

# 3D tištěný nástroj pro zpracování kompozitních materiálů

Pavel Pavelka

---

Bakalářská práce  
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Pavel Pavelka**  
Osobní číslo: **T21686**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **3D tištěný nástroj pro zpracování kompozitních materiálů**

## Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši na zadané téma.
- Návrh modelu vybrané součásti.
- Návrh skladby materiálového složení vybrané součásti.
- Optimalizace procesu 3D tisku nástroje a navrhnutí metodiky výroby vybrané součásti s následným experimentálním ověřením.
- Vyhodnocení a stanovení závěrů výsledků bakalářské práce.

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

Seznam doporučené literatury:

1. HARPER, Charles A. Handbook of plastics, elastomers, and composites. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2002, xii, 884 p. ISBN 00-713-8476-6.
2. WANBERG, John. Composite materials: step by step projects. Stillwater, MN: Wolfgang Publications, [2014]. ISBN 978-1-929133-36-9.
3. WANBERG, John. Composite materials: Fabrication handbook 3. Stillwater, MN: Wolfgang Pub, 2012. ISBN 978-1-935828-66-2.
4. WANBERG, John. Composite materials. Stillwater, MN: Wolfgang Pub., c2009. Fabrication handbook, #1. ISBN 19-291-3376-6.
5. SHIGLEY, J. E., MISCHKE, Ch. R., BUDYNAS, R. G. a VLK M. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Mañas, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2024**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2024**

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 4. března 2024

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

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

### **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- Že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářské práce se zabývá návrhem 3D tištěného nástroje pro výrobu kompozitních materiálů.

Teoretická část práce se zaměřuje na přiblížení problematiky kompozitních materiálů. Zejména popisuje jejich skladbu, používané výrobní technologie a možnosti použití součástí z 3D tištěných nástrojů v odvětví kompozitních materiálů. Neopomíná ani problematiku forem pro zaformování součástí z kompozitů při průběhu jejich výroby. Praktická část bakalářské práce popisuje návrh zvolené součásti, optimalizaci 3D tisku a zabývá se materiálovou skladbou pro výrobu dané součásti. Součástí praktické části je rovněž výroba formy i výrobku z kompozitního materiálu.

Klíčová slova: 3D tisk, kompozitní materiály, 3D tištěná forma, uhlíkové vlákno

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with the design of a 3D printed tool for processing composite materials.

The theoretical part of the work focuses on approaching the issue of composite materials. In particular it describes their composition, the production technologies used and the possibilities of using components from 3D printed tools in the composite materials sector. It does not neglect the issue of molds for components forming from composites during their production. The practical part of the bachelor's thesis describes the design of the selected component, the 3D printing optimization and deals with the material composition for the production of the component. The practical part also includes production of a the mould and the finished product made of composite material.

Keywords: 3D print, composite materials, 3D printed mould, carbon fiber

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Lukáši Maňasovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, trpělivost, jeho čas a cenné rady během zpracování mé bakalářské práce, zejména v praktické části. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vojtěchovi Šenkeříkovi, Ph.D. za pomoc a ochotu při 3D skenování.

Díky také patří mým blízkým za veškerou podporu během studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 3D TISK</b> .....	<b>11</b>
1.1 DRUHY 3D TISKU .....	11
1.1.1 Fused Deposition Modeling .....	11
1.1.2 Stereolitografie .....	12
1.1.3 Selective Laser Sintering a Direct Metal Laser Sintering .....	13
<b>2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>15</b>
2.1 VÝZTUŽE.....	15
2.1.1 Uhlíková vlákna .....	15
2.1.2 Aramidová vlákna .....	16
2.1.3 Skelná vlákna .....	17
2.1.4 Hybridní výztuže .....	17
2.2 PRODUKTY Z VÝZTUŽÍ.....	18
2.2.1 Sekaná vlákna.....	18
2.2.2 Tkaniny .....	18
2.2.3 Rohože.....	19
2.2.4 Prepreg .....	19
2.3 MATRICE .....	20
2.3.1 Epoxidová pryskyřice.....	20
2.3.2 Polyesterové pryskyřice .....	20
2.3.3 Vinylesterové pryskyřice .....	21
2.4 TECHNOLOGIE VÝROBY .....	21
2.4.1 Ruční kladení .....	21
2.4.2 Vakuová infuze .....	22
2.4.3 Lisování.....	23
<b>3 3D TIŠTĚNÉ NÁSTROJE PRO ZPRACOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>24</b>
3.1 3D TIŠTĚNÉ FORMY .....	24
3.2 3D TIŠTĚNÁ JÁDRA FOREM .....	25
<b>4 3D SKENOVÁNÍ</b> .....	<b>26</b>
4.1 LASEROVÉ SKENOVÁNÍ.....	26
4.2 OPTICKÉ SKENOVÁNÍ.....	26
4.3 SKENOVÁNÍ ČÁSTÍ LIDSKÉHO TĚLA.....	26
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>27</b>
<b>5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....	<b>28</b>
<b>6 NÁVRH 3D TIŠTĚNÉHO NÁSTROJE</b> .....	<b>29</b>

6.1	NÁVRH MODELU CHRÁNIČE.....	29
6.1.1	Úpravy skenu holeně.....	29
6.1.2	Tvorba modelu chrániče.....	30
6.2	NÁVRH FORMY.....	31
6.2.1	Návrh tvárníku.....	31
6.2.2	Návrh tvárnice.....	32
<b>7</b>	<b>OPTIMALIZACE PROCESU 3D TISKU.....</b>	<b>35</b>
7.1	NAVRHNUTÍ METODIKY TISKU.....	35
<b>8</b>	<b>NÁVRH MATERIÁLOVÉ SKLADBY.....</b>	<b>39</b>
<b>9</b>	<b>VÝROBA SOUČÁSTI.....</b>	<b>40</b>
9.1	3D TISK FORMY A JEJÍ ÚPRAVA PO VYTIŠTĚNÍ.....	40
9.2	PŘÍPRAVA MATERIÁLU.....	42
9.3	RUČNÍ LAMINACE.....	43
9.4	ODFORMOVÁNÍ VÝROBKU.....	46
9.5	ÚPRAVA HOLENNÍHO CHRÁNIČE.....	47
<b>10</b>	<b>OPTIMALIZACE FORMY PRO LEVÝ CHRÁNIČ.....</b>	<b>50</b>
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>51</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>59</b>



## ÚVOD

V současném průmyslovém a technologickém prostředí se 3D tisk stává nejenom revolučním nástrojem, ale také přináší inovativní přístupy k výrobě a zpracování materiálů. Jedním z nejzajímavějších a perspektivních směrů v oblasti 3D tisku je jeho aplikace při práci s kompozitními materiály. Kompozity, složené z kombinace různých materiálů, poskytují unikátní vlastnosti, jako je pevnost, lehkost a odolnost vůči korozním procesům. Využití 3D tištěných nástrojů pro práci s těmito materiály přináší revoluční možnosti v oblasti inženýrství a výroby. Zaměření na kompozitní materiály otevírá dveře k široké škále aplikací, od leteckého a automobilového průmyslu, kde se vyžaduje maximální pevnost za minimální hmotnosti, až po medicínské aplikace, kde je důležitá biokompatibilita a schopnost odolávat fyziologickým podmínkám. Tato flexibilita v použití kompozitů znamená, že 3D tištěné nástroje mají potenciál transformovat mnoho odvětví průmyslu a přinést inovativní řešení do oblastí, které byly dříve omezeny tradičními výrobními metodami.

V teoretické části této bakalářské práce jsou popsány nejběžnější druhy 3D tisku, kompozitní materiály, včetně jejich složení a struktury, a včetně popisu používaných výztuží a maticí. Dále jsou popsány nejčastěji využívané technologie pro výrobu kompozitních součástí. Tato část práce rovněž přináší přehled o 3D tištěných formách používaných při výrobě kompozitních výrobků a možnostech využití 3D tištěných jader pro vytvoření dutin a složitých tvarů. Nakonec pak 3D skenování, jeho rozdělení a 3D skenování lidského těla.

Cílem bakalářské práce bylo vyhotovení 3D tištěného nástroje pro výrobu součástí z kompozitních materiálů a experimentální ověření. Jako předmětná součást byla pro výrobu zvolen holenní chránič. Praktická část bakalářské práce je proto věnována návrhu tvaru a modelu této formy, její výrobě, a také návrhu materiálové skladby a výrobě chrániče v této formě.

**I.**

## **TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 3D TISK

Aditivní výrobní proces, známý jako 3D tisk, je způsob vytváření objektů nebo součástí podle požadovaných 3D CAD modelů postupným ukládáním materiálu vrstvu po vrstvě. Oproti tradičním výrobním metodám, kde jsou díly formovány odstraňováním nadbytečného materiálu z bloku surového materiálu, není při aditivní výrobě potřeba používat řezací nástroje. Tento přístup je proto označován jako bez nástrojový způsob výroby.

Aditivní výroba umožňuje flexibilní návrh složitých struktur s maximální efektivitou tím, že odstraňuje omezení v návrhu, která jsou spojená s tradičními odebíracími technikami. Široká škála materiálů, včetně kovů, polymerních materiálů, biomateriálů, kompozitů, slitin, stavebních materiálů a keramiky, může být zpracována pomocí různých technik aditivní výroby.

### 1.1 Druhy 3D tisku

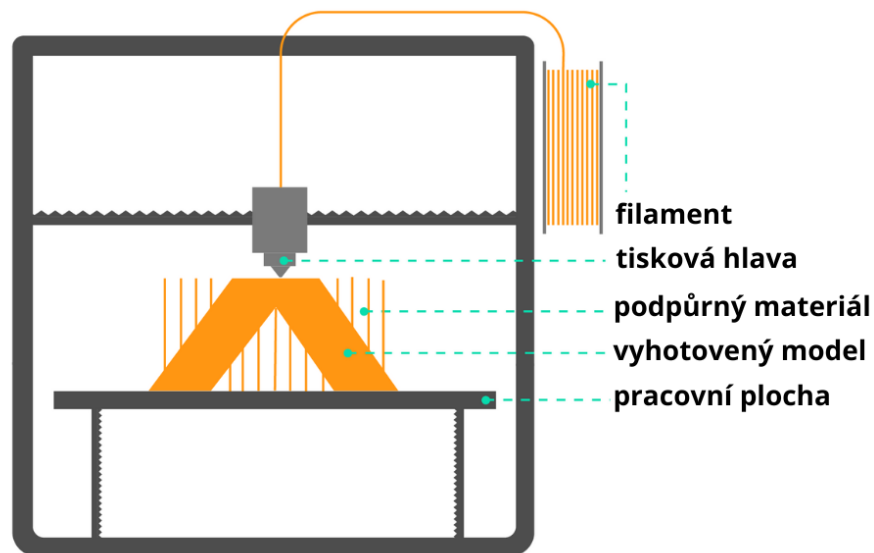
Trojrozměrný tisk se používá jako synonymum pro všechny procesy aditivní výroby, ale ve skutečnosti se jednotlivé metody liší v závislosti na použitých surovinách a jejich zpracování, kterým je například způsob ukládání materiálu, a využití zdroje energie.

Pro různé typy materiálů lze využít rozdílné procesy zpracování. Například pro vytisknutí polymerních součástí může být použita metoda VAT foto-polymerizace, extruze materiálu nebo fúze práškového lůžka. Stejně tak pro tisk kovových součástí lze využít fúzi práškového lůžka, extruze materiálu a přímou depozici energie. [1]

#### 1.1.1 Fused Deposition Modeling

Tato technologie umožňuje rychlé vytvoření prototypu za poměrně krátký čas. S touto metodou se lze také potkat pod názvem Fused Filament Fabrication (FFF). Je nejrozšířenější a také nejdostupnější technologií 3D tisku. Výrobním materiálem je primárně roztavený polymer v podobě struny (filamentu), který je extrudován (vytlačován) a postupně nanášen vrstvu po vrstvě. V důsledku toho jsou na výsledném produktu viditelné tiskové vrstvy, což je charakteristický rys pro tuto metodu. Tisková vrstva je sestavována tak, že hlava extruze nejprve deponuje obrys vrstvy, což je hraniční linie, a poté tento obrys vyplní materiálem podle nastavených vlastností rastru, které určil operátor. Rastr vyplnění obrysu je série rovných úseků, které jsou spojeny a jsou rovnoměrně rozestaveny. Jakmile je každá vrstva deponována, splyne s předchozí vrstvou, vytvářející pevný model. Možnost tisku v různých barvách závisí na volbě barvy použitého tiskového materiálu.

FDM se využívá v široké škále odvětví a je oblíbená pro svou cenovou dostupnost, intuitivní ovladatelnost a schopnost pracovat s různými druhy polymerů. Tato metoda 3D tisku nachází uplatnění od prototypování až po výrobu koncových výrobků a je populární v domácím prostředí i v průmyslových aplikacích. [2; 3]

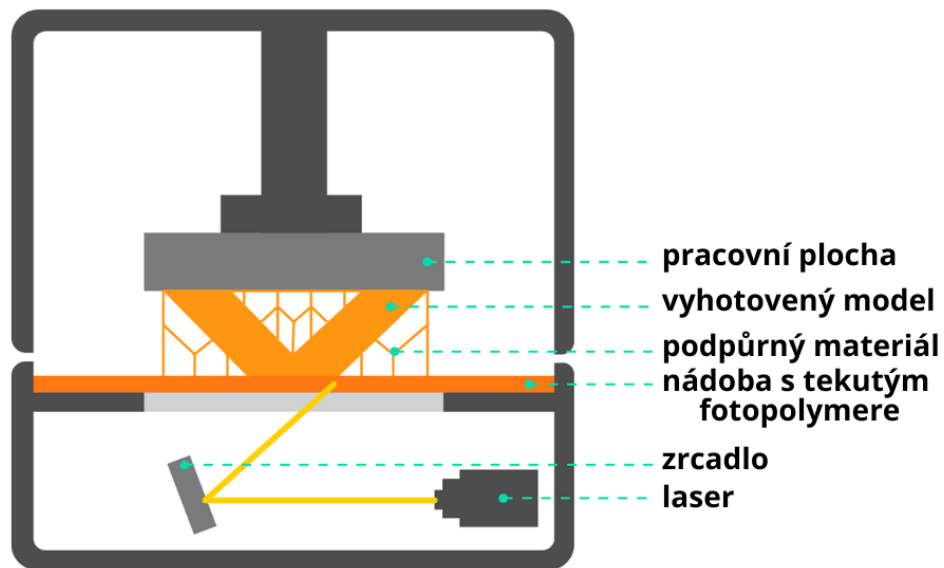


Obrázek 1 Schéma FDM 3D tiskárny [4]

### 1.1.2 Stereolitografie

Stereolitografie (SLA) funguje na principu vytvrzování tekuté pryskyřice výkonným laserem a vytváří tak požadovaný tvar. Tímto procesem přeměňuje fotosensitivní pryskyřici na pevný polymer, vrstvu po vrstvě díky fotopolymerizaci. Tiskárna pracuje s odlišným pohybem než u ostatních metod 3D tisku. Namísto pohybu samotné tiskárny se při stereolitografii pohybuje prvek vytváření tvaru, což je výkonný laser, v rámci tekuté pryskyřice. Tento laser postupně vytvrzuje jednotlivé vrstvy produktu, což umožňuje precizní a detailní tisk složitých struktur.

Tato inovativní technika poskytuje vysoké rozlišení a přesnost, což je výhodné zejména při vytváření komplexních geometrických tvarů. Stereolitografie se často využívá pro výrobu prototypů, modelů a součástí v oblastech jako lékařství, průmyslový design a inženýrství. Její schopnost tisku s vysokým detailem ji činí důležitým nástrojem pro různé odvětví průmyslu. [5]

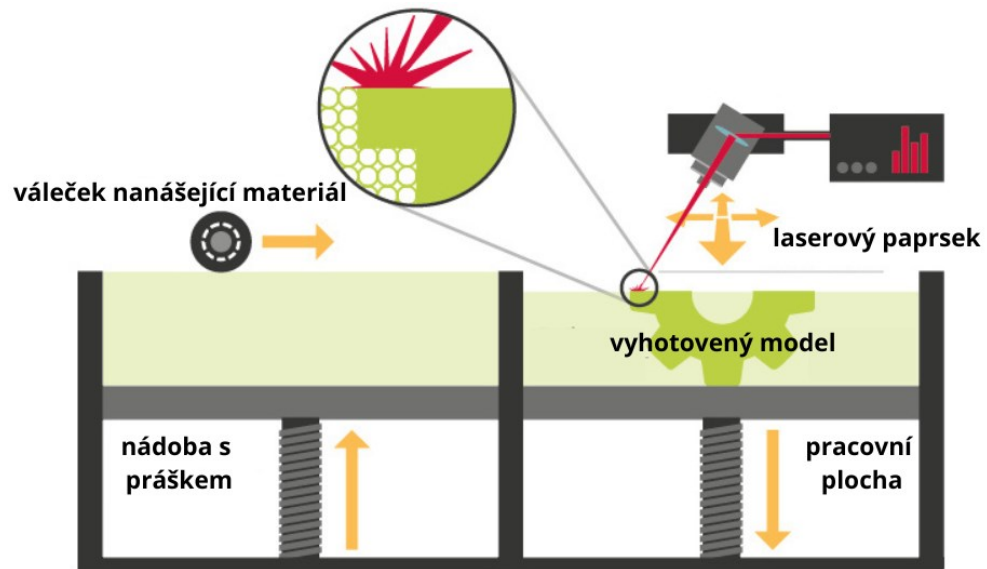


Obrázek 2 Schéma SLA 3D tiskárny [6]

### 1.1.3 Selective Laser Sintering a Direct Metal Laser Sintering

Technologie 3D tisku jako SLS (Selective Laser Sintering) a DMLS (Direct Metal Laser Sintering) patří mezi pokročilé metody vytváření třírozměrných objektů. Při každém tiskovém procesu válec nanese tenkou vrstvu prášku, která je pak postupně spékána laserem, čímž se zpevní v místech, kde má vzniknout konečný objekt. Tento proces se opakuje, dokud není celý model kompletně vytištěn a obalen tiskovým materiálem.

Díky tomu, že tiskový materiál není zcela roztavený, ale spékán do pevné formy, se minimalizuje množství odpadu. Avšak při tvorbě dutých modelů je nutné zahrnout otvory, které umožní odstranění neztvrdlého materiálu a jeho následné opětovné použití pro další tiskové úkony.



Obrázek 3 Schéma SLS 3D tiskárny [7]

Tyto speciální tiskárny nejsou běžně dostupné pro širokou veřejnost jako tradiční FDM tiskárny. Jejich využití se soustředí především v průmyslových odvětvích, kde mají klíčovou roli ve výrobě prototypů, dílců a speciálních komponent. Jejich cena začíná od 150 000 Kč a odráží jak jejich specializované využití, tak náklady na technologii a materiály, které jsou pro tyto procesy vyžadovány. [2]

## 2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou charakterizovány kombinací dvou a více materiálů, a to výztuže a základního materiálu – matrice. Tyto složky mají vůči sobě různé chemické i mechanické vlastnosti a každá ze složek přispívá k vlastnostem kompozitu. Podstata je získat nové materiály, využívající synergický efekt.

V porovnání s tradičními kovovými materiály mohou kompozity nabídnout až pětinasobně vyšší poměr pevnosti a hmotnosti. Stejně tak i poměr tuhosti a hmotnosti u těchto materiálů může dosáhnout až osminásobku hodnoty oproti kovům. Proto jsou kompozitní materiály stále více preferovanou volbou pro konstrukce, které kladou důraz na snížení hmotnosti, jako jsou například komponenty automobilů, letadel a kosmických technologií. [8; 9]

### 2.1 Výztuže

Výztuž je klíčovou složkou kompozitů. Obecně má větší pevnost a je tužší než matrice a její hlavní funkcí je přenášet zatížení.

Zpracovávané kompozity můžeme rozdělit do dvou skupin v závislosti na způsobu, jakým jsou vlákna uspořádána v matrici. První skupinu nazýváme kompozity zpevněné vlákny, zatímco druhou skupinu nazýváme kompozity zpevněné částicemi.

#### 2.1.1 Uhlíková vlákna

Uhlíkové vlákno je vlákno, které dosahuje nejlepší mechanické vlastnosti. Zejména oceňovaný je jeho vysoký modul pružnosti, který v kombinaci s nízkou hmotností předurčuje uhlíkové vlákno pro použití v nejnáročnějších aplikacích. Vlastnosti vláken se liší podle použitého polotovaru (prekurzoru) a podle parametrů výrobního postupu. Na trhu lze nalézt vlákna, které dosahují vysokých pevností (HT – High Tenacity, HS – High Strength), vlákna se středním nebo vysokým modulem pružnosti. Tkaniny z uhlíkových vláken se také prodávají v různých gramážích.



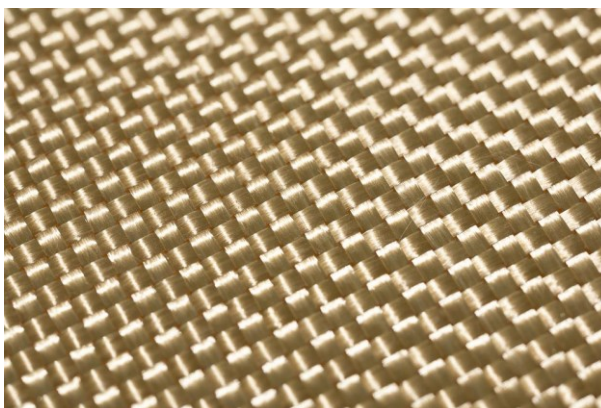
Obrázek 4 Uhlíkové vlákno [10]

### 2.1.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů. Název vychází z názvu aromatický polyamid. Hlavní přednost aramidových vláken je vysoká pevnost, tuhost, odolnost vůči otěru a odolnost vůči působení vysokých teplot. Nevýhoda aramidových vláken je jejich obtížné krácení, jak ve stavu nevytvrzeném, tak po vytvrzení kompozitní součásti. Jednou z nejlepších možností obrábění vytvrzeného kompozitu z aramidových vláken je řezání vodním paprskem.

Díky jejich příznivým vlastnostem jsou hlavními oblastmi použití výztuž pro pneumatiky, balistické aplikace, náhrada azbestu ve třecích a brzdových obloženích a světlovodné kabely.

Aramidová vlákna se dají zpracovávat se všemi reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. V laminátu lze využít 70 % jejich pevnosti, při zvláště tažné matrici ještě více. [11; 12]



Obrázek 5 Aramidové vlákno [13]



### 2.1.3 Skelná vlákna

Skelná vlákna (GF – Glass Fiber) je název pro tenká vlákna průměrů 3,5 až 24  $\mu\text{m}$  s kruhovým pravidelným průřezem, tažená z roztavené skloviny.

Skelných vláken rozeznáváme několik druhů, lišících se použitím a jejich vlastnostmi:

- E-sklo – vyšší elektrický odpor,
- S-sklo – vysoká pevnost,
- C-sklo – vysoká chemická odolnost,
- sklo ACR – odolné proti alkáliím,
- křemenná vlákna.

Základem je vždy silikát  $\text{SiO}_2$  s přísadkami oxidů kovů. Skelné vlákno se vyrábí zvlákněním taveniny s následným dlužením. Problémem skelného vlákna je absorpce vody na jeho povrchu a proto se vlákno chrání lubrikantem. [9]

Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou velmi dobrými elektrickým izolantem. [11]

### 2.1.4 Hybridní výztuže

V těchto tkaninách je kombinováno více druhů tkanin. Jsou využity kladné vlastnosti z každého, v této tkanině využitého, vlákna.

Může to být například hybridní tkanina využívající houževnatost aramidového vlákna s tuhostí uhlíkového vlákna.



Obrázek 6 Hybridní výztuž [14]

## 2.2 Produkty z výztuží

U vláknové výztuže je popisována jejich délka (krátká vlákna, dlouhá vlákna) a jejich sdružování (například rohože a tkanina). U částicové výplně je dělení podle pravidelnosti a nepravidelnosti.

### 2.2.1 Sekaná vlákna

Jsou to vlákna krácená do určité délky. Podle délky se často dělí do tří skupin:

- Mletá vlákna (100  $\mu\text{m}$  – 3mm)
- Krátká sekaná vlákna (do 6 mm)
- Dlouhá sekaná vlákna (do 50 mm)

Díky jejich krátké délce jsou tyto materiály často flexibilnější a snáze se přizpůsobují tvarům a povrchům, což je ideální pro složitější geometrie výrobků. Tato flexibilita je činí vhodnými pro širokou škálu aplikací, od automobilového průmyslu po stavbu letadel a sportovní vybavení. Sekaná vlákna se dále využívají pro výrobu prepregů, rohoží, jako výplň termoplastů či velmi často samostatně s pryskyřicí. [11; 15; 16]



Obrázek 7 Sekaná uhlíková vlákna [17]

### 2.2.2 Tkaniny

Plošné výrobky z vláken nebo pramenců, uložených kolmo přes sebe. Vznikají tak různé typy křížení. Oproti jednosměrně orientované výztuži, jsou tkaniny snáze zpracovatelné. Jejich struktura je složitější a umožňuje různé vlastnosti v různých směrech, což je velkou

výhodou při konstrukci a modelování materiálů pro různorodé aplikace. Mohou se lišit skladbou materiálu, rozdílnou délkou a šířkou nebo hmotností, což umožňuje přesné přizpůsobení materiálu požadavkům daného použití.

### 2.2.3 Rohože

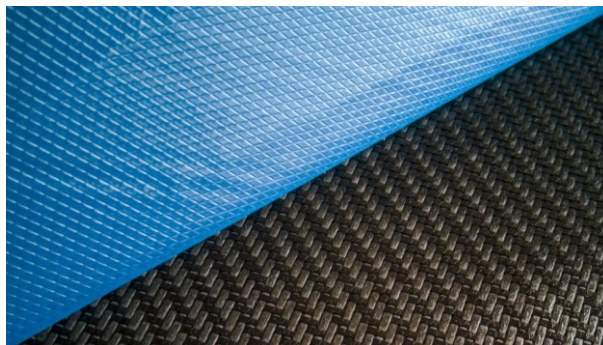
V náhodném uspořádání jsou kontinuální nebo sekaná vlákna rovnoměrně uspořádána vedle sebe, přičemž jsou překryta řadou nití, které probíhají příčně pod různými nastavitelnými úhly (multiaxiálně), a jsou zpevněna po celé šíři prostřednictvím propletení nebo vpichování. Tyto rohože mají hmotnost 30-900 g/m<sup>2</sup> a jsou snadno ohebné.

### 2.2.4 Prepreg

Název prepreg je zkratka pro anglický výraz preimpregnated fibres neboli předimpregnovaná výztuž. Je to polotovar, kde je tkanina již naimpregnovaná pryskyřicí a zjednoduší se obtížný a časově zdlouhavý proces prosycování výztuže při výrobě dílce. Prepreg se vyrábí pomocí zařízení, které dosahuje a zaručuje stále stejné vlastnosti polotovaru, což má velký vliv na jakost a vlastnosti budoucího výrobku. Velkou nevýhodou prepregu je, že se musí skladovat při teplotě -20 °C v mrazicím zařízení, a to maximálně po dobu 6 - 12 měsíců což záleží na materiálu.

Součásti vyrobené z prepregu jsou nejčastěji vytvářeny pomocí metod jako je lisování ve vakuu, lisování ve vyhřívané formě nebo v autoklávu. Tyto metody umožňují precizní formování a vytvrzování materiálu, což vede k dosažení požadovaných mechanických vlastností.

Prepregy nacházejí uplatnění v široké škále průmyslových odvětví, včetně leteckého průmyslu, automobilového průmyslu, výroby sportovních nástrojů (např. sportovních lodí nebo lyží) a v oblasti energetiky. [11; 15]



Obrázek 8 Prepreg z uhlíkového vlákna [18]

## 2.3 Matrice

Matrice je jedna ze dvou základních částí kompozitu. Vlákná jsou matricí prosycena v celém objemu kompozitního dílu tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Matrice má několik funkcí, a to:

- uzavření a spojení výztuže
- ochrana výztuže před vnějšími vlivy
- distribuce zatížení
- zajištění geometrické polohy vláken a stálosti výrobku

Matrice musí mít požadovanou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákna úplně smáčela a nevznikaly bubliny. [9]

### 2.3.1 Epoxidová pryskyřice

Epoxidové pryskyřice vykazují stabilitu rozměrů (jejich objemové smrštění se pohybuje od 2 do 5 %), dobrou přilnavost k podkladu a vysokou pevnost, zejména při dynamickém namáhání. Díky těmto vlastnostem jsou ideální jako matrice pro kompozitní materiály obsahující například uhlíková vlákna. Jsou využívány především v automobilové a leteckém průmyslu. Mezi nevýhody epoxidových pryskyřic patří čtyř, až pětinasobně vyšší cena ve srovnání s polyesterovými pryskyřicemi, náročné požadavky na přesnost poměru mezi tvrdidlem a pryskyřicí a poměrně vysoká viskozita. [11; 19]

### 2.3.2 Polyesterové pryskyřice

Jde o reaktivní pryskyřice, jež jsou průhledné, téměř bezbarvé až mírně nažloutlé, a které lze vytvrdit při obvyklých nebo zvýšených teplotách. Při procesu vytvrzování dochází k společné chemické a tepelné reakci, dochází k objemovému smrštění o 6 až 9 %. Jejich hlavními výhodami jsou nízká cena, nízká viskozita, schopnost dobře pronikat do vláken a možnost regulovat rychlosti zatvrdnutí. Právě díky těmto vlastnostem jsou polyesterové pryskyřice často používaným materiálem pro výrobu kompozitních materiálů. Nevýhodou však zůstává jejich snížená odolnost vůči alkalickému působení.

### 2.3.3 Vinylesterové pryskyřice

Jde o nenasyčené estery epoxidových pryskyřic, které se vyrábějí buď z bisfenolu A, nebo jako novolakové vinylesterové pryskyřice. Obsahují aktivní rozpouštědlo, obvykle styren. Makromolekula předpolymerní vinylesterové pryskyřice má nižší počet aktivních míst než u polyesterové pryskyřice, dvojná vazba je umístěna pouze na koncích makromolekuly. To má za následek menší míru síťování, což vede k větší pružnosti pryskyřice a zvýšené odolnosti proti vzniku mikrotrhlin. Kompozity s vinylesterovými pryskyřicemi vykazují větší mezilaminární smykovou pevnost a vyšší houževnatost než kompozity s nenasyčenými polyesterovými pryskyřicemi. [19]

## 2.4 Technologie výroby

Každá skupina kompozitů má odlišný mechanismus zpevnění a pevnost, v závislosti na aplikaci. U součástí vyrobených z dlouhých, nebo spojitých vláken, může být anizotropie žádoucí, protože ji lze uspořádat tak, aby maximální napětí leželo ve směru vláken, tudíž s nejvyšší pevností. To znamená, že uspořádání vláken v matrici v úhlech  $0^\circ/90^\circ$  dodává kompozitní struktuře pevnost ve dvou kolmých směrech. Složitější uspořádání, jako jsou pláty s  $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$  poskytují zpevnění ve více směrech. To můžeme využít u technologií jako jsou různé druhy laminace, vakuová infuze nebo pultruze.

U krátkovláknových, či částicových kompozitů s polymerní matricí se mohou využít technologie, jako je vstřikování a extruze. [9; 20]

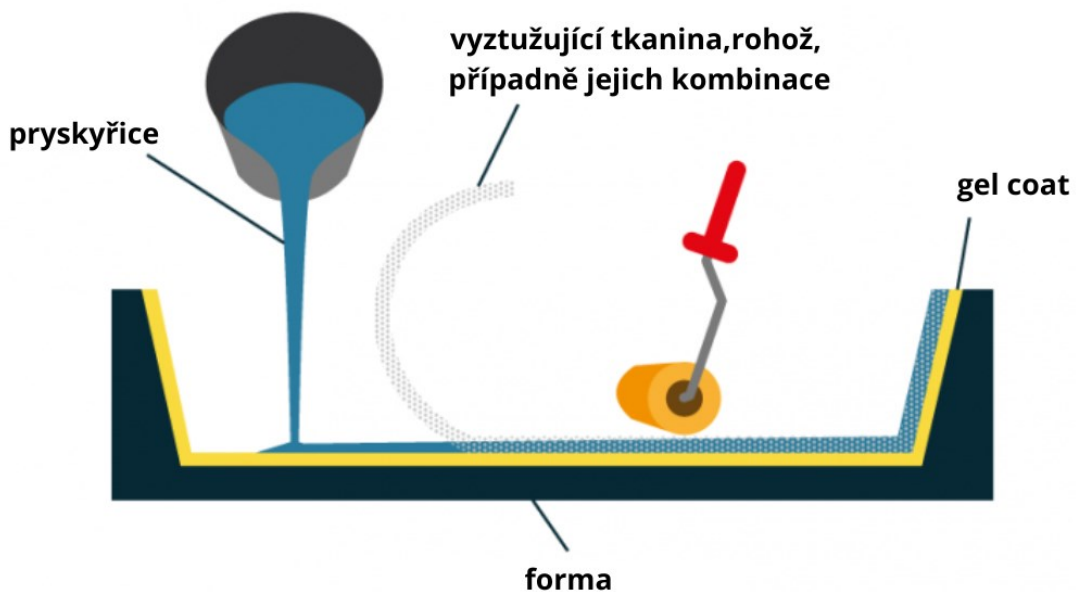
### 2.4.1 Ruční kladení

Ruční kladení je nejjednodušší výrobní postup kompozitních dílců, který je vhodný pro malosériovou výrobu, výrobu prototypů nebo velkoplošných dílů. Jakost vyrobeného dílu závisí na zkušenostech a znalostech zpracovatele. Výrobní proces dílů s pryskyřicemi nejčastěji zahrnuje jejich vytvrzování za studena, což znamená při pokojové teplotě. Samotný proces vytvrzování je závislý na použitém vytvrzovacím systému. Použitím urychlovače lze zkrátit dobu želatinizace pryskyřice (tzv. gel time).

Výroba začíná nanesením vrstvy separátoru na povrch formy a následně nanesení vrstvy pryskyřice o tloušťce 0,3 až 0,6 mm, tzv. gel coat.

Pryskyřice se nanáší štětcem, válečkem nebo stříkací pistolí. Důležitou součástí ručního kladení je správné položení výztuže – nejčastěji tkaniny nebo rohože – do předem nanesené

pryskyřice. Je při tom nutné zamezit vzniku bublin, které se mohou objevit po vyjmutí dílce z formy na povrchu. [11; 19]



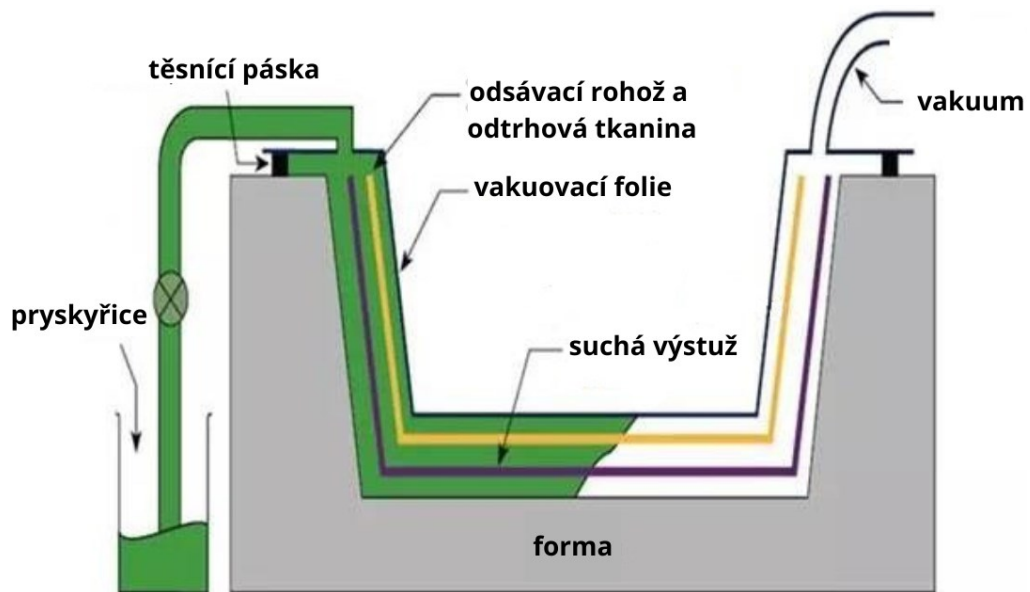
Obrázek 9 Ruční kladení [21]

#### 2.4.2 Vakuová infuze

Proces vakuové infuze využívá rozdíl tlaku mezi uzavřeným systémem formy a atmosférickým tlakem jako pohon pro vmísení pryskyřice do výztuže. To zvyšuje poměr mezi vláknem a pryskyřicí, což přináší výhody oproti tradičním metodám jako je ruční kladení. Tento uzavřený proces ve vakuovací fólii také minimalizuje odpad materiálu, což je významné z hlediska udržitelnosti. Zároveň minimalizuje expozici pryskyřice, takže je lidské tělo méně vystavováno škodlivým látkám.

Proces začíná položením suchých výztuží na povrch formy, následně jsou použity specifické rozváděcí tkaniny k usnadnění průtoku pryskyřice. Následuje zakrytí vakuovací fólií a připojení hadic k nádobě s pryskyřicí a k vakuové vývěvě. Vakuová vývěva je použita k odstranění vzduchu z formy, čímž je vytvořen rozdíl tlaku, který saje pryskyřici do dutiny a přes laminát. Tímto způsobem je zajištěno rovnoměrné nasycení výztuže pryskyřicí.

Díky schopnosti hnát pryskyřici do dílu během procesu, je dosaženo lepší distribuce a poměru vlákna k pryskyřici, což eliminuje přebytečnou pryskyřici a zabraňuje tak vzniku výrobků s vyšší hmotností a případné lámavosti. V průmyslovém a spotřebním sektoru, kde je preferováno využití lehčích a pevnějších kompozitů, je proces vakuové infuze účinný způsob výroby kompozitních materiálů, který přináší řadu vylepšení oproti tradičním metodám. [22]



Obrázek 10 Vakuová infuze [23]

### 2.4.3 Lisování

V principu je možné rozdělit lisování na dva typy: lisování za tepla a lisování za studena. Lisování za tepla je obvykle preferovanější, protože teplo urychluje proces vytvrzování materiálu, což zkracuje dobu potřebnou k výrobě jednoho kusu. Technologií využívající lisování lze zpracovávat také prepregové polotovary či polotovary obsahující jádrové materiály. Tyto semiprodukty označujeme jako sendvičové struktury.

Existují různé typy lisů, od manuálních a poloautomatických po plně automatické. Nicméně, jejich nevýhodou je vysoká pořizovací cena. [11]

### 3 3D TIŠTĚNÉ NÁSTROJE PRO ZPRACOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

3D tisk poskytuje rozmanité možnosti v oblasti kompozitních struktur. Využití 3D tisku zahrnuje tisk forem pro výrobu kompozitních komponent nebo vytváření jader pro duté části kompozitních materiálů.

Čím více se začaly rozšiřovat a využívat kompozitní materiály, tím byla větší poptávka po dalších nástrojích. Výrobci nástrojů kladou velký důraz na průmyslovou schopnost vyrábět a udržovat vysoce kvalitní nástroje a zároveň zachování nákladové efektivity. Nástroje a formy představují velkou část celého výrobního řetězce kompozitních komponent.

Popularita 3D tisku při výrobě kompozitních součástí je díky značným výhodám nad obráběním konvenčními metodami. Díky 3D tisku lze vytisknout celý nástroj nebo formu z jednoho kusu namísto spojování samostatných komponent dohromady, což pomáhá přispívat k výraznému snížení nákladů na nástroje. [24]

Naopak jednou z hlavních výzev, je odstranění vysoké drsnosti povrchu, která by se mohla přenášet přímo do finálního povrchu vyrobeného kompozitu. Termoplastické polymery jsou obecně rozpustné v některých rozpouštědlech, což nabízí možnost využití různých chemických sloučenin k úpravě a zlepšení kvality povrchu. Tím lze vyhladit jednotlivé vrstvy materiálu při metodě FDM. Další možností je použití mechanického broušení s různými nástroji. Nicméně při použití této metody mohou vzniknout problémy u složitých geometrií forem, zejména v oblastech záhybů a přechodů. [24; 25]

#### 3.1 3D tištěné formy

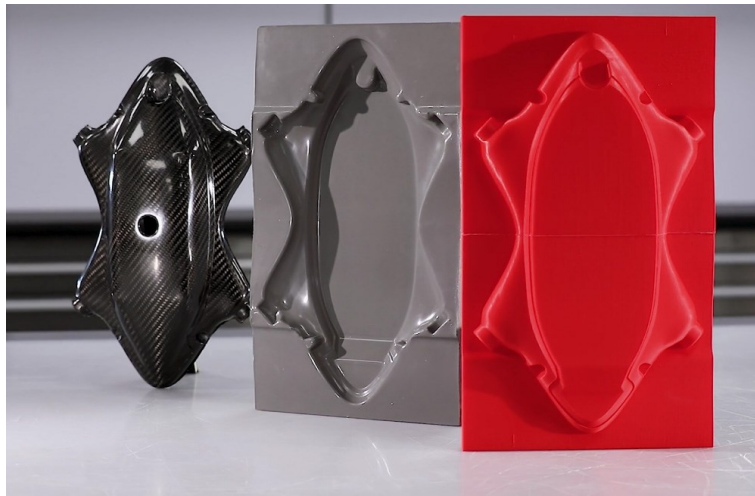
Výroba forem je velmi nákladná záležitost. Možnosti použití materiálu pro výrobu formy mohou být kovové, plastové nebo kompozitní. U kompozitních forem je nutný model, aby bylo možné vyrobit formu. Ten je možné vyrobit 3D tiskem nebo obráběním například dřeva.

Formy vyrobené metodou 3D tisku jsou vyráběny automatizovaným procesem přímo z digitálního modelu, tudíž je dosaženo výrazné snížení ceny, ušetření času a zároveň dosažení přesnějších výsledků. Tento proces je ideální pro výrobu prototypů a aplikací, kde je nabízena individuální úprava výrobku podle požadavků zákazníka nebo kde má design výrobku členitou geometrii, kterou by bylo obtížné vyrobit jinými způsoby. [24; 26]



Výplň formy by měla být určena dle použité technologie. To znamená přizpůsobit výplň namáhání, které bude působit v průběhu výroby kompozitního dílu na formu.

Pro vakuovou infuzi a laminaci, popřípadě pro technologii, kde působí síly ve více směrech, je vhodné použít typ výplně gyroid s třemi konturovacími liniemi, s výplní alespoň 20 %, jež dává stejnou pevnost ve všech třech směrech. Pro lisování je vhodné použít typ mřížka, plástev a přímočará výplň s výplní od 40 %. Tyto typy mřížek zaručují pevnost ve vertikálním směru. [24; 27]



Obrázek 11 3D tištěná forma [28]

### 3.2 3D tištěná jádra forem

Inovativní přístup v oblasti 3D tisku umožnil výrobcům kompozitů využívat rozpustné materiály pro tisk jader a mandrelů, které se používají při výrobě kompozitů a uhlíkových vláken.

3D tisk nám umožňuje vyrobit nerozpustná i rozpustná jádra. Rozpustné jádra umožňují vyrábět složité duté dílce, aniž by bylo potřeba vyrábět dílec z více částí nebo za použití více jader. Tyto jádra také mohou být využity u křehkých dílů, kde by mohlo ruční vytažení nerozpustného jádra poškodit výrobek. [29]

## 4 3D SKENOVÁNÍ

3D skenování je metoda měření povrchu skenované součásti, která je promítána v obrovském množství bodů a systematického vzoru. 3D skenovací systémy mohou pracovat kontaktně nebo bezkontaktně. Pomocí této metody lze vytvořit z fyzického objektu digitální model, který může být použit pro simulace, modelování, testování, spojování do sestav. 3D skenování je ve velkém množství využíváno např. v oborech medicíny, automobilovém průmyslu, leteckém a vesmírném průmyslu, kde je nutné pracovat s přesnými rozměry, které tato metoda dosahuje. [30]

### 4.1 Laserové skenování

V současnosti tato bezkontaktní technika vede ve strojním průmyslu. Paprsek svítí na objekt, od něj se světlo odráží do speciální kamery a na základě toho vzniká digitální model. Avšak i když jsou tyto systémy s laserovým skenováním stále populárnější, mají potíže s odrazivými nebo průhlednými povrchy a modely malého měřítka. Hlavními třemi technikami laserového skenování jsou laserová triangulace, laserové měření času letu a laserové skenování fázového posunu. [30; 31]

### 4.2 Optické skenování

Optické skenování je nejdostupnější a nejlevnější variantou 3D skenování. K zachycení objektu slouží přirozeně odražené světlo a čočka fotoaparátu.

Ke skenování lze použít skenery přímo na to určené, ale mohou být použity i obyčejné fotoaparáty nebo mobilní telefony s fotoaparátem. Princip metody spočívá ve snímání modelu v různých úhlech v určité vzdálenosti. Samotná digitální realizace se kvůli náročnosti poté provádí ve skenovacím programu pomocí počítače. [32]

### 4.3 Skenování částí lidského těla

3D skenování lidských částí těla je proces, při kterém se vytváří digitální model těla pomocí 3D skenerů. Pro 3D skenování lidských částí těla se často používají různé typy zařízení, jako jsou laserové skenery, strukturované světelné skenery nebo optické 3D skenery. Tyto zařízení snímají povrch těla pomocí různých metod a zaznamenávají informace o tvaru, textuře a prostorových vlastnostech. Tato technologie umožňuje získat detailní a přesný 3D model lidského těla, který lze použít v různých oblastech, včetně medicíny, módy a sportu. [33; 34]

**II.**

## **PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním cílem bakalářské práce je využití nástroje vyrobeného metodou 3D tisku pro výrobu vybrané součásti z kompozitních materiálů. Návrh nástroje a ostatní související operace v bakalářské práci budou podloženy literární rešerší zabývající se zejména problematikou 3D tisku v oblasti nástrojů a současně obecně kompozitními materiály a jejich přínosy pro uplatnění v návrhu součástí.

Postup při vypracování praktické části bakalářské práce lze rozdělit do jednotlivých kroků:

1. Vypracujte literární rešerši na zadané téma.
2. Návrh modelu vybrané součásti.
3. Návrh skladby materiálového složení vybrané součásti.
4. Optimalizace procesu 3D tisku nástroje a navrhnutí metodiky výroby vybrané součásti s následným experimentálním ověřením.
5. Vyhodnocení a stanovení závěrů výsledků bakalářské práce.

## 6 NÁVRH 3D TIŠTĚNÉHO NÁSTROJE

Návrh 3D tištěného nástroje je zaměřen na návrh modelu vícedílné formy. Na základě doporučení vedoucího bakalářské práce byl zvolen proces vytvoření formy pro ruční laminaci s následným lisování. Forma byla vytvořena jako vícedílná, kvůli tvaru chrániče a odformování, aby byla dosažena co největší životnost. Tvar a rozměry formy musí být voleny s ohledem na chránič.

### 6.1 Návrh modelu chrániče

#### 6.1.1 Úpravy skenu holeně

Prvním a zároveň klíčovým krokem při návrhu modelu holenního chrániče bylo provést 3D skenování části dolní končetiny za účelem získat vnitřní tvar, aby chránič přesně dosedal na holeň. Dolní končetina byla skenována na 3D skeneru MCAx30+. Sken byl poté upraven a vyčištěn od šumu v programu PolyWorks Inspector Profesional. Následně exportován do souboru typu STP, aby s ním bylo možné pracovat v téměř jakémkoli CAD programu.



Obrázek 12 Sken holení

### 6.1.2 Tvorba modelu chrániče

Holenní chránič primárně vycházel z tvaru holeně, která byla skenována. Ostatní rozměry a tvary byly voleny podle předchozích zkušeností s chrániči a inspirací z různých chráničů na trhu. Na základě těchto dat byl zvolen design holenního chrániče a byl vymodelován úpravami modelu holeně v programu Solid Edge 2022. Model chrániče byl následně vytisknut na 3D tiskárně, aby bylo ověřeno, že na holeni sedí a vnitřním tvarem ji kopíruje.



Obrázek 13 Model chrániče



Obrázek 14 Vytisknutý model chrániče

## 6.2 Návrh formy

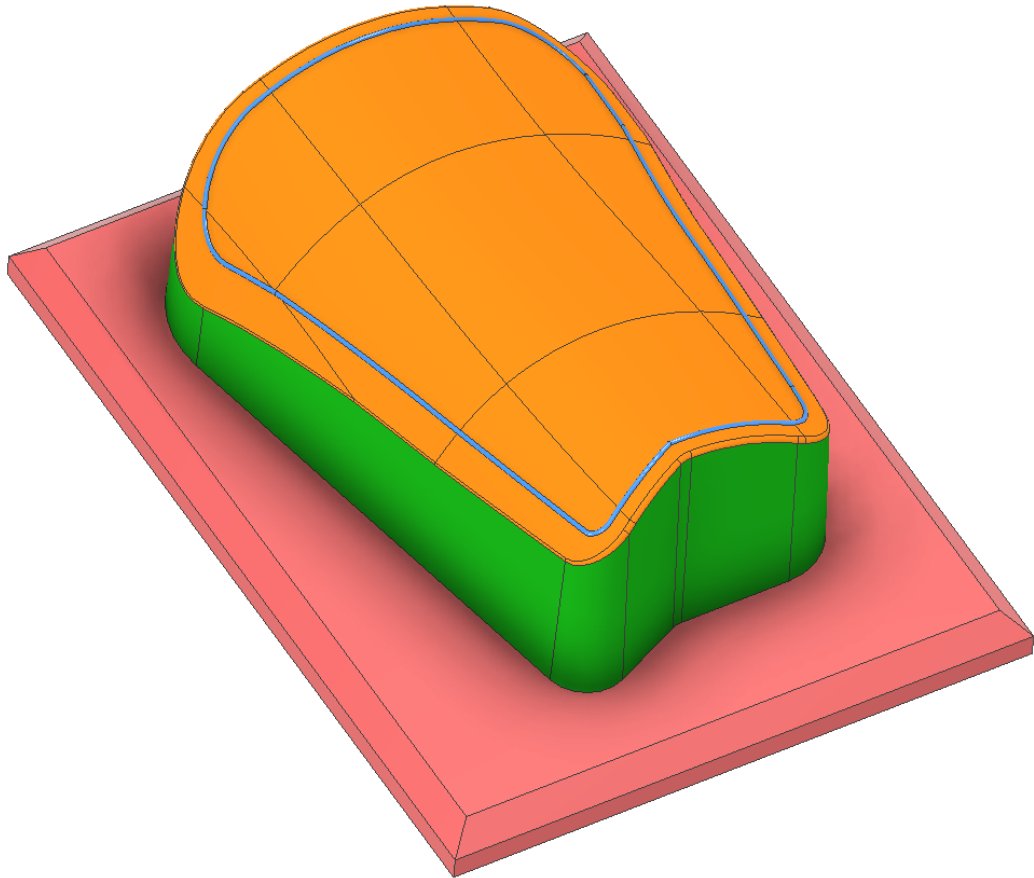
Pro vytvoření samotných modelů formy bylo potřeba upravit model chrániče. Úpravy spočívaly hlavně ve zvětšení modelu o přídavky materiálu na ořez. Je to z důvodu toho, že okraje výrobku po laminaci mohou být ostré, mohou z krajů trčet ostrá vlákna nebo v krajích může být málo pryskyřice. Byla také přidána kontura v rozměrech původního chrániče, která značí místo na ořez a původní velikost chrániče.

Jak již bylo zmíněno forma byla zvolena jako vícedílná. Forma se skládá z tvárníku a dvou tvárnice. Tvárník kopíruje vnitřní část chrániče a tvárnice část vnější. Z důvodu vícedílné tvárnice bylo uvažováno přidat šroubové spoje pro zanechaní rozebíratelnosti a pro odformování výrobku. Bylo také nutné přidat do tvárnice kolíkové spoje, aby bylo zaručen hladký přechod v pohledové části.

### 6.2.1 Návrh tvárníku

Tvárník vycházel z upraveného modelu chrániče o ořezy a konturu pro ořez viz Obrázek 15 (modrá barva), kde byl ponechán jeho tvar. Nejprve proběhlo vysunutí zadní části plochy a následné vytvoření dosedací plochy, která bude v kontaktu s tvárnicí po stlačení v lisu. Po zhotovení této části modelu, následovaly úpravy pro zajištění co nejlepšího odformování. Po celé výšce tvárníku byl přidán úkos. Vnější hrany na dosedacích plochách byly zkoseny, aby

se nástroj pro odformování dostával lépe do dělicí roviny mezi tvárníkem a tvárnici. Přidán byl také reliéf, který označuje samotný tvárník nápisem. V tomto případě (Obrázek 15) Pravý chránič\_Tvárník UTB fakulta technologická.



Obrázek 15 Model tvárníku

### 6.2.2 Návrh tvárnice

Pro tvorbu tvárnice musel být předem upraven tvárník. Tyto úpravy zahrnovaly zvětšení tvarové části tvárníku viz Obrázek 15 (oranžová a zelená barva) s odsazením o 1mm, aby bylo možné jednoduše zasunout tvárník do tvárnice. V neposlední řadě byla také zvětšena výška tvarové části o 2 mm, aby byl mezi tvárníkem a tvárnicí prostor pro materiál při výrobě a aby se dosáhlo požadované tloušťky výrobku.

Po těchto úpravách byl vytvořen kvádr o hranách velikosti dosedací plochy tvárníku a výšce tvárníku s přidanou rezervou. Tvárník byl poté zavazben dosedacími plochami k tomuto kvádru a byla provedena booleovská operace vyřezáním. Tím vznikla prvotní tvárnice.

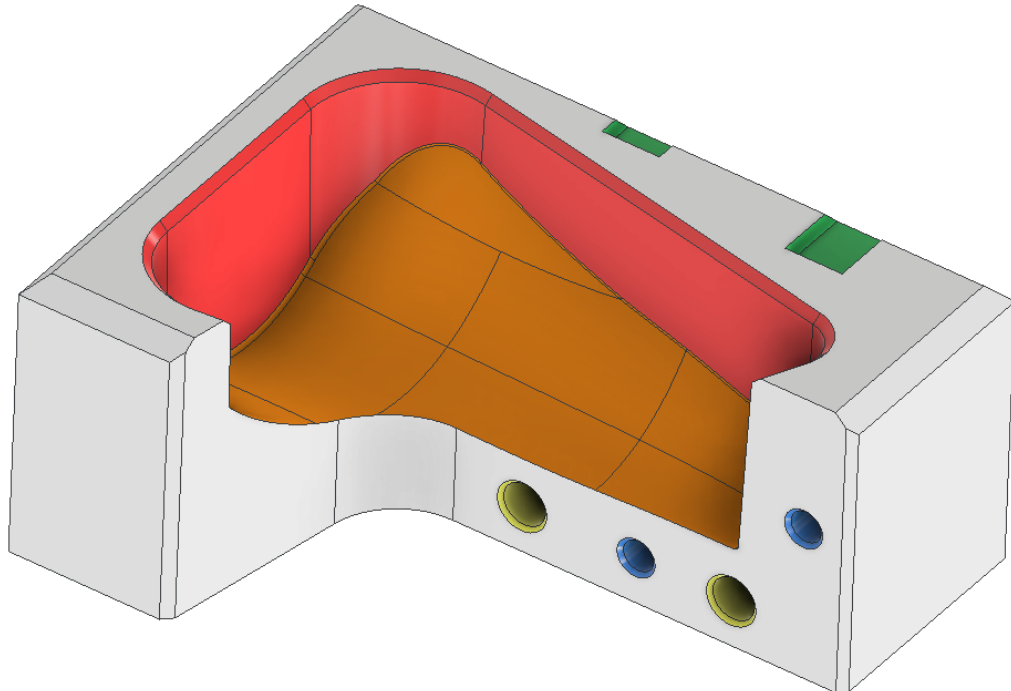


### 6.2.3 Rozdělení tvárnice

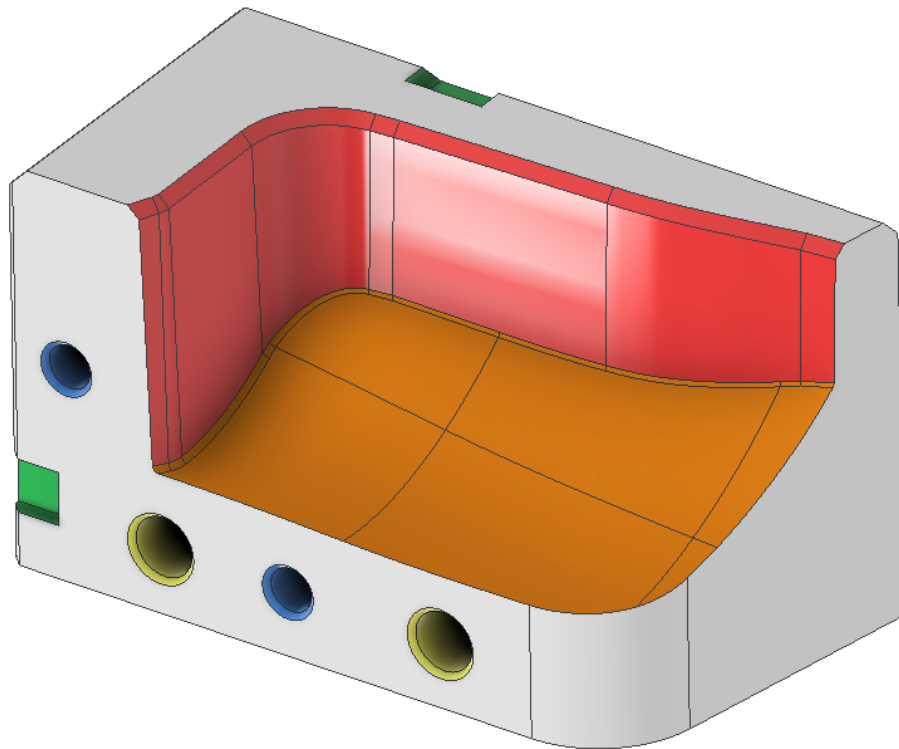
Tato počáteční tvárnice byla následně rozdělena na dvě tvárnice, a to na tvárnici 1 a tvárnici 2, z důvodu zaručení odformování. U obou tvárníc byly stejně zvětšeny výškové rozměry, aby bylo dosaženo prostoru pro otvory na šrouby a kolíky.

Otvory na šrouby byly vymodelovány 2 a to rozměru 11 mm, tzn. střední velikost díry pro šroub M10, a ty byly vyhotoveny zcela průchozí viz Obrázek 16 a 17 (žlutá barva). Dále byly přidány 2 neprůchozí díry pro kolík 8x40 mm. Průměr těchto otvorů je 8 mm a jsou vymodelovány do hloubky 21 mm v každé z tvárníc s tím, že bude průměr děr případně zvětšen vrtáním, z důvodu případné nepřesnosti 3D tisku viz Obrázek 16 a 17 (světle modrá barva). Tím byla zajištěna rozebíratelnost tvárníc. Na krajích ploch dělících rovin byla vytvořena vybrání pro odformování a rozdělení tvárníc po zatuhnutí pryskyřice viz Obrázek 16 a 17 (zelená barva).

Ze spodní části tvárníc byl přidán reliéf s názvem tvárníc (Pravý chránič\_Tvárnice 1 a 2 UTB fakulta technologická) z důvodu přehlednosti při výrobě.



Obrázek 16 Model tvárnice 1



Obrázek 17 Model tvárnice 2

## 7 OPTIMALIZACE PROCESU 3D TISKU

Sto procentní úspěšnost tisku není zaručena prakticky nikdy. Tomu, aby se co nejvíce omezilo riziko vzniku chyb, se dá předcházet různými úpravami, například úpravou výplně. Optimalizace je klíčová pro vytvoření modelů s minimálním množstvím materiálu bez ztráty pevnosti a pro zvýšení bezpečnosti při funkci modelu a také co nejvíce snížit čas tisku. Optimalizace vyžaduje znalosti softwaru, materiálů a konstrukce, které se zaměřují na možnosti, které nabízí 3D tiskárna, a na požadované funkční vlastnosti finálního tištěného produktu. Pro výrobu 3D tištěného nástroje byla vybrána metoda FDM 3D tisku.

### 7.1 Navrhnutí metodiky tisku

Všechna optimalizace probíhala v programu PrusaSlicer. Pro výrobu 3d tištěného nástroje bylo zvolen materiál PLA viz Příloha P II. Bylo uvažováno mezi výplní typu gyroid a mřížka. Bylo tak zvoleno dle zdrojů: [35; 36; 37; 38]. Pro gyroid bylo zvažováno 20 % - 40 % výplně a pro mřížku 50 % - 70 % výplně. Plné vrstvy, jak spodní, tak vrchní, byly voleny větší, v rozmezí 4 až 5, a jejich kombinace, z důvodu následného broušení povrchu tvarové plochy formy.

Výše uvedené nastavení bylo navrhováno pro 3D tiskárnu Creality Ender-3 viz Tabulka 1 a 3D tiskárnu Original Prusa 3 MK3 viz Tabulka 2. Tyto tiskárny nabízejí různé druhy nastavení tisku, které se odráží na drsnosti výtisku související právě s nastavením výšky jedné vrstvy. Pro tiskárnu Creality byl zvolen nejhrubší, a to 0,28 mm SUPERDRAFT SPEED. Pro tiskárnu Original Prusa 3 MK3 byl také zvolen nejhrubší co tiskárna nabízí, což byl 0,30 mm DRAFT. Nejhrubší nastavení bylo zvoleno z časových důvodů. Současně jsou v tomto nastavení zohledněny dokončovací úpravy, pro které je toto nastavení dostačující. Nastavení také obsahovalo pro obě dvě tiskárny límec s velikostí 10 mm a vynucené podpory.

Tabulka 1 Nastavení pro tiskárnu Creality Ender-3

Creality Ender-3								
Tvárník								
č.	Typ výplně	Výplň	Plných vrstev (vrchní)	Plných vrstev (spodní)	Perimetry	Odhadovaný čas	Spotřebovaný materiál (m)	Hmotnost (g)
1	Gyroid	20 %	4	4	2	19h1min	83,48	248,99
2	Gyroid	25 %	4	4	2	23h28min	96,75	288,56
3	Gyroid	30 %	4	4	2	1d3h32min	109,64	327,01
4	Gyroid	40 %	4	4	2	1d12h35min	135,98	405,57
5	Gyroid	20 %	4	4	3	19h10min	87,07	259,69
6	Gyroid	25 %	4	4	3	23h33min	100,13	298,66
7	Gyroid	30 %	4	4	3	1d3h35min	112,8	336,43
8	Gyroid	40 %	4	4	3	1d12h28min	138,72	413,75
9	Gyroid	20 %	5	5	2	19h33min	87,8	261,86
10	Gyroid	25 %	5	5	2	23h58min	100,57	299,94
11	Gyroid	30 %	5	5	2	1d3h59min	113,23	337,71
12	Gyroid	40 %	5	5	2	1d12h49min	139,15	415,03
13	Gyroid	20 %	5	5	3	19h43min	91,15	271,85
14	Gyroid	25 %	5	5	3	1d0h2min	103,9	309,88
15	Gyroid	30 %	5	5	3	1d3h57min	116,33	346,95
16	Gyroid	40 %	5	5	3	1d12h41min	141,85	423,08
17	Mřížka	50 %	4	4	2	22h47min	169,5	505,54
18	Mřížka	60 %	4	4	2	1d1h59min	197,33	588,53
19	Mřížka	70 %	4	4	2	1d5h14min	225,16	671,56
20	Mřížka	50 %	4	4	3	22h53min	171,71	512,13
21	Mřížka	60 %	4	4	3	1d2h2min	199,09	593,79
22	Mřížka	70 %	4	4	3	1d5h15min	226,49	675,51
23	Mřížka	50 %	5	5	2	23h17min	172,03	513,09
24	Mřížka	60 %	5	5	2	1d2h27min	199,35	594,58
25	Mřížka	70 %	5	5	2	1d5h38min	226,69	676,11
26	Mřížka	50 %	5	5	3	23h22min	174,2	519,56
27	Mřížka	60 %	5	5	3	1d2h30min	201,09	599,76
28	Mřížka	70 %	5	5	3	1d5h38min	227,99	680

Z Tabulky 1 lze vyčíst, že časový rozdíl při zvětšení perimetru je pouze v jednotkách minut. Při změně vrchních a spodních plných vrstev se časový rozdíl větší o nižší desítky minut. Největší rozdíly byly pozorovány u typu výplně a množství výplně, kde časové rozdíly čítaly hodiny. Spotřebovaný materiál a stejně tak hmotnost závisí nejvíce na procentech výplně.

Nejméně vhodná nastavení tisku byla v Tabulce 1 označena červeně a žlutě. Červeně označené nastavení z důvodu největší spotřeby materiálu a nejdelšího odhadovaného času tisku i přes to, že tato varianta je schopna snést nejvyššího zatížení ve vertikálním směru. U

žlutě označeného nastavení je naopak doba tisku nejkratší a spotřeba materiálu nejmenší, ale pevnost výtisku bude nižší.

Kvůli konstrukci formy bylo vybráno pro tisk nastavení č. 15 viz Tabulka 1. Nastavení obsahuje typ výplně gyroid, s výplní 30 %. I přes to, že odhadovaný čas (1d3h57min) byl jeden z nejvyšších, tak spotřebovaný materiál i hmotnost byla jakési optimum. Jak bylo zmíněno v teoretické části, typ výplně gyroid se hodí pro zatěžování ve všech třech osách, což při odformování může nastat a u typu mřížka by se forma mohla zhroutit.

Tabulka 2 Nastavení pro tiskárnu Original Prusa i3 MK3S

Original Prusa i3 MK3S								
Tvárník								
č.	Typ výplně	Výplň	Plných vrstev (vrchní)	Plných vrstev (spodní)	Perimetry	Odhadovaný čas	Spotřebovaný materiál (m)	Hmotnost (g)
1	Gyroid	20 %	4	4	2	13h37min	86,54	258,11
2	Gyroid	25 %	4	4	2	16h35min	99,52	296,82
3	Gyroid	30 %	4	4	2	19h41min	112,24	334,75
4	Gyroid	40 %	4	4	2	1d1h48min	138	441,6
5	Gyroid	20 %	4	4	3	14h05min	90,54	270,05
6	Gyroid	25 %	4	4	3	16h51min	103,26	307,99
7	Gyroid	30 %	4	4	3	19h54min	115,82	345,45
8	Gyroid	40 %	4	4	3	1d1h57min	141,07	420,75
9	Gyroid	20 %	5	5	2	13h59min	90,89	271,08
10	Gyroid	25 %	5	5	2	16h56min	103,58	308,94
11	Gyroid	30 %	5	5	2	20h3min	116,05	346,13
12	Gyroid	40 %	5	5	2	1d1h58min	141,31	421,47
13	Gyroid	20 %	5	5	3	14h17min	94,81	282,77
14	Gyroid	25 %	5	5	3	17h11min	107,31	320,05
15	Gyroid	30 %	5	5	3	20h9min	119,49	356,39
16	Gyroid	40 %	5	5	3	1d2h3h	144,38	430,62
17	Mřížka	50 %	4	4	2	14h35min	170,85	509,56
18	Mřížka	60 %	4	4	2	16h20min	198,13	590,92
19	Mřížka	70 %	4	4	2	18h14min	225,45	672,41
20	Mřížka	50 %	4	4	3	14h46min	173,35	517,03
21	Mřížka	60 %	4	4	3	16h45min	200,15	596,97
22	Mřížka	70 %	4	4	3	18h29min	226,96	676,91
23	Mřížka	50 %	5	5	2	14h58min	173,52	517,55
24	Mřížka	60 %	5	5	2	16h49min	200,28	597,34
25	Mřížka	70 %	5	5	2	18h39min	227,07	677,24
26	Mřížka	50 %	5	5	3	15h15min	176,01	524,95
27	Mřížka	60 %	5	5	3	17h4min	202,28	603,3
28	Mřížka	70 %	5	5	3	18h52min	228,56	681,68

U nastavení pro tiskárnu Prusa viz Tabulka 2, lze pozorovat, že odhadovaný čas tisku se oproti Tabulce 1 výrazně snížil. Je to způsobeno tím, že tiskárna Prusa nabízí možnost větší výšky tiskové vrstvy, což vede ke kratším časům.

Pro tisk jednotlivých komponent nástroje byla nakonec zvolena tiskárna Original Prusa i3 MK3 Ústavu výrobního inženýrství Fakulty technologické. Tiskárna umožňuje redukování časové náročnosti výroby částí nástroje.

Tabulka 3 Porovnání nastavení tisku

Prusa i3 MK3							
Tvárník							
č.	Nastavení tisku	Typ výplně	Výplň	Plných vrstev (vrchní)	Plných vrstev (spodní)	Perimetry	Odhadovaný čas
1	0,30 mm DRAFT	Gyroid	30 %	5	5	3	20h9min
2	0,20 mm SPEED	Gyroid	30 %	5	5	3	1d6h5min
3	0,20 mm QUALITY	Gyroid	30 %	5	5	3	1d7h22min

Zde bylo zkoumáno, zda se vyplatí změnit výšku vrstvy, což by vytvořilo hladší strukturu, avšak za cenu delší doby tisku. Jak je z Tabulky 3 vidět, při změně nastavení na 0,20 mm SPEED, odhadovaný čas se zvýšil o 10 hodin, což se už časově nevyplatí. Bylo tedy ponecháno u všech tisknutých součástí původní nastavení tisku. Odhadované časy všech součástí viz Tabulka 4.

Tabulka 4 Nastavení tisku pro jednotlivé součásti

Prusa i3 MK3							
Součást	Nastavení tisku	Typ výplně	Výplň	Plných vrstev (vrchní)	Plných vrstev (spodní)	Perimetry	Odhadovaný čas
Tvárník	0,30 mm DRAFT	Gyroid	30 %	5	5	3	20h9min
Tvárnice 1	0,30 mm DRAFT	Gyroid	30 %	5	5	3	21h6min
Tvárnice 2	0,30 mm DRAFT	Gyroid	30 %	5	5	3	12h21min

## 8 NÁVRH MATERIÁLOVÉ SKLADBY

Tloušťka dostupných holenních chráničů se běžně pohybuje od 2 do 4 mm. Tloušťka byla zvolena dle doporučení vedoucího bakalářské práce na 2 mm. Pro chránič byly zvoleny dva materiály, a to uhlíkové vlákno a aramid.

Jak bylo zmíněno v teoretické části, uhlíková vlákna se vyznačují nízkou hmotností a zároveň zachovávají velkou pevnost a tuhost. Pro výrobu holenního chrániče byla vhodná sekaná vlákna, a to z důvodu lepšího zaplnění členitých ploch a všech záhybů. Sekané uhlíkové vlákno se na výrobcích také vyznačuje jedinečným estetickým vzhledem. Tudíž kvůli výše zmíněným vlastnostem a uvažování o designu výrobku byla zvolena nasekaná uhlíková vlákna jako pohledová část.

Na sekaná vlákna byla položena uhlíková tkanina, aby překryla následující aramidovou tkaninu, a případně překryla místa která nevyplnila uhlíková vlákna.

Aramid se vyznačuje velkou rázovou odolností a houževnatostí, což se hodí na výrobu holenního chrániče, protože ten bývá zatěžován různými rázy. Byl tedy zvolen jako podpůrný materiál mezi uhlíková vlákna, dovnitř chrániče.

Na aramidovou tkaninu byla nanесena další sekaná uhlíková vlákna, aby byla aramidová tkanina kompletně překryta.



Obrázek 18 Materiálová skladba chrániče

## 9 VÝROBA SOUČÁSTI

### 9.1 3D tisk formy a její úprava po vytištění

Z výše uvedených nastavení v programu Prusa Slicer byly vygenerovány G-kody a ty byly přeneseny do 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3.



Obrázek 19 Detail v průběhu tisku

Úspěšný výtisk byl po vyjmutí z tiskárny manuálně zbaven límce a podpěr. Aby se dosáhlo hladkého povrchu na pohledové části výrobku, musely být tvárnice obroušeny. Tvárnice byly broušeny pouze ve vnitřních plochách, které utváří pohledovou část výrobku. Broušeny byly nejprve brusným papírem o hrubosti 80, následně papírem o hrubosti 120 a nakonec brusným papírem s hrubostí 240.

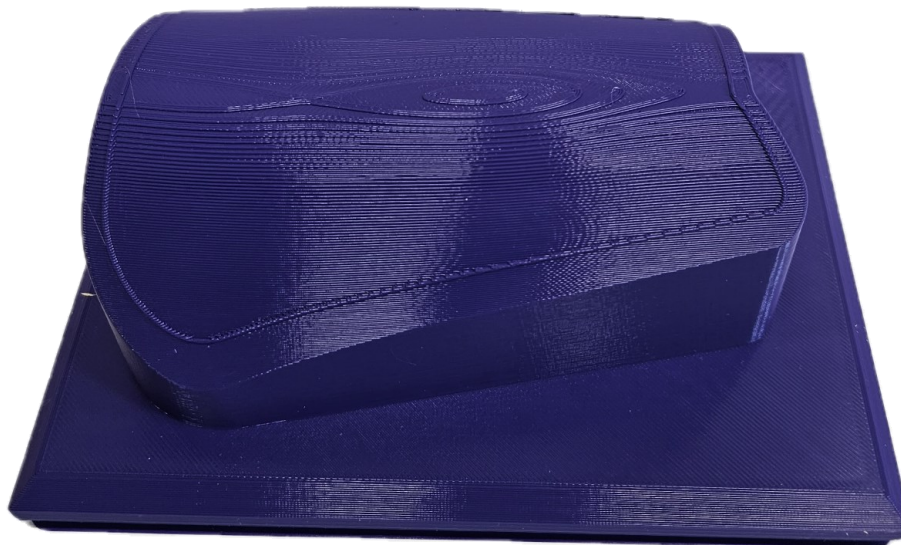




Obrázek 20 Tvárnice 1 po vytištění (vlevo) a po úpravách (vpravo)



Obrázek 21 Tvárnice 2 po vytištění (vlevo) a po úpravách (vpravo)



Obrázek 22 Tvárník

Formu je nutné před výrobou kompozitního dílce naseparovat. Separovaly se plochy, kde bude forma v kontaktu s matricí i výztuží. Separovány byly tvarové plochy, plochy dělicí roviny a všechny otvory v dělicích rovinách tvárnic sloužící pro šrouby a čepy. Jako separátor byl použit separační vosk Oskars M-700 viz Příloha P III. Separovalo se třikrát a mezi každou vrstvou byla časová rezerva 15 minut.

Následně byly do tvárnic vloženy čepy, tvárnice byly spojeny a sešroubovány šrouby.

## 9.2 Příprava materiálu

Prvním krokem bylo připravit výztuž. Sekané uhlíkové vlákno bylo přichystáno nastřiháním vláken z tkaniny z uhlíkového vlákna. Vlákna byla stříhána na velikost v rozmezí 20 - 40 mm. Dále byla zbylá tkanina z uhlíkového vlákna nastřihána na pásy ve velikosti 80 - 120 x 30 mm. Aramidová tkanina byla nastřihána dvakrát ve tvaru chrániče zmenšena o 10 mm z každé strany, aby na chrániči nebyla viditelná.



Obrázek 23 Přichystané sekané uhlíkové vlákno a aramidová tkanina

Jako matrice byla zvolena epoxidová pryskyřice LH 287 viz Příloha P IV. Pro pryskyřici bylo zvoleno tužidlo 285 (MGS) viz Příloha P V. Jak udává poměr na etiketě tužidla 100:40, tak bylo naváženo 100 g pryskyřice a 40 g tužidla. Následně byla pryskyřice smíchána s tužidlem a míchána.

### 9.3 Ruční laminace

Po nachystání materiálu a naseparování formy byla tvárnice nejprve natřena pryskyřicí za pomoci štětce. Následně bylo na pryskyřici sypáno sekané uhlíkové vlákno a přitlačeno štětcem k pryskyřici na povrchu tvárnice. V průběhu sypání sekaného vlákna byla tvárnice otáčena, aby všechna vlákna, co byla navrstvená na sobě a nebyla přichycena k pryskyřici odpadala pryč z formy a mohla být sypána další, aby zaplnila a přichytila se k celé ploše tvarové části tvárnice.



Obrázek 24 Kladení sekaného uhlíkového vlákna

Jakmile byla tvárnice celá zakryta sekaným uhlíkovým vláknem, byla nanoseny pásy nastříhané z uhlíkové tkaniny, aby překryly malé mezery, co zbyly po sekaném vlákně a aby překryly následující aramidovou tkaninu. Aramidová tkanina byla nanesena ve dvou vrstvách stejně orientována.

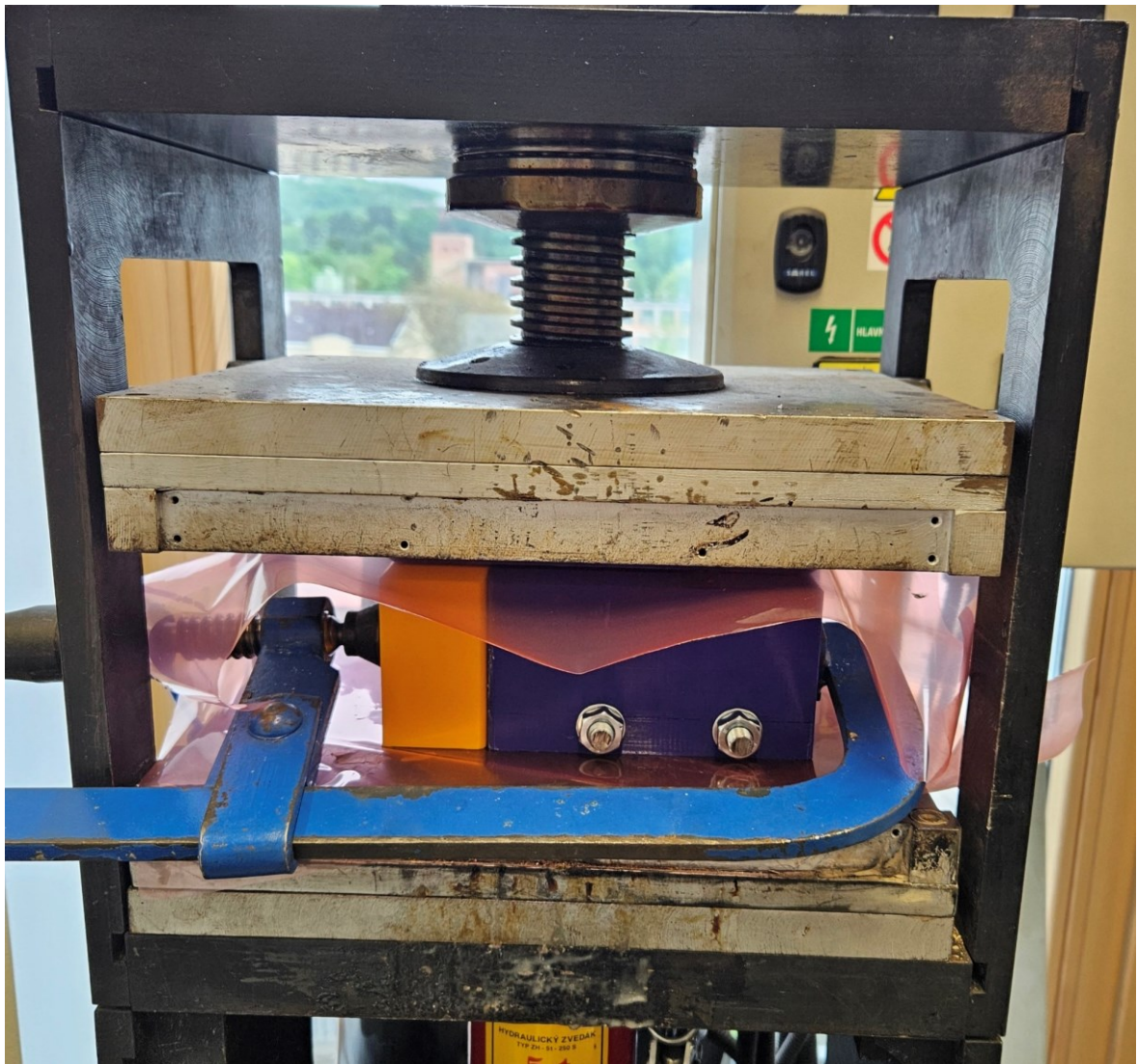


Obrázek 25 Kladení aramidové tkaniny

Tkanina z aramidů byla zakryta zbylým sekaným vláknem, aby se zachoval stejný design chrániče z obou stran.

Materiál ve tvárnici byl uzavřen tvárníkem a forma byla vložena do lisu. Nejdříve byla forma v lisu lehce stlačena, aby odtekla přebytečná pryskyřice. Po odtečení pryskyřice byla forma dále stlačena, aby odtekla zbylá přebytečná pryskyřice. Tento proces byl opakován až po dotažení lisu na maximum. Během každého dotahování byla vytečená pryskyřice utírána, aby bylo dosaženo co nejmenšího poškození formy a zároveň bylo zajištěno co nejjednodušší rozdělení formy při odformování.

Forma byla v lisu ponechána na 24 hodin, aby pryskyřice kompletně zatuhla.



Obrázek 26 Forma v lisu

#### 9.4 Odformování výrobku

Po zatuhnutí pryskyřice a vytažení z lisu bylo na řadě odformování. Nejprve byl za pomoci ručního nářadí oddělován tvárník od tvárnice. Pro rozdělení formy byly využity všechny vytvořené technologické úpravy pro rozebrání. Tvárník se nedařilo od tvárnice oddělit a zlomil se v lemu kolem tvarové části viz Obrázek 28. Poté byly z tvárnic odšroubovány šrouby a oddělily se od sebe tvárnice bez poškození. Následně byl vytažen tvárník, který ještě držel ve tvárnici a nato byl odformován výrobek.

Ani jedna z tvárnic nenesla žádné znaky poškození, pouze bylo uvnitř tvárnic a na vnějších plochách značné množství přebytečné pryskyřice.



Obrázek 27 Tvárnice po rozdělení formy



Obrázek 28 Tvárník po rozdělení formy

## 9.5 Úprava holenního chrániče

Chránič po odformování nenesl žádné velké defekty nebo deformace, pouze drobné důlky, které zanechaly bubliny v pryskyřici a viditelné stopy po dělicí rovině tvárnic. Bylo tedy rozhodnuto o dalších úpravách.



Obrázek 29 Chránič po odformování

Nejprve byl ale chránič ořezán ještě před konturou, která značí místo pro ořez, aby se odstranily ostrá vlákna. Hrany chrániče byly po ořezání vybroušeny brusným papírem drsnosti 80. Po tomto procesu byla broušena pohledová strana. Bylo nutné vybrousit přechod vzniklý dělicí rovinou na pohledové části. Ten byl broušen brusným papírem drsnosti 240. Následně byla broušena celá pohledová plocha obroušena brusným papírem o drsnosti 320.





Obrázek 30 Chráníč po prvotním obroušení

Po vybroušení a očištění byla štětcem nanesena na pohledovou část tenká vrstva pryskyřice, z důvodu zahlazení všech malých defektů. Ta byla po vytvrzení vybroušena pod vodou brusnými papíry se zrnitostí (400, 600, 1200, 2000) a chráníč byl zalakován bezbarvým lakem.



Obrázek 31 Hotový chráníč

## 10 OPTIMALIZACE FORMY PRO LEVÝ CHRÁNIČ

Po rozlomení pravého tvárníku viz Obrázek 28, při odformování, bylo nutné udělat změny v konstrukci pro formu pro levý chránič. U tvárníku byla zvětšena výška materiálu od plochy dělicí roviny, byl změněn úkos tvarové části na 5° a v neposlední řadě bylo zvětšeno množství výplně při tisku na 40 %, viz Tabulka 5. U tvárnic byl pozměněn pouze úkos v dutině také na 5°. Všechny součásti formy pro levý holenní chránič byly vytvořeny zrcadlením objektů formy pro pravý chránič v programu Solid Edge 2022.

Tabulka 5 Nastavení tisku pro součásti formy pro levý chránič

Prusa i3 MK3							
Součást	Nastavení tisku	Typ výplně	Výplň	Plných vrstev (vrchní)	Plných vrstev (spodní)	Perimetry	Odhadovaný čas
Tvárník	0,30 mm DRAFT	Gyroid	40 %	5	5	3	1d4h54min
Tvárnice 1	0,30 mm DRAFT	Gyroid	30 %	5	5	3	21h7min
Tvárnice 2	0,30 mm DRAFT	Gyroid	30 %	5	5	3	12h29min

## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout 3D tištěný nástroj pro zpracování kompozitních materiálů. Jako kompozitní součást byl zvolen holenní chránič a jako 3D tištěný nástroj byla zvolena forma. Bakalářská práce zahrnuje návrh modelu holenního chrániče, návrh výrobní formy a návrh procesu výroby formy. Dále materiálovou skladbu holenního chrániče a experimentální ověření formy při výrobě. Při návrhu procesu výroby a materiálové skladby bylo vycházeno z literární rešerše bakalářské práce.

Pro vytvoření modelu holenního chrániče bylo nejprve nutné naskenovat autorovu holoň. Skeny byly upraveny a vyčištěny od šumu a následně byl vytvořen model chrániče, který vycházel z tvaru naskenované holoň. Z tvaru chrániče vycházela 3D tištěná forma pro technologii ručního kladení s následným lisováním. Forma byla zhotovena jako třídílná, skládající se z tvárníku a dvou tvárnice. Tvárnice obsahují výřezy v plochách dělicích rovin pro rozdělení formy při odformování výrobku. Součástí formy jsou také šrouby M10x140, matice M10 a podložky pro šrouby M10 a nakonec čepy 8x40.

Optimalizace a navrhnutí metodiky tisku formy je složena ze čtyř tabulek. V tabulkách viz Tabulka 1 a Tabulka 2, byl zkoumán odhadovaný čas, spotřeba materiálu a hmotnost pro různé nastavení tisku tvárníku na 3D tiskárnách Creality Ender-3 a Original Prusa i3 MK3. Pro tisk byla vybrána 3D tiskárna Prusa Original i3 MK3 z důvodu kratšího času tisku. Pro tisk formy bylo vybráno nastavení č. 15, jež obsahovalo typ výplně gyroid s výplní 30 %, spotřebu materiálu 119,49 m, hmotnost 356,39 g a odhadovaný čas byl 20 h 9 min. Následně bylo porovnáváno nastavení tisku na tiskárně Original Prusa i3 MK3, kde se posuzoval odhadovaný čas v závislosti na velikosti nastavení tisku viz Tabulka 3. Tabulka 4 obsahuje odhadované časy všech 3D tištěných součástí formy.

Návrh materiálové skladby součásti seskládal z pěti vrstev. Kvůli estetickým vlastnostem byl na první (pohledovou) vrstvu zvoleno sekané uhlíkové vlákno, na které bude při výrobě nanášena uhlíková tkanina. Následují dvě vrstvy aramidové tkaniny, která je zakryta poslední vrstvou sekaného uhlíkového vlákna.

Výroba součásti začala úpravou formy po vytištění. Byly odebrány podpěry a funkční části formy byly vybroušeny brusnými papíry hrubosti (80, 240, 320). Forma byla naseparována separačním voskem. Naseparované tvárnice byly spojeny šroubovými spoji a byla nanášena první vrstva předchystané pryskyřice a následně byla do tvárnice kladena výztuž. Tvárnice byla přitlačena tvárníkem a forma byla vložena do lisu.

Po 24 hodinách byla forma vytažena z lisu, následovalo rozdělení formy a odseparování. Nejprve byl vytažen tvárník, který se při vytahování rozlomil v ploše dělicí roviny kolem tvarové části tvárník. Tomu by se dalo předejít zvýšením množství výplně, zvětšením výšky materiálu od plochy dělicí roviny, zvětšením úkosu, anebo jejich kombinací.

Tvárnice po jejich rozdělení nenesly známky trvalého poškození. Na holenním chrániči po odformování byly znát pouze malé defekty způsobeny bublinami v pryskyřici. Chránič byl proto ořezán ještě před místem pro ořez a byl v pohledové ploše obroušen brusnými papíry se zrnitostí (80, 240, 320) a nato zatřen pryskyřicí. Po zatuhnutí pryskyřice byl chránič ořezán v místě pro ořez a jeho pohledová plocha byla vybroušena brusnými papíry (400, 600, 1200, 2000) pod vodou a chránič byl zatřen bezbarvým lakem.



Obrázek 32 Chránič z pohledové strany (vlevo) a ze zadní strany (vpravo)

Přínosem této bakalářské práce je možnost využití 3D tisku pro výrobu modelů a nástrojů, které jsou užitečné pro výrobu součástí z kompozitních materiálů. Přínosem je také prohloubení znalostí a zkušeností v oblasti 3D tisku a kompozitů.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] UL HAQ, Mir, Ankush RAINA a Nida NAVEED, ed. *3D Printing and Sustainable Product Development*. 1.st ed. CRC Press, 2024. ISBN 978-1-032-30680-3.
- [2] STŘÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. 1. vyd. Praha: Prusa research a.s., 2020. ISBN 978-80-907798-0-8.
- [3] NOORANI, Rafiq. *3D Printing: Technology, Applications, and Selection*. 1.st ed. CRC Press, 2018. ISBN 13: 978-1-4987-8375-0.
- [4] 3D print graphics FDM. In: *UNSW Making* [online]. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.making.unsw.edu.au/learn/3d-printing-with-fdm-and-thermoplastics/>
- [5] Stereolithography: SLA 3D Printing Simply Explained. In: *All3dp* [online]. 2023 [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>
- [6] 3D printing SLA. In: *UNSW Making* [online]. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.making.unsw.edu.au/learn/3d-printing-with-sla-resin-printers/>
- [7] Selective laser sintering. In: *Ricoh* [online]. [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://rapidfab.ricoh-europe.com/technologies/selective-laser-sintering/>
- [8] SHIGLEY, Joseph, Charles MISCHKE a Richard BUDYNAS, Miloš VLK, ed. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [9] KREBS, Stefan, Ladislav KOLAŘÍK a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie zpracování plastů a kompozitů*. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [10] Carbon Fibre. In: *MBFibreglass* [online]. [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://www.mbfg.co.uk/1-25m-wide-carbon-fibre-twill.html>
- [11] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [12] WANBERG, John. *Composite Materials: Fabrication Handbook #1*. 1. vyd. Wolfgang Pub, 2009. ISBN 19-291-3376-6.
- [13] Material Aramid. In: *Veba* [online]. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.veba.cz/cs/materialy>
- [14] Hybridní tkanina. In: *Element shop* [online]. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.element-shop.cz/hybridni-tkaniny/>
- [15] FRYDRÝŠEK, Karel. *Composite materials in theory and practice: (Kompozitní materiály v teorii a praxi)*. 1st ed. Ostrava: Vysoká škola báňská -Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3239-5.
- [16] Sekané vlákno z uhlíkových vláken. In: *Sinauva Composites* [online]. [cit. 2024-03-23]. Dostupné z: <https://cz.sinauva-composites.com/fiberglass-reinforcements/thermoplastic-chopped-strand/chopped-strand-carbon-fiber.html>
- [17] Sekaná vlákna. In: *CARBON FIBER* [online]. [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://carbonfiber.cz/products/sekana-vlakna>
- [18] Prepreg. In: *SPM prepreg systems* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://www.spmkompozit.com/prepreg>
- [19] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. 2016 [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>

- [20] SIDDIQUEE, Shafiquzzaman, Melvin GAN JET HONG a Mizanur RAHMAN, ed. *Composite Materials: Applications in Engineering, Biomedicine and Food Science* [online]. 1.st. Springer, 2020 [cit. 2023-11-11]. ISBN ISBN 978-3-030-45489-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45489-0>
- [21] Hand lamination. In: *NORCO* [online]. [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://www.norco.co.uk/knowledge-base/composite-processing/>
- [22] Vacuum Infusion Process – Benefits, Dry Spots, Pinholes and More. In: *German Advanced Composites* [online]. 2021 [cit. 2024-01-10]. Dostupné z: <https://german-advanced-composites.com/vacuum-infusion-process-explained>
- [23] Vacuum infusion. In: *Up-resin* [online]. [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <http://www.up-resin.com/info/what-is-vacuum-resin-infusion-30368858.html>
- [24] PAN, Houwen a Eric LUIS, ed. Molds with Advanced Materials for Carbon Fiber Manufacturing with 3D Printing Technology. *Polymers* [online]. 2021, **2021**(13), 14 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/21/3700>
- [25] FERRETTI, Patrich, Gian SANTI, Christian LEON-CARDENAS, Elena FUSARI, Mattia CRISTOFORI a Alfredo LIVERANI. Production readiness assessment of low cost, multi-material, polymeric 3D printed moulds. *Heliyon* [online]. 2022, **8**(10) [cit. 2024-03-24]. ISSN 24058440. Dostupné z: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000937989900006>
- [26] How to 3D Print Molds for Carbon Fiber Parts. In: *Dynamism* [online]. 2021 [cit. 2024-01-12]. Dostupné z: <https://www.dynamism.com/learn/automotive/how-to-3d-print-carbon-fiber-molds.html>
- [27] Vzory výplně. In: *Prusa3d* [online]. 2023 [cit. 2024-03-24]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/vzory-vyplne\\_177130](https://help.prusa3d.com/cs/article/vzory-vyplne_177130)
- [28] Carbon Fiber Molds. In: *Dynamism* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.dynamism.com/learn/how-to-3d-print-carbon-fiber-molds-patterns-and-sacrificial-cores.html>
- [29] 3D PRINTING. SOLUBLE CORES AND FORMS. In: *3D Alchemy* [online]. 2016 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://www.3d-alchemy.co.uk/3d-printed-soluble-material.html>
- [30] ABDELMOMEN, Mohamed, F. DENGIZ a Mart TAMRE. Survey on 3D Technologies: Case Study on 3D Scanning, Processing and Printing with a Model. *2020 21st International Conference on Research and Education in Mechatronics* [online]. 2020 [cit. 2023-11-29].
- [31] Co je 3D skenování a k čemu ho využijete. In: *For3Dtisk* [online]. 2022 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://for3dtisk.cz/co-je-3d-skenovani-a-jak-funguje-blog/>
- [32] YALÇINKAYA, Senai, Burak YILDIZ a Mazlum BORAK. OPTICAL 3D SCANNER TECHNOLOGY. *INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY* [online]. 2019, **2019**(3), 67-75 [cit. 2024-03-24]. Dostupné z: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/706016#:~:text=3D%20scanning%20systems%20are%20the,is%20called%20the%20point%20cloud.>
- [33] SCANTECH iReal 3D Human Body Scanning Application. In: *3d-scantech* [online]. 2021 [cit. 2024-03-24]. Dostupné z: [https://www.3d-scantech.com/scantech-ireal-3d-human-body-scanning-application/?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjwnv-vBhBdEiwABCYQA6NV5aoKvGLdhguW9XNeRqUU9oxy0LY\\_Fy4WdRIcYnlb9Z5HWitouRoCllkQAvD\\_BwE](https://www.3d-scantech.com/scantech-ireal-3d-human-body-scanning-application/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwnv-vBhBdEiwABCYQA6NV5aoKvGLdhguW9XNeRqUU9oxy0LY_Fy4WdRIcYnlb9Z5HWitouRoCllkQAvD_BwE)

- [34] ZHU, Gucai, Lingye WANG, Zhong REN, Yanlin WENG a Kun ZHOU. IDlgles: 3D-printed Customized Goggles based on Scanned Faces. In: *2021 15th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)* [online]. IEEE, 2021, s. 13-18 [cit. 2024-03-21]. ISBN 978-1-7281-7724-3. Dostupné z: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000717036500003>
- [35] DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ, G., J. J. KU-HERRERA a A. HERNÁNDEZ-PÉREZ. An assessment of the effect of printing orientation, density, and filler pattern on the compressive performance of 3D printed ABS structures by fuse deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2018, **95**(5-8), 1685-1695 [cit. 2024-05-16]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: [doi:10.1007/s00170-017-1314-x](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1314-x)
- [36] RAPID PROTOTYPING OF COMPOSITE AEROSPACE PARTS WITH 3D PRINTED MOLDS. In: *GordonKirkwood* [online]. 2020 [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: <http://gordonkirkwood.com/rapid-prototyping-of-composite-aerospace-parts-with-3d-printed-molds/>
- [37] TORPAN, Radu a Sebastian-Marian ZAHARIA. Manufacturing Process of Helicopter Tail Rotor Blades from Composite Materials Using 3D-Printed Moulds. *Applied Sciences* [online]. 2024, **14**(3) [cit. 2024-04-16]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: [doi:10.3390/app14030972](https://doi.org/10.3390/app14030972)
- [38] FERRETTI, Patrich, Gian Maria SANTI, Christian LEON-CARDENAS, Marco FREDDI, Giampiero DONNICI, Leonardo FRIZZIERO a Alfredo LIVERANI. Molds with Advanced Materials for Carbon Fiber Manufacturing with 3D Printing Technology. *Polymers* [online]. 2021, **13**(21) [cit. 2024-05-16]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: [doi:10.3390/polym13213700](https://doi.org/10.3390/polym13213700)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

°	Stupeň
°C	Stupeň celsia
3D	Trojrozměrný
CAD	Computer Aided Design
STP	Formát souboru
Kč	Česká koruna
g	Gram
mm	Milimetr
m	Metr
m <sup>2</sup>	Metr čtvereční
min	Minuta
d	Den
h	Hodina
μm	Mikrometr
SiO <sub>2</sub>	Oxid křemičitý
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
DMLS	Direct Metal Laser Sintering



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 Schéma FDM 3D tiskárny [4] .....	12
Obrázek 2 Schéma SLA 3D tiskárny [6] .....	13
Obrázek 3 Schéma SLS 3D tiskárny [7] .....	14
Obrázek 4 Uhlíkové vlákno [10] .....	16
Obrázek 5 Aramidové vlákno [13] .....	16
Obrázek 6 Hybridní výztuž [14] .....	17
Obrázek 7 Sekaná uhlíková vlákna [17] .....	18
Obrázek 8 Prepreg z uhlíkového vlákna [18] .....	19
Obrázek 9 Ruční kladení [21] .....	22
Obrázek 10 Vakuová infuze [23] .....	23
Obrázek 11 3D tištěná forma [28] .....	25
Obrázek 12 Sken holení .....	29
Obrázek 13 Model chrániče .....	30
Obrázek 14 Vytištěný model chrániče .....	31
Obrázek 15 Model tvárníku .....	32
Obrázek 16 Model tvárnice 1 .....	33
Obrázek 17 Model tvárnice 2 .....	34
Obrázek 18 Materiálová skladba chrániče .....	39
Obrázek 19 Detail v průběhu tisku .....	40
Obrázek 20 Tvárnice 1 po vytištění (vlevo) a po úpravách (vpravo) .....	41
Obrázek 21 Tvárnice 2 po vytištění (vlevo) a po úpravách (vpravo) .....	41
Obrázek 22 Tvárník .....	42
Obrázek 23 Přichystané sekané uhlíkové vlákno a aramidová tkanina .....	43
Obrázek 24 Kladení sekaného uhlíkového vlákna .....	44
Obrázek 25 Kladení aramidové tkaniny .....	45
Obrázek 26 Forma v lisu .....	46
Obrázek 27 Tvárnice po rozdělení formy .....	47
Obrázek 28 Tvárník po rozdělení formy .....	47
Obrázek 29 Chránič po odformování .....	48
Obrázek 30 Chránič po prvotním obroušení .....	49
Obrázek 31 Hotový chránič .....	49
Obrázek 32 Chránič z pohledové strany (vlevo) a ze zadní strany (vpravo) .....	52

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Nastavení pro tiskárnu Creality Ender-3 .....	36
Tabulka 2 Nastavení pro tiskárnu Original Prusa i3 MK3S .....	37
Tabulka 3 Porovnání nastavení tisku .....	38
Tabulka 4 Nastavení tisku pro jednotlivé součásti .....	38
Tabulka 5 Nastavení tisku pro součásti formy pro levý chránič.....	50

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Soubory modelů a programy k 3D tisku

Příloha P II: Technický list Prusament PLA

Příloha P III: Technický list separačního vosku Oskar's M-700

Příloha P IV: Technický list epoxidové pryskyřice LH287

Příloha P V: LH287Technický list tužidla 285 (MGS)