

Využití 3D tištěného modelu pro zpracování kompozitních materiálů

Marek Šiška

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:	Marek Šiška
Osobní číslo:	T21019
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Využití 3D tištěného modelu pro zpracování kompozitních materiálů

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši na zadané téma.
- Návrh modelu vybrané součásti.
- 3D tisk navrhnuté součásti a návrh metodiky výroby kompozitního nástroje.
- Návrh skladby materiálového složení výrobního kompozitního nástroje.
- Experimentálním ověření výroby kompozitního nástroje.
- 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, považují 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 bakalářská práce se zabývá využitím 3D tištěného modelu pro výrobu formy z kompozitního materiálu. Teoretická část popisuje využití 3D tisku v oblasti modelů s přípravou modelu pro tisk a základní přehled v oblasti kompozitních materiálů a jejich využití v oblasti výrobních nástrojů. Praktická část se zabývá návrhem a výrobou 3D tištěného modelu pro výrobu kompozitního nástroje. Tato část zahrnuje metodiku výroby, výběr materiálů, samotnou výrobu kompozitního nástroje a následné ověření jeho funkčnosti pomocí výroby zvoleného dílu.

Klíčová slova: 3D tisk, model, kompozitní materiály, kompozitní nástroj, ruční laminace.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the use of a 3D printed model for the production of a mould from a composite material. The theoretical part describes the use of 3D printing in the field of models with the preparation of the model for printing and a basic overview in the field of composite materials and their use in manufacturing tools. The practical part deals with the design and fabrication of a 3D printed model for the production of a composite tool. This part includes the manufacturing methodology, selection of materials, actual fabrication of the composite tool and subsequent verification of its functionality by manufacturing the selected part.

Keywords: 3D printing, model, composite materials, composite tool, manual lamination.

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Lukáši Maňasovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné připomínky, rady a čas, které mi pomohli při zpracování této bakalářské práce.

Také bych rád vyjádřil poděkování mé rodině a blízkým za podporu během mého studia.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 VYUŽITÍ 3D TISKU V OBLASTI MODELŮ.....	11
1.1 PŘÍPRAVA MODELU PRO 3D TISK.....	11
1.1.1 Modelování	11
1.1.2 3D skenování.....	12
1.1.3 Slicer	13
1.2 VOLBA MATERIÁLU	13
1.2.1 PLA – Kyselina polymléčná	13
1.2.2 ABS – Akrylonitrilbutadienstyren.....	14
1.2.3 PETG – Polyethylentereftalát glykol.....	14
1.3 ÚPRAVA POVRCHU 3D TIŠTĚNÉHO MODELU PRO VÝROBU FORMY.....	14
1.3.1 Odstranění materiálových podpor	14
1.3.2 Úprava povrchu broušením.....	15
1.3.3 Úprava povrchu nátěrem.....	15
2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	16
2.1 MATRICE	16
2.1.1 Polyesterové pryskyřice	16
2.1.2 Vinylesterové pryskyřice	16
2.1.3 Epoxidové pryskyřice	17
2.2 VÝZTUŽ.....	17
2.2.1 Polotovary výztuží.....	17
2.2.2 Aramidová vlákna	18
2.2.3 Skelná vlákna	18
2.2.4 Uhlíková vlákna	19
2.3 TECHNOLOGIE VÝROBY	19
2.3.1 Ruční laminace	19
2.3.2 Nástřík.....	20
2.3.3 Vakuová infuze.....	21
3 NÁSTROJE Z KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	22
3.1 FORMY Z KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	22
3.1.1 Typy forem.....	22
3.1.2 Konstrukce formy z kompozitních materiálů.....	23
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	26
4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	27
5 NÁVRH A VÝROBA SOUČÁSTI.....	28
5.1 NÁVRH SOUČÁSTI.....	28
5.2 3D TISK PROTOTYPOVÉ SOUČÁSTI	29

6	NÁVRH METODIKY VÝROBY KOMPOZITNÍHO NÁSTROJE	30
6.1	NÁVRH MODELU.....	30
6.2	VÝROBA MODELU.....	32
6.3	NÁVRH SKLADBY MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ VÝROBNÍHO KOMPOZITNÍHO NÁSTROJE.....	35
6.3.1	Gelcoat.....	35
6.3.2	Skelná tkanina	36
6.3.3	Skelná rohož.....	36
6.3.4	Pryskyřice.....	37
6.3.5	Sendvičový materiál	37
6.4	VÝROBA KOMPOZITNÍHO NÁSTROJE	38
7	VÝROBA SOUČÁSTÍ S VYUŽITÍM KOMPOZITNÍHO NÁSTROJE	41
7.1	DOKONČOVACÍ OPERACE.....	42
	ZÁVĚR	44
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	46
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	48
	SEZNAM OBRÁZKŮ	49
	SEZNAM PŘÍLOH	51

ÚVOD

V dnešním dynamicky se rozvíjejícím průmyslovém prostředí se technologie 3D tisku stává stále více oblíbenou a nezbytnou součástí inovativního vývoje a výroby díky svému téměř neomezenému spektru využití a efektivnosti výroby. Jednou z moderních a zajímavých aplikací této revoluční technologie je využití 3D tisku k výrobě modelů pro zpracování kompozitních materiálů. Kompozitní materiály jsou kombinace dvou nebo více materiálů s odlišnými vlastnostmi, díky čemu nabízí výborný poměr mezi pevností, hmotností a přinášejí do průmyslového odvětví nové možnosti a výzvy. V tomto kontextu nabývá velkého významu použití 3D tištěných modelů jako nástroje pro výrobu kompozitních forem a nástrojů. Tyto modely přinášejí přesnost, flexibilitu a rychlost výroby, což jsou klíčové faktory v moderním průmyslu.

Hlavním cílem teoretické části bakalářské práce je popis 3D tisku v oblasti přípravy modelů, volba nejběžnějších materiálů pro FDM metodu a jejich dodatečné povrchové úpravy. Dále jsou v teoretické části popsány všeobecně kompozitní materiály jejich složení, druhy matric, výztuží a také základní technologie výroby. V poslední kapitole je popsán přínos kompozitních materiálů při použití v oblasti výroby forem, jejich druhů a výrobních požadavků. Teoretická část práce je koncipována tak, aby poskytla porozumění jak technologii 3D tisku v oblasti modelů, tak i využití kompozitních materiálů v průmyslovém prostředí.

Hlavním cílem praktické části bakalářské práce je navrhnout a vyrobit 3D tištěný model a následně s jeho pomocí vyrobit formu z kompozitního materiálu pro zvolenou součást. Dále jsou popsány metodiky a postupy výroby, použité materiály a zkušební výroba zvolené součásti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VYUŽITÍ 3D TISKU V OBLASTI MODELŮ

Využití 3D tisku v oblasti modelů představuje pokrokový přístup k výrobě. 3D tisk je mechanický proces, při kterém je digitální model převeden do fyzické podoby. Tato metoda umožňuje vytvářet výrobky s neomezenými tvary a minimalizuje množství odpadního materiálu. Výrobky vyrobené pomocí 3D tisku nejsou vždy finálním produktem, ale často se využívají jako prototypy, šablony, modely nebo formy. Tento přístup poskytuje flexibilitu a rychlost výroby, což je obzvláště užitečné při vývoji a výrobě nových produktů nebo při tvorbě testovacích vzorků. Díky 3D tisku mohou tvůrci rychle testovat a implementovat své nápady, díky čemuž dochází ke zrychlení vývojového procesu a snížení nákladů spojených s tradičními metodami výroby modelů a prototypů. [1; 2]

1.1 Příprava modelu pro 3D tisk

K tisku požadovaného předmětu je nezbytný 3D model, který poskytuje tiskárně potřebné informace o tom, co má tisknout. 3D modely představují digitální reprezentaci objektů a mohou být získány různými způsoby. Nejjednodušším způsobem je použití již existujícího modelu, který můžeme nalézt ve velké míře na internetových stránkách zaměřených na 3D modely. Alternativně lze vytvořit vlastní model pomocí CAD programu, který umožňuje návrh objektů ve 3D prostoru. Další možností je využití technologie 3D skenování, která umožňuje digitalizaci fyzického objektu a vytvoření 3D modelu. Každý z těchto způsobů má své pozitivní a negativní stránky a jejich použití záleží na konkrétním případě a dostupných technologiích. Nejdůležitější je zajistit, aby 3D model byl přesný a odpovídal výsledným požadavkům. [3]

1.1.1 Modelování

3D modelování představuje proces vytváření třírozměrných digitálních objektů. K vytvoření 3D modelu potřebujeme speciální software nazývaný CAD program. Tento software umožňuje vytvářet a měnit geometrické tvary, povrchy a objekty ve virtuálním prostoru. Jedním z nejzákladnějších, nejjednodušších a snadno přístupných programů pro začátečníky je Tinkercad. Při nutnosti vytvoření složitějších a detailnějších modelů existují specializovanější programy jako Autodesk Inventor Professional, Autodesk Fusion 360 nebo Solidworks, které poskytují pokročilejší nástroje a funkce pro profesionální designéry a inženýry. Tyto programy umožňují modelování a simulování složitých součástí, sestav a mechanismů s vysokou přesností a detailností. Zvolení vhodného softwaru při vytváření 3D

modelů je důležité z hlediska uživatelských zkušeností a požadované úrovně přesnosti modelů. [3]



Obrázek 1 3D model redukce

1.1.2 3D skenování

3D skenování je operace, při které se reálné fyzické tvary transformují do počítačového digitálního obrazu pomocí speciálního zařízení nazývaného 3D skener. Existují různé metody provádění skenování, včetně mechanického, optického nebo laserového skenování. [4; 5]

Mechanické skenování využívá přímého kontaktu objektu se snímacím zařízením, který bývá nejčastěji opatřen sondou s kuličkou. Tímto způsobem se získává velké množství bodů, které se následně pomocí softwaru spojí do digitálního modelu. [4; 5]

Optické skenování se provádí pomocí optického zařízení z několika úhlů což umožňuje zachytit objekt z různých perspektiv. Získaná data se následně zpracují pomocí specializovaného softwaru, který vytvoří digitální model. Optické skenování má své limity, zejména pokud jde o lesklé povrchy, které často vyžadují předchozí úpravu nátěrem nebo nástřikem pro zmatnění povrchu. [4]

Laserové skenování funguje na principu vysílání laserového paprsku ze skeneru na objekt s následným odražením paprsku zpět do skeneru. Vypočítáním doby mezi vysláním a vrácením paprsku se získá informace o rozměru objektu a úhel pod jakým se paprsek vrací udává zakřivení ploch. Tímto způsobem naměříme velké množství bodů, které se převede do počítače a pomocí specializovaného softwaru vykreslí skenovaný objekt. [4; 6]

1.1.3 Slicer

Slicer je klíčový software který, který hraje důležitou roli v procesu přípravy 3D modelů pro tisk. Jeho hlavní funkcí je rozdělení modelu na jednotlivé vrstvy a umožňuje nastavení různých parametrů tisku, jako jsou výška vrstvy, rychlost tisku, teploty, výplň a perimetry. Správné nastavení těchto parametrů má velký vliv na dobu tisku, kvalitu povrchu a odolnost výrobku. Kromě toho, slicer také převádí model z formátu STL do požadovaného G kódu, který obsahuje veškeré potřebné informace pro 3D tiskárnu. Na základě tohoto kódu je pak 3D tiskárna řízena během tisku. Mezi známé slicery patří například Ultimaker Cura nebo PrusaSlicer od českého výrobce 3D tiskáren. Tyto slicery nabízejí širokou škálu funkcí a možností pro ideální proces tisku, maximální dosažení kvality a přesnosti výtisku. [3]

1.2 Volba materiálu

Volbu správného materiálu musíme volit jako kompromis mezi nejvyšší kvalitou a ekonomickou nákladností. Je důležité zvolit materiál tak, aby odpovídal konkrétním požadavkům aplikace, jako je například potřebná přesnost a odolnost. V technologii FDM lze použít širokou škálu termoplastů, které lze použít pro tisk 3D modelů. Tyto materiály jsou běžně dodávány ve formě struny, která je navinuta na cívce, a umožňují vytvářet pevné a funkční díly s různými vlastnostmi, jako je pevnost, pružnost, odolnost vůči teplotám a chemickým vlivům. Při výběru materiálu je třeba zohlednit specifické potřeby dané aplikace a optimalizovat volbu materiálu pro dosažení požadovaných vlastností a výsledné kvality tisku. [7]



Obrázek 2 Tisková struna [25]

1.2.1 PLA – Kyselina polymléčná

PLA, neboli kyselina polymléčná, je biologicky rozložitelný polymer, který patří mezi nejpoužívanější materiály pro technologii FDM díky své zpracovatelnosti bez zápachu a neekonomičtějším nákladům na pořízení a zpracovatelnost. Tento polymer se vyznačuje

tvrdostí, pružností a odolností, což ho činí atraktivním pro široké spektrum aplikací. Nicméně, má také několik nevýhod, jako je nízká teplota skelného přechodu, špatná obrobiteľnosť a sklon k absorpci vlhkosti, což může ovlivnit kvalitu výsledného tisku a celkovou odolnost výrobku. [8; 9]

1.2.2 ABS – Akrylonitrilbutadienstyren

ABS, neboli akrylonitrilbutadienstyren, je termoplastický kopolymer, který se používá pro výrobu odolných dílů, které jsou vystaveny vyšším teplotám. Na rozdíl od PLA, s nímž patří mezi nejčastěji používané materiály pro 3D tisk je ABS méně křehký, má vyšší houževnatost a je odolnější vůči kyselinám, hydroxidům a uhlovodíkům. Tento materiál je oblíbený pro aplikace, kde je potřeba vyšší odolnost a tepelná stabilita, a je často využíván v automobilovém průmyslu, elektronice a dalších odvětvích, kde jsou kladeny nároky na dlouhou trvanlivost a odolnost. [8; 9]

1.2.3 PETG – Polyetylentereftalát glykol

PET-G představuje upravenou verzi amorfního kopolymeru PET. Tento materiál obrazně řečeno kombinuje vlastnosti PLA s odolností ABS. Jeho hlavní pozitivní vlastnost je mnohem vyšší odolnost než u PLA a obzvláště se hodí pro výrobu nádob a nástrojů určených pro kontakt s potravinami. Na rozdíl od ABS u něj nedochází během tisku ke kroucení a nevytváří výpary. Sice není biologicky rozložitelný, ale je zcela recyklovatelný, což přispívá k udržitelnosti a snižování ekologické zátěže. [8]

1.3 Úprava povrchu 3D tištěného modelu pro výrobu formy

Základním stavebním kamenem pro výrobu formy je kvalitní model, který slouží jako předloha pro vytvoření formy. Proto je nutné model před zaformováním důkladně zkontrolovat a případně upravit, začistit a dokončit, aby byl zbaven všech nedostatků a nerovností. Dokonalá příprava modelu je klíčová, protože jakékoliv nedostatky se mohou promítnout do výsledné formy a ovlivnit tak kvalitu a přesnost výroby. [10]

1.3.1 Odstranění materiálových podpor

Při 3D tisku je někdy nutné model opatřit podporami které slouží pro podepření částí které pod sebou nemají žádný materiál a také jako prevence proti kroucení při tisku. Po dokončení tisku je potřeba tyto podpory odstranit. Tento proces obvykle nevyžaduje žádný speciální nástroj kromě malých kleští nebo jemného nožíku. Proces však může zanechat nežádoucí

stopy na povrchu součásti, a proto je nutné provést další povrchové úpravy. Jestliže podpory jsou tisknuty z jiného materiálu, než samotný model je možné je odstranit chemicky. [2]

1.3.2 Úprava povrchu broušením

Jestliže požadujeme hladší povrch součásti, než dokážeme dosáhnou 3D tiskem nebo potřebujeme zahladit povrch po podporách, je nezbytné jej přebrousit. V tomto procesu se součást brousí pomocí brusného papíru s cílem odstranit viditelné nedokonalosti povrchu. Broušení se provádí brusným papírem s různou zrnitostí, od hrubozrnných papírů až po jemnozrnné, dokud nedosáhneme požadované hladkosti povrchu. [2]

1.3.3 Úprava povrchu nátěrem

Nátěr provádíme z důvodu zlepšení vzhledu, zacelení a ochrany povrchu barvou nebo pryskyřicí za pomoci štětce nebo spreje. Mezi nevýhodu úpravy povrchu nátěrem můžeme zahrnout delší čas aplikace z důvodů, že nátěr musíme nechat dostatečně vytvrdnout. [2]

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou strukturální materiály vytvořeny specifickým procesem, s charakteristickými vlastnostmi a použitím ve specifických činnostech. Tyto materiály se skládají ze dvou nebo více odlišných fází, které se mezi sebou liší mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Základní a zcela zásadní složkou je matrice, která slouží jako prostředí pro disperzi a výztuž, která poskytuje mechanickou podporu a zvyšuje pevnost materiálu, a další složky, které mohou přidávat specifické vlastnosti nebo modifikovat chování materiálu v různých prostředích. Tyto složky společně tvoří složitější kompozitní struktury, které jsou navrženy a optimalizovány pro různé aplikace, od lehkých a pevných materiálů pro letecký průmysl až po odolné materiály pro automobilový průmysl, stavebnictví a další odvětví. Díky nim mohou být dosaženy vysoké výkony v oblasti odolnosti a efektivity, které by nebylo možné dosáhnout s jednotlivými složkami nebo tradičními materiály. [11]

2.1 Matrice

Matrice neboli pojivo je jedna ze základních složek kompozitních materiálů. Tvoří souvislou výplň v celé součásti. Hlavní funkce matrice zahrnují vyplnění a uzavření prostoru kolem výztuže, což poskytuje ochranu výztuže před vnějšími vlivy a zajišťuje, že distribuce zatížení mezi jednotlivá vlákna bude rovnoměrná. Dále matrice zajistí udržení nezměněného tvaru výrobku a pomáhá vytvářet pevnou a stabilní strukturu. Její kvalita a vlastnosti mají zásadní vliv na celkové chování a výkonnost kompozitního materiálu v mnoha podmínkách a aplikacích. [11; 12]

2.1.1 Polyesterové pryskyřice

Jedná se o nebarevnou někdy lehce nažloutlou pryskyřici, která vytvrzuje za normálních nebo zvýšených teplot bez vzniku prchavých produktů. Při vytvrzování vlivem teploty dochází k zmenšení objemu o 5 až 9 %. Z důvodů nízké viskozity, schopnosti dobře pronikat do vláken a rychlému vytvrzování se jedná o nejčastěji používanou maticí při výrobním procesu kompozitních materiálů. [12]

2.1.2 Vinylesterové pryskyřice

Vinylesterové pryskyřice se od polyesterových pryskyřic liší svou vyšší chemickou odolností, větší houževnatostí a nižší viskozitou, což způsobuje jejich snadnější

zpracovatelnost. Tyto vlastnosti umožňují snazší přizpůsobení se náročnějším chemickým a mechanickým prostředím, zejména v oblasti lodního průmyslu. Vinylestery jsou schopny lépe odolávat agresivním chemikáliím a prostředím než polyesterové pryskyřice, což je dělá preferovanou volbou pro aplikace, které vyžadují vysokou trvanlivost a spolehlivost. Díky svým vlastnostem jsou vinylesterové pryskyřice důležitým materiálem pro výrobu námořních konstrukcí a dalších zařízení provozovaných v náročných podmínkách. [13]

2.1.3 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice se většinou skládají z více než jedné složky. Vynikají dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou přilnavostí a rozměrovou stálostí. Vlastnosti epoxidové pryskyřice ve velkém rozsahu ovlivňují tvrdidla, která pryskyřici přizpůsobují pro speciální aplikace. Vyniká malým objemovým smrštěním v rozmezí 2 až 5 %, které vzniká v kapalně fázi a neobsahuje žádné zapáchající monomery. Nejčastěji jsou používány jako lepidla, nátěrové a lakovací hmoty. [12; 14]

2.2 Výztuž

Výztuž představuje druhou hlavní složku kompozitních materiálů. Většinou má vyšší tahovou pevnost než matrice, což jí umožňuje přebírat hlavní část zatížení působícího na materiál. Existuje několik typů vláknové výztuže, které se liší podle délky (dlouhá, krátká vlákna) a podle způsobu, jakým jsou tato vlákna uspořádána do pramenů, rovingů, tkanin, rohoží nebo netkaných textilií. Jejich správná volba a uspořádání mají klíčový vliv na výsledné mechanické vlastnosti a chování kompozitního materiálu. Výběr vhodné výztuže je proto důležitý při návrhu kompozitní struktury, ovlivňuje pevnost, tuhost, odolnost a další důležité vlastnosti kompozitního výrobku. [11]

2.2.1 Polotovary výztuží

- **Roving** – Roving je nejjednodušší formou výztuže kompozitních materiálů. Je formě pramenců, které jsou navinuté na cívkách a mohou být následně zpracovávány pomocí sekání nebo tkaní do konečné formy potřebné k výrobě kompozitního materiálu. [12]
- **Rohože** – Rohože jsou vytvářeny shlukováním krátkých vláken s nepravidelnou orientací do plošného tvaru a jsou spojeny pomocí emulze nebo práškového pojiva. Jsou ideální pro použití u výroby tvarově složitých dílců. [12]

- **Tkaniny** – Tkaniny jsou výsledkem propletení vláken nebo pramenců do uspořádaného vzoru, ve kterém jednotlivé prameny svírají daný úhel nejčastěji 90°. Druh propletení a úhel který vlákna svírají má velký vliv na mechanickou odolnost výrobku. Tkaniny rovněž nabízejí výhodu snazší manipulace ve srovnání s jednosměrnou výztuží. Tkaniny se dělí do tří vazeb, mezi které patří plátňová, keprová a atlasová vazba. [12]



Obrázek 3 Druhy vazeb výztužných vláken [27]

2.2.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou zástupcem organických vláken polymerů. Mohou se zpracovávat s většinou reaktivních pryskyřic a termoplastů. Vlastnosti těchto vláken je vysoká odolnost v tahu, tuhost a elasticita, ale hlavní vlastnost je jejich rázová odolnost, proto se používá na pancéřování, neprůstřelné vesty, náběhové hrany letadel a sportovní potřeby. [11; 12]

2.2.3 Skelná vlákna

Jedná se o jedny z nejpoužívanější výztužných vláken kompozitu a polymerů díky kombinaci ceny a vlastností například vysokou tepelnou a chemickou odolnost, uspokojivou pevnost v tahu a výbornými elektroizolačními vlastnostmi. Skelná vlákna mají kruhový průřez, protože se vyrábí roztavením skleněných kuliček nebo prášku a následným vytlačováním taveniny skrz kruhovou průchodku. [11; 12]



Obrázek 4 Skelná vlákna [24]

2.2.4 Uhlíková vlákna

Uhlíkové vlákno má nejvyšší dosahované mechanické vlastnosti mezi vlákny. Jeho složení je převážně z atomů uhlíku. Průměr vlákna dosahuje 5 až 10 μm . Hlavní výhody tohoto materiálu jsou vysoká tuhost, pevnost v tahu, chemická odolnost a dobrý poměr pevnosti k hmotnosti. Díky těmto vlastnostem mají uhlíková vlákna širokou oblast využití například v automobilovém a leteckém průmyslu, kosmonautice a na výrobu sportovního vybavení. [11; 15]



Obrázek 5 Automobilové křídlo z uhlíkových vláken [26]

2.3 Technologie výroby

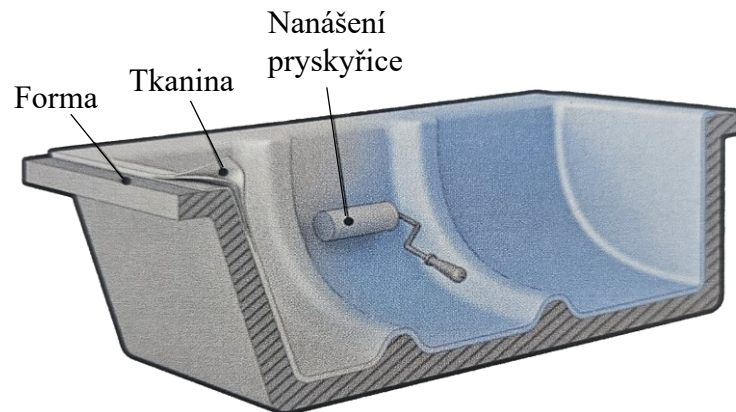
Výrobu kompozitních materiálů je proces, který lze provádět pomocí několika různých technologií. Z důvodu specifčnosti kompozitních materiálů a nutnosti zajistit co největší homogenizační spojení jednotlivých fází je volba dané technologie velmi důležitá. Rozhodování o vhodné technologii je ovlivněno několika faktory, včetně sériovosti výroby, velikosti a složitosti výrobku, zamýšleného použití, požadované kvality povrchu a konečné ceny produktu. Zajištění optimálního spojení mezi jednotlivými složkami kompozitního materiálu je důležitá pro dosažení požadovaných vlastností výsledného produktu. Proto je důležité zvážit vhodnost a účinnost jednotlivých výrobních technologií při výrobě kompozitních materiálů. [11; 16]

2.3.1 Ruční laminace

Ruční laminace je nejjednodušší a nejstarší technologií pro výrobu kompozitních dílů. Tento způsob výroby lze aplikovat na výrobu desek nebo dílů komplexnějších tvarů, avšak pro úspěšnou aplikaci je nezbytné disponovat formu s opačným tvarem, než je požadovaný výrobek, a také vhodné konstrukce, aby forma umožňovala odformování dílu po jeho

vytvrzení. Kvalita výsledného výrobku je primárně závislá na zkušenostech a šikovnosti pracovní obsluhy. [11; 16]

Postup výroby pomocí ruční laminace spočívá v postupném pokládání jednotlivých vrstev výtzuže a následného nasycování pryskyřicí pomocí štětce nebo válečku, dokud není dosažena požadovaná tloušťka výrobku. Při těchto aplikacích je klíčové vytlačení bublin a rovnoměrné nanesení pryskyřice, což významně ovlivňuje kvalitu a pevnost výsledného dílu. Výrobek se poté vytvrzuje při pokojové teplotě, nebo v peci podle použité matrice. Ruční laminace je ideální pro kusovou, prototypovou výrobu a opravy kompozitních dílů, kde je vyžadována rychlá a flexibilní reakce na konkrétní požadavky. Tato metoda umožňuje vytvářet kompozitní díly s mnoha vlastnostmi a parametry za relativně nízké náklady a s jednoduchou manipulací. [11; 16]

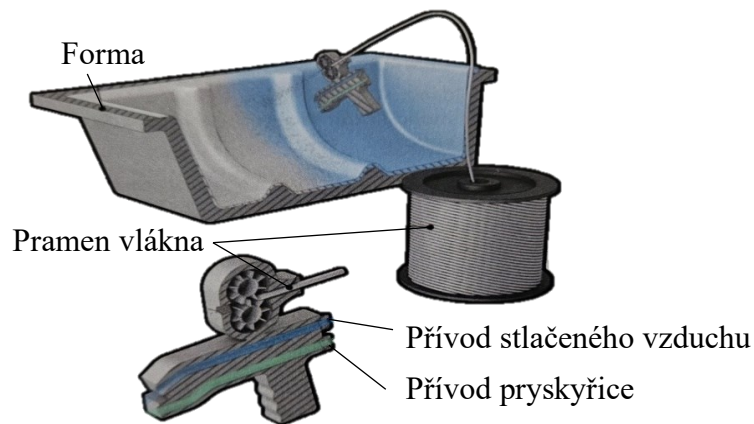


Obrázek 6 Schéma postupu při ruční laminaci [11]

2.3.2 Nástřik

K výrobě kompozitních dílů pomocí nástřiku je nezbytná speciální pistole, která umožňuje smíchání nasekaných vláken s pryskyřicí a současně tuto směs unáší stlačeným vzduchem do formy. Směs se nanáší v několika vrstvách podle požadované tloušťky výrobku. Tato technologie se používá pro střední až velkorozměrové díly nepříliš složitých tvarů. Také je vhodná pro sériovou výrobu z důvodu rychlého nanášení materiálu. Hlavní nevýhodou této metody je zvýšené množství odpadu a poměrně velké investice na nákup stříkacích zařízení

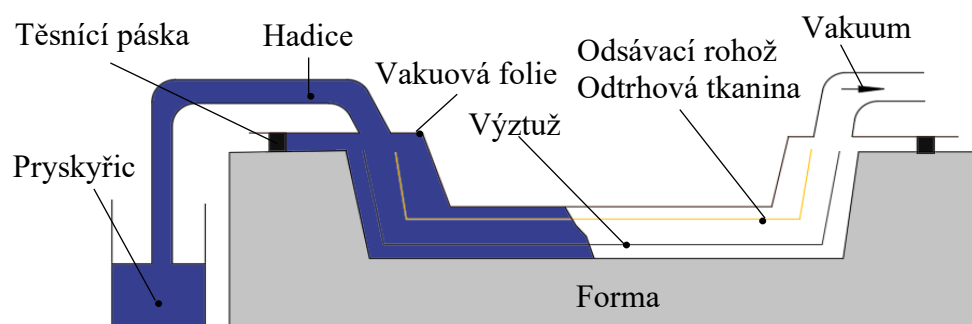
a odsávacího boxu. Z důvodu vyššího obsahu pryskyřice mají výrobky horší mechanické vlastnosti ve srovnání s jinými metodami výroby kompozitních dílů. [11]



Obrázek 7 Schéma principu nástřiku sekaných vláken [11]

2.3.3 Vakuová infuze

Vakuová infuze je inovativní technologií, která se zabývá specifickým procesem výroby kompozitních materiálů. Princip této technologie spočívá v tom, že výztuže jsou umístěny do formy, na kterou se následně aplikuje odsávací rohož a pružná folie. Poté je pomocí vakuového čerpadla a systému hadiček ve formě vytvořen podtlak. Díky tomuto podtlaku proniká pryskyřice do vláken a vyplní celou formu a přebytečná pryskyřice se absorbuje do odsávací rohože. Po vytvrzení pryskyřice se odstraní odsávací rohož, folie a výsledkem je kompozitní materiál s vysokou pevností a nízkou hmotností. Hlavní výhody této technologie spočívají v lepším poměru výztuže k objemu, což vede k vyváženější tloušťce materiálu. Tato metoda také minimalizuje zatížení životního prostředí, protože používá uzavřenou formu, což snižuje riziko úniku nežádoucích látek do okolí. Vakuová infuze se stala oblíbenou volbou v různých odvětvích, včetně leteckého, námořního průmyslu a výroby sportovních vybavení, díky své schopnosti vytvořit materiály s vynikajícími mechanickými vlastnostmi a optimálním poměrem pevnosti a hmotnosti. [11; 17]



Obrázek 8 Schéma principu vakuové infuze

3 NÁSTROJE Z KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Nástroje lze vyrábět prakticky z jakéhokoliv materiálu. Volba správného materiálu je velmi náročná a musíme zohlednit mnoho faktorů. Kompozitní materiály se při použití na výrobu nástrojů používají hlavně na výrobu forem při následné výrobě dílů z kompozitních materiálů. [18]

3.1 Formy z kompozitních materiálů

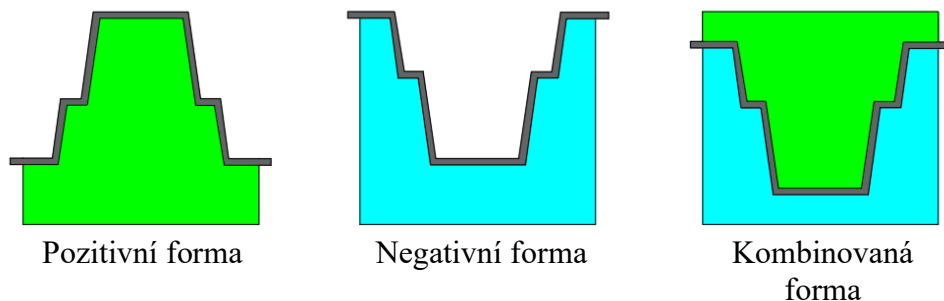
Využití kompozitních materiálů pro výrobu forem představuje klíčovou roli v následném procesu výroby dílů. Forma je základní nástroj, který umožňuje reprodukovat požadovaný tvar a detaily vyráběného dílu. Můžeme je vytvořit různými způsoby a s využitím mnoha různých materiálů v závislosti na požadavcích, které bude muset forma splňovat. Mezi hlavní vlastnosti, které forma musí splňovat, patří vysoká rozměrová přesnost a kvalita povrchu, aby vyráběný díl měl požadovanou geometrii a estetický vzhled. Dále je velmi důležitým faktorem odolnost forem z důvodu opakovatelného použití. Formy z kompozitních materiálů jsou vyrobeny z kombinace různých materiálů, které kombinují své vlastnosti. Tyto formy mají široké uplatnění v různých výrobních procesech, zejména při výrobě kompozitních součástí. Hlavní výhody kompozitních forem zahrnují možnost tvarování do složitých geometrických tvarů, nízká hmotnost oproti kovovým formám což usnadňuje jejich manipulaci, přepravu a skladování a v neposlední řadě jejich vysokou odolnost proti korozi, což umožňuje jejich použití i ve vlhkých prostředích. I přesto, že se kompozitní formy vyrábějí s větší náročností, zejména kvůli nutnosti výroby modelu, který slouží jako základ pro vytvoření formy, a možným složitějším opravám v průběhu životnosti, stávají se stále populárnější volbou, zejména při výrobě kompozitních dílů v leteckém, automobilovém a loděřském průmyslu. Tyto formy nacházejí uplatnění jak při malosériové, tak i při velkosériové výrobě, a díky svým vlastnostem přispívají k efektivnějšímu a ekonomičtějšímu provozu výrobních procesů. [19; 20]

3.1.1 Typy forem

- **Pozitivní forma** – Pozitivní forma napodobuje konečný tvar dílu přes jeho vnější povrch. Tato konstrukce nabízí výhodu rychlejší a zpravidla i ekonomičtější výroby, ale nevýhodu z hlediska hrubé vnější strany, která vyžaduje případné dodatečné pracné dokončení. Další nevýhoda spočívá ve zvětšení součástky o její tloušťku,

z toho důvodu, jestli že je zvětšení nežádoucí, musíme formu vyrobit menší. Pozitivní formy jsou typicky používány pro kusovou výrobu. [20; 21]

- **Negativní forma** – Negativní forma oponuje pozitivní formě tím, že napodobuje konečný tvar dílu přes jeho vnitřní povrch. I přesto, že výroba těchto forem obvykle vyžaduje vyšší náklady, poskytují několik výhod, zejména při výrobě středních výrobních sérií, kde je vyžadován kosmeticky dokonalý vnější povrch výrobku. Negativní forma se díky snadnějšímu utěsnění lépe hodí pro výrobu pomocí vakuového lisování. [20; 21]
- **Kombinovaná forma** – Kombinovaná neboli lisovací forma využívá jak pozitivní, tak i negativní formu. Tyto formy se používají pro výrobu přesných dílů, kde je klíčové dosáhnout vysoké rozměrové přesnosti a kvalitní hladký povrch na obou stranách dílu. Proces výroby pomocí kombinované formy začíná naskládáním výtuzě do jedné poloviny formy, po čemž následuje nanesení pryskyřice. Poté je forma uzavřena druhou polovinou a dochází k lisování. Tento proces umožňuje vytlačení přebytečné pryskyřice a vzduchu. [20; 21]



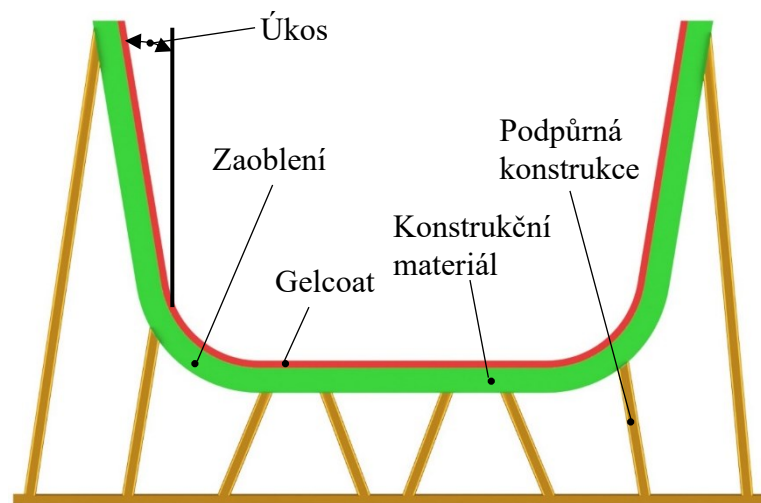
Obrázek 9 Typy forem

3.1.2 Konstrukce formy z kompozitních materiálů

Před konstrukcí formy je nezbytné pečlivě zvážit všechny požadavky, které tato forma bude muset splnit. Správná forma musí být dostatečně tuhá a odolná, aby odolala deformaci během procesu vkládání materiálu výrobku, jeho tuhnutí, vytvrzování a následného odformování. Konstrukce formy by měla být výsledkem vyváženého kompromisu mezi fyzikálními vlastnostmi, náklady a časovou náročností na výrobu. Je tedy nezbytné pečlivě posoudit všechny tyto faktory při navrhování formy, aby bylo dosaženo optimálního výsledku. [20; 22]

- **Přídavek na smršťení** – Forma musí být konstruována s přihlédnutím k procesu smršťení kompozitního materiálu během jeho vytvrzování. Je nezbytné brát v úvahu smršťení, aby bylo zajištěno vytváření dílů s přesnými a konzistentními rozměry a tolerancemi, které odpovídají požadavkům. [20; 21]
- **Úkosy a zaoblení** – Úkosy neboli sklony jsou často aplikovány na určité části povrchu formy s cílem usnadnit uvolňování hotového výrobku. Tento konstrukční prvek snižuje tření mezi formou a výrobkem, což vede k snadnějšímu oddělení dílu od formy a zabraňuje tak jeho poškození. Zaoblení je konstrukční prvek, který nahrazuje ostrou hranu a má ve formě několik funkcí mezi které patří prevence defektu v hraně, snadnější distribuce materiálu a estetičtější vzhledu. [20; 21]
- **Povrchové úpravy** – Povrch je velmi důležitý prvek, který se na kompozitních formách realizuje pomocí gelcoatu. Jedná se o tenkou vrstvu speciální pryskyřice, která se nachází na povrchu formy. Gelcoat přispívá formě významnými faktory, mezi které patří vynikající tvrdost, zachování lesku, odolnost proti poškrábání a chemickým vlivům. [20; 23]
- **Konstrukční materiály** – Konstrukční materiál se skládá z výztuže a matrice. Při výrobě formy se vrstvy výztuže aplikují na model a následně se impregnují matricí. Model je již předtím opatřen vytvrzeným gelcoatem. Nejčastěji se jako výztužný materiál používá kombinace rohoží a tkaniny ze skelných vláken, které se aplikují v několika vrstvách, dokud není forma dostatečně pevná. Vrstvy jsou pokládány v různých směrech pro zajištění odolnosti formy ve všech směrech. Jako matrice se při výrobě forem nejčastěji používá polyesterová nebo vinylesterová pryskyřice. Správně zvolený konstrukční materiál zajistí odolnost a stabilitu formy s minimálním opotřebením a deformacemi. [20; 22]
- **Podpůrná konstrukce** – Podpůrná konstrukce je prvek, který dodává tvarovou stabilitu a snadnější manipulaci formy. Tato konstrukce může být realizována pomocí různých prvků, včetně rámových struktur, trubek nebo žebrování. Rámy poskytují pevnost a ochranu formě, zatímco trubky nebo žebra mohou být integrovány do struktury pro dodatečnou podporu a zpevnění. Tyto prvky se vyrábějí z dostatečně pevných materiálů, například kov, aby odolaly tlaku a namáhání vytvářenému během procesu formování. Podpůrná konstrukce může mít i některé nevýhody mezi které může patřit zvýšená hmotnost formy, což může ztížit

manipulaci. Navíc složitější konstrukce může zvýšit náklady a náročnost na výrobu a údržbu formy. [22]



Obrázek 10 Konstrukce kompozitní formy

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

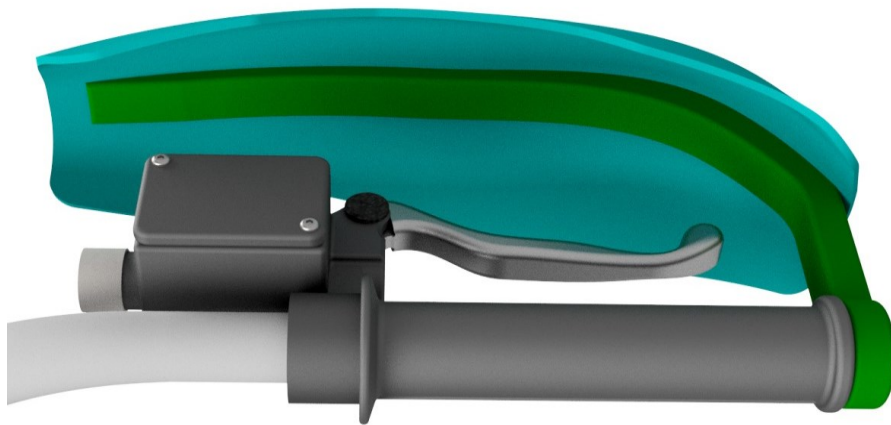
Hlavním cílem bakalářské práce je využití 3D tištěného modelu vybrané součásti pro výrobu kompozitní formy. Návrh nástroje a ostatní související operace v bakalářské práci budou podloženy literární rešerší zabývající se zejména problematikou 3D tisku v oblasti modelů a současně obecně kompozitními materiály a jejich přínosy pro uplatnění v návrhu výrobních nástrojů.

Hlavní zásady pro vypracování jsou stanoveny takto:

- Vypracujte literární rešerši na zadané téma.
- Návrh modelu vybrané součásti.
- 3D tisk navrhnuté součásti a návrh metodiky výroby kompozitního nástroje.
- Návrh skladby materiálového složení výrobního kompozitního nástroje.
- Experimentálním ověření výroby kompozitního nástroje.
- Vyhodnocení a stanovení závěrů výsledků bakalářské práce.

5 NÁVRH A VÝROBA SOUČÁSTI

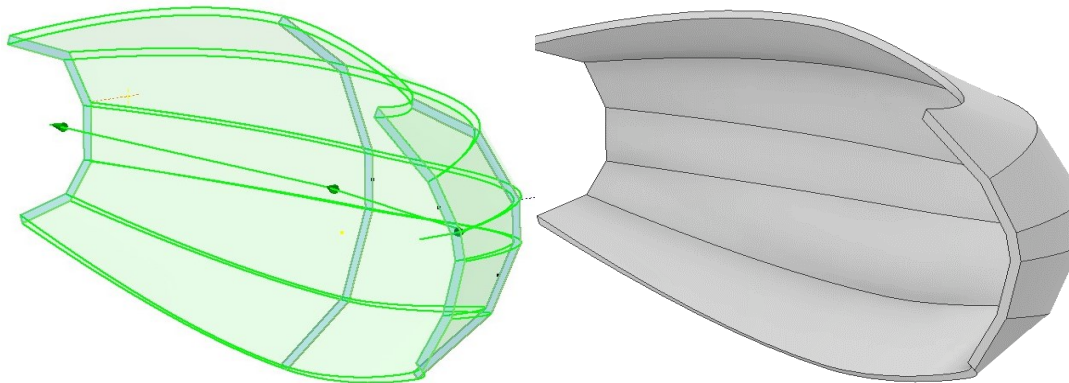
Praktická část této bakalářské práce se zaměřila na návrh a výrobu formy z kompozitního materiálu. Výchozí součástí byly zvoleny vnější kryty chrániče rukou na čtyřkolku. Tyto chrániče se upevňují na řídítka před rukojeťmi a jejich hlavním úkolem je ochránit ovládací prvky před poškozením a ruce jezdce před možným zraněním během jízdy, zejména při kontaktu s překážkami, jako jsou větve nebo odletující kameny.



Obrázek 11 Vizualizace krytu a držáku na řídítkách

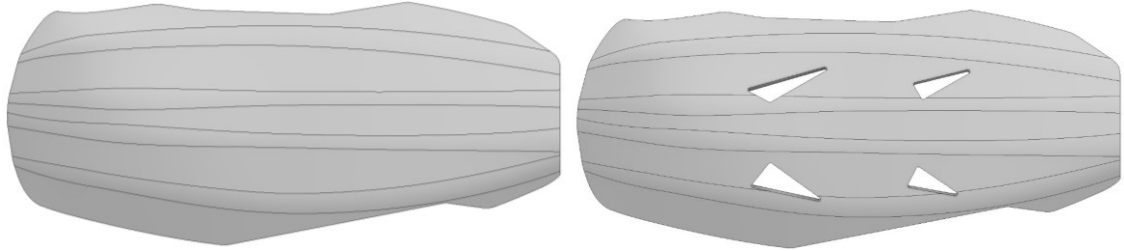
5.1 Návrh součásti

Základním krokem při návrhu součásti bylo zvolení velikosti a tvaru, aby chránič rukou pokryl celou přední část prstů, horní část zápěstí a také, aby pasoval do tvaru a velikosti ovládacích páček. Po změření řídítek čtyřkolky a reálné předlohy chrániče byly zvoleny základní rozměry o délce 260 mm, výšce 105 mm, tloušťce 2,5 mm a vzdálenosti od řídítek 120 mm. Na základě těchto rozměrů byly v programu Autodesk Inventor Professional 2023 vytvořeny čtyři základní profily, které byly následně spojeny pomocí funkce šablonování.



Obrázek 12 Vytvoření základního profilu šablonováním

Tímto postupem vznikl základní tvar, který byl následně opatřen ořezy pro agresivnější design a rádiusy pro zaoblení ostrých hran. Byly navrženy dvě varianty, první varianta byla navržena bez výřezů, která zajišťovala lepší ochranu a jednoduší výrobu. Druhá varianta byla navržena se čtyřmi výřezy, které by napomáhaly lepšímu proudění vzduchu na ruce a agresivnějšímu designu. Po zvážení všech kroků výroby a prozkoumání prototypové součásti byla zvolena varianta první.



Obrázek 13 Varianta bez výřezu (vlevo) a varianta s výřezy (vpravo)

5.2 3D tisk prototypové součásti

Kvůli občasným nedokonalostem u nových součástí a potřebě nalézt optimální variantu pro výrobu bylo u součásti provedeno ověření tvaru a velikosti pomocí FDM tiskárny k vytisknutí fyzického modelu. Tento proces zahrnoval několik kroků. Prvním krokem byla volba vhodného materiálu. V našem případě byl zvolen materiál PLA, který se vyznačuje dobrými vlastnostmi při tisku a nízkou ekonomickou nákladností, což byly optimální vlastnosti pro náš účel. Nastavení tisku bylo provedeno softwaru PrusaSlicer a pro realizaci tisku byla zvolena tiskárna Originál Prusa i3 MK3. Dále součást byla opatřena podporami z důvodu stability součásti při tisku. S ohledem na úsporu času a materiálu byly použity organické podpory, tloušťka vrstvy byla stanovena na 0,2 mm a výplň mřížková 10 %.



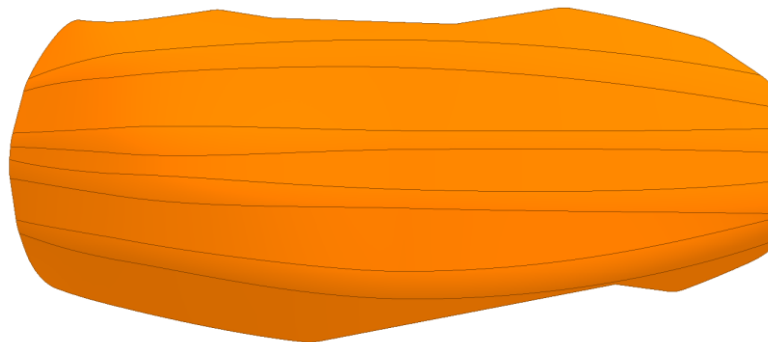
Obrázek 14 Tištěná prototypová součást s podporami

6 NÁVRH METODIKY VÝROBY KOMPOZITNÍHO NÁSTROJE

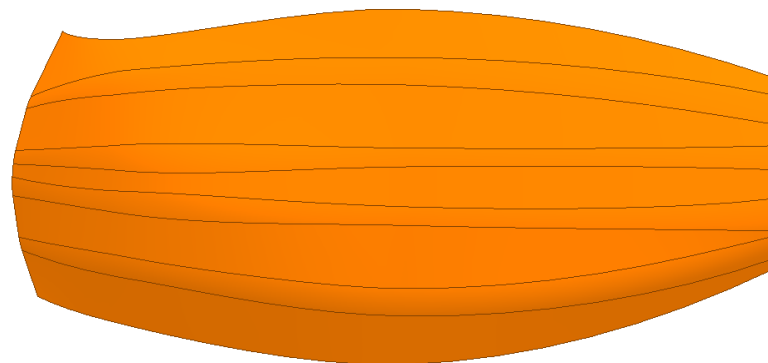
Návrh metodiky se zaměřuje na návrh a výrobu 3D tištěného modelu a následně formy z kompozitního materiálu. Byl zvolen postup vytvoření pozitivního modelu a negativní formy, z důvodů pohledové vnější strany, což umožňuje zachování přesného detailu na pohledové straně finálního výrobku. S ohledem na druh chrániče, který se skládá z pravého a levého dílu, bylo rozhodnuto, že forma byla vyrobena tak, aby umožnila výrobu obou dílů v jednom výrobním cyklu. Tato strategie zvyšuje efektivitu výrobního procesu a zároveň minimalizuje časové a nákladové nároky na výrobu celého výrobku.

6.1 Návrh modelu

Návrh modelu byl realizován v programu Autodesk Inventor Professional 2024 a Fusion 360. Před zahájením návrhu modelu bylo nezbytné provést úpravu modelu výchozího dílu pomocí odstranění ořezů a obvodových rádiusů. Tyto úpravy byly nutné kvůli obtížnému nebo nemožnému upravování a propojení výchozího modelu plochami. Následně byla z modelu dílu extrahována vnější plocha, která posloužila jako výchozí prvek pro následující tvorbu nového modelu.

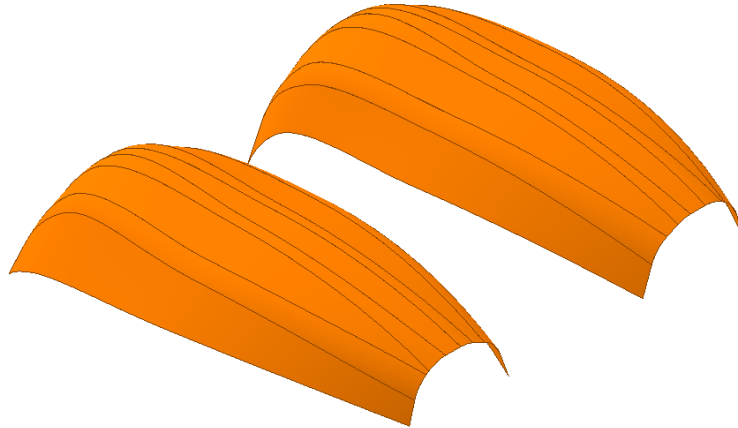


Obrázek 15 Model původního dílu



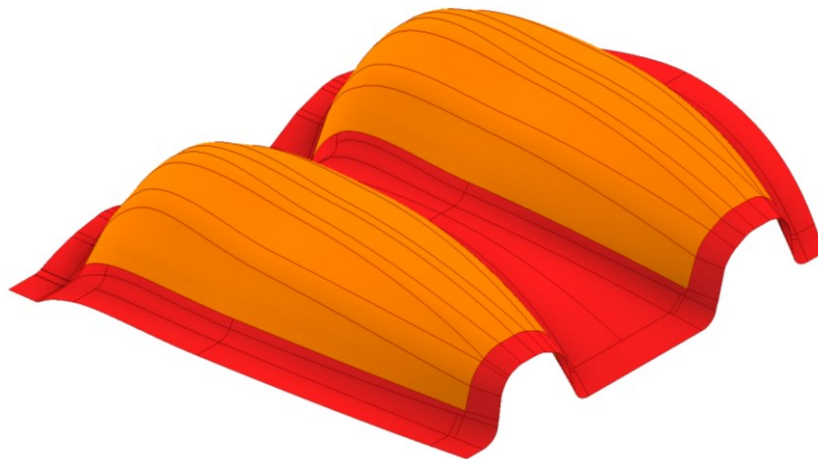
Obrázek 16 Model upraveného dílu

Následným krokem bylo zvolení umístění a natočení dílů vůči sobě. Tento proces má zásadní význam z hlediska snadného odstranění hotové formy z modelu, což minimalizuje riziko poškození formy během procesu odformování. Bylo zvoleno, že oba díly nebudou mezi sebou natočeny, aby se předešlo vzniku kolmých hran, které by mohly komplikovat odformování. Umístění bylo zvoleno s ohledem na rozměry, aby velikost modelu nepřesáhla tiskovou plochu tiskárny.



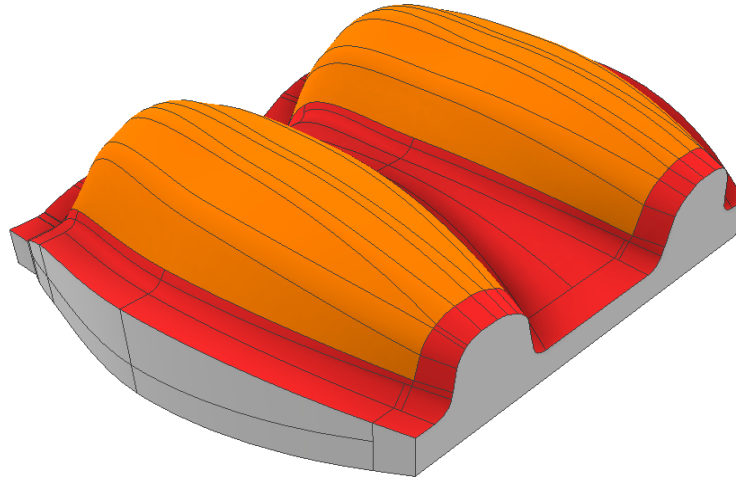
Obrázek 17 Umístění ploch vůči sobě

Poté byly vytvořeny technologické prvky, které se realizovaly pomocí prodloužení ploch a velkých rádiusů. Tyto prvky slouží primárně jako přídavek na oříznutí, u kterého jsme zvolili minimální velikost 5 mm a sekundárně jako spojnice mezi díly a technologickými ukončeními.



Obrázek 18 Technologické prvky (červeně)

Posledním krokem k vytvoření modelu bylo vysunutí vytvořené plochy tak aby vznikl pozitivní model. S ohledem na požadovanou tuhost a minimalizaci rizika poškození byla zvolena minimální vzdálenost vysunutí 6 mm.



Obrázek 19 Dokončený model s výchozími plochami (oranžově) a technologickými prvky (červeně)

6.2 Výroba modelu

Výroba modelu byla realizována pomocí FDM 3D tisku. FDM tisk byl zvolen z několika důvodů. Prvním faktorem byla dostupnost 3D tiskáren a materiálu. Dalšími faktory byly jednoduchost, rychlost a flexibilita tisku.

Materiál pro tisk modelu byl zvolen PLA, nejen z důvodů dostupnosti a dobrým vlastnostem při tisku, ale také pro jeho tuhost a tvrdost. Tyto vlastnosti byly klíčové pro zabránění deformaci modelu během kladení a vytvrzování kompozitního materiálu.

Tiskárna byla vybrána Creality CR-10 Max, která je součástí laboratorního vybavení fakulty technologické. Byla zvolena z důvodů velikosti tiskového prostoru, aby se model mohl vytisknout v jednom celku a nebylo nutné jej rozdělovat na více částí, které by pak bylo nutné spojovat.

V softwaru PrusaSlicer bylo provedeno nastavení tisku. Orientace modelu byla zvolena tak, aby největší rovná plocha ležela na tiskové podložce, což zajišťuje stabilitu během tisku bez nutnosti použití podpěr. Pro úsporu času byla zvolena výška vrstvy 0,28 mm. Dále byl nastaven límec o velikosti 5 mm, který pomáhá s přilnavostí k tiskové podložce a výplň byla nastavena na hustotou 10 % s použitím vzoru kubického adaptivního. Tento vzor se skládá z kostek a automaticky upravuje hustotu výplně v závislosti na vzdálenosti od stěny. Díky této výplni má výrobek hustší výplň nahoře, dole a po stranách než v jeho středu, což přispívá ke zkrácení doby tisku a snížení spotřeby materiálu při zachování optimálních mechanických vlastností.



Obrázek 20 Model během tisku s viditelnou adaptivní výplní

Následně bylo nutné provést slicování, převedení tisku do G kódu a nahrát ho do tiskárny. Bylo zkontrolováno nastavení tiskárny a dostatečné množství materiálu na celý tisk. Poté byl tisk spuštěn a průběžně kontrolován, zda nedochází k chybám nebo problémům.



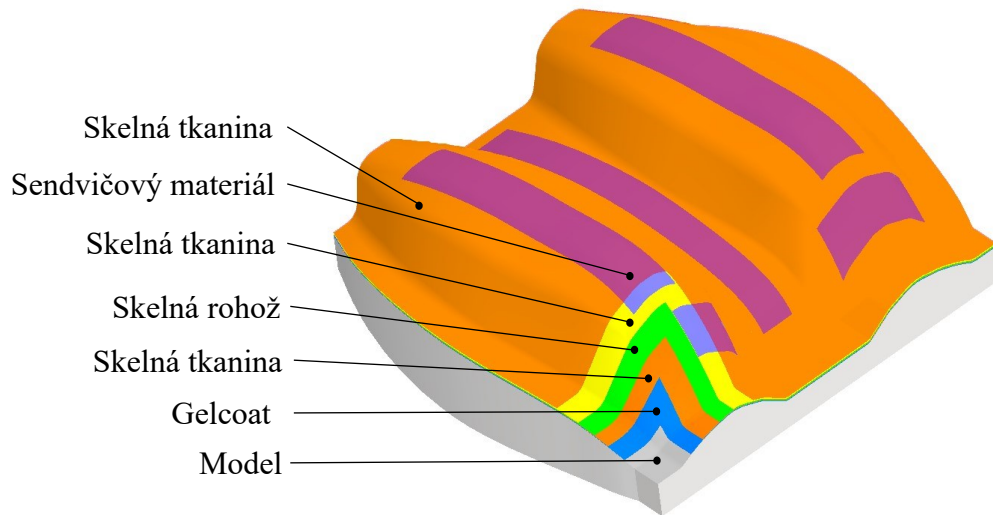
Obrázek 21 Model po dokončení tisku

Pro dokončení tisku bylo nezbytné povrch modelu přebrousit z důvodů zajištění, aby se detaily povrchu po 3D tisku nepřenesly do formy a byla zaručena hladká povrchová úprava formy, a také čím je povrch modelu hladší, tím je snadnější odformování kompozitní formy. Z těchto důvodů bylo nutné přebrousit všechny funkční plochy. Broušení probíhalo brusnými papíry a jako první byl použit papír zrnitosti 80 k odstranění nejhrubších nerovností. Poté následoval jemnější papír zrnitosti 240 a jako poslední se použil nejjemnější papír zrnitosti 320. Po dokončení broušení bylo nutné model očistit od prachu, zbytkového brusného materiálu a zkontrolovat, zda byl celý povrch dostatečně přebroušen.



Obrázek 22 Porovnání povrchu modelu před broušením (vlevo) a po broušení (vpravo)

6.3 Návrh skladby materiálového složení výrobního kompozitního nástroje



Obrázek 23 Rozvržení materiálové skladby

6.3.1 Gelcoat

Epoxidový gelcoat 252 T od výrobce Havel Composites je typ gelcoatu který vytváří hladký pohledový povrch. Je vhodný pro použití s epoxidovými laminovacími pryskyřicemi z důvodu dobrého spojení. Na separační vosky dobře přilne, neočkuje, nevytváří bubliny a nanáší se ve vrstvě 0,2 - 0,5 mm. Byl použit na první vrstvu v kombinaci s tužidlem H 252 v poměru 100:35. Tato vrstva umožnila zahmlení funkčního povrchu formy broušením po přenesení nedokonalého povrchu z modelu.



Obrázek 24 Epoxidový gelcoat a tužidlo

6.3.2 Skelná tkanina

Skelná tkanina Aeroglass s hmotností 25 g/m² a plátňovou vazbou je vyrobena ze skelné příze. Díky vlastnostem, mezi které patří nízká cena, lehkost a vysoká ohebnost je ideální pro tvarování a vyplňování přechodů a rádiusů. Tato tkanina má dobré průnikové vlastnosti, což umožňuje snadné nasycení pryskyřicemi. V našem případě byla použita pro první dvě vrstvy před skelnou rohoží a další dvě vrstvy po skelné rohoži jako ochranný prvek, aby zabránila vystupování vláken skelné rohože z formy a také jako poslední vrstva na překrytí sendvičového materiálu.



Obrázek 25 Skelná tkanina

6.3.3 Skelná rohož

Skelná rohož INDUSTRYGLASS s hmotností 100 g/m². Díky své nízké gramáži je poddajná, a proto se používá na komplikovanější tvary. Tato rohož byla aplikována na již zalaminovanou tkaninu, avšak ji lze použít přímo na gelcoatovou vrstvu. Slouží jako hlavní výztužná vrstva formy.



Obrázek 26 Skelná rohož

6.3.4 Pryskyřice

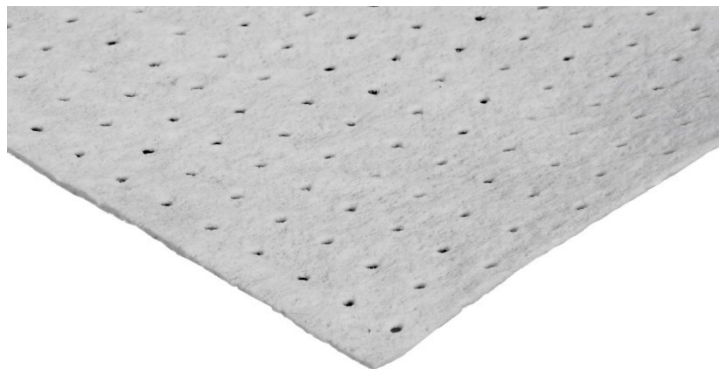
Epoxidová pryskyřice LH 287 od výrobce Havel Composites je čirá pryskyřice která má dobré mechanické vlastnosti v kombinaci s epoxidovým gelcoatem. Její hlavní výhoda spočívá v tom, že v kombinaci s tužidlem vytvoří nízkoviskozní systém, který je dobře smáčivý a umožňuje dobré prosycení tkaniny a vytlačení bublin. Tato pryskyřice byla použita v kombinaci s tužidlem 285 MGS v poměru 100:40 a spolu mají dobu zpracovatelnosti 50 minut.



Obrázek 27 Epoxidová pryskyřice a tužidlo

6.3.5 Sendvičový materiál

Havelcore soft o tloušťce 2 milimetry je sendvičový materiál který se skládá z polyesterového vlákna a mikrokuliček. Vyznačuje se dobrou poddajností a tvarovatelností. Tento sendvičový materiál nasaje pryskyřici a následně slouží jako výztužná vrstva na velkých plochách.



Obrázek 28 Sendvičový materiál [28]

6.4 Výroba kompozitního nástroje

Výroba nástroje neboli formy probíhala pomocí dokončeného 3D tištěného modelu a technologie ruční laminace. Prvním krokem bylo nanesení separačního vosku Oskar's M-700/C na důkladně očištěný a odmaštěný povrch modelu. Separací vosk se aplikoval z důvodu lepšího oddělení formy od modelu pomocí hadříku ve třech vrstvách, každá vrstva se nechala zaschnout po dobu 15 minut a následně byla rozleštěna. Vosk vytvořil na modelu tenkou a tvrdou ochrannou vrstvu.



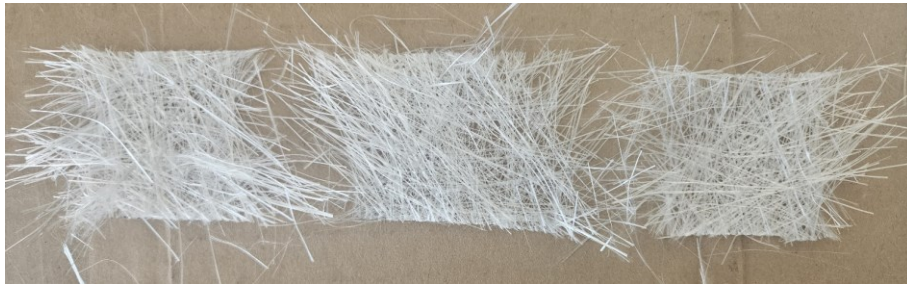
Obrázek 29 Nanesení separačního vosku

Následně byla na povrch pomocí štětce aplikována souvislá vrstva gelcoatu smíchaného s tužidlem v poměru 100:35 a nechána zaschnout přibližně 35 minut.



Obrázek 30 Nanesení gelcoatu

Během zasychání gelcoatu byla připravena skelná tkanina a skelná rohož. Tkanina byla nastříhána do tvaru trojúhelníků o hraně 3 až 6 cm a obdélníků nebo čtverců o velikosti 4 až 10 cm. Skelná rohož byla nastříhána na dlouhé pásy šířky 5 cm které byly následně natrhány ve vzdálenostech 3 až 5 cm.



Obrázek 31 Nastříhána a natrhána skelná rohož

Po zaschnutí gelcoatové vrstvy byla připravena směs epoxidové pryskyřice s tužidlem v poměru 100:40. Tato směs byla nanášena pomocí štětce na gelcoatovou vrstvu a následně se do ní vkládala nastříhaná tkanina tak, aby se částečně překrývala s vedlejší tkaninou. Tkanina byla postupně prosyncována pryskyřicí, když byl hotový celý povrch následovalo pokládání druhé vrstvy tkaniny. Jako třetí a čtvrtá vrstvu byla použita skelná rohož a jako pátá a šestá vrstva skelná tkanina. Před pokládáním nové vrstvy byla předchozí důkladně prosyncena pryskyřicí. Poté byl na velké plochy položen sendvičový materiál, který byl důkladně prosyncen pryskyřicí, a následně byl zalaminován skelnou tkaninou. Po dokončení všech vrstev se forma nechala důkladně vytvrdnout.



Obrázek 32 Forma po dokončení laminace

Po vytvrzení formy došlo k jejímu odformování a následně pomocí modelářské brusky byly odřezány nepotřebné okraje. Poté bylo nutné okraje ještě zabrousit pomocí brusného papíru, aby nedošlo ke zranění při manipulaci s formou. Na funkčních površích formy byly nalezeny mírné nedokonalosti, proto bylo nutné povrch postupně přebrousit brusnými papíry pod vodou se zrnitostí (400, 600, 1200, 2000) dokud funkční povrch nebyl dostatečně hladký a bez vad.



Obrázek 33 Dokončená forma

7 VÝROBA SOUČÁSTÍ S VYUŽITÍM KOMPOZITNÍHO NÁSTROJE

Součást byla vyrobena z kompozitního materiálu pomocí nově vyrobené kompozitní formy. Technologie výroby byla zvolena ruční laminace s použitím uhlíkového vlákna a epoxidové pryskyřice. Před zahájením laminace bylo nutné formu zbavit nečistot a odmastit. Poté byl do formy nanesen separační vosk, který byl po 15 minutách rozleštěn. Dohromady se nanesly tři vrstvy separačního vosku Oskar's M-700/C. Následně byly nasekány 3 cm dlouhé kousky uhlíkového vlákna a také nastříhána uhlíková tkanina o hmotnosti 200 g/m^2 ve tvaru dutiny formy s malým přesahem. Do levého dílu formy byla nanesena vrstva epoxidové pryskyřice s tužidlem, na kterou byly nasypány kousky uhlíkového vlákna tak, aby vznikla první pohledová vrstva stejné tloušťky v celém dílu. Na první vrstvu byla opatrně pokládána a prosycována uhlíková tkanina v šesti vrstvách. Když byl levý díl dokončen tak se stejným postupem pokračovalo při výrobě pravého dílu. Díly se nechali 24 hodin vytvrdnout a následně došlo k jejich odformování.



Obrázek 34 Prosycená tkanina ve formě



Obrázek 35 Pravý a levý díl po odformování

7.1 Dokončovací operace

Po odformování bylo nutné ořezat přebytečný materiál. Kvůli složitému tvaru a náročnosti výroby nebyl do modelu a formy navržen výstupek ořezové hrany, proto bylo nutné vyrobení šablon s konečným tvarem chráničů. Po zvážení možností bylo rozhodnuto že se šablony vyrobí pomocí 3D tisku FDM metodou. Šablony byly navrženy v programu Autodesk Inventor Professional 2024, následně tisk byl nastaven v programu PrusaSlicer s 30 % mřížkovou výplní, výškou vrstvy 0,2 mm a 5 mm límcem. Materiál tisku byl zvolen PLA a tisk byl zhotoven tiskárnou Creality CR-10 Max.



Obrázek 36 Levá šablona na neořezané součásti

S použitím šablony a popisovače jsme na součástích vyznačili ořezové hrany díky kterým jsme pomocí modelářské brusky odřezali přebytečný materiál. Následně se ostré hrany zabrousily pomocí brusných papírů zrnitosti 80 a 240.



Obrázek 37 Levý chránič po ořezání a zabroušení

Pro uchycení chráničů na říditka byly v programu Autodesk Inventor Professional 2024 navrženy držáky, jejichž nastavení tisku proběhlo v programu PrusaSlicer. Tyto držáky byly vytisknuty FDM metodou na tiskárně Creality CR-10 Max z materiálu PLA, výškou vrstvy 0,2 mm, s mřížkovou 30 % výplní a mřížkovými podpěrami. Hotové držáky byly na kompozitní chrániče upevněny pomocí lepidla.



Obrázek 38 Model levého držáku

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo využít 3D tištěného modelu vybrané součásti pro výrobu kompozitní formy. Vybranou součástí byly zvoleny chrániče rukou na čtyřkolku. Práce začala návrhem součástí, při kterých byl promyšlen jejich tvar, velikost a další prvky, aby navržená součást splnila požadavky. Návrh součásti byl ověřen 3D tiskem prototypového dílu, který umožnil ověření tvaru a velikosti, a také napomohl k určení, která ze dvou variant bude vhodnější pro výrobu.

V další části byly popsány všechny potřebné úkony k výrobě kompozitní formy, které obsahovaly návrh modelu, problematiku jeho tvorby v podobě nutné úpravy modelu výchozího dílu a vytvoření technologických přechodů pro navržení funkčního modelu. Dále obsahuje výrobu modelu pomocí 3D tisku FDM metodou z materiálu PLA a jeho následné dokončení broušením pomocí brusných papírů. Po dokončení broušení byl na model nanesen separační vosk pro snadnější odformování a byla navržena materiálová skladba v podobě první gelcoatové vrstvy, skelných tkanin a rohoží o nízké plošné hmotnosti, epoxidové pryskyřici a sendvičového materiálu pro vyztužení velkých ploch. Výroba formy probíhala metodou ruční laminace. Volba metody a materiálové skladby se ukázala jako náročná, ale vhodná, protože se formu podařilo vyrobit dostatečně kvalitní pro výrobu součástí. Z důvodu nedostatečného zabroušení povrchu modelu došlo k přenesení povrchové struktury do formy, a proto bylo nutné formu ještě zabrousit a doleštit brusnými papíry pod vodou.

Dalším krokem byla výroba samotných součástí s využitím kompozitní formy. Pro výrobu součástí byla opět použita technologie ruční laminace s využitím uhlíkových vláken a epoxidové pryskyřice. Na povrchu součástí byly zjištěny defekty v podobě bublin, což by vyžadovalo náročné dokončení součástí pomocí broušení a dalších nátěrů. Pro optimalizaci budoucí výroby by bylo vhodné zvolit postup s první gelcoatovou vrstvou, která by předešla vzniku bublin na povrchu. Dokončení součástí zahrnovalo výrobu 3D tištěných šablon na ořezání finálního tvaru a následné ořezávání a zahlazení ostrých hran. Nakonec byly pomocí 3D tisku vyrobeny držáky pro uchycení chráničů na říditka, které byly následně pomocí lepidla upevněny na kompozitní chrániče.

Přínosem bakalářské práce je možnost využití 3D tisku k výrobě modelů a dalších pomocných prvků které jsou užitečné při výrobě a také prohloubení informací a zkušeností v oblasti kompozitních materiálů.



Obrázek 39 Levý chránič s držákem

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TORPAN, Radu a ZAHARIA, Sebastian-Marian. Manufacturing Process of Helicopter Tail Rotor Blades from Composite Materials Using 3D-Printed Moulds. online. *Applied Sciences*. 2024, roč. 14, č. 3. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app14030972>. [cit. 2024-03-10].
- [2] DIZON, John Ryan C.; GACHE, Ciara Catherine L.; CASCOLAN, Honelly Mae S.; CANCINO, Lina T. a ADVINCULA, Rigoberto C. Post-Processing of 3D-Printed Polymers. online. *Technologies*. 2021, roč. 9, č. 3. ISSN 2227-7080. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/technologies9030061>. [cit. 2024-03-14].
- [3] KLOSKI, Liza a KLOSKI, Nick. *Začínáme s 3D tiskem*. 1. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [4] *Digitalizace - její princip a rozdělení*. online. 2004. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni>. [cit. 2023-12-16].
- [5] BUGEJA, Antonella; BONANNO, Martina a GARG, Lalit. online. *Materials Today: Proceedings*. 2022, roč. 63, s. 718-725. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.069>. [cit. 2024-03-15].
- [6] *Co je laserové skenování a k čemu je dobré?*. online. 2021. Dostupné z: <https://www.visionplan.cz/co-je-laserove-skenovani-a-k-cemu-je-dobre/>. [cit. 2023-12-16].
- [7] *3D Filament Guide: Popular 3D Printing Filaments*. online. 2015. Dostupné z: <https://blog.pinshape.com/popular-3d-printing-filaments-3d-printer-filament-types/>. [cit. 2023-12-15].
- [8] *3D PRINTER FILAMENT COMPARISON GUIDE*. online. 2023. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>. [cit. 2023-12-15].
- [9] *Making a Composite Mould from a 3D Print*. online. 2021. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/making-a-composites-mould-from-a-3d-print>. [cit. 2023-12-15].
- [10] *Výroba forem a odlévání 3D výtisků – průvodce pro začátečníky*. online. 2020. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/cs/vyroba-form-a-odlevani-3d-vytisku-pruvodce-pro-zacatecniky_31561/. [cit. 2023-12-15].
- [11] KREBS, Stefan; KOLAŘÍK, Ladislav a BRYKSÍ STUNOVÁ, Barbora. *Teorie zpracování plastů a kompozitů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [12] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [13] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. V ČR 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [14] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [15] *Encyclopedia of Materials: Composites*. 1. Elsevier, 2021. ISBN 978-0-12-819731-8.
- [16] *Technologie výroby kompozitů*. online. In: HAVEL COMPOSITES. 2020. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%C3%BDroby%20kompozit%C5%AF.pdf>. [cit. 2023-11-17].

- [17] *German advance Composites*. online. 2021. Dostupné z: <https://german-advanced-composites.com/vacuum-infusion-process-explained>. [cit. 2023-11-17].
- [18] GARMENDIA, Iñaki; VALLEJO, Haritz a OSÉS, Usue. Composite Mould Design with Multiphysics FEM Computations Guidance. online. *Computation*. 2023, roč. 11, č. 2. ISSN 2079-3197. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/computation11020041>. [cit. 2024-03-22].
- [19] *Charles composite production*. online. 2023. Dostupné z: <https://www.charles.cz/formy/>. [cit. 2023-12-03].
- [20] FIBER GLAST. *Mold Construction Guide*. online. 2023. Dostupné z: https://www.fibreglast.com/product/mold-construction/Learning_Center. [cit. 2023-12-03].
- [21] ROY, Madhuparna a DICKENS, Tarik J. Additive technology of soluble mold tooling for embedded devices in composite structures: A study on manufactured tolerances. online. *Additive Manufacturing*. 2017, roč. 15, s. 78-86. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.03.012>. [cit. 2024-04-07].
- [22] WANBERG, John. *Composite Materials: Fabrication Handbook*. 3. Wolfgang Publications, 2012. ISBN 978-1-935828-66-2.
- [23] YUHAZRI, M. Y.; AMIRHAFIZAN, M. H.; NILSON, G. C. H.; SIHOMBING, H.; KAMARUL, A. M. et al. Effects of gelcoat thickness on mechanical properties of woven glass/polyester laminated composite. online. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND SCIENCES*. 2018, roč. 12, č. 1, s. 3370-3386. ISSN 22894659. Dostupné z: <https://doi.org/10.15282/jmes.12.1.2018.7.0301>. [cit. 2024-04-11].
- [24] *Skelná vlákna*. online. 2023. Dostupné z: <https://www.bevedo.cz/napoveda/clanky/skelna-vlakna/>. [cit. 2023-11-17].
- [25] *Maltisk.cz*. online. 2024. Dostupné z: <https://maltisk.cz/produkt/filament-silk-oranzova-1-kg-3dpower/>. [cit. 2024-02-23].
- [26] *Tuning car design*. online. 2024. Dostupné z: <https://www.tuningcardesign.cz/karbonove-kridlo-japspeed-subaru-impieza-01-07-1/>. [cit. 2024-02-24].
- [27] *Tkaniny pro epoxidové kompozity*. online. In: Skolil kompozit. 2024. Dostupné z: <https://skolil.cz/materialy-pro-vyrobu-forem-modelu-pripravku/vyroba-tepelne-odolnych-forem/13-materialy-pro-vyrobu-kompozit/tkaniny>. [cit. 2024-03-13].
- [28] Lantor Coremat. online. In: *Easycomposites*. 2024. Dostupné z: <https://media.easycomposites.co.uk/products/large/COREM1MM-1.4mm-Lantor-Coremat.jpg>. [cit. 2024-05-10].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°	Stupeň
%	Procenta
3D	Trojrozměrný
CAD	Computer Aided Design
STL	Standard Tessellation Language
FDM	Fused Deposition Modeling
PLA	Kyselina polyléčná
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PET	Polyethylentereftalát
PETG	Polyethylentereftalát glycol
m	Metr
cm	Centimetr
mm	Milimetr
μm	Mikrometr
UV	Ultrafialové záření
g	Gram

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 3D model redukce	12
Obrázek 2 Tisková struna [25].....	13
Obrázek 3 Druhy vazeb výztužných vláken [27].....	18
Obrázek 4 Skelná vlákna [24].....	18
Obrázek 5 Automobilové křídlo z uhlíkových vláken [26].....	19
Obrázek 6 Schéma postupu při ruční laminaci [11].....	20
Obrázek 7 Schéma principu nástřiku sekaných vláken [11].....	21
Obrázek 8 Schéma principu vakuové infuze	21
Obrázek 9 Typy forem.....	23
Obrázek 10 Konstrukce kompozitní formy	25
Obrázek 11 Vizualizace krytu a držáku na řídkách	28
Obrázek 12 Vytvoření základního profilu šablonováním.....	28
Obrázek 13 Varianta bez výřezu (vlevo) a varianta s výřezy (vpravo).....	29
Obrázek 14 Tištěná prototypová součást s podporami.....	29
Obrázek 15 Model původního dílu.....	30
Obrázek 16 Model upraveného dílu	30
Obrázek 17 Umístění ploch vůči sobě.....	31
Obrázek 18 Technologické prvky (červeně).....	31
Obrázek 19 Dokončený model s výchozími plochami (oranžově) a technologickými prvky (červeně)	32
Obrázek 20 Model během tisku s viditelnou výplní	33
Obrázek 21 Model po dokončení tisku.....	33
Obrázek 22 Porovnání povrchu modelu před broušením (vlevo) a po broušení (vpravo) ..	34
Obrázek 23 Rozvržení materiálové skladby	35
Obrázek 24 Epoxidový gelcoat a tužidlo.....	35
Obrázek 25 Skelná tkanina	36
Obrázek 26 Skelná rohož.....	36
Obrázek 27 Epoxidová pryskyřice a tužidlo.....	37
Obrázek 28 Sendvičový materiál [28].....	37
Obrázek 29 Nanesení separačního vosku	38
Obrázek 30 Nanesení gelcoatu.....	38
Obrázek 31 Nastřihána a natrhána skelná rohož.....	39
Obrázek 32 Forma po dokončení laminace	39
Obrázek 33 Dokončená forma	40

Obrázek 34	Prosycená tkanina ve formě	41
Obrázek 35	Pravý a levý díl po odformování	42
Obrázek 36	Levá šablona na neořezané součásti	42
Obrázek 37	Levý chránič po ořezání a zabroušení	43
Obrázek 38	Model levého držáku	43
Obrázek 39	Levý chránič s držákem	45

SEZNAM PŘÍLOH

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

Příloha P II: Technický list epoxidového gelcoatu 252 T

Příloha P III: Technický list epoxidové pryskyřice LH 287

Příloha P IV: Technický list tužidla do epoxidové pryskyřice 285 (MGS)

Příloha P V: Technický list separačního vosku Oskar's M-700/C