



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍ PROTETICKÉ POMŮCKY

DESIGN OF COMPOSITE PROSTHETIC APPLIANCES PRODUCTION TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Magula

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Jan Zouhar,
Ph.D.**

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Martin Magula**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jan Zouhar, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh technologie výroby kompozitní protetické pomůcky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh technologie výroby kompozitní protézy paže. Protézu je třeba navrhnout z hlediska tvarového i pevnostního dle individuálních potřeb uživatele pro běžné využití nebo pro speciální potřeby. Pro výrobu budou zvoleny moderní materiály, které vynikají svou odolností a dalšími vlastnostmi, jako třeba útlum vibrací.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše materiálů a technologií výroby protetických pomůcek
- návrh vhodného materiálu a technologie
- mechanické testy zvolených materiálů
- návrh individuální protetické pomůcky

Seznam doporučené literatury:

CAMPBELL, F. C. Structural Composite Materials. Materials Park: ASM International, 2010. ISBN 978-1-61503-037-8.

Composite materials handbook. Volume 1. Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials. USA: SAE International on behalf of CMH-17, a division of Wichita State University, 2012. 700 s. ISBN 978-0-7680-7811-4.

BOGOLJUBOV, N. N. Composite Manufacturing Technology. London: Chapman & Hall, 1995. 433 s.

MALLICK, P. K. Composites engineering handbook. New York: Marcel Dekker, 1997. 1249 s. ISBN 0-8247-9304-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá tématem výroby kompozitní protetické paže. První část práce je věnována rešerši základních kompozitních materiálů a technologií výroby protetických pomůcek. Druhá část práce je zaměřena na praktickou výrobu, kde ze skenování již zhotovené předešlé protézy bude získán model. V návaznosti na tuto část bude vyrobena část paže, která bude podrobena zkouškám materiálu.

Klíčová slova

protéza, kompozit, paže, matrice, vlákna, pryskyřice

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the topic of manufacturing a composite prosthetic arm. The first part of the thesis is devoted to the research of basic composite materials and technologies for the production of prosthetic devices. The second part of the thesis is focused on the practical manufacturing, where from the scanning of a previously made prosthesis we obtain a model. Following this part, a part of the arm will be fabricated and subjected to material testing.

Keywords

prosthesis, composite, arm, matrix, fibres, resin

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAGULA, Martin. *Návrh technologie výroby kompozitní protetické pomůcky* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149351>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Zouhar.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Návrh technologie výroby kompozitní protetické pomůcky vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 25.05.2023

místo, datum

Martin Magula

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Janu Zouharovi PhDr., Ing. Martinu Slanému PhDr. a Ing. Oscaru Zemčíkovi PhDr. za cenné připomínky a rady, které mi poskytli při vypracování bakalářské práce.

Dále děkuji rodině a blízkým za psychickou podporu.

OBSAH

Zadání práce	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD	9
1 Rozbor zadání	10
1.1 Druhy technologií výroby kompozitních protéz	10
2 kompozitní materiály	11
2.1 Základní pojmy a materiály	11
2.2 Matrice.....	12
2.3 Materiál výztuže	15
2.3.1 Druhy materiálových výztuží	16
3 Praktická část.....	21
3.1 Skenování předchozí protézy a zpracování	22
3.2 Převod skenu do modelu v programu Inventor 2023	24
3.3 Výběr materiálu	26
3.4 3D tisk a testování	27
3.5 Laminace testovacího vzorku	30
ZÁVĚR.....	36
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam příloh	

ÚVOD

Dodnes stále není jasné, kdy přesně se ve světě objevily první náhrady končetin. Jako první se vyráběly dřevěné protézy. Postupem času se začaly konstruovat protetické pomůcky z kovu u uměleckých kovářů. Ve dvacátém století, které bylo také velkým obdobím válek, se začala protetika hojně využívat. Kvůli válkám se měnily jak materiály, tak i tvary protetických končetin.

Konstrukce kompozitních protéz začala již v 80. letech dvacátého století, kde se jako první uvažovalo o několika termoplastických polymerech. První byl použit hydroxyapatit, vyztužený kompozit z vysokohustotního polyethylenu, jako obdoba kostní náhrady a nosného materiálu v kloubních endoprotézách. [4]

V dnešní době se protézy končetin vyrábí především z kompozitních materiálů, kvůli svým nenahraditelným vlastnostem. Nejčastějším kompozitním materiálem jsou uhlíková vlákna s termosetickou, či kovovou maticí. Díky dnešním technologiím se pomocí protéz mohou lidé vrátit zpět do svého sportovního i osobního života s mírným omezením.



Obr. 1 protetická náhrada kotníku [6].



Obr. 2 protéza zápěstí [7].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Řešeným dílcem je protéza pravého předloktí pro konkrétního jedince, což je vidět na obrázku (obr. 3). Daný uživatel nasazuje protézu na pravou paži, respektive na pahýl pod pravým loktem. Protetická ruka je téměř plnohodnotnou náhradou předloktí při sportu, cvičení, a tudíž disponuje vyměnitelnými hlavicemi pro úchop činky, pátky, řídítek a mnoho dalších, které můžeme vidět na obrázku (obr. 4).

Hlavními parametry jsou především hmotnost, pevnost v tahu a útlum vibrací. Z tohoto důvodu se jako ideální materiály jeví kompozity na místo oceli, která má o dost horší poměr hmotnosti a pevnosti než kompozitní materiály.



Obr. 3 protéza v praxi.

Obr. 4 hlavice pro úchop činky.

1.1 Druhy technologií výroby kompozitních protéz

Existuje celá řada technologií, kterými se dají vyrábět protézy z kompozitních materiálů. Druhy technologií výroby kompozitní paže [16; 17]:

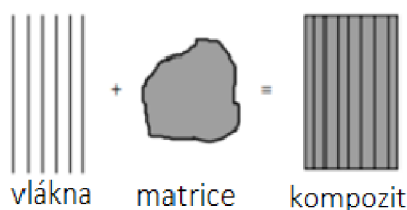
- 3D tisk – 3D tisk je poměrně nová metoda výroby protéz v dnešní době. Spočívá v tisknutí materiálu vrstvu po vrstvě ve formě filamentu, prášku či fólie. Velkými výhodami jsou – tvarová složitost nemá velký vliv na cenu a není zde zapotřebí žádných forem ani nástrojů. Nevýhody této technologie jsou horší mechanické vlastnosti a anisotropie mechanických vlastností.
- mokré kladení – jedná se pravděpodobně o nejrozšířenější a nejjednodušší technologii, ke které je zapotřebí minimálního vybavení. Nevýhody technologie jsou – potřebná zručnost a zkušenost obsluhy a je téměř nemožné vyhnout se porositě v pryskyřici. Pro výrobu je třeba jednodílná forma, často bývá leštěná, protože kvalita jejího povrchu ovlivňuje kvalitu vyrobeného dílu. Formy lze získat otiskem modelového dílu nebo přímo obráběním. Jejich materiály budou probrány dále. Používá se suchá tkanina, která se ručně prosycuje pryskyřicí.

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

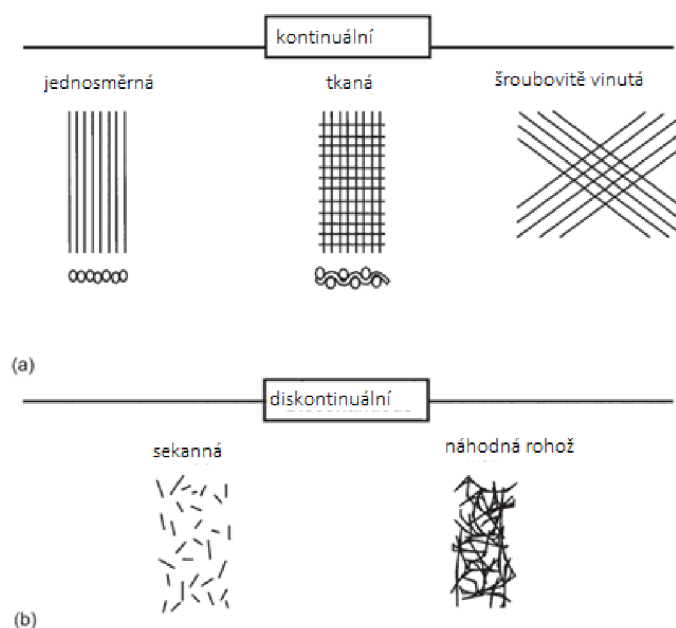
Kompozitní materiály jsou v dnešní době stále více využívané díky svým jedinečným vlastnostem, kterými disponují. Jejich uplatnění je velmi rozmanité, využívají se v kosmickém průmyslu, kde tvoří hlavní komponenty raketoplánu, v leteckém průmyslu, ve sportu a medicíně, kde se kompozitní materiály využívají především jako funkční protézy a sportovní vybavení.

2.1 Základní pojmy a materiály

Kompozitní materiál lze definovat jako kombinaci dvou nebo více materiálů, které vede k lepším vlastnostem, než když jsou jednotlivé materiály použity samostatně. Na rozdíl od slitin kovů si každý materiál zachovává své chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti. Jako dva komponenty jsou běžně použita vlákna a matrice (obr. číslo 5). Materiálem výztuže i matrice mohou být jak kovy, keramika, tak nekovové organické či neorganické materiály ve formě keramiky nebo polymerů. Typická vlákna jsou skleněná, aramidová a uhlíková, ta mohou být kontinuální nebo diskontinuální. Kontinuální vlákna mají dlouhé poměry stran, zatímco nespojitá vlákna je mají krátké. Kompozity se spojitými vlákny mají obvykle určenou orientaci, nespojitá vlákna zase náhodnou orientaci. Příklady spojitých výztuží jsou jednosměrná, tkaná a šroubovitě vinutá (obr. 6a), příkladem nespojitých výztuží jsou sekaná vlákna a náhodná rohož (obr. 6b) [3;5;16;17].



Obr. 5 kompozitní materiál [16].



Obr. 6 běžné typy výztuží [16].

Výhody a přední vlastnosti kompozitních materiálů [1]:

- redukce hmotnosti dílce,
- skvělý poměr tuhosti a tuhosti vůči hmotnosti,
- delší životnost díky korozivzdornosti,
- přizpůsobitelné vlastnosti,
- lze přizpůsobit pevnost a tuhost ve směru zatížení, přirozené tlumení,
- zvýšení/snížení tepelné a elektrické vodivosti.

Nevýhody kompozitních materiálů [1]:

- náklady na materiál a výrobu,
- příčné vlastnosti mohou být slabé,
- matrice má malou houževnatost,
- matrice podléhá enviromentální degradaci.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů [3]

	Napětí v tahu [Mpa]	Modul pružnosti [MPa]	Mezní přetržení při prodloužení [%]
E-Sklo	500	11	4.8
Aramid	550	19	2.8
Uhlík	530	33	1.5

2.2 Matrice

Úloha matrice v kompozitních materiálech je zásadní. Matrice udržuje vlákna ve správné poloze, zajišťuje celistvost kompozitního tělesa, chrání je před oděrem, přenáší zatížení mezi vlákny a zajišťuje pevnost ve smyku mezi vlákny.

Vhodně zvolená matrice také zajišťuje odolnost vůči teplu, chemikáliím a vlhkosti; má vysokou odolnost proti deformaci, vytvrzuje se při co nejnižší teplotě a není toxická [3] [2].

Nejčastěji se používají organické polymerní matrice. Následující výčet se zaměřuje na jejich dvě základní charakteristické skupiny – termosety a termoplasty [5].

Základní rozdělení matric dle typu polymeru [16]:

- termosetické (reaktivní):
 - nenasycené polyesterové pryskyřice,
 - vinylesterové (VE-R),
 - epoxidové pryskyřice (EP-R),
 - fenolitické pryskyřice.
- termoplastické:
 - polypropylen,
 - polyamid,
 - polykarbonát,
 - polyether.

Tab.2 Mechanické vlastnosti vybraných termoseťů [17]

	ρ	E_t	σ_{Pt}	$\varepsilon_{m,krit}$
	$10^3 kgm^{-3}$	<i>GPa</i>	<i>MPa</i>	%
Epoxidová pryskyřice	1,1-1,4	2,1-6	35-90	1-10
polyestery	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85	1-5
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50-60	1-3

Tab.3 Mechanické vlastnosti vybraných termoplastů [17]

	ρ	E_t	σ_{Pt}	$\varepsilon_{m,krit}$
	$10^3 kgm^{-3}$	<i>GPa</i>	<i>MPa</i>	%
Polypropylen	0,9	1,1-1,5	28-41	10-700
Polyamid	1,42	2,8-2,4	76-83	60-300
Polykarbonát	1,21	2,1-2,8	62-76	110-130
Polyether	1,31	3,8	70	50-130

- polyester

Polyester je základním prvkem kompozitního průmyslu. Je používán v největším objemu ze všech materiálů díky své ceně, mechanickým vlastnostem a odolnosti. Ačkoli jsou náklady nižší než epoxidy, mají polyestery obecně nižší teplotní odolnost, nižší mechanické vlastnosti, nižší odolnost proti povětrnostním vlivům a vykazují větší smrštění během vytvrzování. Potrubí a nádrže, sprchové kouty a vany, lodě, automobilové komponenty a mnoho dalších aplikací plastů, vyztužených vlákny, jsou polyesterovými kompozity. [2] [5]



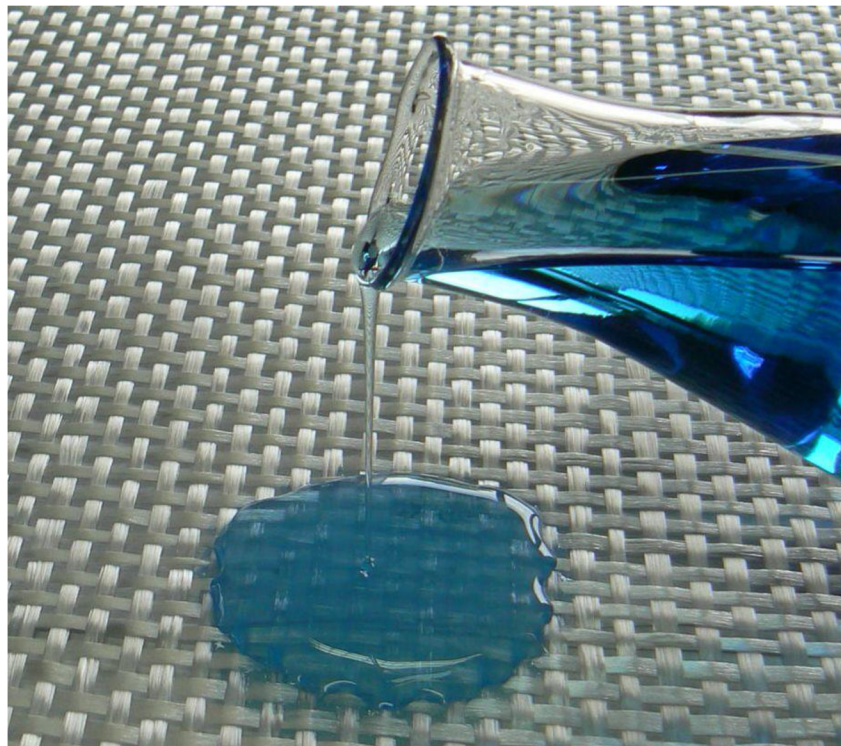
Obr. 7 Polyesterová pryskyřice [8].

- epoxidová pryskyřice

Jedním z nejběžnějších materiálů matrice jsou epoxidy pro vysoce výkonné kompozitní materiály. Mají vynikající kombinaci síly, přilnavosti, nízkého smrštění a univerzálnosti zpracování. Předními vlastnostmi epoxidových matric jsou obecně vyšší hodnoty lomové houževnatosti než polyestery a vinylestery, což může mít za následek lepší odolnost laminátů proti únavě, dále také mají nižší viskozitu oproti jiným termosetickým pryskyřicím. Jsou mnohem dražší, navzdory lepším mechanickým vlastnostem. Komerční epoxidová matrice mohou být velmi jednoduché a obsahovat mohou tak jednu epoxidovou a jednu vytvrzovací pryskyřici. Většina z nich však obsahuje hlavní epoxidovou pryskyřici, jeden až tři vedlejší epoxidy a jednu nebo dvě vytvrzovací činidla. Vedlejší epoxidy se přidávají za účelem zajištění regulace viskozity, zlepšují vlastnosti při vysokých teplotách, snižují absorpci vlhkosti nebo zlepšují houževnatost. Vytvrzování může probíhat za tepla i za studena, podle konkrétního typu pryskyřice a tvrdidla epoxidová pryskyřice (obr. 8) nachází hlavní využití především v leteckém průmyslu. [2;3;5;17]

Tab.4 Závislost mechanických vlastností epoxidové pryskyřice EPON na teplotě [17]

Teplota °C	ρ	E_t	σ_{pt}	$\varepsilon_{m,krit}$
	10^3 kgm^{-3}	GPa	MPa	%
25	1,22	2,8	95,1	5,5
120	1,22	2,1	46,2	9,6



Obr. 8 epoxidová pryskyřice [9].

- fenolická pryskyřice

Fenoly jsou obvykle velmi křehké a během vytvrzování vykazují velké smrštění. Jejich primární použití je pro vnitřní konstrukci letadel, protože mají nízkou hmotnost, hořlavost a tvorbu kouře. Fenoly mají vynikající rozměrovou stabilitu v širokém rozsahu teplot, elektrické izolační vlastnosti a tvrdost. [2;3]

Fenolické pryskyřice (obr. 8) se vyrábějí reakcí fenolu (fenolického materiálu, např. krezolu) s aldehydem. Použitým aldehydem je téměř vždy formaldehyd, protože je nejúspěšnějším aldehydem, reaguje rychleji a nemůže podléhat většině vedlejších reakcí, které jsou možné u vyšších aldehydů. [2;3]



Obr. 9 fenolická pryskyřice [10].

2.3 Materiál výztuže

Vlákna jsou základním nosným prvkem v kompozitu vyztuženém vlákny. Jsou předem sestaveny do různých forem, aby se usnadnila výroba kompozitních dílů. Vzhledem k pevnosti a tuhosti vláken, jsou převážně používány výztuže pro pokročilé kompozity. Vlákna mohou být spojitá nebo nespojitá, v závislosti na aplikaci a výrobním procesu. Nespojitá vlákna (označovaná také jako sekaná nebo krátká vlákna) se často používají k výrobě levných kompozitů, například z deskových formovacích směsí nebo netkaných rohoží. Vlákna, filameny, příze, přadena a prameny obecně představují paralelní svazky spojitých vláken. [2;3]

Dva hlavní faktory, které určují pevnost a tuhost kompozitů, jsou délka a orientace vláken. Teoreticky se kompozit z přerušovaných vláken s dostatečnou délkou, který je dokonale orientovaný, přiblíží pevnosti a tuhosti kompozitu z nekonečných vláken. Ve skutečnosti je velmi obtížné kontrolovat orientaci u kompozitů s nespojitými vlákny. Během zpracování dochází k protlačování vláken proudem pryskyřice, což způsobuje jejich nesprávnou orientaci.

Hlavní druhy a vlastnosti vláken [16]:

- skelná vlákna:
 - izotropní a hydrofilní vlákna,
 - vysoká pevnost, nižší tuhost,

- uhlíková vlákna:
 - vysoká tuhost a pevnost,
 - dobrá manipulace,
 - anizotropní vlákna,
- aramidová vlákna:
 - dobré tlumící vlastnosti,
 - anizotropní,
 - nízká pevnost v tlaku,
- přírodní vlákna:
 - levná výztuž s malou hustotou,
 - recyklovatelný odpad,
- polyethylenová vlákna s ultravysokou molekulovou hmotností (UHMPE):
 - dobrá odolnost vůči vlhkosti,
 - dobré elektrické vlastnosti.

2.3.1 Druhy materiálových výztuží

- Skelná vlákna

Díky nízkým materiálovým nákladům, ve srovnání s uhlíkovými a aramidovými vlákny, jsou kompozity ze skleněných vláken nejpoužívanějším kompozitním materiálem vůbec.

Kvůli vysoké pevnosti v tahu, vysoké odolnosti proti nárazu a dobré chemické odolnosti se skleněná vlákna hojně využívají v komerční sféře. Jejich vlastnosti se však nemohou rovnat vlastnostem uhlíkových vláken pro vysoce výkonné kompozitní aplikace. Mají relativně nízký modul pružnosti a horší únavové vlastnosti ve srovnání s uhlíkovými vlákny.

Dva nejrozšířenější typy skelných vláken pro strukturální využití jsou E-glass a S-2 glass, viz obr.10. Nejčastěji používaným typem je E-glass, protože tato vlákna jsou levná, disponují dobrou kombinací pevnosti v tahu (500 ksi) a modulu pružnosti (11 msi). S-2 glass má lepší pevnost v tahu (650 ksi) a modul pružnosti (12,6 msi), je o 40% pevnější než E-glass a při vyšších teplotách zanechává vyšší procento své pevnosti. Na druhou stranu je daleko dražší než E-glass.

Sklo je amorfni materiál, který se skládá z křemíku SiO_2 s různými oxidovými složkami, které vytvářejí specifické složení a vlastnosti. Skelné vlákno se vyrábí z křemičitého písku, vápence a dalších surovin. Výroba spočívá tažením z taveniny v připravených platinových pecích. Vlákno je následně ochlazováno a opatřeno ochranou vrstvou, která jej brání před oxidací a také zvyšuje adhezi a smáčivost organickými matricemi. [3;16;17]



Obr. 10 skelná vlákna [11].

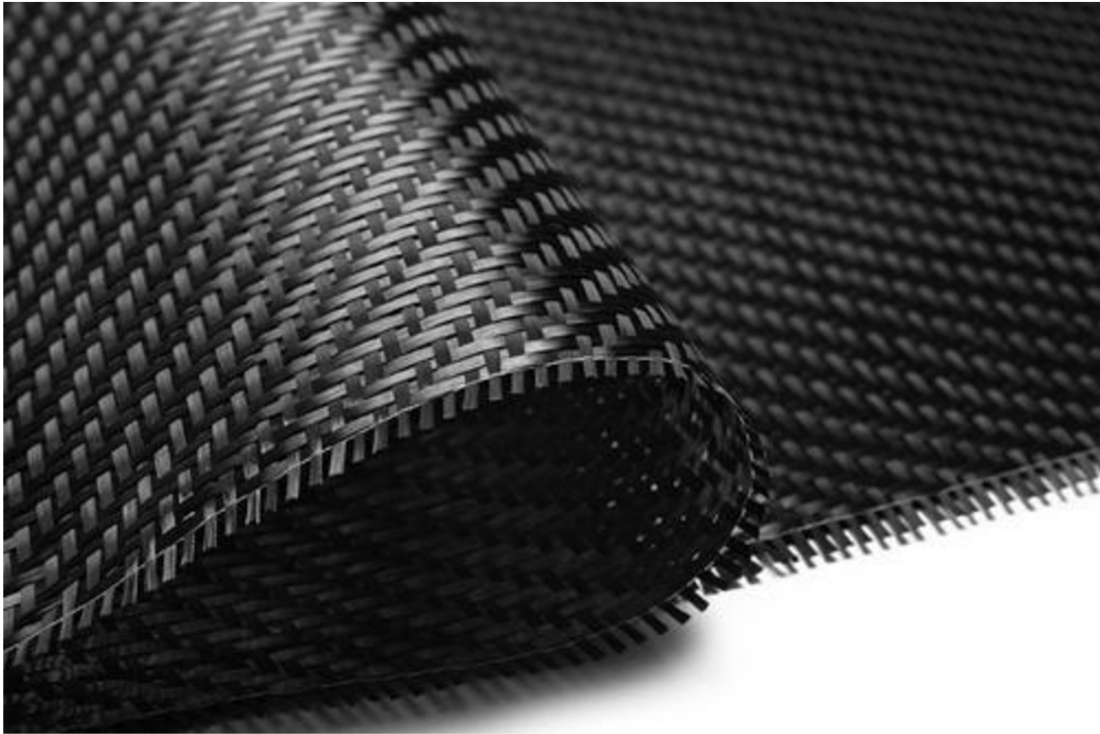
- Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou obzvláště vyhledávanou výztuží díky své nízké hmotnosti, vysoké pevnosti a tuhosti. Jejich nevýhodou je poměrně vysoká cena. Již desítky let se hojně používají v leteckém průmyslu, ale v posledních letech si našla cestu i do sportovního vybavení spolu se závodním a automobilovým průmyslem (obr. 11). [5]

Vyrábí se pyrolýzou polyakrylonitrilových vláken PAN. Ta jsou nejprve zahřata a protahována, aby se získala vhodná orientace molekul. Následuje stabilizace v okysličující atmosféře při teplotě 220–230 °C až 10 hod. Potom se pokračuje grafitizací v inertní atmosféře při 1000–1500 °C a dalším protahováním. Následným technologickým krokem je grafitizace v inertní atmosféře za teplot 2500–3000 °C pod napětím. Výsledkem je značná anizotropie materiálových charakteristik. [5]

PAN vlákna se dělí dle mechanických vlastností [17]:

- HS (vysokopevnostní) – disponují dobrou pevností v tahu. Většinou jsou brány jako standardní uhlíková vlákna, které se poměrně často označují HT (vysokopevnostní v tahu),
- IM – velice pevná vlákna, která mají střední modul pružnosti,
- VHM/UHM – vlákna s velmi vysokým modulem pružnosti,
- HM grafitizovaná vlákna s vysokým modulem pružnosti.



Obr. 11 uhlíková vlákna [12].

▪ Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou také zkrácená verze chemického názvu (aromatický polyamid). Vyznačují se především nízkou měrnou hmotností, pevností, otěruvzdorností a odolností vůči ohni. Tyto vlastnosti se uplatňují především v náročném prostředí, kde je důležitá bezpečnost. Navzdory všem benefitům má aramid i spoustu nevýhod, jako je náchylnost na UV záření nebo rychlá degradace a zhoršení mechanických vlastností ve vlhkém prostředí vlivem absorpce vlhkosti. Dalším negativem je obtížnost stříhání vláken. Aramidová vlákna je obtížné stříhat běžnými nůžkami a dost často se řezou vodním paprskem. Jejich největší využití je pro balistické účely a lze je nalézt také v ochranných oděvech, jako jsou neprůstřelné vesty. [3;5;16]

Aramid je běžně žluté barvy nejvíce znám pod obchodním názvem Kevlar (obr. 12), který si roku 1965 patentovala společnost DuPont. Kevlar můžeme rozdělit na základní tři druhy [5, 16]:

- kevlar – hlavní využití jako výztuž pryže,
- kevlar-29 – především nachází využití jako ochranné prvky,
- kevlar-49 – vysokovýkonné kompozity a dopravní aplikace.



Obr. 12 kevlar [13].

- Polyethylenová vlákna (UHMWPE)

Polyethylenová vlákna s vysokým modulem pevnosti se vyrábí tažením za pevného stavu vysokohustotního polyethylenu. Mají dobrou odolnost proti vlhkosti, vysokou rázovou houževnatost a pozitivní elektrické vlastnosti. Společně s hustotou $0,97 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$ jsou polyethylenová vlákna lehčí jako aramidová. Mají lepší korozní odolnost, protože vlákna lze leptat pouze silnými oxidačními činidly, jako jsou koncentrovaná kyselina dusičná nebo hydroxid sodný. Velikou nevýhodou polyethylenové výztuže je náchylnost na teplo. Vlákna snesou teplo pouze do 143°C . Hlavní použití UHMWPE vláken je v protiprořezových oděvech, protibalistických aplikacích, jako jsou neprůstřelné vesty a vysokopevnostní lana, které lze vidět na obr. 13. [3;16]



Obr. 13 vysokopevnostní lano z UHMWPE [14].

- Přírodní rostlinná vlákna [16]

Přírodní organická vlákna se získávají z pěstovaných rostlin. Jádru je tvořeno ligninem a celulózu. Jejich nejtýpčtější vlastností je odlišná délka a průměr jednotlivých vláken, ze kterých se poté tvoří rovingy. Mechanické vlastnosti u těchto vláken mají poněkud veliký rozptyl, způsobený hlavně díky odlišné délce a průměru vláken. Hlavními výhodami rostlinných vláken je levná výztuž poměrně s malou hustotou, biodegradací. Hlavní využití najdeme pro vnitřní výplně panelů a dveří.

Tab. 5 mechanické vlastnosti přírodních vláken [16].

Vlákna	Hustota [g·cm ³]	Pevnost v tahu [GPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Mezní prodloužení při přetržení [%]
Celulózová	1,5	0,675	35	6,2
Bavlna	1,5-1,6	0,287-0,597	5,5-12,8	3-10
Kopřiva	2,11	1,59	87	2,11
Bambus	1,5	0,3-0,34	16,2	23,8
Len	1,53	0,8-1,795	40-85	1,1-1,5



Obr.14 přírodní lněná vlákna.

3 PRAKTICKÁ ČÁST

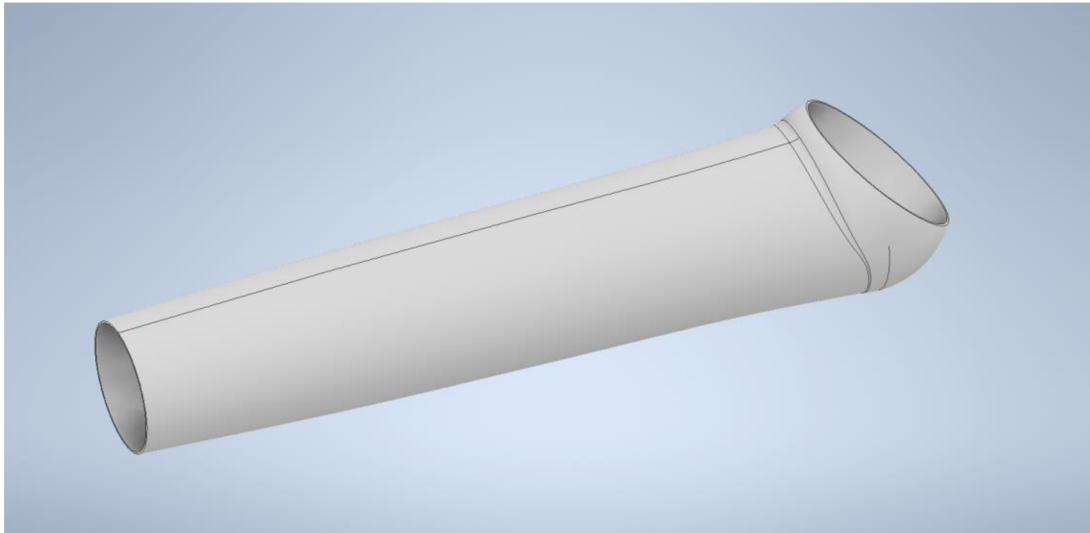
Praktická část se zaměřuje na výrobu části protetické paže pravého předloktí z kompozitních materiálů. Z nich poté vyplyne ten nejlepší a nejvhodnější pro protetickou paži a její použití. Nebude dělaná exaktní kopie, ale bude vyrobena pouze část této paže, která bude sloužit pro otestování materiálů a využití metod zpracování.

V první řadě se praktická část rozděluje na dvě cesty. První variantou je vymodelování paže v programu Inventor 2023 s přibližnými rozměry. Druhou variantou je sken zhotovené starší protetické pomůcky (obr. 15) z uhlíkových vláken a převedení sken do modelu. Varianta číslo dva je daleko přesnější a vhodnější, nicméně je také časově mnohem náročnější, než varianta číslo jedna.



Obr. 15 protéza.

První varianta, modelování paže v programu Inventor 2023 s přibližnými rozměry, nebyla časově tak náročná, ale o to více byla náročnější svým procesem. Modelování započalo prostým náčrtem elipsy, která přibližně odpovídala tvaru protézy. Následně se v dalším kroku nastavila odsazená rovina o 15 mm od předchozí základní roviny a opět se načrtla elipsa v přibližném tvaru. Tímto postupem se postupovalo přibližně dvanáctkrát, dokud nebylo dosaženo části lokte. Další byl úsek lokte, který se vymodeloval pomocí rotace na nakloněné rovině pod úhlem 25° C. Z celého tělesa se ke konci udělala skořepina o tloušťce 1 mm. Hotový model lze vidět na obr. 13.



Obr. 13 model protězy v programu Inventor 2023.

3.1 Skenování předchozí protězy a zpracování

Druhá metoda je poněkud složitější, tudíž byla rozdělena na několik menších částí. Jako první byla protěza naskenována, sken se poté upravil v programu GOM 2018. Následně byl nahrán do programu Inventor 2023, kde z něj byl získán model.

Prvním krokem výroby je skenování starší protetické paže, která již není používána z rozměrových důvodů. Paže je zhotovená z epoxidové pryskyřice a vyztužená uhlíkovými vlákny (obr. 16). Povrch je velmi lesklý, což je důvodem k použití zmatňovacího spreje k lepšímu snímání povrchu.



Obr. 16 kompozitní paže před skenováním.

3D skenování (obr.17) je převedení fyzického objektu do počítačových dat. Skener funguje na principu triangulace, kdy je základem aktivní zdroj záření, minimálně jeden snímač a povrch předmětu, které dohromady tvoří triangulační trojúhelník. Vzdálenost mezi světelným zdrojem a snímačem se nazývá triangulační báze. Úhel, který svírá maticová kamera a světelný zdroj je neměnný. Naproti tomu úhel, který svírá báze a paprsek dopadající na

snímač je proměnný dle místa odrazu paprsku od předmětu. Touto metodou se dají informace použít na dopočítání vzdálenosti od předmětu.

Před samotným snímáním je nutností olepit objekt reflexními body, co nejvíc pravidelně a rovnoměrně po celém povrchu tělesa. V první řadě se nastaví protéza do vertikální polohy a nasnímají se počáteční body. Skener se pak přesune na další místo, které bude snímat. Nutností je mít v optickém poli několik již snímaných bodů a několik bodů nových. Obdobně probíhá každé pootočení skeneru. Tímto způsobem se nasnímá celé těleso a obraz se postupně spojuje. V průběhu je důležité obnovovat vrstvu spreje pro optimální sken.

Celý proces trval přibližně dvě hodiny, včetně manuální přípravy. Přístroj je velmi náchylný na vibrace, které byly způsobeny jízdou výtahu a zapříčinily časovou prodlevu skenování. Díky vibračním skenování trvalo přibližně třikrát déle než normálně.

Výstupem jsou data tvořena trojúhelníkovou sítí. Jedná se o nejjednodušší způsob vykreslení povrchu. Nejčastější využití najdeme pro 3D tisk.



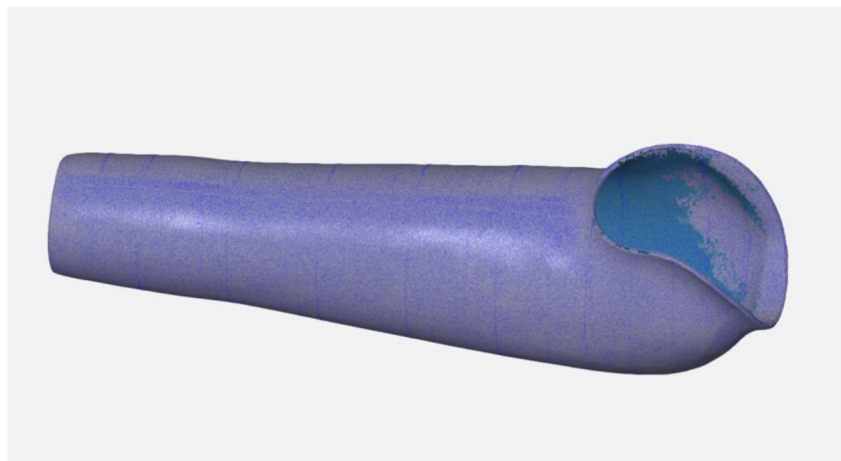
Obr. 17 hlavice skeneru skenující ruku.

- Zpracování v programu GOM Inspect

Celý sken (obr. 18) se zpracuje v programu GOM Inspect 2018, kde se provede několik nezbytných úprav předtím, než se sken nahraje do programu Inventor 2023 a bude se z něj dělat model.

- Zalepení děr po reflexních bodech – reflexní body zanechaly v samotném skenu, díry, které je nutné zalepit. Zalepení je docíleno funkcí Close hole automatically, kde se nastaví parametry delete neighbourhood na 5 a maximal hole size 10 mm. Pro lepší výsledek je lepší použít funkci Close hole inactively, kde se nastaví parametr delete neighbourhood na 4 a maximal hole size 8 mm.
- Vyhlazení sítě – povrch starší protézy byl částečně poškozený a zanechal na povrchu hrbatý reliéf. Funkcí Smooth mash je zajištěn krásný povrch celé součásti. Zde byl parametr radius nastaven na velmi velký, detailní ostrota na velmi nízká a povrchová tolerance na 1 mm.

- Redukce počtu trojúhelníků – po opravení veškerých děr byla zredukována hustota polygonální sítě. Toho bylo docíleno příkazem thin mash, který zredukuje síť především v rovinných oblastech
- Ustavení do souřadného systému – k ustavení do souřadného systému je zapotřebí si zadefinovat geometrie. Definovaná geometrie je v tomto případě válec, bod a rovina pomocí kterých se nastaví souřadnicový systém. Použití funkce construct, kde se zvolí create datum system. Zde se nastaví celý souřadnicový systém pomocí jednotlivých geometrických entit. Nový souřadnicový systém se srovná s globálním pomocí funkce align, kde se vybere main align by coordinate system a zvolí aktuální souřadnicový systém.

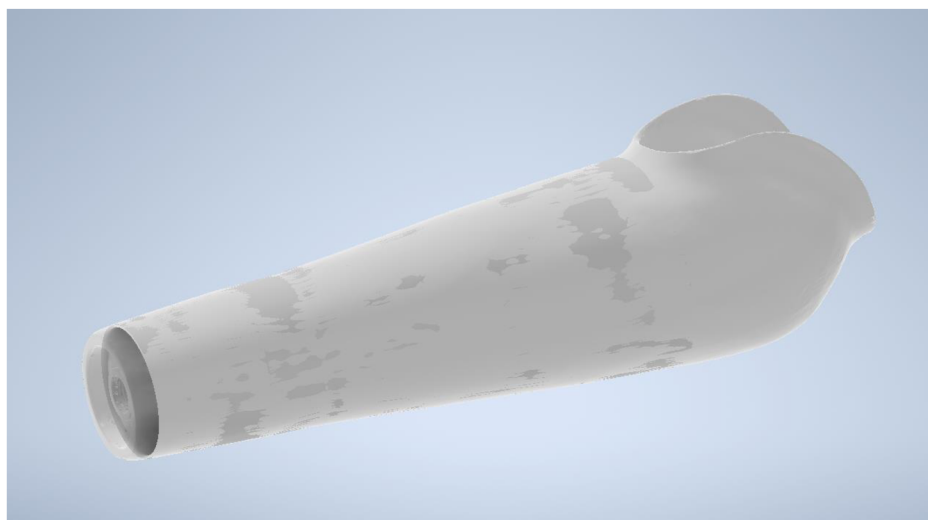


Obr. 18 sken protézy v programu GOM Inspect 2018.

3.2 Převod skenu do modelu v programu Inventor 2023

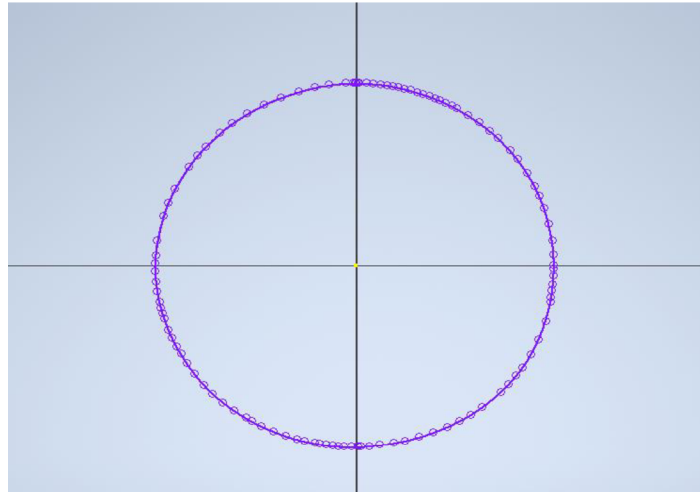
Převod skenu do modelu byla nejdélejší část z celé praktické části, z důvodu výskytu hned několika problémů s modelováním. V Inventoru nebyla modelována část pouzdra na loket, protože je velmi složitá a nese s sebou několik problémů jak pro 3D tisk, tak pro samotnou laminaci, která by byla značně náročnější.

Prvním krokem bylo nahrát z třetí strany sken do Inventoru, kde je pouze jako 3D objekt nikoli jako model. Poté co protéza (obr.19) byla nahrána, celá součást se obkreslí a následně vymodeluje.



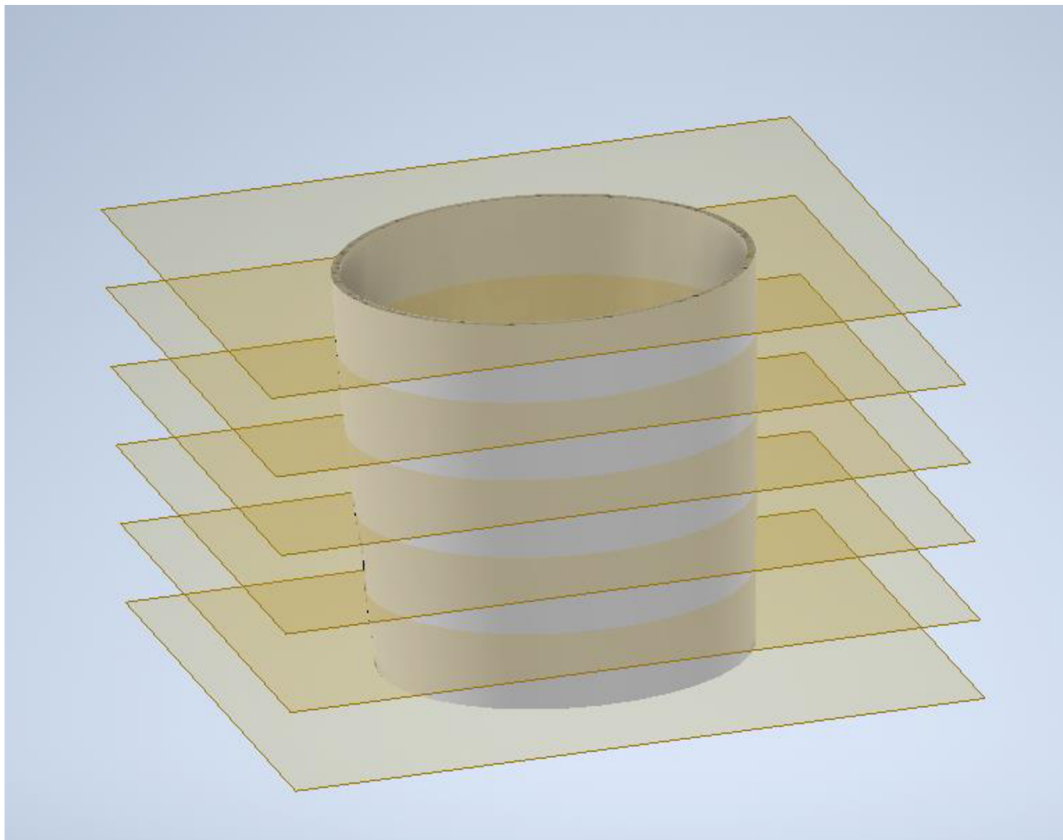
Obr. 19 sken protézy v programu Inventor 2023.

Modelování se odráží od základního náčrtu na užším konci protézy, kde se nejprve definuje počáteční rovina. V rovině se pomocí funkce spline načrtne první náčrt v tvaru průřezu protézy, který připomíná kružnici (obr.20). Vzhledem k tomu, že každá část protézy je jiného nepravidelného kruhovitého tvaru a velikosti, nelze říct, že se jedná o kružnice. Funkce spline umožňuje vytvořit křivku na základě zadaných řídicích vrcholů. Určením prvního bodu se začne kreslit funkcí spline a zadáním ostatních vrcholů se ovlivňují spline křivky.



Obr. 20 náčrt pomocí funkce spline.

Obdobným postupem se pracuje dále, kdy je protéza zobrazena v řezu (obr.21) a zde se obkreslí funkcí spline. Model bude velmi přesný, pokud bude síť dostatečně hustá. Nevýhodou je časová náročnost této metody. Celá síť rovin byla zvolena po 10 mm, což odpovídá poměrně přesnému modelu s nepatrnou odchylkou.

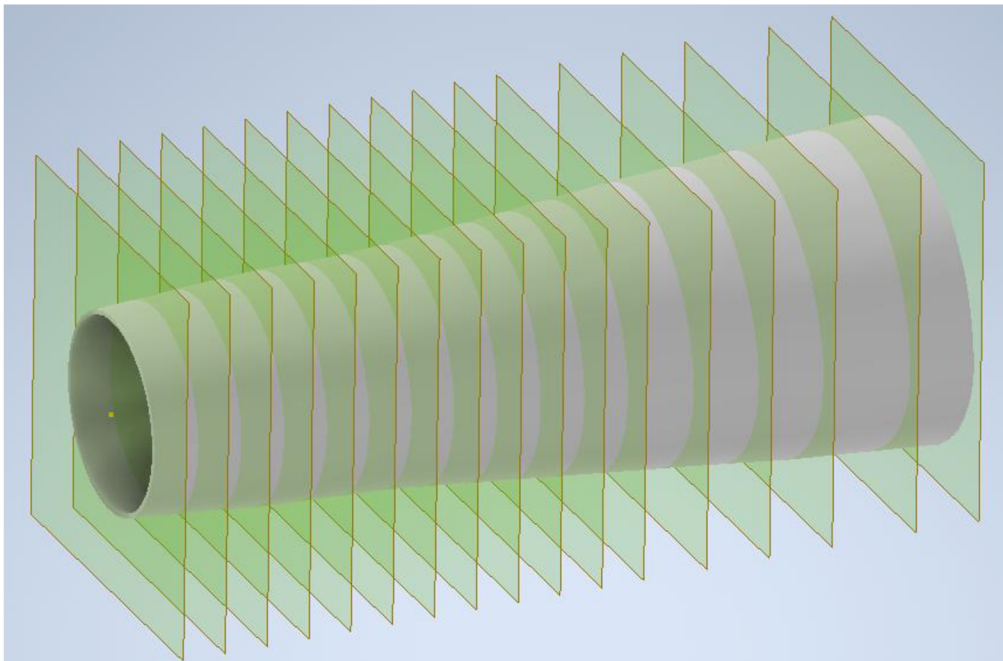


Obr. 21 protéza zobrazená v řezu.

Po dokončení všech náčrtů se objevil první problém. Původní plán byl použit funkci šablonování. Je to funkce, která slouží k vytvoření přechodového tvaru mezi dvěma a více náčrtů. Problém nastal ve chvíli, kdy se nedala tato funkce provést. Problém byl způsoben nesprávně obkreslenými křivkami, které byly kresleny na třikrát a nenavazovaly přímo na sebe. Celý problém byl vyřešen překreslením daných náčrtů.

Druhý problém souvisel také s funkcí šablonování. V první fázi se protéza vyšablonovala trasami, které navrhl sám Inventor. Hlavní potíž byla v tom, že se nedalo použít funkci skořepina, protože vlastní trasy Inventoru vytvořily ostré hrany. To bylo vyřešeno nastavením vlastních tras šablonování mezi každým konkrétním náčrtem tak, aby dané trasy byly co nejrovnější a nevytvářeli žádné ostré hrany. Celá část předloktí (obr.22) byla vymodelována po 18 hodinách, včetně vyřešení všech problémů.

Jako daleko lepší metoda se jeví modelování v programu Catie, který je daleko přívětivější pro modelování podobných protéz. Tato metoda nebyla zvolena z důvodu absolutní neznalosti daného programu a vzhledem k množství času nepřipadalo v úvahu učení se programu Catie, přestože je pro modelování protézy jednodušší.



Obr. 22 vymodelovaná část předloktí.

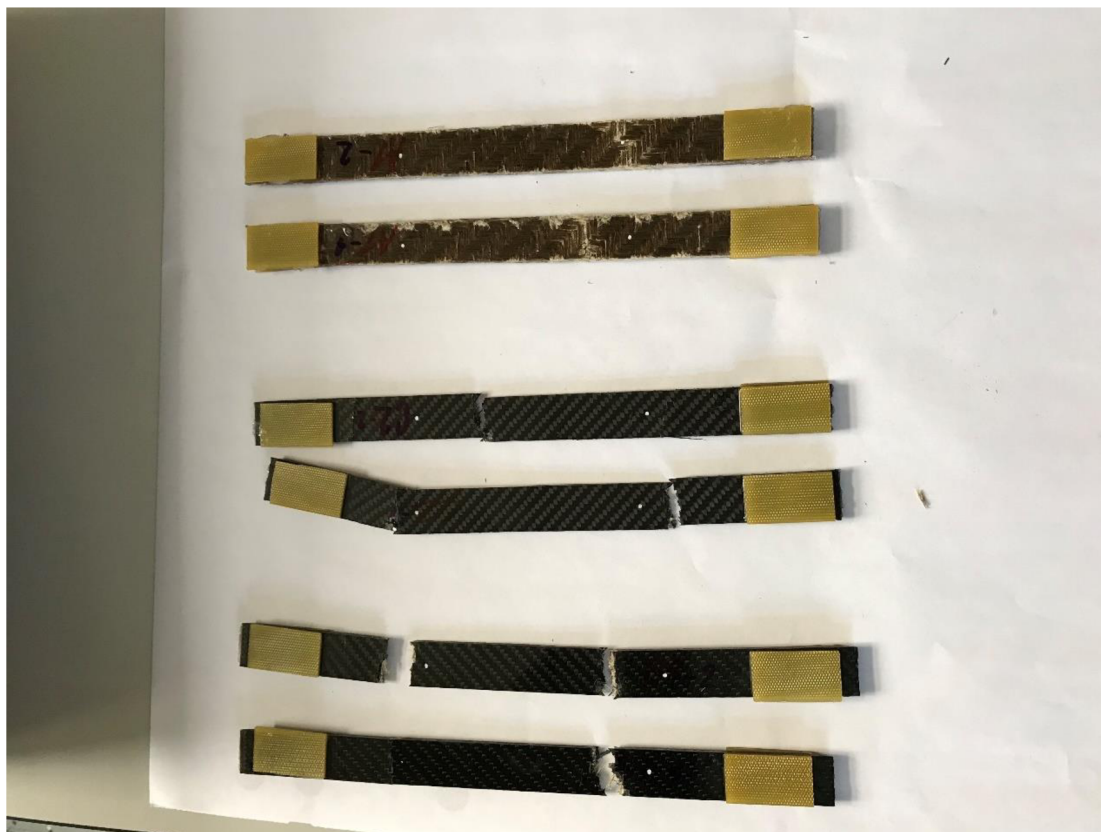
3.3 Výběr materiálu

Výběr materiálu patří k jednomu z nejdůležitějších rozhodnutí výroby kompozitních součástí. Vybírat se dá z celé řady materiálů, matric a jejich kombinací. Základními faktory, ovlivňující výběr jsou cena a vlastnosti výrobku.

Ideální konstrukční materiál má vysokou houževnatost, vysokou pevnost a tuhost a nízkou hmotnost. Uhlíková vlákna s polymerními matricemi splňují tyto vlastnosti lépe než jakýkoliv jiný materiál. Navzdory všem pozitivním vlastnostem mají uhlíková vlákna i řadu negativ. Mezi hlavní patří křehkost a nízká odolnost proti nárazu. Po porovnání všech výhod a nevýhod je uhlík jasnou volbou materiálu pro testovací vzorek protézy.

Druhým materiálem je lněná výztuž. Typickým znakem lněných vláken je různá tloušťka a délka. Z tohoto důvodu mají velký rozptyl jejich základních vlastností. K předním výhodám lněných vláken patří jejich útlum vibrací. Dalším pozitivem je jejich nízká cena.

K předním vlastnostem paže musí patřit především nízká hmotnost, vysoká pevnost, útlum vibrací a pozitivní reakce k lidskému organismu. Z tohoto důvodu byla vybrána kombinace uhlíkových a lněných vláken. Uhlíková vlákna společně s epoxidem disponují vysokou pevností a tuhostí, čímž tvoří ideální kombinaci. Oproti tomu lněná vlákna, zde slouží jako útlum vibrací. Dohromady je kombinace výborným hybridním materiálem (obr.23) pro protézu.

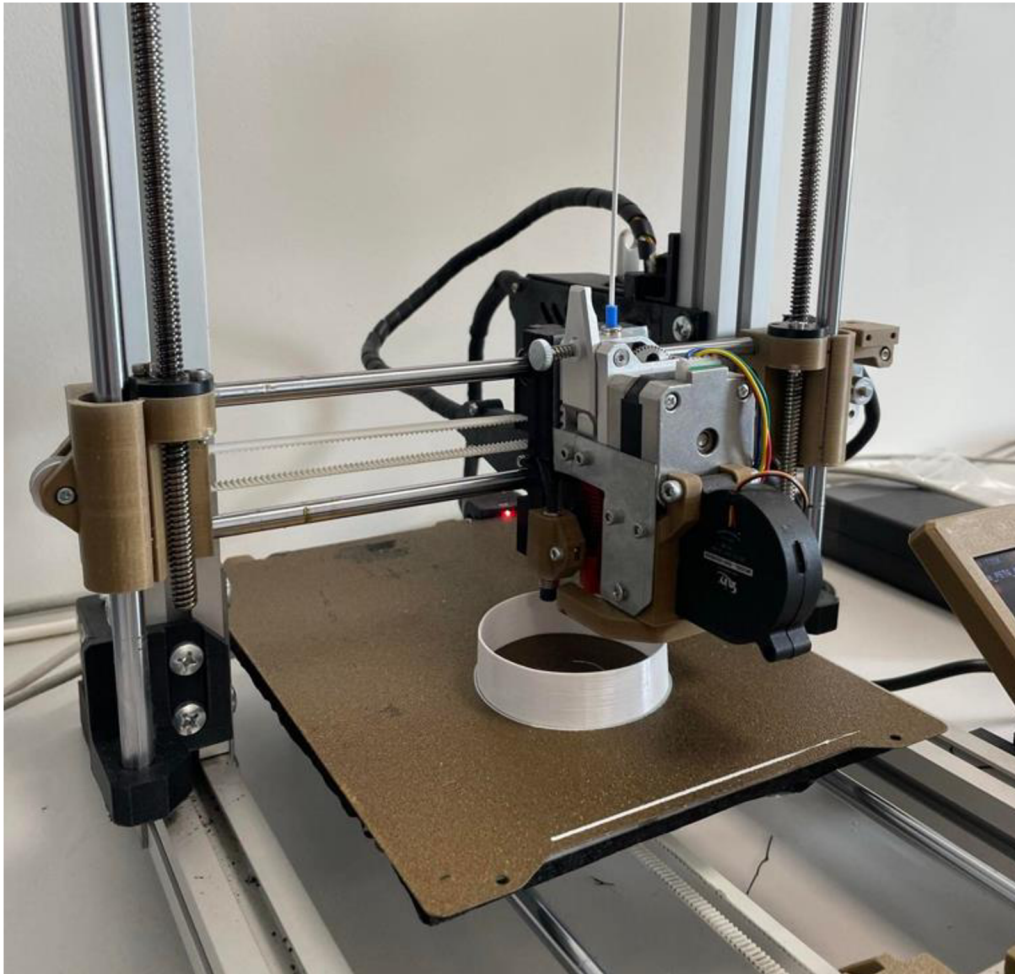


Obr. 23 testovací vzorky hybridního materiálu karbon-len

3.4 3D tisk a testování

Na 3D tisku je zajištěna výroba formy, která bude použita pro následnou laminaci vláken. Pro 3D tisk je nezbytnou součástí mít zhotovený model, ze kterého se následně vytiskne daný tvar.

Tisk se realizuje na tiskárnách od firmy Průša (obr.24), z čehož jedna tiskárna byla speciálně upravená pro individuální potřeby, jako byly například rozměry. Druhá tiskárna byla poněkud staršího typu, nicméně byla podstatně větší a rychlejší. Materiálem na tisk je PET plast, jež je používán poměrně často pro tisk, díky jeho nízké ceně a vlastnostem.



Obr. 24 tiskárna od firmy Průša

Vytištěná část slouží jako forma (obr.18), na kterou budou laminována vlákna. Vytisknutá forma je bílé barvy o tloušťce jeden milimetr. Výška je 19,5 cm, šířka nejužší části je 4,5 cm a největší části 7,5 cm. Plast je poměrně pevný a přitom pružný, díky čemuž je ideální volbou.

Celý tisk trval cca 3 hodiny jeden kus. Celkově byly vyrobeny kusy dva, přičemž tisk probíhal současně. Povrch výtisků je mírně hrbolatý, což je způsobené nepřesným modelováním v programu Inventor 2023. Nepřesnost je zapříčiněna lidskou chybou nikoli programem. Vymodelovat přesně takový tvar paže vyžaduje značnou dávku praxe s programem.

- Tahová zkouška materiálu

Před samotným použitím bude materiál karbon-len zkoušce tahem. Zkouška bude prováděna na stroji Zwick Z100 (obr.25). Stroj Zwick Z100 je klasický zkušební stroj s centrálním kuličkovým šroubem. Tento stroj nabízí celé řady zkoušek, jako je například tahová zkouška, zkouška mechanických lomů či tlakové zkoušky. Výstupem zkoušky jsou data napětí vůči relativnímu prodloužení, modul pružnosti, mez pevnosti a smluvní mez kluzu. Veškerá data jsou znázorněná v tabulce č.6 a na obrázku 26. Z grafu vyplývá, že kombinace karbon-len je vysoce pevný kompozitní materiál, který bohatě postačí pro protetické účely.

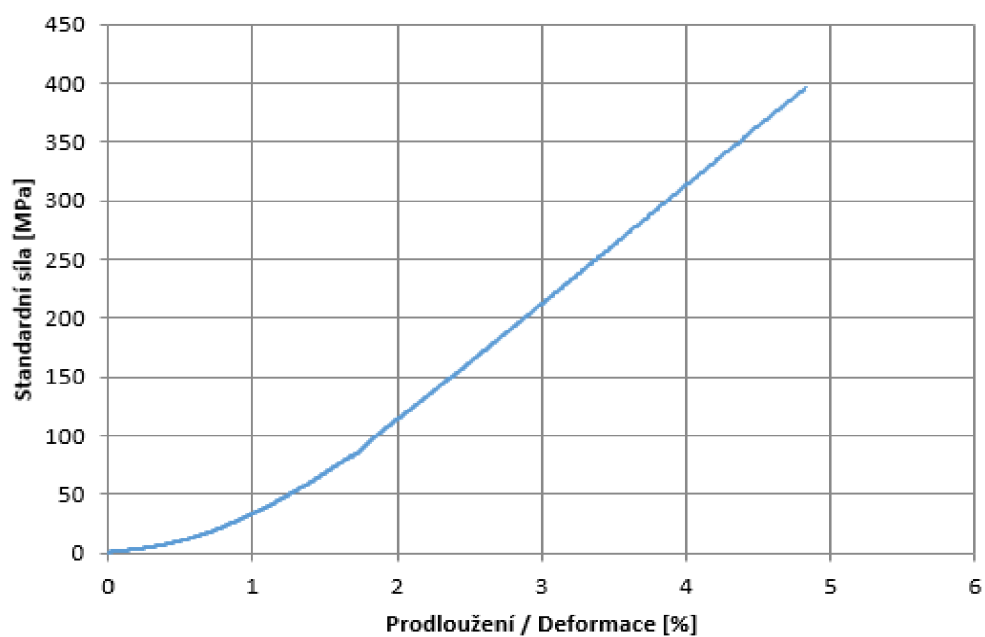


Obr. 25 stroj Zwick Z100 [15].

Tab. 6 data tahové zkoušky.

	E_t	R_m	R_{p2}
x	9,477072	368,4401	19,23455
s	0,923127	32,94738	6,576182
n [%]	9,740638	8,942398	34,18943

Zkouška 6.2



Obr. 26 graf závislosti síly na prodloužení.

3.5 Laminace testovacího vzorku

Byla zvolena technologie mokrého kladení za pomoci vakua. Princip technologie spočívá v kladení tkanin nebo rohoží, které jsou prosyceny pryskyřicí. Velkou výhodou je jednoduchost technologie, která nepotřebuje drahé technické vybavení. Nevýhodou je nevyhnutelná porozita pryskyřice.

Jako vrstvy vláken pro laminaci, byla zvolena uhlíková a lněná vlákna, která budou pokládána na formu vytisknutou na 3D tiskárně. Kvalita vyrobeného dílu je ovlivněna kvalitou povrchu formy.

V první řadě v celém procesu bylo správně naseparovat povrch paže voskem (Obr.26) po celém povrchu, a to v několika vrstvách.



Obr. 26 vosk na nasycení povrchu.

Důležité je mezi natřenými vrstvami dělat pauzy 2-3 minuty. Celý proces se opakuje přibližně šestkrát, dokud není forma patřičně naseparovaná. Separování je důležité pro následné oddělení vytvrzeného dílu od formy.

Druhým krokem, bylo nastříhání všech potřebných kusů výztuže. Jako první se nastříhala lněná vlákna (obr.27). Vlákna byla stříhána obyčejnými nůžkami ve tvaru obdélníku. Celkem byly nastříhány dvě vrstvy lněných vláken. Velmi důležité bylo ke konci oddělat vlákna z okrajů, neboť zde vlákna nebyla důkladně spojena s ostatními. Následovalo stříhání uhlíkových vláken, která se stříhají hůř než vlákna lněná, a proto trvalo přibližně čtyřikrát více času je nastříhat. Celkově byly nastříhány čtyři vrstvy uhlíkových vláken (obr.28).



Obr. 27 lněná vlákna.



Obr. 28 role uhlíkových vláken.

Před samotnou laminací je nutností namíchat pryskyřici s tužidlem. Jako pryskyřice byla zvolena laminační pryskyřice LG 700 (obr.29). Jedná se o epoxid, která disponuje především nízkou viskozitou a umožňuje tak tvorbu laminátů velmi nízké hmotnosti. Její použití je vhodné pro ruční laminaci a pro RTM. Zároveň je systém použitelný pro obvyklé typy výztuží jako jsou skelná, uhlíková a aramidová vlákna. Dalším velikým plusem je dobrá teplotní odolnost. Doba zpracovatelnosti je 20-180 minut dle typu tužidla. Tužidlo bylo zvoleno HG 700 (obr.30), které je základní variantou k epoxidové pryskyřici LG 700. Je velmi tekuté a vhodné pro infuzi velice tenkých materiálových kompozicí. Gel-time 100 g tužidla při teplotě 23 °C je 90 minut. Gel-time je čas, který je zapotřebí, aby se pryskyřice vytvrdila z tekutého skupenství do formy gelu. Pryskyřice byla namíchána s tužidlem v poměru 100:30 a její čas zpracování byl přibližně 35 minut.



Obr. 29 laminační pryskyřice LG 700.

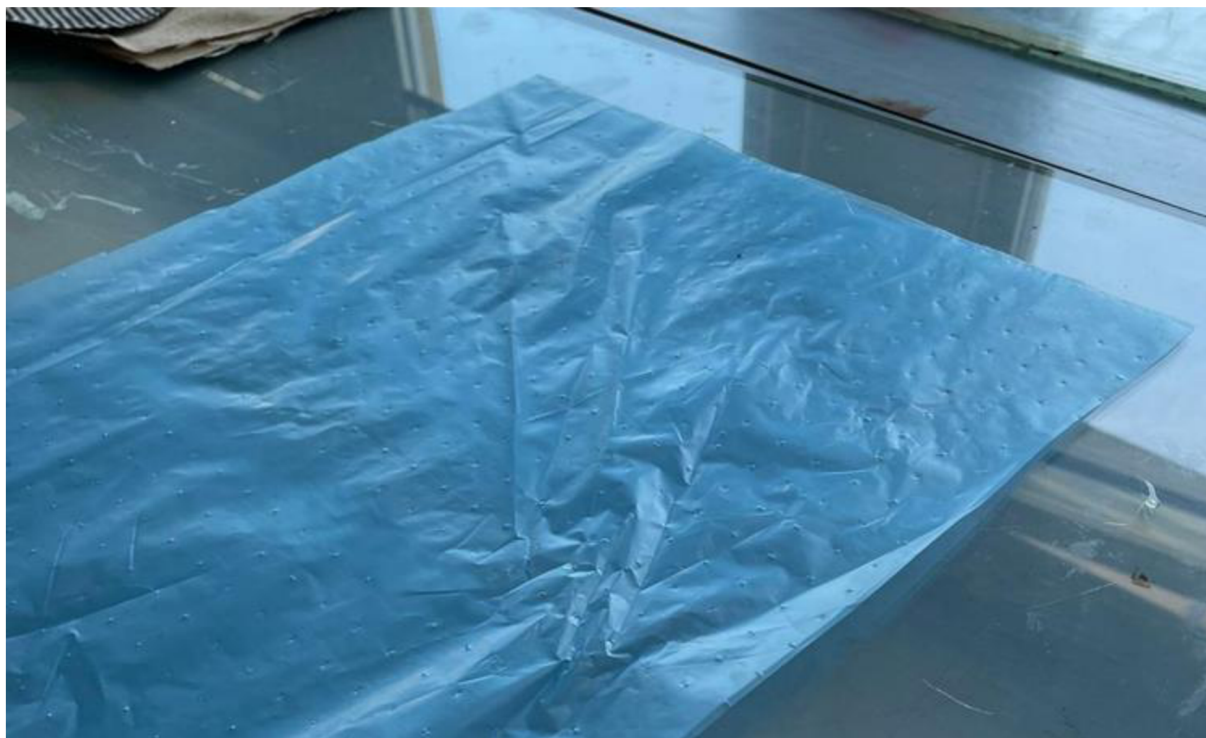


Obr. 30 tužidlo HG 700.

Dalším krokem bylo důkladné prosycení vláken. Prosycení bylo dosaženo roztráním směsi pryskyřice s tužidlem za pomoci štětce. Dobře prosycená vlákna změni barvu a jsou připravena k pokládání na formu. Jako první byly pokládány dvě vrstvy uhlíkových vláken. Prosycená vrstva byla nanášena opatrně na povrch formy. Je nutné, aby povrch byl kompletně pokryt vlákny a nebylo zde žádné prázdné místo. Ke konci se vlákna překryjí přes sebe, kde následně vznikne pomyslný šev. Další vrstva byla opět z uhlíkových vláken. Postup probíhal

stejně s jediným rozdílem. Druhá vrstva se položila na povrch ruky, aby se výsledný šev nepřekrýval se švem předchozím. Třetí a čtvrtá vrstva se skládala z lněných vláken. Lněná vlákna oproti uhlíkovým vláknům vstřebávají pryskyřici daleko více, z tohoto důvodu se jí musí použít mnohem více. Prosycení na lněných vláknech jde vidět podstatně lépe než na vláknech uhlíkových. Na obě vrstvy byla spotřebována zhruba polovina celé pryskyřice. Poslední dvě vrstvy výztuže jsou opět vlákna uhlíková, kde se postupuje stejnou metodou.

Před vakuováním je laminát obalen ještě tenkou vrstvou strhávací tkaniny, která strhne malé množství pryskyřice a zajistí dobrý povrch. Na strhávací tkaninu byla aplikována separační fólie (obr. 31), která obaluje ruku z venku i zevnitř. Její funkce je zabránění přilepení dílu na další vrstvy. Separální fólie je ještě obalena odsávací tkaninou (obr.32). Tkanina zprostředkovává vakuum přes celý díl.



Obr. 31 Separální fólie



Obr. 32 Vrstva odsávací tkanina proti poškození při vakuování

Poslední fáze praktické části je vakuování. Testovací vzorek je nutné vakuovat, kvůli správnému přilnutí jednotlivých vrstev vláken. Vakuování probíhá pomocí vývěvy (obr.33), která je běžně dostupná na pracovišti s kompozitními materiály. Před samotným procesem je nutné protězu vhodně zabalit do vakuovací fólie, které bude dostatečně pevná. Pomocí kaučukové pásky se z fólie vyrobí pytel (obr. 34), kde bude probíhat vakuování. Časová náročnost výroby je znázorněna v tabulce č.8

Tab. 8 Časová náročnost výroby.

	skenování	úprava (GOM)	modelování	3D tisk	laminace	celkem
počet hodin (hod)	2,5	1	18	3	2	26,5

Vytvrzení probíhalo za pokojové teploty. Celá ruka (obr. 35) je ve finále velmi lehká a zároveň velice pevná. Po strhnutí odsávací tkaniny, separační vrstvy a strhávací tkaniny má povrch vrásčitý reliéf. Vrásčky jsou způsobené tlakem vakua. Vrásčitý povrch se dá později obrousit a eliminovat.



Obr. 33 Vývěva



Obr. 34 Vakuovací pytel



Obr. 35 Kompozitní paže

ZÁVĚR

Protetické pomůcky se už v dnešní době vyrábí téměř pouze z kompozitních materiálů a poskytují život skoro bez omezení a dovolí člověku posouvat své limity.

Tato bakalářská práce pojednává o technologii výroby a materiálu kompozitní protetické pomůcky pravého předloktí konkrétního uživatele, který již od narození trpí handicapem. Hlavní návrh protézy byl zaměřen na uzpůsobení daným podmínkám sportu a běžného života, podle kterých byl následně volen materiál. Finální volbou byl hybridní materiál karbon-len, který kombinuje dvě nejdůležitější vlastnosti.

Velikou inspirací byla stará protéza, kterou uživatel už nemohl dát na ruku z rozměrových důvodů. Se starou protézou bylo postupováno metodou reversního inženýrství, kde byla protéza naskenována skenerem a následně předělaná do modelu. Z modelu byla pomocí 3D tisku zhotovena forma do fyzické podoby. Na ni byly posléze nalaminována uhlíková a lněná vlákna. Výstupem byl testovací vzorek předloktí o velmi nízké hmotnosti a vysoké pevnosti.

Metoda laminace byla zvolena technologií mokré kladení, která je tradiční a dlouhodobá metoda výroby kompozitních protéz, nicméně vyžaduje velmi velkou zručnost. Použita byla vnitřní forma, na kterou se z venku pokládala vlákna, což způsobilo vrásčitost reliéfu. Pro hladký povrch je optimální použití vnější formy, která kvůli složitosti a času nebyla použita.

Do budoucna je možné zvolit jinou matici a paži vymodelovat skenem z odlitku lokte v sádře, abychom dosáhli ještě větší přesnosti. Dalším řešením do budoucna je program Catie, který disponuje lepším pracovním prostředím pro modelování paže a je kompatibilní s programem GOM Inspect. V neposlední řadě je velkým faktorem kvalifikovanost obsluhy, která je důležitá pro kvalitu vyrobené protézy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PETERS, S.T., ed. *Handbook of composites*. Second edition. Mountain View: Springer Science & Business Media, 1998. ISBN 978-1-4615-6389-1.
2. MALLICK, Pankaj, ed. *Composites Engineering Handbook Materials Engineering*. 1. New York: CRC Press, 1997. ISBN 9780824793043.
3. CAMPBELL, F. C. *Manufacturing processes for advanced composites*. New York: Elsevier, 2004. ISBN 18-561-7415-8.
4. SACHENKOV, Oscar, ed. *Biomechanics of Contemporary Implants and Prosthesis: Modeling, Experiments, and Clinical Application*. 1. Basel: MDPI – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. ISBN 978-3-0365-5961-2.
5. *Composite materials handbook*. [USA]: SAE International on behalf of CMH-17, a division of Wichita State University, 2012. ISBN 978-0-7680-7811-4.
6. Trias. In: <https://www.ottobock.com/en-ca/home> [online]. Duderstadt: ottobock [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.ottobock.com/_next/image?url=https%3A%2F%2Fspa-prod-commerce.cep.ottobock.com%2Focc%2Fv2%2Fcep-medias%2F2164197_930Wx930H%2F930Wx930H%2FCEP_MEDIA_CATALOG%2FOnline&w=1900&q=75
7. A Prosthetic Arm That Gives Amputees the Sense of Touch. In: *Bloomberg* [online]. New York: Belfiore, 2015 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://assets.bwbx.io/images/users/iqjWHBFdfxIU/i4k9Q6wSXfl4/v1/-1x-1.jpg>
8. Polyesterová pryskyřice HAVELpol 5 - pevnostní (orto). In: *Havel-composites* [online]. Páraslavice: Havel Composites, 2018 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.havel-composites.com/uploads/images/products/1975/756x570/tp2nij6s6r_...bra-jpg
9. TEKUTÉ EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE. In: *5m* [online]. Kunovice: 5m, 2017 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/wp-content/uploads/2017/01/pryskyrice-768x679.jpg>
10. ALKYL PHENOL RESINS: HEAT REACTIVE. In: *Polyolsandpolymers* [online]. GUJARAT STATE: Polyols&Polymers, 2020 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.polyolsandpolymers.net/wp-content/themes/polyolsandpolymers/images/alkyl-phenol-resins-heat-reactive-phenolic-resin-resol-adhesive-resins.jpg>
11. Glass-fibers. In: *Azom* [online]. Manchester: Azo materials, 2021 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://d12oja0ew7x0i8.cloudfront.net/image-handler/ts/20211116065927/ri/750/src/images/Article_Images/ImageForArticle_20970_16370639661632450.jpg
12. Carbon-fiber. In: *JWEI* [online]. NingBo: Jingwei Systemtechnik, 2020 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.jweicut.com/wp-content/uploads/2020/08/tanxianwei.jpg>
13. Kevlar. In: *Azom* [online]. Manchester: Azo materials, 2022 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://d12oja0ew7x0i8.cloudfront.net/image-handler/ts/20221004080445/ri/750/src/images/Article_Images/ImageForArticle_22095_16648850838835859.jpg
14. UHMWPE. In: *REHOBOTH* [online]. Yangzhou: rehoboth transform heavy to light, 2022 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://bpowergroup.com/benefits-of-uhmwpe-rope/>

15. AllroundLine floor-standing testing machine. In: *ZwickRoell* [online]. Ulm: ZwickRoell [cit. 2023-05-22]. Dostupné z:
https://www.zwickroell.com/zrmedia/_processed_/2/6/csm_CTA271607_TVM1629285_661289496b.png
 16. ZOUHAR, Jan. *Kompozitní materiály*. 1. Brno, 2021.
 17. VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT v Brně, 2008.
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
R_{p2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
\bar{x}	Střední hodnota	
s	Výběrová směrodatná odchylka	
n	Relativní četnost	%
σ_{pt}	Pevnost v tahu	[MPa]
E_t	Modul pružnosti	[MPa]
ε_f	Mezní přetržení při prodloužení	[%]
ρ	Hustota	$[g \cdot cm^{-3}]$
$\varepsilon_{m,krit}$	Mezní tažnost	[%]

Zkratky

Označení	Legenda
ksi	Kilopounds per square inch
msi	Milionpounds per square inch
HS	High strengt
IM	Intermediete modulus
HM	High modulus
UHM	Ultra high modulus
UHMWPE	Ultra high molecular weight polyethylen
SiO_2	Oxid křemičitý
S-glass	High strentg glass
E-glass	Electrical glass
RTM	Resin Transfer Moulding
PAN	Polyakrylonitrilová vlákna

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Technický list laminační pryskyřice LG 700



TECHNICKÝ LIST

Strana 1/3

Datum vydání: 07.01.2004

Datum revize: 16.10.2019

Verze: 4.0

Laminační pryskyřice (Laminační systém)

LG 700

pro RTM

Tužidla HG 700 F, HG 700 M, HG 700, HG 737, HG 700 S

1. Popis

Laminační systém LG 700 je epoxidový systém nové generace, na bázi silně modifikované epoxidové pryskyřice a několika tvrdidel, kterými lze nastavit rozdílnou zpracovatelnost a podmínky vytvrzení.

Laminační pryskyřice LG 700 je velmi tekutá pryskyřice se zvýšenou vazností a reaktivitou, vyznačující se mimořádnou flexibilitou při zachování velmi vysoké teplotní odolnosti. Pryskyřice obsahuje modifikační činidla, maximálně zlepšující průnik laminační směsi do tkaniny.

Tužidlo HG 700 F	je velmi rychlé tužidlo s několika akcelerátory, umožňující velmi krátký temperační cyklus. Je určeno zejména pro sériovou výrobu menších dílů. Gel-time (100g) při 23°C je 20 minut.
Tužidlo HG 700 M	je rychlé tužidlo s akcelerátorem, umožňující krátký temperační cyklus. Je vhodné pro výrobu menších a středně velkých dílů. Gel-time (100g) při 23°C je 50 minut.
Tužidlo HG 700	je základní varianta tužidla pro epoxid LG 700. Je velmi tekuté a proto vhodné pro infuzi i těch nejtenších materiálových skladeb. Gel-time (100g) při 23°C je 90 minut.
Tužidlo HG 737	je velmi pomalé tužidlo pro injektáž velkých dílů nebo velmi silných materiálových skladeb. Ani při síle laminátu nad 1 cm nedochází k zahofení směsi. Gel-time (100g) při 23°C je cca 3 hodiny.
Tužidlo HG 700 S	je velmi pomalé tužidlo. Gel-time (100g) při 23°C je cca 4-6 hodin.

2. Použití

Laminační systém 700 se používá zejména pro RTM, ale je možné ho použít i pro ruční laminaci za pokojové i zvýšené teploty. Je vhodný k přípravě komposit s vyšší tepelnou odolností a výbornými mechanickými vlastnostmi. Je předurčen k výrobě i náročných kompozitních dílců. Směsná viskozita systému je 300 – 350 mPa/s dle teploty a použitého tvrdidla.

Systém je použitelný pro všechny běžně používané výztuže, jako jsou například skleněná, uhlíková nebo aramidová vlákna, sendvičové materiály atd.

Systém je kompatibilní s většinou běžných i polyesterových gelcoatů. Přesto doporučujeme jednotlivé kombinace nejprve předem vyzkoušet.

2.1 Pracovní postup

Se systémem doporučujeme pracovat v rozmezí teplot 18 až 30°C běžnými zpracovatelskými postupy pro výrobu kompozitů.

Tento systém byl navržen tak, aby dostatečně vytvrzoval i při pokojové teplotě od 18 - 30°C, proto může být zpracováván i při pokojové teplotě a používán bez následného tepelného vytvrzení. Doba zpracovatelnosti je 20 – 180 minut při pokojové teplotě (podle typu tužidla).

Při vytvrzení za tepla lze dosáhnout teplotní odolnosti až 120°C, viz. tabulka teplotních odolností (str.2).



TECHNICKÝ LIST

Strana 2/3

Datum vydání: 07.01.2004 Datum revize: 16.10.2019

Verze: 4.0

Laminační pryskyřice LG 700 pro RTM + Tužidla HG 700 F, HG 700 M, HG 700, HG 737, HG 700 S

Gel time: (nános do vrstvy 1 mm při různých teplotách)

LG 700	HG 700 F	HG 700 M	HG 700	HG 737	HG 700 S
při 25°C	1 – 2 hod.	2 – 3 hod.	3 – 5 hod.	8 – 12 hod.	12 – 14 hod.
při 50°C	25 min.	50 min.	1,5 hod.	2 – 3 hod.	4 - 6 hod.

Teplotní odolnost (Tg):

LG 700	HG 700 F	HG 700 M	HG 700	HG 737	HG 700 S
při 23°C (2-7 dní)	55°C	60°C	60°C	55°C	45°C
při 50°C (3 hodiny)	65°C	70°C	70°C	65°C	55°C
při 60°C (> 3 hodiny)	75°C	80°C	80°C	75°C	60°C
při 90°C (> 2 hodiny)	95°C	100°C	100°C	95°C	85°C
při 120°C (2 hodiny)	105°C	110°C	110°C	105°C	95°C

Poměr míchání pryskyřice + tužidlo:

Složky váhové	100 : 30
Složky objemové	100 : 38

2.2 Technické parametry

Vlastnosti:

		LG 700
Hustota	g/cm ³ (25°C)	1,18 - 1,23
Viskozita	mPa.s (25°C)	500 – 700
Ekvivalent epoxidu	mol/1kg	156 – 165
Index epoxidu	-	0,60 - 0,64
Barva	Gardner	max 3

		HG 700 F	HG 700 M	HG 700	HG 737	HG 700 S
Hustota	g/cm ³ (25°C)	0,98	0,96	0,94	0,98	0,96
Viskozita	mPa.s (25°C)	30 - 40	35 - 50	15 - 20	10 - 15	10-15
Vodíkový ekvivalent	-	48	48	48	48	48
Barva	Gardner	max 3*	max 3*	max 3*	max 3*	max 3*
Směsná viskozita	mPa.s (25°C)	320 - 328	450 - 457	245 - 249	277 - 285	277-285

* Vztahuje se k nebarvenému tužidlu.

Podrobnosti pro zpracování:

	LG 700	HG 700 F	HG 700 M	HG 700	HG 737	HG 700 S
Průměrná hodnota epoxidu	0,62	-	-	-	-	-
Průměrný ekvivalent aminu	-	48	48	48	48	48
Skladování	24 (epoxid), 12 měsíců (tužidla) v uzavřeném obalu					



TECHNICKÝ LIST

Strana 3/3

Datum vydání: 07.01.2004

Datum revize: 16.10.2019

Verze: 4.0

Laminační pryskyřice LG 700 pro RTM + Tužidla HG 700 F, HG 700 M, HG 700, HG 737, HG 700 S

Orientační mechanické parametry vytvrzené nevytuzené pryskyřice:

Mez pevnosti a ohybu	MPa	110 - 120
E - modul - ohyb	MPa	2700 - 3300
Mez pevnosti v tahu	MPa	65 - 75
Mez pevnosti v tlaku	MPa	120 - 140
Tažnost	%	6 - 8
Rázová houževnatost	KJ/m ²	38 - 48
Shore D	-	85

3. Skladování a balení

Pryskyřice mohou být skladovány po dobu nejméně 24 měsíců, tužidla 12 měsíců v pečlivě uzavřených obalech. Při teplotách pod + 15°C mohou pryskyřice a tužidla zkrystalizovat. Krystalizace je patrná jako zamízení či změna tekuté podoby obsahu obalu na pevnou. Před zpracováním se musí krystalizace zahřátím odstranit. Pomalu zahřejete obsah obalu až do přibližně 50 - 60°C ve vodní lázni nebo peci a mícháním či potřásáním uvedete materiál do původního stavu bez jakékoli vady na kvalitě. Zpracovávejte pouze výrobky zcela jednotné barvy. Před zahřátím lehce obal otevřete, aby došlo k vyrovnání tlaku. Během zahřívání buďte opatrní. Nezahřívajte nad otevřeným ohněm! Při míchání používejte bezpečnostní pomůcky (rukavice, brýle, respirátor).

4. Kontakt

Výrobce/Dovozce:	GRM Systems s.r.o. Slatinky č.p.158 PSČ 783 42 CZECH REPUBLIC	Tel.: +420 585 431 734 Fax: +420 585 431 994 www.grm-systems.cz info@grm-systems.cz
	KANCELÁŘ A SKLAD GRM Systems s.r.o. Technologická 28 779 00 Olomouc CZECH REPUBLIC	
Technický servis:	Zbyněk Gofroj	Tel.: +420 777 766 706 zbynek@grm-systems.cz

Poznámka

Tento technický list byl vytvořen na základě našich nejnovějších poznatků a podle nejlepšího vědomí a svědomí. Jelikož nejsme schopni kontrolovat správnost použití našich výrobků, nemůžeme garantovat ani výsledky.