

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Aplikované strojírenství

STUDIUM USPOŘÁDÁNÍ VLÁKEN V KOMPOZITNÍ
MATRICI S OHLEDEM NA MECHANICKÉ
CHARAKTERISTIKY

Bakalářská práce

Autor práce: Lubomír Stejskal

Vedoucí práce: Ing. Mgr. Lucie Zárybnická, Ph.D.

Jihlava 2025

Vysoká škola polytechnická Jihlava

Tolstého 16, 586 01 Jihlava

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce: **Lubomír Stejskal**

Studijní program: Aplikované strojírenství

Garant studijního programu: Ing. Miloslav Vilímek, Ph.D.

Název práce: **Studium uspořádání vláken v kompozitní matrici s ohledem na mechanické charakteristiky**

Vedoucí práce: Ing. Mgr. Lucie Zárybnická, Ph.D.

Cíl práce: V rámci teoretické části bakalářské práce bude provedena rešerše na zadané téma, která bude zaměřená na možnosti použití kontinuálních vláken v kompozitní matrici s ohledem na mechanické testování, dále bude popsána technologie 3D tisku kompozitních materiálů, možnosti aplikovaných termoplastů pro kompozitní 3D tisk s dopadem na aplikace v průmyslu. Obsahem experimentální části bude návrh různých možností uspořádání kontinuálních vláken, samotný 3D tisk, následně budou připravené vzorky charakterizovány dostupnými mechanickými testy. Cílem práce je zjištění mechanických charakteristik různých uspořádání kontinuálních vláken s ohledem na možné aplikace.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá studiem uspořádání kontinuálních vláken v kompozitní matrici s ohledem na jejich mechanické charakteristiky. Experimentální část je zaměřena na výrobu zkušebních vzorků pomocí aditivní technologie Composite Fiber Coextrusion (CFC) na 3D tiskárně Anisoprint Composer A4. Kompozitní vzorky byly vytvořeny z polyamidové matrice a vyztužené kontinuálním uhlíkovým vláknem s různým uspořádáním výplně. Na připravených vzorcích byly provedeny tahové, ohybové a dynamické zkoušky. Testování bylo doplněno o měření drsnosti a pozorování povrchu digitálním optickým mikroskopem. Na základě experimentálních výsledků byly porovnány mechanické vlastnosti jednotlivých typů výplní. Závěrem práce je vyhodnocení vhodnosti uspořádání vláken z hlediska pevnosti, tuhosti a efektivního využití materiálu pro konstrukční aplikace.

Klíčová slova

3D tisk; kompozitní materiál; uhlíkové vlákno; uspořádání vláken; mechanické testování

Abstract

The bachelor thesis deals with the study of the arrangement of continuous fibers in a composite matrix with regard to their mechanical characteristics. The experimental part focuses on the production of test samples using additive Composite Fiber Coextrusion (CFC) technology on an Anisoprint Composer A4 printer. Composite samples were manufactured from a polyamide matrix reinforced with continuous carbon fiber with different reinforcement arrangements. Tensile and bending tests were performed on the prepared samples was supplemented by roughness measurements and surface observation using a digital optical microscope. Based on the experimental results, the mechanical properties of the individual types of reinforcement were compared. The final part of the thesis provides an evaluation of the suitability of the fiber arrangement in terms of strength, stiffness and effective use of the material for structural applications.

Keywords

3D printing; composite material; carbon fiber; fiber arrangements; mechanical testing

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje **AZ**, zejména § 60 (školní dílo).

Podle § 47b zákona o vysokých školách souhlasím se zveřejněním své práce podle Směrnice pro vedení, vypracování a zveřejňování závěrečných prací na VŠPJ, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

Při vypracování bakalářské práce jsem využil nástroj umělé inteligence ChatGPT od společnosti OpenAI k překladu odborných článků a ke stylistické úpravě textu. Pro vyhledávání odborných zdrojů jsem použil Litmaps AI. Veškeré použití tohoto nástroje bylo pod mojí vlastní kontrolou a odpovědností.

V Jihlavě dne 24. listopadu 2025

.....

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval paní Ing. Mgr. Lucii Zárybnické, Ph.D., za odborné vedení, vstřícný přístup, cenné rady a připomínky, které mi pomohly při zpracování této práce. V neposlední řadě děkuji rodině, přátelům a blízkým za jejich trpělivost, podporu a motivaci po celou dobu mého studia.

Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam tabulek	8
Seznam zkratk.....	9
Úvod	10
1 Teoretická část	11
1.1 3D tisk	11
1.2 3D tisk kompozitů	14
1.3 Kompozitní materiály.....	16
1.4 Uhlíkové vlákno	21
1.5 Aplikace 3D tiskem přípravných kompozitů	22
1.6 Dynamické chování kompozičních materiálů	22
2 Experimentální část	24
2.1 Použité materiály	24
2.2 Použité přístroje	25
2.3 Postup 3D tisku – Příprava a následný proces kompozitů na 3D tisk.....	29
2.4 Charakteristika použitých výplní.....	29
2.5 Postup testování	30
3 Výsledky a diskuze.....	33
3.1 Zhodnocení procesu 3D tisku	33
3.2 Tahová zkouška – zhodnocení výsledků	36
3.3 Ohybová zkouška – zhodnocení výsledků	37
3.4 Dynamické testování – zhodnocení výsledků	39
3.5 Analýza povrchové jakosti vzorků.....	39
4 Shrnutí dosažených výsledků experimentální části	42
4.1 Možnosti dalšího výzkumu a rozvoje	42
Závěr	43
Seznam použité literatury	44
Přílohy.....	47

Seznam obrázků

Obr. 1: Historie a vývoj 3D tisku.....	11
Obr. 2: Technologie 3D tisku FFF	12
Obr. 3: Technologie 3D tisku SLA	12
Obr. 4: Technologie 3D tisku SLS.....	13
Obr. 5: Fáze 3D tisku	13
Obr. 6: Popis kompozitní tiskové hlavy využívající technologii CFF	16
Obr. 7: Dělení kompozitů dle typu výztuže	17
Obr. 8: Typy vláknových kompozitů	19
Obr. 9: Výplň Isogrid.....	19
Obr. 10: Výplň Rhombic grid	20
Obr. 11: Výplň Tetragrid.....	20
Obr. 12: Výplň Anisogrid	20
Obr. 13: Výplň Solid.....	21
Obr. 14: Anisoprint Composer A4	26
Obr. 15: Popis tiskové hlavy pro kompozity.....	26
Obr. 16: Trhací zařízení Instron 3345	27
Obr. 17: Drsnoměr INSIZE ISR-C300	28
Obr. 18: Průběh pozorování mikroskopem	28
Obr. 19: Ukázka softwaru Aura pro přípravu 3D tisku	30
Obr. 20: Rozměry vzorku pro tahovou zkoušku	31
Obr. 21: Ukázka přípravku pro vibrační zkoušku s upnutím vzorku.....	32
Obr. 22: Průběh kompozitního 3D tisku.....	33
Obr. 23: Ukázka neúspěšného ukládání uhlíkového vlákna.....	35
Obr. 24: Tahový diagram.....	36
Obr. 25: Ohybový diagram	38
Obr. 26: Průměrné frekvenční křivky jednotlivých výztuží	39
Obr. 27: Grafické zobrazení drsnosti jednotlivých výplní	40
Obr. 28: a) Anisogrid, b) Isogrid, c) Rhombic grid, d) Solid, e) Tetragrid	41

Seznam tabulek

Tab. 1: Technické vlastnosti materiálu Smooth PA.....	24
Tab. 2: Technické vlastnosti materiálu CFC PA	25
Tab. 3: Technické vlastnosti materiálu Anisoprint CCF -1,5K.....	25
Tab. 4: Počty vzorků pro jednotlivé zkoušky.....	30
Tab. 5: Rozměrová analýza jednotlivých vzorků	34
Tab. 6: Výrobní čas, hmotnost a ekonomické aspekty výroby	35
Tab. 7: Výsledky měření tahové zkoušky	37
Tab. 8: Výsledky měření ohybové zkoušky.....	38

Seznam zkratek

3D	Three Dimensional (Trojrozměrný)
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CAD	Computer Aided Design (Počítačem podporované projektování)
CCF	Continuous Carbon Fiber (Kontinuální uhlíkové vlákno)
CFC	Composite Fiber Coextrusion (Koextruze kompozitních vláken)
CFF	Continuous Filament Fabrication (Výroba s kontinuální výztuží vlákna)
FFF	Fused Filament Fabrication (Výroba z roztaveného vlákna)
GelMA	Gelatin Methacryloyl
HT	High Tensity (Vysokopevnostní vlákna)
HM	High Modulus Fibers (Vysokomodulová vlákna)
IM	Intermediate Modulus Fibers (Středně modulová vlákna)
PAN	Polyakrylonitril
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
PLC	Polycaprolactone
PET	Polyethylenetereftalát
PEEK	Polyetheretherketone
PLA	Polyacetic Acid (Kyselina polymléčná)
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
RTM	Resin Transfer Molding
SLA	Stereolithography Apparatus (Stereolitografie)
SLS	Selective Laser Sintering (Selektivní spékání laserem)
STL	Standard Triangle Language (Standardní trojúhelníkový jazyk)
UV	Ultraviolet (Ultrafialové záření)
UHM	Ultra High Modulus Fibers (Ultra vysokomodulová vlákna)

Úvod

V posledních letech lze pozorovat výrazný rozvoj technologií 3D tisku, které zásadním způsobem mění přístupy k návrhu a výrobě konstrukčních prvků. Významnou oblastí tohoto rozvoje představuje 3D tisk kompozitních materiálů, jenž umožňuje kombinovat polymerní matrici s kontinuálními vlákny a vytvářet tak konstrukce s vysokou pevností, nízkou hmotností a přesně řízenými mechanickými vlastnostmi. Mezi rozvíjející se oblasti výzkumu patří především studium vlivu uspořádání kontinuálních vláken pro výrobu vysoce výkonných a lehkých součástí. (Zheng et al., 2025)

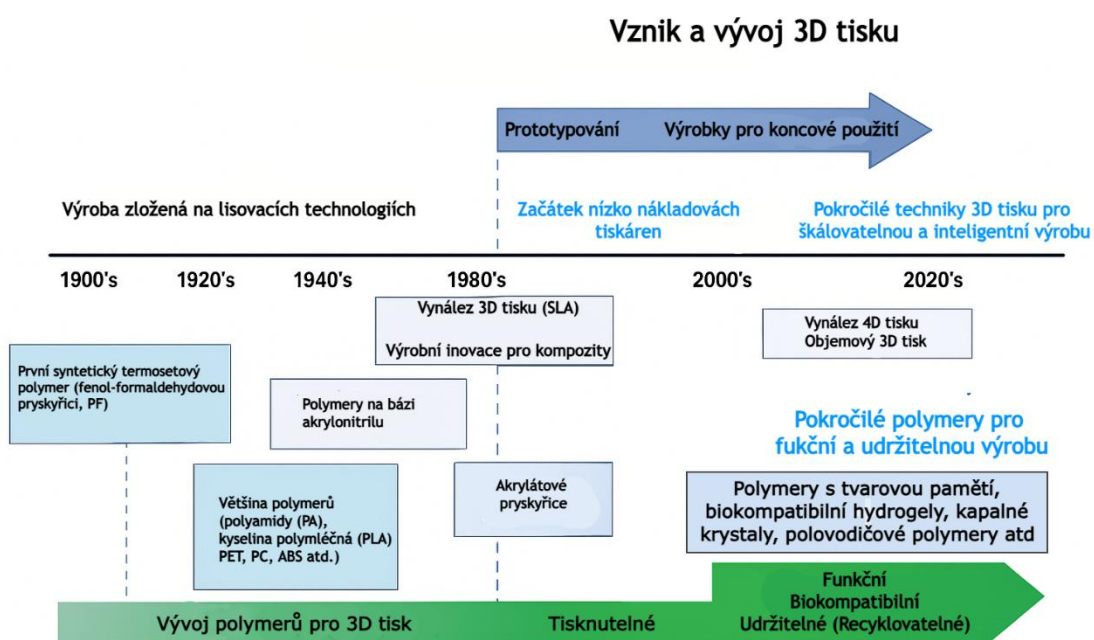
Bakalářská práce je zaměřena na zkoumání vlivu různých uspořádání kontinuálních uhlíkových vláken v kompozitní matrici a jejich dopad na mechanické vlastnosti výsledného materiálu. Práce využívá technologii 3D tisku kompozitních materiálů pomocí zařízení Anisoprint Composer A4, které umožňuje kombinaci polymerní matrice a výztužného vlákna prostřednictvím technologie koextruze kompozitních vláken (CFC).

Cílem práce je experimentálně posoudit mechanické vlastnosti kompozitních vzorků s odlišným druhem vnitřní výplně. V rámci experimentální části byly připraveny a testovány vzorky, u nichž byly sledovány tahové, ohybové a dynamické zkoušky doplněné o pozorování povrchu optickým mikroskopem a měření drsnosti povrchu.

1 Teoretická část

1.1 3D tisk

3D tisk má své počátky ve druhé polovině 20. století. Za klíčový mezník je považováno období 80. let, kdy Charles Hull získal patent na stereolitografii. Princip stereolitografie (SLA) je založen na postupném vytvrzování vrstev fotopolymerní pryskyřice pomocí ultrafialového záření specifické vlnové délky. Tento objev odstartoval rychlý rozvoj dalších metod. Zejména Fused Filament Fabrication (FFF), založeného na nanášení roztaveného termoplastu tryskou řízenou počítačem, a také Selective Laser Sintering (SLS), při němž laser spéká částice práškového materiálu do kompaktních vrstev (Blanco, 2020) (Wieczorek, 2022). Uvedené technologie se postupně staly základními pilíři 3D tisku a otevřely cestu k jejímu širokému uplatnění v průmyslu. Na Obr. 1 je znázorněn průběh vývoje 3D tisku.



Obr. 1: Historie a vývoj 3D tisku

Zdroj: Vlastní zpracování dle Park et al., (2022)

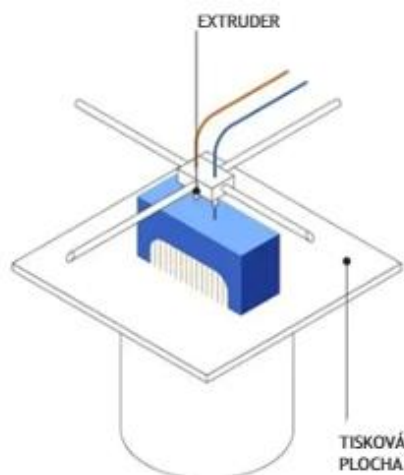
Princip všech technologií 3D tisku spočívá v postupném nanášení materiálu po jednotlivých vrstvách, čímž vzniká trojrozměrný objekt. Na rozdíl od tradičních subtraktivních metod, které materiál odebírají, umožňuje aditivní výroba efektivní využití materiálů. Základem procesu je digitální model vytvořený Computer Aided Design (CAD) softwaru nebo získaný pomocí 3D scanneru. V počátcích se 3D tisk označoval jako rapid prototyping, kdy sloužil k levnému testování prototypů před sériovou výrobou. Příkladem může být návrh ergonomie ovladače, kde se testovalo rozmístění tlačítek a tvar pro pohodlné držení. (Stříteský et al., 2019, s. 5, s. 34)

3D tisk umožňuje výrobu složitých tvarů, které by byly tradičními technologiemi obtížné realizovat. Významně snižují plýtvání materiálem a urychlují vývoj nových materiálů. Využití 3D tisku v oblasti prototypování přináší úsporu nákladů a zkracuje čas potřebný k testování funkčních dílů. Je proto nezbytné, důkladně zvážit požadavky na výsledný produkt a specifikace tiskového zařízení, aby bylo dosaženo optimálního výsledku. (Blanco, 2020) (Stříteský et al., 2019, s. 5-6, s. 10)

1.1.1 Druhy 3D tisku dle typu materiálu

Filament

Nejrozšířenější technologie 3D tisku FFF, znázorněna na Obr. 2, je založena na principu extruze (vytlačování) termoplastického materiálu. Ten je ve formě tenké tiskové struny (filamentu), nejčastěji 1,75 mm, podáván do tiskové hlavy s vyhřívanou tryskou. Tisková hlava se následně pohybuje po osách X a Y a nanáší materiál vrstvu po vrstvě v ose Z, přičemž každá nová vrstva se „přilepí“ k té předchozí. (Stříteský et al., 2019, s. 11)

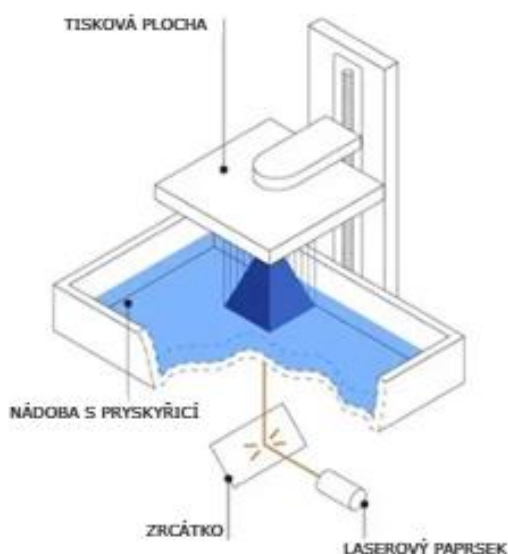


Obr. 2: Technologie 3D tisku FFF

Zdroj: Vlastní zpracování dle Formlabs (2025)

Kapalné

Tiskárny SLA pracují s tekutými fotopolymerními pryskyřicemi, které jsou vytvrzovány pomocí ultrafialového záření (UV). Tekutý materiál je vytvrzován v rámci vrstvy na definovaných oblastech, což umožňuje tvorbu vysoce detailních modelů. Tento proces se opakuje, dokud se celý objekt nevytvoří. Obr. 3 vyobrazuje princip technologie SLA. (Stříteský et al., 2019, s. 16-17)

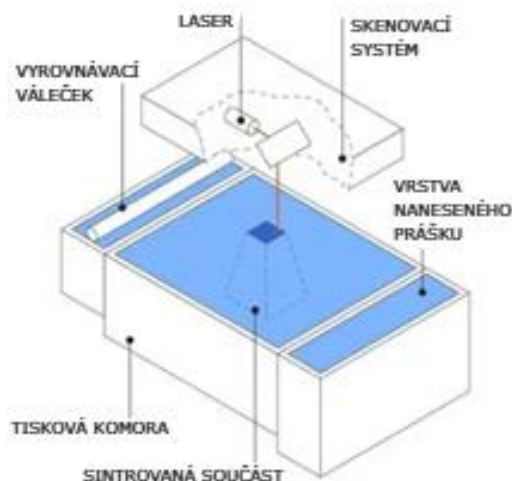


Obr. 3: Technologie 3D tisku SLA

Zdroj: Vlastní zpracování dle Formlabs (2025)

Práškové

Metoda SLS využívá jemný práškový materiál, který je spékán (sintrován) výkonným laserem. Na rozdíl od jiných technologií nedochází k úplnému tavení, ale pouze ke spojení částic prášku ve vymezených částech vrstvy. Pevný výtisk je po dokončení celé vrstvy obklopen nespékaným práškem, který slouží jako přirozená podpora proti zborcení vrstev. Tato technologie umožňuje tisk velmi složitých geometrií bez nutnosti dalších pomocných podpěr, znázorněno na Obr. 4. (Stříteský et al., 2019, s. 20)

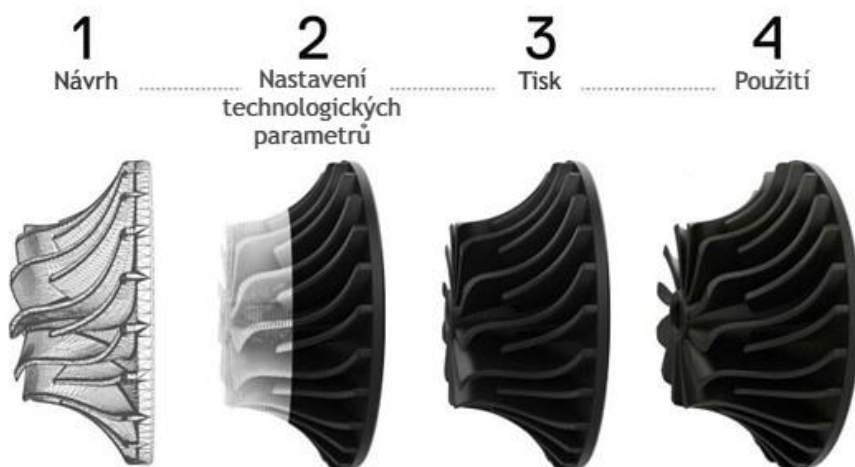


Obr. 4: Technologie 3D tisku SLS

Zdroj: Vlastní zpracování dle Formlabs (2025)

1.1.2 Fáze 3D tisku

Proces 3D tisku lze rozdělit do tří klíčových fází, tvorba modelu, výrobní fáze a testovací fáze. Každá z těchto etap je nezbytná pro zajištění kvality a funkčnosti finálního produktu, přičemž jejich vzájemná návaznost je klíčová pro úspěšnou realizaci celého výrobního cyklu. Znázornění těchto fází je vyobrazeno na Obr. 5.



Obr. 5: Fáze 3D tisku

Zdroj: Vlastní zpracování dle Markforged (2025)

Návrh

Prvotním a nezbytným krokem v procesu 3D tisku je získání digitálního trojrozměrného modelu. Existují tři základní metody pro jeho vytvoření. Vytvořením modelu ve specializovaném CAD softwaru, stažení hotového modelu z online databáze, nebo 3D skenování existujícího fyzického objektu. Výsledný model se obvykle ukládá ve formátu Standard Triangle Language (STL). Tento formát slouží jako vstupní data pro následující fázi, jelikož uchovávají geometrii objektu pomocí trojúhelníkové sítě, která je klíčová pro přesný popis povrchu a integrity modelu. (Stříteský et al., 2019, s. 24-26)

Výroba

Po vytvoření modelu je nezbytné zpracování ve specializovaném slicing softwaru (např. Cura, Aura nebo PrusaSlicer). V tomto programu je digitální model rozdělen na tenké vrstvy, a zároveň jsou zde nastaveny veškeré parametry tisku. Mezi nejdůležitější nastavení patří výplň, tloušťka vrstvy, rychlost tisku a chlazení. Kritickou součástí jsou také podpěry, které zajišťují stabilitu tisku v případě převísů. Na základě těchto parametrů software vygeneruje G-kód, což je soubor instrukcí, které tiskárna využívá pro přesný pohyb tiskové hlavy a nanášení materiálu. Před zahájením tisku je nutná kalibrace tiskárny, zejména tiskové plochy a teploty trysky, aby byly zajištěny optimální podmínky pro adhezi materiálu. (Stříteský et al., 2019, s. 24-25, 35-38, 42)

Finální úprava

Po dokončení tisku následuje post-procesní fáze, která je klíčová pro dosažení finálních vlastností a vzhledu objektu. Tento proces zahrnuje odstranění pomocných podpěr, broušení, lakování či barvení. U specifických materiálů, jako jsou kovové výtisky, může být nezbytná i tepelná úprava, která zvyšuje mechanickou pevnost materiálu. Závěrečným krokem je kontrola kvality, při níž se ověřuje rozměrová přesnost, pevnost a vizuální integrita výtisku, což zajišťuje, že finální produkt splňuje požadované specifikace. (Stříteský et al., 2019, s. 42)

1.2 3D tisk kompozitů

3D tisk kompozitních materiálů představuje významnou oblast aditivní výroby, která spojuje výhody polymerních matric s mechanickými vlastnostmi výztužných složek. Využití kompozitů v rámci 3D tisku umožňuje výrobu dílů s vyšší pevností, tuhostí a odolností, přičemž si zachovávají nízkou hmotnost a flexibilitu návrhu. Díky tomu nacházejí uplatnění v řadě průmyslových odvětví, od automobilového a leteckého průmyslu až po zdravotnictví a sportovní techniku (Blanco, 2020). V této kapitole budou představeny dvě klíčové metody využívané pro tisk kompozitních materiálů Fused Filament Fabrication (FFF) a Continuous Filament Fabrication (CFF), které se liší jak principem tisku, tak typem výztuže a výslednými vlastnostmi tištěných dílů.

1.2.1 Fused Filament Fabrication

FFF představuje jednu z nejrozšířenějších metod aditivní výroby. Princip spočívá v postupném ukládání vrstev roztaveného termoplastického materiálu, který je taven a extrudován tryskou na tiskovou plochu. Díky své cenové dostupnosti, jednoduché obsluze a široké škále

použitelných materiálů se metoda tisku FFF hojně využívá pro prototypování i malosériovou výrobu. Tato metoda umožňuje tvorbu složitých geometrických struktur a tvarů, které by byly tradičními výrobními postupy obtížné realizovat. Významnou výhodou je také možnost využití modifikovaných filamentů, které obsahují výztužné složky v podobě částic uhlíkových nebo skelných vláken, ale i například retardéry hoření, čímž se významně zlepšují mechanické vlastnosti výsledných dílů. (Blanco, 2020) (Kantaros et al.,2023)

Volba vhodného materiálu hraje zásadní roli při optimalizaci výsledků tisku. Filamenty používané v technologii FFF se obvykle skládají z polymerní matrice, mezi které patří například kyselina polymléčná (PLA), akrylonitrilbutadienstyren (ABS), polyethylentereftalát (PET) nebo polyamid (PA). Tyto materiály lze dále upravovat přidáním krátkých výztužných vláken, která jsou rozptýlena v matrici a přispívají ke zvýšení pevnosti, tuhosti a tepelné odolnosti. Uhlíková vlákna navíc poskytují dobrou elektrickou vodivost, což rozšiřuje jejich využití v oblasti elektroniky. Skelná vlákna například zvyšují houževnatost a odolnost vůči nárazům. Vzhledem k tomu, že vlákna nejsou kontinuální nelze přesně řídit jejich orientaci, což může vést k anisotropii mechanických vlastností. Přesto se tyto filamenty hojně využívají v průmyslovém odvětví, zejména tam, kde je klíčová kombinace nízké hmotnosti a zvýšené pevnosti. (Kantaros et al.,2023) (Blanco, 2020)

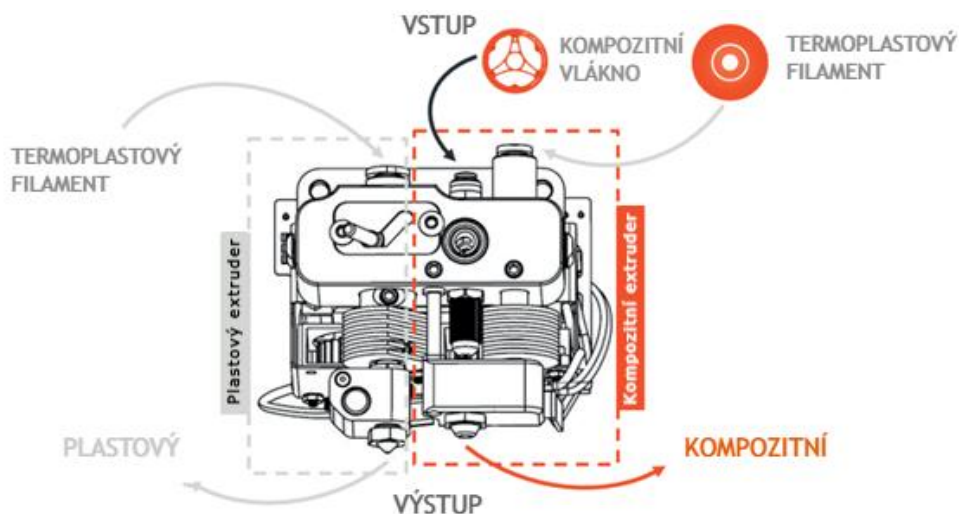
Proces tisku kompozitních materiálů metodou FFF však přináší kromě výhod i řadu technických výzev, které je nutné zohlednit při návrhu výrobního procesu. Jedním z hlavních problémů je opotřebení tiskových trysek, způsobené abrazivními částicemi, jako jsou uhlíková nebo skleněná vlákna obsažená ve filamentových směsích. Tento jev lze zmírnit použitím trysek z kalené oceli nebo jiných odolných materiálů. Mezi klíčové procesní faktory patří tisková teplota, rychlost extruze a chlazení, které musí být přizpůsobeny konkrétnímu typu materiálu a geometrii dílu. (Kantaros et al.,2023)

Přes tyto technické výzvy nacházejí kompozitní materiály tištěné metodou FFF široké uplatnění v průmyslové praxi. V automobilovém průmyslu se využívají pro výrobu lehkých, ale pevných komponentů jako jsou kryty, držáky či montážní přípravky. V letectví slouží jako konstrukční prvky s vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti. Zatímco ve zdravotnictví se uplatňují při výrobě protetiky a ortopedických pomůcek, kde je důležitá nízká hmotnost a možnost individuálního přizpůsobení. Významné využití nacházejí také ve sportovním vybavení, při výrobě rámu kol nebo sportovních náčiní. Budoucí vývoj v oblasti FFF směřuje k vývoji nových filamentů s přídavkem nanočástic, které dále zlepšují mechanické, tepelné i funkční vlastnosti tištěných dílů. Očekává se rovněž automatizace tiskových procesů a zavedení hybridních technologií, které umožní kombinaci různých materiálů v rámci jednoho výrobního cyklu, čímž se rozšíří možnosti aplikace této technologie v moderním průmyslu. (Kantaros et al.,2023)

1.2.2 Continuous Filament Fabrication

Technologie CFF představuje jednu z nejvýznamnějších metod aditivní výroby kompozitních materiálů. Její podstata spočívá v kombinaci polymerní matrice a kontinuálního výztužného vlákna, které se vkládá během tisku přímo do termoplastické struktury. Proces typicky probíhá pomocí dvou trysek, které jsou detailněji popsány na Obr. 6. Jedna tryska ukládá základní polymerní materiál, zatímco druhá zavádí spojitě vlákno, obvykle uhlíkové, skelné nebo aramidové. Díky této technologii lze dosáhnout dílů s vysokou pevností a tuhostí, přičemž

výsledné mechanické vlastnosti se přibližují hodnotám běžně spojovanými s hliníkovými slitinami. (Kabir et al., 2020).



Obr. 6: Popis kompozitní tiskové hlavy využívající technologii CFF

Zdroj: Vlastní zpracování dle Anisoprint (2020)

Jednou z klíčových výhod CFF je možnost cíleně řídit orientaci vláken v rámci jednotlivých vrstev. Vlákná mohou být ukládána v různých směrech, což umožňuje optimalizovat vlastnosti výsledného dílu podle očekávaného zatížení. Orientace vláken významně ovlivňuje pevnost v tahu, modul pružnosti i odolnost vůči delaminaci. Experimenty prokázaly, že vhodné směřování kontinuálních uhlíkových vláken vede k zvýšení pevnosti v tahu a tuhosti kompozitu, a to v některých případech až několikanásobně oproti samotné polymerní matici. Významnou výhodou CFF oproti metodě FFF je schopnost pracovat se spojitým vláknem, nikoli pouze s krátkými částicemi rozptýlenými v matici. Možnost kombinovat nízkou hmotnost polymerní matrice s vysokou pevností spojitých vláken činí z CFF technologii atraktivní pro průmyslovou praxi. (Kabir et al., 2020)

1.3 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou vícesložkové materiály, které vznikají spojením dvou a více složek s odlišnými fyzikálními či chemickými vlastnostmi. Typicky se skládají z matrice, která tvoří spojitou fázi, a disperze, jež plní nosnou funkci. Matrice bývá nejčastěji polymerní, kovová nebo keramická a slouží k přenosu zatížení, ochraně výztuže a zajištění celistvosti materiálu. Výztuž může mít podobu vláken, částic nebo tkanin a výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. Díky této kombinaci lze dosáhnout vlastností, které by jednotlivé složky samostatně neměly, například vysoké pevnosti při nízké hmotnosti, odolnosti vůči korozi, tepelnému namáhání či nárazům. Vláknité kompozitní materiály představují jednu z nejrozšířenějších skupin kompozitů, u nichž je nosnou složkou svazek dlouhých či krátkých vláken a maticí bývá nejčastěji polymer, kov nebo keramika. Dělení kompozitů dle typu výztuže je vyobrazeno na Obr. 7. (Vojtěch, 2006, s.152-173) (Vrbka, 2008, s. 5-8, s. 11-12)



Obr. 7: Dělení kompozitů dle typu výztuže

Zdroj: Vojtěch, (2006) s. 154

Kompozitní materiály nacházejí široké uplatnění napříč průmyslovými odvětvími. V automobilovém a leteckém průmyslu se využívají pro konstrukci lehkých a pevných dílů, což může přispívat ke snížení spotřeby paliva a emisí. Ve stavebnictví se používají pro výztuže a konstrukční prvky s dlouhou životností. Významnou roli hrají také v medicíně, sportovním vybavení a energetice. Nové generace kompozitů, například s nanovýztuží nebo hybridní strukturou, rozšiřují možnosti jejich využití a přinášejí nové funkční vlastnosti, jako je elektrická vodivost, samoopravitelnost nebo tepelná regulace. Kompozitní materiály představují důležitou kategorii materiálů, které kombinují různé vlastnosti, u kterých nejde dosáhnout tradičních materiálů, jako jsou např. kovy či keramika. (Kabir et al., 2020) (Zheng at al., 2025)

1.3.1 Matrice

Matrice tvoří spojitou fázi kompozitního materiálu a plní klíčovou roli při přenosu mechanického zatížení na výztužnou složku. Zajišťuje celistvost tělesa tím, že spojuje vlákna nebo částice do jednoho kompaktního celku, chrání výztuž před vnějšími vlivy prostředí a vytváří funkční i estetický povrch. Důležitou vlastností matrice je schopnost přenášet zatížení nejen v místech působení vnějších sil, ale také v oblastech přerušení vláken, mezi krátkými nebo nerovnoměrně zatíženými vlákny. Matrice rovněž přemostuje trhliny ve výztuži a zajišťuje rovnoměrné rozložení napětí v celém objemu materiálu. Aby kompozit dosáhl požadovaných mechanických vlastností, musí být materiálové vlastnosti matrice a výztuže kompatibilní, zejména z hlediska adheze, tažnosti a teplotní stability. (Vrbka, 2008, s. 11-12)

V praxi se nejčastěji používají polymerní matrice, které se dělí na termosety (reaktroplasty) a termoplasty. Termosetické pryskyřice, jako jsou epoxidy, polyesterové či fenolické pryskyřice, vytvářejí při vytvrzování prostorově zesíťnou strukturu a vyznačují se vysokou tepelnou stabilitou a odolností vůči creepu. Například epoxidová pryskyřice dosahuje modulu pružnosti 1,1–3 GPa a pevnosti 35–90 MPa. Naproti tomu termoplastické matrice, například polyamidy nebo polyethylentereftalát, poskytují lepší houževnatost a možnost opakovaného zpracování, což je výhodné pro některé konstrukční aplikace. Termoplasty, jako polypropylen (PP), polykarbonát (PC) polyetheretherketone (PEEK) a jiné materiály, měknou při zahřátí a po ochlazení znovu tuhnou. Jejich výhodou je vysoká tažnost a možnost opakovaného tvarování, nevýhodou pak vyšší viskozita při zpracování, která může vést k defektům, jako jsou bubliny nebo nedostatečné smočení vláken. (Vrbka, 2008, s. 11-12)

Kromě polymerních matric se v technických aplikacích využívají také kovové matrice (např. hliník (Al), hořčík (Mg), titan (Ti)) a keramické matrice (např. oxid hlinitý (Al_2O_3), karbid křemíku (SiC)).

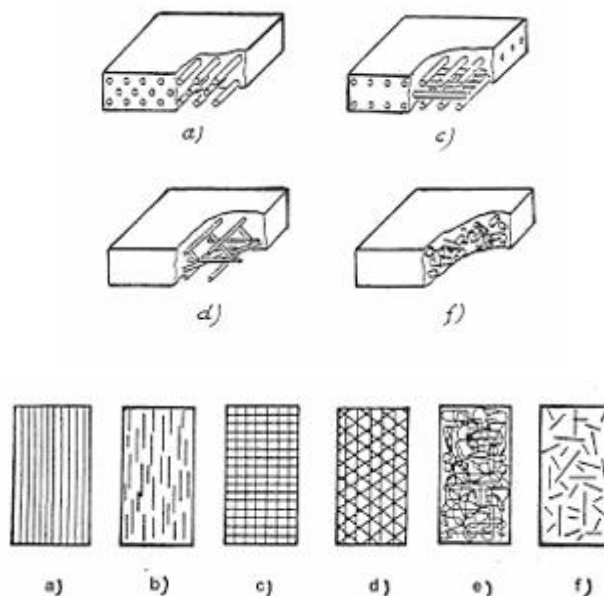
Kovové matrice se vyznačují vysokou tepelnou vodivostí, pevností a odolností vůči opotřebení, což je činí vhodnými pro konstrukční díly vystavené extrémnímu zatížení. Keramické matrice disponují vynikající tepelnou stabilitou, odolností vůči oxidaci a koroznímu prostředí, což je předurčuje pro aplikace v prostředích s vysokými teplotami a agresivními médii. (Vrbka, 2008, s. 5-6, 11-12) (Zheng et al., 2025)

1.3.2 Typy výztuží – Krátká vlákna

Krátkovláknové kompozity se využívají zejména tam, kde je požadována zlepšená pevnost a tuhost ve více směrech současně. Na rozdíl od dlouhovláknových jednosměrných kompozitů, které vykazují výraznou anizotropii a nízké hodnoty pevnosti i modulu pružnosti v příčném směru, poskytují krátkovláknové kompozity díky náhodnému uspořádání vláken výhodnější izotropní vlastnosti. Jejich chování je však podmíněno účinným přenosem zatížení mezi matricí a vláknem prostřednictvím smykového napětí na rozhraní. Délka vláken musí být dostatečná, aby bylo možné napětí efektivně přenášet, jinak se mechanické vlastnosti výrazně snižují. Krátkovláknové kompozity tak představují kompromis mezi jednodušší technologií výroby a nižšími hodnotami pevnostních parametrů ve srovnání s kompozity dlouhovláknovými. (Vrbka, 2008, s. 41-52)

1.3.3 Typy výztuží – Dlouhá vlákna

Typickým znakem vláknitých kompozitních materiálů je jejich anizotropie, tedy závislost mechanických vlastností na směru zatížení. Na Obr. 8 se nachází typy uspořádání kompozitních vláken. Orientace výztužných vláken má zásadní vliv na pevnost v tahu, modul pružnosti. Moderní kompozity jsou navrhovány tak, aby využívaly synergii mezi složkami, například uhlíková vlákna poskytují vysokou pevnost a tuhost, zatímco polymerní matrice zajišťuje pružnost a chemickou odolnost. Výzkum ukazuje, že správná kombinace složek a jejich prostorové uspořádání může výrazně zlepšit výkon materiálu v konkrétních aplikacích. Význam vláknitých kompozitů spočívá v jejich možnosti nahradit tradiční konstrukční materiály tam, kde je vyžadována nízká hmotnost a současně vysoká mechanická výkonnost. (Vrbka, 2008, s. 5-8)



Obr. 8: Typy vláknových kompozitů

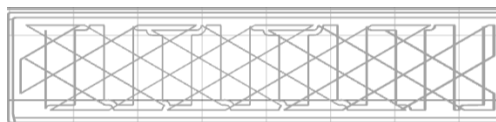
a) jednosměrná dlouhá vlákna, b) jednosměrná krátká vlákna, c) dvousměrné vyztužení, d) vícesměrné vyztužení, e) náhodná orientace vláken, f) náhodná orientace krátkých vláken

Zdroj: Vrbka, (2008), s.6

1.3.4 Typy výplní pro kompozitní tisk

1.3.5 Isogrid

Isogrid je izotropní výtuzná struktura založená na trojúhelníkové mřížce, která poskytuje rovnoměrné mechanické vlastnosti ve všech směrech. Je ideální pro aplikace, kde není znám přesný směr zatížení, nebo kde se zatížení mění v čase či prostoru. Díky své geometrii efektivně rozkládá napětí a zajišťuje vysokou tuhost při relativně nízké hmotnosti. Výplň Isogrid, zobrazena na Obr. 9, je univerzální volbou pro většinu konstrukčních dílů, které jsou vystaveny kombinovanému zatížení. Výhodou je také dobrá tisknutelnost a předvídatelné chování při mechanických zkouškách. V kombinaci s výtuznými perimetry poskytuje velmi vyvážený poměr pevnosti a hmotnosti. (Andereozzi, 2024)



Obr. 9: Výplň Isogrid

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

1.3.6 Rhombic grid

Rhombic grid je výtuzná struktura založená na čtvercové mřížce, která se nanáší podélně a příčně v úhlech 0° a 90° , zobrazena na Obr. 10. Kombinuje výhodu nižší hmotnosti s relativně vysokou tuhostí. Tento typ je vhodný pro aplikace, kde není nutná plná výplň, ale zároveň je

požadována rovnoměrná distribuce napětí. Díky své geometrii umožňuje přenos zatížení v několika směrech, i když ne tak efektivně jako izotropní struktury typu Isogrid. Materiál je pevnější ve směru vláken než kolmo na ně, což jej činí výhodným pro aplikace s převážně jednosměrným zatížením například tahové, avšak méně vhodným pro vícesměrné namáhání. Výhodou je také kratší doba tisku oproti plné výplni typu Solid. (Zhou, 2023)

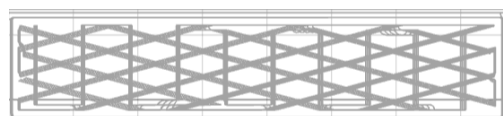


Obr. 10: Výplň Rhombic grid

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

1.3.7 Tetragrid

Tetragrid je tvořena čtyřúhelníkovou mřížkovou strukturou s rovnoměrně rozloženými vlákny, což zajišťuje vyvážené rozložení napětí při zatížení. Vlákná jsou ukládána s úhly 0° a 30° . V prostředí sliceru Aura je možné tuto výplň aplikovat na specifické vrstvy nebo oblasti dílu, čímž lze optimalizovat mechanické vlastnosti bez zbytečné spotřeby materiálu. Tato výplň je však náročnější na tisk a vyžaduje přesné nastavení parametrů. Výsledkem je pevná a lehká struktura. Výplň vyobrazena na Obr. 11.

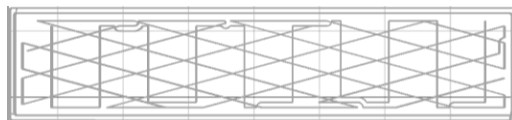


Obr. 11: Výplň Tetragrid

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

1.3.8 Anisogrid

Anisogrid je anizotropní výtuzná struktura, která je optimalizována pro přenos zatížení v jednom hlavním směru, vyobrazena na Obr. 12. Vlákná jsou orientována tak, aby maximalizovala pevnost a tuhost v předem definovaném směru, což je ideální pro díly, u nichž je znám směr působící síly. Nevýhodou je nižší odolnost vůči zatížení v jiných směrech, což může být nevyhovující u složitějších aplikací. Anisogrid je vhodný například pro výtuhy nosníků, ramen nebo ploch zatížených ohybem v jednom směru. Tento typ výplně je doporučen pro pokročilé aplikace s jasně definovaným zatížením.



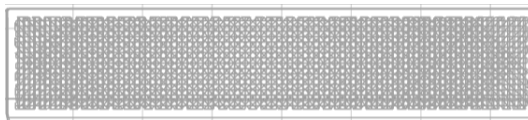
Obr. 12: Výplň Anisogrid

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

1.3.9 Solid

Solid představuje nejpevnější typ výplně, kdy jsou výtuzná vlákna vedena v plné hustotě bez mezer a pokrývají celý objem výplně. Je určena pro aplikace, kde je prioritou maximální tuhost a pevnost, a to za cenu vyšší hmotnosti a delší doby tisku. Vlákná se nanášejí postupně

ve směru kolmém 90° , následně podélném 0° , a nakonec pod úhly 45° a -45° , čímž vzniká kompaktní a směrově vyvážená struktura. Díky této konfiguraci umožňuje výplň Solid efektivní přenos zatížení napříč celou strukturou, což ji činí ideální pro díly vystavené vysokému tahovému, ohybovému nebo tlakovému zatížení. V kombinaci s výztužnými perimetry tvoří extrémně odolnou strukturu, která minimalizuje deformace. Vyšší spotřeba a delší tisk ji činí neefektivní tam, kde není nutná maximální pevnost. Výplně zobrazeny na obrázku č. 13. (Anisoprint, 2025)



Obr. 13: Výplň Solid

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

1.4 Uhlíkové vlákno

Uhlíková vlákna patří mezi nejvýznamnější výztužné materiály využívané v moderních kompozitech. Vyznačují se vysokou pevností v tahu, modulem pružnosti a současně nízkou hustotou, což umožňuje dosažení výjimečného poměru pevnosti k hmotnosti. Podle mechanických parametrů se rozlišují standardní vlákna s pevností pod 1 GPa a modulovým rozsahem do 100 GPa a vysoce výkonná vlákna s pevností až 7 GPa a modulem 230–950 GPa. K jejich výrobě se využívají různé prekurzory, nejčastěji polyakrylonitril (PAN) a mezofázové smoly, které zajišťují vysokou stabilitu a opakovatelnost vlastností. (Grégr, 2005)

Uhlíková vlákna se dodávají ve formě monofilů, svazků, tkanin, netkaných textilií či speciálních 3D struktur. Podle mechanických parametrů se vlákna rozděluje na vysoce pevná (HT), středně modulová (IM), vysokomodulová (HM) a ultramodulová (UHM). Rozdíly mezi jednotlivými typy spočívají nejen v hodnotách pevnosti a modulu, ale i v ceně, která roste se zvyšující se kvalitou a jemností svazků. Povrchová úprava je klíčová pro zajištění kvalitní adheze k matricím. Často se využívají plazmové technologie nebo chemická funkcionalizace povrchu. Pro zpracování vláken do kompozitních materiálů se používají technologie pultruze vakuových infuzí nebo Resin Transfer Moduling (RTM). (Grégr, 2005)

1.4.1 Výroba uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna se vyrábí, termochemickým procesem, pyrolýzou. Základní surovinou je prekurzor, z kterého se vyrábí PAN vlákna. Při výrobě uhlíkových vláken je prekurzor nejprve připraven pomocí tavného zvlákňování nebo zvlákňování z roztoku. Struktura prekurzoru ovlivňuje konečné vlastnosti vláken, zejména jeho pevnostní parametry. V průběhu zvlákňování dochází k protahování vláken. Následující fází je stabilizace, kdy se vlákna vystavují teplotám $200\text{--}450^\circ\text{C}$ po dobu 20–30 minut za přítomnosti vzduchu, což vede k vytvoření teplotně odolné zesílené struktury. Celý proces je regulován tak, aby se předešlo k nadměrnému zahřívání vláken. Používají se vyhřívané komory a válce, které odebírají přebytečné teplo. (Kordcarbon, 2020) (Vrbka, 2008, s. 9)

Dalším klíčovým krokem je karbonizace probíhající v inertní atmosféře bez přístupu kyslíku a obvykle za přítomnosti dusíku při teplotách $1\,000\text{--}2\,000^\circ\text{C}$. Odstraněním většiny neuhlíkových

prvků vznikají vlákna s obsahem uhlíku mezi 85–95 %. Pokud je cílem vyšší obsah uhlíku a vyšší stupeň uspořádanosti, provádí se grafitizace při teplotách 2 400–3 000 °C, jejímž výsledkem je vláknitá struktura s obsahem uhlíku nad 99 %. (kordcarbon, 2020)

Povrchová úprava vlákna zahrnuje oxidaci za účelem zlepšení adheze k pryskyřicím, aby byla zajištěna jejich lepší kompatibilita s kompozitní matricí. Provádí se oxidačními procesy pomocí plynů nebo chemických roztoků, například kyseliny dusičné. Vlákna mohou být následně opatřena ochrannou vrstvou, která minimalizují riziko mechanického poškození při manipulaci a dalším zpracování. (kordcarbon, 2020)

1.5 Aplikace 3D tiskem přípravných kompozitů

Aditivní výroba kompozitních materiálů představuje dynamicky se rozvíjející oblast, která umožňuje vytvářet funkční díly s optimalizovanými mechanickými vlastnostmi. Využití polymerních kompozitů v 3D tisku spočívá zejména v kombinaci polymerní matrice s výztužnými složkami, jako jsou uhlíková, skleněná či keramická vlákna, případně kovové částice. Tato kombinace umožňuje optimalizaci tuhosti, pevnosti, houževnatosti a dalších parametrů podle požadavků konkrétní aplikace. (Park et al., 2022)

V konstrukčních aplikacích se kompozity využívají pro výrobu lehkých, ale mechanicky odolných dílů, například v leteckém, automobilovém či sportovním průmyslu. Biomedicínské využití zahrnuje tisk scaffoldů (využívá se v tkáňovém inženýrství a regenerativní medicíně) z biokompatibilních polymerů například polykaprolakton (PCL), gelatin methacryloyl (GelMA), které slouží jako podpůrné struktury pro regeneraci kostí, chrupavek nebo měkkých tkání. V oblasti elektroniky se kompozitní filamenty používají k výrobě flexibilních senzorů, nositelných zařízení a integrovaných obvodů, přičemž se často využívají vodivé inkousty na bázi uhlíkových nanomateriálů. (Park et al., 2022)

Energetické aplikace zahrnují tisk elektrod pro lithium-iontové baterie, super kondenzátory a palivové články, kde architektura materiálu výrazně ovlivňuje vodivost, kapacitu a životnost. Pokročilé kompozity, jako jsou meta materiály nebo hierarchicky uspořádané struktury, umožňují dosažení specifických vlastností, například auxetického chování nebo řízené deformace. Díky možnosti přesného řízení orientace vláken a složení matric lze vytvářet díly s gradientními vlastnostmi, což je výhodné pro aplikace vyžadující kombinaci tuhosti a pružnosti. (Park et al., 2022)

Technologie 3D tisku kompozitů tak nabízí široké spektrum využití od prototypování přes malosériovou výrobu až po finální funkční komponenty. Její flexibilita, materiálová variabilita a schopnost integrovat více funkcí do jednoho dílu ji činí nepostradatelnou v moderním inženýrství. (Park et al., 2022)

1.6 Dynamické chování kompozičních materiálů

Metody testování vibračních charakteristik představují účinný nástroj pro charakterizaci dynamických vlastností kompozitních materiálů. Princip spočívá v určení modulů pružnosti z rezonančních frekvencí, přičemž tlumení je odvozováno z šířky rezonanční křivky. Tento přístup je proto vhodný pro popis konečných vlastností kompozitů. Přínos spočívá také v tom, že poskytuje ucelený pohled na chování kompozitních struktur při dynamickém namáhání,

což má zásadní význam pro jejich využití v konstrukčních aplikacích vystavených vibracím. Získané údaje tak umožňují nejen pochopit fyzikální podstatu vibrační odezvy, ale zároveň slouží jako podklad pro optimalizaci v rámci průmyslovým aplikacím. (Černý et al., 2000)

Kompozitní materiály se vyznačují specifickou strukturou, v níž je výztuž ve formě vláken kombinována s matricí. Tato kombinace umožňuje dosáhnout vlastností, které by jednotlivé složky samostatně neměly. Z hlediska vibračního chování hraje roli nejen typ použitého vlákna, ale také jeho objemový podíl, uspořádání a kvalita vazby s matricí. Výsledky měření na kompozitech ukázaly, že zvýšením podílu vláken dochází k růstu hodnot dynamických modulů, avšak vliv druhu vlákna je méně výrazný u smykového chování než u modulu v tahu. Přítomnost pórů a celková mikrostruktura navíc významně ovlivňují schopnost kompozitu tlumit vibrace, a proto je nutné brát v úvahu i parametry zpracování a tepelného ošetření materiálu. (Černý et al., 2000)

U kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny bylo prokázáno, že jejich dynamické vlastnosti silně závisí na vlastnostech samotných vláken i na způsobu následného zpracování. Podélný modul pružnosti je určován zejména modulem použitého uhlíkového vlákna a jeho množstvím v kompozitu, zatímco smykové chování odráží především parametry matrice a kvalitu mezifázového rozhraní. Významný vliv má i tepelná úprava, neboť po grafitizaci mohou vlákna vykazovat zvýšenou tuhost, zatímco matrice může naopak podléhat procesům vedoucím k jejímu oslabení. Rozdíly mezi PAN a vlákny z dehetu ukazují, že vlákna s nižším či středním modulem jsou citlivější na zpracování a přispívají k výraznějšímu růstu modulu po tepelném ošetření než vlákna s vysokým modulem. Tyto výsledky potvrzují, že dynamické chování uhlíkových kompozitů není určeno pouze typem vlákna, ale také interakcí všech složek materiálu a podmínkami zpracování, které mohou měnit rovnováhu mezi tuhostí a schopností tlumení. (Černý et al., 2000)

2 Experimentální část

2.1 Použité materiály

V rámci experimentální části byly použity tři materiály Smooth PA 750cc, CFC PA a výztužné uhlíkové vlákno. Smooth PA byl zvolen jako polymerní matrice. Kontinuální uhlíkové vlákno sloužilo jako výztužný prvek vzorků a zajišťovalo zlepšení mechanických vlastností vytištěných vzorků. Materiál CFC PA plnil funkci pojiva k uhlíkovému vláknu. Tento materiál byl extrudován společně s vláknem do jedné trysky, znázorněno na Obr. 15. Smooth PA byl extrudován samostatně druhou tryskou, Obr. 6. Tyto materiály byly zvoleny s ohledem na jejich vzájemnou kompatibilitu a vhodnost pro technologii koextruze kompozitních vláken (CFC).

2.1.1 Smooth PA 750cc

Anisoprint Smooth PA 750cc je vyrobený z polyamid 12 (PA12) obsahujícího 12 % uhlíkových částic. Při výrobě vzorků byl použit filament Smooth PA, který je určen pro tisk povrchových a nevyztužených částí kompozitních dílů. Filament byl navržen tak, aby poskytoval dokonalou kvalitu povrchu bez nutnosti sušení, což výrazně usnadňuje jeho použití v běžných provozních podmínkách. V rámci systému Anisoprint je Smooth PA kombinován s CFC PA, přičemž oba materiály byly optimalizovány pro synergické použití. Smooth PA se zavádí výhradně do plastového extruderu, zatímco CFC PA je určen pro kompozitní extruder. Vlastnosti materiálu jsou zobrazeny v Tab. 1. (Anisoprint, 2020) (3D Manufaktura, 2025a)

Tab. 1: Technické vlastnosti materiálu Smooth PA

Anisoprint Smooth PA	
Vlastnost	Hodnota
Průměr struny	1,75 mm
Teplota trysky	260–300 °C
Teplota tiskové podložky	50–70 °C
Pevnost v tahu	71,8 ± 3,1 MPa
Pevnost v ohybu	109,97 ± 1,38 MPa
Rázová houževnatost Charpy	12,52 ± 0,68 kJ/m ²

Zdroj: Vlastní zpracování dle 3D Manufaktura (2025a)

2.1.2 CFC PA

CFC PA je tvořen termoplastickým polymerem na bázi polyamid 12. Tento materiál byl speciálně vyvinut pro technologii kontinuální koextruze vláken a je dodáván ve formě struny o průměru 1,75 mm. Díky své nízké viskozitě umožňuje CFC PA kvalitní spojení vrstev výztužného vlákna s plastem. Tím je dosaženo vysoké mechanické integrity výsledného kompozitu. Materiál se vyznačuje nízkou schopností sorpce pohlcování vlhkosti a může být zpracováván i v otevřeném tiskovém prostoru bez nutnosti sušení po delší dobu. Vlastnosti materiálu jsou vyobrazeny v Tab. 2. (Anisoprint, 2020) (3D Manufaktura, 2025b)

Tab. 2: Technické vlastnosti materiálu CFC PA

Anisoprint CFC PA	
Vlastnost	Hodnota
Průměr struny	1,75 mm
Teplota trysky	250–260 °C
Teplota tiskové podložky	0–50 °C
Pevnost v tahu	56,8 ± 0,53 MPa
Pevnost v ohybu	68,7 ± 1,8 MPa
Rázová houževnatost Charpy	11,42 ± 0,9 kJ/m ²

Zdroj: Vlastní zpracování dle 3D Manufactura (2025b)

2.1.3 Uhlíkové vlákno Anisoprint

Kompozitní kontinuální karbonové vlákno Anisoprint CCF 1,5K, složené z tisíců monofilamentů impregnovaných polymerní složkou. Tato struktura zajišťuje kvalitní spojení s termoplastickou maticí a umožňuje efektivní přenos mechanického zatížení. Výroba dílů probíhá technologií CFC, která umožňuje koextruzi vláken s plastem, a tím vzniká kompozit s přizpůsobenými vlastnostmi. Vlákno vykazuje vysokou mechanickou výkonnost, modul pružnosti činí 135±15 GPa, pevnost v tahu dosahuje 2130±230 MPa. Objemový podíl vláken v konečném produktu činí přibližně 25 %. Materiál je 30x tužší a pevnější než běžný plast, více než pětinasobně pevnější než hliník 2024-T351 a sedminásobně lehčí než ocel. Přehled vlastností je znázorněn v Tab. 3. (Anisoprint, 2020) (3D Manufaktura, 2025c)

Tab. 3: Technické vlastnosti materiálu Anisoprint CCF -1,5K

Anisoprint CCF -1,5K 750m kompozitní karbonové vlákno	
Poměrové charakteristiky	
Tuhost a pevnost	30× vyšší než běžný plast
Poměr pevnosti k hmotnosti	>5× vyšší než u hliníku 2024-T351
Poměr tuhosti k hmotnosti	>5× vyšší než u hliníku 2024-T351
Hmotnostní poměr	7× lehčí než ocel, pevné jako nerezová ocel
Mechanické vlastnosti	
Průměr vlákna	0,35 mm
Modul pružnosti	149 GPa
Pevnost v tahu	2206 MPa

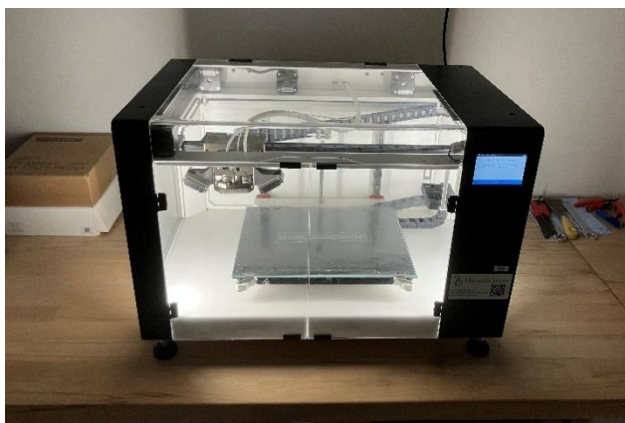
Zdroj: Vlastní zpracování dle 3D Manufactura (2025c)

2.2 Použité přístroje

Pro experimentální část byla využita moderní laboratorní zařízení určená k výrobě a testování kompozitních vzorků. Pro výrobu byl použit 3D tiskový systém Anisoprint Composer A4, který umožňuje výrobu kompozitních dílů metodou CFC. K vyhodnocení mechanických vlastností byly dále využity přístroje Instron 3345 pro tahové a ohybové zkoušky, vibrační stolice LDS V650 a drsnoměr Insize ISR-C300 pro měření povrchové drsnosti. Pro detailní pozorování povrchu a struktury výtisků byl použit digitální mikroskop Keyence VHX-6000, který umožnil optickou analýzu povrchové kvality a rozložení vláken v matici. Kombinace těchto přístrojů poskytla komplexní přehled o mechanickém i vizuálním chování testovaných vzorků.

2.2.1 Composer A4

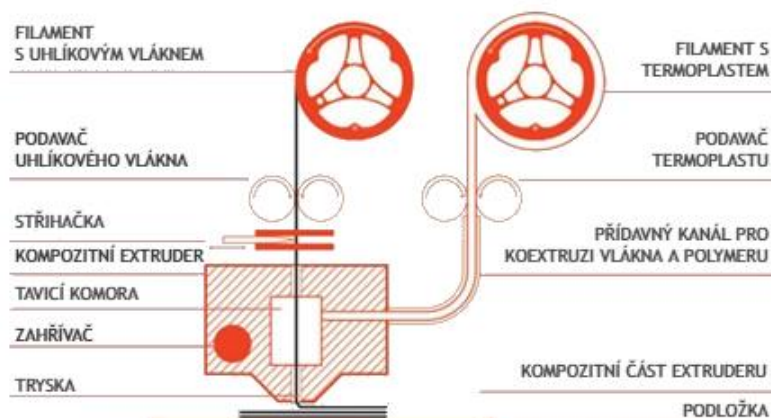
Anisoprint Composer je kompozitní 3D tiskárna využívající technologii CFC, která umožňuje tisk z termoplastické matrice a kontinuální výztuže uhlíkových, skelných nebo aramidových vláken. Tiskárna, zobrazená na Obr. 14, je navržena pro výrobu funkčních a strukturálně namáhaných dílů s vysokou pevností při zachování nízké hmotnosti. Základní materiál, nejčastěji termoplast, se tiskne standardní termoplastickou tryskou, zatímco vlákno je ukládáno do požadovaných oblastí dílu s přesně definovanou orientací, čímž se maximalizuje pevnost v tahu, ohybu. Anisoprint Composer umožňuje tisk dílů s vysokou rozměrovou přesností a minimalizovanou deformací díky pokročilému řízení teploty podložky a extruderu. Tiskárna je vhodná pro vývoj prototypů, konstrukčních komponentů, nástrojů i speciálních přípravků v průmyslových a technických aplikacích. (Anisoprint, 2020)



Obr. 14: Anisoprint Composer A4

Zdroj: Vlastní fotografie (2025)

V rámci experimentální části bylo vytištěno celkem 75 zkušebních vzorků pomocí kompozitní 3D tiskárny Anisoprint Composer A4. Z tohoto počtu bylo 35 vzorků určeno pro tahovou zkoušku, 30 vzorků pro ohybovou zkoušku a 10 pro dynamické testování. Každý typ vzorku byl vytištěn s odlišným typem výplně a následně podroben mechanickému zatížení podle charakteru zkoušky.



Obr. 15: Popis tiskové hlavy pro kompozity

Zdroj: Vlastní zpracování dle Antonov (2019)

2.2.2 INSTRON 3345

Instron 3345, zobrazený na Obr. 16, je univerzální zkušební stroj určený k testování mechanických vlastností materiálů. Jedná se o stolní jednosloupový rám se siloměrem 5 kN, vhodným pro zkoušení plastů, kompozitů a dalších lehkých materiálů. Pohyb příčného rámu je monitorován polohovým snímačem s jemným rozlišením, který zajišťuje přesné stanovení deformace vzorku. Stroj je kompatibilní s různými přípravky a příslušenstvím, například pro tahové, tlakové nebo ohybové testy. Data jsou vyhodnocována prostřednictvím softwaru Bluehill, který umožňuje definovat metody testování, ukládat výsledky a provádět potřebné výpočty. V rámci experimentální části této práce byl Instron 3345 použit k provedení tahové a ohybové zkoušky připravených kompozitních vzorků. (Instron, 2025)



Obr. 16: Trhací zařízení Instron 3345

Zdroj: Vlastní fotografie (2025)

2.2.3 Vibrační stolice

Zařízení LDS V650 představuje elektrodynamický vibrační systém určený k experimentální simulaci dynamického namáhání zkušebních vzorků. Navržená pro testování malých a středně velkých vzorků do hmotnosti 50 kg. Přístroj je schopen generovat maximální sinusovou sílu až 1,62 kN a náhodnou sílu až 1,09 kN. Umožňuje provádět řízené vibrační buzení v širokém frekvenčním rozsahu 5 Hz - 4000 Hz, což umožňuje detailně sledovat odezvu konstrukcí na harmonické zatížení a identifikovat jejich vlastní frekvence. (HBK, 2025)

2.2.4 Insize ISR-C300

Pro měření povrchové drsnosti byl použit přístroj Insize ISR-C300, vyobrazen na Obr. 17. Jedná se o přenosný profilometr určený pro rychlé a přesné hodnocení povrchu. Zařízení umožňuje měřit parametry drsnosti, jako jsou R_a (střední drsnost) a R_z (maximální výška nerovnosti) a to v měřicím rozsahu 4,8 mm s rozlišením 0,001 μm . Měření probíhá prostřednictvím indukčního snímače s diamantovou hrotovou sondou, která se pohybuje podélným směrem po povrchu vzorku. Výsledky jsou zobrazovány na integrovaném displeji a zároveň je možné jejich

exportování pro další vyhodnocení. Díky kompaktní konstrukci a jednoduché obsluze je tento přístroj vhodný pro laboratorní i provozní použití. (Insize, 2024)

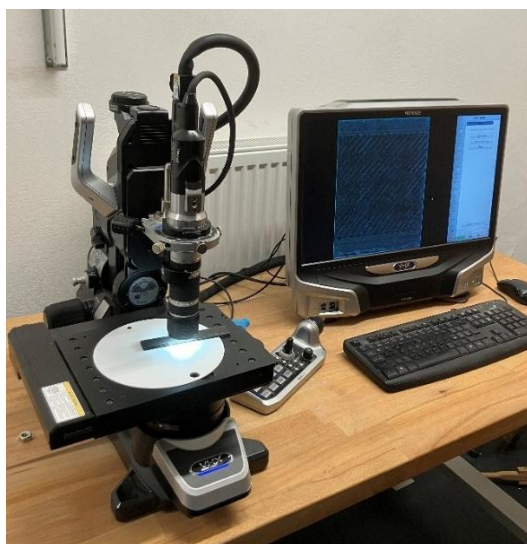


Obr. 17: Drsnoměr INSIZE ISR-C300

Zdroj: Vlastní fotografie (2025)

2.2.5 KEYENCE VHX-6000

Pro mikroskopické vyhodnocení povrchové struktury byl využit digitální optický mikroskop KEYENCE VHX-6000, který umožňuje nejen vysoké zvětšení, ale i měření a dokumentaci topografie povrchu s vynikající hloubkou ostrosti až 200x a možností pozorování z různých úhlů. Zařízení je vybaveno obrazovým senzorem CMOS s velikostí 1/1,8" a virtuálním rozlišením 1600 × 1200 pixelů, dále nabízí automatickou kompozici hloubky ostrosti, měřicí funkce 2D, 3D a multiosvětlení, které umožňují detekci i velmi jemných povrchových rysů (Keyence, 2017). Díky těmto vlastnostem bylo možné detailně analyzovat poslední vytištěnou vrstvu vzorků a sledovat uspořádání uhlíkových vláken v polymerní matici, což přispělo k hodnocení kvality tisku a povrchové struktury v rámci experimentální části. Digitální optický mikroskop zobrazen na Obr. 18.



Obr. 18: Průběh pozorování mikroskopem

Zdroj: Vlastní fotografie (2025)

2.3 Postup 3D tisku – Příprava a následný proces kompozitů na 3D tisk

Pro tvorbu zkušebních vzorků byly vytvořeny digitální modely v prostředí CAD softwaru SolidWorks. Cílem bylo vytvořit modely pro testování na tahovou, ohybovou s vibrační zkoušku. Vytvořené modely byly následně exportovány do formátu STL, který uchovává geometrii objektu prostřednictvím trojúhelníkové sítě. Tato struktura umožňuje přesný popis povrchu a současně slouží jako vstupní data pro přípravu tiskových dat. Soubor byl následně importován do sliceru Aura (program, ve kterém se nastavují parametry pro 3D tiskárnu Anisoprint Composer). Byly nastaveny parametry tisku, zejména tloušťka vrstvy, rychlost tisku, zvolený typ výplně a specifikace extrudovaného materiálu. Vygenerovaný G-kód určoval instrukce pro tiskárnu, přesnou dráhu tiskové hlavy a podložky spolu s množstvím nanášeného materiálu.

Před zahájením samotného tisku bylo provedeno správné zavedení filamentů do extruderů prostřednictvím podávacích motůrků do polytetrafluoretylen (PTFE) trubičky, která zajišťuje plynulý posuv a chrání materiál před nežádoucím třením či poškozením během manipulace v tiskovém prostoru. Po zavedení materiálů byla provedena před každým tiskem zkušební kalibrace výztužného uhlíkového vlákna s cílem ověřit jeho průchodnost tryskou. Současně byla připravena tisková plocha, aby bylo zajištěno dostatečné přilnutí první vrstvy. Pro zvýšení adheze byl aplikován speciální 3DLAC. Následovalo nastavení teploty extruderů na teplotu 260 °C a podložky 60 °C. Nejprve byly vytištěny vrstvy tvořící termoplastickou matici. Po tisku termoplastu proběhla automatická výměna extruderu a zahájení ukládání výztuže z uhlíkového vlákna v kombinaci s přidávným termoplastem.

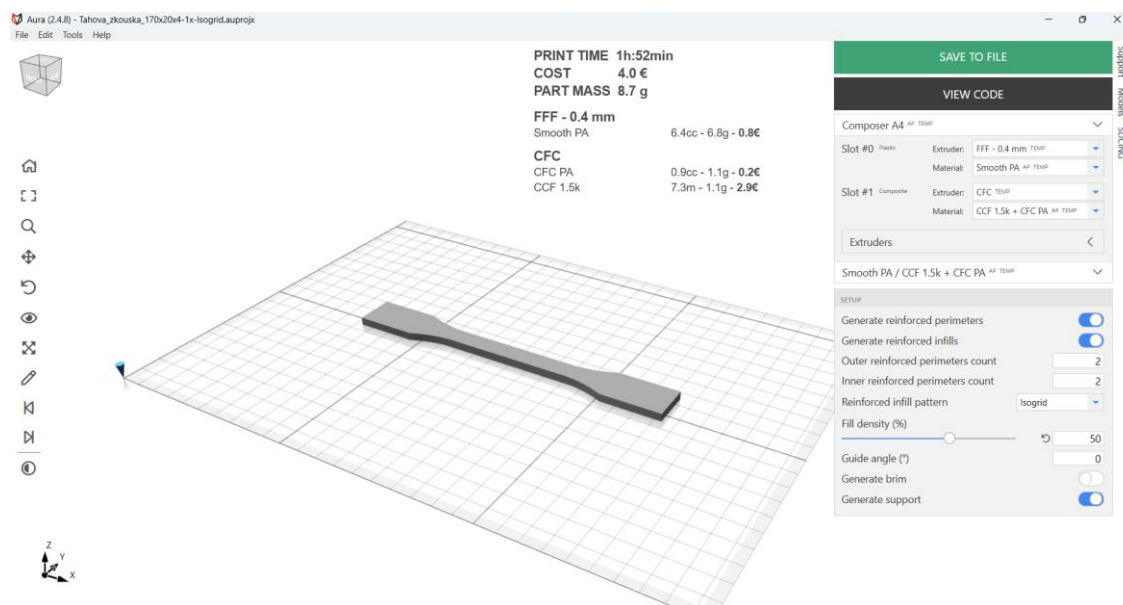
Po dokončení procesu tisku byl proveden post-processing, který zahrnoval odstranění podpůrných vrstev na podložce a přebytečného materiálu mimo požadovanou geometrii vzorku. Následně byly všechny vzorky mechanicky očištěny a byla provedena údržba tiskové plochy i extruderu, aby byla zajištěna jejich funkčnost pro další tiskové cykly. V závěrečné fázi byla realizována kontrola kvality, zaměřená především na ověření rozměrové přesnosti vytištěných vzorků a posouzení základních mechanických charakteristik. Tento postup umožnil zhodnotit, zda vytištěné vzorky odpovídají stanoveným rozměrovým a konstrukčním požadavkům a zda jsou vhodné pro následné experimentální testování.

2.4 Charakteristika použitých výplní

Pro přípravu vzorků byly v softwaru Aura využity základní předdefinované typy výplní, které jsou součástí tiskového nastavení programu. Konkrétně byly zvoleny výplňové struktury Tetragrid, Isogrid, Rhombic grid, Anisogrid a Solid. První čtyři typy výplní byly nastaveny s hustotou 50 %, zatímco výplň typu Solid představovala plnou strukturu s hustotou materiálu 100 %. Tištěný vzorek obsahoval 5 vrstev kontinuálního uhlíkového vlákna. Veškeré ostatní tiskové parametry, jako je rychlost tisku, výška vrstvy, teplota trysky a podložky, zůstaly ponechány ve výchozím nastavení doporučené výrobcem zařízení.

Na Obr. 19 jsou vyobrazeny upravitelné parametry softwaru, které umožňují optimalizaci tiskového procesu podle zvoleného typu výplně a požadovaných mechanických vlastností výsledného vzorku. Jednotlivé typy výplní se liší svým geometrickým uspořádáním, které ovlivňuje mechanické vlastnosti vytištěných kompozitů. Software Aura umožňuje nastavit

hustotu a orientaci mřížky podle potřeby, což z výplně činí univerzální volbu, kde je požadován kompromis mezi pevností, hmotností a efektivitou. Aura umožňuje přesné nastavení směru vláken, což je zásadní pro efektivní využití výplně. V kombinaci s dalšími typy výplní lze vytvořit hybridní struktury s optimalizovanými vlastnostmi. (Anisoprint, 2025)



Obr. 19: Ukázka softwaru Aura pro přípravu 3D tisku

Zdroj: Vlastní fotografie (2025)

2.5 Postup testování

Vytištěné vzorky byly podrobeny mechanickým zkouškám. Celkově bylo testováno 65 vzorků, které byly rozděleny podle typu provedené zkoušky. Pro tahovou zkoušku bylo připraveno 30 vzorků, přičemž každá konfigurace výplně byla zastoupena šesti vzorky. Pro ohybovou zkoušku bylo připraveno 25 vzorků. Celkem bylo vyrobeno 5 sad vzorků, každá byla zastoupena 5 vzorky. V Tab. 4 znázorněny konfigurace výplně pro jednotlivé zkoušky. Výkresy testovaných vzorků se nacházejí v Příloze A1, A2 a A3. U vzorků určených k tahové zkoušce byla provedena povrchová diagnostika poslední vytištěné vrstvy s cílem vyhodnotit její kvalitu a drsnost. U vzorků na ohyb byl povrch analyzován pomocí digitálního optického mikroskopu, aby bylo možné posoudit strukturu a případné nedokonalosti vzniklé během procesu tisku.

Tab. 4: Počty vzorků pro jednotlivé zkoušky

Typ výplně	Počet vzorků		
	Tahová zkouška	Ohybová zkouška	Vibrační zkouška
Isogrid	6	5	2
Rhombic grid	6	5	2
Tetragrid	6	5	2
Anisogrid	6	5	2
Solid	6	5	2

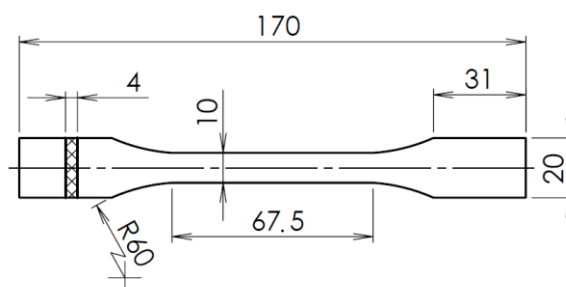
Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

2.5.1 Zkouška tříbodovým ohybem

Zkouška ohybové pevnosti byla realizována na univerzálním zkušebním zařízení Instron 3345 pomocí tříbodového ohybu. Testování probíhalo podle normy ČSN EN ISO 178 (640607). Plasty – Stanovení ohybových vlastností. 2019. Vzorky s rozměry 80 mm x 20 mm x 4 mm byly uloženy na podpěrách s roztečí 50 mm, přičemž zatěžování probíhalo rychlostí 1 mm/min. Tento způsob testování umožnil stanovit pevnost v ohybu, modul pružnosti a deformaci. Během zatěžování byly kontinuálně sledovány posuny a deformace, které byly následně vyhodnoceny z naměřených dat v digitálním záznamu softwaru Bluehill. Získaná data poskytla komplexní pohled na mechanické chování vzorků při ohybovém namáhání.

2.5.2 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na univerzálním zkušebním stroji Instron 3345. Rozměr a tvar vzorku byl vytvořen dle Obr. 20 v souladu s ČSN EN ISO 527-2 (640604). Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. 2012.



Obr. 20: Rozměry vzorku pro tahovou zkoušku

Zdroj: Školní podklady

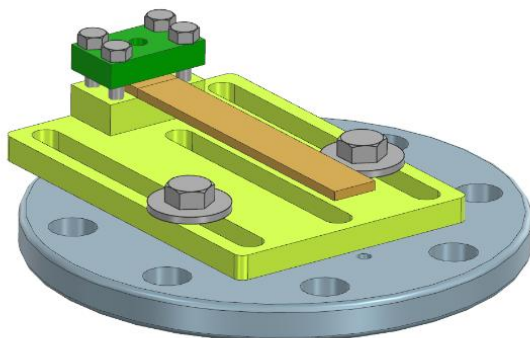
Vzdálenost mezi upínacími čelistmi byla definována ve vzdálenosti 115 mm. Testování probíhalo konstantní rychlostí 1 mm/min do přetržení vzorku. Naměřené hodnoty byly během testu automaticky ukládány, odkud byly získány výsledky pro zpracování a vyhodnocení mechanických vlastností.

2.5.3 Vibrační zkouška

V rámci experimentu byl přístroj LDS V650 řízen externím regulátorem a vybaven kalibrovaným akcelerometrem. Testování probíhalo podle normy ČSN EN ISO 16610-21 (014445). Geometrické specifikace produktu (GPS) - Filtrace – Část 21: Lineární profilové filtry: Gaussovy filtry. 2025. Vzorek s předem stanovenými rozměry 120 mm x 20 mm x 2 mm byl umístěn ve vzdálenosti 40 mm od volného konce vzorku, aby bylo možné přesně zaznamenat průběh vibrací.

Testování probíhalo pomocí sinusového signálu s frekvenčním rozsahem 5–1000 Hz a konstantním zrychlením 2 g. Během měření byly analyzovány jak průběhy bez zatížení (samotná plošina), tak průběhy se vzorkem, čímž bylo možné odlišit rezonanční frekvence systému od vlastního vibračního chování zkušebního tělesa. Celý experiment byl realizován ve stabilizovaných klimatických teplotních podmínkách 22 °C a vlhkostním prostředí 53 %. Ukázku

přípravku s upnutím vzorku je vidět na Obr. 21, snímač byl poté aplikován na volný konec vzorku, pro každý vzorek stejným způsobem a ve stejné vzdálenosti od konce.



Obr. 21: Ukázka přípravku pro vibrační zkoušku s upnutím vzorku

Zdroj: Dvořák (2025)

2.5.4 Analýza jakosti povrchu

Měření povrchové drsnosti bylo realizováno na přístroji Insize ISR-C300. Zkouška byla provedena u všech vzorků určených pro tahovou zkoušku. Přístroj byl uveden do provozu a následně stabilizován ve vodorovné poloze pomocí podložení. Samotné měření probíhalo pohybem výsuvné tyčinky s diamantovým zakončením, která se pohybovala po povrchu vzorku v podélném směru tam a zpět s měřicí délkou 4,8 mm.

Přístroj pracoval s Gaussovým filtrem v souladu s normou ČSN EN ISO 16610-21 (014445). Geometrické specifikace produktu (GPS) - Filtrace – Část 21: Lineární profilové filtry: Gaussovy filtry. 2025., která stanovuje pravidla pro profilové filtrování v rámci geometrické specifikace výrobku. Aplikace tohoto filtru umožňuje získat čistší a přesnější profil povrchu, což vede k vyšší spolehlivosti a opakovatelnosti měření. Díky tomu lze analyzovat povrchové parametry s eliminací rušivých složek, které by jinak mohly ovlivnit interpretaci výsledků.

2.5.5 Mikroskopie povrchu vzorků

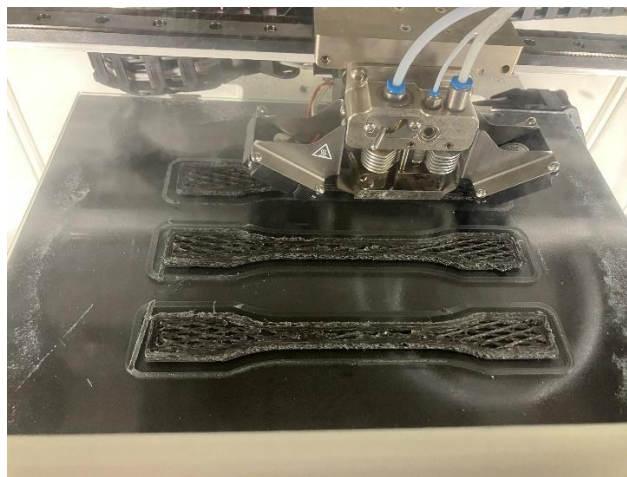
Dalším krokem experimentálního hodnocení bylo pozorování povrchové struktury vzorků pomocí digitálního optického mikroskopu KEYENCE VHX-6000. Cílem měření bylo zkoumat morfologii povrchu a kvalitu poslední vytištěné vrstvy. Před zahájením měření bylo provedeno nastavení optického systému mikroskopu a zvoleno zvětšení 100x v závislosti na požadovaném detailu pozorování. Vybraný vzorek byl následně umístěn na pozorovací stoličce pod objektiv mikroskopu a zaostřen na sledovanou oblast. Po korekci ohniskové vzdálenosti byl spuštěn automatizovaný program, který vytvářel sekvenční snímky povrchu v různých rovinách zaostření. Tyto snímky byly následně softwarově spojeny do jednoho celku, čímž vznikl detailní trojrozměrný obraz povrchové topografie vzorku.

3 Výsledky a diskuze

V této části bakalářské práce jsou uvedeny a vyhodnoceny výsledky experimentálního měření zaměřeného na hodnocení mechanických vlastností kompozitních vzorků s různým uspořádáním kontinuálních uhlíkových vláken v polymerní matrici. Bylo vytištěno pět typů zkušebních vzorků, Solid, Rhombic grid, Tetragrid, Isogrid a Anisogrid, které byly podrobeny tahové, ohybové a dynamické zkoušce, měření drsnosti povrchu a mikroskopické analýze. Výsledky byly vyhodnoceny jak numericky, tak vizuálně, přičemž byla sledována závislost mezi orientací vláken a mechanickým chováním materiálu. Součástí kapitoly je zhodnocení vlivu hustoty výplně na hmotnost a pevnost kompozitu.

3.1 Zhodnocení procesu 3D tisku

Celková kvalita připravených vzorků pomocí 3D tisku může být hodnocena jako velmi kvalitní. Vzhledem k tomu, že se jednalo o poměrně jednoduché vzorky bez složitých tvarů, zakřivení či jemných detailů, probíhal tisk ve většině případů bez výraznějších problémů. Menší odchylky byly zaznamenány především v rozměrové přesnosti vytištěných vzorků. Tyto nepřesnosti lze přičíst technickému stavu zařízení. V některých případech bylo nutné proces tisku přerušit a přenastavit tiskovou plochu. K drobným posunům vrstev mohlo docházet také v důsledku vkládání kontinuálního uhlíkového vlákna, které lokálně ovlivňovalo stabilitu a rovnoměrnost nanášených vrstev. Tyto skutečnosti jsou podrobněji rozebrány v kapitole 3.1.1, kde je uvedeno rozměrové vyhodnocení vzorků. Ukázka průběhu kompozitního 3D tisku je vyobrazena na Obr. 22.



Obr. 22: Průběh kompozitního 3D tisku

Zdroj: Vlastní fotografie (2025)

3.1.1 Rozměrová analýza

Tiskárna Anisoprint Composer A4 dosahuje vysoké přesnosti tisku, přičemž tolerance se pohybuje běžně v rozmezí $\pm 0,1$ až $\pm 0,3$ mm, v závislosti na geometrii dílu, zvoleném materiálu a nastavení v programu Aura. Při pečlivé kalibraci a optimalizaci parametrů lze dosáhnout opakovatelnosti v osách XY až $\pm 0,05$ mm a v ose Z $\pm 0,1$ mm. Výška vrstvy při běžném FFF tisku může být nastavena až na 60 μm , zatímco při použití kontinuálního uhlíkového vlákna je výška

vrstvy omezená na 360 μm kvůli průměru výztuže. Tyto hodnoty jsou důležité pro porovnání s rozměrovými odchylkami u zkušebních vzorků v praktické části, zejména pokud se jedná o díly s výztuží, kde může být tolerance mírně vyšší kvůli tuhosti vlákna a omezené možnosti detailního tvarování. (Anisoprint, 2020)

Rozměrová analýza byla provedena s cílem ověřit přesnost vytištěných dílů ve srovnání s návrhovými rozměry. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5. U všech vzorků byly sledovány základní geometrické veličiny délka, šířka a tloušťka. Měření rozměrů bylo realizováno pomocí digitálního posuvného měřítka a hmotnost vzorků byla stanovena pomocí digitální laboratorní váhy s přesností na setiny milimetru. Tyto údaje sloužily k posouzení rozměrové stability výtisků a ke zjištění případných odchylek vzniklých v průběhu procesu 3D tisku.

Tab. 5: Rozměrová analýza jednotlivých vzorků

Typ výplně/ Rozměry dle výkresu	Vzorky pro tahovou zkoušku			Vzorky pro ohybovou zkoušku		
	Délka 170 [mm]	Šířka v nejužším místě 10 [mm]	Tloušťka 4 [mm]	Délka 80 [mm]	Šířka 20 [mm]	Tloušťka 4 [mm]
Isogrid	171,77±0,11	10,59±0,06	3,91±0,05	80,47±0,09	20,51±0,05	3,87±0,06
Rhombic grid	171,26±0,08	10,56±0,08	3,93±0,04	80,41±0,05	20,46±0,04	3,95±0,04
Tetragrid	171,11±0,07	10,52±0,09	3,84±0,04	80,54±0,07	20,45±0,07	3,92±0,05
Anisogrid	171,29±0,06	10,64±0,07	3,96±0,06	80,39±0,09	20,64±0,06	3,91±0,05
Solid	171,69±0,05	10,39±0,07	3,88±0,07	80,53±0,08	20,42±0,04	3,94±0,04

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

Na základě vyhodnocení naměřených hodnot bylo zjištěno, že rozměrové odchylky mezi návrhovým a reálným modelem se pohybovaly v řádu desetin milimetru. Tyto odchylky lze přičíst k přirozené toleranci aditivního procesu. Rozdíly v hmotnosti jednotlivých vzorků nepřekročily 2 % oproti vypočteným hodnotám, které byly vypočítány v programu pro přípravu k 3D tisku, což svědčí o rovnoměrném ukládání materiálu při tisku. Naměřené výsledky tak potvrzují dostatečnou rozměrovou přesnost a opakovatelnost procesu tisku, která je z hlediska následných mechanických zkoušek plně vyhovující.

3.1.2 Výrobní čas a ekonomické aspekty 3D tisku

Průměrná doba tisku jednoho zkušebního vzorku činila přibližně 1 hodinu a 45 minut u vzorků určených pro tahovou zkoušku 1 hodinu a 10 minut u vzorků pro ohybovou zkoušku. Uvedené hodnoty představují efektivní dobu tisku bez započítání neúspěšných pokusů, které byly způsobeny přerušáním procesu tisku nebo mechanickými komplikacemi zařízení. Celkový čistý čas výroby všech vzorků dosáhl přibližně 97 hodin.

Software Aura automaticky generoval údaje, vyobrazeno v Tab. 6, o celkové době tisku, spotřebě filamentu, výsledné hmotnosti výtisku a odhadované ceně. Cena jednoho vzorku se pohybovala v rozmezí 45–122 Kč v závislosti na jeho spotřebě a typu materiálu. Celkové materiálové náklady na realizaci experimentu činily přibližně 7 000 Kč. Do této částky nejsou zahrnuty neúspěšné výtisky, jejichž podíl byl odhadnut na přibližně 10 % z celkového počtu vytištěných vzorků.

Tab. 6: Výrobní čas, hmotnost a ekonomické aspekty výroby

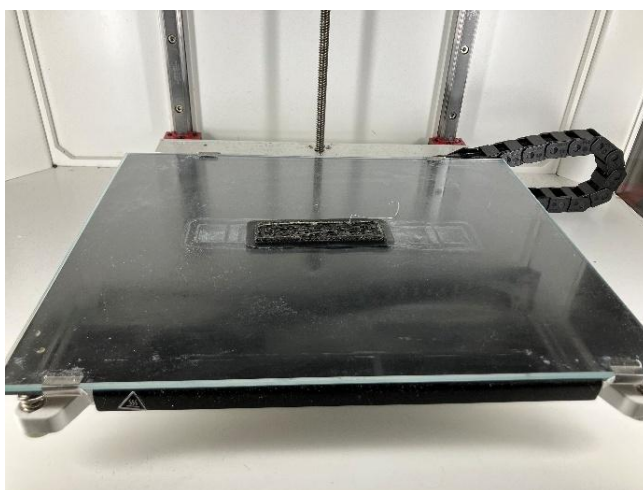
Typ výplně	Vzorky pro tahovou zkoušku			Vzorky pro ohybovou zkoušku			Vzorky pro vibrační testy		
	Hmotnost [g]	Doba tisku	Cena [Kč]	Hmotnost [g]	Doba tisku	Cena [Kč]	Hmotnost [g]	Doba tisku	Cena [Kč]
Isogrid	8,7	1h52min	96	5,7	1h15min	72	6,8	1h16min	48
Rhombic grid	8,7	1h44min	98,4	5,6	1h7min	72	6,8	1h12min	45,6
Tetragrid	8,7	1h45min	96	5,7	1h11min	74,4	6,8	1h15min	55,2
Anisogrid	8,8	1h46min	98,4	5,7	1h11min	74,4	6,8	1h14min	55,2
Solid	9,7	1h58min	122,4	6,4	1h21min	98,4	7,3	1h19min	69,6

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

3.1.3 Technické komplikace v průběhu 3D tisku

Proces 3D tisku probíhal ze začátku bez komplikací a kvalita vytištěných vzorků odpovídala očekáváním. Tiskárna vykazovala stabilní činnost a jednotlivé vrstvy byly ukládány rovnoměrně a přesně. V průběhu experimentu se však začaly objevovat technické problémy související s 3D tiskárnou. Při přepínání mezi extrudery z termoplastického na extruder pro kontinuální výztuž, bylo nutné manuálně upravit výšku podložky, na dotykové obrazovce, aby nedošlo k zaboření extruderu do polymerní matrice. Při těchto úpravách se v jednotkách případů projevil problém se zablokováním dotykového displeje. Vzhledem k tomu, že zařízení neumožňuje pokračování tisku z polohy, kde se tisk přerušil, došlo v těchto situacích ke vzniku zmetků a čištění trysky z důvodu ucpání.

Další komplikace se týkaly podávání materiálu. Bylo nutné upravit mechanismus ozubené soustavy zajišťující posuv filamentu, aby mohl být k uhlíkovému vláknu správně přiváděn polymerní pojivový materiál zajišťující lepší přilnavost výztuže k matrici. Problémy se objevovaly i při samotném podávání uhlíkového vlákna Obr. 23, které se v některých případech zasekávalo před vstupem do extruderu. Situaci bylo nutné řešit částečnou demontáží podávacího systému. Docházelo i k selhání mechanismu pro stříhání uhlíkového vlákna, což vyžadovalo jeho ruční přerušování pomocí kleští, aby se zabránilo ucpání extruderu a došlo ke správnému nanesení uhlíkového vlákna.



Obr. 23: Ukázka neúspěšného ukládání uhlíkového vlákna

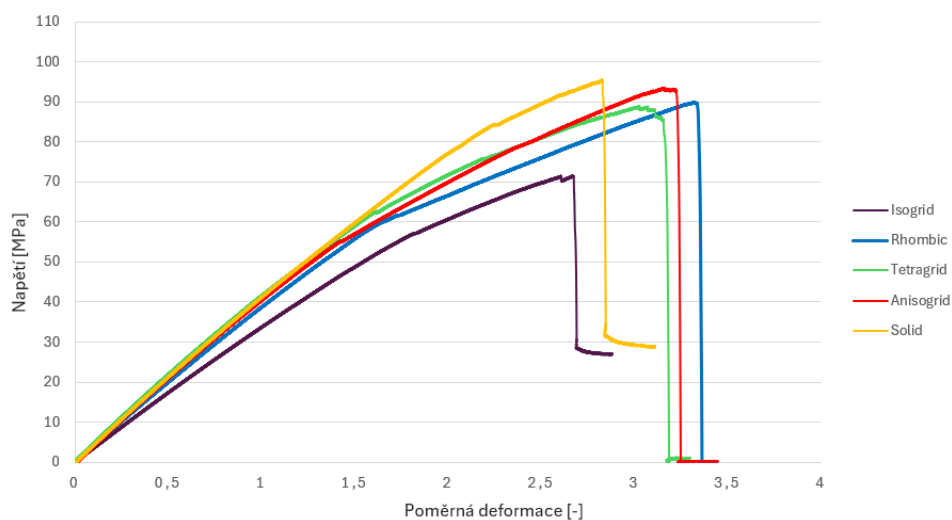
Zdroj: Vlastní fotografie (2025)

Pro zajištění dostatečné adheze mezi první vrstvou a podložkou byl použit speciální 3DLAC, který významně snížil riziko odlepování výtisku od tiskové plochy. Ukládání výztuže probíhalo bez větších problémů, pokud nedošlo k mechanické chybě v některém z výše uvedených mechanismů. Nanášení první vrstvy probíhalo rovnoměrně a vykazovalo velmi dobrou přilnavost ke skleněné podložce. V případech, kdy nedošlo k odlepení první vrstvy, byl tisk dokončen úspěšně.

Přestože se během experimentu objevilo několik technických komplikací, proces tisku lze hodnotit jako úspěšný a kvalitní. V průběhu práce byly získány cenné praktické zkušenosti s obsluhou a údržbou kompozitní 3D tiskárny Anisoprint Composer A4, včetně schopnosti diagnostikovat a odstranit mechanické závady v podávacím a extruzním systému. Tyto poznatky významně přispěly k pochopení konstrukčních a technologických principů kompozitního tisku.

3.2 Tahová zkouška – zhodnocení výsledků

V rámci tahové zkoušky bylo testováno celkem 30 vzorků. Bylo hodnoceno pět různých typů vnitřní výplně zkušebních těles. Na základě naměřených dat byl vytvořen tahový diagram, vyobrazen na Obr. 24, který znázorňuje závislost napětí [MPa] na jeho poměrnou deformaci [-] pro průměrné křivky patřící k jednotlivým typům vzorků. Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvyšší pevnost v tahu vykazovala výplň typu Solid, jejíž maximální hodnota dosáhla $97,33 \pm 5,18$ MPa. Nižších hodnot $86,70 \pm 5,92$ – $93,12 \pm 6,35$ MPa dosáhly výplně Anisogrid, Rhombic grid a Tetragrid, zatímco nejnižší pevnostní charakteristiky byly zaznamenány u výplně typu Isogrid, která dosahovala průměrné hodnoty $71,65 \pm 4,94$ MPa.



Obr. 24: Tahový diagram

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

Výsledky tahových zkoušek byly následně zpracovány do Tab. 7, která obsahuje souhrnné hodnoty měření jednotlivých typů výplní. Z hlediska maximálního zatížení dosahovala výplň Solid průměrné hodnoty $4142,47 \pm 147,67$ MPa, zatímco výplně Rhombic grid, Tetragrid a Anisogrid se pohybovaly v rozmezí $3771,27 \pm 141,39$ – $4020,25 \pm 237,56$ MPa. Nejnižší hodnoty byly opět naměřeny u výplně Isogrid, která vykazovala maximální zatížení $3149,74 \pm 155,91$ MPa.

Tab. 7: Výsledky měření tahové zkoušky

Typ výztuže	Tahové napětí [MPa]	Modul pružnosti [MPa]	Tahová deformace [%]
Isogrid	71,65±4,94	3737,95±241,19	3,11±0,62
Rombic	89,08±6,11	4441,16±168,29	3,17±0,49
Tetragrid	86,70±5,92	4902,86±183,12	2,66±0,41
Anisogrid	93,12±6,35	4926,60±139,22	2,24±0,89
Solid	97,33±5,18	4986,41±172,96	2,33±0,36

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

Z hlediska hmotnosti vzorků a spotřeby materiálu se jako nejefektivnější jeví výplň Anisogrid, Tetragrid a Rhombic grid, které kombinovaly nižší hmotnost s dobrou pevnostní odezvou. V tahovém diagramu lze pozorovat prudký pokles napětí směrem k nule, což odpovídá okamžiku přetržení vzorku po dosažení mezí pevnosti. Tento jev je důsledkem koncentrace napětí v místě oslabení materiálu.

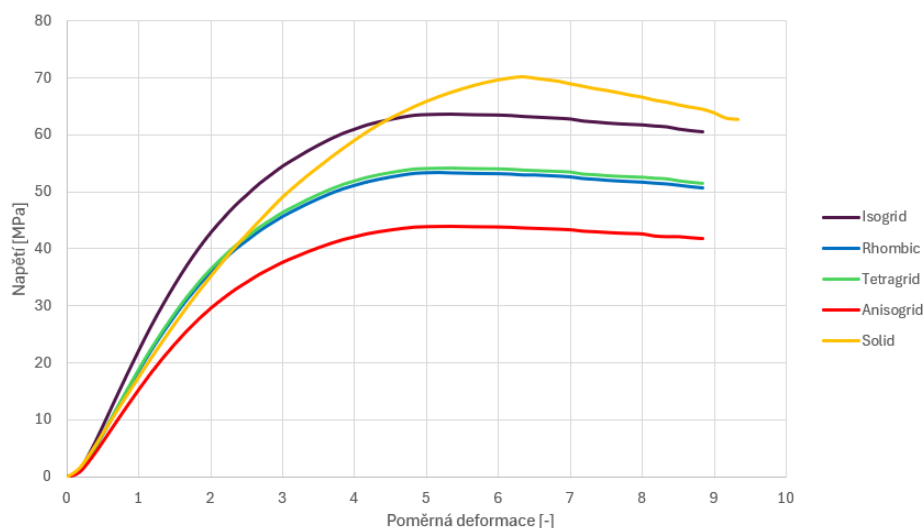
Při porovnání výsledků tahových zkoušek s Parmiggiani et al., (2021) je nutné zdůraznit zásadní technologické rozdíly mezi oběma experimenty. Studie byla provedena na tiskárně Markforged Mark Two s použitím materiálu Onyx (PA6 s krátkými uhlíkovými vlákny) a kontinuální výztuže CCF. Tahové vzorky o rozměrech 157 × 16 × 3 mm byly testovány dle normy ISO 527-2 (2012). Kontinuální uhlíkové vlákno celkem tvořilo 16 výztužných vrstev, zatímco u vzorků tištěných technologií Anisoprint bylo použito pouze 5 vrstev. Tento rozdíl významně ovlivňuje mechanické charakteristiky, neboť vyšší počet vláken experimentu Parmiggiani et al., (2021) zvyšuje podíl nosné výztuže a vede k vyšší pevnosti v tahu.

Ve výzkumné práci Parmiggiani et al., (2021) dosahovala orientace 0° maximální pevnosti 566 MPa a modulu 24,2 GPa. Konfigurace s výztuží 0°/90° a 45°/–45° dosahovaly středních hodnot v rozmezí 193–309 MPa, což potvrzuje, že mechanická odezva je závislá na orientaci vláken a podílu výztuže. Tyto výsledky však nelze přímo srovnávat s výztužně slabšími vzorky tištěnými na Anisoprint Composer, jejichž mechanické vlastnosti vycházejí z odlišné vnitřní architektury kompozitu.

3.3 Ohybová zkouška – zhodnocení výsledků

Testováno bylo celkem 25 vzorků, zahrnujících pět typů výplní s odlišným uspořádáním vláken. Vyhodnocení ohybové zkoušky je uvedeno v Tab. 8, která obsahuje průměrné hodnoty z pěti testovaných vzorků pro každý typ výplně. Závislost mezi napětím [MPa] a poměrnou deformací [-] je graficky znázorněna v diagramu na Obr. 25.

Z výsledků vyplývá, že nejvyšší hodnoty ohybového napětí dosáhla výplň typu Solid, a to 70,33±5,18 MPa. Výplně Rhombic grid a Tetragrid vykazovaly srovnatelné výsledky v rozmezí 53,31±7,51 – 54,23±6,12 MPa, zatímco Anisogrid dosahoval nejnižší pevnosti 44,29±4,15 MPa. Z hlediska poměru hmotnosti k ohybovému napětí se jako nejefektivnější ukázala výplň Isogrid 63,63±4,69 MPa, která při nižší materiálové spotřebě poskytovala velmi dobré mechanické vlastnosti. I když výplň Solid vykazovala vyšší absolutní hodnoty pevnosti, její vyšší hmotnost a spotřeba materiálu snižují její efektivitu při aplikacích, kde je prioritou poměr pevnosti k hmotnosti.

**Obr. 25: Ohybový diagram***Zdroj: Vlastní zpracování (2025)*

Výplň Solid potvrdila své nejlepší mechanické vlastnosti, když dosáhla maximálního zatížení $254,41 \pm 26,58$ N, zatímco ostatní výplně se pohybovaly v rozmezí $218,35 \pm 16,17$ – $226,57 \pm 15,91$ N. Z hlediska modulu pružnosti dosahovala výplň Anisogrid nejnižších hodnot, přibližně $1828,76 \pm 226,58$ MPa, zatímco ostatní výplně vykazovaly srovnatelné výsledky v rozmezí $2249,16 \pm 252,11$ – $2334,09 \pm 310,24$ MPa.

Tab. 8: Výsledky měření ohybové zkoušky

Typ výztuže	Ohybové posunutí [mm]	Ohybové napětí [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
Isogrid	$6,43 \pm 0,43$	$63,63 \pm 4,69$	$2334,09 \pm 310,24$
Rombic	$6,70 \pm 0,35$	$53,31 \pm 7,51$	$2252,61 \pm 212,81$
Tetragrid	$6,14 \pm 0,59$	$54,23 \pm 6,12$	$2368,32 \pm 288,21$
Anisogrid	$5,70 \pm 0,72$	$44,29 \pm 4,15$	$1828,76 \pm 226,58$
Solid	$7,33 \pm 0,67$	$70,33 \pm 5,18$	$2249,16 \pm 261,93$

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

Z celkového pohledu lze konstatovat, že při ohybovém namáhání se nejlépe osvědčila výplň Isogrid, která vykazuje dobrý poměr mezi hmotností, spotřebou materiálu a dosaženou pevností. Její struktura poskytuje vyvážené rozložení napětí v rámci ohybové deformace, čímž přispívá k efektivnějšímu přenosu sil v kompozitní matici.

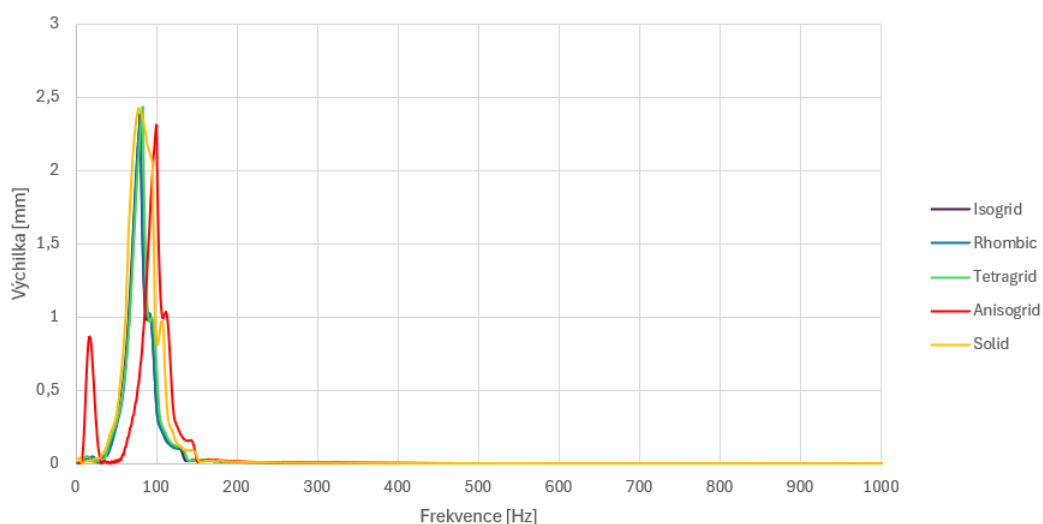
V rámci ohybové zkoušky výzkumné práce Parmiggiani et al., (2021) je rozdíl v počtu vrstev kontinuálního uhlíkového vlákna mezi oběma studiemi výraznější. Ohybové vzorky byly tištěny s celkovým počtem 24 vrstev CCF. Jedná se o výrazně robustnější výztužný systém než u vzorků vyrobených 3D tiskárnou Anisoprint, jejichž kompozitní výztuž obsahovala pouze 5 vrstev. Tento rozdíl zásadně ovlivňuje nejen ohybový modul, ale také charakter porušení a tvar deformace při zatěžování, a proto nelze mezi oběma soubory vzorků provádět přímé kvantitativní srovnání.

V analýze Parmiggiani et al., (2021) dosahovala orientace 0° maximální ohybové pevnosti $340,7$ MPa při modulu pružnosti $24,39$ GPa, zatímco orientace 90° vykazovala pouze $51,8$ MPa a $2,13$ GPa. Při srovnání s výsledky mřížkových struktur v této práci lze konstatovat, že hodnoty se pohybují na obdobné úrovni. Konfigurace $0^\circ/90^\circ$ a dosahovaly hodnot v intervalu 212 – 241 MPa. Vzhledem k tomu, že mechanické vlastnosti kompozitů tištěných metodou CFF závisí nejen na

úhlu orientace, ale také na procesní teplotě, počtu vrstev a způsobu laminace, lze výsledky z práce Parmiggiani et al., (2021) chápat pouze jako informativní a nikoli přímo porovnatelné s hodnotami získanými v rámci této bakalářské práce.

3.4 Dynamické testování – zhodnocení výsledků

Vibrační zkouška probíhala v rozsahu 5–1000 Hz při zrychlení 2 g. Nejvýraznější odezvy všech vzorků se koncentrovaly v nízkofrekvenční oblasti, kde docházelo k rezonanci kompozitních struktur. U všech výztužných geometrií se maximální výchylka pohybovala přibližně mezi 2,25–2,45 mm, což lze pozorovat na Obr. 26. Rozdíly se projeví v charakteru samotné rezonance. Výztuže se směrově vedenými vlákny (Tetragrid, Anisogrid, Rhombic grid, Isogrid) vykazaly výraznější a ostřejší definované rezonanční špičky, zatímco geometrie s rovnoměrněji rozloženou tuhostí (Solid) měla průběh stabilnější a méně citlivý na změnu frekvence.



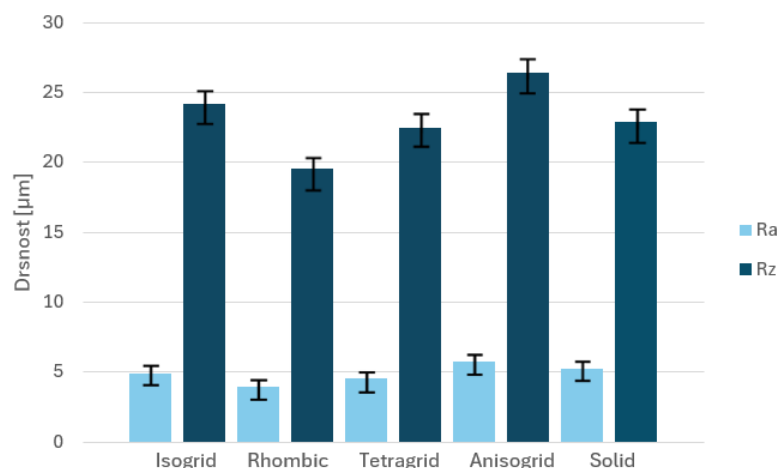
Obr. 26: Průměrné frekvenční křivky jednotlivých výztuží

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

3.5 Analýza povrchové jakosti vzorků

3.5.1 Analýza drsnosti povrchu pomocí drsnoměru

Drsnost povrchu byla měřena na přístroji Insize ISR-C300, přičemž měřena byla poslední vytištěná vrstva vzorku. U všech vzorků určených pro tahovou zkoušku byly zaznamenány hodnoty parametrů drsnosti R_a a R_z , které charakterizují střední aritmetickou odchylku profilu a maximální výšku nerovnosti povrchu. Naměřené hodnoty jednotlivých typů výplní jsou graficky zobrazeny na Obr. 27, kde byl zároveň stanoven průměrný výsledek pro každý z testovaných typů výplně.



Obr. 27: Grafické zobrazení drsnosti jednotlivých výplní

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

Z hlediska kvality povrchu lze konstatovat, že tištěné vzorky nedosahovaly hladkosti běžné pro subtraktivní výrobní metody, u nichž se hodnoty drsnosti Ra obvykle pohybují v rozmezí 0,2–3,2 μm . V rámci provedeného měření byly zjištěny průměrné hodnoty Ra 4,9 μm , přičemž průměrná výška nerovností Rz dosahovala 23, 8 μm . Srovnání s dostupnou literaturou potvrzuje, že naměřené hodnoty odpovídají rozmezí typickému pro technologii FFF. Podle studie společnosti Xometry (2023) se drsnost povrchu součástí vyrobených metodou FFF obvykle pohybuje v intervalu 2,3–10,2 μm , což je v souladu s výsledky získanými v rámci tohoto měření. Pro materiál PA12 jsou navíc podle Almuflieh et al. (2024) uváděny průměrné hodnoty drsnosti přibližně 4,63–5,5 μm , přičemž na výslednou strukturu povrchu mají zásadní vliv procesní podmínky samotného tisku.

Drsnost povrchu může být ovlivněna ukládáním uhlíkových vláken, kalibrací tiskárny a přesností tvorby finálních jednotlivých vrstev. Na výslednou kvalitu povrchu má zásadní vliv zejména nastavení tiskové plochy, trysky a extruderu, jelikož při nesprávné kalibraci může dojít k nerovnoměrnému nanášení materiálu, a tím i k výrazným odchylkám v morfologii povrchu tištěného produktu.

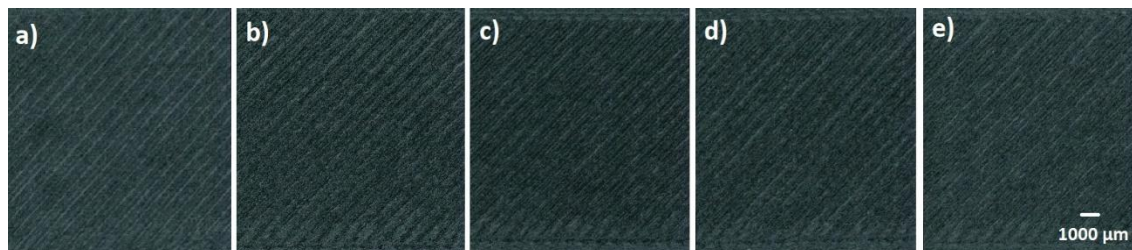
3.5.2 Mikroskopie povrchů připravených vzorků

Pozorování povrchové struktury jednotlivých vzorků bylo provedeno pomocí digitálního optického mikroskopu Keyence VHX-6000 při zvětšení 100x. Cílem analýzy bylo vyhodnotit kvalitu povrchu poslední vytištěné vrstvy a ověřit rovnoměrnost rozložení uhlíkových vláken v polymerní matrici. U všech pěti typů výplní byla sledována textura, homogenita a případné defekty povrchu vzniklé během tisku. Jednotlivé vzorky jsou vyznačeny na Obr. 28.

Na mikroskopických snímcích bylo možné rozlišit „stopy“ po směru pohybu tiskové trysky a jemné pruhy odpovídající směru ukládání vláken, což je typické pro použitou technologii 3D tisku. U výplně typu Solid byl povrch nejkompaktnější s dobrou přilnavostí vrstev. Naproti tomu u výplně Isogrid a Rhombic grid se místy vyskytovaly mikropóry a nerovnoměrnosti, které pravděpodobně vznikly v důsledku nedostatečné teplotní homogenity při tisku. Výplně Anisogrid, Tetragrid, Isogrid a Rhombic grid vykazovaly viditelnou orientaci vláken

v diagonálních směrech, což potvrzuje správnou funkci koextruzního procesu při ukládání kontinuálních vláken.

Při analýze bylo rovněž možné identifikovat rozhraní mezi jednotlivými vrstvami tisku a sledovat rozložení uhlíkových částic v materiálu Smooth PA, které vytvářely jemnou mikrostrukturu na povrchu vzorku.



Obr. 28: a) Anisogrid, b) Isogrid, c) Rhombic grid, d) Solid, e) Tetragrid

Zdroj: Vlastní zpracování (2025)

Celkově lze konstatovat, že mikroskopická analýza prokázala dobrou soudržnost vrstev a správnou „impregnaci“ vláken polymerní matricí, přičemž rozdíly v povrchové morfologii odpovídají odlišným konfiguracím výztužných struktur.

4 Shrnutí dosažených výsledků experimentální části

V rámci experimentální části bakalářské práce byly zkoumány mechanické charakteristiky kompozitních vzorků s různým uspořádáním kontinuálních uhlíkových vláken v polyamidové matrici. Vzorky byly vyrobeny na 3D tiskárně Anisoprint Composer A4 metodou Composite Fiber Coextrusion, která umožňuje současnou depozici termoplastické matrice a kontinuálního vlákna. Cílem bylo experimentálně ověřit, jak různé typy výztužných struktur ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti, zejména pevnost v tahu, ohybu a dynamického chování.

Z výsledků tahové zkoušky vyplynulo, že nejvyšších hodnot tahového napětí dosáhla výplň Solid, jejíž pevnost byla $97,33 \pm 5,18$ MPa. Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu, že souvislá výztuž bez mezer umožňuje lepší přenos napětí a zajišťuje vyšší soudržnost mezi vláknem a matricí. Výplně typu Anisogrid, Rhombic grid a Tetragrid vykazovaly mírně nižší pevnostní charakteristiky v rozmezí $86,70 \pm 5,92$ – $93,12 \pm 6,35$ MPa, avšak díky nižší hmotnosti dosahovaly příznivějšího poměru pevnosti k hmotnosti, což je výhodné pro aplikace vyžadující lehké, ale pevné konstrukční prvky. Výplň Isogrid dosáhla nejnižších hodnot $71,65 \pm 4,94$ MPa.

Při ohybové zkoušce dosáhla nejvyššího ohybového napětí výplň solid, která vykazovala ohybové napětí $70,33 \pm 5,18$ MPa. Výplně Rhombic grid a Tetragrid dosahovaly hodnot kolem $53,31 \pm 7,51$ – $54,23 \pm 6,12$ MPa, zatímco Anisogrid pouze $44,29 \pm 4,15$ MPa. Z hlediska poměru hmotnosti k ohybovému napětí se jako nejefektivnější ukázala výplň Isogrid $63,63 \pm 54,69$ MPa, která díky nižší hustotě výplně poskytuje dostatečnou tuhost při nižší spotřebě materiálu. Tento výsledek poukazuje na vhodnost výplně Isogrid pro díly namáhané převážně na ohyb.

Mikroskopická analýza potvrdila, že orientace vláken ovlivňuje kvalitu povrchu i mechanickou soudržnost vrstev. U všech výplní bylo pozorováno rovnoměrné rozložení uhlíkových vláken v matrici a jejich dobré zapouzdření polymerem. Výplně Anisogrid a Rhombic grid vykazovaly rovnoměrnější texturu povrchu, zatímco u výplně Solid byla patrná vyšší hustota vláken s výraznějšími liniemi po směru tisku. Měření drsnosti povrchu ukázalo, že průměrná hodnota R_a se pohybovala kolem $4,9 \mu\text{m}$, což odpovídá běžným výsledkům 3D tisku kompozitních polymerů.

4.1 Možnosti dalšího výzkumu a rozvoje

Do budoucna se nabízí doporučit rozšířit experiment o podrobnější dynamické a cyklické testy, případně o numerické simulace napjatosti a deformace struktur v softwaru typu Abaqus. Dalším směrem výzkumu by mohlo být zkoumání vlivu různých úhlů orientace vláken, případně kombinace více typů výztuží v jedné matrici. Tato práce tak tvoří základ pro další rozvoj aditivních technologií v oblasti kompozitních materiálů s kontinuální výztuží realizovaných na pracovišti Katedry technických studií VŠPJ.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo studium vlivu uspořádání kontinuálních vláken v kompozitní matrici na výsledné mechanické charakteristiky vytištěných vzorků. Práce se zaměřila na návrh, výrobu a experimentální vyhodnocení kompozitních vzorků s různými typy výztužných struktur vyrobených pomocí 3D tiskárny Anisoprint Composer A4 technologií Composite Fiber Coextrusion.

Výsledky experimentální části prokázaly, že uspořádání výztuže a orientace kontinuálních vláken mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti kompozitního materiálu. Z tahových a ohybových zkoušek vyplynulo, že výplň Solid dosahovala nejvyšších hodnot pevnosti i tuhosti, což odpovídá její plné výplni bez mezer a optimálnímu přenosu zatížení mezi vláknem a matricí. Naopak výplň Isogrid pro tahovou zkoušku a Rhombic grid pro ohybovou zkoušku vykazovaly nejnižší pevnostní hodnoty.

Z analýzy drsnosti povrchu vyplynulo, že povrch vytištěných vzorků nedosahuje kvality tradičních subtraktivních metod, avšak hodnoty R_a 4,9 μm odpovídají standardům aditivní výroby polymerních materiálů. Mikroskopické pozorování potvrdilo správné zapouzdření uhlíkových vláken v matrici a soudržnost vrstev, přičemž jednotlivé typy výplně se lišily v míře pravidelnosti a homogenity struktury.

Získané výsledky jednoznačně potvrdily hlavní výzkumnou hypotézu, že orientace a geometrie výztužných vláken zásadním způsobem ovlivňují mechanické charakteristiky kompozitního materiálu. Práce tak přináší praktický přínos v podobě ověření vlivu různých výztužných struktur na pevnost, tuhost a povrchové vlastnosti, což může sloužit jako podklad pro optimalizaci 3D tištěných kompozitních dílů určených pro technické a konstrukční aplikace v průmyslu.

Přínosem autora je nejen praktické zvládnutí technologie CFC tisku, ale také provedení komplexní sady mechanických testů. Tato technologie prokazuje potenciál pro výrobu lehkých a pevných kompozitních struktur. Výsledky zároveň potvrzují, že 3D tisk s kontinuální výztuží představuje perspektivní metodu pro vývoj funkčních a konstrukčně optimalizovaných kompozitů.

Výsledky experimentů poskytují přehled o chování jednotlivých výztužných struktur a jejich vhodnosti pro konkrétní aplikace v technické praxi. Získané poznatky přispívají k efektivnějšímu návrhu kompozitních dílů a k optimalizaci jejich mechanických parametrů v oblasti aditivní výroby.

Seznam použité literatury

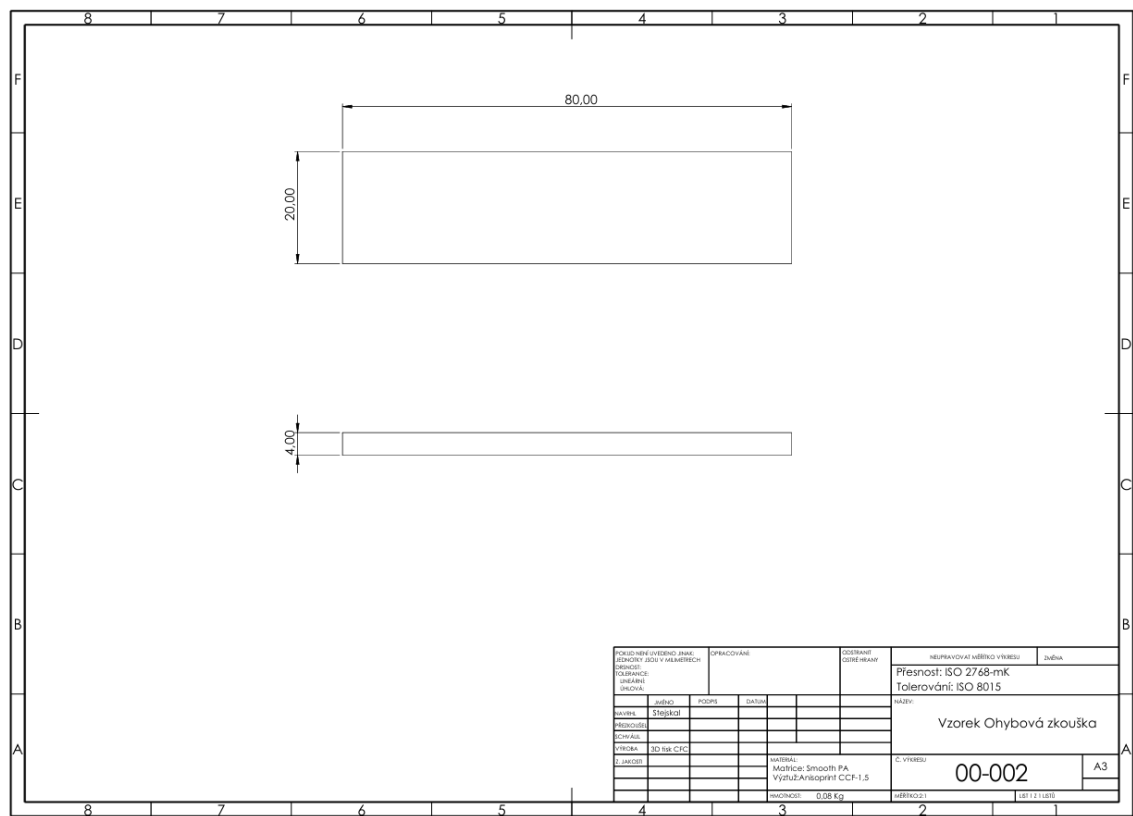
- ALMUFLIH, Ali Saeed; ABAS, Muhammad; KHAN, Imran a NOOR, Sahar. Parametric Optimization of FDM Process for PA12-CF Parts Using Integrated Response Surface Methodology, Grey Relational Analysis, and Grey Wolf Optimization. Online. 2024, article 1508. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym16111508>. [cit. 2025-11-19].
- ANDREOZZI, Marina; BRUNI, Carlo; FORCELESE, Archimede; GENTILI, Serena a VITA, Alessio. Compression Behavior of 3D Printed Composite Isogrid Structures. Online. *Polymers*. 2024, article 2747. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym16192747>. [cit. 2025-11-17].
- ANISOPRINT. *Composer A4 & A3 User Manual*. Online. 2020. Dostupné z: <https://support.anisoprint.com/composer/manual/>. [cit. 2025-11-17].
- ANISOPRINT. *Part Internal Structure*. Online. 2025. Dostupné z: <https://docs.anisoprint.com/aura/entities/#overview>. [cit. 2025-11-17].
- ANTONOV, Fedor. *Continuous fiber 3D printing: current market review by Fedor Antonov, CEO Anisoprint*. Online. 3D Printing Industry. 2019. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/continuous-fiber-3d-printing-current-market-review-by-fedor-antonov-ceo-anisoprint-164964/>. [cit. 2025-11-18].
- BLANCO, Ingazio. The Use of Composite Materials in 3D Printing. Online. *Journal of Composites Science*. 2020, article 42. ISSN 2504-477X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/jcs4020042>. [cit. 2025-11-17].
- ČERNÝ, Martin; GLOGAR, Petr a MANOCHA, Lalit M. Resonant frequency study of tensile and shear elasticity moduli of carbon fibre reinforced composites (CFRC). Online. *Carbon*. 2000, article 38, s. 2139-2149. ISSN 0008-6223. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00071-3](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00071-3). [cit. 2025-11-17].
- ČSN EN ISO 178 (640607). Plasty – Stanovení ohybových vlastností. 2019. Praha: Český normalizační institut. Dostupné také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-178-640607-211913.html>.
- ČSN EN ISO 527-2 (640604). Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. 2012. Praha: Český normalizační institut. Dostupné také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-527-2-640604-211897.html#>.
- ČSN EN 60068-2-6 ED. 2 (345791). Zkoušení vlivů prostředí – Část 2-6: Zkoušky – Zkouška Fc: Vibrace (sinusové). 2008. Praha: Český normalizační institut. Dostupné také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-60068-2-6-ed-2-345791-183335.html#>.
- ČSN EN ISO 16610-21 (014445). Geometrické specifikace produktu (GPS) - Filtrace – Část 21: Lineární profilové filtry: Gaussovy filtry. 2025. Praha: Český normalizační institut. Dostupné také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-16610-21-014445-253795.html>.
- DVOŘÁK, Karel. *Ukázka přípravku pro vibrační zkoušku s upnutím vzorku*. Vysoká škola polytechnická Jihlava. Jihlava, 2025.

- FORMLABS. 3D-Druck mit FDM, SLS und SLA im Vergleich. Online. 2025. Dostupné z: <https://formlabs.com/de/blog/fdm-sls-sla-3d-druck-im-vergleich/>. [cit. 2025-11-17].
- GRÉGR, Jan. Uhlíková vlákna. In: *Sborník Muzea Českého ráje v Turnově – Acta musei Turnoviensis*. Trutnov: Muzeum Českého ráje v Turnově, 2005, s. 107-119. ISBN 80-239-6435-6. [cit. 2025-11-19].
- HBK. LDS V650. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.hbkworld.com/en/products/integrated-systems/vibration-testing/shaker-systems/low-force/v650>. [cit. 2025-11-19].
- INSTRON. 3340 Series Single Column Table Top Models. Online. Dostupné z: <https://www.instron.com/wp-content/uploads/2024/07/3300-series-single-column-models-6.pdf>. [cit. 2025-11-17].
- INSIZE ISR-C300. Návod k obsluze. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.insize.at/user/documents/upload/Anleitungen/Form-Messger%C3%A4te/ISR-C300.pdf>. [cit. 2025-11-17].
- KABIR, S.M. Fijul; MATHUR, Kavita a SEYAM, Abdel-Fattah M. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. Online. *Composite Structures*. 2020, roč. 232, article 111476. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476>. [cit. 2025-11-17].
- KANTAROS, Andreas; SOULIS, Evangelos; PETRESCU, Floran Ion Tiberiu a GANETOSOS, Theodore. Advanced Composite Materials Utilized in FDM/FFF 3D Printing Manufacturing Processes: The Case of Filled Filaments. Online. *Materials*. 2023, article 6210. ISSN 2590-2385. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma16186210>. [cit. 2025-11-17].
- KORDCARBON. UHLÍKOVÁ VLÁKNA. Online. 2020. Dostupné z: https://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno. [cit. 2025-11-17].
- KYENCE. Digitální mikroskop Řada VHX-6000. Online. 2017. Dostupné z: https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/vhx-6000/index_cz.jsp. [cit. 2025-11-17].
- MARKFORGED. Mark Two Carbon Fiber 3D Printer. Online. 2025. Dostupné z: <https://markforged.com/3d-printers/mark-two>. [cit. 2025-11-17].
- PARMIGGIANI, Alberto; PRATO, Mirko a PIZZORNI, Marco. Effect of the fiber orientation on the tensile and flexural behavior of continuous carbon fiber composites made via fused filament fabrication. Online. 2021, article 114, s. 2085–2101. ISSN 1433-3015. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06997-5>. [cit. 2025-11-20].
- PARK, Soyoeon; SHOU, Wan; MAKATURA, Liane; MATUSIK, Wojciech a FU, Kun. 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications. Online. *Mattter*. S. 43-72. ISSN 2590-2385. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.10.018>. [cit. 2025-11-17].
- STŘÍTESKÝ, Ondřej; PRŮŠA, Josef a BACH, Martin. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Online. Praha: Prusa Reaserch, 2019. ISBN 978-80-270-5035-3. [cit. 2025-11-17].
- VOJTĚCH, Dalibor. Kovové materiály. In: . Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, s. 152-176. ISBN 80-7080-600-1.

- VRBKA, Jiří. Mechanika kompozitů. In: . Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Brno, 2008. ISBN 978-80-214-3612-1.
- WIECZOREK, Anna. Historie 3D tisku – kde to všechno začalo? Online. 2022. Dostupné z: <https://botland.cz/blog/historie-3d-tisku-kde-to-vsechno-zacalo/>. [cit. 2025-11-17].
- BOURIAUD, Manon a MRONCZ, Nikolaus. *Surface Roughness In 3D Printing*. Online. 2023. Dostupné z: <https://xometry.pro/en-eu/articles/3d-printing-surface-roughness/>. [cit. 2025-11-20].
- ZHENG, Haoyuan; ZHU, Shaowei; CHEN, Liming; WANG, Lianchao; ZHANG, Hanbo et al. 3D Printing Continuous Fiber Reinforced Polymers: A Review of Material Selection, Process, and Mechanics-Function Integration for Targeted Applications. Online. *Polymers*. Article 1601. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym17121601>. [cit. 2025-11-20].
- ZHOU, Zhuoying; ZHANG, Zhongsen; FU, Kunkun a YANG, Bin. Fabrication of a 3D Printed Continuous Carbon Fiber Composite Grid Stiffened Structure Using Induction Heating. Online. *Polymers*. 2023, article 3743. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym15183743>. [cit. 2025-11-17].
- 3D MANUFAKTURA. *Anisoprint Smooth PA 750cc 1,75mm Filament*. Online. 2025a. Dostupné z: <https://eshop.3dmanufaktura.cz/anisoprint-smooth-pa-750cc-1-75mm-filament/>. [cit. 2025-11-17].
- 3D MANUFAKTURA. *Anisoprint CFC PA 750cc 1,75mm*. Online. 2025b. Dostupné z: <https://eshop.3dmanufaktura.cz/anisoprint-cfc-pa-750cc-1-75mm/>. [cit. 2025-11-17].
- 3D MANUFAKTURA. *Anisoprint CCF -1,5K 750m kompozitní karbonové vlákno*. Online. 2025c. Dostupné z: <https://eshop.3dmanufaktura.cz/anisoprint-ccf-1-5k-750m-kompozitni-karbonove-vlakno/>. [cit. 2025-11-17].
- 3D MANUFAKTURA. *Anisoprint Composer A4 – kompozitní 3D tiskárna*. Online. 2025d. Dostupné z: <https://eshop.3dmanufaktura.cz/anisoprint-composer-a4/>. [cit. 2025-11-17].

Příloha A.1 Výkres vzorku pro tahovou zkoušku

Příloha A.2 Výkres vzorku pro ohybovou zkoušku



Příloha A.3 Výkres vzorku pro vibrační zkoušku

