

Výrobní návrh elektrického mountainboardu

Bc. Radovan Němec

Diplomová práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Radovan Němec
Osobní číslo: T19510
Studijní program: N0788A270002 Výrobní inženýrství
Specializace: Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Výrobní návrh elektrického mountainboardu

Zásady pro vypracování

- 1. Zpracujte literární rešerši na dané téma.**
- 2. Navrhněte výrobní postup pro výrobu mountainboardu.**
- 3. Zvolte a otestujte vhodný materiál na výrobu základních součástí mountainboardu.**
- 4. Zhodnotte výsledky vašeho řešení.**

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

Seznam doporučené literatury:

1. DISHOVSKY, Nikolay a Mihail MIHAYLOV. Elastomer-based composite materials: mechanical, dynamic and microwave properties and engineering applications. New Jersey: Apple Academic Press, 2018. ISBN 9781771886208.
2. KREBS, Stefan, Ladislav KOLAŘÍK a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. Teorie zpracování plastů a kompozitů. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 9788001067222.
3. GEBHARDT, Andreas, Julia KESSLER a Laura THURN. 3D printing: understanding additive manufacturing. 2nd edition. Cincinnati, Ohio: Hanser Publications, [2019]. ISBN 9781569907023.
4. CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. New Jersey: World Scientific, [2017]. ISBN 978-981-3146-76-1.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Janošík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

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

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 18. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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 – diplomovou 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 diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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 diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce rozebírá ve své teoretické části druhy matic a výztuží kompozitních materiálů, a jejich výrobu. V rešerši jsou popsány technologie výroby při využití kompozitních tkanin jako je ruční laminace a vakuová infuze.

Praktická část diplomové práce se věnuje výrobě elektrického inboardu, který by se dal definovat jako terénní skateboard. V první části praktické práce je popis vytvořeného 3D modelu, kde je odůvodněna jeho konstrukce. Druhá část obsahuje popis 3D tisku, který byl využit při výrobě součástí pro mountainboard. Před výrobou samotné mountainboardové desky byl testován zvolený materiál pro výrobu pomocí tříbodové ohybové zkoušky. Deska terénního skateboardu byla vyráběna z kompozitního sendviče, jako jádro bylo použito topolové překližky a pro potahy bylo zvoleno kombinace uhlíkové a skelné tkaniny. Výroba probíhala pomocí ruční laminace a následné odsátí přebytečné pryskyřice pomocí vakuové vývěvy.

Klíčová slova: 3D modelování, kompozit, sendvič, 3D tisk, mountainboard, elektro, ohyb

ABSTRACT

The thesis discusses in its theoretical part the types of matrices and reinforcements of composite materials and their production. The research describes the production technologies in the use of composite fabrics such as hand lamination and vacuum infusion.

The practical part of the thesis is devoted to the production of an electric mountainboard, which could be defined as an off-road skateboard. The first part of the practical thesis is a description of the created 3D model, where its construction is justified. The second part contains a description of the 3D printing that was used in the production of the components for the mountainboard. Before the production of the mountainboard itself, the material chosen for the production was tested using a three-point bending test. The board of the off road skateboard was manufactured from a composite sandwich, poplar plywood was used as the core and a combination of carbon and fibreglass fabric was chosen for the cover. The production was carried out by hand lamination followed by extraction of excess resin using a vacuum pump.

Keywords: 3D modeling, composite, sandwich, 3D printing, mountainboard, electro, bend

„Vědět, že víme to, co víme, a vědět, že nevíme to, co nevíme, je opravdové vědění.“

Konfucius (551 př. n. l. - 479 př. n. l.) čínský filozof, sociální politik a státník

V této části bych rád poděkoval zejména svým rodičům za jejich celoživotní lásku a péči, a především za jejich výchovu. Díky své rodině jsem takový, jaký jsem. Mé velké poděkování také patří mým blízkým kamarádům, kteří mně vždy pomohli v těžkých situacích, a to nejen při studiu vysoké školy. V neposlední řadě bych rád poděkoval panu Ing. Václavu Janošíkovi, Ph.D. za jeho směřování při vedení mé diplomové práce, a utřídění mých myšlenek. Také bych rád poděkoval firmě Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o. za poskytnutí tiskáren a materiálu pro realizaci diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KOMPOZITY	11
1.1 MATRICE	13
1.1.1 Vliv drsnosti povrchu vláken na rozhraní	15
1.2 VÝZTUŽ.....	16
1.3 VLÁKNA	17
1.3.1 Skelné vlákno	20
1.3.2 Uhlíkové vlákno	22
1.3.3 Uhlíkové vlákna vyrobená pomocí technologie PAN.....	23
1.3.4 Aramidové vlákno	25
1.4 PREPREGY	26
1.5 SENDVIČOVÉ STRUKTURY	28
2 VÝROBA KOMPOZITNÍCH DÍLŮ	31
2.1 RUČNÍ LAMINACE	31
2.2 VAKUOVÉ TECHNOLOGIE	32
3 3D TISK	33
3.1 FDM	34
4 MOUNTAINBOARDING	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI	39
6 DESING MOUNTAINBOARDU	40
6.1 MOUNTAINBOARDOVÁ DESKA.....	40
6.2 FORMA	40
6.3 TRUCKY	41
6.4 KOLO NEHNANÉ	42
6.5 KOLO HANANÉ.....	43
6.6 DRŽÁK MOTORU	44
6.7 POHON.....	45
6.8 CELKOVÁ SESTAVA	47
7 3D TISK	48
7.1 TISK FORMY	49
7.2 TISK DALŠÍCH KOMPONENTŮ	50
8 VOLBA KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU	51

8.1	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES PRO TŘÍBODOVOU ZKOUŠKU OHYBEM.....	51
8.2	POSTUP VÝROBY ZKUŠEBNÍCH TĚLES	52
8.3	NAŘEZÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	56
9	OHÝBÁNÍ JADER DO FINÁLNÍHO TVARU DESKY	58
9.1	TVAROVÁNÍ BALSOVÉHO DŘEVA	58
9.2	TVAROVÁNÍ PĚNY	59
10	TESTOVÁNÍ	60
10.1.1	Tělesa s jádrem balsového dřeva.....	60
10.2	TĚLESA S JÁDREM POLYSTYRÉNOVÉ PĚNY	61
10.3	MODIFIKOVANÁ VÝROBA VZORKŮ	62
10.3.1	Testování modifikovaných těles	64
10.4	VÝPOČET POŽADOVANÉ ÚNOSNOSTI.....	66
11	VÝROBA PROTOTYPU DESKY	67
11.1	TVAROVÁNÍ JÁDRA.....	67
11.2	SKLADBA POTAHU	68
11.3	VÝROBA MOUNTAINBOARDOVÉ DESKY	69
11.3.1	Výroba spodní strany desky	69
11.3.2	Výroba horní strany desky	70
11.3.3	Ořezání do tvaru mountainboardové desky.....	72
12	CENOVÉ ZHODNOCENÍ.....	75
13	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	76
	ZÁVĚR	78
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	80
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ	84
	SEZNAM TABULEK.....	87

ÚVOD

Moderní kompozitní materiál je v dnešní době využíván nejen v HI-TECH aplikacích. Vyskytuje se i v běžném životě například v prostorech hromadné dopravy i v běžném průmyslu pro vrtule větrných elektráren. Kompozitní materiál je znám svou nízkou hustotou a dobrými mechanickými vlastnostmi.

V dnešní době se můžeme setkat s různými dopravními prostředky poháněnými elektrickým motorem. Od elektrických koloběžek, které se využívají ve městech pro rychlou dopravu, tak i po terénní elektrokola, která umožňují lidem absolvování delších a náročnějších tras, až po elektro automobilový průmysl, kterému prodeje automobilů exponenciálně rostou. V roce 2019 se prodal zatím nejvyšší počet elektro aut 2,1 milionu. Při využití elektromotoru lze dosáhnout efektivity až 85 % oproti spalovacímu motoru, kde je to méně než 40 %. [1]

Při volbě tématu pro diplomovou práci bylo smýšleno nad vhodným tématem pro obor, jenž student studuje. Vzhledem ke studijnímu oboru „Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitu“ bylo uvažováno, jak využít informace získané po dobu studia. Tím se dostáváme k danému tématu, výrobní návrh elektrického mountainboardu. Pokud vezmeme na vědomý, že 3D tiskárna nástroj pro zpracování polymerů, a vyrobená deska mountainboardu bude zhotovena z kompozitního materiálu. Student využije získaných vědomostí ze studia daného oboru.

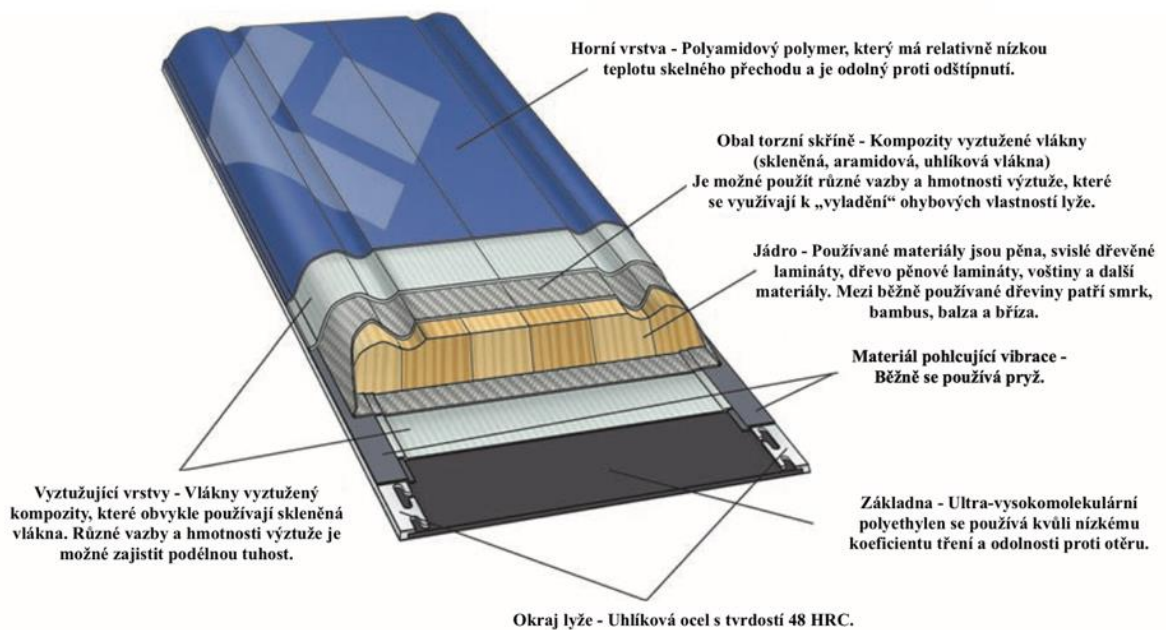
Pro konstrukci kompletní sestavy bylo využito programu Fusion 360. Pro následnou realizaci dílů bude využito 3D tiskárny, která používá roztavený polymer k budování trojrozměrných objektů pomocí řídicího systému, který využívá elektrických impulsů pro řízení motorů, jež pohybují tiskovou hlavou. Tisková hlava klade vrstvu po vrstvě a vytváří požadovaný 3D objekt. Jako hlavní součást celé výrobní sestavy je považována deska mountainboardu, která bude vyrobena z kompozitního materiálu.

Konečným výstupem diplomové práce bude funkční prototyp elektrického mountainboardu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITY

Kompozitní materiál se skládá z různých substancí, které mají heterogenní schopnosti lišící se v mechanických, fyzikálních a chemických vlastnostech. Obecně za kompozit považujeme jakýkoliv vícefázový materiál, který vykazuje významný podíl vlastností obou složek tak, aby se dosáhlo lepší kombinace vlastností. Většina kompozitů byla tvořena za účelem zlepšení vlastností, jako je tuhost, houževnatost a pevnost při normálních a zvýšených teplotách. Zpravidla je jedna část fáze v kompozitu spojitá, takovou fázi označujeme jako matici. Fází, která je nespojitá, nazýváme výztuž. Ve srovnání s maticí má výztuž obvykle výrazně lepší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.). Kompozitní materiály jsou vyznačovány jako konstrukční materiály vznikající specifickými procesy a mající specifické vlastnosti, které se používají pro specifické aplikace. [2-7]



Obr. 1.: Moderní Lyže z kompozitního materiálu [2]

Kompozitní materiály moderního charakteru vznikají již od 60. let 20. století, jejich vznik byl zapříčiněn potřebou materiálu pro letecký a kosmický průmysl. V dnešní době jsou již kompozity rozšířenější a můžeme se s nimi setkat i v běžném životě. Například v dopravních prostředcích, ve sportu, v domácnosti i u zubaře. Kompozitní strukturu lze najít i v lidském těle, reprezentují ho naše kosti, které se skládají z organického kolagenového vlákna a drobných neorganických krystalů vázaných vodou a tuky. [2-8]

Některé polymerní materiály, do nichž byla přidána plniva, jsou ve skutečnosti velkočásticové kompozity. Plniva upravují nebo vylepšují vlastnosti materiálu nebo nahrazují část objemu polymeru levnějším materiálem (plnivem). Pro účinné vyztužení by měly být částice malé a rovnoměrně rozmístěné v celé matici. Kromě toho má na chování vliv objemový podíl obou fází. Mechanické vlastnosti se zlepšují s rostoucím obsahem částic. Pro dvoufázový kompozit byly formulovány dva matematické vzorce závislosti modulu pružnosti na objemovém podílu jednotlivých fází. Tyto rovnice pro pravidlo směsi předpovídají, že modul pružnosti E by se měl pohybovat mezi horní hranicí a dolní hranicí nebo limitem. [2]

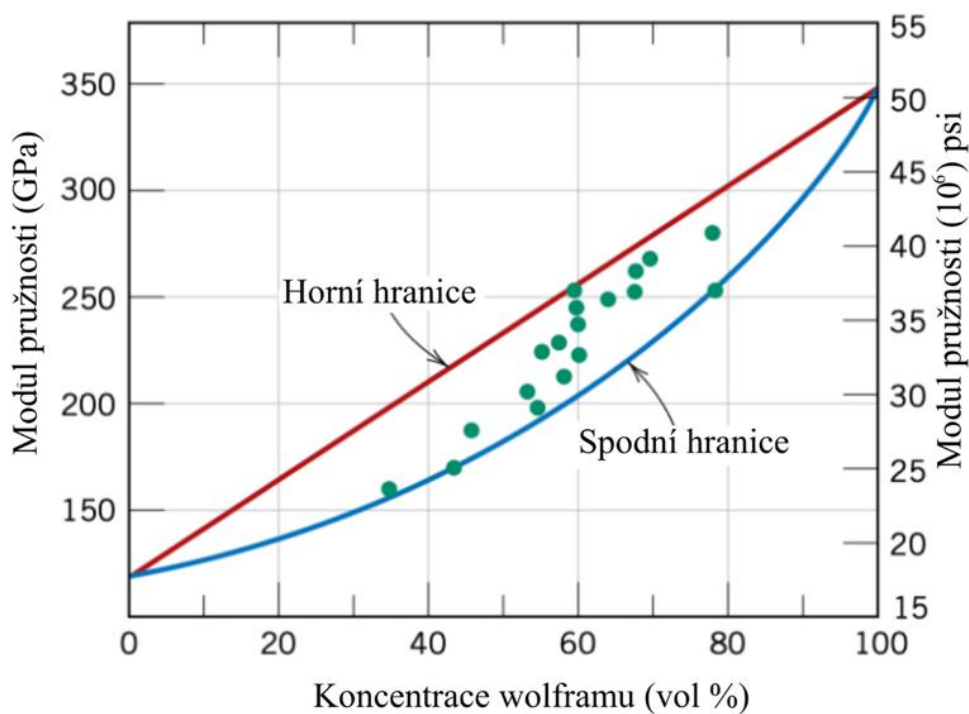
Pro dvoufázový kompozit je horní hranice modulu pružnosti vyjádřena rovnicí (1):

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \quad (1)$$

Pro dvoufázový kompozit je dolní hranice modulu pružnosti vyjádřena rovnicí (2):

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad (2)$$

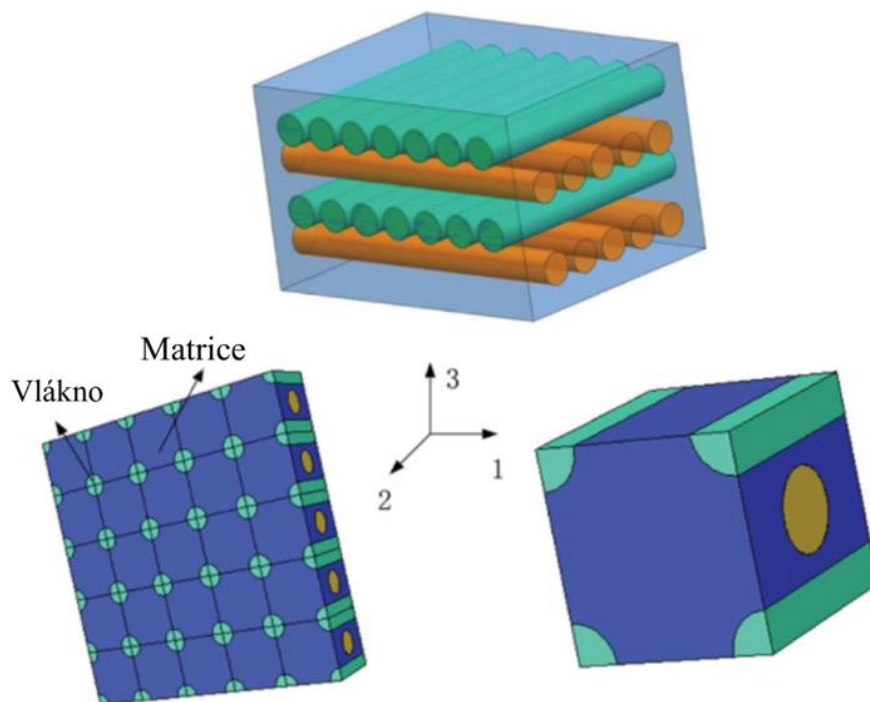
Kde v tomto vztahu E a V označují modul pružnosti a objemový zlomek a indexy c , m a p představují kompozitní, maticovou a částicovou fázi. Na obr. 2. jsou vykresleny horní a dolní hranice křivek E_c versus V_p pro kompozit mědi a wolframu, v němž je wolfram částicovou fází. Experimentální body leží mezi oběma křivkami. [2]



Obr. 2.: Modul pružnosti v závislosti na objemu [2]

1.1 Matrice

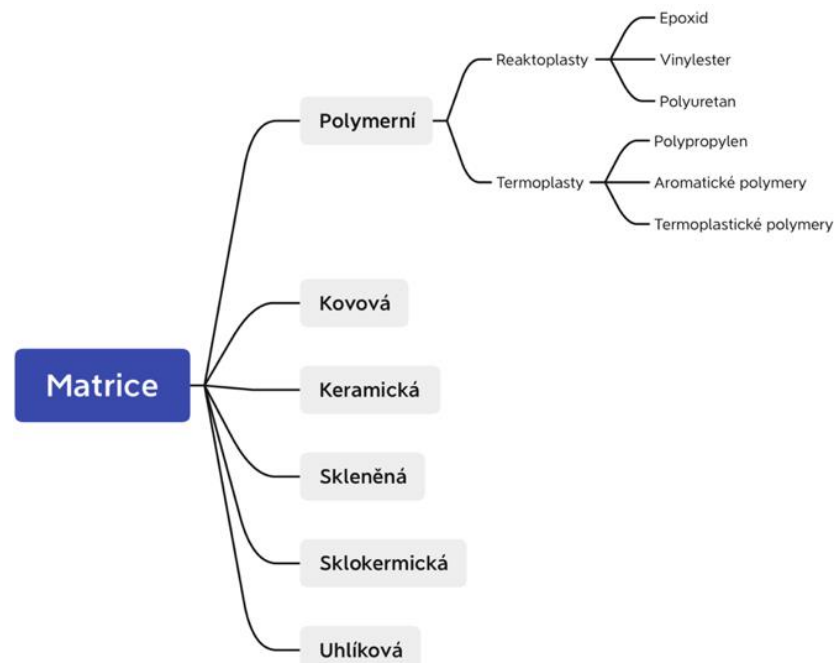
Matrice je základní složkou (fází) kompozitních materiálů. Je rozdělována po celém objemu kompozitního dílu. Matrice vláknitých kompozitů může být z polymeru nebo keramiky. Matrice má vždy nižší pevnost v tahu, než je pevnost výztuže. Od matrice se očekává, že její fyzikální a chemické vlastnosti umožní dokonalé spojení na rozhraní mezi matricí a výztuží, a tím efektivní přenesení zatížení na výztuž. U kompozitních materiálů vyztužených vlákny plní matrice několik funkcí. V první řadě váže vlákna dohromady a funguje jako médium, kterým se přenáší a rozděluje na vlákna vnější napětí. Pouze malá část působícího zatížení je přenášena matricí. Modul pružnosti vlákna by měl být mnohem vyšší než modul pružnosti matrice. Další funkcí matrice je chránit jednotlivá vlákna před povrchovým poškozením v důsledku mechanického otěru nebo chemických reakcí okolí. Takové interakce mohou způsobit vznik povrchových vad schopných vytvářet trhliny, které mohou vést k selhání i při nízkých úrovních tlakového napětí. Jednou z nejdůležitějších vlastností je, že matrice odděluje vlákna a díky své relativní plasticitě zabraňuje šíření křehkých trhlin z vlákna na vlákno, a tím zabraňuje selhání. Jinak řečeno, matrice slouží jako bariéra šíření trhlin. V případě, že jednotlivá vlákna selžou, k celkovému porušení kompozitního dílu dojde až po selhání velkého počtu sousedních vláken, která tvoří shluk kritické velikosti. Je nezbytné, aby adhezní síly mezi vlákny a matricí byly vysoké, pro minimalizování porušení vytržení vláken. [2-8]



Obr. 3.: Schéma křížového kompozitu vyztuženého [9]

Stupeň vyztužení nebo zlepšení mechanického chování závisí na silné vazbě na rozhraní matrice a částic. Zatímco matrice nese hlavní část působícího zatížení, malé rozptýlené částice brání nebo brzdí pohyb dislokací. Tím se omezuje plastická deformace, takže se zlepšuje mez kluzu a pevnost v tahu i tvrdost. Matrice ochraňuje výztuž před mechanickým poškozením, UV zářením apod. Podle materiálu matrice dělíme kompozity na 3 základní skupiny:

- Kompozity s polymerní matricí (PMC – Polymer Matrix Composites)
- Kompozity s kovovou matricí (MMC – Metal Matrix Composites)
- Kompozity s keramickou matricí (CMC Ceramic Matrix Composites) [2-8]

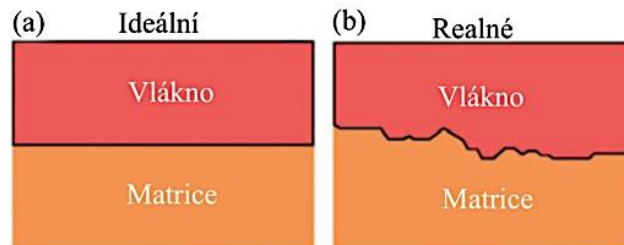


Obr. 4.: Druhy matric kompozitních materiálů [3]

Při využití polymerních matric je třeba odlišit rozdíl mezi matricemi reaktoplastickými a termoplastickými, což výrazně ovlivňuje způsob zpracování a výroby dílů. Reaktoplasty jsou jako materiály pro použití matric historicky nejrozšířenější, a dalo by se říct, že vláknový kompozit s reaktoplastickou matricí je charakteristickým příkladem pro použití v letadlovém a kosmickém průmyslu, kde je jednou z nejdůležitějších vlastností hmotnost konečného dílu. V automobilovém průmyslu se v dnešní době běžně vyskytují kompozitní díly s termoplastickou matricí. Co se týče pryskyřic, nejčastěji se používají nenasycené polyestery, vinylestery a epoxidy. Při použití termoplastů jsou nejčastější polypropyleny a polyamidy. U termoplastů jako je polyethyltereftalát, polyvinylchlorid a polyetylen jsou poměrně vysoké náklady na zpracování, a proto se používají výjimečně. [2-8]

1.1.1 Vliv drsnosti povrchu vláken na rozhraní

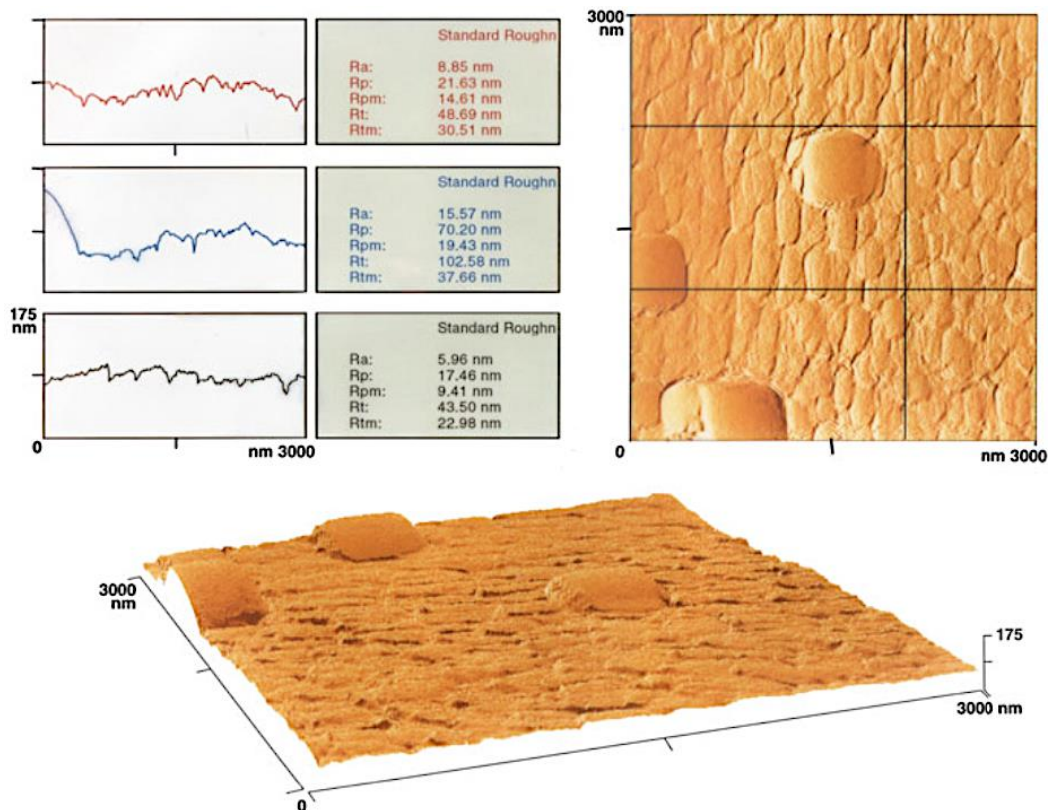
Obecně se předpokládá, že povrch je dokonale hladký. V praxi to však nemusí být pravda. Častěji je povrch mezi vláknem a matricí namísto ideálního rovinného povrchu spíše drsný, jak lze vidět na obr.5.



Obr. 5.: Ideální rovné rozhraní (a)

Pravděpodobnější členité rozhraní (b) [4]

Povrch představuje určitý stupeň drsnosti. Hodnoty drsnosti povrchu vláken změřené pomocí mikroskopie atomárních sil (AFM) mohou udělit podrobné výsledky týkající se kvality, morfologie a drsnosti povrchu vláken. Na obr.6 lze vidět příklad popsání drsnosti povrchu polykrystalického vlákna oxidu hlinitého (Nextel 610) pomocí technologie AFM. [4]

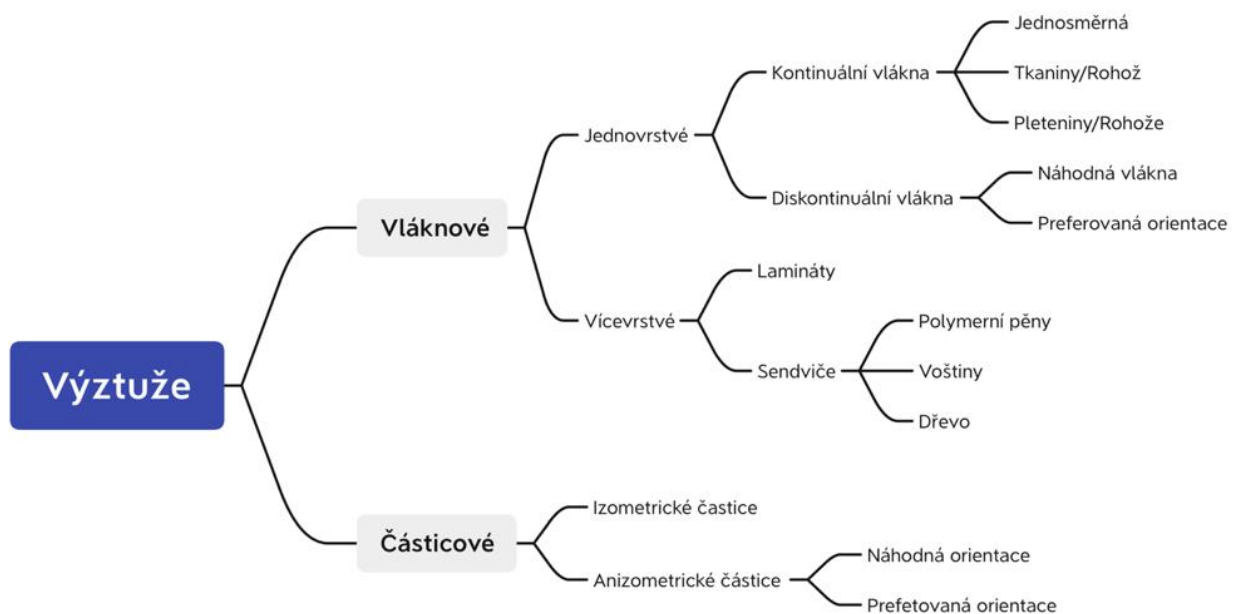


Obr. 6.: Charakterizace drsnosti povrchu polykrystalického vlákna oxidu hlinitého (Nextel 610) pomocí mikroskopie atomárních sil. [4]

Všeobecně platí, že rozhraní vlákna a matrice nabývá stejného profilu drsnosti jako je drsnost vlákna. V případě kompozitu s polymerní matricí vnáší blízký kontakt na molekulární úrovni mezi vlákno a matrici mezimolekulární síly, jež způsobují nebo nezpůsobují chemickou vazbu mezi složkami. Pro dosažení blízkého kontaktu mezi vláknem a matricí musí matrice v kapalně formě vlákno smočit. Pro zlepšení smáčivosti mezi složkami se běžně používají spojovací prostředky nebo se upravuje složení matrice. Přestože kontaktní úhel poskytuje kvantitativní míru smáčivosti, je třeba zdůraznit, že jeho hodnota závisí na přípravě povrchu. Výrazný vliv může mít topografie povrchu. Wenzel (1936) se zabýval vlivem drsnosti povrchu na smáčivost a poukázal na to, že v rámci měrné jednotky na drsném povrchu je ve skutečnosti více povrchů, a v jistém smyslu tedy i větší povrchová energie než ve stejné měrné jednotce plochy na hladkém povrchu. Podle Wenzela lze vliv drsnosti povrchu na smáčivost znázornit pomocí poměru skutečné plochy a předpokládané plochy na rozhraní. Pokud je tedy smáčivost špatná, může drsnost povrchu zmenšit lepenou plochu a vést k tvorbě dutin a možné koncentraci napětí. [4]

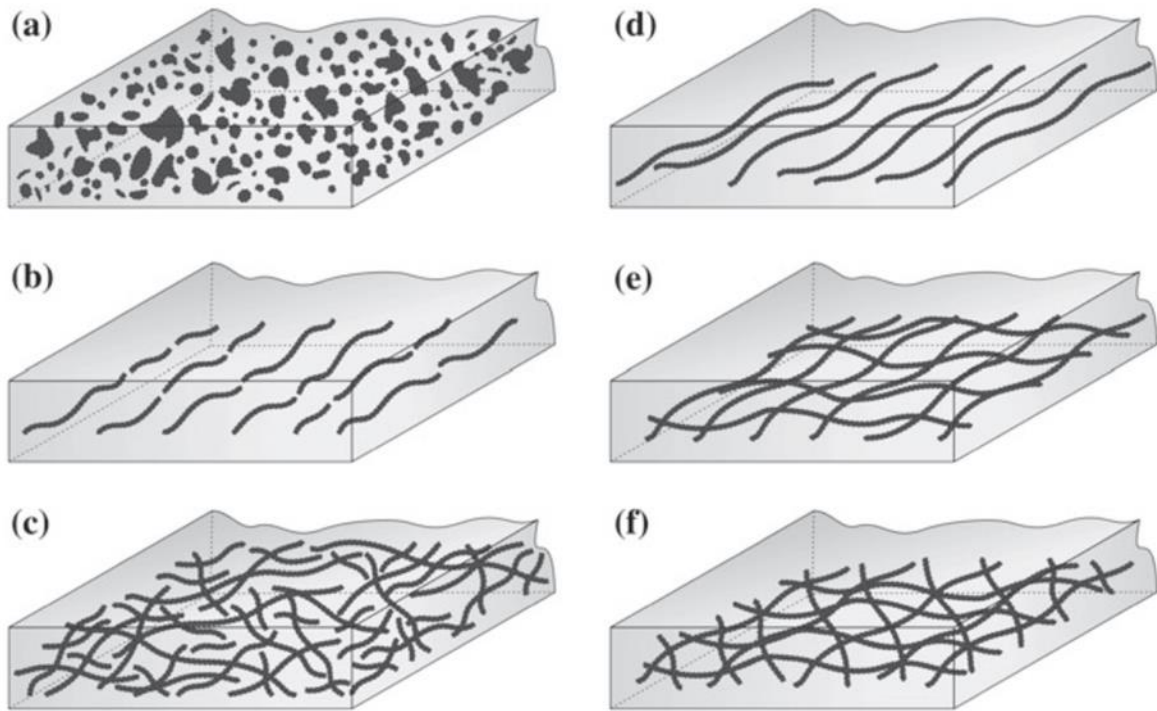
1.2 Výztuž

Druhou důležitou složkou kompozitního materiálu je výztuž. Všeobecně je pevnější, a to především v tahu, je tužší díky většímu modulu pružnosti než matrice. Funkce výztuže spočívá především v přenášení zatížení. Výztuže rozdělujeme na dva základní druhy: vláknové a částicové, a ty do dalších podskupin, které jsou zobrazeny na obr.7. [3]



Obr. 7.: Rozdělení výztuží [3]

Vláknové výztuže mají svá specifika. Dělí se na krátká a dlouhá vlákna, a dle způsobu sdružování např. do pramenů, rovingů, tkanin nebo netkaných textilií a rohoží. Pro použití částic je důležitou vlastností, zda jsou pravidelné či nepravidelné, zda-li jsou kulovité, destičkové, tyčinkové apod. Jedním z důležitých parametrů je míra uspořádání, ze které poté plyne případná anizotropie vlastností. [3]



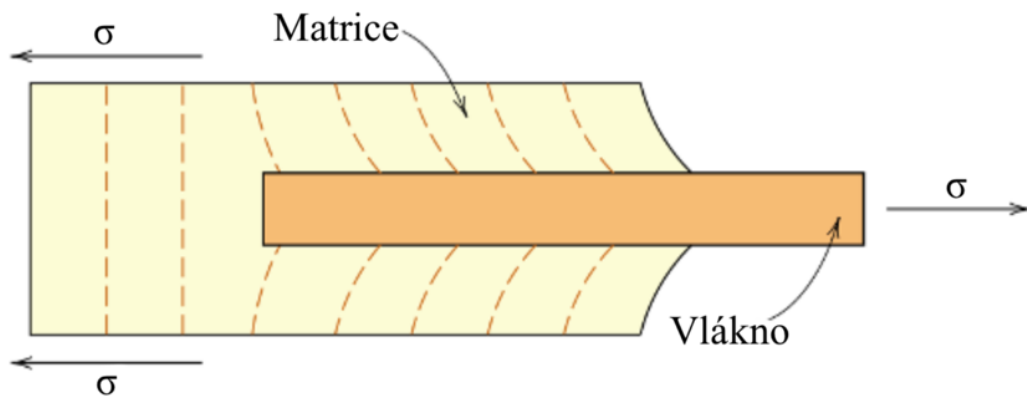
Obr. 8.: Typy kompozitních materiálů vyztuženy
 (a) disperzními částicemi (b) nespojitými vlákny – jednosměrně
 (c) nespojitými vlákny – náhodně (d) spojitými vlákny – jednosměrně
 (e) spojitými vlákny – úhel orientace $0^\circ - 90^\circ$ (f) spojitými vlákny – ve více směrech [10]

1.3 Vlákna

Vlákna dělíme v první řadě podle materiálů, případně podle použití např. pro vysokoteplotní aplikace. Konkrétně rozdělujeme vlákna na organická a anorganická. Mezi anorganická vlákna patří skelná vlákna, uhlíková vlákna, vlákna borová atd. Z organických vláken je potřeba nejprve jmenovat vlákna z polymerních materiálů jako jsou aramidová vlákna, polyethylenová vlákna, dále jsou přírodní vlákna nebo proteinová vlákna. Jednotlivé druhy vláken se od sebe liší svými vlastnostmi a způsobem použití. Z technologického hlediska jsou nejdůležitější kompozity, v nichž je disperzní fáze ve formě vlákna. Konstrukční cíle kompozitu vyztužených vláken často zahrnují vysokou pevnost, anebo tuhost v poměru ke své hmotnosti. [2,3,11]

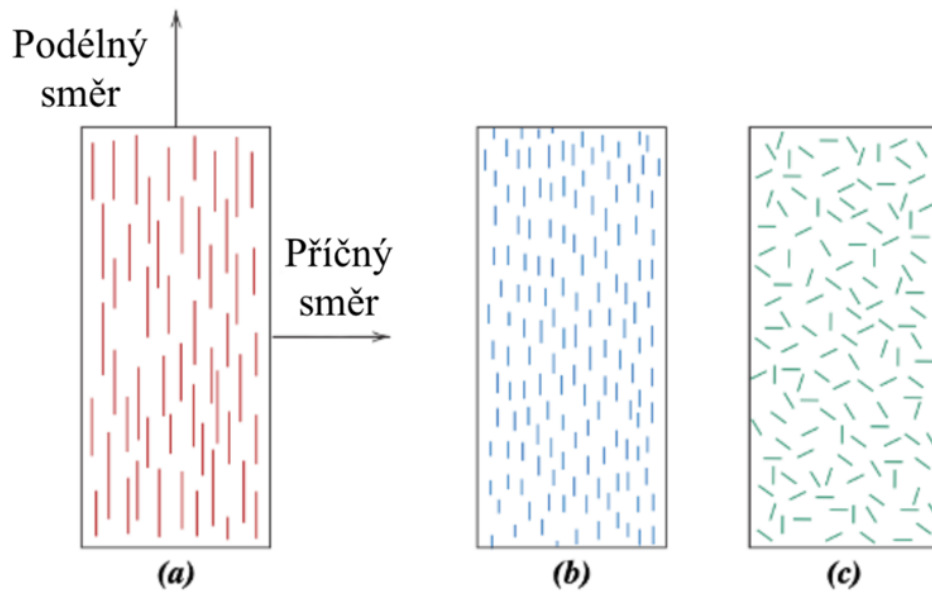
U vláken je důležitá jejich délka a průměr. Mechanické vlastnosti kompozitu vyztuženého vlákny závisí nejen na vlastnostech vláken, ale také na tom, do jaké míry je aplikované zatížení přenášeno na vlákna matricí. Pro míru přenosu zatížení je důležitá velikost mezifázové vazby mezi vlákny a matricí. Při aplikovaném namáhání tato vazba mezi vláknem a matricí na konci vláken zaniká, což vede k deformaci matrice, jak je znázorněno na obr. 9. To znamená, že na každém konci vlákna nedochází k přenosu zatížení z matrice. Pro účinné zpevnění a vyztužení kompozitního materiálu je nutná určitá kritická délka vláken. Tato kritická délka l_c [mm] závisí na průměru vlákna d a jeho mezní pevnosti τ_c a na pevnosti vazby mezi vláknem a matricí (nebo na mezi kluzu matrice ve smyku, podle toho, která je menší). U řady kombinací skleněných a uhlíkových vláken s matricí se tato kritická délka pohybuje v řádu 1 mm, což je 20–150násobek průměru vlákna.

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c} \quad (3)$$



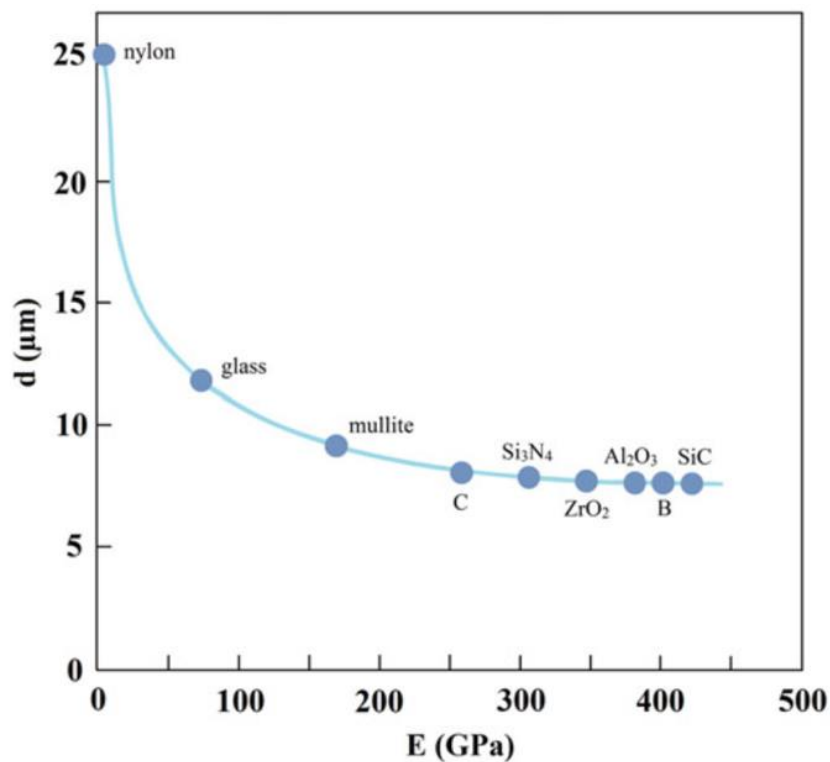
Obr. 9.: Působící tahové zatížení na vlákno v matrici [2]

Uspořádání nebo orientace vláken vůči sobě navzájem, jejich koncentrace a rozložení mají podstatný vliv na pevnost a další vlastnosti kompozitu vyztuženého vlákny. Orientace vláken je možné rozdělit na dva extrémy. Rovnoběžné uspořádání podélné osy vláken v jednom směru, druhé zcela náhodné uspořádání. Spojitá vlákna jsou normálně orientovaná viz obr. 10 (a), avšak nespojitá vlákna mohou být orientována anebo z části neorientována viz obr. 10 (b,c). Nejlepších výsledných vlastností kompozitu se dosáhne, pokud je rozložení vláken rovnoměrné. [2,11]



Obr. 10.: Schématické znázornění kompozitu vyztužených vláken
 (a) spojitéch a zarovnaných vláken
 (b) nespojitých a zarovnaných vláken
 (c) nespojitých a náhodně orientovaných vláken [2]

V grafu na obr. 11. lze pozorovat, že z křehkých materiálů (sklo, karbid křemíku, oxid hlinitý), pokud jsou zpracovány v menších průměrech, lze vyrobit velmi ohebná vlákna. Výroba tak malých průměrů vláken v praxi je velice nákladná. [4,11]



Obr. 11.: Průměr vláken z různých materiálů s pružností odpovídající nylonovému vláknu o průměru 25 μm [4]

Z mechanických vlastností u vláken sledujeme zvláště modul pružnosti, který u kompozitních konstrukcí ovlivňuje tuhost. Další důležité vlastnosti jsou mez pevnosti, hustota vláken, teplotní odolnost nebo tržná délka, což je charakteristika, která dává do souvislosti pevnost vlákna s jeho hustotou, podle rovnice níže. Kde L_r znázorňuje tržnou délku v jednotkách [m, km], R_m mez pevnosti v tahu [MPa], ρ hustotu [Kg/m^3] a gravitační zrychlení g v jednotkách [m/s^2].

$$L_r = \frac{R_m}{\rho \cdot g} [m, km] \quad (4)$$

Tržná délka vystihuje teoretickou hodnotu délky vlákna v okamžiku přetržení jeho vlastní hmotností, udává se v metrech. Vybrané hodnoty tržné délky jsou uvedené v tab. 1. [3,11]

Tab. 1.: Orientační hodnoty tržné délky vybraných materiálů [3]

Materiál	Tržná délka L_R [km]
Ocel	6
Ocel lanová	20
Hliník	3
Hedvábí	50
Ultravysokomolekulární polyetylén	300
Aramidové vlákno	260
Skelné vlákno	90-180
Uhlíkové vlákno	200-340

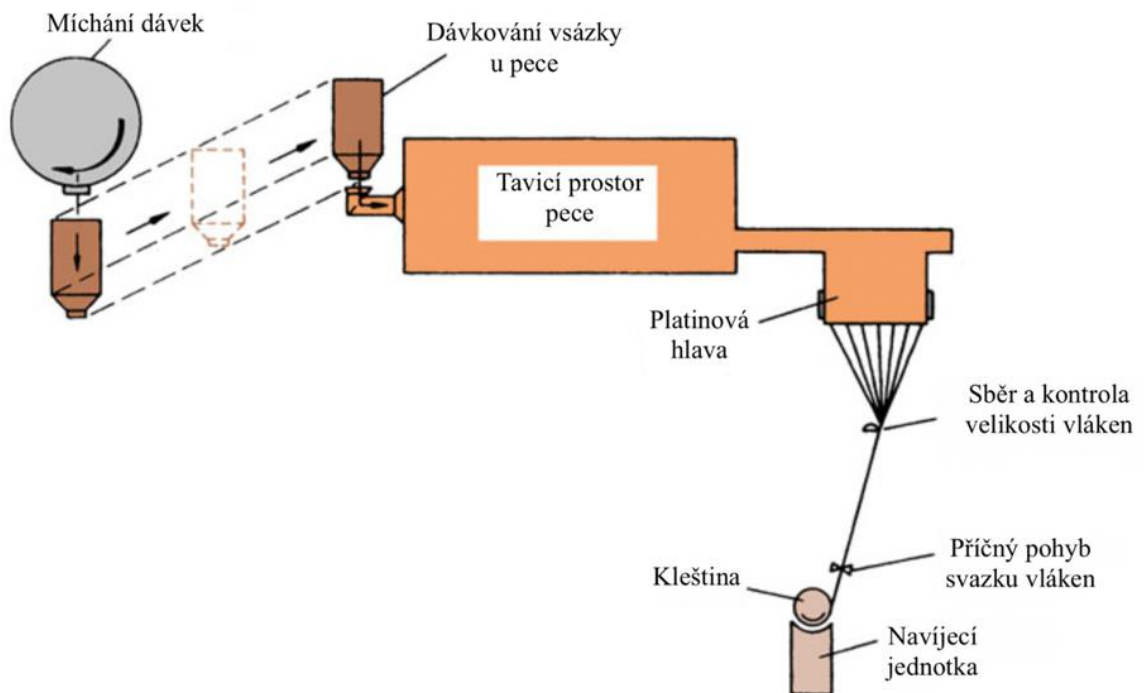
1.3.1 Skelné vlákno

Skelné vlákno nebo také skleněné vlákno je používáno pro vláknovou výztuž díky jeho kombinaci vlastností a ceny. Skelné vlákno je rozlišováno do několika druhů, lišících se vlastnostmi a použitím. Běžná skelná vlákna jsou na bázi oxidu křemičitého (50–60 % SiO_2) a obsahují další řadu oxidů vápníku, boru, sodíku, hliníku a železa, jak lze vidět v tab. 2. Skelná vlákna s označením E, mají kromě dobré pevnosti a přiměřeného modulu pružnosti také dobré elektroizolační vlastnosti. Vlákna třídy C mají lepší odolnost proti chemické korozi a v poslední řadě vlákna označení třídy S mají vysoký obsah oxidu křemičitého, díky němuž sklo odolává vyšším teplotám než ostatní třídy skla. [4,12]

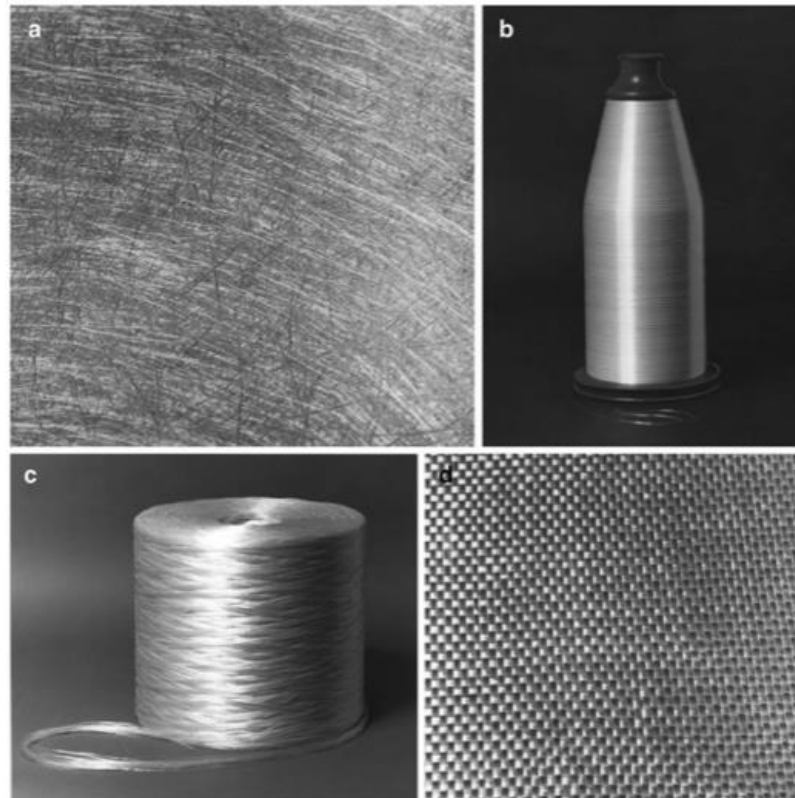
Tab. 2.: Přibližné chemické složení vybraných skleněných vláken v procentech [3]

Látka	E sklo	C sklo	S sklo
SiO ₂	55,2	65	65
Al ₂ O ₃	8	4	25
CaO	18,7	14	-
MgO	4,6	3	10
Na ₂ O	0,3	8,5	0,3
K ₂ O	0,2	-	-
B ₂ O ₃	7,3	5	-

Základní surovinou pro skelná vlákna je silikát SiO₂ s přísadami oxidu kovů (např. Al, Ca, Mg, B, Na, K). Výroba skelného vlákna probíhá zvlákňováním taveniny s následným dloužením, které lze vidět na obrázku 12. Při výrobě vzniká problém s absorpcí vody na povrchu vlákna, proto je nutné chránit vlákno lubrikantem. [4,12]



Obr. 12.: Výroba skelných vláken [4]



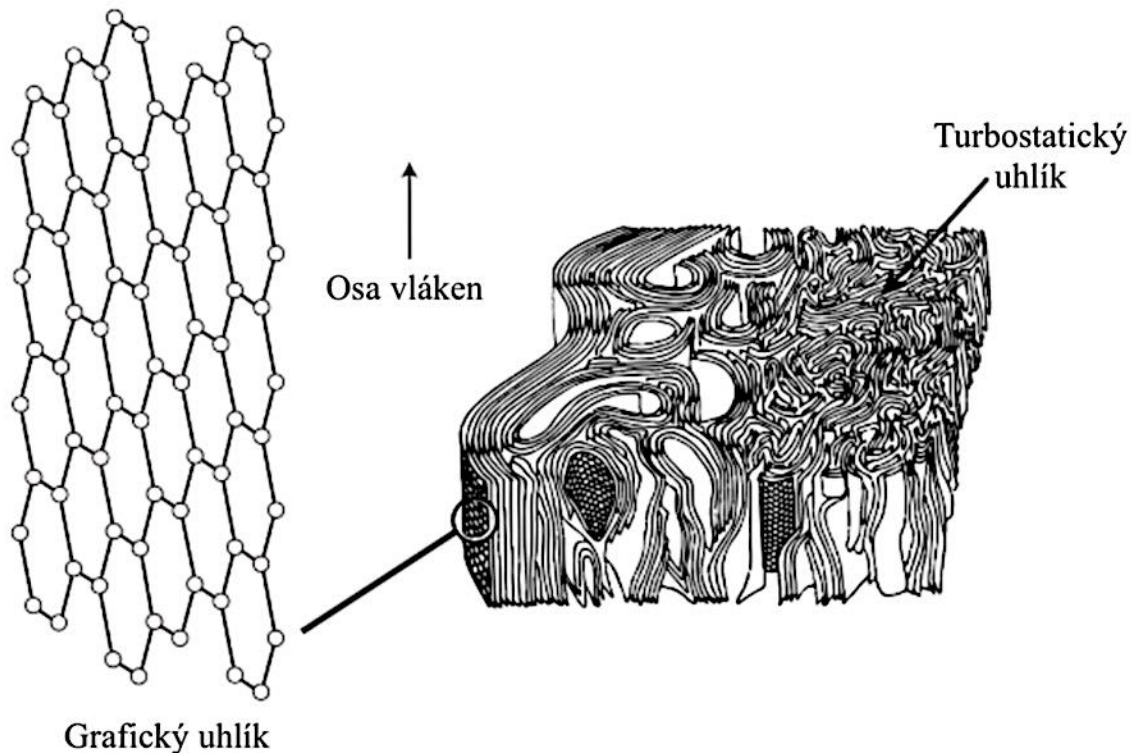
Obr. 13.: Skleněná vlákna v různých podobách
a) sekané skleněné vlákno
b) nekonečná příze
c) předené vlákno d) tkanina [4]

1.3.2 Uhlíkové vlákno

Uhlíkové vlákno dosahuje nejlepších mechanických vlastností. Charakteristickou vlastností pro uhlíkové vlákno je vysoký modul pružnosti, který v kombinaci s nízkou hmotností předurčuje použití uhlíkového vlákna ve špičkových aplikacích. Vlastnosti vláken se odlišují podle použitého polotovaru (prekursoru), dále podle výrobního postupu a jeho parametrů. [3,13]

Klíčové vlastnosti uhlíkových vláken:

- Uhlíková vlákna mají vysoký modul pružnosti a měrné pevnosti.
- Zachovávají si svůj vysoký modul pružnosti v tahu a vysokou pevnost při zvýšených teplotách (problém však může být vysokoteplotní oxidace).
- Při pokojové teplotě na uhlíková vlákna nepůsobí vlhkost ani široká škála rozpouštědel, kyselin a zásad.
- Vlákna představují rozmanité fyzikální a mechanické vlastnosti. [4]



Obr. 14.: Turbo statická struktura uhlíkového vlákna
a schématické zobrazení uhlíkového vlákna [2]

Prekursorové vlákno je obvykle speciální textilní polymerní vlákno, které lze karbonizovat bez tavení. Prekursorové vlákno se stejně jako každé jiné polymerní vlákno skládá z dlouhých řetězců molekul uspořádaných náhodným způsobem. Taková polymerní vlákna mají obecně špatné mechanické vlastnosti a obvykle vykazují poměrně velké deformace při nízkých napětích, a to hlavně proto, že nejsou polymerní řetězce uspořádány. Běžně používaným prekurzorem vláken je polyakrylonitril (PAN).

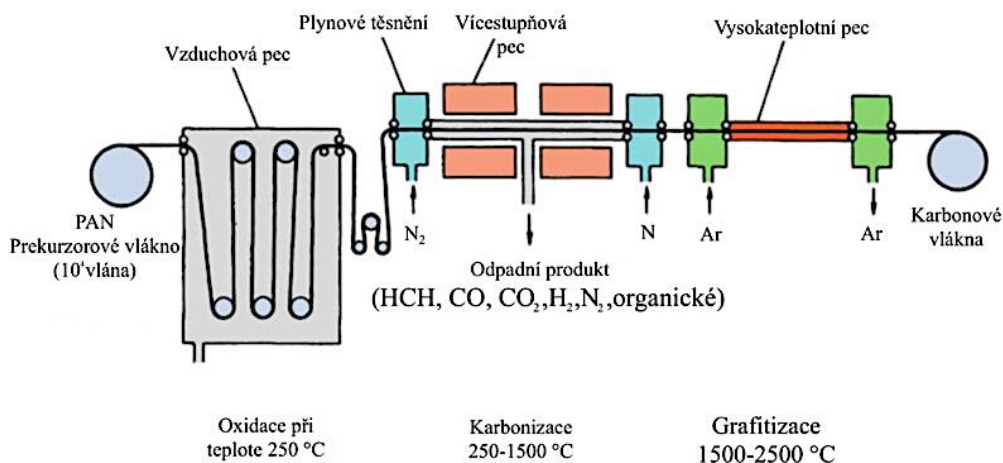
Jedním z klasifikačních schémat pro uhlíková vlákna je klasifikace podle modulu pružnosti v tahu. Jsou rozlišována na čtyři třídy: standardní, střední, vysoký a ultra vysoký modul. Průměr vlákna se z pravidla pohybuje mezi 4-10 μm , které lze získat v podobě jak kontinuálních také i v sekané formě.

Mimo to jsou uhlíková vlákna obvykle potažená ochrannou epoxidovou vrstvou, která rovněž zlepšuje přilnavost k polymerní matici. [2-8,13]

1.3.3 Uhlíková vlákna vyrobená pomocí technologie PAN

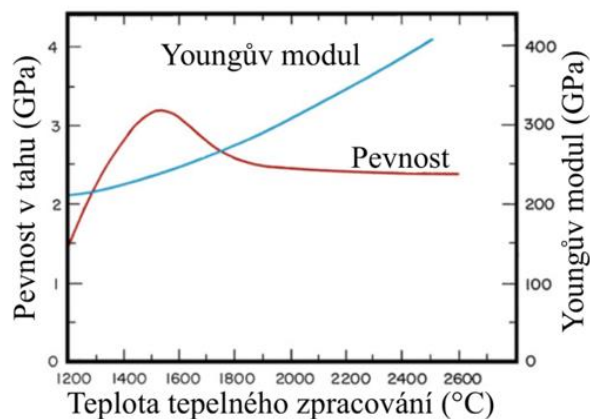
Polyakrylonitrilová vlákna jsou stabilizována při teplotě 250 °C po několik hodin, aby se předešlo jejich roztavení při následné úpravě za vyšších teplot. Vlákna jsou udržována v tahu, pro zabránění jejich smršťování během této oxidační úpravy. Vlákna, které jsou bílá

se po oxidaci změni na černá. Poté se pomalu zahřívají v inertní atmosféře na teplotu pohybující se 1000–1500 °C. Pomalý ohřev zajišťuje zachovat vysoký stupeň uspořádanosti vlákn. Rychlost zvyšování teploty by neměla být příliš vysoká, aby nedošlo k destrukci molekulárního uspořádání ve vláknech. Poslední volitelná tepelná úprava se zakládá na krátkodobém udržování vláken při teplotách do 3000 °C. Díky tomu se zlepši struktura vláken a orientace bazálních rovin, a zvýší se tak modul pružnosti vlákna v axiálním směru.



Obr. 15.: Schématické zobrazení výroby uhlíkových vláken pomocí technologie PAN [4]

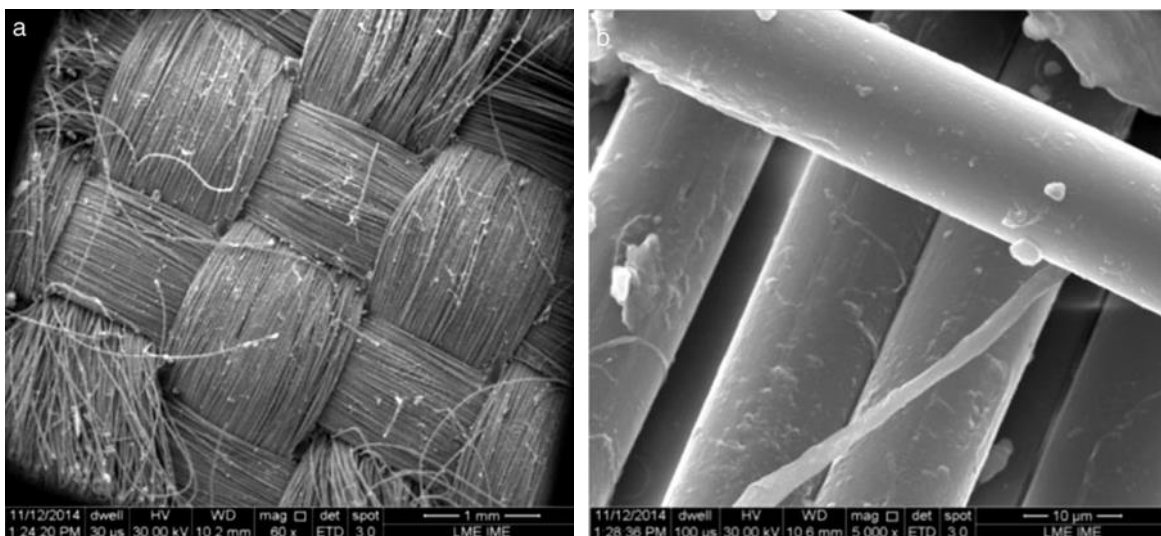
K odstranění plynných odpadních produktů jako je dusík a vodík dochází při karbonizaci při teplotě 1000–1500 °C. Atomy uhlíku, které po této úpravě zůstanou, mají podobu sítě protáhlých hexagonálních pásků. Přestože tyto pásky mají tendenci se řadit rovnoběžně s osou vlákna, stupeň uspořádání jedné pásky vůči druhé je relativně nízký. Toto uspořádání lze zlepšit tepelným zpracováním při teplotách až 3000 °C. Danou úpravu nazýváme grafitizační úprava. Mechanické vlastnosti výsledného uhlíkového vlákna se mohou ve velkém rozsahu lišit. Je to způsobeno především teplotou konečného zpracování vláken, jak je zobrazeno na obr. 15. [4]



Obr. 16.: Pevnost a modul pružnosti uhlíkových vláken v závislosti na teplotě konečného tepelného zpracování [4]

1.3.4 Aramidové vlákno

Vlákno vyrobené z aramidu (aromatický polyamid) je zástupcem organických vláken používaných v technických kompozitech. Znamé obchodní názvy jsou Kevlar a Nomex. Aramidové vlákno je charakteristické vysokými hodnotami pevnosti v tahu a modulu pružnosti, jeho předností je však odolnost v aplikacích s rázy (náběhové hrany křídel letadel, pancéřování, neprůstřelné vesty atd.). Ačkoliv jsou aramidy termoplasty, jsou odolné vůči poměrně vysokým teplotám. Teplotní rozsah, ve kterém zachovávají své mechanické vlastnosti je v rozmezí -200 až 200 °C. Z chemického hlediska jsou náchylné k degradaci silnými kyselinami a zásadami, ale v jiných rozpouštědlech a chemikáliích jsou relativně inertní. Aramidová vlákna se dělí na para-aramidy (PPTA – například Kevlar), pro ně je charakteristická vysoká pevnost i modul pružnosti, dále na meta-aramidy (MPIA – např. Nomex), která jsou známá teplotní odolností a elektroizolačními vlastnostmi. [2,4,14]

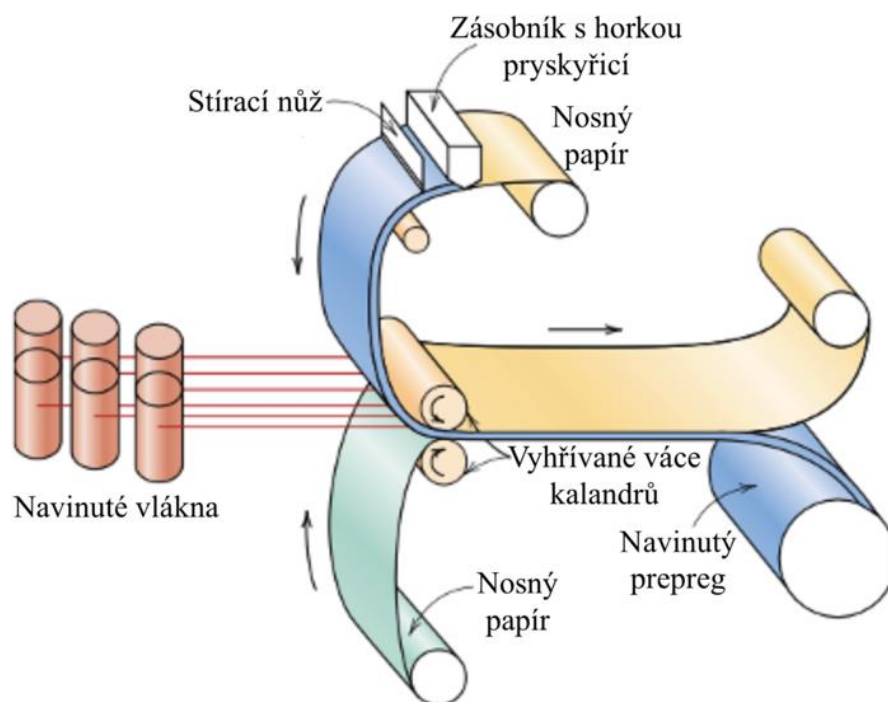


Obr. 17.: Aramidová tkanina (a) hladká vazba tkaniny (b) mikroskopický detail vláken [15]

1.4 Prepregy

Prepreg je předpřipravený polotovár pro výrobu kompozitních materiálů. Skládá se z tkaniny či rohože, která je impregnovaná matricí v podobě pryskyřice, která je částečně vytvrzená. Jde o typ kompozitního materiálu, který je nejvíce využíván pro konstrukční aplikace. Tento materiál se dodává ve formě pásů výrobcí, který pak přímo formuje a plně vytvrzuje výrobek, aniž by musel využít pryskyřici.

Předsycený polotovár je v tzv. B – stavu, což znamená, že matrice v podobě pryskyřice není tekutá, ale je v tuhé fázi. I přesto je prepreg poddajný a je možné jej tvarovat do požadovaných tvarových složitostí formy. V daném stavu lze prepreg uchovávat po omezenou dobu, protože dochází k samovolnému vytvrzování pojiva. Doba, po kterou lze používat prepreg, závisí na teplotě skladování. Pro delší dobu použití se prepregy skladují při teplotách pod bodem mrazu ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$). Díky tomu je možné dosáhnout i několika měsíční trvanlivosti prepregů. [2-8,16]



Obr. 18.: Výroba prepregového pásu z termosetového polymeru [2]

Proces výroby prepregů je zobrazen na obr 18. a začíná splétáním řady cívek navinutých nekonečných vláken. Tyto prameny se pak pomocí vyhřívaných válečků vloží a zalisují mezi listy separačního a nosného papíru, což je proces označovaný jako kalandrování. List separačního papíru je potažen tenkou vrstvou zahřátého roztoku pryskyřice s relativně nízkou viskozitou, aby se zajistila důkladná impregnace vláken. Pryskyřice se rozetře

pomocí stíracího nože do filmu o rovnoměrné tloušťce a šířce. Konečný výrobek z prepregu je tenká páska složená z vyrovnaných vláken zalitých částečně vytvrzenou pryskyřicí. Při navíjení impregnované pásky se odstraní separační papír. Typická tloušťka pásky se pohybuje mezi 0,08 – 0,25 mm a její šířka mezi 25–1525 mm, obsah pryskyřice se obvykle pohybuje v hodnotách 35–45 objemových procentech. Používají se termoplastické i termosetové pryskyřice. Běžnou výztuží pro prepreg jsou uhlíková, skleněná a aramidová vlákna. Výroba dílu probíhá nanášením několika vrstev, aby se dosáhlo požadované tloušťky kompozitního dílu. Uspořádání vrstev může být jednosměrné, ale častěji se orientace vláken střídá pro vzniknutí křížového nebo úhlového laminátu. Prepregová role má svůj záznamový list, do které je zaznamenávána manipulace, teploty a doby skladování. Při vytažení prepregové role z mrazícího boxu je několik hodin temperována na okolní teplotu a osychání vysrážené vlhkosti. Poté následuje nařezání na požadované přířezy podle technologického postupu a specifikace. Prepregová role je z obou stran chráněna fólií, které se před použitím odstraní.

Po odtržení fólie je prepreg připraven na aplikování do formy a následné vytvrzení, které probíhá při zvýšené teplotě a tlaku. Jednou z největších výhod používání prepregů je přesně definovaný a minimální podíl matrice vůči výztuži, který je možné ještě snížit použitím vhodné technologie zpracování (např. metoda VBM). Díky této skutečnosti je zachována stabilita a opakovatelnost výroby, která je pro sériovou výrobu dílů pro letecký či kosmický průmysl klíčová. Při používání prepregů je jednou z nejvíce ceněnou vlastností jejich praktičnost z pohledu manipulace. Prepregy se do určité míry dají tvarovat, a kladení do formy není tak náročné. [2-8,16]



Obr. 19. Prepreg, výroba dílu z prepregu [2,17]

1.5 Sendvičové struktury

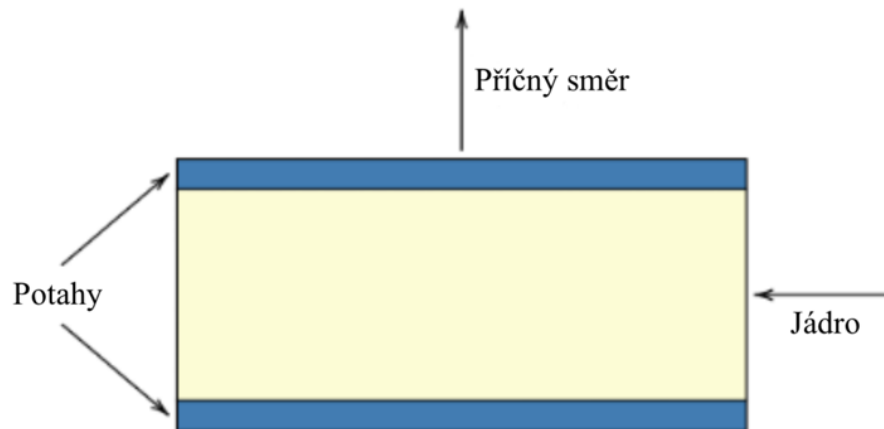
Kompozitní díly lze vyrobit nejen z matrice a výztuže, mohou je tvořit i složitější struktury. Typické jsou sendvičové struktury, mezi vrstvy kompozitu je vložena sendvičová struktura, které se nazývá jádro. Jsou navrženy jako lehké nosníky nebo panely s relativně vysokou tuhostí a pevností. Při použití sendvičové struktury má finální výrobek lepší vlastnosti, kterými jsou zvýšení tuhosti při minimálním zvětšení hmotnosti. Základní typy sendvičových jader jsou:

- voštiny
- pěny
- přírodní materiály
- kompozitní materiály

Voština je skládá z buněčné struktury nejčastěji v podobě šestiúhelníku, která připomíná včelí plástev. Může být tvořena z různých materiálů, nejčastěji se lze setkat s hliníkovými, aramidovými, skleněnými, uhlíkovými, papírovými voštinami nebo s voštinou z polymerních materiálů.

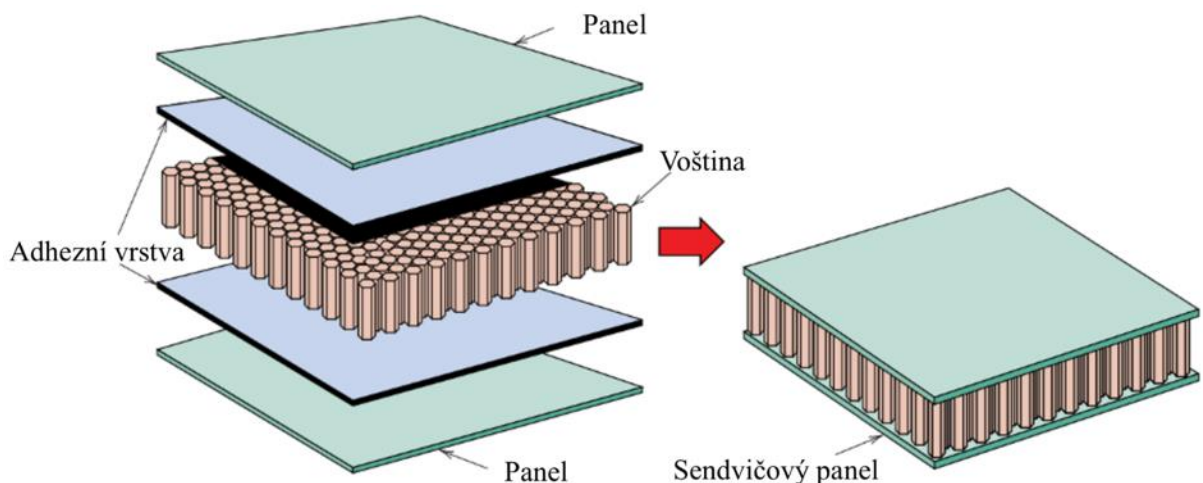
Při výrobě pěnových jader se nejčastěji používají polymery PVC, PET, PU, PMI, PE, PS. Také je možnost využít přírodních materiálů jako je dřevo, balza nebo korek. [3,18]

Sendvičový panel je tvořen ze dvou vnějších desek, ploch nebo pláštěů, které jsou od sebe odděleny a lepidlem spojeny s tlustším jádrem, jak je zobrazeno na obr. 19. Vnější plochy jsou vyrobeny z relativně tuhého a pevného materiálu, obvykle kompozitních laminátů nebo hliníkových slitin. Při ohýbání sendvičových panelů působí na jedné straně tlaková napětí a na straně druhé tahová. Tato normálová napětí působí ale v převážné míře jen na potahy sendviče. [3,18]



Obr. 20.: Řez sendvičovým panelem [2]

Materiál jádra je lehký a většinou má nízký modul pružnosti. Z konstrukčního hlediska má několik funkcí. Poskytuje souvislou oporu potahům a drží je pohromadě. Je důležité, aby měl dostatečnou pevnost ve smyku a odolával příčným smykovým napětím, a byl zároveň dostatečně silný, aby poskytoval vysokou tuhost ve smyku. Tahová a tlaková napětí v jádře jsou mnohem nižší než na potazích. Tuhost panelu závisí především na vlastnostech materiálu jádra a jeho tloušťce, tuhost v ohybu se výrazně zvyšuje s rostoucí tloušťkou jádra. Výhodou sendvičových kompozitů je jejich cena, protože materiály jádra jsou levnější než materiály použité pro potahy. [2,18]



Obr. 21.: Schéma znázorňující konstrukci sendvičového panelu s voštinovým jádrem [1]

Rozšířeným jádrem jsou struktury nazývané voštiny. Jsou zformovány do vzájemně propojených buněk tvořící šestiúhelníkovou, anebo jinou konfiguraci. Mechanické vlastnosti voštin jsou anizotropní. Pevnosti v tahu a tlaku jsou největší ve směru rovnoběžném s osou buněk. Pevnost ve smyku je největší v rovině panelu. Pevnost a tuhost voštinových struktur závisí na od velikosti buněk, tloušťce stěny buněk a v neposlední řadě na materiálu.

Další užitečnou vlastností voštinových struktur jsou tlumení zvuku a vibrací díky vysokému objemovému podílu prázdného prostoru v jednotlivých buňkách. Voštiny se vyrábí z tenkých plechů a používají se materiály jako například hliník, titan, nikl, nerezová ocel a polymery jako jsou polypropylen, polyuretan, kraftový papír. [2,18]

2 VÝROBA KOMPOZITNÍCH DÍLŮ

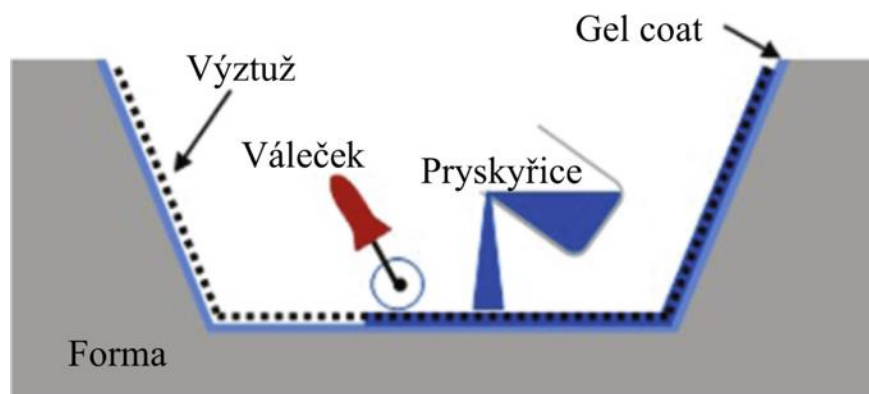
Existuje velké množství zpracování kompozitu s polymerní matricí, od zcela manuálních (závislých na dovednosti pracovníka) až po plně automatické (s různým stupněm automatizace). Každá z metod zpracování má své výhody a komplikace, což znamená, že žádná metoda není nutně lepší než jiná, ale její použití je závislé na počtu kusů a náročnosti vyráběného dílu. [19,20]

2.1 Ruční laminace

Ruční (nebo také mokrá) laminace je nejzákladnější a nejlevnější způsob zpracování kompozitních dílů. Je možné vyrábět desky případně i díly složitějších tvarů, ty však vyžadují formu s negativním tvarem budoucího výrobku. Při navrhování formy je potřeba myslet na odformování dílu po jeho vytvrzení. Kvalita vyrobených dílů závisí na zkušenostech a zručnosti zpracovatele, protože se jedná o vysoce kvalifikovaný proces.

Vlákna v podobě pramenů, tkanin či rohoží jsou pokládána do formy. Zpracovatel aplikuje výztuž do jednostranné formy, přičemž pečlivě obtahuje a překládá tkaninu přes obrysy dutiny formy. Pryskyřice se nanáší ručně pomocí válečků nebo štětců. Tento postup se opakuje až do dosažení požadovaného počtu vrstev (tloušťky dílu). Je možné měnit směr a uspořádání vláken buďto k potlačení anizotropie vlastností, nebo naopak k dosažení určitých vlastností v požadovaném směru.

Pro ruční laminaci se používá pryskyřice s nízkou viskozitou, díky tomu je obtížnější dosáhnout smáčení tkaniny nebo kompozitu s vysokým objemovým podílem vláken. Pro zlepšení smáčivosti pryskyřice do tkanin lze použít impregnační systémy s válečky. Vzhledem k dlouhé době vytvrzování při pokojové teplotě a ručnímu pokládání je celková doba ruční laminace časově náročná. [19,20]

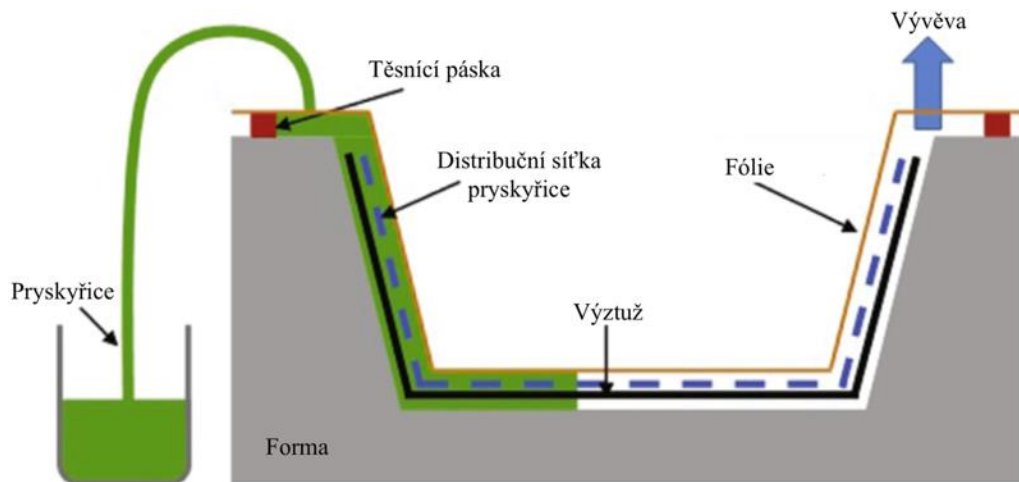


Obr. 22.: Ruční laminace [20]

2.2 Vakuové technologie

Pro díly s vyššími požadavky je žádoucí minimalizovat podíl matrice tak, aby splnila svůj účel pojiva, ale nezvyšovala hmotnost finálního výrobku. Také se používá se při výrobě kompozitu se zvýšenou pórovitostí a vyšším obsahem vláken. Vakuová technologie zajišťuje důkladné prosycení výztuže matricí. Přebytek matrice je následně vakuově odsát.

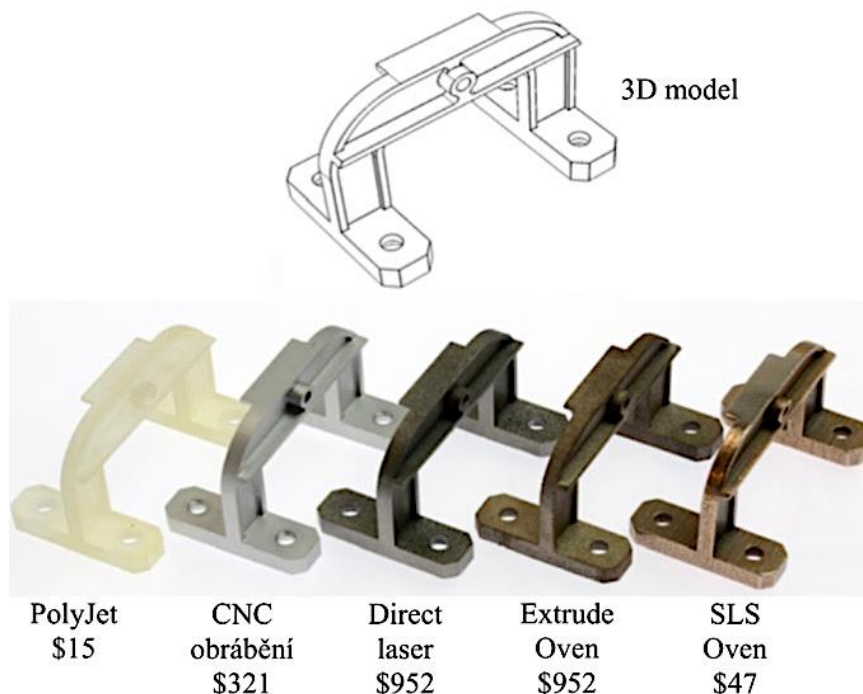
Princip výroby kompozitního dílu vakuovou technologií začíná nástřihem a přetvarováním tkaniny či rohože, a jejím vkládáním ve vrstvách do formy. Po utěsnění formy je do dutiny přiváděna pod tlakem pryskyřice a pomocí vakua distribuována, tak aby došlo k důkladnému prosycení tkaniny. Následuje vytvrzení dílu ve formě. Systém vakuových folií lze také umístit do pece, takže vytvrzování může probíhat při zvýšené teplotě, což urychluje reakci. A také to znamená, že je možno zpracovávat prepreg a termoplastické kompozity. Přestože kompozit vyrobený pomocí vakuových folií má lepší mechanické vlastnosti a kratší dobu cyklu, je tento proces nákladnější než ruční laminování kvůli velkému množství spotřebovaného materiálu pro vakuování, jako je vak, separační fólie, prodyšná tkanina a těsnicí pásky. Pomocí vakuové technologie lze vyrábět širokou škálu součástí včetně výrobků ze skleněných a uhlíkových vláken a také sendvičové struktury. [20]



Obr. 23.: Vakuová technologie výroby kompozitu [20]

3 3D TISK

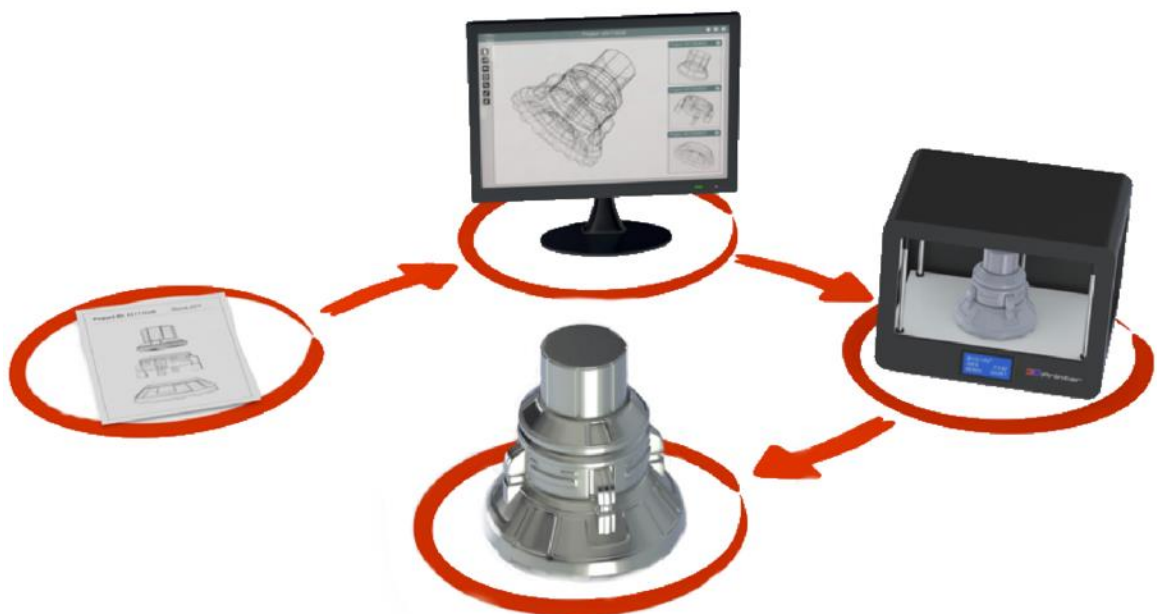
3D tisk nebo také rapid prototyping je aditivní technologií spočívající v nanášení nebo spojování materiálu do vrstev tak, aby vznikl pevný trojrozměrný objekt. Základní princip aditivní technologie je, že původně vytvořený 3D model je možné vyrobit přímo bez nutnosti plánování procesu. Výrazně zjednodušuje proces výroby složitých 3D objektů a přímo z dat 3D modelu. Jiné výrobní procesy vyžadují pečlivou a podrobnou analýzu geometrie dílu, aby bylo možné určit například pořadí operací výroby, použité nástroje a potřebné přípravky pro finální výrobu požadovaného dílu. Na obr. 26. je srovnání různých výrobních technologií. Ceny výrobních technologií se výrazně liší, a to hlavně díky dostupnosti technologií, čím je výrobní technologie dostupnější, tím je výroba levnější. Dále se cena liší kvůli složitosti výrobku, protože pro CNC obrábění daného dílu je nutno vytvořit program pro CNC frézku, který se bude skládat z vícero operací, protože nelze daný díl vyrobit na jednu operaci. Je nutno použít více nástrojů pro výrobu a od toho se odvíjí vyšší cena. Pro aditivní technologie není potřeba vytvářet program s posloupností operací, jako je to u CNC programování, a není potřeba využití více nástrojů. Obecně stačí jen nastavit parametry tisku a software vygeneruje potřebný kód pro daný stroj. [21-25]



Obr. 24.: Cenové srovnání různých technologií [22]

Proces 3D tisku začíná virtuálním trojrozměrným datovým souborem (CAD). V inženýrské praxi se datový soubor vytváří pomocí 3D programu, skenováním nebo pomocí zobrazovacích procesů jako je počítačová tomografie. Zpracování souboru pro 3D tisk je

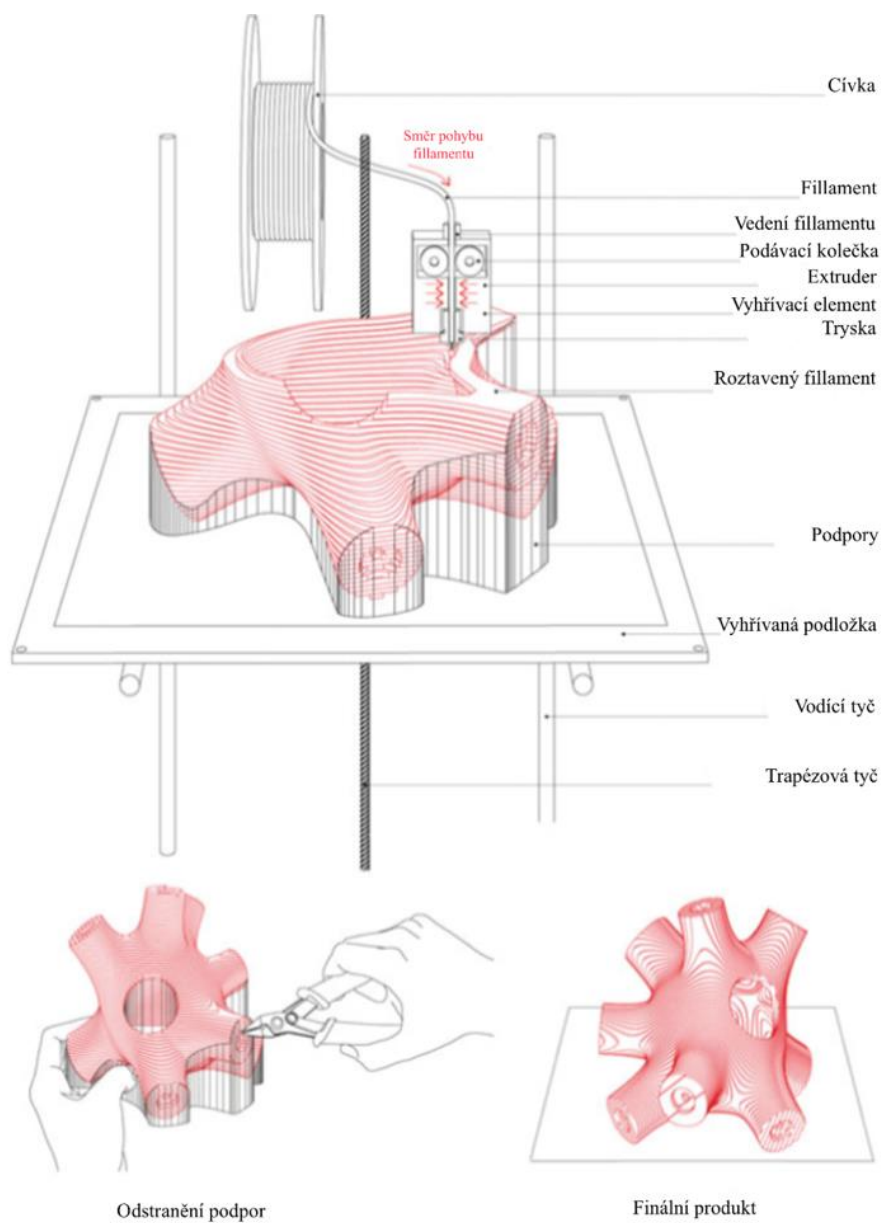
následující: v prvním kroku je 3D model rozdělen pomocí speciálního softwaru na řezy nebo vrstvy, přičemž každá vrstva je tenký průřez dílu odvozený z původních dat modelu. Každá vrstva má svoji definovanou tloušťku, čím tenčí vrstva, tím se bude výsledný výtisk blížit originálnímu dílu (zároveň se ale prodlužuje doba tisku). 3D tisk začíná několika kroky před tím, než se tisková hlava uvede do chodu. Prvním krokem je nalezení softwarového souboru návrhu, který udává vestavěnému softwaru 3D tiskárny, co má tisknout. Jakmile je soubor připraven, uživatel přemístí soubor do 3D tiskárny ve speciální formátu, který dokáže vestavěný firmware přečíst a pracovat s ním. Jakmile firmware dokončí plánování posloupnosti operací, může začít fyzický proces tisku. [21-25]



Obr. 25.: Realizace 3D tištěného dílu [27]

3.1 FDM

V současné době je FDM nejrozšířenější a nejdostupnější technologií 3D tisku. Spočívá ve vytlačování tuhého polymerního vlákna (filamentu) přes jednu nebo více vyhřívaných trysek, které jsou ovládány ve třech osách. Tuhý materiál je přiváděn do vyhřívaného extrudéru, kde je roztaven, aby mohl vytékat tryskou a spojit se s přilehlým materiálem ještě před ztuhnutím. Proces je podobný běžným procesům vytlačování polymerů. Tento proces připomíná klasické CNC obrábění, ve většině systémů se k řízení pohybu a úkonů používá stejný programovací jazyk (G-kód). Díly jsou tisknuty na vyhřívanou desku pro zlepšení přilnavosti prvních vrstev dílu. Vyhřívání podložky výrazně snižuje smrštění polymerů. [24-25]



Obr. 26.: 3D tisk – technologie FDM [28]

4 MOUNTAINBOARDING

Mountainboarding je sport, který vznikl zkřížením sportů snowboardingu a skateboardingu a prvky dalších extrémních sportů jako je BMX. Průkopníkem sportu byl James Stanley, který měl zájem jezdit na snowboardu, i přestože nebyl snůh. Rozhodl se upravit svůj snowboard a přidat mu potřebné komponenty, aby bylo možné hory sjíždět po různorodém terénu. S mountainboardem je možné využívat jakýkoliv terén, a díky tomu lze jezdit celoročně. [29-31]



Obr. 27.: Mountainboarding – ukázka sportu [30]

Gravitace je hnací silou mountainboardů, pokud jej umístíte z kopce dolů, bude gravitační síla táhnout prkno s předepsaným zrychlením. Třecí síla udržuje zrychlení pod kontrolou. Pneumatiky pro jízdu na prkně jsou široké, tlusté a vyrobené z pryže. Jsou navrženy, tak aby vytvářely vysokou úroveň tření neboli trakce. Dobrá trakce, a to i na nerovném nebo sypkém povrchu, je rozhodující pro zpomalení mountainboardu, provádění kontrolovaných zatáček a náhlé zastavení. Klíčem k udržení vzpřímení jízdy na mountainboardu je udržet rovnováhu nad těžištěm. Těžiště je definováno jako průměrná poloha hmotnosti objektu. U lidí je těžiště v oblasti boků. Pro udržení rovnováhy je nutné, aby jezdec mírně pokrčil kolena a ruce držel natažené poloze. Při zatáčení nebo řízení mountainboardu se jezdci spoléhají na třetí Newtonův pohybový zákon, který říká, že každá akce vyvolá stejnou a opačnou reakci. Když se jezdec na prkně silně opře o paty na levé straně prkna, směřuje sílu doprava. Podle třetího Newtonového zákona působí země stejnou silou v opačném směru a tlačí prkno doleva.

Následek toho je, čím silněji se nakloníme na jedno stranu, tím prudčeji se na tu samou stranu otočíme. Při ostrých zatáčkách nebo vzdušných manévrech se jezdci řídí zákonem zachování momentu hybnosti, jenž říká, pokud se neotáčíte, potřebujete točivou sílu neboli točivý moment, aby bylo dosaženo pohybu. Pro projetí prudké zatáčky jezdec vytváří točivý moment kroucením horní části těla ve směru zatáčky. Tento točivý moment způsobí, že se nohy rychle stočí stejným směrem. [29-31]



Obr. 28.: Mountainbordová deska [31]

Deska mountainboardu je simultánní desce snowboardu a skateboardu. Má zhruba stejné rozměry a je vytvořena ze stejných materiálů, dřeva nebo uhlíkových vláken. Desky mountainboardů jsou pružnější než desky skateboardů, což přispívá k lepšímu tlumení nárazů a plynulejšímu ovládní. Konce desky jsou u mountainboardu zkosené, proto aby zbytek desky byl co nejnižší u země. Díky tomu má jezdec větší rovnováhu a kontrolu na jízdou. Největším rozdílem mezi skateboardem a mountainboardem jsou pneumatiky, které jsou vyrobeny z pryže, a součástí jsou také duše vložené do pneumatik, které jsou naplněné vzduchem. Tlakem v pneumatikách lze upravit trakci nebo rychlost. Pneumatiky jsou namontovány k nápravám, které se nazývají trucky. Mountainboardové trucky jsou silnější a delší než skateboardové a obvykle jsou vyrobeny z hliníku. Trucky se otáčejí na centrálním čepu jako houpačka. Tato otočná konstrukce nabízí velký rozsah pohybu. Vozíky jsou odpruženy pružinami a tlumiči na obou stranách středového čepu. To umožňuje projíždět hluboké zatáčky i při vysokých rychlostech. [29-31]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

- Navrhnout 3D model mountainboardu
- Zhotovit konstruované díly pomocí 3D tisku
- Výběr vhodného kompozitního materiálu
- Vyrobit kompozitní desky pro testování
- Otestování vyrobených kompozitních materiálů
- Ohýbání jádra sendviče do tvaru desky
- Výroba mountainboardové desky
- Cenové zhodnocení

6 DESING MOUNTAINBOARDU

Praktická část diplomové práce byla započata 3D návrhem sestavy. Bylo využito zkušeností získaných v průběhu studia z různých 3D programů. Fusion 360 byl zvolen z důvodu dostupnosti programu ve volně přístupné licenci. V dílčích kapitolách níže jsou vyobrazeny jednotlivé díly sestavy, a popsány k čemu jsou využity a zdůvodněny jejich konstrukce.

6.1 Mountainboardová deska

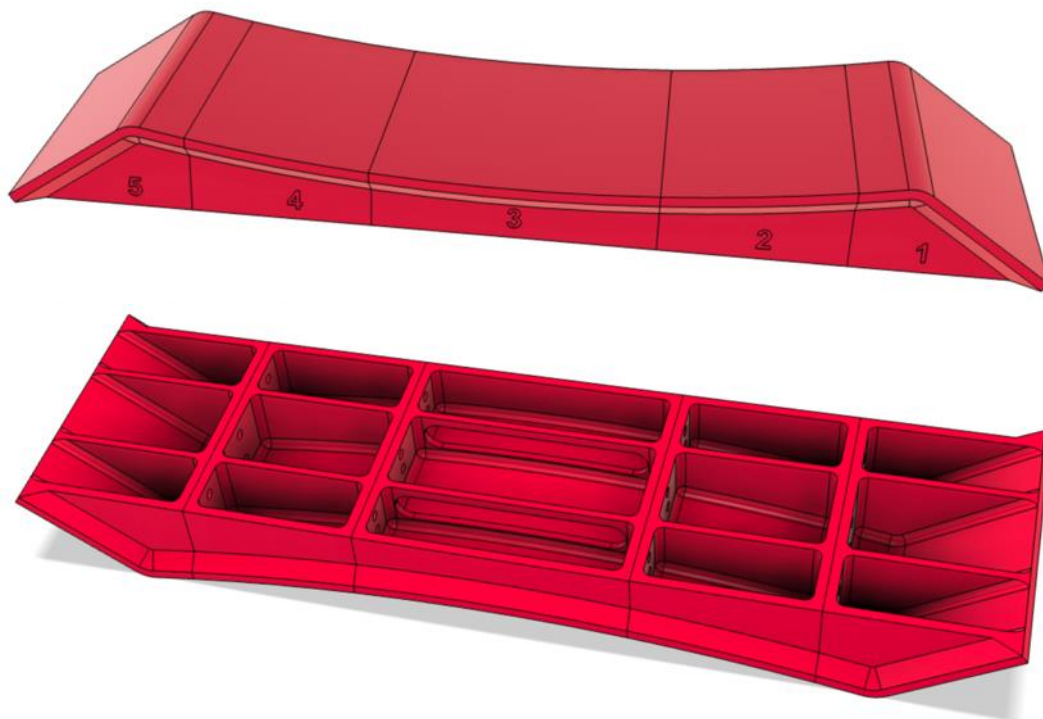
Při modelování celku, bylo započato hlavním prvkem sestavy, jež je mountainboardová deska, která bude vyráběna ze sendvičového materiálu. Při návrhu bylo počítáno s roznožením jezdce, proto má deska téměř 1 m na délku. Při tvarování kompozitního jádra na formu mountainboardu není žádoucí ostrý úhel, proto je v úhlu 35° zvolen rádius o velikosti 30 mm. Tvar desky je navrhnout, aby těžiště jezdce bylo co nejnižší pro lepší stabilitu. Model obsahuje 8 otvorů pro šrouby, které budou sloužit pro uchycení trucků.



Obr. 29.: 3D model – Mountainboardová deska

6.2 Forma

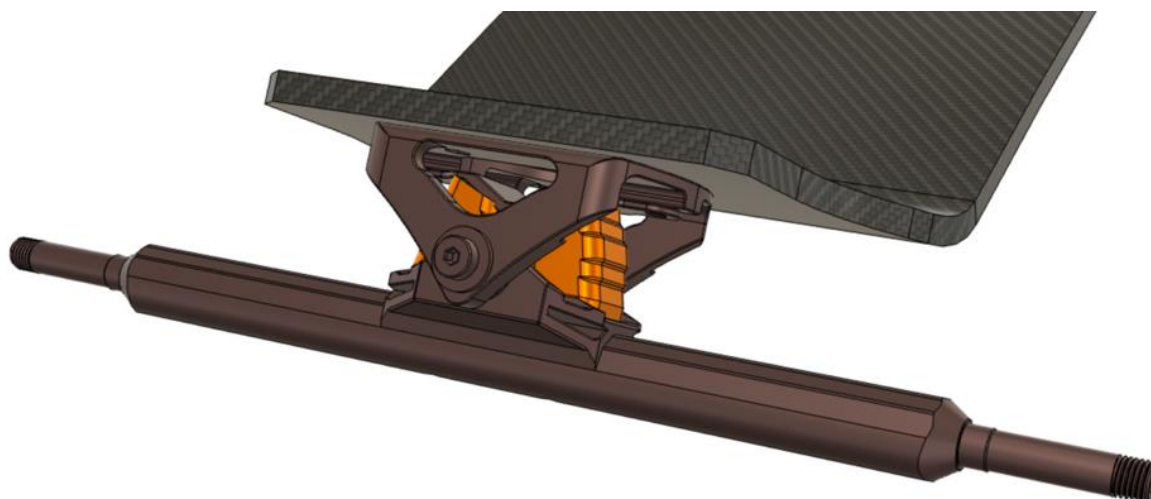
Pro výrobu desky byla vytvořena forma, která se skládá z 5 částí a to kvůli velikosti formy. Při navrhování bylo dodržováno technologických parametrů pro 3D tisk, jako jsou rádiusy a zkosené hrany, díky nimž je spoj pevnější, protože při namáhání v ostrém úhlu tištěného spoje může vznikat prasknutí. U prostřední části formy, která je označena číslem 3 je zhotoveno žebrované odlehčení. Důvodem tohoto odlehčení je velikost dané části formy. V kapitole 7.1 tisk formy, bude důkladněji rozebráno a odůvodněno, proč bylo odlehčení využito. Forma po vytisknutí na 3D tiskárně bude spojena šroubovým spojem M10 s podložkami.



Obr. 30.: 3D model – Forma

6.3 Trucky

Trucky budou sešroubovány k sendvičové desce pomocí šroubů M5x15 mm. Pro šroubový spoj bude využito pojistných matic a podložek. Trucky jsou vyrobeny z částí hliníku 6061-T6 a jako tlumiče jsou využity pryžové tlumnicí bloky.



Obr. 31.: 3D model – trucků

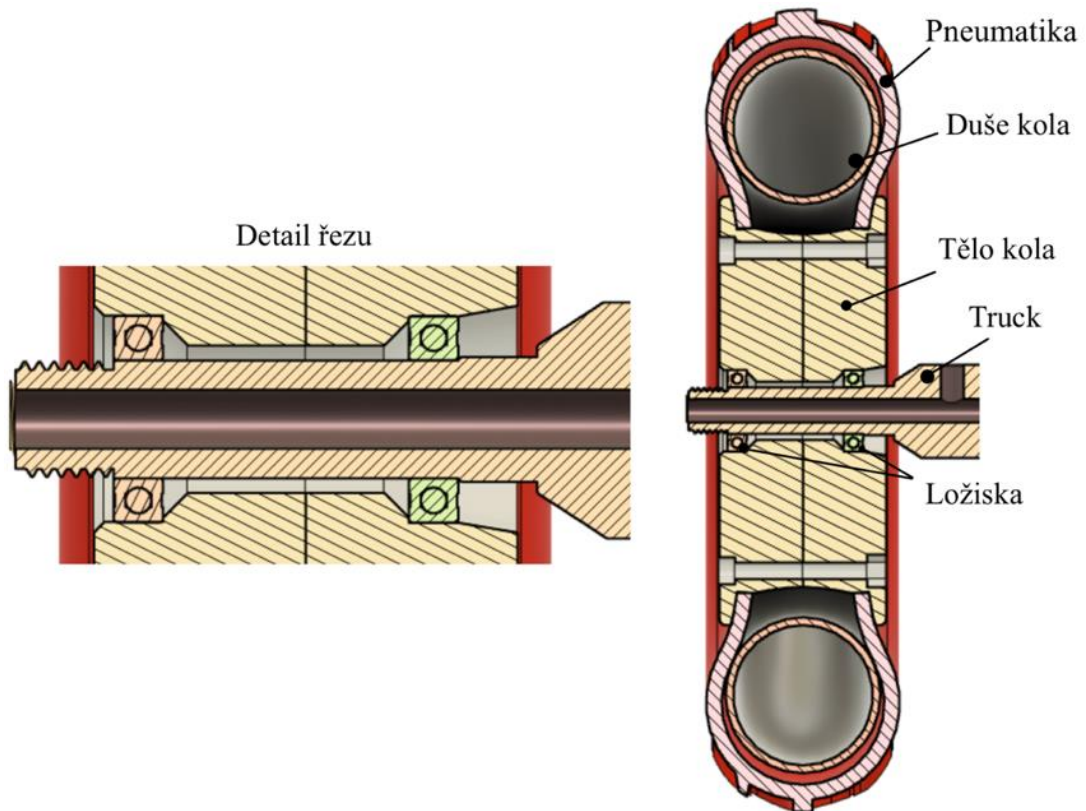
6.4 Kolo nehnané

Kola se skládají z více částí. Z vytištěného těla, které je rozděleno na půl. To z důvodu využití technologie 3D tisku (snadnější tisk bez podpor) a následné montáže kola. Pokud by tak nebylo učiněno, duše a plášť kola by bylo velmi obtížné složit. Jsou spojeny pomocí imbusových šroubů M4x40 mm. Pro zajištění šroubů jsou použity pojistné matice s pryžovým kroužkem jako u všech šroubových spojení sestavy. Vybrané matice jsou použity z důvodu, aby nedošlo k povolání spoje, při působení častých rezonančních sil vlivem terénního povrchu. Dalšími komponenty sestavy jsou, dvě ložiska 6801 2RS, které budou zalisovány do tištěného kola a budou zajišťovat otáčivý pohyb. V neposlední řadě je důležitou součástí kola i plášť s duší, jenž mají rozměr 200x50 mm.



Obr. 32.: 3D model – kola

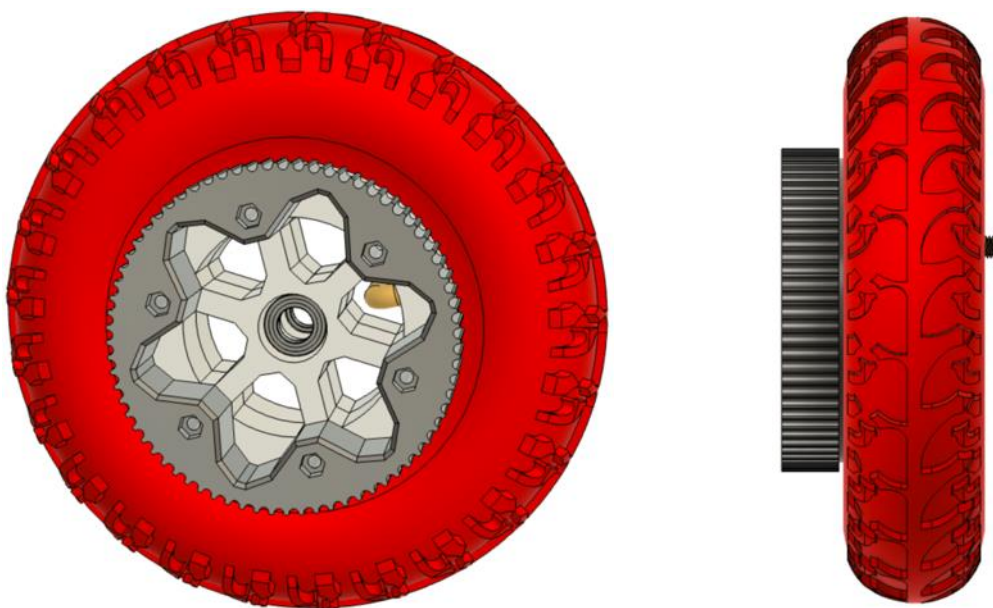
Jak lze vidět na Obr. 33 ložiska nelícují s hranou kola. Důvodem je příliš krátká hřídel, proto musela být ložiska více zapuštěna do těla kola, aby plocha ložiska doléhala jen na osazenou hřídel a nezasahovala do oblasti závitů. Při 3D tisku je vhodné použití zkosení, pokud to tištěná součást dovoluje. A proto je využito zkosení při osazeních pro ložiska. V případě nutnosti dodržení ostrého osazení pro ložisko by bylo nutno využít podpor, které zajistí, aby kladený roztavený polymer nebyl ve vrstvě dávkován do prázdného prostoru.



Obr. 33.: 3D model – průřez kolem

6.5 Kolo hnané

U poháněného kola je navíc hnaná ozubená řemenice, která je taktéž zhotovena pomocí 3D tisku. Kolo je koncipováno stejně jako nehnaná soustava kol. Pro spojení všech tří částí byly použity delší šrouby s rozměrem M4x65mm s pojistnými maticemi.



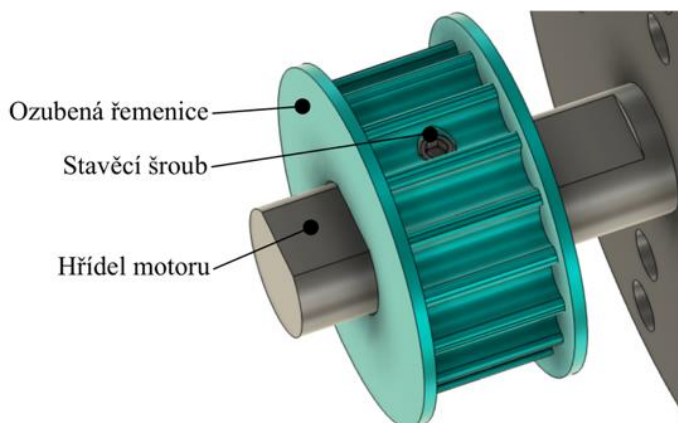
Obr. 34.: 3D model – Kolo hnané



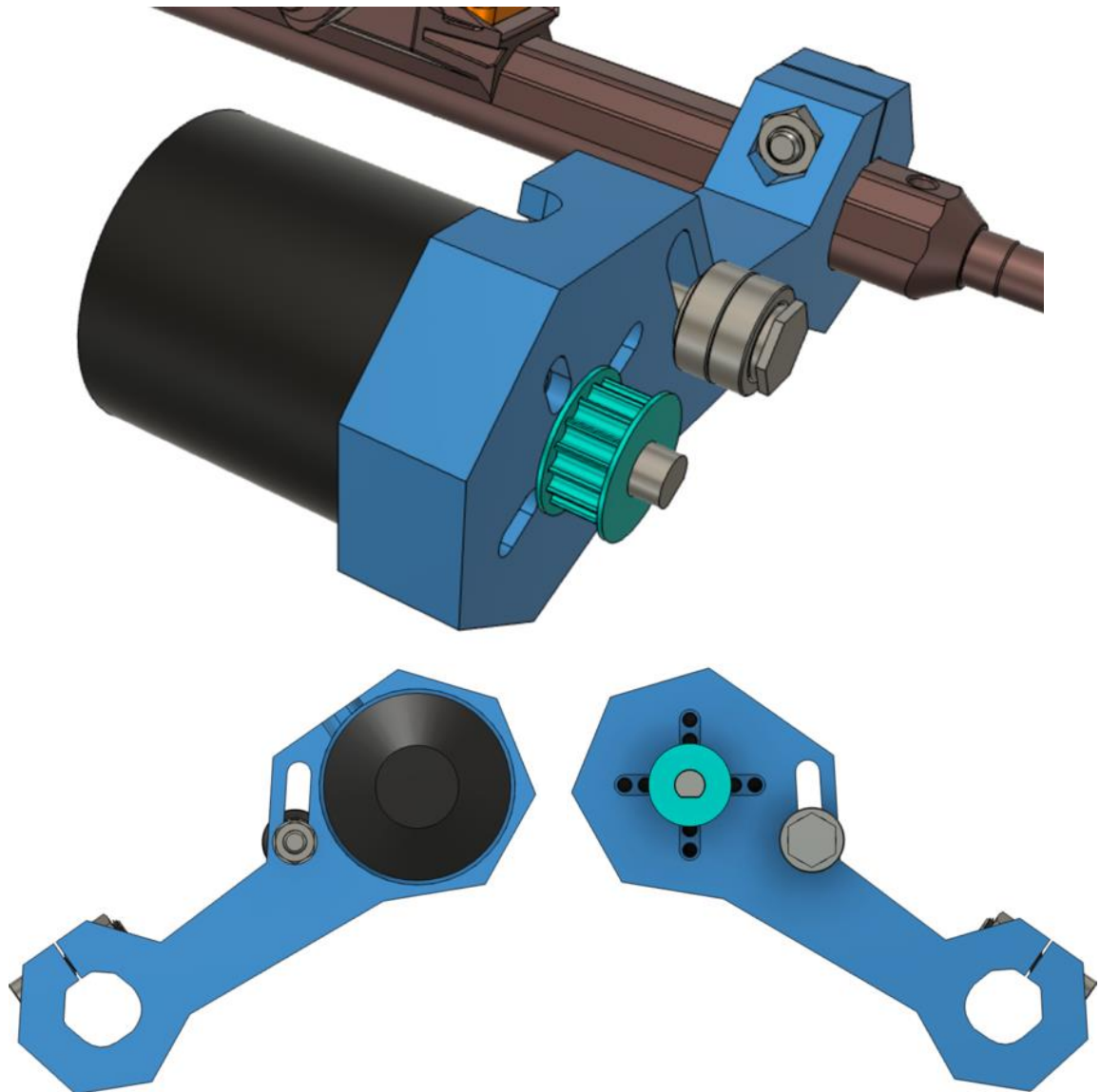
Obr. 35.: 3D model – součásti hnaného kola

6.6 Držák motoru

Držák motoru je připevněn pomocí imbusového šroubu a matice k tělu trucku. Pro fixaci držáku bylo zvoleno rozdělení součásti v místě šroubového spoje. Po utahnutí imbusového šroubu funguje jako dostatečně pevný spoj. Při konstrukci bylo bráno na vědomí vývodu kabelů střídavého motoru, a proto je v místě zhotoven výřez pro kabeláž. Uchycení motoru v držáku zajišťuje osm imbusových šroubů. Otáčivý a kroutivý moment je přenášen pomocí systému ozubených řemenic a řemene HTD s profilem zubů 5M o délce 500 mm, kterého si lze povšimnout na Obr. 38. Zajištění posuvu hnané řemenice v podélném směru je zabezpečeno stavěcím šroubem M3. Pro napnutí řemene bylo využito napínací kladky, složené ze soustavy ložisek 608 RS2 a šroubu s podložkami a pojistnou maticí. Napínací kladka má dostatečný rozsah pro napnutí řemene.



Obr. 36.: 3D model – detail stavěcího šroubu



Obr. 37.: 3D model – Držák motoru

6.7 Pohon

Pohon se skládá z hnaného kola, které je poháněno elektrickým střídavým motorem. Přenos otáčivého pohybu a kroutivého momentu zajišťuje soustava řemenového pohonu, který se skládá z ozubených řemenic a řemene. Převodový poměr soustavy byl stanoven na hodnotu 1:4,5, a to z důvodu využití dosažení dostatečné rychlosti a síly převodu, která je potřebná v terénu do strmých kopců. Počet zubů na hnané řemenici byl stanoven na 72 zubů a pro hnanou řemenici 16 zubů. Pro výpočet otáček bylo použito rychlostní konstanty motoru, jež je uvedena v technických parametrech, dále velikost elektrického napětí baterie, a v poslední řadě koeficientu efektivity, který do rovnice přináší veličinu zatížení motoru, (bez dané konstanty jsou to pouze otáčky motoru bez zatížení).

Pro výpočet pohonu bylo využito vzorců:

Otáčky motoru:

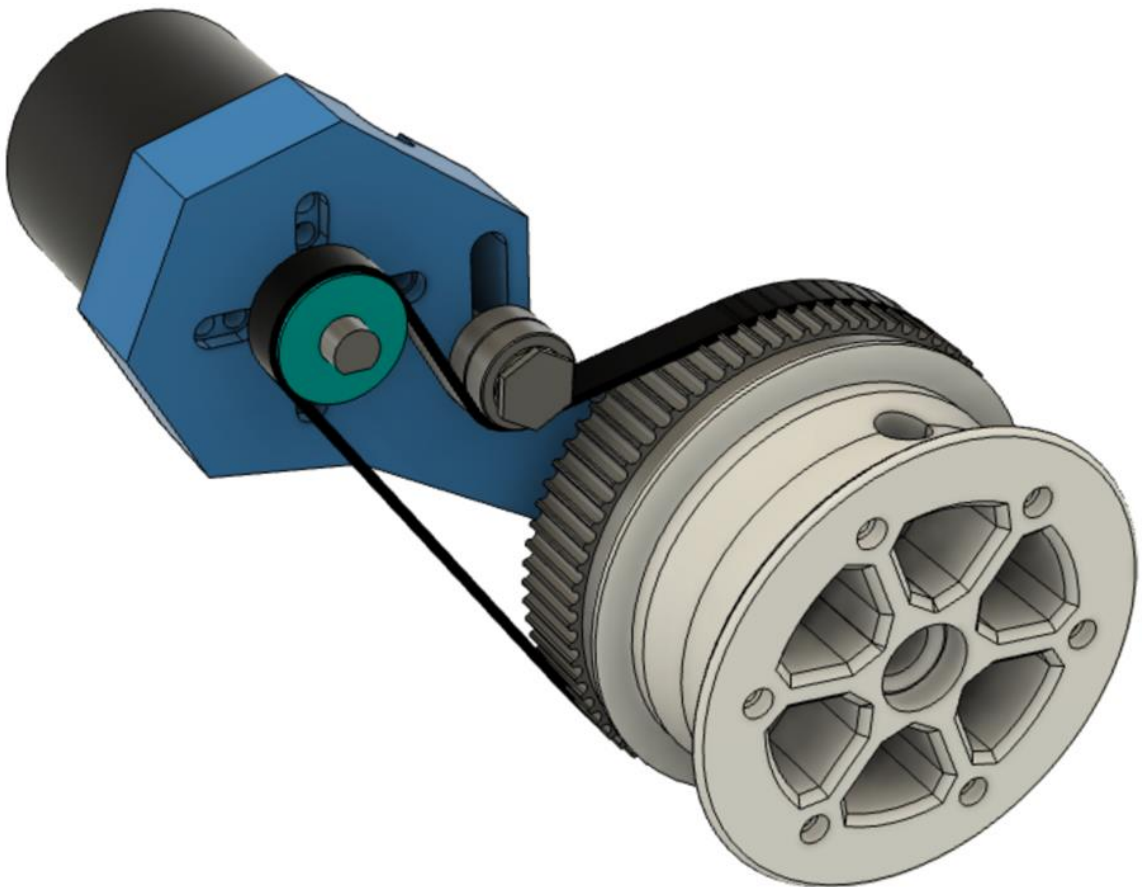
$$Ot = \text{rychlostní konstanta motoru} \cdot \text{napětí baterie} \cdot \text{efektivita} = \quad (5)$$
$$Ot = Kv \cdot V = 120 \cdot 36 \cdot 0,8 = 3456 \text{ ot/min}$$

Řemenový převod:

$$i = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{72}{16} = 4,5 \quad (6)$$

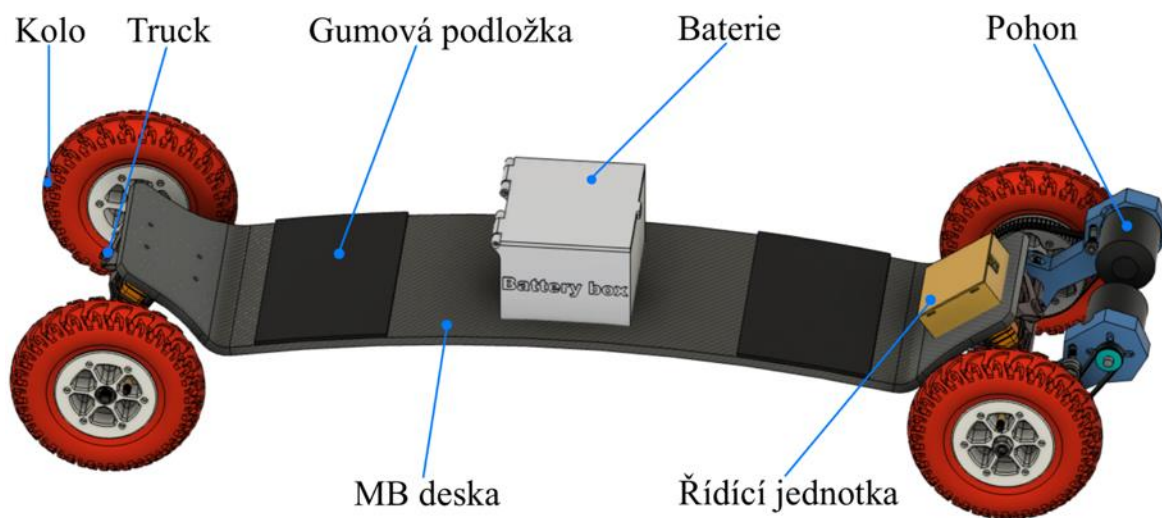
Maximální rychlost:

$$v_{max} = \text{otáčky} \cdot \text{převodový poměr} \cdot \text{obvod kola v km} \cdot \text{konstanta km/h} = \quad (7)$$
$$v_{max} = 3456 \cdot 0,222 \cdot 0,000628319 \cdot 60 = 28,9 \text{ km/h}$$



Obr. 38.: 3D model – Pohon

6.8 Celková sestava



Obr. 39.: 3D model – Celková sestava

7 3D TISK

V kapitole 3D tisk budou rozebrány parametry jednotlivých dílů a tiskový čas součástí. Jako materiál pro všechny tištěné díly bylo zvoleno CPE. Jenž je 3D tiskový materiál používaný pro konstrukční aplikace. Jedná se o polymer z kopolyesteru, materiál je odolný a houževnatý. Pevnost v tahu podle normy ASTM D638 je udávána 48 MPa.

Pro tisk bylo využito průmyslové tiskárny TRILAB AzteQ Industrial, jež disponuje tiskovým prostorem v průměru 300 mm a 400 mm na výšku. Součástí tiskárny je aktivně vyhřívaná komora, která je schopná trvale udržovat až 80°C. Jako program pro přípravu G-kodu pro tiskárnu byl využit PrusaSlicer 2.4.

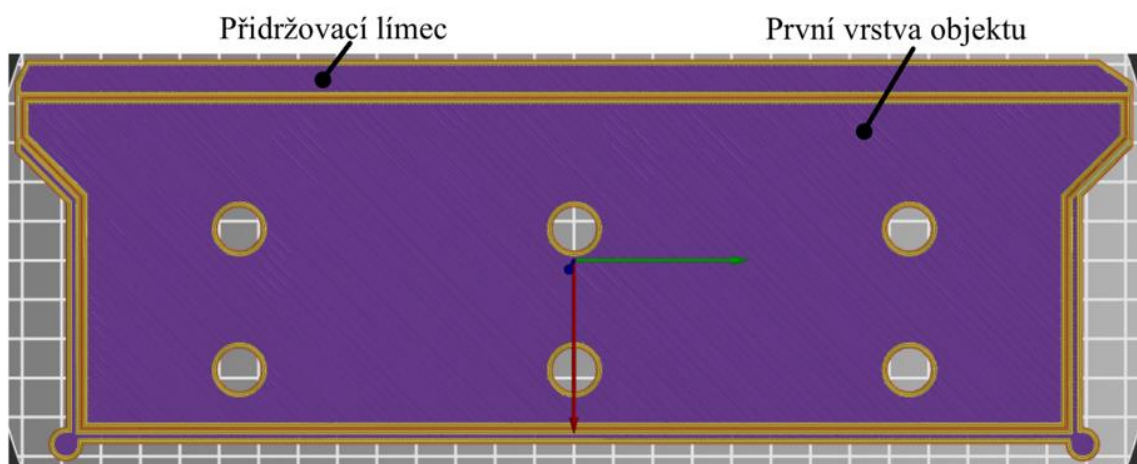


Obr. 40.: TRILAB AzteQ Industrial [32]

7.1 Tisk formy

Jako první součást byla zhotovena forma pro výroku kompozitní desky. Parametry 3D tisku byly následující, výška vrstvy 0,3 mm pro rychlejší zhotovení, pro detailnější tisk se využívá až vrstev 0,1 mm. Perimetry (množství obrysových stěn) bylo nastaveno na hodnotu 5 perimetrů a procentuální výplň tištěného dílu byla 20 %. Jako teplotní nastavení pro materiál CPE bylo nastaveno pro vyhřívanou trysku 265 °C, pro teplotu podložky 80 °C a pro teplotu vyhřívané komory 55 °C.

Součástí všech tištěných částí formy jsou přídržovací límce. Ty byly zhotoveny v 3D programu před samotným zahájením tisku. Důvodem bylo předejít zvedání rohů tištěného objektu, které je způsobováno smrštěním materiálu. Detailní zobrazení límce lze vidět na *Obr. 41*. Je možné využít i systémových funkcí PrusaSliceru, který disponuje funkcí límec, jež vygeneruje kolem objektu límec v požadované šířce, ale pouze v jedné vrstvě. Vytvořený přídržovací límec byl tvořen ve 3 prvních vrstvách. Díky tomu kraje tištěné formy nejsou tak náchylné ke zvedání od podložky.

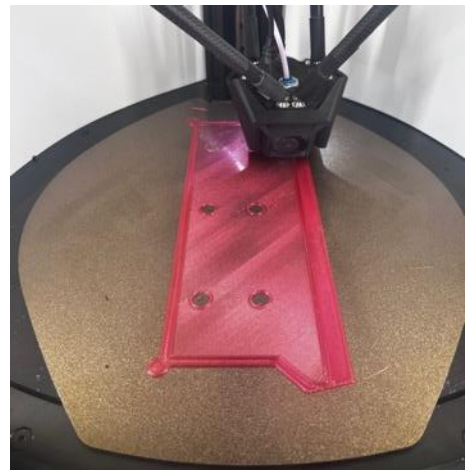
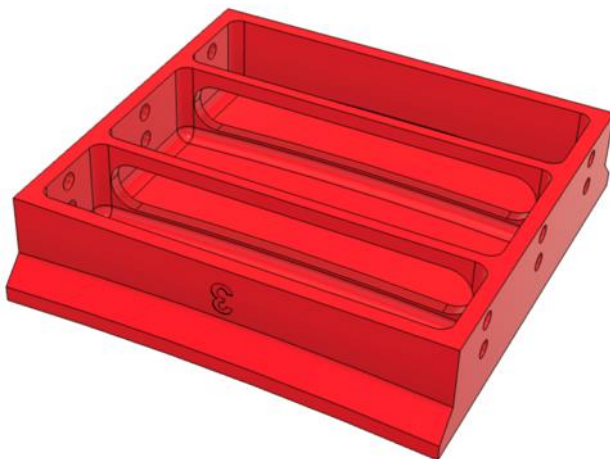


Obr. 41.: 3D tisk – První vrstva

Celková doba tisku všech částí formy je vypsána v *Tab. 3*. Lze všimnout trendu, že hmotnost tištěného dílu formy nepřesahuje hodnotu 750 g. Důvodem je hmotnost cívky materiálu, která je vyráběna o dané hmotnosti. Prostřední a největší část formy s číslem označení 3 je z tohoto důvodu konstruována žebrované odlehčení, které má za následek menší spotřebu materiálu a díl je možné zhotovit při stejných parametrech jako předešlé díly, a zároveň je dodržena limitní podmínka hmotnosti.

Tab. 3.: Čas a hmotnost materiálu pro 3D tisk formy

	Hmotnost (g)	Čas (h)
Forma – část 1	686	34,5
Forma – část 2	715	33,3
Forma – část 3	739	44
Forma – část 4	710	32,8
Forma – část 5	683	34,2
Celková hmotnost	3533	178,8 (7,45 dne)



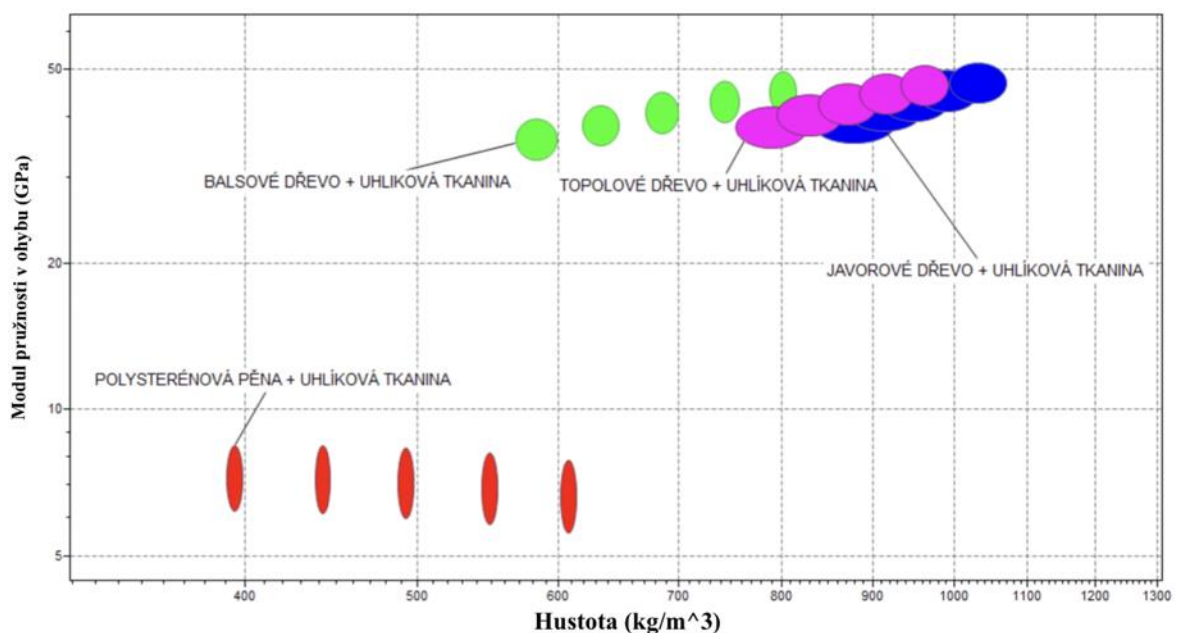
Obr. 42.: 3D tisk – Část formy díl 3 (odlehčená část)

7.2 Tisk dalších komponentů

Tisk veškerých komponentů součásti mountainboardové desky, jako jsou těla kol, držáky motorů, hnaná a hnací ozubená řemenice, a kryty elektronických součástek probíhal za stejných parametrů. Výška tištěné vrstvy 0,15 mm, množství perimetrů 5 a 100 % výplň. Celkový čas tisku všech součástí byl stanoven na 146,1 hodin.

8 VOLBA KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU

Při volbě kompozitního materiálu pro mountainboardovou desku bylo využito programu CES Granta EduPack 2021, který disponuje rozsáhlou knihovnou materiálů. Pro vytvoření grafu bylo zvoleno sendvičových struktur, dále stanoven materiál potahu, jádra a jejich tloušťka, která se pohybuje od 1-2 mm. Lze si povšimnout v grafu (Obr. 43), jak se podle tloušťky mění ohybový modul (s rostoucí tloušťkou, která je úměrná hmotnosti a tím i celkové hustotě sendviče, roste modul pružnosti v ohybu). Který při roste s tloušťkou potahové tkaniny. Poté bylo vytvořeno několik kombinací pro srovnání, které lze vidět v grafu na Obr. 43 závislosti ohybového modulu pružnosti na hustotě. Daný graf sloužil k pozorování vlastností materiálů uvažovaných jako potenciálně vhodné pro sendvičové jádra mountainboardu. Jako alternativa dřeva byla vybrána i možnost pěněného materiálu, který má řádově nižší hustotu.

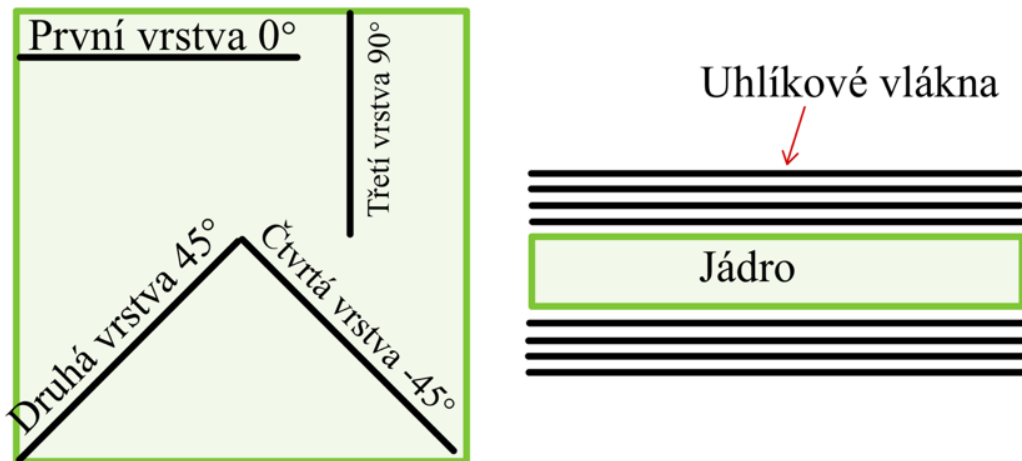


Obr. 43.: Graf závislosti ohybového modulu pružnosti na hustotě

8.1 Výroba zkušebních těles pro tříbodovou zkoušku ohybem

Pro výrobu zkušebních těles bylo použito jednosměrných uhlíkové tkaniny o hmotnosti 300 g/m² s kombinací s jádrem. Bylo použito dvou různých typů jader, které byly zvoleny pomocí programu CES Granta EduPack 2021. V prvním případě bylo použito balsové dřevo a jako alternativní druhá možnost bylo využito materiálu s obchodním názvem Graupner Vector Boards. Daný materiál byl identifikován jako polystyren podle hustoty a zkoušky plamenem. Plamen zapáleného vzorku byl svítivý s čadivým efektem, který poté tvořil saze.

Uhlíková tkanina byla pokládána kvazi izotopně na jádro ve směrech 0° , 45° , 90° , -45° ve čtyřech vrstvách z každé strany, jak je zobrazeno na Obr. 44. Pro výrobu zkušebních těles byla použita technologie ruční laminace s následným odsátím přebytečné pryskyřice pomocí vakua.



Obr. 44.: Orientace vláken

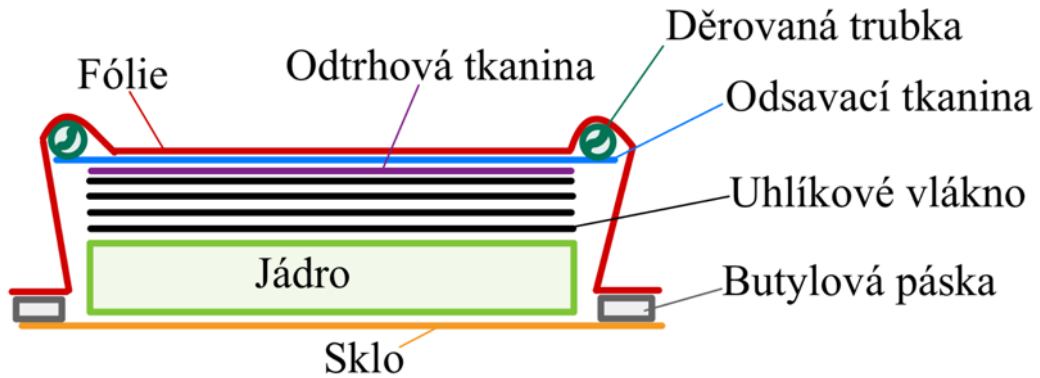
Pro testování těles byla zvolena norma ASTM C 393, která je vhodná pro testování ohybu kompozitních sendvičů. Podle normy byl stanoven rozměr tělíska pro ohybovou zkoušku, rozměr je limitován minimální šířkou, která nesmí být menší než dvojnásobek tloušťky a zároveň větší než šestinásobek tloušťky. Při výrobě tělísek byla naměřená tloušťka pro vzorky s jádrem z balsového dřeva na hodnotu 7,8 mm a materiálu Graupner Vector Boards bylo naměřeno 9,2 mm. Zvolené rozměry obdélníkového tvaru byly v rozměrech 200x20 mm.

8.2 Postup výroby zkušebních těles

Pro výrobu zkušebních těles byly vyrobeny sendviče, které se skládaly z uhlíkové tkaniny s kombinací balsového dřeva v prvním případě a pro druhý typ tělísek bylo použito materiálu polymerní pěny. V následujícím popisu je popisována pouze výroba z uhlíkové tkaniny s kombinací balsového dřeva, protože výroba s materiálem Graupner Vector Boards probíhala identickým technologickým postupem. Postup zkušebních tělísek byl zvolen tak, aby odpovídal postupu výroby mountainboardové desky.

Výroba započala nanesením separátoru na tabuli skla (formu). Separátor byl aplikován dle doporučení výrobce krouživým pohybem ve třech vrstvách. Každá vrstva byla ponechána 5 minut a důkladně rozleštěna pomocí papírového ubrousku. Následovalo dělení balsového

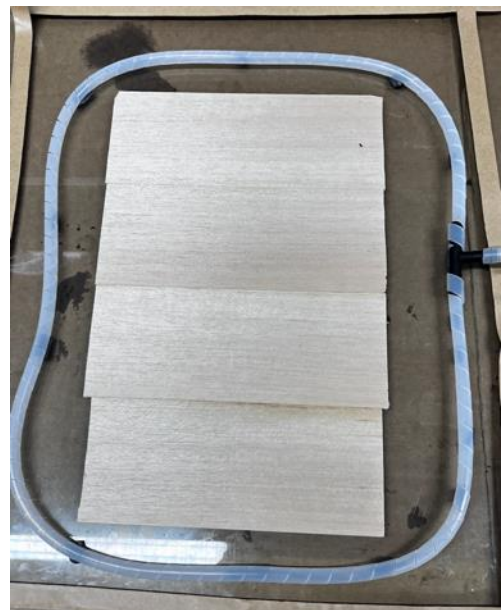
prkénka o rozměrech 100x1000x5 mm na 4 kusy o rozměrech 100x250 mm, které poté byly slepeny sekundovým lepidlem na desku o rozměrech 400x250 mm, ze které pak bylo možné nařezat zkušební tělesa.



Obr. 45.: Schématický obrázek výroby první strany sendviče



Obr. 46.: Nanesení separátoru



Obr. 47.: Balsa bez uhlíkové tkaniny

Dalším krokem bylo nastříhání jednosměrné uhlíkové tkaniny a potřebných technologických materiálů, jako jsou odtrhová a odsávací tkanina, fólie pro utěsnění a odsávacích trubek pryskyřice. Pro ušetření času bylo nastříháno všech 8 vrstev i pro následující výrobu (4 vrstvy pro každý potah sendviče). Pro stanovení potřebné hmotnosti pryskyřice byly zváženy nastříhané tkaniny a bylo přidáno 10 % hmotnosti. Poté následovalo nalepení butylové těsnicí pásky kolem obvodu vyráběného sendviče. Jako matrice byla použita epoxidová pryskyřice LH 160. Tento reaktiplastický systém je vhodný pro technologii ruční laminace a to v kombinaci s univerzálním tužidlem H 536. Epoxidová pryskyřice s tužidlem byla

míchána v poměru určeným výrobcem (100:35). V materiálovém listu tužidla je udávaná doba zpracovatelnosti 60-80 minut, což je pro danou aplikaci vhodné. Pro nanesení matrice na jádro bylo využito štětce a pěněného válečku. Nanášení probíhalo ve všech vrstvách totožně, využitím štětce bylo po celé ploše nanášeno matrice, následně položena tkanina v požadovaném směru vláken, rozválečkována pěněným válečkem a znovu nanášena pryskyřice pomocí štětce.



Obr. 48.: První vrstva uhlíkové tkaniny



Obr. 49.: Odsátí přebytečné pryskyřice

Po položení všech vrstev tkaniny, byla na nasycená uhlíková vlákna aplikována odtrhová a odsávací tkanina se systémem děrované a odsávací trubice. V dalším kroku bylo použito vakuovací fólie, která byla přilepena k butylové těsnící pásce. Při finálním kroku byla odsávací hadice připojena k odpadní tlakové nádobě pro přebytečnou pryskyřici, jež byla napojena na vývěvu. Ta vytvořila vakuum, jehož působením došlo k odsátí přebytečné pryskyřice do odsávací tkaniny přes odtrhovou tkaninu, která zabezpečuje snadné oddělení technologickým materiálům od výrobku.

Následující den byl odstraněn technologický materiál a zkontrolována vyrobená deska. Takto vyrobená část sendviče (jádro a první potah) je zobrazena na *Obr. 50* a *Obr. 51*.

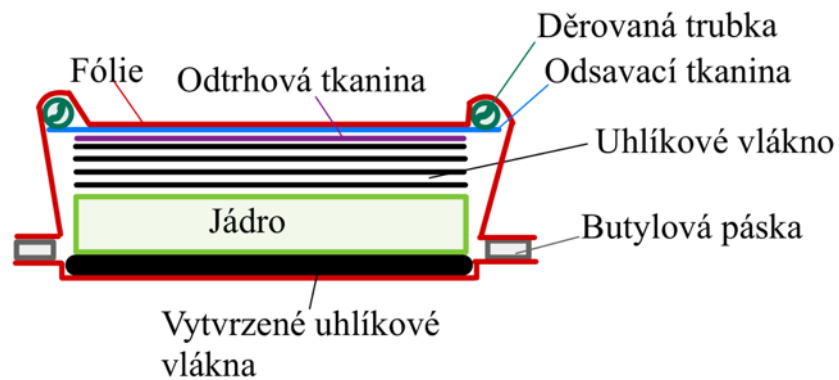


Obr. 50.: Sendvičová deska – pohled ze strany následného nanášení uhlíkové tkaniny



Obr. 51.: Kompozitní deska – pohled na vytvrzenou uhlíkovou tkaninu

Při následující výrobě již nebylo použito tabule skla, ale vakuovací fólie jako podklad pod vyráběný sendvič (Obr. 53). Z důvodu, který již byl zmíněn dříve, a to pro zachování stejného výrobního postupu jako u budoucího kompozitního sendviče. Kromě této změny, byla dodržena stejná technologie výroby jako pro první stranu sendviče.



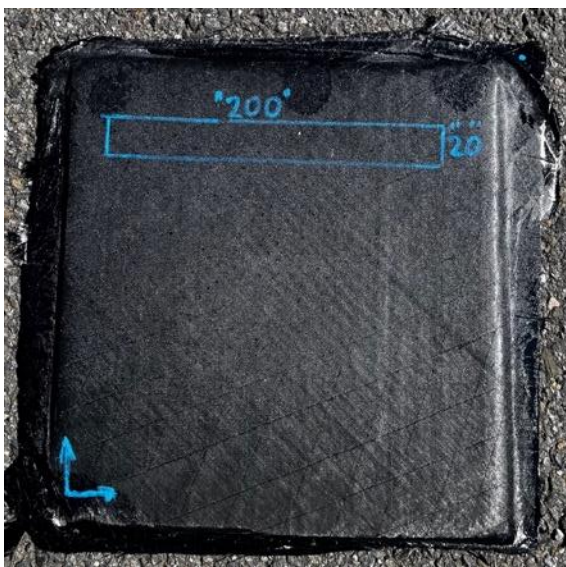
Obr. 52.: Schéma obrázku výroby druhé strany sendviče



Obr. 53.: Výroba těles

8.3 Nařezání zkušebních těles

Pro nařezání zkušebních tělísek bylo využito technologie vodního paprsku. Daná technologie byla zvolena z důvodu, aby nebylo tepelně poškozeno jádro kompozitního sendviče (balsové dřevo a polystyrenová pěna). K tomuto jevu by došlo například při využití laserového paprsku. Před předáním pracovníkovi vodního paprsku bylo na desky vyznačeno rozměr a orientace tělísek pro případné předejití chybného nařezání. Protože u vyrobené desky tělísek bylo zásadní dodržení orientace. A to kvůli balsovému dřevu, protože mountainboardová deska bude namáhaná podélně vůči létům dřeva.

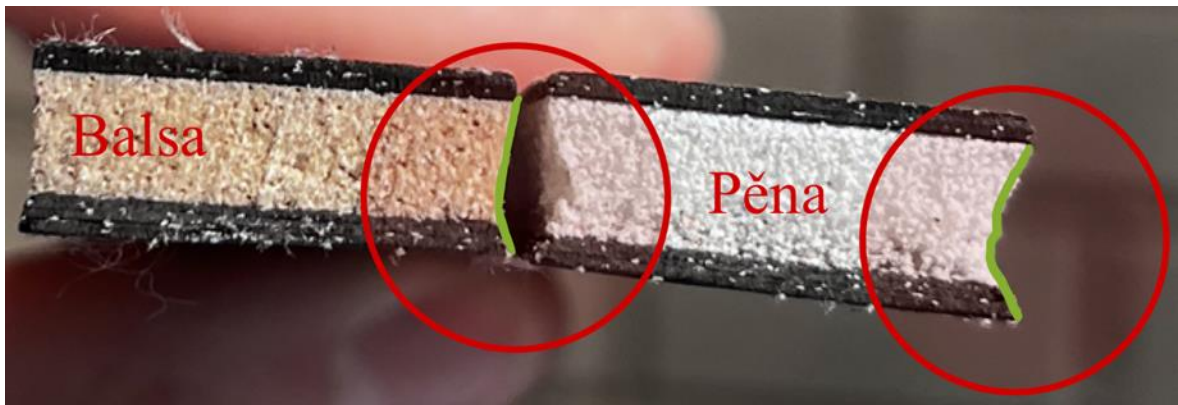


Obr. 54.: Kompozitní deska přichystána pro řezání vodním paprskem



Obr. 55.: Tělíska nařezána pomocí vodního paprsku

Při řezání vodním paprskem vznikl v průřezu zkušebních tělísek defekt, který lze vidět ve vyznačeném červeném poli na Obr. 56. U zkušebních tělísek s balsovým dřevem byl úhel podřezání menší než ve srovnání s pěnovým materiálem. Pěnový materiál má horší odolnost vůči vniku cizím tělesům a materiál se lépe deformuje. Daný problém vzniká, při nárazu vodního proudu na první vrstvu uhlíkové tkaniny, kde vodní paprsek rychle ztrácí svoji energii a roztrhne se. Poté vzniká defekt podřezání, u balsového dřeva je to spíše mírný úhel. U polystyrenové pěny to lze definovat jako rádius.



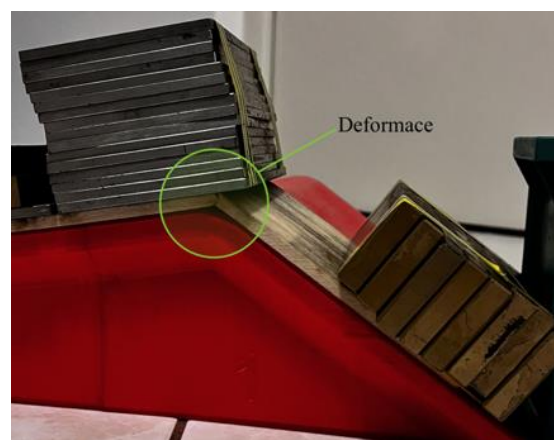
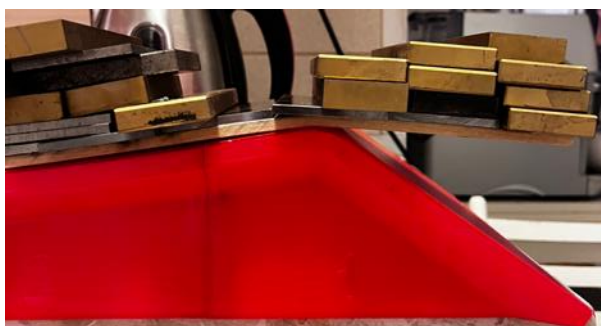
Obr. 56.: Defekt po řezání vodním paprskem

9 OHÝBÁNÍ JADER DO FINÁLNÍHO TVARU DESKY

Po předání tělísek na nařezání bylo započato ohýbání jádrového materiálu do tvaru desky. Bylo využito vytištěné formy pro dosažení výsledného tvaru desky. Použité nástroje pro vytvarování balsového dřeva bylo použito parního přístroje, jež generoval páru. Pro pěnový materiál byla použita horkovzdušná pistole s možností nastavení teploty vyfukovaného vzduchu, který byl nastaven na 70°C. Při dělení materiálu bylo využito metrového železného pravítka a skalpelu. Při ohýbání bylo využito železných podložek jako závaží.

9.1 Tvarování balsového dřeva

Jako první bylo ohýbáno balsové dřevo, jak lze vidět na *Obr. 57*. Dřevo bylo napařováno pomocí parního přístroje. To se ukázalo jako nedostatečná metoda pro ohýbání balsového dřeva. Dalším krokem bylo ponoření balsového dřeva do horké vody po dobu 60 minut. Poté bylo balsové dřevo pokládáno na formu a pomocí zátěží formováno. I přes nasycení dřeva horkou vodou bylo dřevo v největším úhlu poškozeno a po odstranění závaží balsové dřevo nedrželo požadovaný tvar výrobku.



Obr. 57.: Formování balsového dřeva

9.2 Tvarování pěny

Při tvarování polystyrenové pěny bylo použito horkovzdušné pistole nastavené na teplotu 70°C. Teplota byla určena pomocí jednoduchého testu, a to postupným přidáváním od teploty 30°C až po finálních 70°C. Teplota nad 70°C způsobovala bobtnání pěny. Tvarování probíhalo postupným nahříváním a ohýbáním o formu. Po odstranění závaží polystyrenová pěna kopírovala požadovaný tvar formy a držela stály tvar.



Obr. 58.: Formování polystyrénové pěny

10 TESTOVÁNÍ

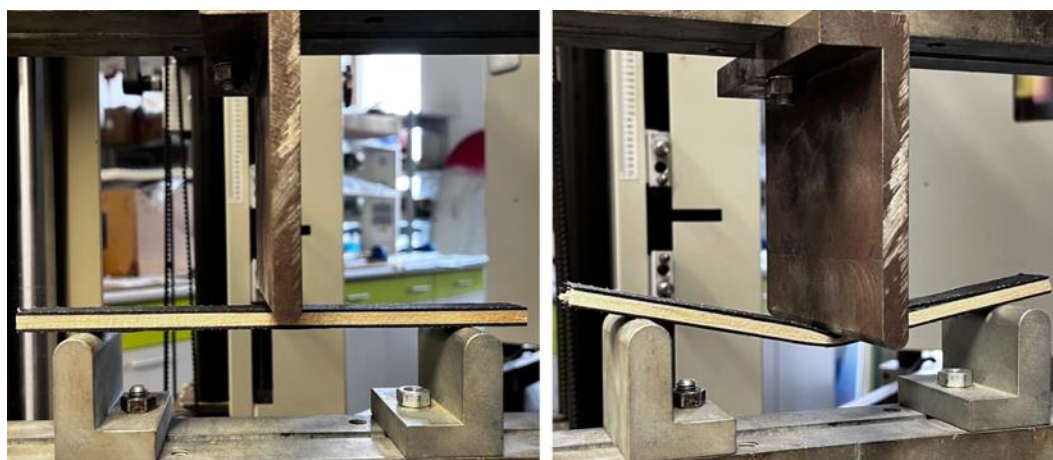
Ohybová zkouška probíhala podle normy ASTM C 393.

10.1.1 Tělesa s jádrem balsaového dřeva

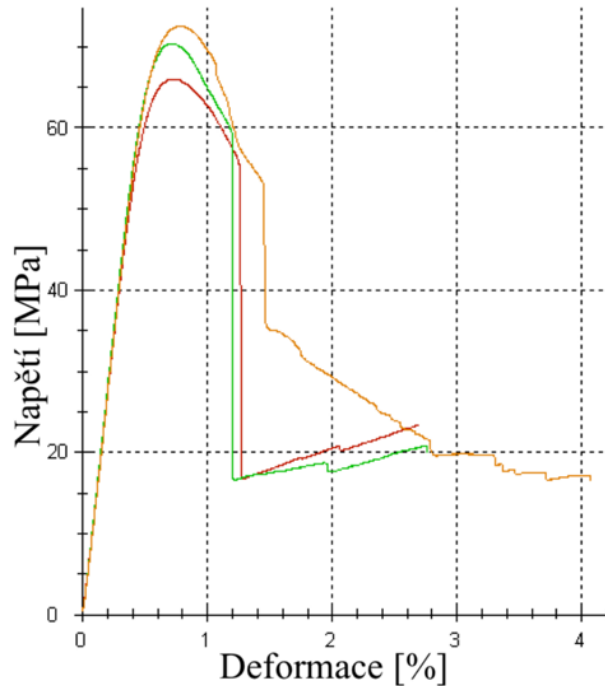
Prezentaci výsledků lze vidět v tabulce níže. Hodnota ohybového modulu byla stanovena na 14,1 GPa. Vzorky balsy se při zatížení přibližně 375 N prohnuly o hodnotu 3,5 mm v průměru.

Tab. 4.: Výsledky tříbodové zkoušky ohybem – jádro balsa

Balsa	modul pružnosti v ohybu		maximální síla		průhyb
	E [GPa]	F max [N]	σ [MPa]	dL [mm]	
1. vzorek	13,8	355	66,0	3,5	
2. vzorek	14,4	379	70,4	3,4	
3. vzorek	14,1	390	72,5	3,7	
Průměr	14,10	374,7	69,7	3,5	
Směr.odch.	0,30	17,9	3,3	0,2	



Obr. 59.: Ohybová zkouška – jádro balsa



Obr. 60.: Výsledek ohybové zkoušky – jádro balsa
Graf závislosti napětí na deformaci

10.2 Tělesa s jádrem polystyrénové pěny

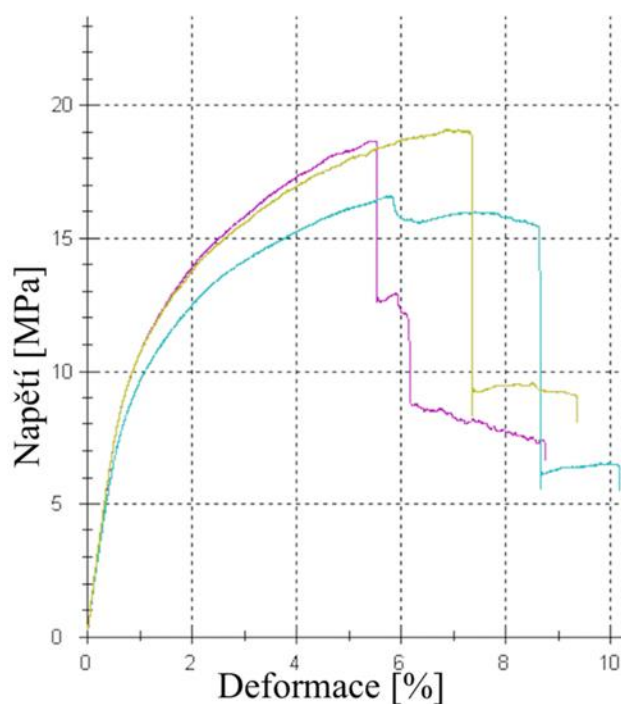
Polypropylenová pěna má sama o sobě řádově nižší tuhost, byla vybrána jako alternativa pro zkušební testy. Ohybový modul sendviče s použitím daného jádra byl stanoven na hodnotu 1,46 GPa, který je desetkrát nižší, než u balsového dřeva. Dosažená hodnota průhybu byla sedmkrát vyšší než u balsového dřeva (24,7 mm oproti 3,5 mm). Tento průhyb nastal při maximální síle 135 N, což je takřka třetinová hodnota oproti výsledkům sendviče s balsovým jádrem.

Tab. 5.: Výsledky tříbodové ohybové zkoušky – jádro pěna

Pěna	modul pružnosti v ohybu	maximální síla		průhyb
	E [GPa]	F max [N]	σ [MPa]	dL [mm]
1. vzorek	1,51	140	18,7	22,5
2. vzorek	1,37	124	16,6	23,4
3. vzorek	1,52	143	19,1	28,1
Průměr	1,46	135,7	18,1	24,7
Směr.odch.	0,08	10,2	1,4	3,0



Obr. 61.: Ohybová zkouška – jádro pěna



Obr. 62.: Výsledek ohybové zkoušky – jádro pěna
Graf závislosti napětí na deformaci

10.3 Modifikovaná výroba vzorků

Podle výsledků z tříbodové ohybové zkoušky bylo zjištěno, že zkušební tělíska nejsou dostatečně dimenzována a při následné výrobě desky z dané kompozice by došlo k porušení struktury moutainboardové desky. Proto byla vyrobena nová zkušební tělíska s kombinací uhlíkových a skelných vláken a novým jádrem pro sendvič kvůli předešlým komplikacím ohýbání balsového dřeva, jenž při ohýbání v největším úhlu praskalo, a nedostatečným vlastnostem polystyrénové pěny. Proto byl zvolen nový materiál, topolová překližka, která má sice vyšší hustotu, než balsové dřevo a bude o něco těžší, ale jde jednodušeji tvarovat, a

skládá se pouze z jednoho kusu. Modifikovaná skladba byla zpětně přidána do grafu ohybové tuhosti na *Obr. 43.* jako srovnání s ostatními vyráběnými materiály. Při volbě nového jádra bylo v první řadě odzkoušeno tvarování v kritickém místě. Po úspěšném tvarování byla zahájena výroba tělísek.

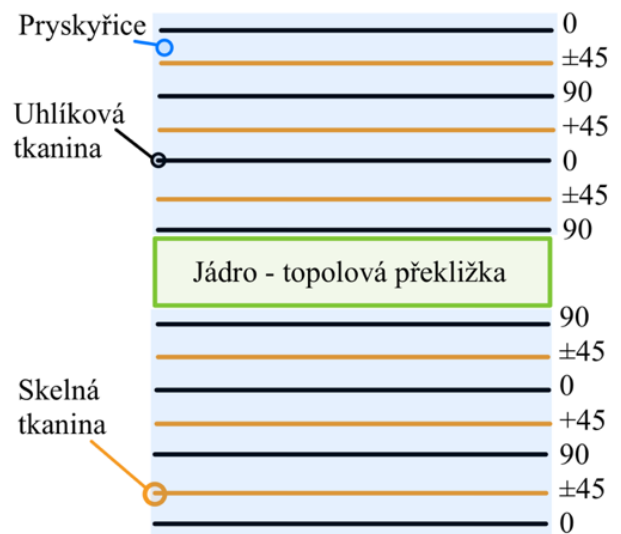


Obr. 63.: Test ohybu topolové překližky

Výroba modifikovaných tělísek probíhala stejným způsobem jako předešlá výroba zkušebních těles s tím rozdílem, že bylo použito navíc biaxiální skelné tkaniny o hmotnosti 200 g/m², která byla použita ve směrech ± 45 stupňů, pro ušetření uhlíkové tkaniny.

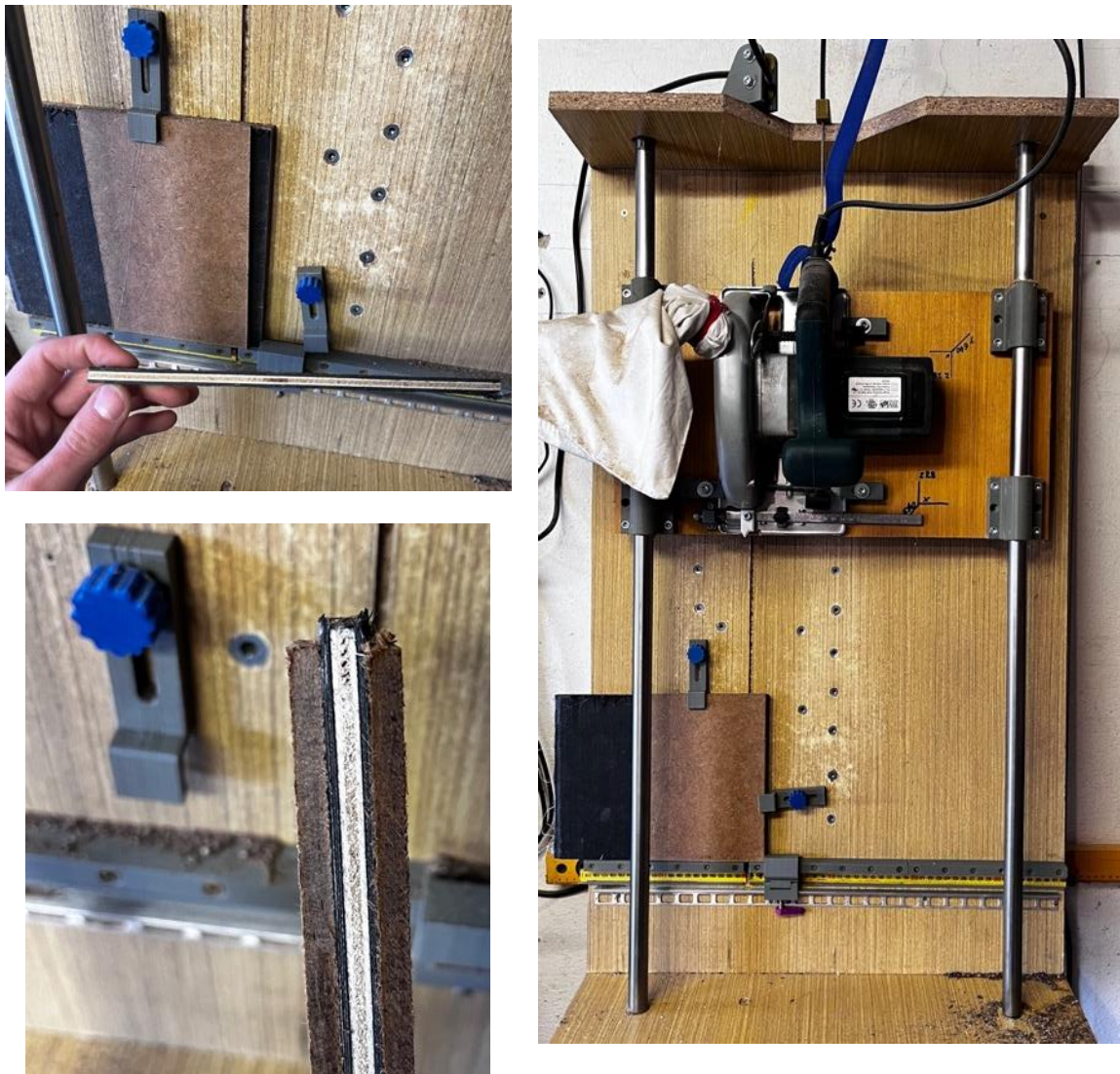


Obr. 64.: Výroba modifikovaných těles



Obr. 65.: Skladba potahu pro modifikované tělisko

Pro ušetření nákladů a času bylo pro nařezání modifikovaných tělísek použito přípravku, který lze vidět na *Obr. 66.*, na který je přidělena ruční okružní pila. Přípravek zajišťuje kolmost při řezání. Zahájení řezání bylo započato zkušebními řezy okrajů vyrobené desky. Po kladném zhodnocení, bylo pokračováno v řezání vzorků. Aby se vlákna nevytrhávala, bylo použito prokladů ze dřeva.



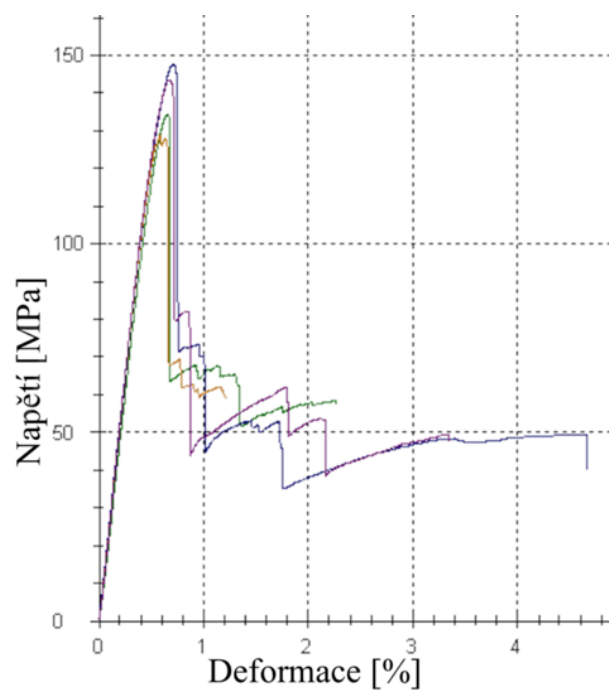
Obr. 66.: Řezání modifikovaných těles

10.3.1 Testování modifikovaných těles

Tělesa s jádrem topolové překližky a modifikovanou skladbou tkaniny měla výrazně lepší výsledky než předešlé vzorky. Při porovnání s balsovým dřevem a prvotní skladbou potahů má modifikovaná skladba s topolovým dřevem téměř dvakrát vyšší hodnotu modulu pružnosti ohybu, která odpovídá 26 GPa, při prakticky stejné hodnotě průhybu 3,6 mm jako sendvič s balsovým dřevem.

Tab. 6.: Výsledky tříbodové ohybové zkoušky – jádro topolová překližka

Topolová překližka	modul pružnosti v ohybu	maximální síla		průhyb
	E [GPa]	F max [N]	σ [MPa]	dL [mm]
1. vzorek	25	505	134	3,5
2. vzorek	26,2	622	148	3,8
3. vzorek	26,4	522	129	-
4. vzorek	26,6	591	143	3,6
Průměr	26,0	560	138	3,6
Směr.odch.	0,7	55	8	0,1

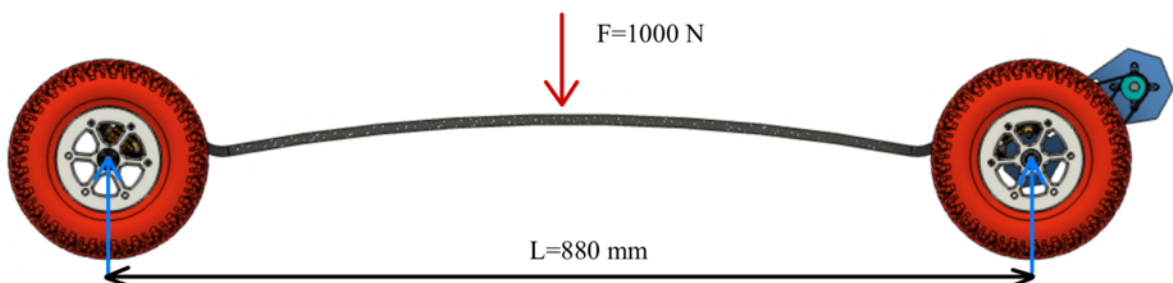
Obr. 67.: Výsledek ohybové zkoušky – jádro topolová překližka
Graf závislosti napětí na deformaci

Obr. 68.: Ohybová zkouška – jádro topolová překližka

10.4 Výpočet požadované únosnosti

Při provozním zatížení bude na sendvič působit síla vyvozená jezdce. Maximální síla F byla stanovena na hodnotu 1000 N (odpovídající hmotnosti jezdce 100 kg). Délka nosníku L je daná vzdáleností uchycení trucků na sendvičové desce mountainboardu. Nosník byl zjednodušeně řešen jako staticky určená konstrukce podle vztahu v rovnici (8), kde $M_{o_{max}}$ [Nmm] je maximální ohybový moment, W_o [mm³] je kvadratický modul pro obdélníkový průřez a b [mm] a h [mm] jsou rozměry průřezu sendviče.

$$\sigma = \frac{M_{o_{max}}}{W_o} = \frac{\frac{F \cdot L}{2 \cdot 2}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{\frac{1000 \cdot 880}{2 \cdot 2}}{\frac{230 \cdot 7^2}{6}} = \frac{440000}{1878,33} = 117,12 \text{ MPa} \quad (8)$$



Obr. 69.: Výpočet ohybového napětí

Výpočtem je dána minimální pevnost sendviče v ohybu 117 MPa. Tato hodnota je srovnána v následující tabulce s hodnotami, kterých bylo dosaženo při zkušebních testech.

Tab. 7.: Porovnání vlastností vyrobených sendvičových struktur

materiál jádra	počet vrstev tkaniny	modul pružnosti v ohybu [MPa]	maximální ohybové napětí [MPa]	vyhovuje
PS – pěna	8	1460	18,1	NE
balsové dřevo	8	14100	69,7	NE
topolová překližka	14	26000	138	ANO
mountainboardová deska	16	Netestováno	Netestováno	ANO

V tabulce výše jsou vypsány parametry vyrobených sendvičových struktur a jejich porovnání. V tabulce je navíc sendvičová skladba budoucího výrobku. V kapitole 11.2 je popsána finální skladba mountainboardové desky a její odůvodnění.

11 VÝROBA PROTOTYPU DESKY

Výroba mountainboardové desky započala tvarováním jádra. Následovala ruční laminace s vakuovým odsátím přebytečné pryskyřice a ve finálním kroku došlo k řezání do tvaru desky s následným zabroušením ostrých hran a nanesením pohledového nátěru pryskyřice, který byl vybroušen a vyleštěn.

11.1 Tvarování jádra

Finální výroba kompozitní desky započala tvarováním topolové překližky do tvaru budoucího výrobku. Tvarování probíhalo využitím parní konvice, a to postupným napařováním dřeva, které po napaření bylo více poddajné ke tvarování. Následně byla překližka fixována pomocí truhlářských svorek. Aby bylo předejito poškození budoucího kompozitního jádra, bylo využito podkladového dřeva, které zajišťovalo působení síly na celou plochu jádra a bránilo vtisku svorek.



Obr. 70.: Tvarování topolového jádra k tělu formy

Jádro formy bylo fixováno po dobu 10 dní a to kvůli vyschnutí topolové překližky a následnému zachování tvaru po odstranění svorek.



Obr. 71.: Tvarované jádro, po sundání z formy

11.2 Skladba potahu

Skladba tkanin pro finální výrobek je odlišná od skladby tkanin modifikovaných testovacích tělísek a to z důvodu využití veškeré nakoupené tkaniny a vylepšení vlastností výrobku. V případě modifikovaných testovacích tělísek bylo dosaženo hodnot ohybového modulu $E = 26000 \text{ MPa}$ a napětí 138 MPa . Oproti modifikovaným tělískům má finální skladba navíc celkově jednu vrstvu tkaniny v potahu (místo 7 vrstev bylo použito 8) a bylo přidáno dvou vrstev uhlíkové tkaniny ve směrech 45 stupňů, které výrobku zajišťují vyšší odolnost při smykovém namáhání v ploše.



Obr. 72. Skladba potahu pro mountainboardovou desku

Při stříhání jednosměrné uhlíkové tkaniny bylo využito úhloměru, pro přesné stanovení úhlu pro dělení tkaniny.



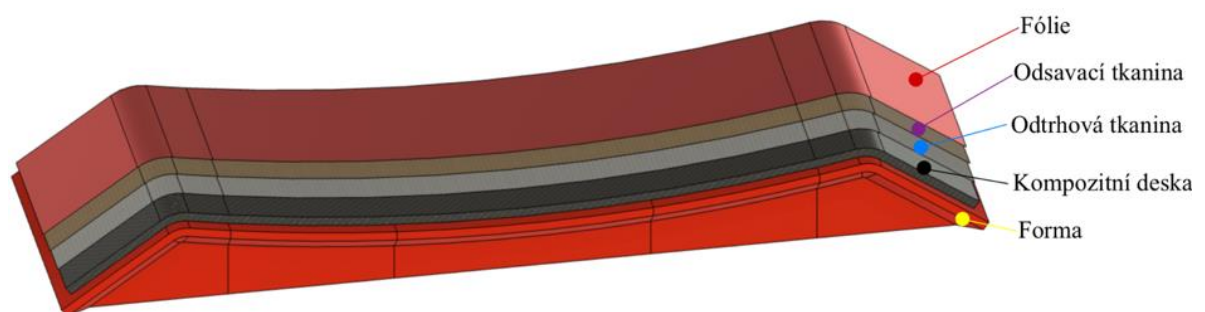
Obr. 73. Dělení tkaniny pro 45 stupňů

11.3 Výroba mountainboardové desky

Výroba mountainboardové desky probíhala následovně. V první řadě byla nastříhána potřebná tkanina pro 16 vrstev, a to 8 vrstev z každé strany kompozitní desky. Byly přichystány všechny potřebné pomůcky i nástroje a štětec, pomocí něhož byla nanášena pryskyřice, váleček, který sloužil pro roz distribuování matrice po celé ploše tkaniny, odtrhová tkanina, pomocí které dochází ke snadnému oddělení vyrobeného laminátu s ostatními materiály, odsávací tkanina, jež zajišťuje odsátí přebytečné pryskyřice, a v poslední řadě fólie s těsnící páskou pro udržení vakua, které je vytvořeno pomocí vývěvy s tlakovou nádobou pro přebytečnou pryskyřici. Na Obr. 74 je znázorněná skladba technologických materiálů.

11.3.1 Výroba spodní strany desky

Při výrobě mountainboardové desky bylo dodrženo stejného technologického postupu jako u výroby zkušebních těles. Na kompozitní jádro byla nanášena vrstva pryskyřice pomocí štětce, poté byla položena tkanina, která byla přitlačena pomocí válečku, jenž pomáhal distribuovat pryskyřici po celé ploše tkaniny. Při aplikaci veškerých vrstev kompozitních tkanin byly aplikovány technologické materiály. Následně byla forma s kompozitním materiálem vložena do folie s těsnící butylovou páskou a pomocí vývěvy odsát vzduch. Při odsátí vzduchu vzniklo vakuum. Přebytečná pryskyřice byla odsátá do tkaniny tomu určené, tlak vakua udržoval vrstvy u sebe tlakem jednoho baru. Poté byla soustava uzavřena využitím svorky, která byla uzavřena odvodovou hadicí. Díky tomu bylo zajištěno udržení vakua po ukončení odsávání.



Obr. 74.: Schéma skladby materiálů 1



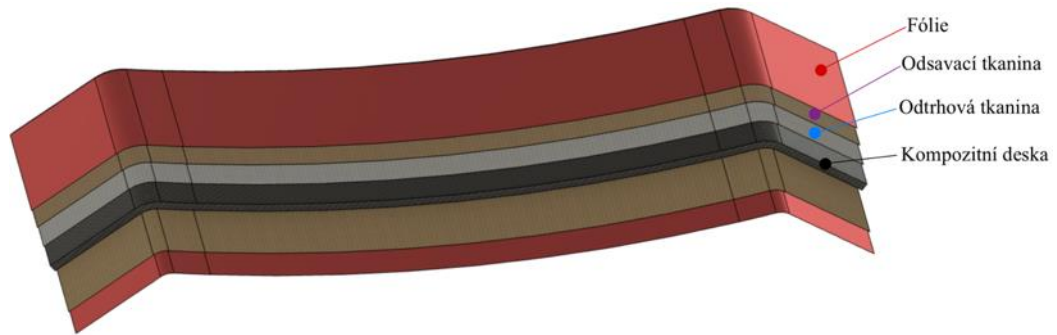
Obr. 75.: Fotografie výroby první části mountainboardové desky



Obr. 76.: Fotografie výrobku s formou po odstranění technologických materiálů

11.3.2 Výroba horní strany desky

Následující den byly odstraněny technologické materiály a zahájena výroba druhé strany kompozitního sendviče. Výroba probíhala identickým způsobem. Jen místo fólie byl použit stavební pytel z materiálu LD-PE, do kterého byla vložena deska mountainboardu. Stavební pytel byl využit z důvodu jednoduššího utěsnění a manipulace. Pro utěsnění byla využita butylová páska, která byla aplikována na hranu otvoru pytle. Aby bylo zabráněno protržení pytle bylo využito odsávací tkaniny, jež byla aplikována i ze spodní strany a to z důvodu předejití poškození těsnícího vaku, které by mohl způsobit vytvrzený laminát.



Obr. 77.: Schéma skladby materiálu 2

Na Obr. 78 je vyobrazena deska po provedení vakuace. Lze pozorovat, že do odsavací tkaniny bylo odsáto značné množství přebytečné pryskyřice. U kompozitních výrobků je pro požadovaný přenos napětí z vlákna na vlákno důležité, aby byl celý objem výztuže řádně prosycen matricí. Zároveň ale přebytečná matrice snižuje mechanické vlastnosti výsledného výrobku a zvyšuje jeho hmotnost.



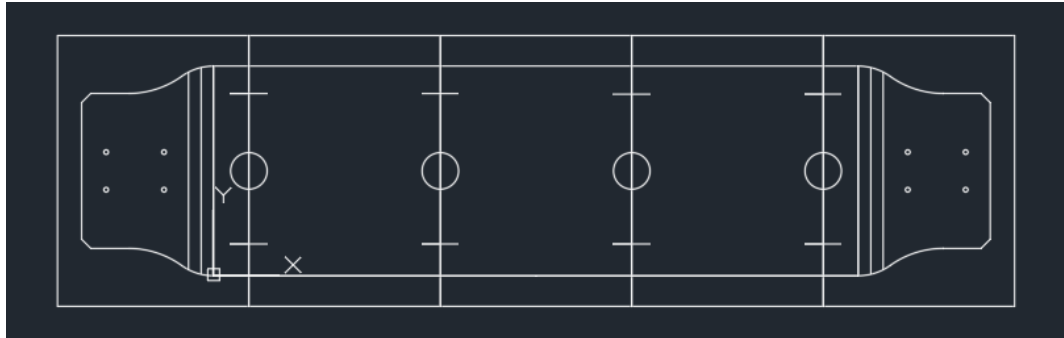
Obr. 78.: Fotografie výroby druhé části mountainboardové desky



Obr. 79.: Vytvrzená kompozitní deska

11.3.3 Ořezání do tvaru mountainboardové desky

Řezání desky bylo započato vytisněním rozvinutého tvaru desky na papír formátu A4. Pro přesnější srovnání hran k sobě, bylo v 2D nákresu vytvořeno čar a kruhů.



Obr. 80.: Rozvinutý tvar mountainboardu ve 2D formátu přichystaný pro tisk

Při slepení všech papírů následovalo vystřížení do požadovaného tvaru a nalepení na kompozitní desku. Papír sloužil pro vyznačení potřebných ořezů. Ty byly vyznačeny barevným lihovým popisovačem.



Obr. 81.: Vyznačení tvaru mountainboardové desky na vyrobenou desku

Při vyznačení obvodových hran mountainboardu bylo započato řezání. Jako nástroj pro řezání bylo využito úhlové brusky s kotoučem určeným pro ocel. Po vyřezání byl vyměněn řezný nástroj za brousící kotouč se zrnitostí 150. Který byl využit pro dosažení finálního tvaru. Při broušení a řezání bylo použito upínek pro držení desky.



Obr. 82.: Řezání do finálního tvaru výrobku

Při vrtání bylo použito vrtáku s průměrem 3 mm pro předvrtání díry. Až poté bylo využito vrtáku s průměrem 6 mm. Aby bylo zabráněno delaminování tkaniny při průniku vrtáku, bylo využito dřevěného podkladu.



Obr. 83.: Vrtání děr do kompozitní desky

Po ořezání byly okraje na šikmé ploše poškozeny roztřepáním vláken a delaminací vrstev, jak lze vidět na *Obr. 84*. Pro opravu vzniklé delaminace bylo využito nového nátosu pryskyřice, který byl nanesen mezi delaminované vrstvy. Následně stlačeno pomocí dvou železných plechů, mezi které byla vložena odtrhová tkanina.



Obr. 84.: Oprava delaminované tkaniny



Obr. 85.: Hotová moutainboardova deska



Obr. 86.: Finální prototyp mountainboardu

12 CENOVÉ ZHODNOCENÍ

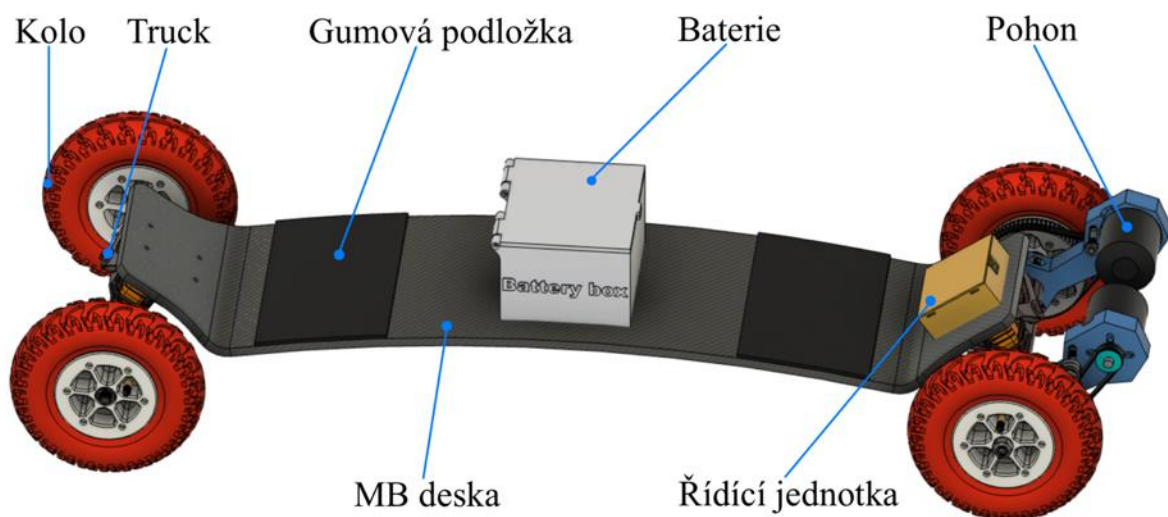
Cenové zhodnocení výroby prototypu je sumarizováno v Tab. 8. Nejdražším nákladem při výrobě byla cena 3D tisku, která je stanovena za zakázkový 3D tisk součástí 100 Kč / hodina. Cena se vypočítává z celkového času 3D tisku. Do daného času jsou zahrnuty pouze vytištěné komponenty, které jsou použity pro finální prototyp mountainboardu, kterému předcházelo mnoho prototypových návrhů jednotlivých součástí. Tiskový čas byl darován jako sponzorský dar pro diplomovou práci od společnosti Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.

Tab. 8.: Cenové zhodnocení výroby prototypu

Druh	Množství	Cena
Motory	2 ks	3660,-
Kontrolor	1 ks	2900,-
Trucky	2 ks	4478,-
Pneumatiky	4 ks	1144,-
Duše	4 ks	1084,-
Spojovací materiál	-	387,-
Ložiska	8 ks	116,-
Balsa	4 ks	384,-
Pěna	1 ks	239,-
Topolová překližka	1 ks	160,-
Uhlíkové vlákna	5 m ²	2813,-
Pryskyřice a tužidlo	3,5/1,5 kg	2975,-
řezání tělísek	-	560,-
Baterie	4 ks	5653,-
Tisk komponentů	325 h	32 500,-
Cena bez 3D tisku	-	26 553,-
Celková cena	-	59 053,-

13 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Pro diplomovou práci byl vytvořen 3D návrh součástí v programu Fusion 360. Celková sestava se skládá z mountainboardové desky, jež byla základním prvkem, od kterého se odvíjely všechny ostatní součásti. Při zhotovení tvaru desky byla dále navržena forma pro budoucí výrobu kompozitní desky. Forma se skládá z 5 částí a to z důvodu velikosti formy, která má na délku 1000 mm. Při takové velikosti by se nevezla na tiskovou plochu tiskárny. Jako náprava pro kola bylo zakoupeno trucků obchodním názvem *Metal Matrix II* společně s nápravou byly pořízeny i pneumatiky s dušemi. Pořízené součásti byly vytvořeny a vloženy do modelu sestavy. Dané součásti jsou jedinými pořízenými komponenty sestavy, všechny ostatní komponenty byly vyrobeny s výjimkou elektronických a normalizovaných komponentů. Na obrázku *Obr. 87* můžeme vidět všechny součásti sestavy, která je finálním návrhem, kterému předcházelo mnoho změn a prototypů, jež byly tištěny a odzkoušeny, zda jsou vhodně konstruovány. Tisk byl realizován na 3D tiskárně AzteQ Industrial od společnosti Trilab, z materiálu CPE, jenž je používán při 3D tisku jako konstrukční materiál. Celkový tisk součástí trval 325 hodin, což odpovídá 13,5 dne. Nejvíce časově náročný díl byla forma, která se tiskla 178,8 hodin.



Obr. 87.: 3D model sestavy

Při volbě kompozitního materiálu pro výrobu desky bylo využito programu CES Granta EduPack 2021. V programu bylo vytvořeno mnoho různých variant kombinací. Pro výrobu zkušebních těles bylo zvoleno balsaového dřeva jako jádra sendviče a jednosměrné uhlíkové tkaniny kladených v kvazi-izotropním složení jako potah sendviče. Pro srovnání bylo vybráno alternativního materiálu Graupner Vector Boards, jež byl vyhodnocen jako polystyrenová pěna.

Byla vytvořena zkušební tělíska pomocí ruční laminace a následného odsátí přebytečné pryskyřice. Vyrobené sendvičové desky byly nařezány na vodním paprsku. Mezičas vzniklý řezáním byl využit pro ohýbání zvolených jader. Při ohýbání balsového dřeva vznikly problémy v největším ohybovém místě, kde docházelo k deformacím dřeva. Naopak u polystyrénového jádra nevznikaly žádné problémy a jádro bylo formováno bez obtíží. Po obdržení nařezaných těles byla tělíska testována podle normy ASTM C 393 pro ohyb sendvičových struktur. Výsledky ohybových zkoušek byly pro obě varianty vyhodnoceny jako nedostatečné. Z důvodu zatížení jezdcem by se kompozitní deska v použité skladbě deformovala. Dále od využití balsového dřeva jako kompozitního jádra bylo upuštěno pro jeho deformaci při ohybu. Proto bylo zvoleno nového materiálu s modifikovanou skladbou tkaniny. Jako nový materiál byla využita topolová překližka. Před zahájením výroby modifikovaných vzorků pro testování bylo odzkoušeno tvárných vlastností topolového dřeva. Při úspěšném ohnutí zkušební vzorku byla zahájena výroba zkušebních vzorků. Vyrobená sendvičová deska využita pro zkušební tělíska byla nadělena na požadovaný rozměr pomocí přípravku s využitím okružní pily. Toto řešení bylo použito, pro ušetření času a finanční náročnosti řezání pomocí vodního paprsku. Po nařezání byla tělíska testována totožným způsobem jako předešlé ohybové zkoušky. Výsledek modifikovaných těles byl dostatečný pro využití mountainboardové desky.

Po úspěšném stanovení sendvičového jádra a skladby tkanin mohla započít výroba mountainboardové desky. Výroba probíhala ve více krocích, prvním krokem bylo ohnutí topolového dřeva do tvaru budoucí desky. Dalším krokem bylo nanesení první strany kompozitního potahu, odsátí přebytečné pryskyřice a následné vytvrzení. Na vytvrzený potah s topolovým jádrem byl nanesen vrchní potah kompozitního materiálu, u nějž bylo postupováno stejně jako u spodní vrstvy potahu. Vyrobená kompozitní deska byla tvarována do požadovaného tvaru pomocí úhlové brusky. Při řezání v krajích desky vznikla poškození, jež byla následně opravena. Pro lesklý povrch desky byla nanesena tenká vrstva pryskyřice, která byla poté vybroušena a vyleštěna.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá výrobním návrhem elektrického mountainboardu. Cílem práce bylo navrhnout výrobní postup pro kompozitní desku mountainboardu a jejích dalších komponentů jako jsou těla středů kol, držáky motorů, řemenový pohon a kryty elektroniky, které byly zhotoveny pomocí 3D tisku. Teoretická část diplomové práce se zabývá rozborem kompozitních materiálů, podrobněji maticí a její výztuží. Taktéž je rozvedená výroba kompozitních vláken a technologie výroby kompozitních dílů, konkrétně ruční laminace, který byla použita při výrobě mountainboardové desky. Rešerše obsahuje také 3D tisk konkrétně technologii FDM, jenž byl hlavním producentem při výrobě dílu. Poslední kapitola teoretické části popisuje mountainboarding jako sport.

Praktická část diplomové práce započala 3D sestavou v programu Fusion 360. Hlavním komponentem sestavy je deska mountainboardu, od které se odvíjí všechny navrhované díly. Po vytvoření budoucího tvaru desky byla navržena forma, která kopíruje tvar desky. Další konstruované součásti sestavy jako jsou těla kol, držáky motorů, řemenový pohon a kryty elektronických součástí a byly konstruovány, testovány a následně optimalizovány. Zakoupené díly jako jsou trucky (náprava), pneumatiky s dušemi, řemen a elektronika (motory s kontrolorem). Celková vizualizace 3D modelu je zobrazena na *Obr. 87*.

Prvním 3D tištěným dílem byla forma pro výrobu kompozitní desky. Tento komponent byl časově nejnáročnější díl, tiskový čas dané součásti byl stanoven na celkový čas 178,8 h. Celkový 3D tiskový čas veškerých součástí byl sumarizován na 324,9 h. Tisk součástí byl zhotoven na 3D tiskárně AzteQ Industrial od společnosti Trilab. Jako program pro tvorbu g-codu pro tiskárnu byla použita aplikace PrusaSlicer 2.4.

Při volbě kompozitního materiálu bylo využito programu CES Granta EduPack 2021. Ze zvolených sendvičových struktur byla vyrobena zkušební tělesa, která byla následně testována podle normy ASTM C 393. Výsledky z ohybové zkoušky navržených těles byly vyhodnoceny jako nedostatečné. Z tohoto důvodu byla vyrobena modifikovaná tělesa, jež byla dostatečně dimenzována na váhu jezdce. Při výrobě kompozitní desky mountainboardu byla použita vytištěná forma. Výroba finální desky probíhala ve třech krocích. Prvním krokem bylo formování jádra do tvaru desky (*Obr. 70*), které bylo ponecháno 10 dní v zafixované podobě. Po odformování deska držela požadovaný tvar a byla zahájena výroba kompozitní desky pomocí ruční laminace. Ta probíhala ve dvou krocích. Prvně nanesení spodní vrstvy potahu, který se skládal z uhlíkové a skelné tkaniny. Následovalo odsátí

přebytečné pryskyřice a ponechání v uzavřeném systému, který udržoval vakuum. Posledním krokem výroby bylo aplikování vrchního potahu kombinace uhlíkové a skelné tkaniny. Na finální výrobek desky byla nanesená pohledová vrstva pryskyřice, která byla následně broušena a leštěna. Jeden z nejdůležitějších údajů kompozitní desky je její váha, ta byla stanovena na 1930 g.

Posledním krokem praktické části byla montáž komponentů k sobě.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Global EV Outlook 2020 [online]. 2020 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
- [2] D. CALLISTER, JR., William a David G. RETHWISCH. Materials science and engineering. 9rd ed. USA: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-32457-8.
- [3] KREBS, Stefan, Ladislav KOLAŘÍK a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. Teorie zpracování plastů a kompozitů. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [4] K. CHAWLA, Krishan. Composite Materials: Science and Engineering. 4 rd ed. Springer, 2019. ISBN 978-3-030-28982-9.
- [5] DISHOVSKY, Nikolay a Mihail MIHAYLOV. Elastomer-based composite materials: mechanical, dynamic and microwave properties and engineering applications. New Jersey: Apple Academic Press, 2018. ISBN 9781771886208
- [6] WANBERG, John. Composite Materials Fabrication Handbook #1. United States: Wolfgang Publications, 2009. ISBN 1929133766.
- [7] CLYNE, T. a Derek HULL. Introduction to Composite Materials. Cambridge University Press, 2019. ISBN 0521860954.
- [8] WANBERG, John. Composite materials: Step-by-step projects. United States: Wolfgang Publications, 2014. ISBN 1929133367.
- [9] A Simplified Micromechanical Model for Predicting Effective Mechanical Behaviors of Continuous Bidirectional-fiber-reinforced Composites. ResearchGate. 2016, , 1293. Dostupné z: doi:10.1080/15376494.2016.1227505
- [10] Moisture Transport Process in Vegetable Fiber Composites: Theory and Analysis for Technological Applications. ResearchGate. 2013, , 39. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-37469-2_2
- [11] KYOSEV, Yordan a Boris MAHLTIG. Inorganic and Composite Fibers: Production, Properties, and Applications (The Textile Institute Book Series). United Kingdom: Woodhead Publishing, 2018. ISBN 9780081022283.
- [12] WARRING, R.H. Glassfibre Handbook. United Kingdom: Chris Lloyd Sales & Marketing, 2002. ISBN 9780852428207.

- [13] SPENCER, P.F., B. CHARLEY a B. YANKELLO. Carbon Fiber. By Grace For Glory Publishing, 2017. ISBN 9780998730202.
- [14] LOGBOOK, S. Address Book: For Contacts, Addresses, Phone, Email, Note, Emergency Contacts, Alphabetical Index With Carbon kevlar fiber pattern texture. Independently published, 2019. ISBN 9781797466156.
- [15] Ballistic comparison between epoxy-ramie and epoxy-aramid composites in Multilayered Armor Systems [online]. 2018, , 4 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2018.06.018
- [16] GOULD, S. Composite Structures & Construction:: Modern Methods In Wet Lay-up & Prepreg Construction for Aerospace / Automotive / Marine Applications (DIY Home Workshop). CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017. ISBN 9781973890133.
- [17] Prepreg carbon fiber parts / composites, autoclave composites [<http://www.dexcraft.com>]. 2019 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: Prepreg carbon fiber parts / composites, autoclave composites
- [18] LEE, S.W. Advances in Thick Section Composite and Sandwich Structures: An Anthology of ONR-sponsored Research. Switzerland: Springer, 2020. ISBN 9783030310646.
- [19] GÜRDAL, Z., RT. HAFTKA a P. HAJELA. Design and Optimization of Laminated Composite Materials. United States: Wiley-Interscience, 1999. ISBN 9780471252764.
- [20] GOODSHIP, Vanessa, Bethany MIDDLETON a Ruth CHERRINGTON. Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality. USA: Matthew Deans, 2016. ISBN 978-0-323-34061-8.
- [21] GEBHARDT, Andreas, Julia KESSLER a Laura THURN. 3D printing: understanding additive manufacturing. 2nd edition. Cincinnati, Ohio: Hanser Publications, [2019]. ISBN 9781569907023.
- [22] LIPSON, Hod a Melba KURMAN. Fabricated: The New World of 3D Printing. Kanada: John Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-35063-8.

- [23] CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. New Jersey: World Scientific, [2017]. ISBN 978-981-3146-76-1.
- [24] BIEHLER, J. a B. FANE. 3D Printing with Autodesk: Create and Print 3D Objects with 123D, AutoCAD and Inventor. United States: Que Publishing, 2014. ISBN 9780789753281.
- [25] .O., M.G. a M. GILBERT O. Troubleshooting COMMON 3D PRINTING Errors. Independently Published, 2020. ISBN 9781660155972.
- [26] SINGH, Rupinder a J. Paulo DAVIM. Additive Manufacturing: Applications and Innovations. New York: Taylor & Francis Group, 2019. ISBN 978-1-1380-5060-0.
- [27] WALLACH KLOSKI, Liza a Nick KLOSKI. MAKE: Getting started with 3D printing [online]. 2 rd. USA [cit. 2021-12-01]. ISBN 9781680456431.
- [28] BAÑÓN, Carlos a Félix RASPALL. 3D Printing Architecture: Workflows, Applications, and Trends [online]. Springer, 2021 [cit. 2021-12-01]. ISBN ISBN 978-981-15-8388-9.
- [29] How Mountain Boarding Works [online]. 2009 [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://adventure.howstuffworks.com/outdoor-activities/urban-sports/mountain-boarding.htm>
- [30] Mountain WHAT? [online]. 2017 [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.x-wear.com/blogs/news/mountain-what-mountainboarding-she-said>
- [31] MBS Atom 90 Mountainboard. Mbs [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.mbs.com/boards/91115-mbs-atom-90-mountainboard>
- [32] 3D tiskarna Azteq. Trilab3d [online]. 2022 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://trilab3d.com/cs/3d-tiskarna-azteq/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Al	Hliník
Ca	Vápník
Mg	Hořčík
B	Bor
Na	Sodík
K	Draslík
PAN	Polyakrylonitrilová vlákna
PVC	Polyvinylchlorid
PET	Polyethylentereftalát
PMI	Polymethacrylimid
PE	Polyethylen
PS	Polystyren
Km	Kilometr
m	Metr
mm	Milimetr
μm	Mikrometr
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
G	Gram
N	Newton
σ	Napětí
ρ	Hustota
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň Celsia
%	Procenta

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.: Moderní Lyže z kompozitního materiálu [2]</i>	11
<i>Obr. 2.: Modul pružnosti v závislosti na objemu [2]</i>	12
<i>Obr. 3.: Schéma křížového kompozitu vyztuženého [9]</i>	13
<i>Obr. 4.: Druhy matic kompozitních materiálů [3]</i>	14
<i>Obr. 5.: Ideální rovné rozhraní (a)</i>	15
<i>Obr. 6.: Charakterizace drsnosti povrchu polykrystalického vlákna oxidu hlinitého (Nexel 610) pomocí mikroskopie atomárních sil. [4]</i>	15
<i>Obr. 7.: Rozdělení výtuzí [3]</i>	16
<i>Obr. 8.: Typy kompozitních materiálů vyztuženy (a) disperzními částicemi (b) nespojitými vlákny – jednosměrně (c) nespojitými vlákny – náhodně (d) spojitými vlákny – jednosměrně (e) spojitými vlákny – úhel orientace 0° – 90° (f) spojitými vlákny – ve více směrech [10]</i>	17
<i>Obr. 9.: Působící tahové zatížení na vlákno v matici [2]</i>	18
<i>Obr. 10.: Schématické znázornění kompozitu vyztužených vlákny (a) spojitých a zarovnaných vláken (b) nespojitých a zarovnaných vláken (c) nespojitých a náhodně orientovaných vláken [2]</i>	19
<i>Obr. 11.: Průměr vláken z různých materiálů s pružností odpovídající nylonovému vláknu o průměru 25 μm [4]</i>	19
<i>Obr. 12.: Výroba skelných vláken [4]</i>	21
<i>Obr. 13.: Skleněná vlákna v různých podobách a) sekané skleněné vlákno b) nekonečná příze c) předené vlákno d) tkanina [4]</i>	22
<i>Obr. 14.: Turbo statická struktura uhlíkového vlákna a schématické zobrazení uhlíkového vlákna [2]</i>	23
<i>Obr. 15.: Schématické zobrazení výroby uhlákových vláken pomocí technologie PAN [4]</i>	24
<i>Obr. 16.: Pevnost a modul pružnosti uhlíkových vláken v závislosti na teplotě konečného tepelného zpracování [4]</i>	25
<i>Obr. 17.: Aramidová tkanina (a) hladká vazba tkaniny (b) mikroskopický detail vláken [15]</i>	25
<i>Obr. 18.: Výroba prepregového pásu z termosetového polymeru [2]</i>	26
<i>Obr. 19. Prepreg, výroba dílu z prepregu [2,17]</i>	27
<i>Obr. 20.: Řez sendvičovým panelem [2]</i>	29
<i>Obr. 21.: Schéma znázorňující konstrukci sendvičového panelu s voštinovým jádrem [1]</i>	29
<i>Obr. 22.: Ruční laminace [20]</i>	31
<i>Obr. 23.: Vakuová technologie výroby kompozitu [20]</i>	32
<i>Obr. 24.: Cenové srovnání různých technologií [22]</i>	33
<i>Obr. 25.: Realizace 3D tištěného dílu [27]</i>	34
<i>Obr. 26.: 3D tisk – technologie FDM [28]</i>	35

<i>Obr. 27.: Mountainboarding – ukázka sportu [30]</i>	36
<i>Obr. 28.: Mountainbordová deska [31]</i>	37
<i>Obr. 29.: 3D model – Mountainboardová deska</i>	40
<i>Obr. 30.: 3D model – Forma</i>	41
<i>Obr. 31.: 3D model – trucků</i>	41
<i>Obr. 32.: 3D model – kola</i>	42
<i>Obr. 33.: 3D model – průřez kolem</i>	43
<i>Obr. 34.: 3D model – Kolo hnané</i>	43
<i>Obr. 35.: 3D model – součásti hnaného kola</i>	44
<i>Obr. 36.: 3D model – detail stavěcího šroubu</i>	44
<i>Obr. 37.: 3D model – Držák motoru</i>	45
<i>Obr. 38.: 3D model – Pohon</i>	46
<i>Obr. 39.: 3D model – Celková sestava</i>	47
<i>Obr. 40.: TRILAB AzteQ Industrial [32]</i>	48
<i>Obr. 41.: 3D tisk – První vrstva</i>	49
<i>Obr. 42.: 3D tisk – Část formy díl 3 (odlehčená část)</i>	50
<i>Obr. 43.: Graf závislosti ohybového modulu pružnosti na hustotě</i>	51
<i>Obr. 44.: Orientace vláken</i>	52
<i>Obr. 45.: Schématický obrázek výroby první strany sendviče</i>	53
<i>Obr. 46.: Nanesení separátoru</i>	53
<i>Obr. 47.: Balsa bez uhlíkové tkaniny</i>	53
<i>Obr. 48.: První vrstva uhlíkové tkaniny</i>	54
<i>Obr. 49.: Odsátí přebytečné pryskyřice</i>	54
<i>Obr. 50.: Sendvičová deska – pohled ze strany následného nanášení uhlíkové tkaniny</i>	55
<i>Obr. 51.: Kompozitní deska – pohled na vytvrzenou uhlíkovou tkaninu</i>	55
<i>Obr. 52.: Schéma obrázku výroby druhé strany sendviče</i>	55
<i>Obr. 53.: Výroba těles</i>	56
<i>Obr. 54.: Kompozitní deska přichystána pro řezání vodním paprskem</i>	56
<i>Obr. 55.: Tělíska nařezána pomocí vodního paprsku</i>	56
<i>Obr. 56.: Defekt po řezání vodním paprskem</i>	57
<i>Obr. 57.: Formování balsového dřeva</i>	58
<i>Obr. 58.: Formování polystyrénové pěny</i>	59
<i>Obr. 59.: Ohybová zkouška – jádro balsa</i>	60
<i>Obr. 60.: Výsledek ohybové zkoušky – jádro balsa Graf závislosti napětí na deformaci</i>	61
<i>Obr. 61.: Ohybová zkouška – jádro pěna</i>	62

<i>Obr. 62.: Výsledek ohybové zkoušky – jádro pěna Graf závislosti napětí na deformaci</i>	62
<i>Obr. 63.: Test ohybu topolové překližky</i>	63
<i>Obr. 64.: Výroba modifikovaných těles</i>	63
<i>Obr. 65.: Skladba potahu pro modifikované těliska</i>	63
<i>Obr. 66.: Řezání modifikovaných těles</i>	64
<i>Obr. 67.: Výsledek ohybové zkoušky – jádro topolová překližka Graf závislosti napětí na deformaci</i>	65
<i>Obr. 68.: Ohybová zkouška – jádro topolová překližka</i>	65
<i>Obr. 69.: Výpočet ohybového napětí</i>	66
<i>Obr. 70.: Tvarování topolového jádra k tělu formy</i>	67
<i>Obr. 71.: Tvarované jádro, po sundání z formy</i>	67
<i>Obr. 72. Skladba potahu pro mountainboardovou desku</i>	68
<i>Obr. 73. Dělení tkaniny pro 45 stupňů</i>	68
<i>Obr. 74.: Schéma skladby materiálů 1</i>	69
<i>Obr. 75.: Fotografie výroby první části mountainboardové desky</i>	70
<i>Obr. 76.: Fotografie výrobku s formou po odstranění technologických materiálů</i>	70
<i>Obr. 77.: Schéma skladby materiálů 2</i>	71
<i>Obr. 78.: Fotografie výroby druhé části mountainboardové desky</i>	71
<i>Obr. 79.: Vytvrzená kompozitní deska</i>	71
<i>Obr. 80.: Rozvinutý tvar mountainboardu ve 2D formátu přichystaný pro tisk</i>	72
<i>Obr. 81.: Vyznačení tvaru mountainboardové desky na vyrobenou desku</i>	72
<i>Obr. 82.: Řezání do finálního tvaru výrobku</i>	72
<i>Obr. 83.: Vrtání děr do kompozitní desky</i>	73
<i>Obr. 84.: Oprava delaminované tkaniny</i>	73
<i>Obr. 85.: Hotová mountainboardová deska</i>	74
<i>Obr. 86.: Finální prototyp mountainboardu</i>	74
<i>Obr. 87.: 3D model sestavy</i>	76

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1.: Orientační hodnoty tržné délky vybraných materiálů [3]</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2.: Přibližné chemické složení vybraných skleněných vláken v procentech [3]</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 3.: Čas a hmotnost materiálu pro 3D tisk formy</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 4.: Výsledky tříbodové zkoušky ohybem – jádro balsa</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 5.: Výsledky tříbodové ohybové zkoušky – jádro pěna</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 6.: Výsledky tříbodové ohybové zkoušky – jádro topolová překlíčka</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 7.: Porovnání vlastností vyrobených sendvičových struktur</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 8.: Cenové zhodnocení výroby prototypu</i>	<i>75</i>