vytvoří 3D objekt. Pro tisk není třeba žádného bednění nebo následných vibrací. Na obrázku 10 je dosud největší vytisknutá budova, která se nachází v Dubaji.<sup>41, 42</sup>



Obrázek 10 - Vytisknutá budova v Dubaji společností Apis-cor.<sup>42</sup>

Obrovskou výhodou této technologie je výstavba v odlehlých nebo nebezpečných oblastech a neomezená geometrická svoboda. Optimálním stavebním materiálem se jeví portlandský cementový beton. Beton má optimální vlastnosti při tečení i při vytvrzování a také má širokou škálu sekundárních zlepšujících přísad, které rozšiřují škálu jeho použití.<sup>43</sup>

## **5. Návrh metodiky experimentálních prací**

1. Příprava a tisk vzorků
2. Zařízení TESTOMETRIC M500-50CT
3. Stanovení tahových vlastností
4. Experimentálně zjištěné hodnoty tahové zkoušky
5. Vyhodnocení experimentu

## 6. Provedení experimentálních prací

### 6.1. Příprava a tisk vzorků

Pro experimentální část bylo připraveno 15 plochých zkušebních vzorků z materiálu ALM PA 640 GSL se skleněnými kuličkami, pro potřeby srovnání základních mechanických vlastností. CAD data byla zpracována v programu Solid EDGE od společnosti Siemens. Rozměry vzorků jsou znázorněny na obrázku 12.

Následoval import do programu Materialise Magics, kde byly nastaveny tiskové parametry a rozmístění vzorků v 3D tiskárně.

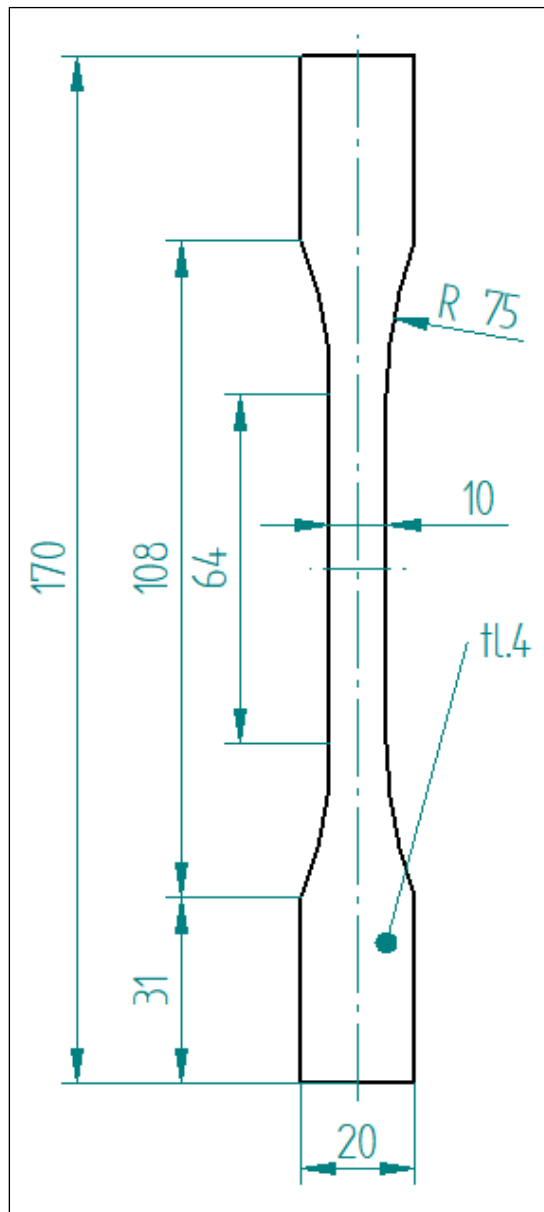
Vzorky byly tisknuty technologií SLS na přístroji EOS P396 s výškou vrstvy 120  $\mu\text{m}$ . Přístroj se nachází v centru aditivní výroby na VŠB-TUO Ostrava v ProtoLabu.



Obrázek 11 - Tiskárna EOS P396.

Šířka a tloušťka je u jednotlivých vzorků proměnlivá, a to mohlo zapříčinit více faktorů.

- Poměr nového a použitého prášku,
- Poloha v komoře (nanášení vrstev),
- Nastavení koeficientu smrštění (tepelná roztažnost plastů).

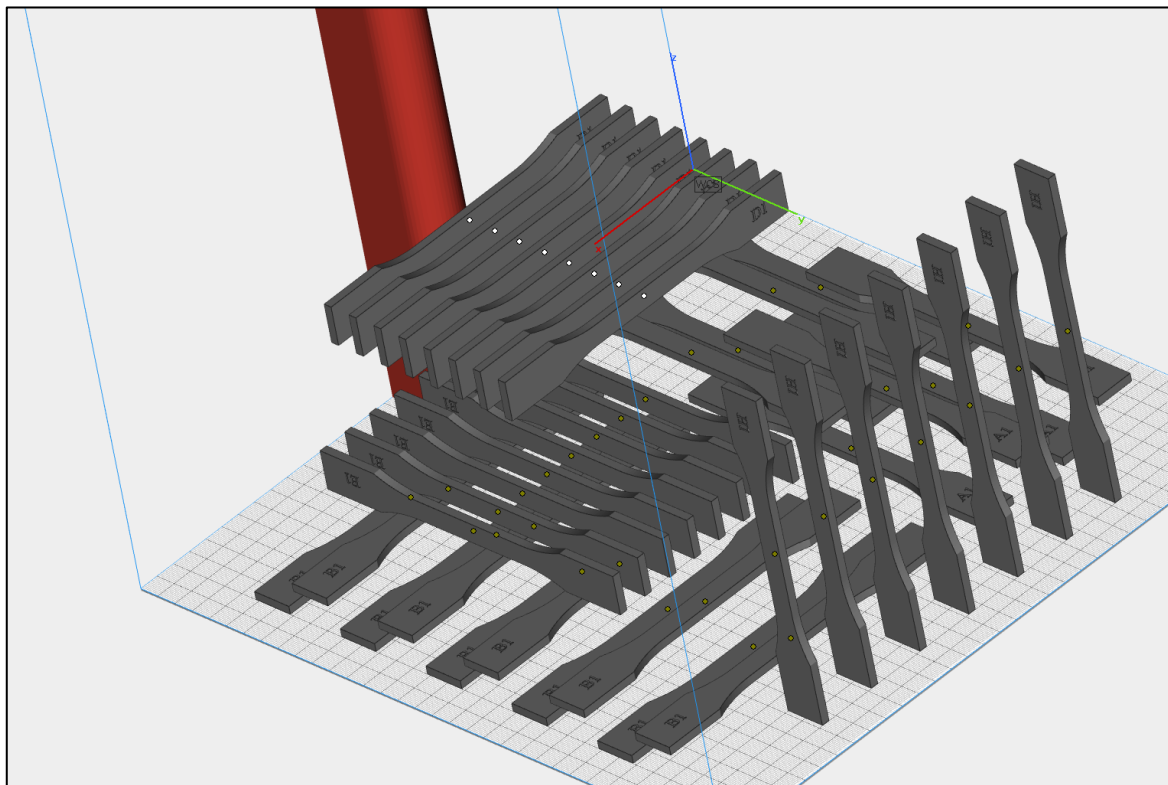


Obrázek 12 – Rozměry plochého testovacího vzorku

Některé podmínky při tisku mohly také ovlivnit výsledné rozměry vzorků. Podmínky, za jakých byly tištěny testovací vzorky, jsou následující:

- 40 % vlhkost prášku (doporučeno výrobcem),
- Teplota v procesní komoře - 175 °C,
- Výška vrstvy – 120  $\mu\text{m}$ ,
- Výkon laseru a typ expozice vrstvy, respektive vzorku (zvolen byl výchozí standart firmy EOS).
- Řízené chladnutí pod ochrannou atmosférou dusíku po krocích o cca 0,5 °C za 1 minutu.

Vzorky byly rozděleny kvůli přehlednosti do 5 skupin po 3 vzorcích. Jednotlivé skupiny se od sebe liší polohou v 3D tiskárně. Vzorky jsou tisknuty v různých osách a každá skupina je dále odlišena jiným natočením v komoře, jinými slovy, na které ploše vzorek leží. Na obrázku 13 je znázorněno rozmístění vzorků v tiskové komoře. Rozdělení vzorků do jednotlivých skupin je znázorněno v tabulce 6.



Obrázek 13 - Rozmístění vzorků v tiskové komoře.

Tabulka 6 – Rozdělení vzorků do skupin

Skupina vzorků	Orientace při tisku v ose	Plocha vzorku
A1	V ose Y	Spodní
B1	V ose X	Spodní
D1	V ose X	Boční
E1	V ose Y	Boční
H1	V ose Z	Hlavy

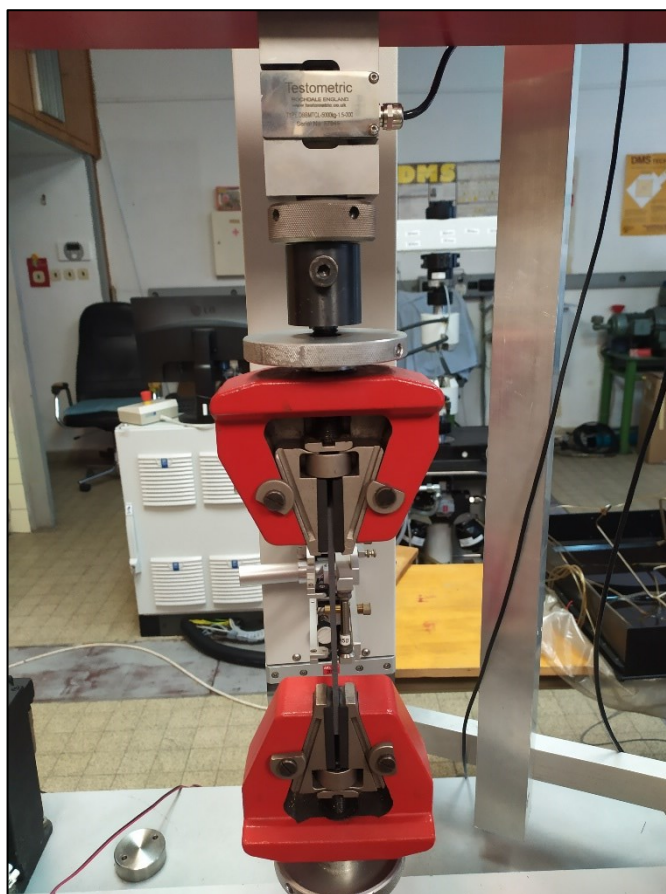
## 6.2. Zařízení TESTOMETRIC M500-50CT

Zařízení Testometric M500-50CT je univerzální zkušební stroj pro zkoušky materiálů. V našem případě se jednalo o zkoušku v tahu. Mez pevnosti v tahu je základní materiálovou charakteristikou zkoumaného kompozitního materiálu.

Měření probíhalo na FS VSB-TUO a třída přesnosti stroje je dle normy ISO 7500. Základními parametry stroje jsou:

Tabulka 7 – Parametry zařízení TESTOMETRIC M500-50CT

<b>Šířka pracovního prostoru</b>	420 mm
<b>Výška pracovního prostoru</b>	950 mm
<b>Maximální možné zatížení</b>	50 kN
<b>Měřicí rozsah</b>	0,4 % - 100 % (jmenovité hodnoty siloměru)
<b>Rychlost posuvu</b>	0,00001 – 1000 mm/min



Obrázek 14 - Zařízení TESTOMETRIC M500-50CT.



### 6.3. Stanovení tahových vlastností

Tahová zkouška byla provedena na trhacím stroji TESTOMETRIC M500-50CT. Součástí testu byl software WinTest Analysis a poloautomatický extenzometr k měření podélného prodloužení se vzdáleností hrotů 25 mm. Tahové zkoušky probíhaly v režimu konstantní rychlosti deformace. Rychlost příčnicku byl 1mm/min.

Před zahájením testu byly do softwaru WinTest Analysis, pro snímání pevnosti a tažnosti zadány rozměry vzorku (šířka, tloušťka a délka) v milimetrech, a poté se vzorek upnul mezi čelisti přístroje. Upínání probíhalo vždy číselným označením na vzorku do horní čelisti. Pro vzorky byly použity hydraulické čelisti se zoubky a upínací šířka byla 2,3 mm. Maximální možné zatížení bylo 50 kN. Přístroj byl nastaven na ukončení zkoušky, až do úplného přetržení vzorku. Výsledkem těchto měření byl soubor číselných dat a grafů tahových křivek k jednotlivým vzorkům, ze kterých byla následně zpracována tabulka výsledných dat v softwaru Microsoft Excel, se kterými se dále pracovalo.

Klimatické podmínky, za kterých probíhaly experimenty v laboratoři, byly zjištěny přístrojem Elcometr 319 (tabulka 8). Zkoušky byly realizovány dle normy ISO 527-1.

Tabulka 8 – Klimatické podmínky v laboratoři

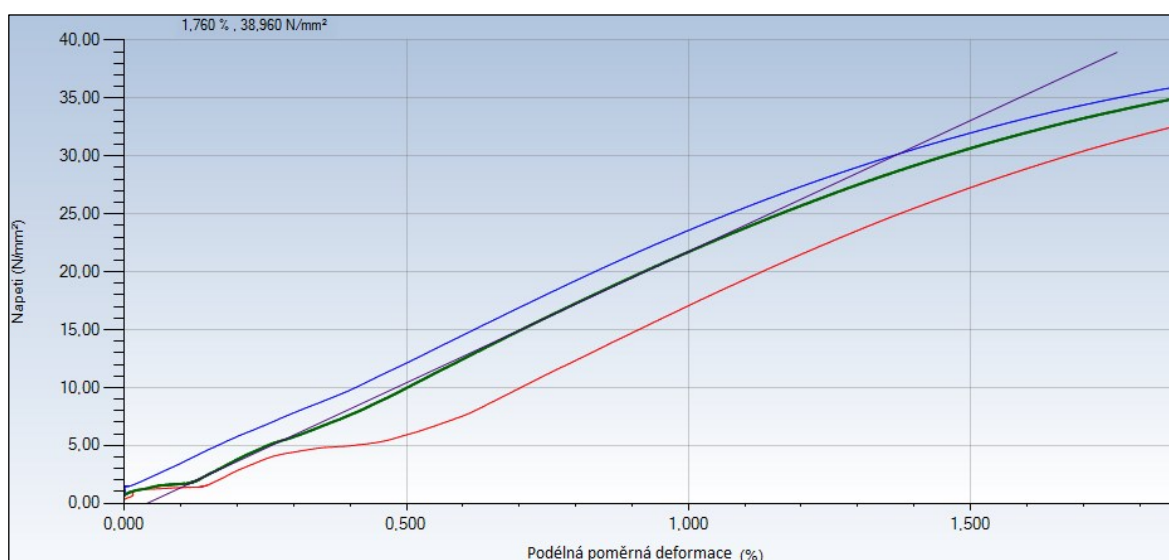
<b>Teplota vzduchu</b>	22,4 °C
<b>Relativní vlhkost vzduchu</b>	40,7 %
<b>Teplota rosného bodu</b>	9,2 °C

### 6.4. Experimentálně zjištěné hodnoty tahové zkoušky

V tabulce 9 až 13 jsou naměřené hodnoty tahové zkoušky vzorků. Šířka a tloušťka je u jednotlivých vzorků proměnlivá, a to mohlo zapříčinit více faktorů. Vzorky s označením 1.3 (u každé skupiny) se při zkoušce mírně uvolňovaly v čelistech. Výsledné hodnoty meze kluzu a pevnosti to neovlivnilo, avšak ovlivnilo to poměrnou podélnou deformaci. Z tohoto důvodu bereme křivku grafu vzorku za směrodatnou až od bodu elastické oblasti. Pro každou skupinu vzorků byly vypočteny odchylky a průměrné hodnoty u naměřených veličin.

Z výsledných smluvních diagramů je vynesena závislost podélné poměrné deformace [%] na napětí [N/mm<sup>2</sup>] na které je vidět, jak se kompozitní materiál chová při zatížení tahem. Zaznamenané hodnoty začínají na nulovém zatížení a končí maximálním zatížením silou, které vedla k přetržení vzorku. Výsledné mechanické vlastnosti jsou tedy napětí při nejvyšší síle, což je napětí na mezi pevnosti, podélná poměrná deformace při nejvyšší pevnosti a modul pružnosti v tahu. Ke každé skupině vzorků je vyhodnocena makroskopická analýza po provedení tahové zkoušky.

Pro přesné určení modulu pružnosti v tahu byla v softwaru Wintest Analysis provedena vizuální korekce tečny ke křivce v lineární oblasti. Zde na obrázku 14 je vidět, že tečna protíná křivku v cca 30 N/mm<sup>2</sup> a lze tedy předpokládat, že se v tomto místě nachází mez pružnosti. Dále dochází k pozvolnému lomení křivky a nastává zde trvalá deformace vzorku.



Obrázek 15 - Graf pro stanovení modulu pružnosti v tahu.



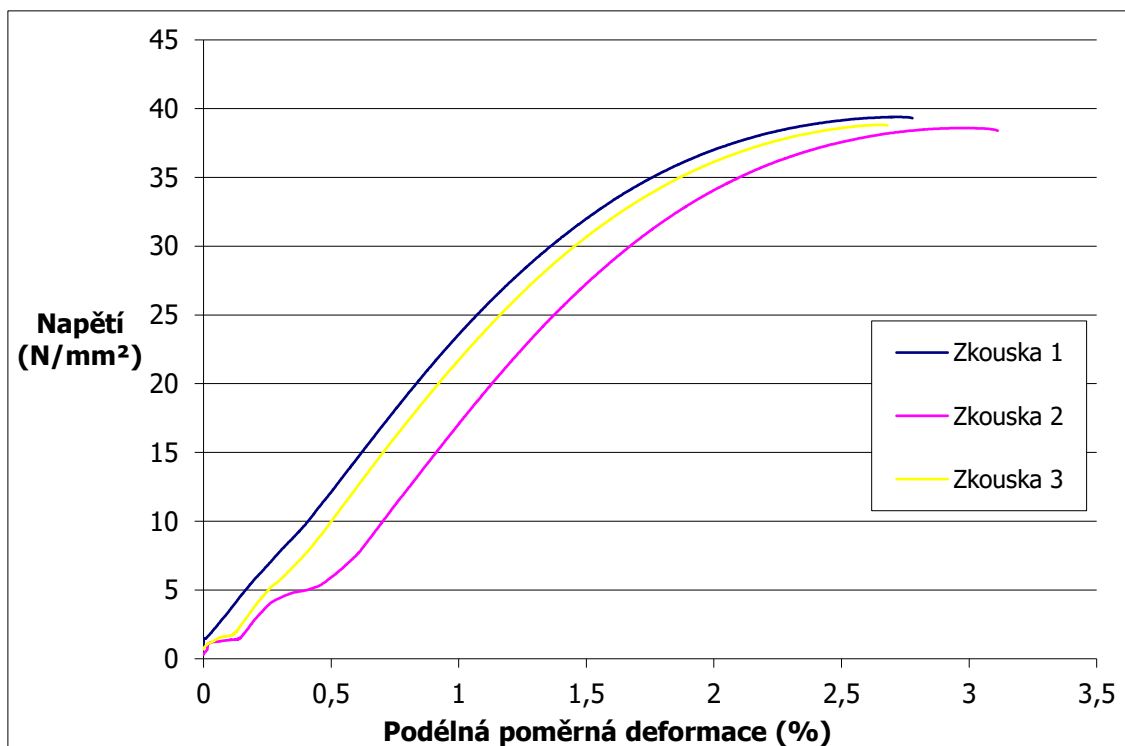
## 6.4.1. Tahová zkouška vzorků skupiny A1

Tabulka 9 – Naměřené hodnoty tahové zkoušky u skupiny A1

Vzorky skupiny A1					
Označení	A1.1	A1.2	A1.3	Průměr	Střední odchylka
Šířka [mm]	10,060	10,010	9,920	9,997	0,071
Tloušťka [mm]	4,140	4,150	4,080	4,123	0,038
Youngův modul [N/mm <sup>2</sup> ]	2245,743	2398,089	2371,856	2338,563	81,448
Napětí při nejvyšší síle [N/mm <sup>2</sup> ]	39,399	38,598	38,835	38,944	0,412
Napětí v 0,2 % meze pružnosti [N/mm <sup>2</sup> ]	33,851	32,179	32,588	32,872	0,871
Podélná poměrná deformace při nejvyšší pevnosti [%]	2,724	2,964	2,653	2,78	0,163
					

V tabulce 9 jsou naměřené hodnoty první skupiny vzorků A1, které byly orientované v tiskové komoře v ose Y a ležely na spodní straně. Vzorek s označením A1.3 byl vytisknut s viditelnou vadou a ze začátku tahové zkoušky se uvolňoval v čelistech. To mohlo zapříčinit ovlivnění výsledných hodnot. Z tohoto důvodu je křivka grafu vzorku směrodatná až od bodu elastické oblasti, a to je v tomto případě cca  $8 \text{ N/mm}^2$ .

Při pohledu na vzorky skupiny A1 můžeme říct, že lom byl veden příčně na podélný směr ve spodní části u vzorku A1.1 nebo v dolní části jako je tomu u vzorku A1.2 a A1.3. Lom je v nejužším místě vzorku nad čelistmi.






Obrázek 16 – Smluvní diagram naměřených hodnot vzorků v tahu pro skupinu A1



Obrázek 17 – Vzorky skupiny A1 po tahové zkoušce

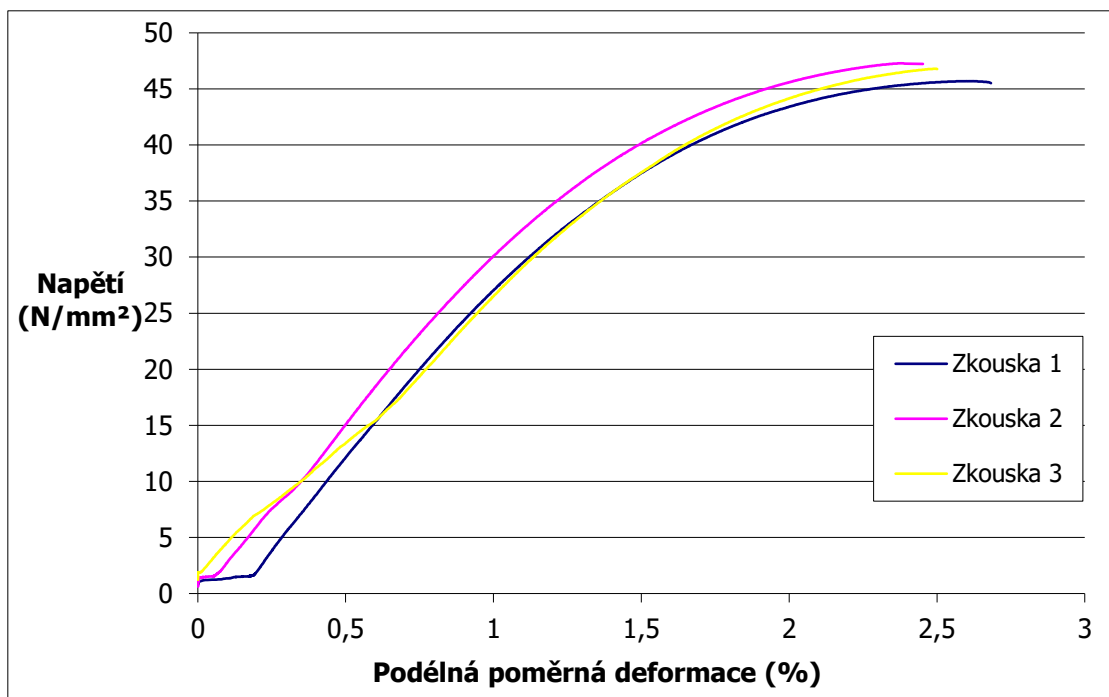
## 6.4.2. Tahová zkouška vzorků skupiny B1

Tabulka 10 - Naměřené hodnoty tahové zkoušky u skupiny B1.

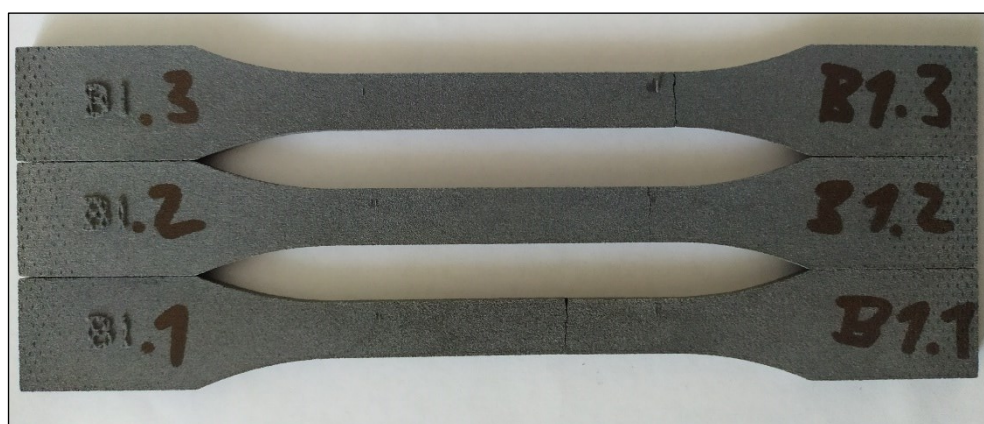
Vzorky skupiny B1					
Označení	B1.1	B1.2	B1.3	Průměr	Střední odchylka
Šířka [mm]	9,460	9,560	9,400	9,473	0,081
Tloušťka [mm]	4,110	4,240	4,210	4,187	0,068
Youngův modul [N/mm <sup>2</sup> ]	3300,704	3087,277	2886,709	3091,563	207,031
Napětí při nejvyšší síle [N/mm <sup>2</sup> ]	45,691	47,288	46,796	46,592	0,818
Napětí v 0,2 % meze pružnosti [N/mm <sup>2</sup> ]	36,617	40,289	40,551	39,152	2,200
Podélná poměrná deformace při nejvyšší pevnosti [%]	2,600	2,377	2,490	2,489	0,112
					

V tabulce 10 jsou uvedena data z měření vzorků skupiny B1, které byly v tiskové komoře orientovány v ose X a ležely na spodní straně. Opět s vzorkem číslo B1.3 byl problém s uvolňováním v čelistech a došlo k ovlivnění meze tažnosti, proto ji bereme za směrodatnou až od elastické oblasti cca 10 N/mm<sup>2</sup>.

Optickou analýzou u vzorků skupiny B1 můžeme říct, že lom je veden příčně na podélný směr, a to vždy ve spodní části vzorku. Lom se u každého vzorků nachází v jiné výšce, ale vždy v nejužší části vzorku.






Obrázek 18 – Smluvní diagram naměřených hodnot vzorků v tahu pro skupinu B1



Obrázek 19 – Vzorky skupiny B1 po tahové zkoušce

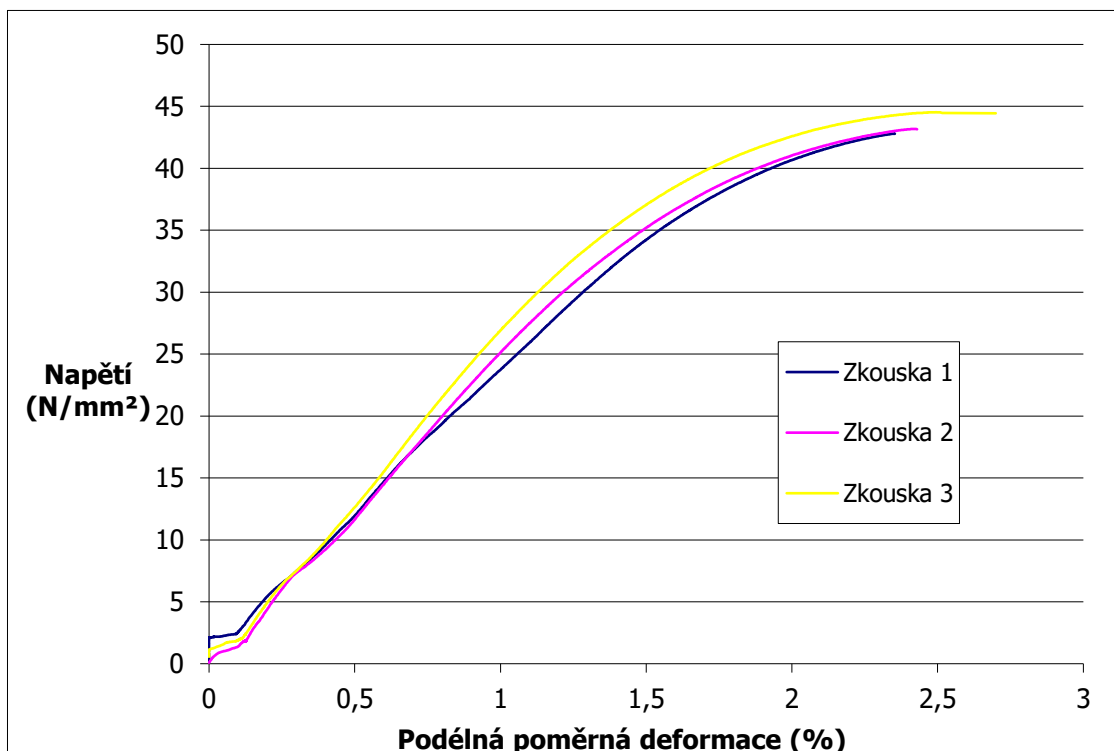
## 6.4.3. Tahová zkouška vzorků skupiny D1

Tabulka 11 - Naměřené hodnoty tahové zkoušky u skupiny D1.

Vzorky skupiny D1					
Označení	D1.1	D1.2	D1.3	Průměr	Střední odchylka
Šířka [mm]	10,150	10,160	10,140	10,150	0,010
Tloušťka [mm]	3,630	3,590	3,560	3,593	0,035
Youngův modul [N/mm <sup>2</sup> ]	2361,309	2685,794	2801,602	2616,235	228,240
Napětí při nejvyšší síle [N/mm <sup>2</sup> ]	42,799	43,175	44,531	43,502	0,911
Napětí v 0,2 % meze pružnosti [N/mm <sup>2</sup> ]	39,255	37,225	38,686	38,389	1,047
Podélná poměrná deformace při nejvyšší pevnosti [%]	2,352	2,411	2,494	2,419	0,072
					

V tabulce číslo 11 jsou uvedeny veličiny z měření na vzorcích skupiny D1. Tyto vzorky byly umístěny v tiskové komoře na boční straně v ose X.

Zde při optické analýze můžeme říct, že lom je veden příčně na podélný směr, avšak pokaždé v jiném místě. U prvního vzorku s označením D1.1 je lom ve spodní části vzorku. U zbylých vzorků ve skupině D1 došlo k lomu spíše ve střední oblasti.



Obrázek 20 - Smluvní diagram naměřených hodnot vzorků v tahu pro skupinu D1



Obrázek 21 – Vzorky skupiny D1 po tahové zkoušce

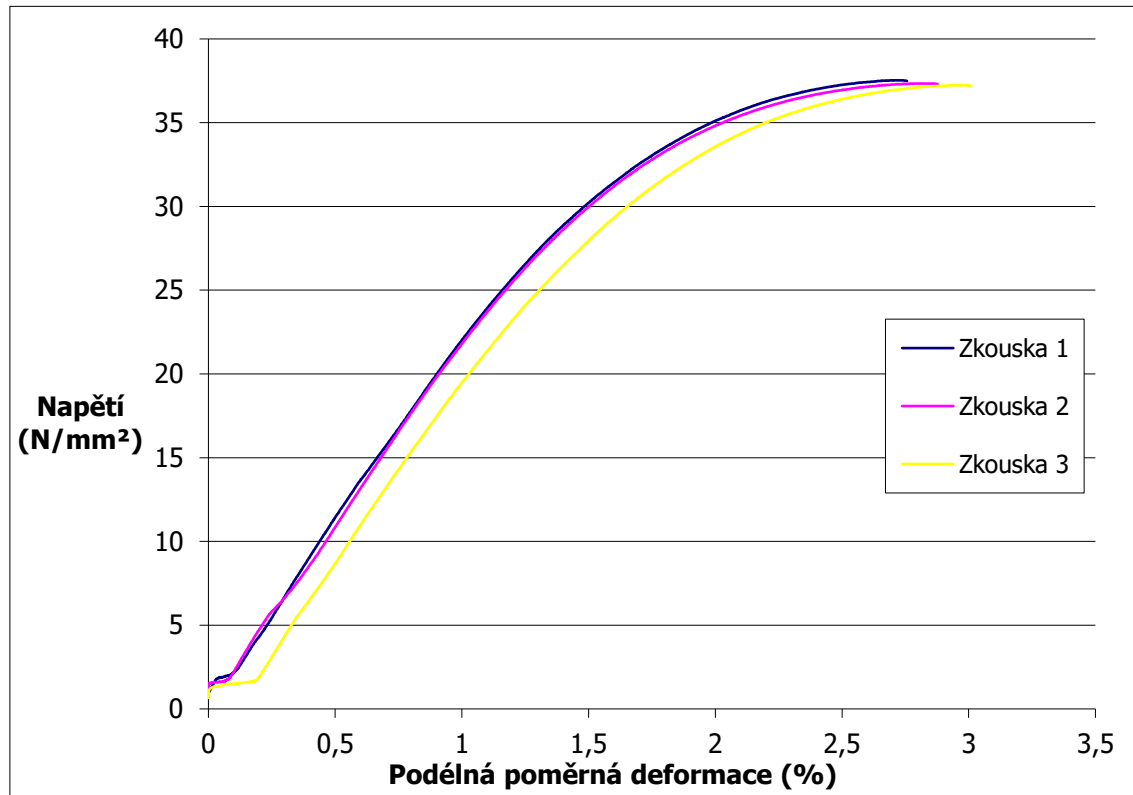


## 6.4.4. Tahová zkouška vzorků skupiny E1

Tabulka 12 - Naměřené hodnoty tahové zkoušky u skupiny E1.

Vzorky skupiny E1					
Označení	E1.1	E1.2	E1.3	Průměr	Střední odchylka
Šířka [mm]	10,380	10,350	10,320	10,350	0,030
Tloušťka [mm]	3,950	3,890	3,880	3,907	0,038
Youngův modul [N/mm <sup>2</sup> ]	2245,067	2206,699	2203,106	2218,291	23,259
Napětí při nejvyšší síle [N/mm <sup>2</sup> ]	37,531	37,348	37,246	37,375	0,144
Napětí v 0,2 % meze pružnosti [N/mm <sup>2</sup> ]	31,474	31,538	30,507	31,173	0,577
Podélná poměrná deformace při nejvyšší pevnosti [%]	2,711	2,814	2,991	2,839	0,141
					

V tabulce na předchozí straně s číslem 12 jsou hodnoty z měření tahem u vzorků skupiny E1. Tyto vzorky byly orientované v ose Y a jejich poloha v tiskové komoře byla na boční straně. Lom je veden příčně na podélný směr. U prvního vzorku (A1.1.) je lom ve středu vzorku. U vzorků E.1.2 a E1.3 je lom veden spíše ve vrchní části, avšak v jiné vzdálenosti.



Obrázek 22 – Smluvní diagram naměřených hodnot vzorků v tahu pro skupinu E1






Obrázek 23 – Vzorky skupiny E1 po tahové zkoušce

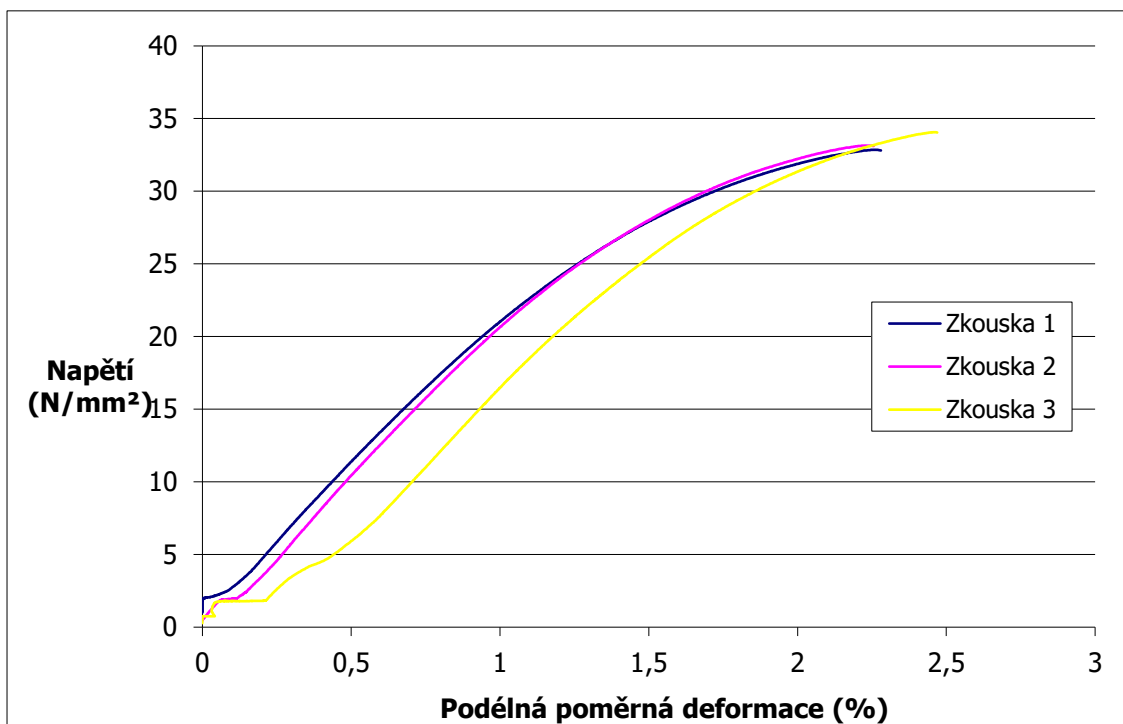


## 6.4.5. Tahová zkouška vzorků skupiny H1

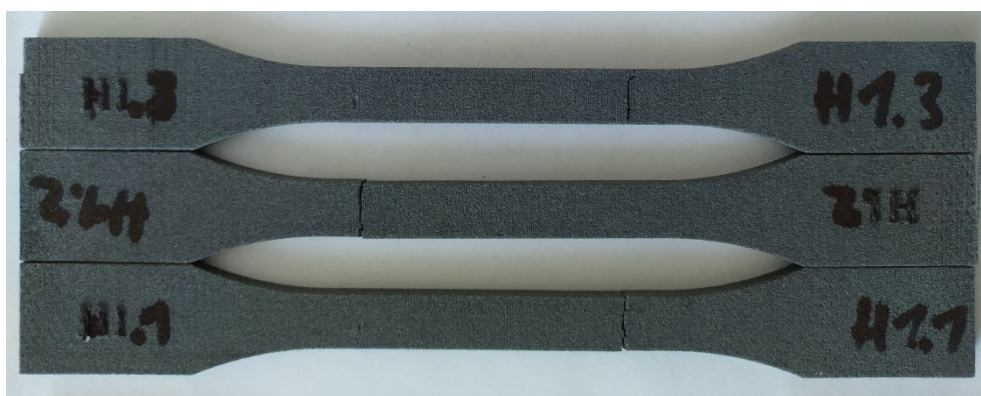
Tabulka 13 - Naměřené hodnoty tahové zkoušky u skupiny H1.

Vzorky skupiny H1					
Označení	H1.1	H1.2	H1.3	Průměr	Sřední odchylka
Šířka [mm]	9,790	9,760	9,820	9,790	0,030
Tloušťka [mm]	3,950	3,940	3,960	3,950	0,010
Youngův modul [N/mm <sup>2</sup> ]	2140,521	2107,622	2124,490	2124,211	16,451
Napětí při nejvyšší síle [N/mm <sup>2</sup> ]	32,852	33,141	34,063	33,352	0,632
Napětí v 0,2 % meze pružnosti [N/mm <sup>2</sup> ]	27,376	28,663	29,456	28,499	1,050
Podélná poměrná deformace při nejvyšší pevnosti [%]	2,255	2,227	2,457	2,313	0,125
					

U poslední skupiny vzorků H1 jsou výsledné hodnoty zaznamenané do tabulky 13. Tato skupina jako jediná měla při tisku orientaci v ose Z a její tisk byl na tzv. ploše hlavy. U posledního vzorku s označením H1.3 docházelo při zkoušce tahem k uvolňování v čelistech stroje, a to ovlivnilo výsledky meze tažnosti. Proto v tomto případě bereme křivku za směrodatnou až v místě, kde přechází v přímku tzv. elastická oblast (cca  $10 \text{ N/mm}^2$ ). Zde je lom u vzorků prakticky v totožném místě, a to ve spodní části vzorku.



Obrázek 24 – Smluvní diagram naměřených hodnot vzorků v tahu pro skupinu H1

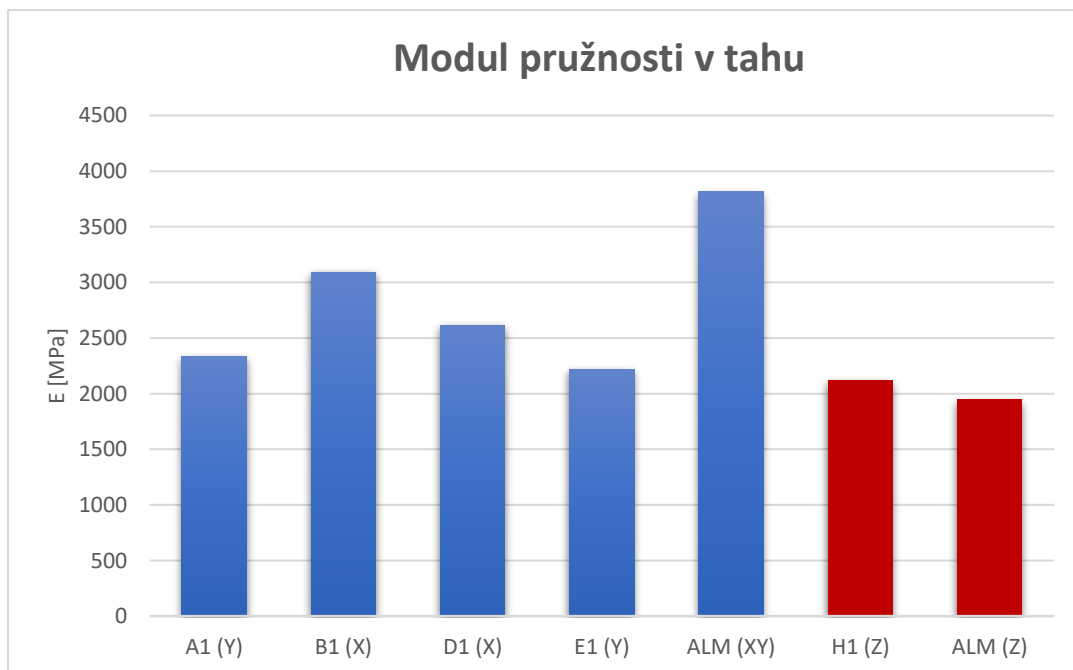


Obrázek 25 – Vzorky skupiny H1 po tahové zkoušce

## 6.5. Vyhodnocení experimentu

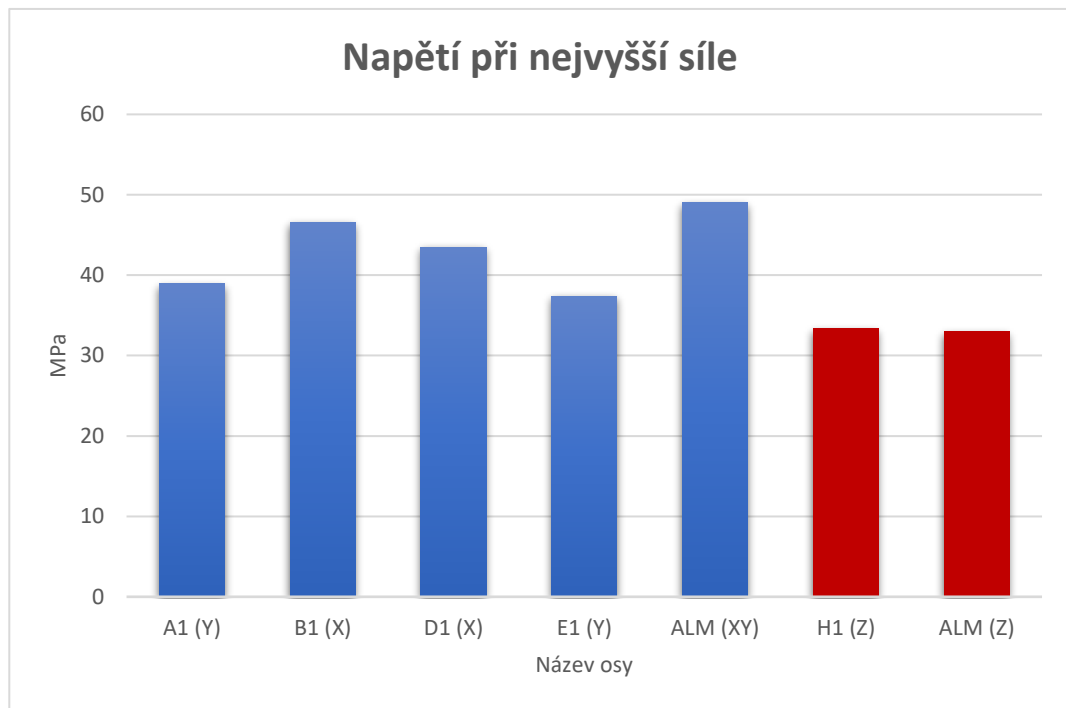
Pro porovnání hodnot výrobce, v grafu označené jako ALM(XY) a ALM(Z), jsem použil průměrné veličiny každé skupiny vzorků podrobené na zkoušku tahem.

Na obrázku 26 je graf s hodnotami modulu pružnosti v tahu, pro každou skupinu vzorků v ose X a Y je srovnání s hodnotou od výrobce ( $E = 3816 \text{ MPa}$ ). Na první pohled je patrné, že výsledky se výrazně liší. U testovaných vzorků byly hodnoty nižší někde i o desítky procent. První srovnávací skupinou je skupina A1. Ta dosáhla v testech průměrné hodnoty  $E = 2338,56 \text{ MPa}$ , tedy o 38,7% pokles od referenční hodnoty. Následuje skupina B1, tam se průměrná hodnota pohybuje ze všech testovaných vzorků na nejvyšší hodnotě  $3091,56 \text{ MPa}$ , tedy o 19 % méně a u skupiny D1 došlo k poklesu 31,4 %. Největším rozdílem je tomu u skupiny E1, která se od dat ALM(XY) liší o 41,9 %. Naopak je tomu u vzorků tisknutých v ose Z skupiny H1. V tomto případě modul pružnosti v tahu převýšil referenční hodnotu ( $ALM(Z) = 1945 \text{ MPa}$ ) o 9,2 %.



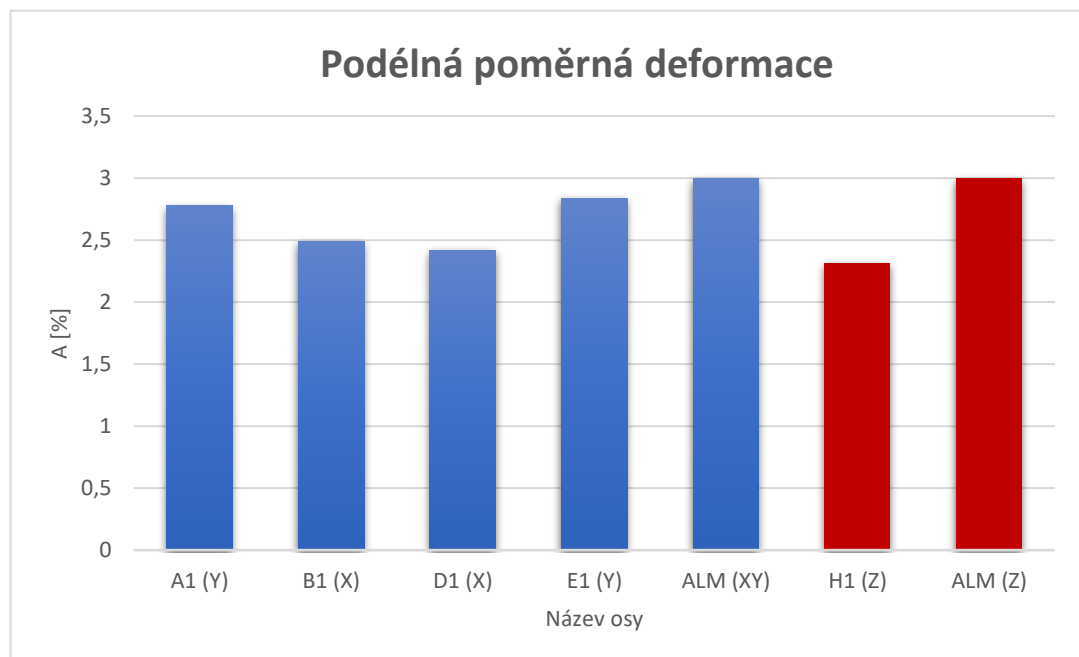
Obrázek 26 – Graf veličin porovnávající modul pružnosti v tahu

Dalším grafem je srovnání napětí při nejvyšší síle (obrázek 27). Z výsledků zkoušky bylo zjištěno, že u napětí při nejvyšší síle testovaných skupin nedošlo k tak enormním rozdílům jako tomu bylo v předchozím grafu. Referenční hodnota ALM (XY) je 49 MPa. Skupina A1 dosáhla hodnoty 38,9 MPa (o 20,5 % méně). Nejvyšší hodnoty dosáhla znovu jako u předchozího grafu skupina B1, a to s hodnotou 46,59 MPa (o 4,9 % méně, než je tomu u referenční hodnoty). Skupina D1 o 11,2 % a E1 23,7 % méně než ALM (XY). Nejmenšímu rozdílu tomu bylo u skupiny H1, která byla tisknuta v ose Z a srovnávána s hodnotou  $ALM(Z) = 33 \text{ MPa}$ . Zde došlo k téměř totožným hodnotám  $H1 = 33,35 \text{ MPa}$ .



**Obrázek 27 - Graf veličin porovnávající napětí při nejvyšší síle v tahu**

Posledním srovnávacím kritériem s referenční hodnotou ( $A = 3\%$ ) je podélná poměrná deformace. U všech testovaných skupin byla výsledná podélná poměrná deformace menší než referenční hodnota ALM. U vzorků s označením A1 dosáhla hodnota  $2,78\%$ , u skupiny B1 =  $2,5\%$  a podobnou hodnotu vykazují i vzorky D1 =  $2,42\%$ . Nejvyšší hodnoty z testovaných vzorků dosáhla skupina E1 =  $2,84\%$ . A poslední skupina H1 =  $2,31\%$ .



**Obrázek 28 - Graf veličin porovnávající podélnou poměrnou deformaci**

## Závěr

Experimentální část diplomové práce je rozdělena do pěti fází, a výsledkem bylo hodnocení fyzikálně mechanických vlastností kompozitního materiálu na bázi polyamidu 12 se skelnými kuličkami a následné porovnání s referenčními hodnotami. Materiál na základě vyhodnocení testů tahové zkoušky vykazoval jiné mechanické vlastnosti, než deklaruje výrobce.

Prvním krokem byl návrh vzorku na zkoušku tahem. Vzorek byl omezen rozměry pracovního prostoru trhačího stroje. Rozměry plochého testovacího vzorku viz obrázek 12. Vzorky pro realizaci experimentu, byly rozděleny do pěti základních skupin po třech viz tabulka 6 a pak následně rozmístěny pomocí software Materialise Magics do pracovního prostoru tiskárny EOS P396 viz obrázek 13. Následoval tisk plochých vzorků za následujících podmínek. S vlhkostí prášku 40 %, výškou vrstvy 120  $\mu\text{m}$ . Po celou dobu tisku byla udržována v procesní komoře teplota 175  $^{\circ}\text{C}$  a po tisku následovalo řízené chladnutí v ochranné atmosféře dusíku o 0,5  $^{\circ}\text{C}$  za 1 minutu.

V následujícím bodu byla provedena tahová zkouška na trhačím stroji za konstantní rychlosti 1mm/min a výsledky každého vzorku byly zaznamenány do tabulek 9 – 13. Po odzkoušení plochých zkušebních vzorků byla zjištěna mez pružnosti v tahu, napětí při nejvyšší síle a podélná poměrná deformace. Pro vyhodnocení byly brány v potaz průměrné hodnoty výsledků mechanických vlastností tahové zkoušky každé skupiny a ty byly komparovány s hodnotami materiálového listu ALM PA 640 GLS. Od hodnot se významně lišil modul pružnosti v tahu v ose X a Y (kde došlo spíše k poklesu hodnot), která byla u skupiny A1 o 38,7 % nižší, B1 o 19 %, D1 o 31,4 % a E1 o 41,9 % nižší, než tomu bylo u referenčních hodnot. V ose Z byl nárůst modulu pružnosti v tahu s porovnáním referenční hodnotou o 9,2 %. Dalším porovnávacím kritériem bylo napětí při nejvyšší síle. Zde nedocházelo k tak výraznému poklesu, ale přesto to u některých skupin bylo v desítkách procent. U skupiny v ose X a Y s porovnáním s referenční hodnotou tomu bylo A1 o 20,5 %, B1 o 4,9 %, D1 11,2 % a E1 23,7 %. V ose Z byla hodnota zkušební skupiny H1 takřka identická. Došlo zde k převýšení napětí o 1 %. Posledním porovnávacím kritériem byla poměrná podélná deformace. Ta byla srovnávána s referenční hodnotou 3 %. Skupiny dosáhly následujících hodnot A1 = 2,78 %, B1 = 2,5 %, D1 = 2,42 %, E1 = 2,84 % a H1 = 2,31 %.

Cílem diplomové práce bylo podrobit materiál AML PA 640 GLS vyrobený 3D tiskem metodou SLS tahové zkoušce a výsledné vlastnosti porovnat s materiálovým listem. Z výsledků experimentální části lze říct, že výsledné mechanické vlastnosti v tahu materiálu nedosahují předepsaných hodnot, jak uvádí výrobce. Toto však nelze tvrdit bez ohledu na další možné faktory, které mohly ovlivnit výrobu vzorků. Tím může být poměr nového a použitého prášku, nanášení vrstev nebo neodladěné parametry tisku na stroji EOS P396.

Odchylky výsledných testů mohly být také ovlivněny použitím odlišných výrobních podmínek vzorků nebo zkoušením vzorků jiných tvarů a rozměrů. Na geometrickou přesnost vzorků měl vliv především koeficient smrštění. Tyto faktory je nutné brát v úvahu při řešení dalších prací a je nezbytné se je snažit eliminovat v co největší míře, abychom dosáhli, pokud možno nejideálnějších podmínek při výrobě.

## Poděkování

Na závěr mé diplomové práce, ale i studia na vysoké škole bych chtěl poděkovat všem lidem, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia. Poděkovat je nutno mé rodině a přítelkyni, díky kterým mi bylo umožněno plnohodnotně studovat.

Mé poděkování ohledně diplomové práce patří panu Ing. Petru Štefkovi, MBA, za rady a náměty při obtížích, zájem, připomínky a čas, který mi věnoval. A hlavně za zajištění výroby zkušebních vzorků v laboratoři Protolab VŠB-TUO.

Diplomová byla vypracována za podpory projektu: „Specifický výzkum inovativních technologií výroby“, reg. č. „SP2020/27“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

## Seznam použité literatury

1. LEARY, Martin. Introduction to AM. *Design for Additive Manufacturing* [online]. Elsevier, 2020, 2020, s. 1-6 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/B978-0-12-816721-2.00001-4. ISBN 9780128167212. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128167212000014>
2. KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
3. SU, Amanda a Subhi J. AL'AREF. History of 3D Printing. *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine* [online]. Elsevier, 2018, 2018, s. 1-10 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/B978-0-12-803917-5.00001-8. ISBN 9780128039175. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128039175000018>
4. HUANG, Runze, Matthew RIDDLE, Diane GRAZIANO, Joshua WARREN, Sujit DAS, Sachin NIMBALKAR, Joe CRESKO a Eric MASANET. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, **135**, 1559-1570 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.109. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615004849>
5. *Přehled technologií 3D tisku* [online]. [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
6. KUMAR, S. Selective Laser Sintering/Melting. *Comprehensive Materials Processing* [online]. Elsevier, 2014, 2014, s. 93-134 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01003-7. ISBN 9780080965338. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080965321010037>
7. SHAHZAD, Khuram, Jan DECKERS, Zhongying ZHANG, Jean-Pierre KRUTH a Jef VLEUGELS. Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2014, **34**(1), 81-89 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.07.023. ISSN 09552219. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221913003531>
8. HEIDARI-RARANI, M., M. RAFIEE-AFARANI a A.M. ZAHEDI. Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2019, **175** [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107147. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836818335686>
9. LIGON, Samuel Clark, Robert LISKA, Jürgen STAMPFL, Matthias GURR a Rolf MÜLHAUPT. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews* [online]. 2017, **117**(15), 10212-10290 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074. ISSN 0009-2665. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
10. Aditivní technologie pro Průmysl 4.0. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2018 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-technologie-pro-prumysl-4-0.html>



11. ISO/ASTM 52900:2015. *Additive manufacturing — General principles — Terminology*. Mezinárodní technická norma, 2015, 19s.
12. BOURELL, David L., Trevor J. WATT, David K. LEIGH a Ben FULCHER. *Performance limitations in polymer laser sintering*. *Physics Procedia*. 2014, č. 56, s. 147- 156. ISSN 18753892.
13. *The Environmental Impact of 3D Printing* [online]. India: Manufactur3D Magazine [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.3dprintingbusiness.directory/environmental-impact-3d-printing/?fbclid=IwAR001utDXAMNhsVPgcymJDLPxLOK7UBs2FQsLhjjIeJzbmLeqtOceUmVeE>
14. *Is 3D Printing Really as Ecofriendly* [online]. 3D Printing Industry, 2018 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/is-3d-printing-really-as-ecofriendly-as-we-think-it-is-136335/>
15. LIU, Zhichao, Qihong JIANG, Yang ZHANG, Tao LI a Hong-Chao ZHANG. Sustainability of 3D Printing: A Critical Review and Recommendations. In: *Volume 2: Materials; Biomanufacturing; Properties, Applications and Systems; Sustainable Manufacturing* [online]. American Society of Mechanical Engineers, 2016, 2016-06-27, s. - [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1115/MSEC2016-8618. ISBN 978-0-7918-4990-3. Dostupné z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/MSEC/proceedings/MSEC2016/49903/Blacksburg,%20Virginia,%20USA/269054>
16. BOURELL, David, Jean Pierre KRUTH, Ming LEU, Gideon LEVY, David ROSEN, Allison M. BEESE a Adam CLARE. Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals* [online]. 2017, **66**(2), 659-681 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.009. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850617301488>
17. HERZOG, Dirk, Vanessa SEYDA, Eric WYCISK a Claus EMMELMANN. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* [online]. 2016, **117**, 371-392 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019. ISSN 13596454. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645416305158>
18. GROOVER, Mikell P. *Groover's principles of modern manufacturing: materials, processes, and systems : SI version*. Global edition. USA: Wiley, 2017. ISBN 978-1-119-24912-2.
19. WANG, Xin, Man JIANG, Zuowan ZHOU, Jihua GOU a David HUI. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2017, **110**, 442-458 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836816321230>
20. FU, Z., L. SCHLIER, N. TRAVITZKY a P. GREIL. Three-dimensional printing of SiSiC lattice truss structures. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2013, **560**, 851-856 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/j.msea.2012.09.107. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509312014372>
21. ZOCCA, Andrea, Paolo COLOMBO, Cynthia M. GOMES, Jens GÜNSTER a D. J. GREEN. Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities. *Journal of the American Ceramic Society* [online].

- 2015, **98**(7), 1983-2001 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1111/jace.13700. ISSN 00027820. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/jace.13700>
22. MOLITCH-HOU, Michael. *CRP Unveils Flame-Retardant Composite SLS Material* [online]. 2020 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://3dprint.com/263250/crp-unveils-flame-retardant-composite-sls-material/>
23. SALAZAR, A., A. RICO, J. RODRÍGUEZ, J. SEGURADO ESCUDERO, R. SELTZER a F. MARTIN DE LA ESCALERA CUTILLAS. Fatigue crack growth of SLS polyamide 12: Effect of reinforcement and temperature. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2014, **59**, 285-292 [cit. 2020-04-02]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.12.017. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836813007476>
24. 3DWISER S.R.O. *Markforged X3, X5 a X7* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/3d-tiskarny/3d-tiskarny-markforged/markforged-x3-x5-x7/>
25. DILBEROGLU, Ugur M., Bahar GHAREHPAPAGH, Ulas YAMAN a Melik DOLEN. The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, **11**, 545-554 [cit. 2020-04-09]. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.148. ISSN 23519789. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978917303529>
26. SONY, Michael a Subhash NAIK. Industry 4.0 integration with socio-technical systems theory: A systematic review and proposed theoretical model. *Technology in Society* [online]. 2020 [cit. 2020-04-09]. DOI: 10.1016/j.techsoc.2020.101248. ISSN 0160791X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160791X19304051>
27. SAPTARSHI, Sourabh Manoj a Dr. Chi ZHOU. Basics of 3D Printing. *3D Printing in Orthopaedic Surgery* [online]. Elsevier, 2019, 2019, s. 17-30 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/B978-0-323-58118-9.00002-6. ISBN 9780323581189. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323581189000026>
28. SING, S.L., C.F. TEY, J.H.K. TAN, S. HUANG a Wai Yee YEONG. 3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing. *Rapid Prototyping of Biomaterials* [online]. Elsevier, 2020, 2020, s. 17-40 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1016/B978-0-08-102663-2.00002-2. ISBN 9780081026632. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081026632000022>
29. MAZUR, M., M. LEARY, M. MCMILLAN, S. SUN, D. SHIDID a M. BRANDT. Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM). *Laser Additive Manufacturing* [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 119-161 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1016/B978-0-08-100433-3.00005-1. ISBN 9780081004333. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081004333000051>
30. LEARY, M. Surface roughness optimisation for selective laser melting (SLM). *Laser Additive Manufacturing* [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 99-118 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1016/B978-0-08-100433-3.00004-X. ISBN 9780081004333. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978008100433300004X>

31. NEGI, Sushant, Suresh DHIMAN a Rajesh Kumar SHARMA. Determining the effect of sintering conditions on mechanical properties of laser sintered glass filled polyamide parts using RSM. *Measurement* [online]. 2015, **68**, 205-218 [cit. 2020-05-05]. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.02.057. ISSN 02632241. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224115001219>
32. SINHA, Sudip Kumar. Additive manufacturing (AM) of medical devices and scaffolds for tissue engineering based on 3D and 4D printing. *3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials* [online]. Elsevier, 2020, 2020, s. 119-160 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1016/B978-0-12-816805-9.00005-3. ISBN 9780128168059. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128168059000053>
33. DESHMUKH, Kalim, Aqib MUZAFFAR, Tomáš KOVÁŘÍK, Tomáš KŘENEK, M. Basheer AHAMED a S. K. Khadheer PASHA. Fundamentals and applications of 3D and 4D printing of polymers: Challenges in polymer processing and prospects of future research. *3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials* [online]. Elsevier, 2020, 2020, s. 527-560 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1016/B978-0-12-816805-9.00017-X. ISBN 9780128168059. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012816805900017X>
34. NEIKOV, Oleg D. Powders for Composites. *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders* [online]. Elsevier, 2019, 2019, s. 351-372 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1016/B978-0-08-100543-9.00012-9. ISBN 9780081005439. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081005439000129>
35. XU, Zhiyao, Yue WANG, Dingdi WU, K. Prem ANANTH a Jiaming BAI. The process and performance comparison of polyamide 12 manufactured by multi jet fusion and selective laser sintering. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2019, **47**, 419-426 [cit. 2020-04-16]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.07.014. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612518315123>
36. SABOORI, Abdollah, Donato GALLO, Sara BIAMINO, Paolo FINO a Mariangela LOMBARDI. An Overview of Additive Manufacturing of Titanium Components by Directed Energy Deposition: Microstructure and Mechanical Properties. *Applied Sciences* [online]. 2017, **7**(9) [cit. 2020-04-18]. DOI: 10.3390/app7090883. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2076-3417/7/9/883>
37. DUNHAM, Simon, Bobak MOSADEGH, Eva A. ROMITO a Mohamed ZGAREN. Applications of 3D Printing. *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine* [online]. Elsevier, 2018, 2018, s. 61-78 [cit. 2020-04-18]. DOI: 10.1016/B978-0-12-803917-5.00004-3. ISBN 9780128039175. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128039175000043>
38. KELLNER, Tomas. 3D-Printed 'Bionic' Parts Could Revolutionize Aerospace Design. *GE report* [online]. 2017 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.ge.com/reports/3d-printed-bionic-parts-revolutionize-aerospace-design/>
39. BHARGAV, Aishwarya, Vijayavenkatraman SANJAJIRAJ, Vinicius ROSA, Lu Wen FENG a Jerry FUH YH. Applications of additive manufacturing in dentistry: A review. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials* [online]. 2018, **106**(5), 2058-2064 [cit. 2020-04-18].

DOI: 10.1002/jbm.b.33961. ISSN 15524973. Dostupné z:

<http://doi.wiley.com/10.1002/jbm.b.33961>

40. SHAHRUBUDIN, N., P. KOSHY, J. ALIPAL, M.H.A. KADIR a T.C. LEE. Challenges of 3D printing technology for manufacturing biomedical products: A case study of Malaysian manufacturing firms. *Heliyon* [online]. 2020, **6**(4) [cit. 2020-04-18]. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03734. ISSN 24058440. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S240584402030579X>
41. MALAEB, Zeina, Fatima ALSAKKA a Farook HAMZEH. 3D Concrete Printing. *3D Concrete Printing Technology* [online]. Elsevier, 2019, 2019, s. 115-136 [cit. 2020-04-18]. DOI: 10.1016/B978-0-12-815481-6.00006-3. ISBN 9780128154816. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128154816000063>
42. *The biggest 3d printed building* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.apis-cor.com/>
43. KAZEMIAN, Ali, Xiao YUAN, Ryan MEIER a Behrokh KHOSHNEVIS. Performance-Based Testing of Portland Cement Concrete for Construction-Scale 3D Printing. *3D Concrete Printing Technology* [online]. Elsevier, 2019, 2019, s. 13-35 [cit. 2020-04-18]. DOI: 10.1016/B978-0-12-815481-6.00002-6. ISBN 9780128154816. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128154816000026>
44. NICKELS, Liz. Strengthening the 3D printing composites field. *Reinforced Plastics* [online]. 2018, **62**(6), 298-301 [cit. 2020-04-19]. DOI: 10.1016/j.repl.2018.06.036. ISSN 00343617. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034361718302352>
45. *ADVANCED LASER MATERIALS - MATERIAL SPECIFICATIONS: GLASS SPHERE FILLED - PA 640-GSL*. In: . 3115 Lucius McCelvey, Temple, TX 76504: Advanced Laser Materials.
46. *Magics training: Material profile editing: 3. Configuring Build Strategies* [online]. 07.2016 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/metal-3d-printing--32084>
47. PAGÁČ, Marek. 3D TECHNOLOGIE: Začínáme s 3D tiskem kovů #1: Příprava laboratoře. *Konstrukter* [online]. 10.10.2016 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-1/>