

Vývoj hybridního automobilového dílu vyráběného technologií autoklávového lisování

Vojtěch Ovesný

Bakalářská práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Vojtěch Ovesný
Osobní číslo:	T21684
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vývoj hybridního automobilového dílu vyráběného technologií autoklávového lisování

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na problematiku kompozitních materiálů, rozdělení, výroba a využití v automotive
2. Popis aktuální situace využití kompozitů při výrobě automobilových součástí
3. Zrealizujte experimentální výrobu zvolné kompozitní aplikace, návrh materiálové skladby, volba technologických podmínek
4. Testování mechanických vlastností
5. Dosažené výsledky vyhodnotte
6. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh: **dle pokynů VDP**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. EHRENSTEIN G. W.: Polymerní kompozitní materiály, Praha, SCIENTIA v Praze, 351s, 2009, ISBN 978-80-86960-29-6.
2. LIPTÁKOVÁ, T.: Polymérne konstrukčné materiály. University of Žilina, Žilina, 189 s, 2012, ISBN 978-80-554-0505-6.
3. SRINIVASAN, K.: Composite Materials: Production, Properties, Testing and Applications, Alpha Science International Limited, 2009, ISBN 1842654918, 9781842654910.
4. ŠUBA, O.: Mechanika polymerů a kompozitů, Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, ISBN 978-80-7454-015-8.
5. ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s., ISBN 978-80-7318-948-8.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2023**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 22. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vývojem prototypu kompozitního automobilového dílu vyráběného technologií autoklávového lisování. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část bakalářské práce se zabývá popisem kompozitních materiálů, prepregy, autoklávovým lisováním a použitím kompozitů v automobilovém průmyslu. Praktická část bakalářské práce se zabývá výběrem materiálů, orientací vrstev a výrobou zkušebních tělísek pro zkoušku ohybem a metodu krátkého nosníku. Poslední část práce je věnována návrhu formy a technologickému postupu výroby.

Klíčová slova: kompozit, prepreg, autokláv, automobil

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the development of a prototype of a composite automotive part produced by autoclave curing technology. The work is divided into a theoretical and a practical part. The theoretical part of the bachelor thesis deals with the description of composite materials, prepregs, autoclave curing and the use of composites in the automotive industry. The practical part of the bachelor thesis deals with the selection of materials, the orientation of the layers and the production of test specimens for the bending test and the short beam method. The last part of the work is devoted to the design of the mold and the technological process of production.

Keywords: composite, prepreg, auoclave, automobile

Rád bych poděkoval doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za její odborné rady a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Chtěl bych také poděkovat Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při měření mechanických zkoušek. V neposlední řadě děkuji rodině a kamarádům za podporu během studia.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	11
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	11
1.2 VLÁKNA	11
1.2.1 Přírodní vlákna	12
1.2.2 Skleněná vlákna	12
1.2.3 Basaltová vlákna	14
1.2.4 Aramidová vlákna	14
1.2.5 Uhlíková vlákna	15
1.3 MATRICE	16
1.3.1 Keramické matrice	16
1.3.2 Kovová matrice	16
1.3.3 Polymerní matrice	17
1.3.4 Uhlíková matrice	18
2 PREPREGY	19
2.1 VARIANTY PREPREGŮ	19
2.2 ROZDĚLENÍ VÝROBY PREPREGŮ	20
3 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU	23
4 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	25
5 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	30
5.1 ZKOUŠKA OHYBEM.....	30
5.2 METODA KRÁTKÉHO NOSNÍKU	31
6 MATERIÁLY PRO VÝROBU FOREM	32
6.1 HLINÍK/OCEL	32
6.2 INVAR.....	33
6.3 KOMPOZIT	33
6.4 EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE	34
II PRAKTICKÁ ČÁST	35
7 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	36
8 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH DESEK	37
8.1 STŘÍHÁNÍ A KLADENÍ PREPREGU	38
8.2 LISOVÁNÍ A VYJMUTÍ Z LISU	38
9 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	40
9.1 ZKOUŠKA OHYBEM ČSN EN ISO 14125	40
9.2 METODA KRÁTKÉHO NOSNÍKU ČSN EN ISO 14125.....	46

10	DISKUZE VÝSLEDKŮ	54
10.1	VYHODNOCENÍ TĚLÍSEK PRO OHYBOVOU ZKOUŠKU	54
10.2	VYHODNOCENÍ TĚLÍSEK PRO METODU KRÁTKÉHO NOSNÍKU.....	55
10.3	POROVNÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	55
11	NÁVRH PROTOTYPU DRŽÁKU BATERIE	57
11.1	NÁVRH FORMY	57
11.2	ŠABLONA PRO VRSTVY	58
11.3	TECHNOLOGICKÝ POSTUP.....	59
	ZÁVĚR	61
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	62
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK	71
	SEZNAM PŘÍLOH	73

ÚVOD

Kompozitní materiály v dnešní době nabývají čím dál větší popularitu. Kompozit je materiál tvořený kombinací dvou nebo více materiálů za účelem vytvoření jiného materiálu se zlepšenými vlastnostmi. Kompozity nachází uplatnění v automobilovém, leteckém a vojenském průmyslu.

V současnosti se kompozitní materiály běžně používají v automobilovém průmyslu. Vyrábí se z nich karoserie, listové pružiny, disky kol, kryty v interiéru, ale i kryty světel. Kompozity mají oproti tradičním materiálům mnoho výhod, jako je jejich relativně vysoká pevnost a nízká hmotnost, vynikající odolnost proti korozi, tepelné vlastnosti a větší odolnost proti nárazu, únavě a dalšímu statickému a dynamickému namáhání, které by konstrukce automobilů mohly být podrobeny. Díky nižší hmotnosti těchto dílů se zlepšuje poměr výkonu k hmotnosti vozidla a spotřeba paliva. Použitím kompozitních dílů lze dosáhnout až 50% snížení hmotnosti automobilu a 7% úspory paliva na každých 10% ušetřených na hmotnosti vozidla.

Teoretická část bakalářské práce se zabývá popisem kompozitních materiálů a jejich složením včetně popisu typů vláken a matric. V práci jsou popsány prepregy a autoklávové lisování. Dále se práce zabývá historií a současností kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu.

Praktická část bakalářské práce se zabývá výběrem materiálů, orientací vrstev a výrobou desek. Dále jsou v práci uvedeny výsledky zkoušky ohybem a metody krátkého nosníku získaných pomocí zkušebních tělísek vyřezaných z desek. Následně je těchto výsledků vybrán materiál a typ orientace vláken. Poslední část obsahuje návrh formy a technologický postup při výrobě prototypu automobilového dílu.

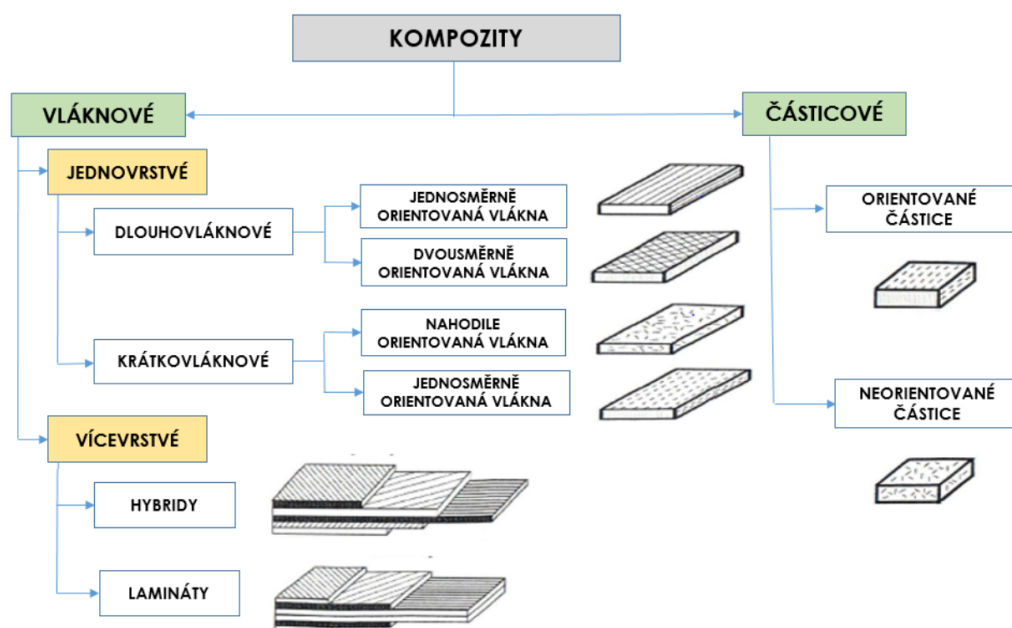
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou tvořeny kombinací dvou či více materiálů za účelem dosáhnout lepších vlastností než mají homogenní materiály. Skládají se z výztuže a matrice (pojivo). Jako výztuž se používají vlákna. Vlákna slouží pro zvýšení pevnosti kompozitu a jejich orientace v materiálu může mít vliv na chování kompozitu při působení sil. Matrice spojuje vlákna do jednoho celku pro lepší přenos zatížení mezi jednotlivými vlákny a napomáhá kompozitu odolávat proti přírodním elementům. [1]

1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozity lze dělit podle výztuže na vláknové a částicové. Vláknový kompozit lze vyrobit z dlouhých nebo sekaných vláken. Částicové kompozity jsou tvořeny z částic rozptýlených v matrici. Částice mohou být sférické, elipsoidní nebo náhodného tvaru. [2,3]



Obrázek 1 Rozdělení kompozitů [4]

1.2 Vlákna

Důležitou vlastností vláken je nízká hmotnost a vysoká pevnost. Bývají pevnější než sytký materiál, ze kterého jsou vyrobeny kvůli orientaci molekul podél směru vlákna a z důvodu sníženého počtu defektů ve vlákně na rozdíl od původního sytkého materiálu. Obecně lze vlákna dělit na organické a anorganické. [1]

1.2.1 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna se dle původu dělí na rostlinné, živočišné a minerální. V průmyslu se nejčastěji používají lýková vlákna, jako je konopí, len, kenaf a juta. Živočišná vlákna se získávají ze srsti, vlny a hedvábí. Minerální vlákna jsou umělá vlákna vyráběná z přírodních minerálů. Mnoho rostlinných vláken může být použito jako výztuž v kompozitech, například v automobilovém průmyslu. Přírodní vlákna mají nižší hustotu, snáze se upravují a nezpůsobují zdravotní rizika jako umělá vlákna. Jejich omezením je vyšší náchylnost k absorpci vlhkosti a menší tuhost a pevnost v porovnání s umělými vlákny. Přírodní vlákna se stávají stále populárnějšími jako alternativa k umělým vláknům v mnoha průmyslových aplikacích díky své nižší ceně a nižšímu dopadu na životní prostředí. Kompozity z přírodních vláken prospívají životnímu prostředí ve srovnání se syntetickými vlákny menším znečištěním při výrobě a snížením spotřeby energie při likvidaci. [5]



Obrázek 2 Rozdělení přírodních vláken [6]

1.2.2 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou nejpoužívanější vlákna v automobilovém průmyslu. Obecně se dělí na několik typů. [7]

1.2.2.1 A-sklo

Má nižší náklady na výrobu než skleněná vlákna obvykle používaná pro tepelnou izolaci a výztuže pro plasty. Zároveň má ale A-sklo obvykle nižší pevnost v tahu a nižší chemickou odolnost, zejména v kyselém prostředí, než jiná skleněná vlákna používaná pro tepelnou izolaci. [8]

1.2.2.2 R/S-sklo

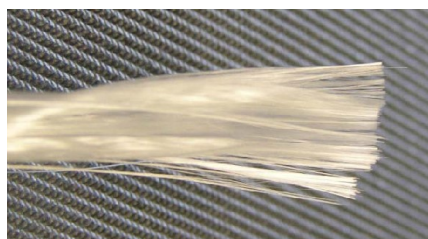
Jsou to skla s vysokou pevností. Mají vyšší teploty tání a vyšší pevnost v tahu než konvenční E-skla. Při výrobě se taví v malém objemu pomocí vysokoteplotního tavicího přístroje. V důsledku toho jsou poměrně drahá a používají se pouze ve speciálních aplikacích, kde je požadována velmi vysoká tepelná odolnost a pevnost. [8]

1.2.2.3 D-sklo

D-glass nabízí téměř ideální dielektrické charakteristiky, používá se při výrobě desek plošných spojů. [9]

1.2.2.4 E-sklo

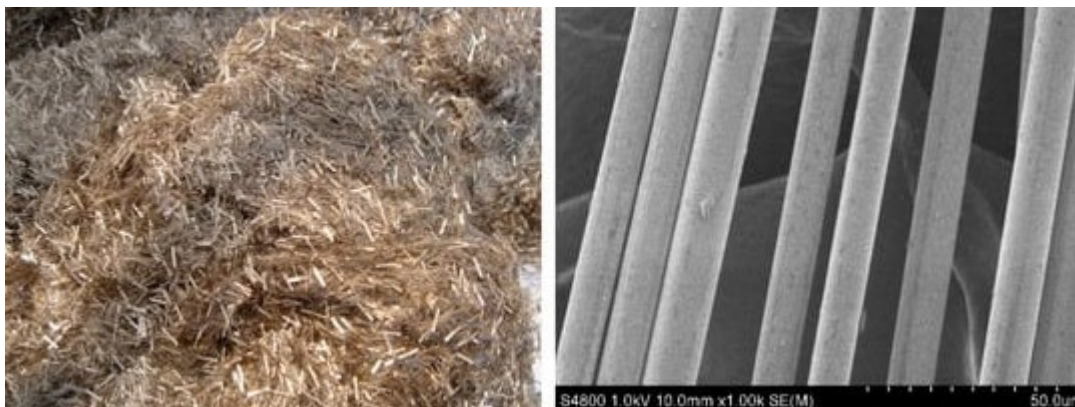
E-skla se primárně používají jako výztuže v široké škále organických polymerů. Termín E-sklo pochází z jeho raného použití jako výztuže v elektrických aplikacích. Při pokojové teplotě mají E-skla velmi vysoký elektrický odpor. Proto se hodí jako výztuž v deskách plošných spojů. Chemická odolnost těchto skel v kyselých roztocích je velmi dobrá, převyšuje odolnost většiny nerezových ocelí. Většina skel typu E v dřívější době obsahovala bor. Skla typu E bez boru nebo fluoru však nyní získávají široké uplatnění v průmyslu skleněných vláken kvůli nižším nákladům na vsázku a nižším emisím během tavicích a tvářecích operací. Tato skla mají ještě vyšší chemickou odolnost vůči kyselým roztokům než typ E-skel obsahující bor, ale také vyšší viskozitu taveniny (a tím i vyšší teploty tání). Vzhledem k vynikající chemické odolnosti, zejména v kyselých roztocích, patří do podtřídy E-skel nazývané ECR (chemicky odolné) E-skla. [8]



Obrázek 3 Vlákna E-skla [10]

1.2.3 Basaltová vlákna

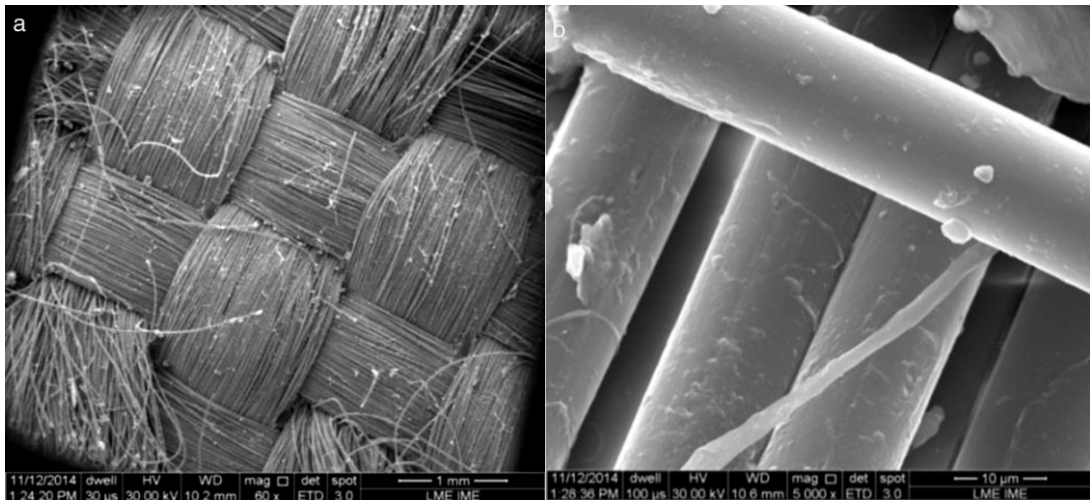
Basaltová vlákna lze zařadit mezi skelná vlákna s vysokou pevností. Basalt je minerál, který se těží z různých ložisek po celém světě. Jako těžený minerál se chemické složení může značně lišit v závislosti na nánosu. Z tohoto důvodu se mohou vlastnosti vytvořeného vlákna také lišit. Ve srovnání s běžným E-sklem má speciální vlákno „Basfiber“ o 25 % vyšší pevnost v tahu, o 15 % vyšší modul v tahu, širší rozsah provozních teplot a snazší recyklovatelnost. V automobilovém průmyslu se používají na stropy, brzdové destičky a interiérové a exteriérové díly na bázi tkanin. [9,11]



Obrázek 4 Basaltová vlákna [12]

1.2.4 Aramidová vlákna

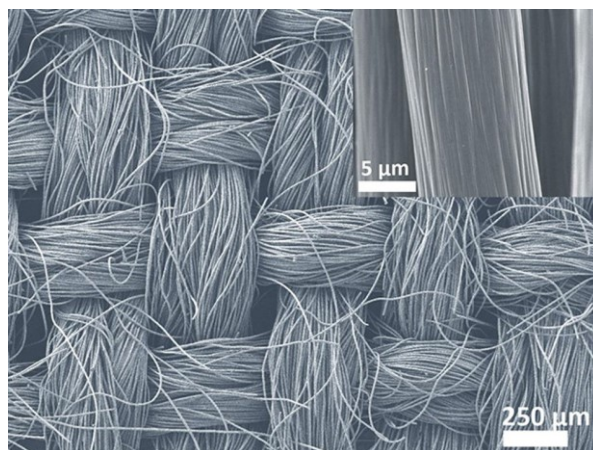
Aramidová (kevlarová) vlákna jsou druhem lehkého a vysoce pevného organického vlákna. Používají se hlavně k vyztužení kompozitů s polymerní matricí, pryží a kovů, což má za následek výrazné zlepšení pevnosti. Tyto vlastnosti se uplatňují hlavně v oblasti kosmonautiky a letectví. Kevlarem vyztužené epoxidové kompozity jsou široce používány při výrobě plášťů motorů, křídel a krytů trupu. Aplikují se také jako pancéřová ochrana válečných lodí a letadlových lodí. Nejznámější použití kevlarových vláken je k výrobě neprůstřelných vest. [13]



Obrázek 5 Aramidová vlákna [14]

1.2.5 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna mají několik výhod, například vysoký modul pružnosti, dobrou pevnost, nízkou hustotu a tedy nízkou hmotnost, dobrou tepelnou stabilitu, nízký koeficient tepelné roztažnosti a dobrou chemickou odolnost. Mezi nevýhody patří nižší pevnost v tlaku je než pevnost v tahu, špatná rázová houževnatost a elektrická vodivost, která může způsobit problémy v elektrických systémech. V automobilovém průmyslu se uhlíková vlákna používají na šasi, interiérové prvky a brzdové destičky. Aplikují se také v leteckém a námořním průmyslu. [15]



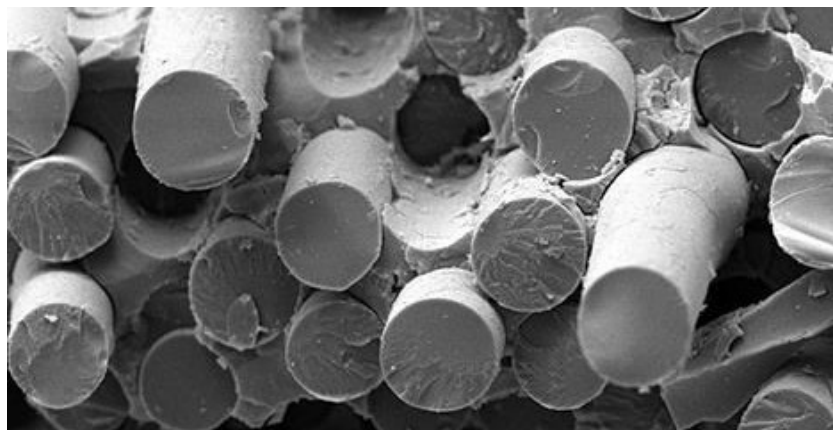
Obrázek 6 Uhlíková vlákna [16]

1.3 Matrice

Matrice má mnoho funkcí. Drží pohromadě vlákna a tím se přenáší zatížení k výztužným prvkům. Přenáší některá zatížení, zejména příčné napětí a smykové napětí. Některé vlastnosti kompozitu, jako je příčná tuhost a pevnost záleží na matrici. Vlastnosti matrice určují přípustné provozní podmínky pro kompozit, například teplotní rozsah, chemickou odolnost, odolnosti proti oděru a odolnost proti přírodním vlivům. Matrice také stanovuje tepelnou a elektrickou vodivost v kompozitu a vnější vzhled kompozitu. [1]

1.3.1 Keramické matrice

Keramika je známá svou vysokou teplotní stabilitou, vysokou tvrdostí, vysokou odolností proti korozi a nízkou hustotou. Jsou to však křehké materiály a mají nízkou lomovou houževnatost. Hlavním důvodem pro vyztužení keramické matrice je zvýšení její lomové houževnatosti. Strukturální keramiku používanou jako matricové materiály lze kategorizovat jako buď oxidy nebo neoxidy. Oxidy jsou známé pro svou tepelnou a chemickou stabilitu. Neoxidové keramické materiály mají vynikající odolnost vůči vysokým teplotám. Nevýhodou keramiky je obtížné přilnutí k vláknům v tekutém stavu, kvůli vysoké povrchové energii keramických materiálů. [17]

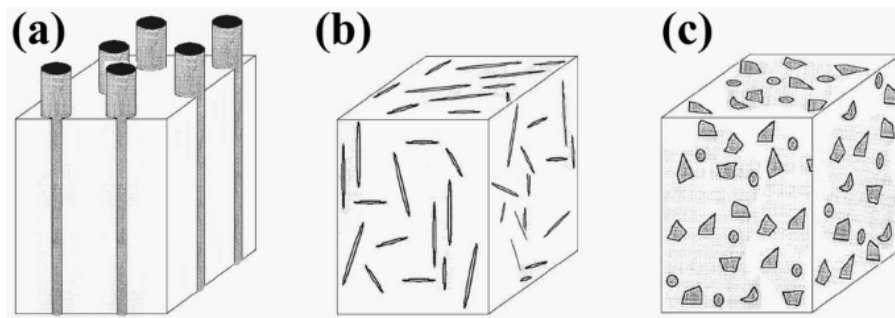


Obrázek 7 SiNC vlákna v keramické matrici[18]

1.3.2 Kovová matrice

Kovová matrice má výhodu oproti polymerní matrici v aplikacích, které vyžadují dlouhodobou odolnost vůči náročnému prostředí, jako je vysoká teplota. Mez kluzu u většiny kovů je vyšší než u polymerů, což je důležitý faktor pro aplikace, které vyžadují vysokou pevnost, stejně jako pevnost v tlaku kompozitu. Další výhodou použití kovů je, že mohou být plasticky deformovány a zpevněny různými tepelnými a mechanickými úpravami. Kovy

však mají řadu nevýhod, jmenovitě mají vysoké hustoty, vysoké teploty tání (tedy vysoké procesní teploty) a sklon ke korozi na rozhraní vlákna a matrice. Dvě nejčastěji používané kovové matrice jsou na bázi hliníku a titanu. Oba tyto kovy mají poměrně nízké hustoty a jsou dostupné v různých formách slitin. Jako matrice byly také použity superslitiny na bázi niklu a kobaltu; legující prvky v těchto materiálech však mají tendenci zvýrazňovat oxidaci vláken při zvýšených teplotách. [17]



Obrázek 8 Vlákná a částice v kovové matrici [19]

1.3.3 Polymerní matrice

Matrice kompozitů s polymerní matricí je polymer, který může být buď termoset nebo termoplast.

1.3.3.1 Termosetové matrice

Nevratnou chemickou přeměnou pryskyřice vzniká termosetová matrice systém do zesíťované polymerní matrice. Obecně se polymer nazývá pryskyřicový systém během zpracování a matrice po vytvrzení polymeru. Termosetové pryskyřice mají nízkou viskozitu, což umožňuje vynikající impregnaci výztuže a vysoké rychlosti zpracování. Termosetové pryskyřice jsou oblíbené pryskyřicové systémy. Používají se v kompozitních systémech kvůli jejich snadnému zpracování. U termosetových pryskyřic se sleduje několik parametrů. Skladovatelnost je doba, bez níž lze nenamíchaný pryskyřičný systém skladovat aniž by začal degradovat. Pro dosažení jmenovité hodnoty se obvykle doporučuje skladování v chladničce do data trvanlivosti produktu. Doba zpracovatelnosti je doba, po kterou může být smíchaná pryskyřice zpracovávána dříve, než viskozita vzroste do bodu, kdy již zpracování není možné. Nejběžnější termosetové pryskyřice jsou: polyesterové, vinylesterové, epoxidové a fenolické. Všechny pryskyřice poskytují vyšší tepelnou izolaci než většina běžně používaných konstrukčních materiálů. Vinylesterové pryskyřice mohou mít vyšší tažnost, což umožňuje přenesení většího zatížení na výztuž a zlepšení odolnosti vůči korozi proti polyesterům. Polyesterové mají širokou škálu vlastností, které lze přizpůsobit

různým aplikacím a procesním požadavkům. Mívají průměrné mechanické vlastnosti, ale mohou být levnější než vinylosterové pryskyřice. Epoxidové pryskyřice jsou považovány za vysoce výkonné pryskyřice kvůli jejich vyššímu poměrnému prodloužení a vyšším provozním teplotám. Fenolové pryskyřice se běžně používají v aplikacích, kde se vytváří kouř a žár. Fenolické pryskyřice jsou obtížnější na zpracování než jiné běžné termosetové pryskyřice. [1]

1.3.3.2 Termoplastické matrice

Termoplastický polymer během zpracování nepodléhá žádné chemické změně. Místo toho je polymer změkčen z pevného stavu pro zpracování. Po dokončení zpracování se vrátí do pevného stavu. Termoplasty mají vysokou viskozitu při zpracovatelských teplotách, což je činí obtížněji zpracovatelnými. Jedním z hlavních cílů při výrobě nových termoplastických materiálů a procesů je snížit viskózní účinky v tekutém stavu termoplastu. Jelikož je impregnace ovlivněna vysokou viskozitou, je třeba věnovat zvláštní pozornost zajištění kontaktu mezi vlákny a polymerem. Tyto vlastnosti zvyšují náklady na konečný produkt. Termoplasty nevyžadují skladování v chladničce a mají prakticky neomezenou skladovatelnost. Termoplastické kompozity lze opravit, protože přechod na změkčovací stupeň může být proveden mnohokrát aplikací tepla. [1]

1.3.4 Uhlíková matrice

Uhlíkové matrice se vyztužují uhlíkovými vlákny. Tento typ kompozitů spojuje výborné mechanické vlastnosti uhlíkových vláken s vysokou teplotní odolností uhlíkové matrice. Kompozity s uhlíkovou maticí se používají na „nosy“ raketoplánů a pro brzdy u letadel. [20]

2 PREPREGY

Prepreg (předimpregnované vlákna) je polotovar sestávající z matrice a výztužných vláken. Materiál je obvykle navinut na cívky a má dvě varianty:

- Jednosměrný (UD - unidirectional) prepreg (má vlákna pouze v jednom směru)
- Tkaný prepreg (ortogonální posílení vláken)

Pro výrobu prepregu jsou vlákna namočena v matricovém materiálu, čímž vznikne předimpregnovaný polotovar. Z důvodu vyšší ceny je tato technologie primárně využívána pro výrobní série od malých po střední velikosti. Přestože mají prepregy nižší výrobní produkci ve srovnání s infuzními technikami, vynikají svou jednoduchou zpracovatelností. Další charakteristikou prepregů je jejich omezená trvanlivost kvůli samovytvrzení pryskyřice. Mnoho prepregů musí být skladováno při teplotě -18 °C , aby se zpomalila reakce. S vhodným chlazením lze dosáhnout trvanlivosti mezi 6 a 18 měsíci. V poslední době se začínají objevovat prepregy s trvanlivostí skladování až 60 dnů při pokojové teplotě pro všeobecné průmyslové a automobilové aplikace. [21]



Obrázek 9 Prepreg [22]

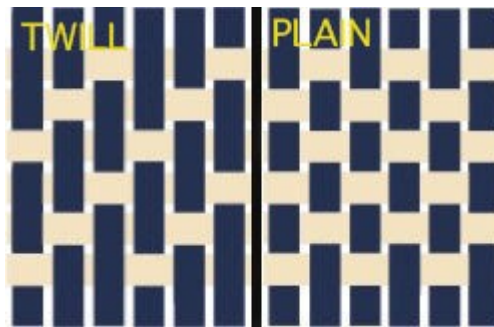
2.1 Varianty prepregů

2.1.1 Jednosměrné prepregy

Jednosměrné prepregy jsou netkané, takže nemají žádný vzor tkaní. Místo toho uhláková vlákna leží vzájemně rovnoběžně bez mezer. Tento způsob konstrukce zvyšuje potenciál podélného tahu, takže je ideální pro aplikace vyžadující pevnost v jednom směru. Mnoho aplikací však vystavuje kompozitní materiály vícesměrným tahovým silám. Pro tyto aplikace jsou vhodnější tkaninové prepregy. Tkaninové prepregy mají také tendenci být lépe zpracovatelné než jednosměrné prepregy. [23]

2.1.2 Tkaninové prepregy

Tkaninové prepregy lze klasifikovat na základě jejich vazby nebo vzoru použitého ke spojení vláken do tkaniny. Různé vazby od sebe vypadají odlišně, ale mají také odlišné charakteristiky chování. V souladu s tím jsou některé vazby pro určité aplikace vhodnější než jiné. Nejjednodušší tkaninová vazba z uhlíkových vláken je známá jako plátňová vazba. Plátňová vazba je tvořena křížením svazků vláken jeden přes druhý, čímž vznikne šachovnice. Tyto materiály jsou pevné a vysoce stabilní, ale nejsou příliš poddajné. Plátňové prepregy jsou nejlepší pro součásti, které jsou ploché nebo jen mírně tvarované. Stejně jako plátňová vazba, keprová vazba se vytváří proplétáním svazků vláken. Rozdíl je v tom že každý svazek překrývá více svazků. To se obvykle provádí ve vzoru dva-přes, dva-pod, ale běžné jsou také kepry čtyři-přes, čtyři-pod. V obou případech se zdá, že výsledný vzor tvoří řady obdélníků probíhajících diagonálně nahoru po tkanině. Keprové vazby jsou lépe tvarovatelné než plátňové vazby, lze je tedy použít u složitějších tvarů. To však znamená, že nejsou tak tuhé a stabilní jako plátňové vazby. [23]



Obrázek 10 Keprová a plátňová vazba [24]

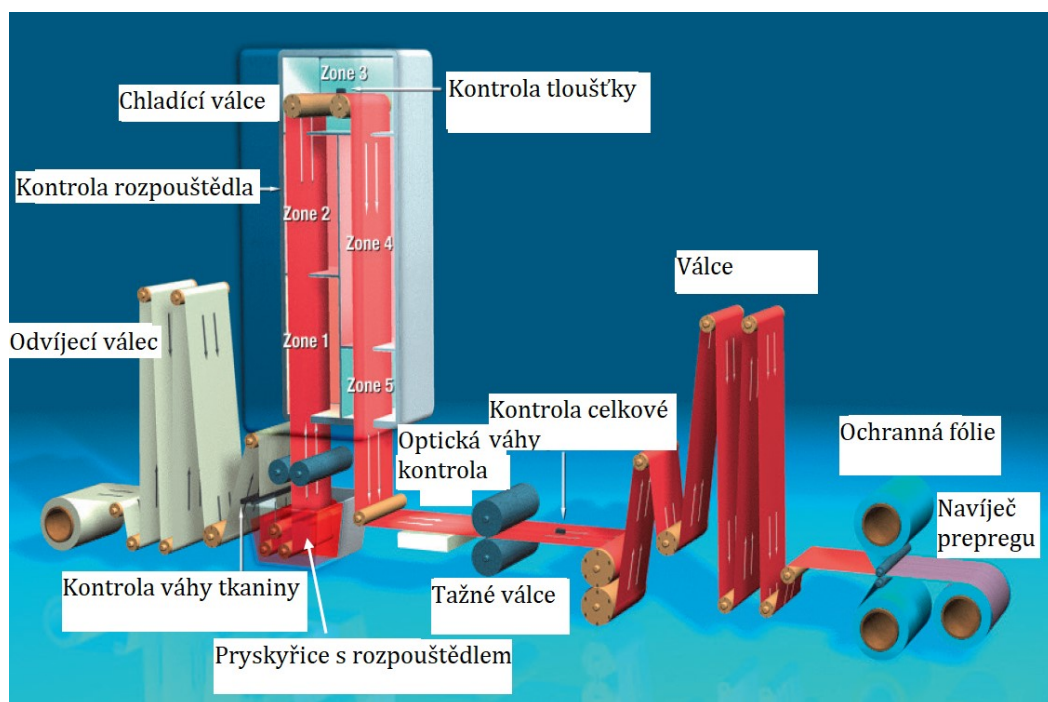
2.2 Rozdělení výroby prepregů

V dnešní době je k dispozici řada různých metod a výrobních linek. Jsou schopny používat různé typy vláken a spojit je se širokým výběrem matricových pryskyřic. Nejen základní materiály vyžadují opatrné zacházení, ale mnoho parametrů, včetně navíjení, kontroly, impregnace a sušení musí být přizpůsobené v závislosti na typu výztuže, impregnaci matrice, a vlastnostem finálního produktu. [21]

2.2.1 Metoda rozpouštědlového máčení

Používá se k impregnaci textilií, popř jednotlivých vláken. Zde je sada cívek používaná v metodě tavení za tepla nahrazena odvíječem válců, jenž dodává polotovary tkaniny do linky. Napětí textilie je nastaveno a kontrolováno aby se zabránilo deformaci výztužného

materiálu. V lázni materiál prochází pryskyřicí, která je rozpuštěna. Řízení viskozity roztoku pryskyřice je dáno určením teploty lázně a zároveň použitým obsahem rozpouštědla při výrobě. Nadbytečná pryskyřice se odstraňuje stěrkou. Tloušťka prepregu a množství obsažené pryskyřice je kontrolována skrz válce. Množství látek v kapalném stavu v impregnovaném materiálu se většinou odpařuje pomocí tepla a recirkulace vzduchu a je recyklován, aby splňoval požadavky na ochranu životního prostředí. Testování tloušťky vzniklého impregnovaného materiálu probíhá v tomto kroku. Po dosažení požadovaného množství kapalných látek je prepreg ochlazován na požadovanou teplotu. Díky nižší teplotě po zchlazení se zastaví vytvrzovací reakce u pryskyřice. Poté prepreg prochází optickým testováním, aby bylo možné vady, než se určí jeho plošná hmotnost. Fólie nebo silikonem potažený papír se používají k zabránění přilepení a kontaminaci výrobku. Následně je navinut na jádra a zabalen do fóliových sáčků. Prepregy potažené roztokem nejsou ořezány; jejich šířka je určena šířkou výztužné tkaniny. [21]



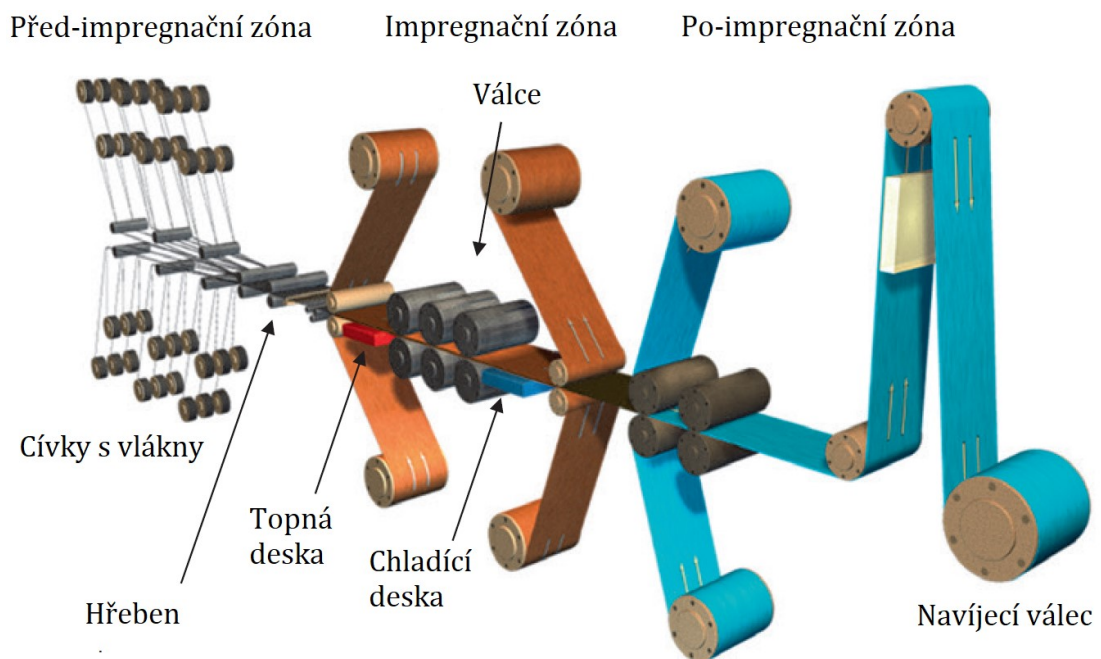
Obrázek 11 Metoda rozpouštědlového máčení [21]

Metoda rozpouštědlového máčení nabízí určité výhody ve srovnání s metodou tavení za tepla. Například zde mohou být relativně snadno zpracovávány systémy s velmi vysokou viskozitou pryskyřic nebo systémy s nerozpustnými částicemi díky vhodnému nastavení obsahu rozpouštědla. Prepregy vyráběné metodou rozpouštědlového máčení často vykazují vyšší lepidlost než srovnatelné prepregy vyráběné metodou tavení za tepla. Nevýhodou této

metody je skutečnost, že ji nelze použít pro impregnaci jednosměrných vláken protože při průchodu lázni s rozpouštědlem se vytvářejí mezery mezi vlákny. [21]

2.2.2 Metoda tavení za tepla

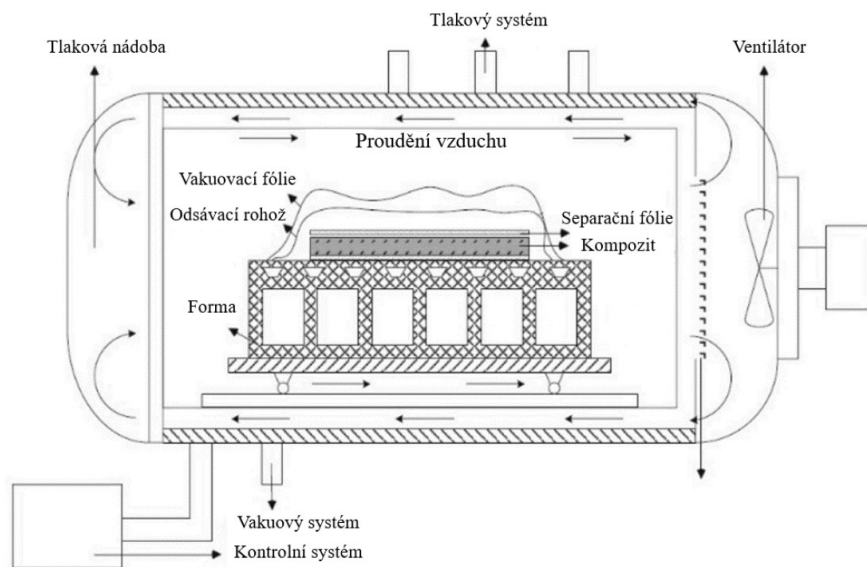
Výroba prepregu zahrnuje několik fází, aby byla zajištěna kvalita a jednotnost konečného produktu. Proces začíná cívkou, která drží skleněná nebo uhlíková vlákna. Pramen vláken se přivádí do stroje na výrobu prepregu pomocí vodících válečků. Udržování napětí vláken je zajištěno speciálním brzdovým mechanismem pro rovnoměrné řízení napětí. Prameny vláken pak v předimpregnační zóně procházejí hřebenem, který vymezuje šířku výztuže a vytváří jednotný uzavřený povrch jednosměrných vláken. Materiál je poté vtažen do impregnační zóny, kde je výztuž potažena pryskyřicí. Tato pryskyřice pochází ze silikonem potažených papírů. Po zahřátí na infračervené topné desce je materiál veden přes několik válců, které vtlačují pryskyřičnou matrici do výztuže. Nakonec se materiál ochladí, ořízne a navine na jádra a poté je zmrazen. [21]



Obrázek 12 Metoda tavení za tepla [21]

3 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU

Pro vytvrzování prepregů se obecně používají autoklávy. Autoklávy jsou tlakové nádoby, které umožňují nastavení tlaku a tepla. Většina autoklávů je vybavena systémem regulace teploty a tlaku, který umožňuje nastavit teplotu a tlak pro vytvrzovací cyklus. Autoklávy jsou často naplněny inertním plynem (obecně dusík) k potlačení oxidace, která může vzniknout během cyklu vytvrzování. K oxidaci může dojít ve formě, v dílu, nebo ve vakuové fólii. Pomocí autoklávu mohou být součásti v sestavě spojeny při vytvrzovacím cyklu. V tomto případě je role tlaku zajistit, aby vrstvy částí zůstaly v těsném kontaktu pro správné spojení a vytvrzení. Tento proces se nazývá spoluvytvrzování. Autoklávy se používají ve Formuli 1. Tyto autoklávy jsou navrženy pro provoz při teplotách do 400 °C, kdežto normální autoklávy pro zpracování kompozitů pracují při 200-300 °C. Dosahují tlaků až 7 barů a jsou elektricky vyhřívané. [25,26]



Obrázek 13 Schéma autoklávu [27]

Výhody technologie:

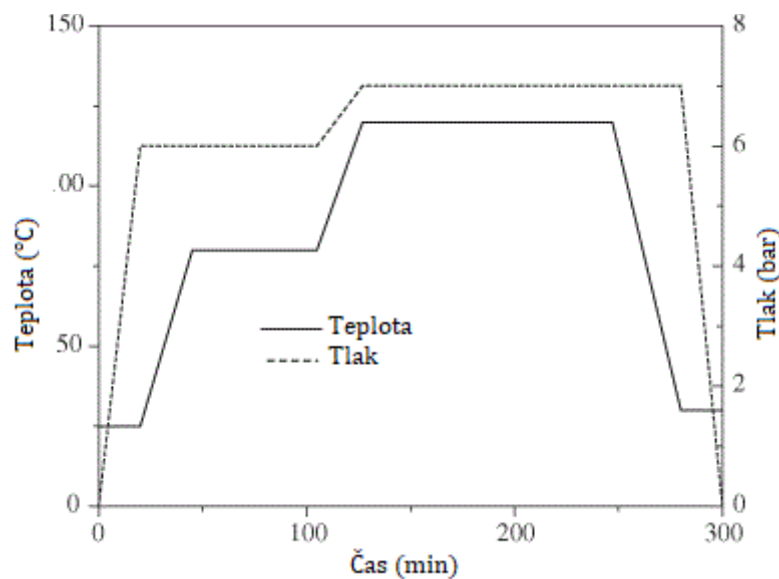
- Poskytuje výrobu konstrukčních kompozitních komponent s vysokým objemovým podílem vláken.
- Umožňuje výrobu kompozitů s různou orientací vláken
- Je vhodná pro výrobu prototypových dílů
- Pro zpracování termoplastických matric v autoklávu se používá stejné autoklávové zařízení jako při zpracování termosetových matric.

Nevýhody technologie:

- Obtížné kladení prepregu do formy kvůli nedostatečné lepivosti
- Vyšší investice pokud je potřeba koupit přídavný autokláv
- Při zpracování termoplastických kompozitů jsou potřeba vyšší teploty a tlaky kvůli vysoké teplotě taveniny a vyšší viskozitě [28]

3.1 Vytvrzovací cyklus

Vytvrzování v autoklávu je oblíbenou metodou výroby těžce zatěžovaných kompozitních dílců. Při použití této metody jsou prepregy nastříhány a vrstveny do požadovaného tvaru. Po sestavení je struktura pokryta separační fólií a odsávací rohoží a uzavřena v podtlakové vakuové fólii. Odsávací rohož pomáhá s absorpcí přebytečné pryskyřice. Celá sestava je umístěna do autoklávu, což je vyhřívaná tlaková nádoba. Aby se dílec vytvrdil, je na polotovar během předem určeného vytvrzovacího cyklu aplikován tlak a teplota. Vysoká teplota je nutná k zahájení reakce polymerace pryskyřice. Tlak se aplikuje na polotovar, aby se přizpůsobil povrchu formy a aby se vyplnily případné dutiny, které by se mohly vytvořit během vytvrzování pryskyřice. Tlak ve vakuové fólii je řízen tak, aby se na začátku odstranil jakýkoli zadržený vzduch během sestavování. Tlak ve vakuové fólii musí být menší než tlak v autoklávu, aby se zaručila kompaktnost výrobku. Posledním krokem je vyjmutí dílu z fólie pro dokončovací procesy. [29]



Obrázek 14 Vytvrzovací cyklus [30]

4 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

4.1 Historie kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu

Prvním použitím plastů vyztužených vlákny u automobilů byl Soybean Car z roku 1941 od Fordu. Vozidlo mělo 14 kompozitních panelů které snížili hmotnost na 907 kg – o 454 kg lehčí než klasické auto z oceli. Bavlnou vyztužený plast, nazývaný Duroplast, se používal k výrobě karoserií pro Trabant v letech 1957 až 1991. Panely údajně vydržely i desetiletí na slunci. Na konci životnosti je bylo možné snadno recyklovat rozdrčením na přídavek do cementu. Chevrolet Corvette, představený v roce 1953, neustále používá kompozity ve svých panelech karoserie. Společnost Molded Fiber Glass Co. vyrobila 26 panelů karoserie ze skleněných vláken/polyesteru pro výrobu 10 000 vozů/rok v roce 1954. Šedesátá léta byla podobná těm dnešním v tom, že existovala snaha o nízkou hmotnost, ale nebylo to kvůli spotřebě paliva, ale kvůli vyšší maximální rychlosti. Chrysler a Ford se předháněly, kdo dostane na vozidla kapoty ze skleněných vláken jako první. Mezitím Ford vydával Ford Shelby GT a další varianty Mustangu. [31]



Obrázek 15 Soybean Car [32]

4.2 Současnost kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu

Kompozitní materiály zaznamenaly v posledních letech zvýšené využití v automobilovém průmyslu díky jejich vynikající tvarové stabilitě. Kompozity jsou preferovanými materiály pro automobilový průmysl díky svým užitečným vlastnostem jako je odolnost proti korozi za sucha i za mokra a nízké hmotnosti. Rostoucí poptávka po lehkých komponentech pohání trh s automobilovými kompozity s cílem snížit emise vozidel a zlepšit palivovou účinnost. [33]

4.2.1 BMW

BMW i3 je vozidlo s elektrickým pohonem. Prostor pro cestující vozidla obsahuje přibližně 150 dílů z karbonu, což je třetina počtu potřebného pro konvenční plechovou stavbu, přičemž hmotnost byla rovněž snížena o třetinu. Použití karbonu také umožnilo eliminovat vzpěru, která odděluje dveře, což usnadňuje přístup cestujících. Zadní výklopné dveře vyztužené sklem a skelnými vlákny ve srovnání s konvenčním plechovým řešením snížily hmotnost až o 30%. Karbonová struktura, jejíž část je viditelná při otevření dveří, slouží jako estetický spojovací prvek mezi interiérem a exteriérem, vyrobený převážně z termoplastů. Interiér využívá kombinaci kůže, vláken kenafu na obložení dveří a přírodní vlny v kombinaci se syntetickými materiály. Z 25% je interiér vyroben z recyklovaných materiálů nebo obnovitelných surovin. Pro přístrojovou desku byla použita nosná konstrukce z hořčíku s podpěrami z vláken kenafu. Váží o 20% méně než běžný panel z oceli ale také snižuje počet součástí a tím snižuje hmotnost o dalších 10%. [34]



Obrázek 16 BMW i3 [34]

4.2.2 Tesla

Tesla Roadster má panely karoserie vyrobených z vrstvy základního nátěru, vrstvy uhlíku, vrstvy skla, vrstvy polypropylenu, další vrstvy skla a další vrstvy uhlíku. Tyto vrstvy jsou zalité v epoxidové pryskyřici. Tato stavba umožňuje zachovat tuhost v ohybu podobnou jako u běžného ocelového panelu karoserie a zároveň snížení hmotnosti o 22 kilogramů z panelů karoserie ve srovnání s kompozity ze skleněných vláken. [35]

4.2.3 Chevrolet

Chevrolet Corvette začal využívat pokročilé materiály v roce 1953, kdy byly vyrobeny první Corvetty s celolaminátovými karoseriemi. Od té doby má každá Corvette karoserii z kompozitního materiálu. C8 je čtvrtá generace Chevrolet Corvette, která používá třívrstvou vícemateriálovou strukturu karoserie pro rám, strukturu karoserie a panely karoserie. I přes otevřenou střechu v kupé i kabrioletu se Chevy opět podařilo udělat novou C8 tužší než předchozí generace, ve skutečnosti asi o 13,79 procenta tužší než C7. K tomuto úspěchu pomohlo několik kompozitních dílů. Jedním z nich je nosník zadního nárazníku přímo připojený ke konstrukci rámu. Tento díl pomáhá se zpevněním rámu a tím zlepšuje výkon v případě zadního nárazu. [36,37]

4.2.4 McLaren

Nízká hmotnost zůstává pro vozy McLaren prioritou. Skořepina „MonoCage“ z uhlíkových vláken se střechou McLarenu P1 byla vyvinuta z konstrukce „MonoCell“ použité v supersportu McLaren 12C. Díky použití uhlíkových vláken došlo k optimalizaci hmotnosti vozidla, která činí pouhých 1 395 kilogramů. Panely karoserie McLarenu P1 jsou také z uhlíkových vláken a obsahují přední a zadní panely připojené ke skořepině, dvě malé přístupové klapky v zadní části, přední kapotu a dvoje dveře. Panely váží celkem pouhých 90 kilogramů a jsou tenké, ale také pevné. [38]

4.2.5 Lamborghini

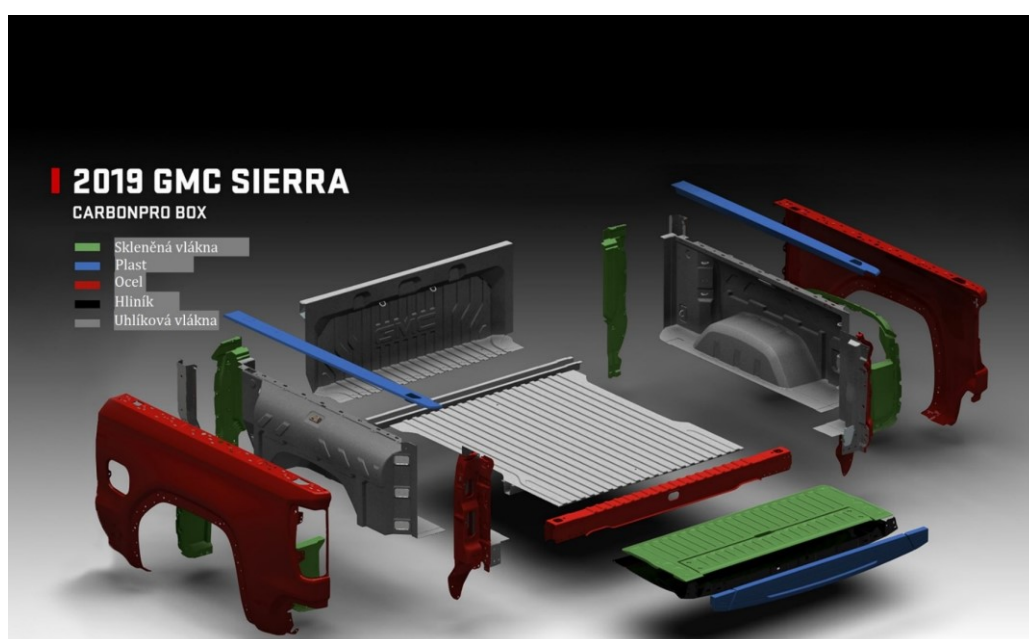
Skořepina Lamborghini Aventador váží pouze 147,5 kg a jeví se jako jeden monolitní díl, který maximálně využívá extrémní tuhost kompozitních materiálů a jejich konstrukční flexibilitu. Každá jednotlivá část, která tvoří skořepinu, byla navržena se specifickou funkcí a vyrobena třemi specializovanými technologiemi. Skořepina Aventadoru se vyrábí z uhlíkových vláken pomocí technologie „RTM Lambo“, která má určité výhody ve srovnání s tradiční autoklávovou technologií. [39]



Obrázek 17 Skořepina Lamborghini Aventador [40]

4.2.6 General Motors

GMC Sierra Denali je prvním modelem nákladního vozidla, které má kompozitní korbu, která je vyrobena z uhlíkových vláken. Jednou z největších výhod kompozitní korby je, že má vynikající odolnost proti korozi. Jedním z největších problémů s korbami nákladních automobilů je to, že nadměrné používání často vede k poškození a v konečném důsledku k rezivění. Toto rezivění pak může vést k oslabení konstrukce korby a oslabená konstrukce může zhoršit schopnost vozidla přepravovat velké množství nákladu. Pevnost a odolnost kompozitní korby nákladního automobilu navíc snižuje pravděpodobnost poškození, které může vést ke korozi. To znamená, že pevnost korby nákladního automobilu a jeho nosnost nákladu zůstanou dlouhodobě vysoké. Znamená to také, že by se snížily náklady na údržbu a údržbu vozidla. Další výhodou je že korba je o 28 kilogramů lehčí než stejná korba z oceli. Kompozitní korba má vyšší odolnost proti poškrábání a promáčknutí než ocelová korba. [41]



Obrázek 18 Korba GMC Sierra Denali [42]

4.2.7 Toyota

Toyota Tundra obsahuje sedadla vyrobené pomocí technologie pultruze. Tyto sedadla jsou o 20% lehčí než předchozí celooceľová sestava, která obsahovala 60 lisovaných a svařovaných dílů. Nová kompozitní sestava je složená ze čtyř dílů, což snížilo náklady na montáž spojenou s kovovou konstrukcí sedadel. Jedinečný design vstřikovaného nosníku v konstrukci sedadla také prošel všemi relevantními požadavky nárazových testů a umožňuje další uplatnění kompozitů v automobilových aplikacích. [43]

4.2.8 Ford

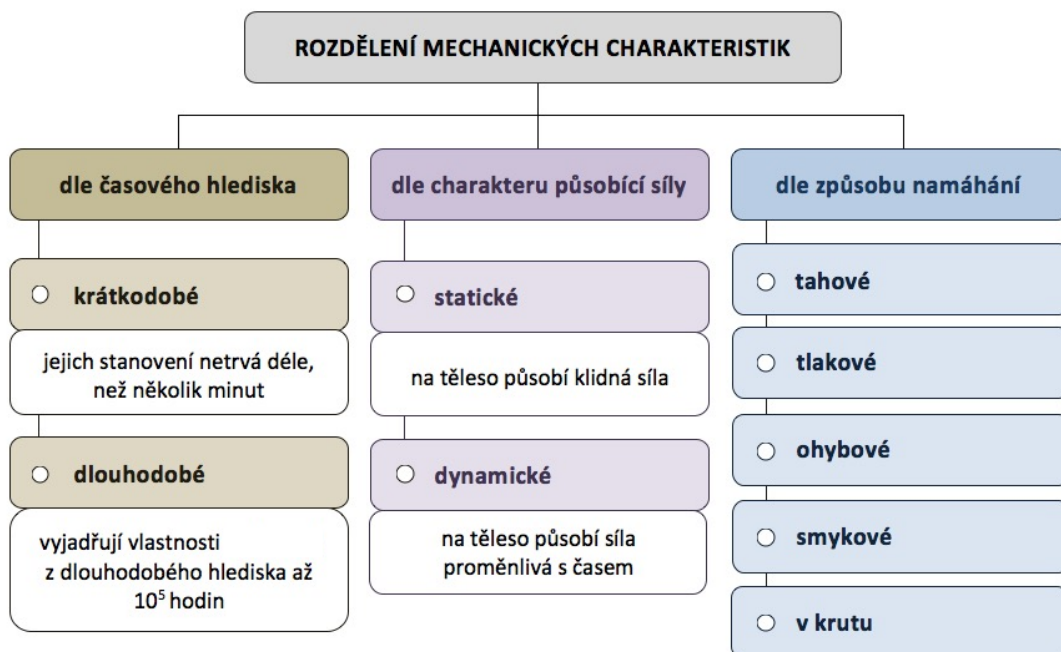
Ford Shelby GT je prvním vozidlem, které má z výrobní linky vlastní sadu vysoce výkonných kol z uhlíkových vláken. Kola byla navržena, vyvinuta a testována s ohledem na nejvyšší standardy kvality. Poskytují výborný výkon podvozku, úsporu hmotnosti a zlepšenou jízdní dynamiku. Nová kola, která shodila asi 27 kg ve srovnání s hliníkem, umožňují snadnější rozjezdy a zastavování, rychlejší zatačení a výrazné snížení setrvačnosti kola (o více než 40 procent) což zlepšuje akceleraci a zásah řidiče. [44]



Obrázek 19 Karbonová kola Ford Shelby GT [44]

5 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Mezi mechanické vlastnosti patří pevnost, plasticita, pružnost a houževnatost. Důležité informace pro jejich použití poskytují mechanické charakteristiky. Charakteristiky mechanického chování lze klasifikovat podle různých hledisek jako krátkodobé či dlouhodobé, statické nebo dynamické, tahové, tlakové, ohybové, smykové a ty, které lze zjistit při namáhání v krutu. [45]



Obrázek 20 Rozdělení mechanických charakteristik [45]

5.1 Zkouška ohybem

K provádění ohybových zkoušek se využívají tělesa ve tvaru hranolu, která jsou umístěna na dvě podpěry v předepsané vzdálenosti. Pro tříbodový ohyb je síla umístěna uprostřed mezi podpěrami. Při čtyřbodovém ohybu je síla rozdělena na dvě stejně velké síly, které působí v určité vzdálenosti od podpěr. Čtyřbodový ohyb se používá pro velké a tlustostěnné vzorky. [45]

Napětí v ohybu:

$$\sigma_f = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1)$$

Deformace ohybem:

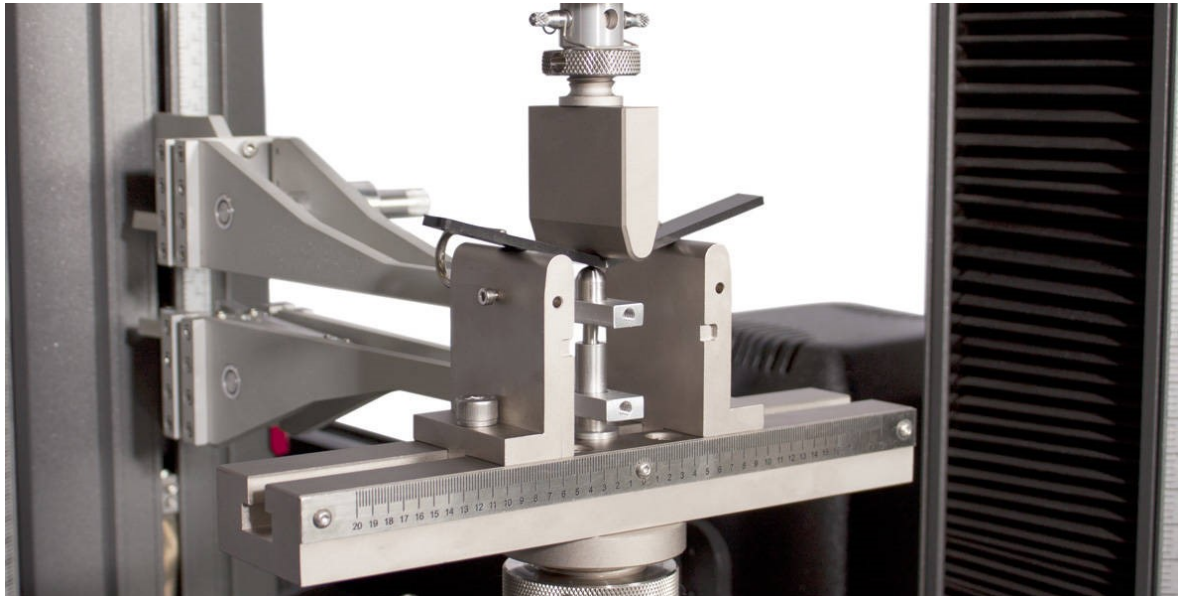
$$\varepsilon_f = 6 \cdot \frac{s \cdot h}{l^2} \text{ [bez jednotky nebo \%]} \quad (2)$$

Výpočet průhybů s_1 as s_2 :

$$s_i = \frac{1}{6} \cdot \frac{\varepsilon_{fi} \cdot l^2}{h} \quad [mm] \quad (3)$$

Výpočet modulu pružnosti:

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad [MPa] \quad (4)$$



Obrázek 21 Tříbodový ohyb [46]

5.2 Metoda krátkého nosníku

Metoda krátkého nosníku podrobují tělísko ohybu, stejně jako to dělají metody testování v ohybu, ale tělísko je vzhledem ke své tloušťce velmi krátké. Cílem je minimalizovat ohybová (tahová a tlaková) napětí a maximalizovat mezilaminární smykové napětí. Tloušťka a šířka zkušební vzorku se před zkoušením změří. Vzorek se umístí na podpěry. Zatěžovací prvek je poté použit k ohýbání vzorku a zaznamená se síla. [55,56]

Výpočet smykového napětí:

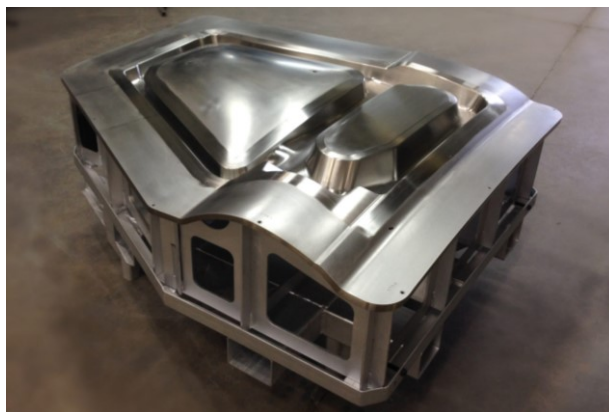
$$\tau = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{b \cdot h} \quad [MPa] \quad (5)$$

6 MATERIÁLY PRO VÝROBU FOREM

Kompozitní díly se tvarují ve formách. Formy lze vyrobit prakticky z jakéhokoli materiálu. Pro díly, které budou vyráběny v malém množství a mohou být vytvrzeny při nízkých teplotách, nebo pro prototypové díly, kde je méně potřeba důsledná kontrola rozměrové přesnosti, se používají materiály jako sklolaminát, obrobitelné epoxidové desky nebo dokonce hliněné nebo dřevěné modely jsou často vhodné. 3D tištěné formy využívající polymery jsou také stále běžnější pro prototypové i výrobní díly. Náklady na formy a jejich složitost se však zvyšují s tím, jaké jsou požadavky na estetiku hotového povrchu a na počet dílů, které mají být vyrobeny. Například vysoce odolné formy jsou obecně vyrobeny z kovů, které dokážou odolat opakovaným cyklům a zachovávají si dobrou kvalitu povrchu a rozměrovou přesnost. Formy, ve kterých se tvoří vysoce výkonné kompozitní díly, mohou být vyrobeny z uhlíkových vláken/epoxidu, litého grafitu, keramiky nebo kovů jako hliník a ocel. Ve všech případech nabízí každý materiál výhody a nevýhody. [47]

6.1 Hliník/ocel

Většina kovových materiálů na formy a kompozitních materiálů na díly, které tvoří, se neshodují z hlediska tepelné roztažnosti. Ocel a hliník jsou běžnou volbou pro kovové formy, protože jsou levnější ve srovnání s jejich slitinami. Během vytvrzování za tepla je však rozdíl tepelné roztažnosti mezi levnějšími kovovými formami a kompozitem často příliš extrémní pro výrobu kompozitních dílů s malou tolerancí. Pouze dražší kovové slitiny nabízejí bližší tepelnou roztažnost. V některých případech však může být tepelná roztažnost ocelových a hliníkových forem během vytvrzovacích cyklů s výhodou využita při konstrukci formy k záměrnému stlačení a spojení prvků součásti. [47]



Obrázek 22 Ocelová forma [48]

6.2 Invar

Invar je slitina niklu a železa, která se vyznačuje jedinečně nízkým koeficientem tepelné roztažnosti. Díky své vynikající rozměrové stabilitě a odolnosti se používá v různých aplikacích v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu. Nevýhodou invaru je vysoká cena a hmotnost, která při velkých rozměrech forem ztěžuje manipulaci. Existují hybridní řešení forem, které kombinují například tenkou čelní desku z invaru s kompozitní posilující strukturou. [47,49]



Obrázek 23 Forma z invaru [50]

6.3 Kompozit

Jednou z hlavních výhod použití kompozitní formy místo kovové formy jsou celkové náklady. Výroba kompozitních forem může být často o více než 50 % levnější kvůli krátké době výroby, která umožňuje efektivnější využití materiálů a nižší náklady na pracovní sílu na nekvalifikovaných pracovních pozicích, jako je řezání materiálů. Kromě toho jsou kompozitní formy lehké, odolné proti korozi a nenáročné na údržbu. Pro maloobjemovou výrobu je lze vyrobit levněji než CNC obrábění hliníku. Formy vyrobené z kompozitních materiálů také nevyžadují stejnou úroveň dokončovacích procesů po dokončení výroby což znamená, že je lze rychle nainstalovat a použít ve výrobním procesu. Kovové formy je třeba dodatečně tepelně zpracovat a upravit povrch. [51]



Obrázek 24 Kompozitní forma [52]

6.4 Epoxidová pryskyřice

Formy z epoxidové pryskyřice pro vysokoteplotní účely „RenShape“ jsou navrženy tak, aby splňovaly široké spektrum aplikací pro modelování, prototypy a výrobu. Epoxidové pryskyřice nabízejí kladné vlastnosti, jako kompatibilita s prepregy a obecně nabízejí vyšší teplotní odolnost a také chemickou odolnost ve srovnání s polyuretanovými nástrojovými deskami. [53]



Obrázek 25 Obrábění epoxidové desky [54]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je navrhnout složení a orientaci vrstev v kompozitu pro vývoj prototypu držáku baterie.

Z prepregů byly vyrobeny desky, ze kterých byly vyřezány zkušební tělíska pro dvě mechanické zkoušky: zkoušku tříbodovým ohybem ČSN EN ISO 14125 a metodu krátkého nosníku ČSN EN ISO 14130.

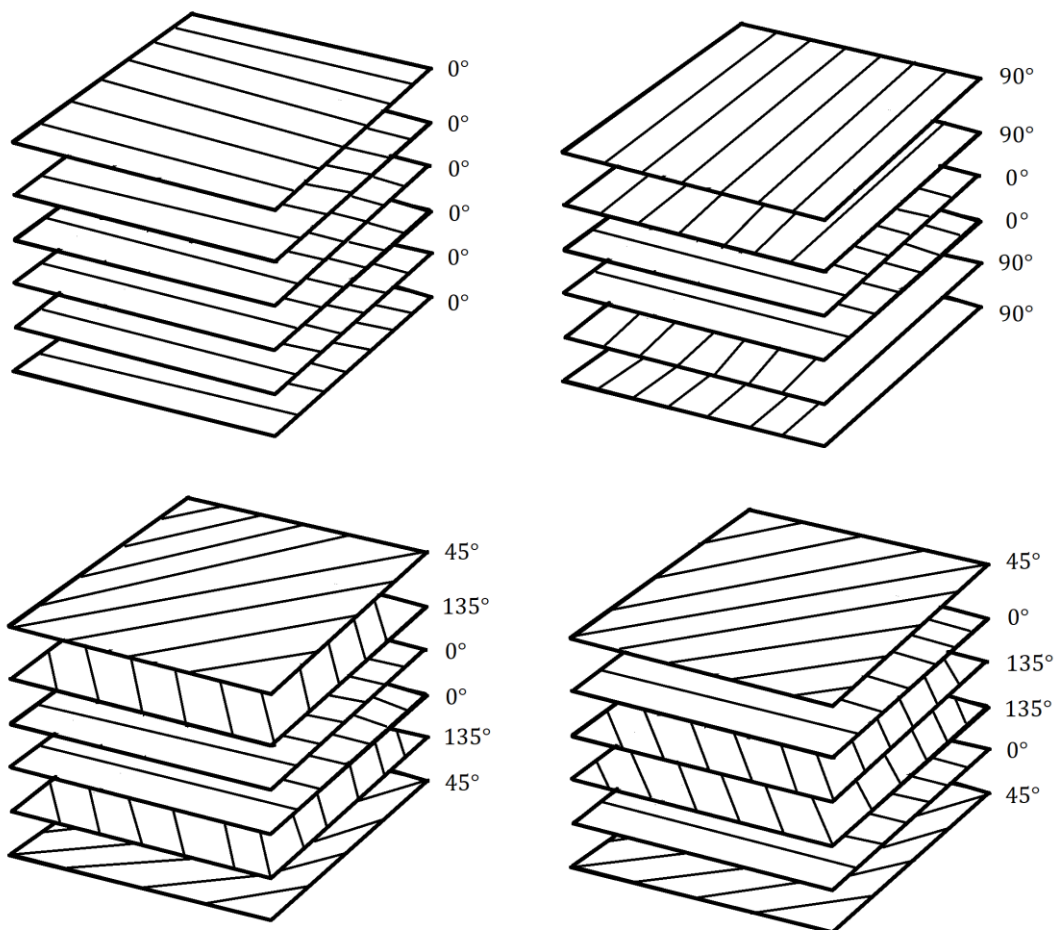
Pro prototypovou výrobu dílu byla navržena forma z RENSHAPE BM-5060 a dále technologický postup výroby.

Cíle bakalářské práce:

1. Výběr dvou prepregů
2. Návrh orientace vrstev
3. Výroba desek a vyřezání tělísek
4. Experimentální provedení zkoušek
5. Vyhodnocení výsledků zkoušek
6. Návrh výroby samotného dílu
7. Závěr bakalářské práce

8 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH DESEK

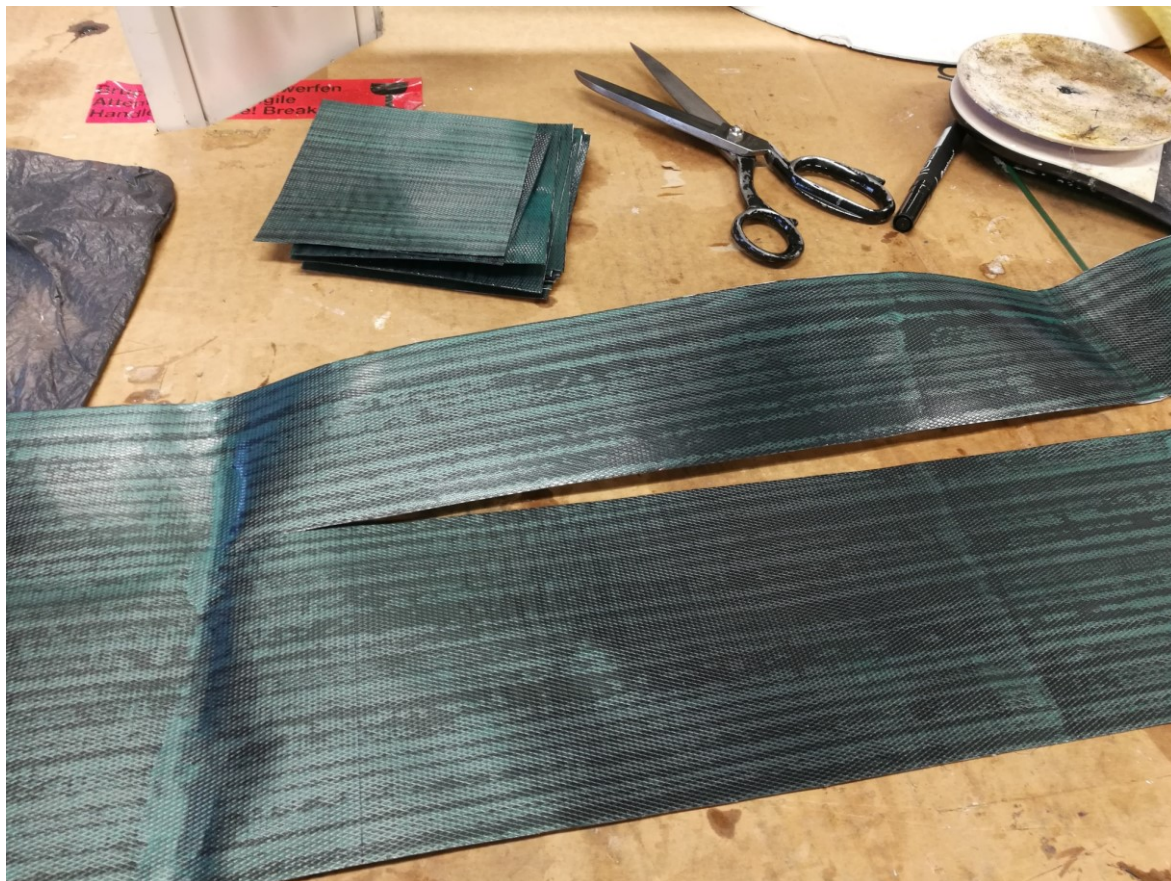
Desky nebyly vyráběny autoklávovým lisováním ale pomocí běžného lisu. Je to z důvodu nižší ceny výroby. Na výrobu desek byly zvoleny dva typy jednosměrných prepregů – jeden z uhlíkových vláken s epoxidovou matricí a jeden ze skleněných vláken. Na testování mechanických vlastností byly navrženy čtyři vzory desek. Každá deska měla rozměry 150 x 150 mm a byla složena z 6 vrstev. Kvůli nedostatku uhlíkového prepregu byly u tohoto typu prepregu vyrobeny pouze první dva vzory desek. V prvním vzoru byla všechna vlákna položena ve směru 0°. U druhého vzoru se po dvou 0° vrstvách vystřídal dvě 90° vrstvy. Třetí a čtvrtý vzor obsahovaly kromě 0° vrstev ještě 45° a 135° vrstvy.



Obrázek 26 Schéma vzorů prepregů

8.1 Stříhání a kladení prepregu

Prvním krokem bylo stříhání prepregů na 150 x 150 mm vrstvy v $0^\circ/90^\circ$ a $45^\circ/135^\circ$. Z těchto připravených vrstev se odtrhávali vnější ochranné fólie a poté byly vrstvy kladeny na papír na pečení, který sloužil jako separátor, aby se prepreg nepřilepil k formě.



Obrázek 27 Stříhání uhlíkového prepregu

8.2 Lisování a vyjmutí z lisu

Po položení všech šesti vrstev se na vrchní stranu znovu položil papír na pečení a tato sestava byla vložena mezi dva ocelové plechy. Sestava s plechy byla poté vložena do lisu. Prepregy byly vytvrzovány po dobu 15 minut při teplotě 150°C . Následně byla hotová deska vytažena z lisu a zatížena větším ocelovým plechem, který měl zabránit deformacím. Výsledné desky měly tloušťku cca 2 mm.



Obrázek 28 Lisování desek



Obrázek 29 Hotové označené desky

9 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

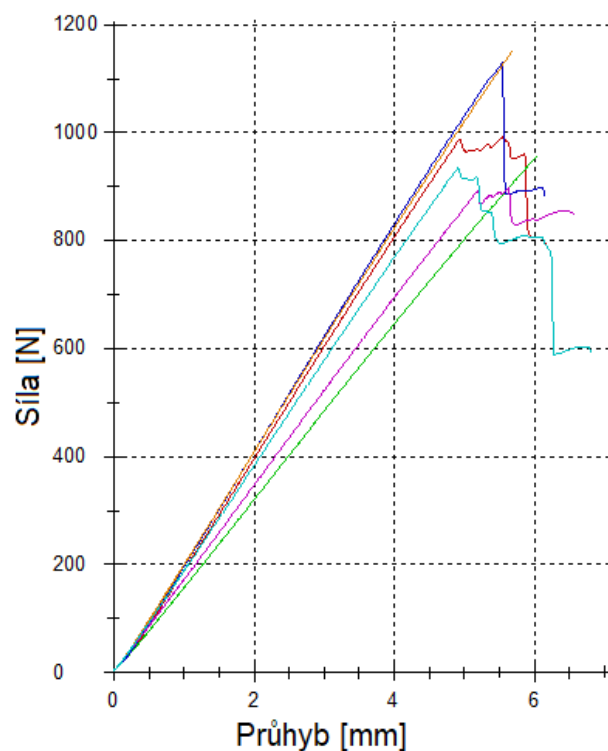
Z hotových desek byly vodním paprskem vyřezány dva typy tělísek. První typ byl určen na zkoušku ohybem ČSN EN ISO 14125 a druhý typ byl určen na metodu krátkého nosníku ČSN EN ISO 14130. Každý typ desky byl dále rozdělen na 2 variace. První variace měla tělíska podélně ve směru vláken 0° a druhá variace měla tělíska kolmo na směr vláken 0°. Zkoušky byly provedeny na Fakultě technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

9.1 Zkouška ohybem ČSN EN ISO 14125

Pro tuto zkoušku byl použit stroj Zwick 1456, který je určen pro zkoušky tahem, tlakem a ohybem. Rozměr tělísek byl 100x15x2 mm a podpěry byly ve vzdálenosti 40násobku tloušťky, tedy 80 mm, podle normy.

Tabulka 1 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro uhlíkové tělíska (typ 1 variace 1)

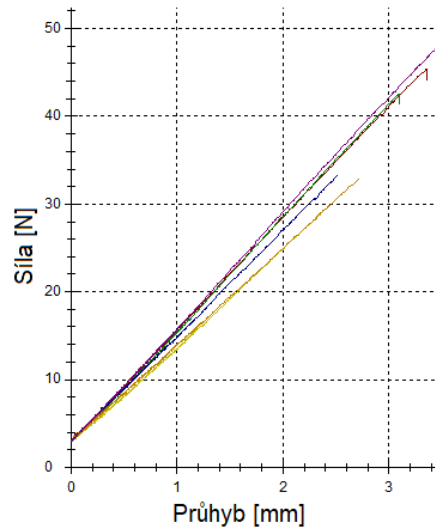
	E_r [MPa]	σ_{fM} [MPa]	F [N]	ε_f [%]	s_B [mm]
\bar{x}	110000	1340	871	1,3	6,2
$s_{\bar{x}}$	17100	169	185	0,1	0,4
$v_{\bar{x}}$ [%]	15,62	12,62	21,25	8,59	6,26



Obrázek 30 Závislost síly na průhybu pro uhlíková tělíska typu 1 variace 1

Tabulka 2 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro uhlíkové tělíska (typ 1 variace 2)

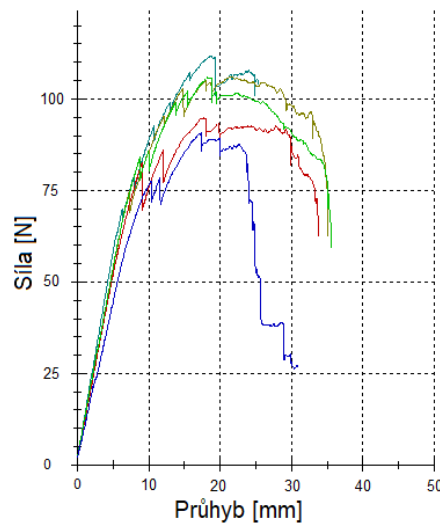
	E_r [MPa]	σ_{fM} [MPa]	F [N]	ϵ_f [%]	s_B [mm]
\bar{x}	8480	58,2	37,8	0,6	2,9
$s_{\bar{x}}$	600	9,42	7,01	0,1	0,5
$v_{\bar{x}}$ [%]	7,08	16,19	18,56	17,79	15,44



Obrázek 31 Závislost síly na průhybu pro uhlíková tělíska typu 1 variace 2

Tabulka 3 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro uhlíkové tělíska (typ 2 variace 1)

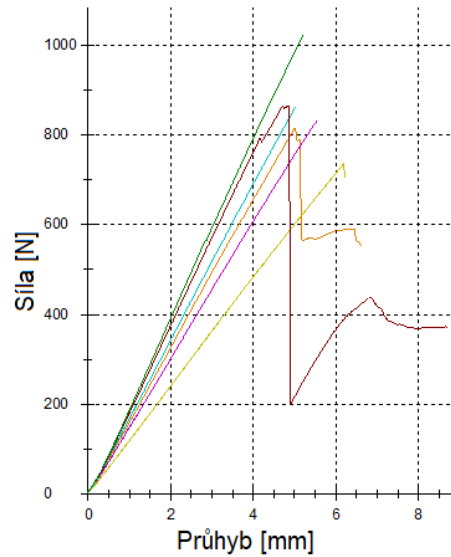
	E_r [MPa]	σ_{fM} [MPa]	F [N]	ϵ_f [%]	s_B [mm]
\bar{x}	10100	204	145	3,8	28,8
$s_{\bar{x}}$	1080	17,5	18,8	0,3	3,6
$v_{\bar{x}}$ [%]	10,76	8,57	13,01	9,15	12,65



Obrázek 32 Závislost síly na průhybu pro uhlíková tělíska typu 2 variace 1

Tabulka 4 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro uhlíkové tělíska (typ 2 variace 2)

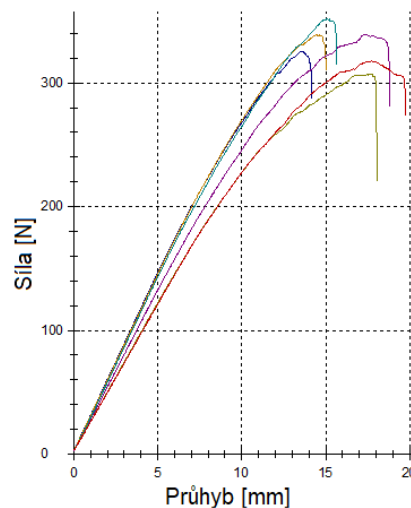
	E_r [MPa]	σ_{fM} [MPa]	F [N]	ϵ_f [%]	s_B [mm]
\bar{x}	111000	1260	725	1,2	6,2
$s_{\bar{x}}$	4230	86,2	235	0,1	1,4
$v_{\bar{x}}$ [%]	3,8	6,83	32,35	4,59	21,82



Obrázek 33 Závislost síly na průhybu pro uhlíková tělíska typu 2 variace 2

Tabulka 5 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 1 variace 1)

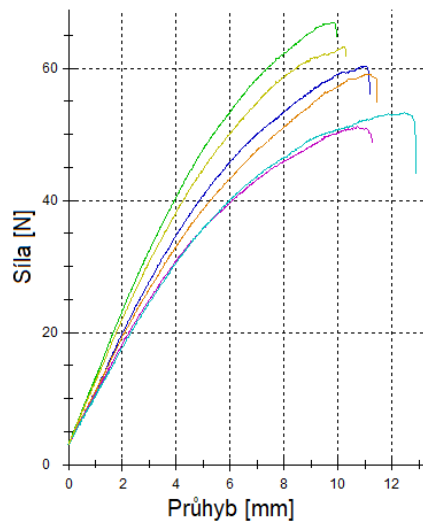
	E_r [MPa]	σ_{fM} [MPa]	F [N]	ϵ_f [%]	s_B [mm]
\bar{x}	37000	797	281	2,7	16,9
$s_{\bar{x}}$	2420	63,2	33,9	0,2	2,3
$v_{\bar{x}}$ [%]	6,53	7,93	12,04	6,99	13,36



Obrázek 34 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 1 variace 1

Tabulka 6 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 1 variace 2)

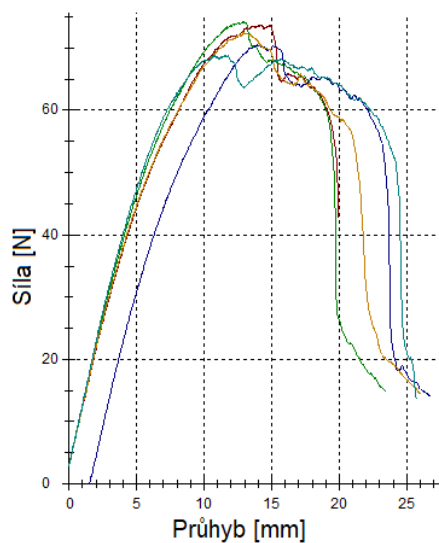
	E_r [MPa]	σ_{fM} [MPa]	F [N]	ϵ_f [%]	s_B [mm]
\bar{x}	9030	118	54,9	2	11,2
$s_{\bar{x}}$	1850	13,3	7,75	0,1	1
$v_{\bar{x}}$ [%]	20,49	11,32	14,1	6,77	9,23



Obrázek 35 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 1 variace 2

Tabulka 7 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 2 variace 1)

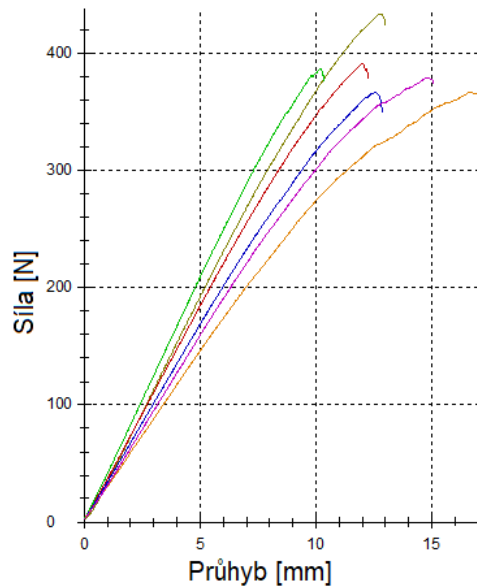
	E_r [MPa]	σ_{fM} [MPa]	F [N]	ϵ_f [%]	s_B [mm]
\bar{x}	9860	143	72	2,4	24,3
$s_{\bar{x}}$	591	11	12,7	2,25	2,8
$v_{\bar{x}}$ [%]	5,99	7,69	63,8	3,12	11,37



Obrázek 36 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 2 variace 1

Tabulka 8 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 2 variace 2)

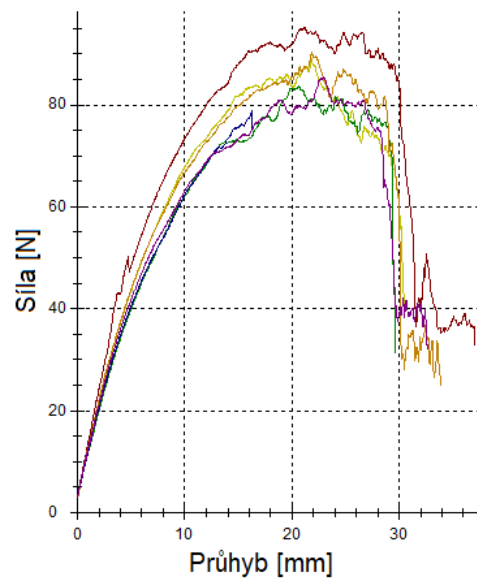
	E_r [MPa]	σ_{fM} [MPa]	F [N]	ε_f [%]	s_B [mm]
\bar{x}	30600	698	376	2,6	13,4
$s_{\bar{x}}$	3560	79,4	25,9	0,3	2,4
$v_{\bar{x}}$ [%]	11,63	11,38	6,9	11,23	17,63



Obrázek 37 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 2 variace 2

Tabulka 9 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 3 variace 1)

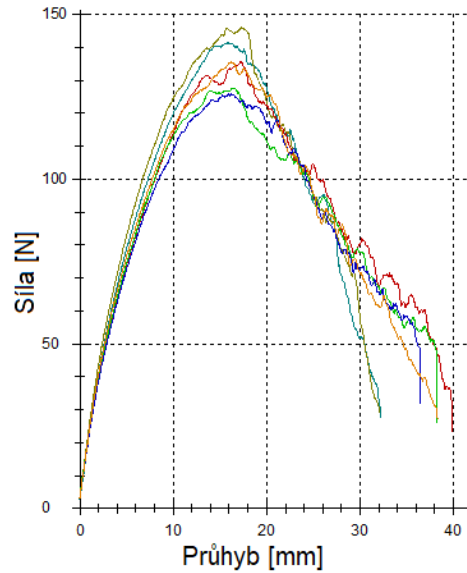
	E_r [MPa]	σ_{fM} [MPa]	F [N]	ε_f [%]	s_B [mm]
\bar{x}	10600	183	88,7	3,8	30,4
$s_{\bar{x}}$	1250	17,9	4,51	0,5	2,5
$v_{\bar{x}}$ [%]	11,81	9,74	5,08	13,97	8,2



Obrázek 38 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 3 variace 1

Tabulka 10 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 3 variace 2)

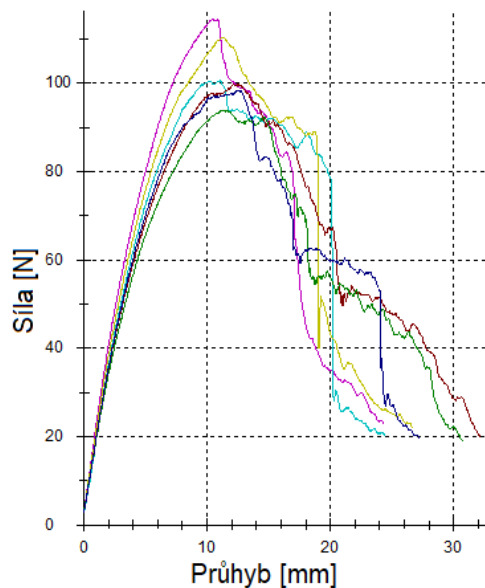
	E_r [MPa]	σ_{fM} [MPa]	F [N]	ϵ_f [%]	s_B [mm]
\bar{x}	8830	202	136	34,2	5,5
$s_{\bar{x}}$	1100	12,8	7,77	3,5	0,4
$v_{\bar{x}}$ [%]	12,51	6,33	5,73	10,33	7,84



Obrázek 39 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 3 variace 2

Tabulka 11 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 4 variace 1)

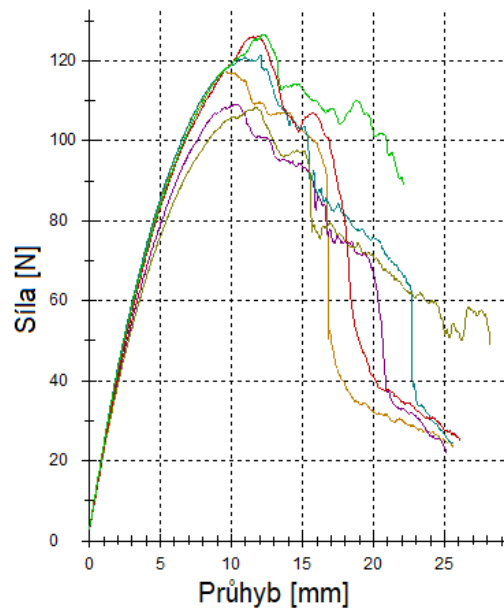
	E_r [MPa]	σ_{fM} [MPa]	F [N]	ϵ_f [%]	s_B [mm]
\bar{x}	9360	173	103	3,6	27,6
$s_{\bar{x}}$	1420	13,5	7,82	0,2	3,2
$v_{\bar{x}}$ [%]	15,13	7,83	7,6	5,93	11,78



Obrázek 40 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 4 variace 1

Tabulka 12 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 4 variace 2)

	E_r [MPa]	σ_{FM} [MPa]	F [N]	ε_f [%]	s_B [mm]
\bar{x}	9390	182	118	3,7	25,5
$s_{\bar{x}}$	1280	19,5	7,98	0,2	2
$v_{\bar{x}}$ [%]	13,59	10,69	6,75	6,62	7,69



Obrázek 41 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 4 variace 2



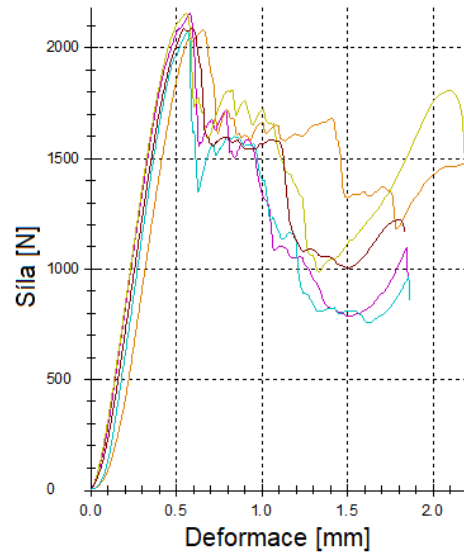
Obrázek 42 Experimentální zkouška ohybem

9.2 Metoda krátkého nosníku ČSN EN ISO 14125

Pro tuto zkoušku byl použit stroj Zwick 1456, který je určen pro zkoušky tahem, tlakem a ohybem. Rozměr tělísek byl 12x8x2 mm.

Tabulka 13 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro uhlíková tělíska (typ 1 variace 1)

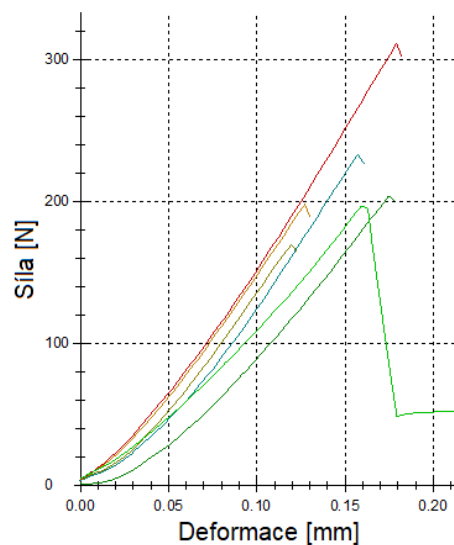
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	2110	90,04
$S_{\bar{x}}$	41,7	4,79
$v_{\bar{x}}$ [%]	1,97	5,32



Obrázek 43 Závislost síly na deformaci pro uhlíková tělíska typu 1 variace 1 pro metodu krátkého nosníku

Tabulka 14 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro uhlíková tělíska (typ 1 variace 2)

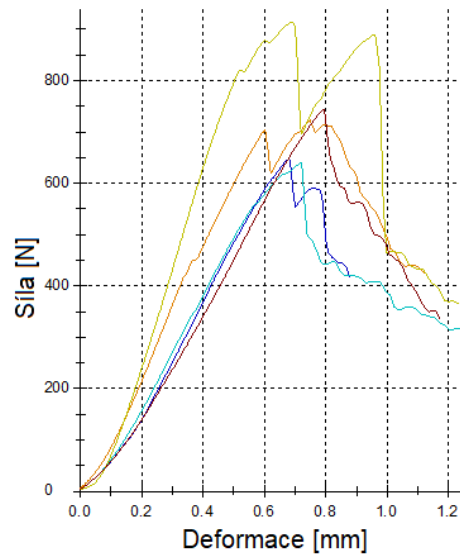
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	187	8,34
$S_{\bar{x}}$	86,3	1,73
$v_{\bar{x}}$ [%]	46,16	20,74



Obrázek 44 Závislost síly na deformaci pro uhlíková tělíska typu 1 variace 2 pro metodu krátkého nosníku

Tabulka 15 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro uhlíková tělíska (typ 2 variace 1)

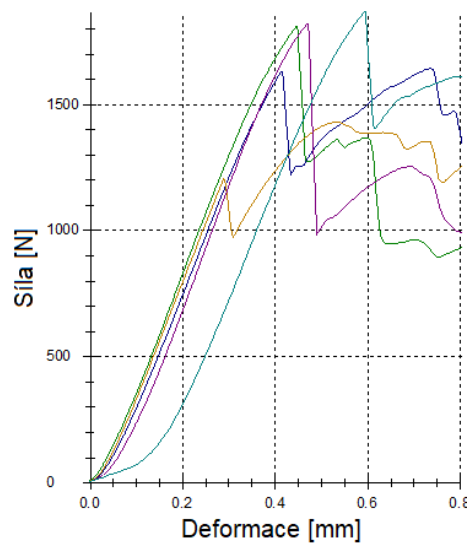
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	787	28,5
$s_{\bar{x}}$	166	3,53
$v_{\bar{x}}$ [%]	21,08	12,39



Obrázek 45 Závislost síly na deformaci pro uhlíková tělíska typu 2 variace 1 pro metodu krátkého nosníku

Tabulka 16 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro uhlíková tělíska (typ 2 variace 2)

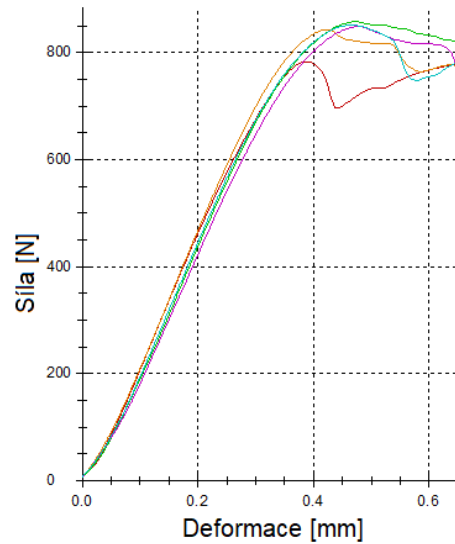
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	1740	69,97
$s_{\bar{x}}$	172	8,05
$v_{\bar{x}}$ [%]	9,9	11,5



Obrázek 46 Závislost síly na deformaci pro uhlíková tělíska typu 2 variace 2 pro metodu krátkého nosníku

Tabulka 17 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 1 variace 1)

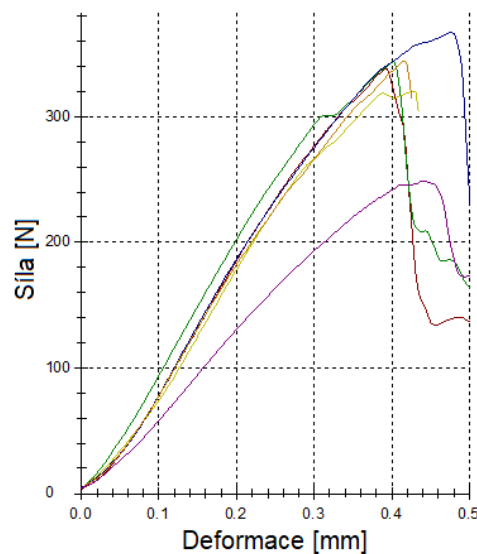
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	836	48,77
$S_{\bar{x}}$	27,3	1,68
$v_{\bar{x}}$ [%]	3,27	3,44



Obrázek 47 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 1 variace 1 pro metodu krátkého nosníku

Tabulka 18 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 1 variace 2)

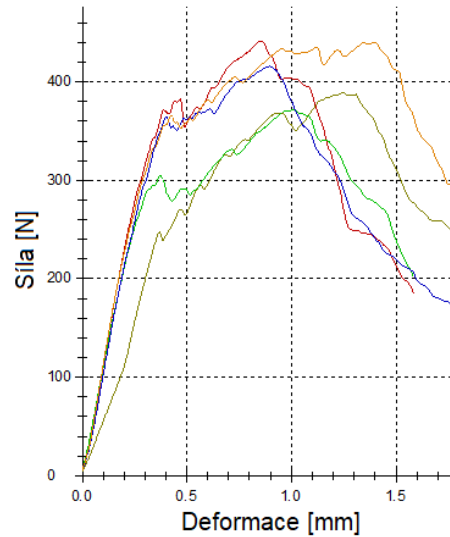
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	325	14,25
$S_{\bar{x}}$	52,1	1,84
$v_{\bar{x}}$ [%]	16,04	12,91



Obrázek 48 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 1 variace 2 pro metodu krátkého nosníku

Tabulka 19 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 2 variace 1)

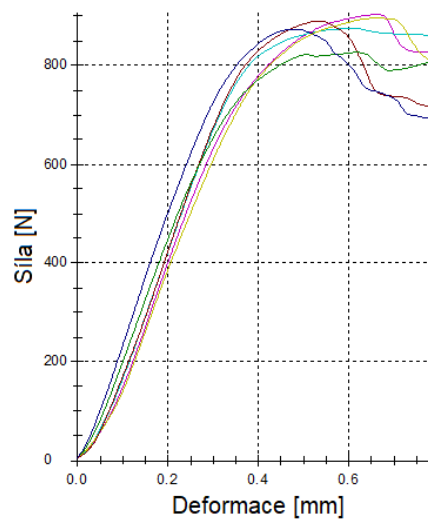
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	372	22,04
$s_{\bar{x}}$	66,8	1,32
$v_{\bar{x}}$ [%]	17,97	5,99



Obrázek 49 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 2 variace 1 pro metodu krátkého nosníku

Tabulka 20 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 2 variace 2)

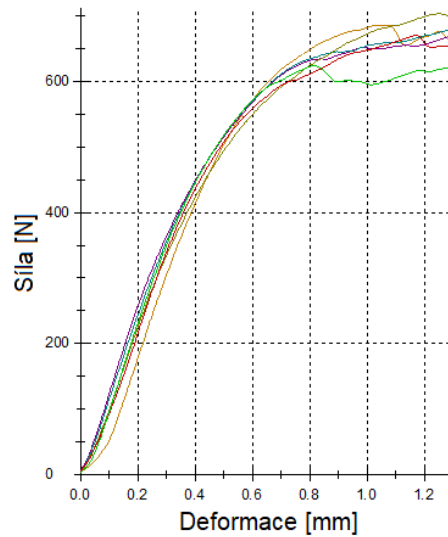
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	888	42,2
$s_{\bar{x}}$	12,8	1,58
$v_{\bar{x}}$ [%]	1,45	3,74



Obrázek 50 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 2 variace 2 pro metodu krátkého nosníku

Tabulka 21 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 3 variace 1)

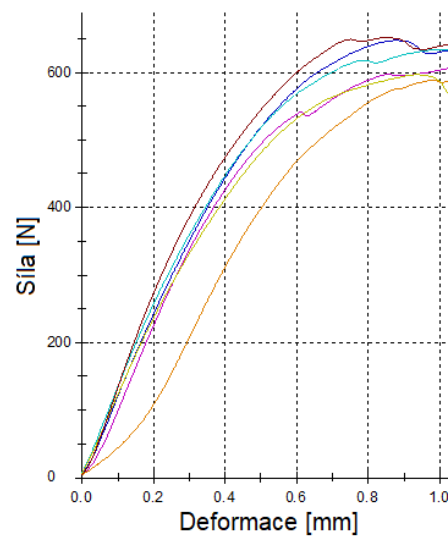
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	652	79,26
$s_{\bar{x}}$	24,3	8,34
$v_{\bar{x}}$ [%]	3,73	10,52



Obrázek 51 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 3 variace 1 pro metodu krátkého nosníku

Tabulka 22 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 3 variace 2)

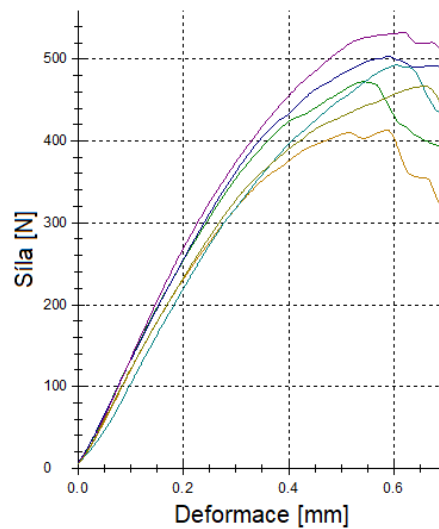
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	616	82,19
$s_{\bar{x}}$	26,8	3,34
$v_{\bar{x}}$ [%]	4,36	4,06



Obrázek 52 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 3 variace 2 pro metodu krátkého nosníku

Tabulka 23 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 4 variace 1)

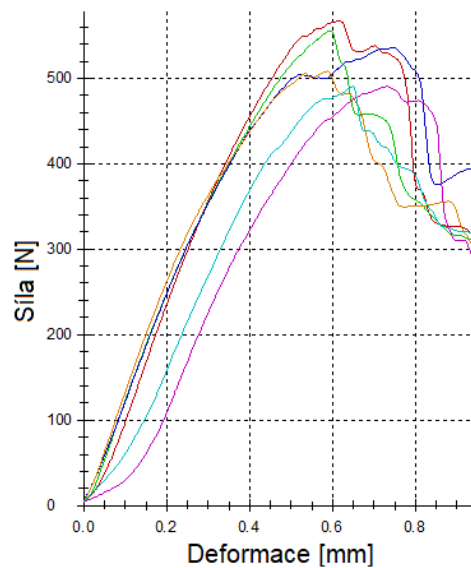
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	480	22,83
$s_{\bar{x}}$	40,3	1,35
$v_{\bar{x}}$ [%]	8,4	5,91



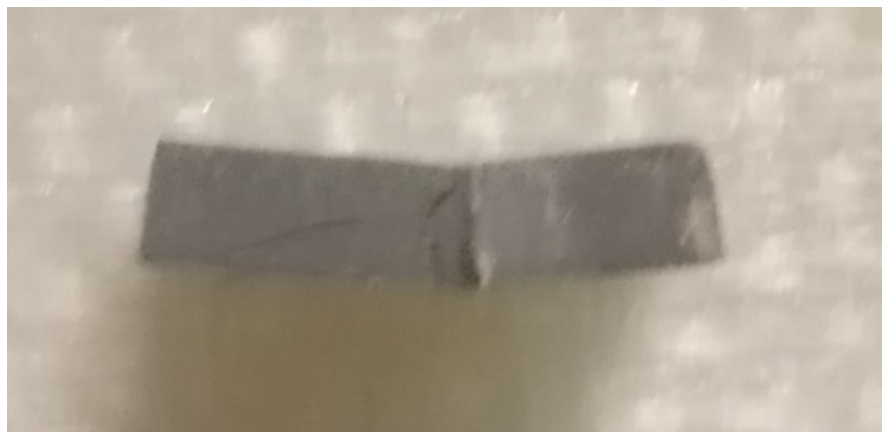
Obrázek 53 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 4 variace 1 pro metodu krátkého nosníku

Tabulka 24 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 4 variace 2)

	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	525	25,41
$s_{\bar{x}}$	33,2	2,16
$v_{\bar{x}}$ [%]	6,32	8,5



Obrázek 54 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 4 variace 2 pro metodu krátkého nosníku



Obrázek 55 Uhlíkové tělísko po metodě krátkého nosníku

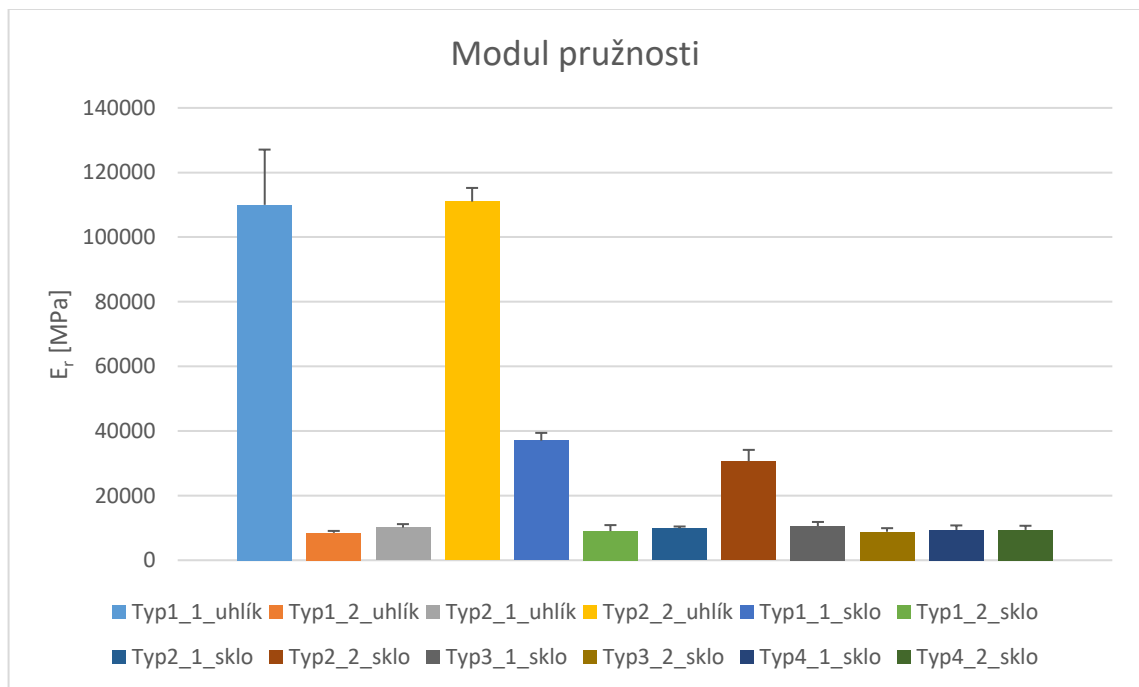


Obrázek 56 Skelné tělísko po metodě krátkého nosníku

10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

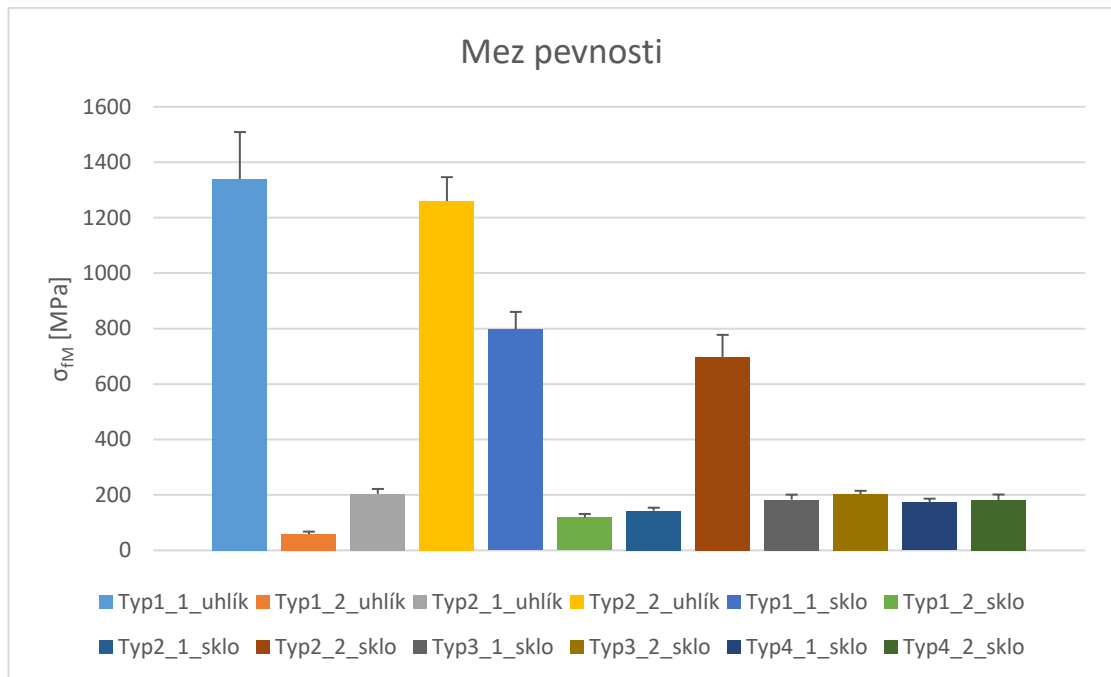
Pro porovnání byly hodnoty znázorněny pomocí sloupcových grafů.

10.1 Vyhodnocení tělísek pro ohybovou zkoušku



Obrázek 57 Porovnání modulů pružnosti při zkoušce tříbodovým ohybem

Na obrázku výše lze vidět porovnání modulů pružnosti při zkoušce tříbodovým ohybem. Nejvyšší modul pružnosti měla u obou materiálů tělíska typu 1 variace 1 (všech 6 vrstev 0° , tělíska vyřezaná po směru 0° vláken) a typ 2 variace 2 (2 vrstvy 0° , 4 vrstvy 90° , u této variace byla tělíska rovnoběžně s 90° vrstvami). Ostatní typy tělísek dosahovaly podobných nízkých hodnot.



Obrázek 58 Porovnání meze pevnosti při zkoušce tříbodovým ohybem

Na obrázku výše lze vidět porovnání mezí pevnosti při zkoušce tříbodovým ohybem. Nejvyšší mez pevnosti měla u obou materiálů tělíska typu 1 variace 1 (všech 6 vrstev 0°, tělíska vyřezaná po směru 0° vláken). Uspokojivé vlastnosti měl také typ 2 variace 2 (2 vrstvy 0°, 4 vrstvy 90°, u této variace byla tělíska rovnoběžně s 90° vrstvami). Ostatní typy tělísek dosahovaly podobných nízkých hodnot.

10.2 Vyhodnocení tělísek pro metodu krátkého nosníku

Zkušební tělíska u metody krátkého nosníku nelze porovnat protože tato zkouška byla neúspěšná. Tělíska u této zkoušky byla porušena jiným než mezilaminárním smykovým porušením – konkrétně byla porušena na tah. Tuto skutečnost lze pozorovat na Obr. 55 a 56. Špatné poruchy byly nejspíše způsobeny nevhodnými rozměry zkušebních tělísek. Lepších výsledků by šlo dosáhnout zvětšením rozměrů na alespoň 20x10 mm.

10.3 Porovnání zkušebních tělísek

Pro vyhodnocení typů tělísek byly provedeny dvě zkoušky: zkouška tříbodovým ohybem a metoda krátkého nosníku. Ze zjištěných hodnot vyplývá že obecně nejlepší vlastnosti měl u obou materiálů typ 1 variace 1. Druhý nejlepší byl typ 2 variace 2. Typ 1 variace 1 měl nejlepší vlastnosti díky tomu, že všech šest vrstev bylo natočeno kolmo k zatěžovacímu

prvku. V praxi ovšem není vhodné lepit více než dvě vrstvy se stejným směrem na sebe. Proto je vhodnější typ 2 variace 2. Tento typ má dvě prostřední 0° vrstvy a na krajích dvě 90° vrstvy. Nutno podotknout, že výsledky mohly ovlivnit nepřesnosti ve výrobě desek pro tělíska, či lidská chyba při samotném měření.

Tabulka 25 Porovnání materiálů u ohybové zkoušky pro typ 2 variace 2

Typ2_2	E_r [MPa]	σ_{fM} [MPa]
uhlík	111000	1260
sklo	30600	698

Z Tab. 25 si lze všimnout, že modul pružnosti v ohybu a pevnost v ohybu jsou u uhlíkového prepregu daleko vyšší. Důvodem lepšího výsledku může být vyšší procentuální podíl výztuže v uhlíkovém prepregu.

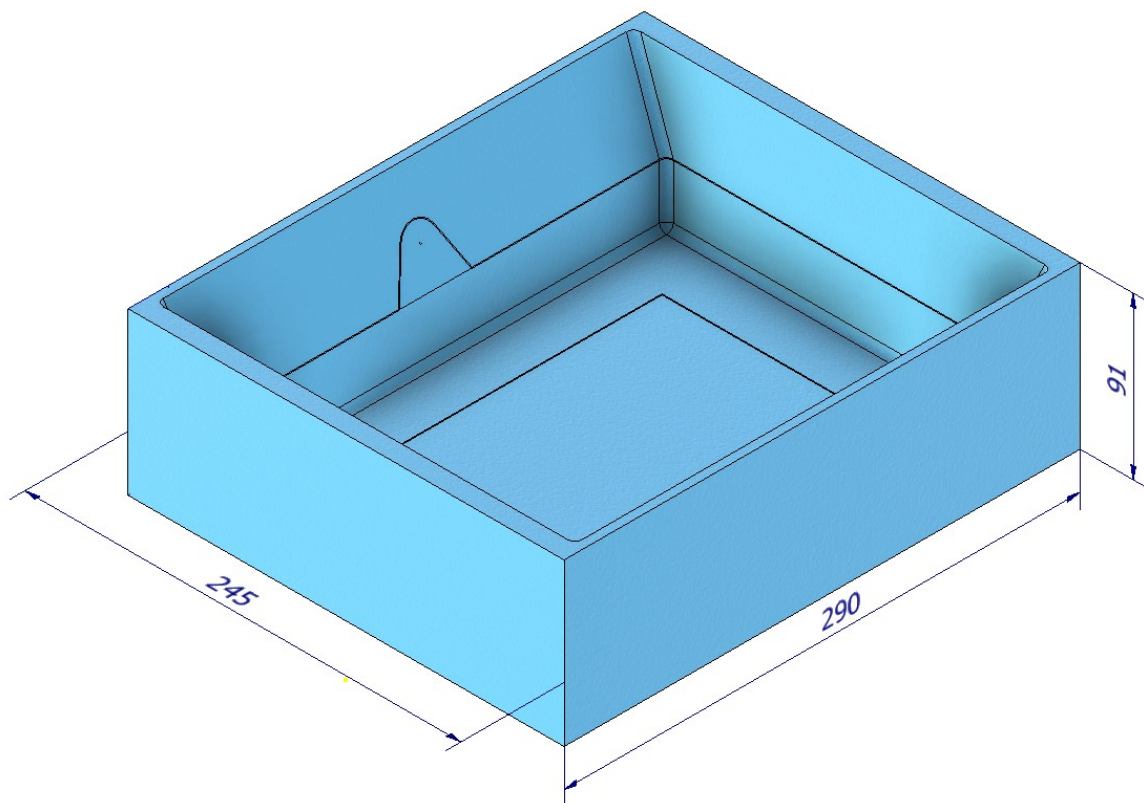
11 NÁVRH PROTOTYPU DRŽÁKU BATERIE

Pro výrobu držáku baterie by bylo vhodné vrstvení podle typu 2 variace 2, celkově z 10 vrstev, na okrajích dvě 0° vrstvy. Tloušťka výrobku by byla stejná jako u zkušebních tělísek, tedy 2 mm. Podle výsledků mechanických zkoušek by byl jako vhodný materiál uhlíkový prepreg s epoxidovou matricí, konkrétně GG-204 T.

11.1 Návrh formy

Na materiál formy by byla použita epoxidová deska RENSHAPE BM 5060, protože tento materiál je vhodný na výrobu kompozitních dílů z prepregu. Má podobnou teplotní roztažnost jako hliník ale je jednodušší na obrábění. Další výhodou je nižší pořizovací cena oproti hliníku.

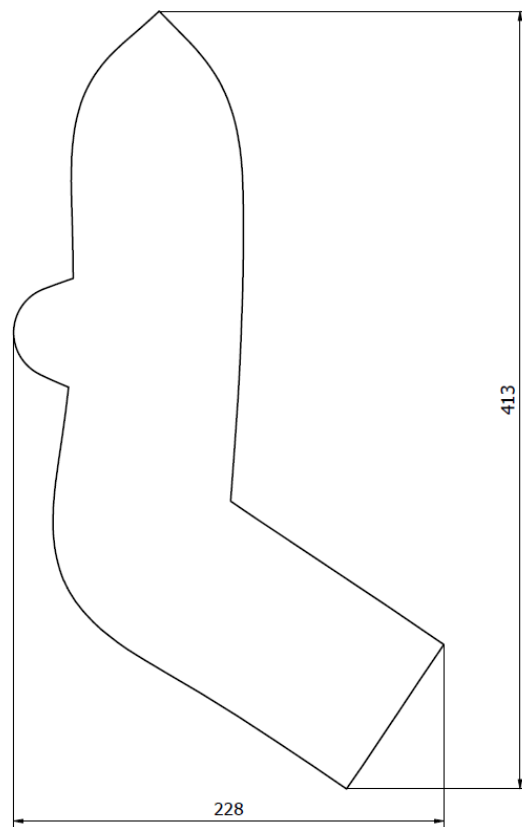
Forma má 5° úkosy po stranách vnitřní části pro snadnější vyjmutí výrobku z formy. Dále má forma drážky, které ukazují obrys výrobku. Dva výstupky na „packách“ slouží jako značky pro vyvrtání díry po vyjmutí výrobku z formy.



Obrázek 59 Model formy

11.2 Šablona pro vrstvy

Celkem by bylo použito 5 velikostí šablon. Na Obr. 60 je nejmenší šablona, každá další velikost šablony by byla o 15 mm delší na obou koncích (špičatý a rovný konec). Pomocí šablon by bylo vystřiženo 20 kusů výstřižků pro 10 vrstev prepregu, od každé velikosti 4 výstřižky prepregu.



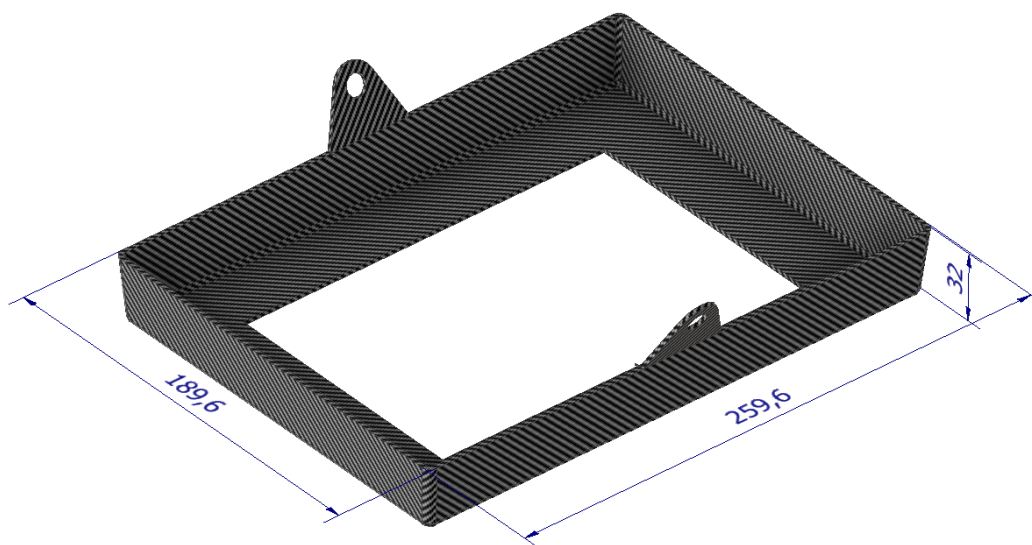
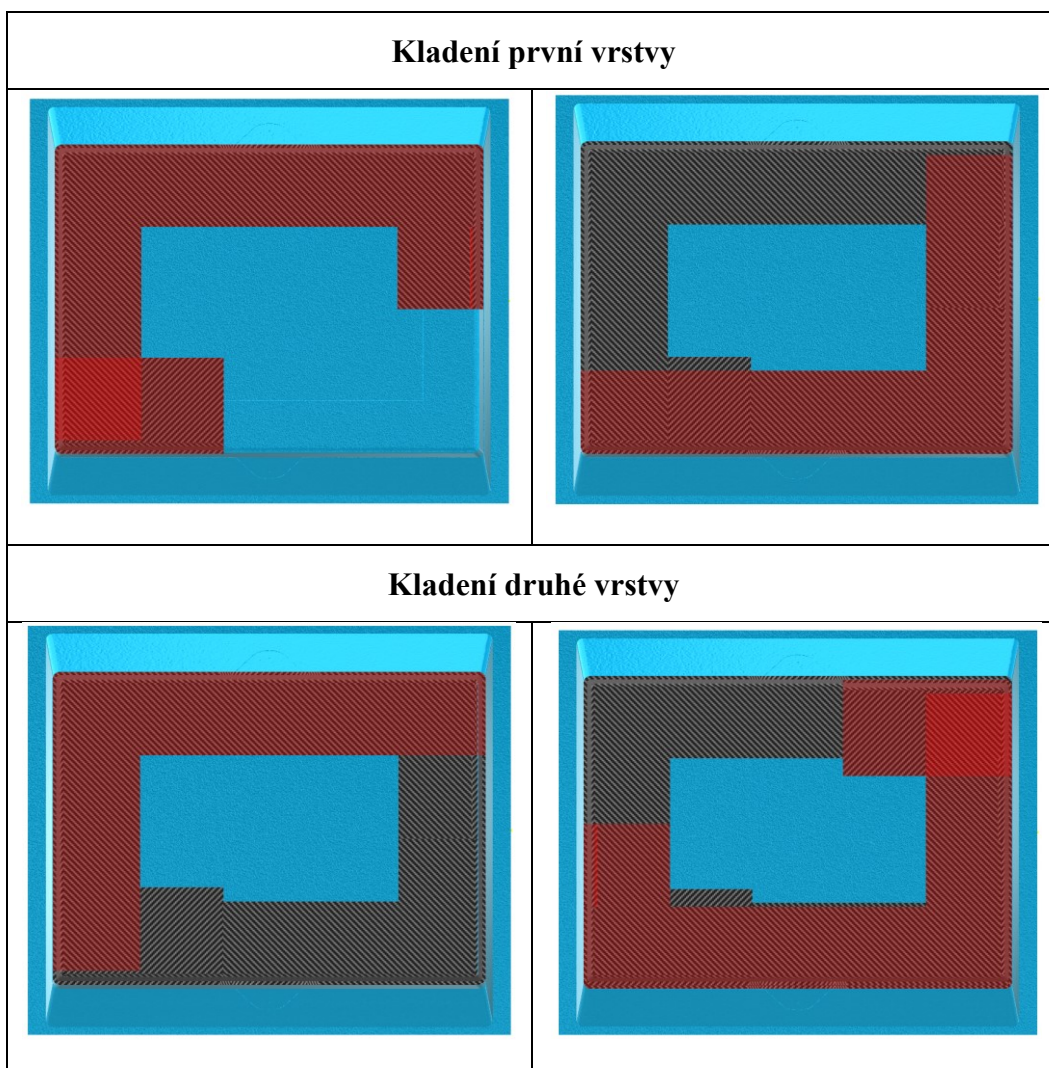
Obrázek 60 Šablona na jednotlivé vrstvy

11.3 Technologický postup

Tabulka 26 Technologický postup

č.o.	Operace	Pomůcky, postup
1.	Vyjmutí prepregu z mrazáku 1 den před aplikací	-
2.	Čištění formy	Hadřík, líh
3.	Aplikace plniče pórů	Plnič pórů, papírový ubrousek
4.	Separace formy	Separátor, papírový ubrousek
5.	Kontrola správnosti separace	Lepící páska
6.	Nastřihání prepregů dle šablon	Nůžky, pravítko, metr
7.	Pokládání 1. vrstvy prepregu	Váleček, nejmenší a největší výstřižky, podle Tab. 27
8.	Použití vakua na první vrstvu	-
9.	Pokládání 2. vrstvy	Váleček, Tab. 27
10.	Pokládání 3. - 10. vrstvy	Váleček, 3. a 4. vrstva použit druhý největší a druhý nejmenší výstřižek atd. pro další vrstvy, kladení podle Tab. 27
11.	Zavakuování	Separáční fólie, odsávací rohož, vakuovací fólie, těsnící páska
12.	Vytvrzení v autoklávu	Autokláv
13.	Odformování	Stlačený vzduch, speciální pomůcky
14.	Ořezání dílu	Kotoučová pila, vrtačka
15.	Leštění dílu	Lešticí pasta, hadřík
16.	Lakování dílu	Lakovací pistol

Tabulka 27 Kladení první a druhé vrstvy



Obrázek 61 Model výrobku

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala návrhem prototypu hybridního dílu do automobilu. Práce obsahuje volbu materiálů, volba orientace vrstev a testování mechanických vlastností. Podle dosažených výsledků byl vybrán materiál, typ orientace vrstev a navržena samotná výroba prototypu a technologický postup výroby.

V teoretické části bakalářské práce byly popsány kompozitní materiály a jejich složení včetně typů vláken a maticí. V práci jsou popsány prepregy a autoklávové lisování. Dále se práce zabývá historií a současností kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu.

V praktické části byly zvoleny dva prepregy – jeden uhlíkový a druhý skelný. Dále byl stanoven počet a natočení vrstev v prepregu. Následně byly vyrobeny z prepregů desky pomocí lisu. Navrženy byly čtyři typy desek. První typ obsahoval šest 0° vrstev, druhý typ dvě 0° vrstvy a čtyři 90° vrstvy. Třetí a čtvrtý typ obsahovaly dvě 0° vrstvy, dvě 45° vrstvy a dvě 135° vrstvy – tyto typy se lišily pouze v pořadí vrstev. Tloušťka desek byla 2 mm. Z desek byly poté vyřezány vodním paprskem zkušební tělíska. Tělíska byla nadále rozdělena na dvě variace – první variace měla tělíska vyřezána po směru 0° vrstev, druhá variace měla tělíska vyřezána kolmo k 0° vrstvám.

Po vyřezání tělísek byly provedeny mechanické zkoušky. Zkušební tělíska byla rozdělena na dvě kategorie podle mechanických zkoušek – větší tělíska 100×15 mm byla určena na zkoušku tříbodovým ohybem a menší tělíska 12×8 mm byla určena pro metodu krátkého nosníku. Dalším bodem bylo vyhodnocení a porovnání vzorků. Metoda krátkého nosníku nešla vyhodnotit z důvodu špatných tahových poruch na tělískách způsobených nesprávnými rozměry zkušebních tělísek. Obecně nejlepších výsledků dosahoval uhlíkový typ 1 variace 1. Běžně je nevhodné použít stejnou orientaci vrstev na více než dvě vrstvy za sebou. Tento typ obsahoval všech šest vrstev ve stejném směru a proto nebyl vhodný.

V poslední části bakalářské práce byl zvolen uhlíkový typ 2 variace 2, který byl složen ze šesti 0° vrstev a čtyř 90° vrstev. Tento typ měl jak solidní pružnost v ohybu tak i pevnost v ohybu. Posledním krokem byl návrh formy a technologický postup pro výrobu držáku na baterii.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BARBERO, Ever J. *Introduction to Composite Materials Design* [online]. Third Edition. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2018 [cit. 2023-02-11]. ISBN 978-1-138-19680-3.
- [2] STAAB, George H., [2015]. *Laminar composites* [online]. Second edition. Boston, MA: Butterworth-Heinemann [cit. 2023-02-11]. ISBN 978-012-8024-003.
- [3] *Particle-reinforced Composites* [online]. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://science.jrank.org/pages/1665/Composite-Materials-Particle-reinforced-composites.html>
- [4] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 328 s.
- [5] CAMPILHO, Raul D. S. G. *Natural fiber composites*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2016]. ISBN 978-1-4822-3901-0.
- [6] HAHN, Filip. *KOMPOZITY NA BÁZI PŘÍRODNÍCH VLÁKEN*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Mgr. RADEK PŘÍKRYL, Ph.D.
- [7] ELMARAKBI, Ahmed. *Advanced composite materials for automotive applications: structural integrity and crashworthiness*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-42386-8.
- [8] EICHHORN, S.J., J.W.S. HEARLE, M. JAFFE a T. KIKUTANI, ed. *Handbook of textile fibre structure Volume 2: Natural, regenerated, inorganic and specialist fibres*. 2. dopl. vyd. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009. ISBN 978-1-84569-730-3.
- [9] WALLEMBERGER, Frederick T. a Paul A. BINGHAM. *Fiberglass and glass technology: energy-friendly compositions and applications*. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-0736-3.
- [10] WANG, Haomin Helen. *Test of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Anchors*. Austin, 2013. Master thesis. The University of Texas at Austin. Vedoucí práce James O. Jirsa.

- [11] Kamenny Vek. *Application of basalt fiber products in automotive industry: thermoplastic compound parts, brake pads, headliners, CNG cylinders and others* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://basfiber.com/application/automotive>
- [12] ZHAO, Hua, Bowen GUAN, Rui XIONG a Aiping ZHANG. *Investigation of the Performance of Basalt Fiber Reinforced Asphalt Mixture*. Applied Sciences. 2020, 2. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/app10051561>
- [13] YI, Xiao-Su, Shanyi DU a Litong ZHANG, ed. *Composite materials engineering*. Beijing: Chemical Industry Press, [2018]. ISBN 978-981-10-5695-6.
- [14] BRAGA, Fábio de Oliveira, Thiago Lara MILANEZI, Sergio Neves MONTEIRO, Luis Henrique Leme LOURO, Alaelson Vieira GOMES a Édio Pereira LIMA JR. *Ballistic comparison between epoxy-ramie and epoxy-aramid composites in Multilayered Armor Systems*. Journal of Materials Research and Technology. 2018, 2018, 4. Dostupné z: doi:[10.1016/j.jmrt.2018.06.018](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.018)
- [15] MORGAN, Peter. *Carbon fibers and their composites*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005. ISBN 0-8247-0983-7.
- [16] CHOI, Charles Q. *Carbon Fiber Cloth Can Generate Hydrogen: Catalyst Can Work in Water*. IEEE Spectrum [online]. 2015 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/carbon-fiber-cloth-can-generate-hydrogen#toggle-gdpr>
- [17] MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 978-0-8493-4205-9.
- [18] WOOD, Karen. *Ceramic-matrix composites heat up*. Composites World [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/ceramic-matrix-composites-heat-up>
- [19] Ajay Kumar, P., Rohatgi, P. & Weiss, D. *50 Years of Foundry-Produced Metal Matrix Composites and Future Opportunities*. Inter Metalcast 14, 291–317 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40962-019-00375-4>
- [20] RANA, Sohel a Raul FANGUEIRO, *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications*. Woodhead Publishing, 2016. ISBN 978-0-08-100054-0.

- [21] LENGSELD, H. et al. *Composite Technology - Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies*. Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-599-9.
- [22] HCS2402-103 – Hexcel Carbon Fiber Prepreg – Fabric. HeatCon [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.heatcon.com/product/hcs2402-103-hexcel-carbon-fiber-prepreg-fabric/>
- [23] *Prepreg Carbon Fiber*. Adhesive Prepregs for Composite Manufacturers [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://prepregs.com/prepreg-carbon-fiber/>
- [24] *Twill weave or plain weave carbon fiber?*. SYNSETECH [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://synsetech.com/blogs/tech/twill-weave-or-plain-weave-carbon-fiber/>
- [25] STRONG, A. Brent. *Fundamentals of composites manufacturing: Materials, methods, and applications*. 2nd ed. Dearborn, 2008. ISBN 978-087263854-9.
- [26] RICHARDSON, Mike. *AIC Group provide autoclave to leading F1 team*. Composites in Manufacturing [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.composites.media/aic-group-provide-autoclave-to-leading-f1-team/>
- [27] JU, Xiangwen et al., 2021. Research on the Manufacturing Quality of Co-Cured Hat-Stiffened Composite Structure. *Materials* [online]. **14**(11) [cit. 2022-04-09]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14112747
- [28] MAZUMDAR, Sanjay K. *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-0585-3.
- [29] ADVANI, Suresh G. a Kuang-Ting HSIAO, *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0-85709-625-8.
- [30] BOTELHO, Edson Cocchieri, Rogério Almeida SILVA, Luiz Cláudio PARDINI a Mirabel Cerqueira REZENDE. *A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000300002>
- [31] GARDINER, Ginger. *Class A composites: A history* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/class-a-composites-a-history>

- [32] *The Truth About Henry Ford's Soybean Car* [online]. In: . [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://macsmotorcitygarage.com/the-truth-about-henry-fords-soybean-car/>
- [33] *Automotive Composites Market in 2022 | MDC Detailed Analysis Report*. [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/automotive-composites-market-2022-mdc-detailed-analysis-report->
- [34] *BMW i3: carbon fiber body* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.plastix-world.com/bmw-i3-carbon-fiber-body/>
- [35] *Cut From A Different Cloth* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/blog/cut-different-cloth>
- [36] *Fiberglass to Carbon Fiber: Corvette's Lightweight Legacy* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: https://news.gm.com/newsroom.detail.html/Pages/news/us/en/2012/Aug/0816_corvette.html/
- [37] *Composites-intensive masterwork: 2020 Corvette, Part 1* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-intensive-masterwork-2020-corvette-part-1>
- [38] *McLaren celebrates 10 years of the McLaren P1 hybrid hypercar* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/news/mclaren-celebrates-10-years-of-the-mclaren-p1-hybrid-hypercar>
- [39] *Carbon Fiber* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.lamborghini.com/en-en/innovation-excellence/carbon-fiber>
- [40] *Lamborghini Aventador LP 700-4 carbon fiber monocoque on display at the European Patent Office in Munich* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.thenewsmarket.com/news/lamborghini-aventador-lp-700-4-carbon-fiber-monocoque-on-display-at-the-european-patent-office-in-mu/s/ce74a8f2-99fe-4bc8-9846-cbe7a2c59713>
- [41] *Composites May Make Truck Bed Corrosion a Thing of the Past* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.compositesone.com/composites-may-make-truck-bed-corrosion-a-thing-of-the-past/>

- [42] *Here Are All Six Things the 2019 GMC Sierra's Wild MultiPro Tailgate Can Do* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/news/a19056678/here-are-all-six-things-the-2019-gmc-sierras-wild-multipro-tailgate-can-do/>
- [43] *Toyota Tundra composite seatback design awarded 2022 Altair Enlighten Award* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/news/toyota-tundra-composite-seatback-design-award-2022-altair-enlighten-award>
- [44] *Ford Finally Does It, Creates World's First Mass-Produced Carbon Fiber Wheels* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://blog.carbonfibergear.com/ford-finally-does-it-creates-worlds-first-mass-produced-carbon-fiber-wheels/>
- [45] BĚHÁLEK, Luboš, 2015. *Polymery* [online]. Verze knihy: 15. [cit. 2022-05-02]. ISBN 978-80-88058-66-3.
- [46] *THREE POINT BEND TEST FIXTURES* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.instron.com/en/products/testing-accessories/flexure-fixtures/three-point-bend-test-fixtures>
- [47] *Materials & Processes: Tooling for composites* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/tooling>
- [48] *Molds for composites made of metal or composites* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://lucasindustries.com/molds-aerospace-composites/>
- [49] *INVAR®* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://freeman-japan.co.jp/en/mold/invar/>
- [50] *Invar, wire additive manufacturing expand aerocomposite tooling options* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/invar-wire-additive-manufacturing-expand-aerocomposite-tooling-options>
- [51] *Patterns and Moulds* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://swiftcomposites.ie/patterns-and-moulds/>
- [52] *Composite Molds & Fixtures* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://holifielengineering.com/composites>

- [53] *Tooling & High-Temperature Work Boards* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.freemansupply.com/products/tooling-high-temperature-work-boards>
- [54] *RenShape® Epoxy-Platten* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.obo-werke.de/produkte/renshaper-epoxy-platten.html>
- [55] ADAMS, Don. *The short beam shear test* [online]. 23.9.2010 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/the-short-beam-shear-test>
- [56] *Short Beam Shear Testing ASTM D2344* [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.intertek.com/shear-testing/d2344/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

σ_{fM}	Pevnost v ohybu	[MPa]
F	Síla	[N]
L	Vzdálenost podpěr	[mm]
b	Šířka	[mm]
h	Tloušťka	[mm]
ε_f	Deformace ohybu	[%]
E_r	Modul pružnosti v ohybu	[MPa]
s_B	Průhyb	[mm]
τ_M	Mezilaminární smyková pevnost	[MPa]
SiNC	Karbonitrid křemíku	

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Rozdělení kompozitů [4]	11
Obrázek 2 Rozdělení přírodních vláken [6].....	12
Obrázek 3 Vlákná E-skla [10]	13
Obrázek 4 Basaltová vlákna [12].....	14
Obrázek 5 Aramidová vlákna [14].....	15
Obrázek 6 Uhlíková vlákna [16].....	15
Obrázek 7 SiNC vlákna v keramické matrici[18].....	16
Obrázek 8 Vlákná a částice v kovové matrici [19].....	17
Obrázek 9 Prepreg [22].....	19
Obrázek 10 Keprová a plátnová vazba [24].....	20
Obrázek 11 Metoda rozpouštědlového máčení [21]	21
Obrázek 12 Metoda tavení za tepla [21]	22
Obrázek 13 Schéma autoklávu [27].....	23
Obrázek 14 Vytvrzovací cyklus [30]	24
Obrázek 15 Soybean Car [32].....	25
Obrázek 16 BMW i3 [34]	26
Obrázek 17 Skořepina Lamborghini Aventador [40]	28
Obrázek 18 Korba GMC Sierra Denali [42].....	28
Obrázek 19 Karbonová kola Ford Shelby GT [44].....	29
Obrázek 20 Rozdělení mechanických charakteristik [45]	30
Obrázek 21 Tříbodový ohyb [46]	31
Obrázek 22 Ocelová forma [48]	32
Obrázek 23 Forma z invaru [50].....	33
Obrázek 24 Kompozitní forma [52].....	33
Obrázek 25 Obrábění epoxidové desky [54]	34
Obrázek 26 Schéma vzorů prepregů	37
Obrázek 27 Stříhání uhlíkového prepregu	38
Obrázek 28 Lisování desek.....	39
Obrázek 29 Hotové označené desky	39
Obrázek 30 Závislost síly na průhybu pro uhlíková tělíska typu 1 variace 1	40
Obrázek 31 Závislost síly na průhybu pro uhlíková tělíska typu 1 variace 2.....	41
Obrázek 32 Závislost síly na průhybu pro uhlíková tělíska typu 2 variace 1	41
Obrázek 33 Závislost síly na průhybu pro uhlíková tělíska typu 2 variace 2.....	42
Obrázek 34 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 1 variace 1.....	42

Obrázek 35 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 1 variace 2.....	43
Obrázek 36 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 2 variace 1.....	43
Obrázek 37 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 2 variace 2.....	44
Obrázek 38 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 3 variace 1.....	44
Obrázek 39 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 3 variace 2.....	45
Obrázek 40 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 4 variace 1.....	45
Obrázek 41 Závislost síly na průhybu pro skelná tělíska typu 4 variace 2.....	46
Obrázek 42 Experimentální zkouška ohybem	46
Obrázek 43 Závislost síly na deformaci pro uhlíková tělíska typu 1 variace 1 pro metodu krátkého nosníku.....	47
Obrázek 44 Závislost síly na deformaci pro uhlíková tělíska typu 1 variace 2 pro metodu krátkého nosníku.....	47
Obrázek 45 Závislost síly na deformaci pro uhlíková tělíska typu 2 variace 1 pro metodu krátkého nosníku.....	48
Obrázek 46 Závislost síly na deformaci pro uhlíková tělíska typu 2 variace 2 pro metodu krátkého nosníku.....	48
Obrázek 47 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 1 variace 1 pro metodu krátkého nosníku.....	49
Obrázek 48 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 1 variace 2 pro metodu krátkého nosníku.....	49
Obrázek 49 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 2 variace 1 pro metodu krátkého nosníku.....	50
Obrázek 50 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 2 variace 2 pro metodu krátkého nosníku.....	50
Obrázek 51 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 3 variace 1 pro metodu krátkého nosníku.....	51
Obrázek 52 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 3 variace 2 pro metodu krátkého nosníku.....	51
Obrázek 53 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 4 variace 1 pro metodu krátkého nosníku.....	52
Obrázek 54 Závislost síly na deformaci pro skelná tělíska typu 4 variace 2 pro metodu krátkého nosníku.....	52
Obrázek 55 Uhlíkové tělísko po metodě krátkého nosníku	53
Obrázek 56 Skelné tělísko po metodě krátkého nosníku.....	53
Obrázek 57 Porovnání modulů pružnosti při zkoušce třibodovým ohybem	54
Obrázek 58 Porovnání meze pevnosti při zkoušce třibodovým ohybem.....	55
Obrázek 59 Model formy.....	57
Obrázek 60 Šablona na jednotlivé vrstvy	58
Obrázek 61 Model výrobku	60

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro uhlíkové tělíska (typ 1 variace 1).....	40
Tabulka 2 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro uhlíkové tělíska (typ 1 variace 2).....	41
Tabulka 3 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro uhlíkové tělíska (typ 2 variace 1).....	41
Tabulka 4 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro uhlíkové tělíska (typ 2 variace 2).....	42
Tabulka 5 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 1 variace 1).....	42
Tabulka 6 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 1 variace 2).....	43
Tabulka 7 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 2 variace 1).....	43
Tabulka 8 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 2 variace 2).....	44
Tabulka 9 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 3 variace 1).....	44
Tabulka 10 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 3 variace 2).....	45
Tabulka 11 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 4 variace 1).....	45
Tabulka 12 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro skelná tělíska (typ 4 variace 2).....	46
Tabulka 13 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro uhlíková tělíska (typ 1 variace 1).....	47
Tabulka 14 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro uhlíková tělíska (typ 1 variace 2).....	47
Tabulka 15 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro uhlíková tělíska (typ 2 variace 1).....	48
Tabulka 16 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro uhlíková tělíska (typ 2 variace 2).....	48
Tabulka 17 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 1 variace 1).....	49
Tabulka 18 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 1 variace 2).....	49
Tabulka 19 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 2 variace 1).....	50
Tabulka 20 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 2 variace 2).....	50

Tabulka 21 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 3 variace 1)	51
Tabulka 22 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 3 variace 2)	51
Tabulka 23 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 4 variace 1)	52
Tabulka 24 Naměřené a vypočítané hodnoty z metody krátkého nosníku pro skelná tělíska (typ 4 variace 2)	52
Tabulka 25 Porovnání materiálů u ohybové zkoušky pro typ 2 variace 2.....	56
Tabulka 26 Technologický postup.....	59
Tabulka 27 Kladení první a druhé vrstvy	60

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výkres formy

Příloha P II: Výkres dílu

Příloha P III: Rozměry šablony

