ČESKÉ
VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STROJNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

VOJTĚCH

ZACH

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Analýza mechanických vlastností kompozitních materiálů s různou skladbou vláken.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Vojtěch Zach

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Lukáš Holub, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha 2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zach** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **509166**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza mechanických vlastností kompozitních materiálů s různou skladbou vláken.

Název bakalářské práce anglicky:

Mechanical Properties Analysis of composite materials with different composition of fibres.

Pokyny pro vypracování:

Rozdělení kompozitních materiálů a jejich oblasti využití
Popis stavajících technologií výroby kompozitních materiálů
Návrh experimentu - porovnání vlastností různě kladených komp. materiálů
Vyhodnocení výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

[1] Bareš, R., Kompozitní materiály : SNTL Praha., 1988
[2] Krebs, S. Bryksí-Stunová, B., Kolařík, L.:Podklady k výuce předmětu Technologie zpracování plastů a kompozitů, FS ČVUT v Praze, 2019
[3] Motyčka, M., Technologie výroby kompozitních materiálů, ZČU v Plzni, 2007
[4] Brent Strong, A., Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications, Society of Manufacturing Engineers, Michigan 2008, USA

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Holub, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.04.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**

Ing. Lukáš Holub, Ph.D.	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.	doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lukáš Holub, Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: …… ……

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé práce panu Ing. Lukáši Holubovi, Ph.D. za cenné rady, trpělivost a čas, který mi věnoval.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Vítu Novákovi, který mi pomohl při měření mechanických vlastností vzorku.

Velké díky také patří firmě Mubea Transmission Components s.r.o. Především panu Ing. Janu Flekalovi, který mi dal cenné rady a pomohl mi při výrobě vzorků pro experimentální část.

Anotace

Název diplomové práce:	Analýza mechanických vlastností kompozitních materiálů s různou skladbou vláken.
Autor práce:	Vojtěch Zach
Vedoucí práce:	Ing. Lukáš Holub, Ph.D.
Akademický rok:	2023/2024
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Rozsah práce:	79 stránek, 10 tabulek, 40 obrázků
Klíčová slova:	kompozitní materiály, autoklávová technologie, autokláv, prepreg, kompozit, matrice, uhlíkové vlákno, skelné vlákno

Anotace:

Bakalářská práce se ve své teoretické části zaobírá problematikou kompozitních materiálů, zejména těch s vláknovou výztuží. Popisovány jsou mimo jiné druhy matric, typy výztuže a také je uveden přehled technologických postupů výroby kompozitu. V praktické části je navázáno na teoretickou rešerši a je popsána výroba kompozitu pomocí autoklávu. Jako metoda zjištění mechanických vlastností je uvedena tahová zkouška. Výsledky z ní jsou shrnuty v tabulkách a grafech.

Annotation

Title of the final thesis: Mechanical Properties Analysis of composite materials with different composition of fibres.

Author: Vojtěch Zach

Supervisor: Ing. Lukáš Holub, Ph.D.

Academic year: 2023/2024

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology

Head of department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

Extent: 79 pages, 10 tables, 40 pictures

Keywords: composite materials, autoclave technology, autoclave, prepreg, composite, matrix, carbon fibre, glass fibre

Annotation:

In its theoretical part, the bachelor thesis deals with the issue of composite materials, especially those with fibre reinforcement. It describes, among others, the types of matrices, types of reinforcement and also gives an overview of the technological procedures of composite production. In the practical part, the theoretical research is followed up and the production of composite using autoclave is described. Tensile testing is presented as a method of determining mechanical properties. The results are summarised in tables and graphs.

Obsah

Úvod 11

Teoretická část 12

1 Kompozitní materiály 13

1.1 Výhody kompozitních materiálů 14

1.2 Nevýhody kompozitních materiálů 15

1.3 Dělení kompozitu 15

1.3.1 Dělení kompozitu dle disperzní fáze 15

2 Matrice 16

2.1 Dělení kompozitu dle druhu matrice 16

2.2 Polymerní matrice 16

2.2.1 Reaktoplastické matrice 16

2.2.2 Termoplastické matrice 18

2.3 Kovové matrice 18

2.3.1 Technologie výroby kompozitu s kovovou matricí 18

2.4 Keramické matrice 19

3 Výztuž 20

3.1 Vláknové výztuže 20

3.1.1 Uhlíková vlákna 21

3.1.2 Skelná vlákna 23

3.1.3 Aramidová vlákna 25

3.1.4 Typy polotovarů vláknových výztuží 27

3.1.5 Částicová výztuž 27

3.1.6 Whiskery 28

4 Výroba dílů s vláknovou výztuží a polymerní matricí 29
4.1 Polotovary 29
4.1.1 Prepreg 29
4.1.2 Plošné lisovací materiály (SMC) 30
4.2 Technologie výroby 31
4.2.1 Ruční kladení 31
4.2.2 Navíjení 33
4.2.3 Odstředivé lití 34
4.2.4 Pultruze (tažení) 34
4.2.5 RTM (Resin transfer moulding) 35
4.3 Autoklávová technologie 36
4.3.1 Proces vytvrzování v autoklávu 37
4.3.2 Automatizace autoklávové technologie 40
5 Zkoušky mechanických vlastností 41
5.1 Typické chování kompozitů při zkouškách mechanických vlastností 41
5.2 Tahová zkouška 41
Praktická část 43
6 Použitý materiál 44
6.1 Skladba materiálů 44
6.2 Popis použitých prepregů 45
7 Výroba kompozitů 47
7.1 Řezání prepregů 47
7.2 Předehřev a separace formy 47
7.3 Kladení prepregů 49

7.4 Vakuování 51
7.5 Vytvrzení v autoklávu 52
7.6 Příprava vzorků 53
8 Tahová zkouška 55
8.1 Zkušební stroj 55
8.2 Postup měření 56
8.3 Výsledky měření 56
8.4 Vzorek 1 57
8.5 Vzorek 2 59
8.6 Shrnutí výsledků 61
Závěr 62
Seznam použité literatury 63
Seznam zkratek 67
Seznam použité symboliky 67
Seznam obrázků 69
Seznam tabulek 71
Seznam příloh 72

Úvod

V teoretické části se bakalářská práce věnuje popisu kompozitních materiálů od základního složení po výrobu a zkoušku mechanických vlastností. Kompozitní materiály mají v dnešní době významnou roli ve většině odvětví průmyslu. Nejvíce využívané jsou v automobilovém a leteckém průmyslu, a to hlavně pro jejich nízkou hmotnost při velké pevnosti ve směru vláken. Bakalářská práce popisuje různé typy matric a vláken používaných při výrobě kompozitů a snaží se vyzdvihnout klady a zápory jednotlivých typů. Následně jsou rozebírány postupy a technologie výroby kompozitů a největší důraz je kladen na výrobu z prepregů pomocí autoklávové technologie.

V praktické části bakalářské práce je navázáno na teoretickou část. Experiment se zaměřuje především na kompozitní materiály s polymerní matricí se skelnými, respektive uhlíkovými vlákny. Nejprve je popsána a vyobrazena výroba kompozitních desek pomocí autoklávové technologie. Následuje popis přípravy zkušebních těles pro tahovou zkoušku a na závěr jsou shrnuté výsledky tahové zkoušky v grafech a tabulkách. Pro Větší statistickou přesnost bylo vyrobeno od každého vzorku 20 zkušebních těles.

Dodaný materiál byl poskytnut firmou Mubea Transmission Components s.r.o. Firma se zaměřuje na výrobu dílů pro automobilový průmysl. V prostorách firmy také proběhla výroba vzorků.

Cílem práce je zjistit mechanické vlastnosti vytvrzených kompozitů. Tyto mechanické vlastnosti, především mez pevnosti v tahu, jsou zjišťovány pro účely firmy Mubea Transmission Components s.r.o.

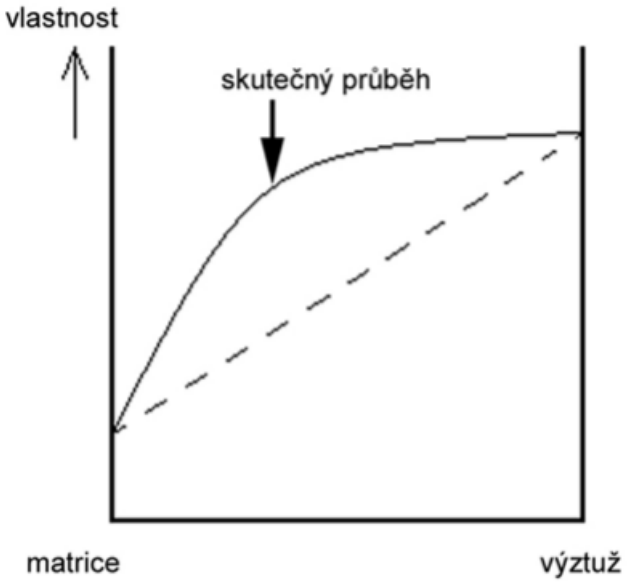
Teoretická část

1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály můžeme definovat jako:

„Materiály, v nichž jsou jednotlivé složky fyzikálně odlišné, ale jejichž mechanické vlastnosti se v kombinaci synergicky zlepšují“. [1]

Samotné prvky kompozitních materiálů mají velmi odlišné fyzikální a chemické vlastnosti. Například pryskyřice, která není vyztužená výztuží, má velmi nízkou hustotu a nechá se snadno zpracovat. Její samotné použití ve strojírenství či jiných odvětvích však znemožňují její mechanické vlastnosti, jako je velmi nízký modul pružnosti, nízká pevnost a křehkost. Oproti tomu vlákna mají tyto vlastnosti velmi dobré, ale je náročné zajistit tvarovou stálost. Vlákna jsou také velmi křehké a velmi náchylné na poškození v agresivních prostředích. Proto byli vyvinuty kompozitní materiály, které vhodně mixují dané složky pro ideální vlastnosti výsledného výrobku. Charakteristickým znakem pro kompozitní materiály je synergismus, tato vlastnost zajišťuje lepší výsledné vlastnosti materiálu, než jaké by byli poměrným sečtením vlastností původních materiálů *(viz obrázek 1)*. Tyto jednotlivé složky nazýváme matrice a výztuž. V této práci bude pojednáváno především o kompozitních materiálech s vláknovou výztuží a polymerní matricí. Tento typ kompozitu je v dnešní době vyvíjen hlavně pro jeho nízkou hustotu (1 600 až 2 000 kg/m^3) v kombinaci s vysokou pevností ve směru vláken. Pro srovnání hliník má hustotu 2 700 kg/m^3 a běžně používaná ocel ještě zhruba 2,9krát větší, tedy 7 800 kg/m^3. Díky těmto vlastnostem jsou kompozity široce využívány v dopravní technice jako jsou automobily, kolejová vozidla nebo v leteckém průmyslu. Je to velmi důležitý prvek z hlediska ekologie, jelikož čím menší hmotnost dopravního prostředku, tím nižší emisní stopa. Na druhou stranu je v dnešní době problém v dostupných technologiích recyklace kompozitních materiálů, a to zejména na bázi reaktoplastické matrice, které není možné po vytvrzení pryskyřice znovu přetvarovat pro jiné využití. Je možné je mechanicky recyklovat, při této recyklaci dochází k porušení vláken a ke zhoršení mechanických vlastností, a to až o 60 %. Když se materiál nerecykluje, dochází k jeho skládkování, např. lopatky větrných elektráren se zahrabávají do země. [1][2][3][4]



Obrázek 1: synergický efekt [4]

1.1 Výhody kompozitních materiálů

Mezi výhody kompozitních materiálů řadíme:

- Nízká hustota v porovnání s konvenčními prvky jako je ocel a hliník
- Výborné mechanické vlastnosti
    - Tuhost
    - Pevnost
- Minimální tepelná vodivost
- Elektroizolační vlastnosti
- Výborná ohnivzdornost
- Odolnost proti únavě – Jednosměrné uhlíkové slitiny prokazují dobré výsledky únavy do téměř 90 % statického zatížení
- Velmi dobrá korozivzdornost u kompozitu s polymerní matricí
- Nahrazení několika ocelových součástí jednou kompozitní díky velké tvarové flexibilitě
- Menší procentuální nutnost obráběcích činností pro výsledný výrobek oproti výrobkům z oceli [2][5][6]

1.2 Nevýhody kompozitních materiálů

Mezi nevýhody kompozitních materiálů řadíme:

- Vysoká pořizovací cena materiálu i následného výrobku, až 20krát vyšší než u oceli či hliníku
- Anizotropické vlastnosti (platí pro kompozity s vláknovou výztuží)
- Výrobní technologie pro výrobu kompozitu bývají drahé a pomalé
- Náchylné na chemické poškození
- Složitá recyklace [2][3][6]

1.3 Dělení kompozitu

Kompozity dělíme dle následujících kritérii:

- Podle druhu matrice
- Podle disperzní fáze
- Podle tvaru disperze [2]

1.3.1 Dělení kompozitu dle disperzní fáze

- Kompozity 1. druhu – pevná disperze
- Kompozity 2. druhu – kapalná disperze
- Kompozity 3. druhu – plynná disperze [2]

2 Matrice

Matrice je jednou ze základních složek a slouží jako pojivo v kompozitním materiálu, která po následném zpracování dodává výslednému dílu tvarovou stálost, a u kompozitu s vláknovou výztuží udržuje vlákna ve stálé pozici. V kompozitu také zajišťuje zavedení a přenos sil z celkového namáhání dílu na vlákna a zároveň z vlákna na vlákno. Další důležitou funkcí je ochrana vlákna před vlivy okolí. [7][8]

Pro ideální převedení namáhání a výsledné vlastnosti kompozitu je velmi důležité dokonalé spojení vlákna s matricí tak, aby matrice dokonale smočila vlákno a nevznikali na fázovém rozhraní bublinky, které by zhoršovaly fyzikální a chemické vazby mezi matricí a vláknem. [8]

2.1 Dělení kompozitu dle druhu matrice

Tři základní skupiny matric, podle kterých rozdělujeme kompozity:

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

Mezi méně často se vyskytující matrice v průmyslových aplikacích patří skleněná, sklokeramická nebo uhlíková. [7]

2.2 Polymerní matrice

Polymer vzniká polymerizací monomerních sloučenin (monomer – nízkomolekulární sloučenina). Při polymerizaci se několikanásobně propojují monomery do makromolekulárního řetězce a počet monomer v řetězci nám říká stupeň polymerizace. Převažující a hlavní vazbou u polymerů je vazba kovalentní. Polymerní matrice jsou dvojího druhu, termoplastické nebo reaktoplastické. Rozdíly mezi termoplasty a reaktoplasty najdeme ve využití i ve zpracování. [5][7][8]

2.2.1 Reaktoplastické matrice

Reaktoplasty jsou více používané v praxi, díky své nízké viskozitě, kterou způsobuje nízkomolekulární stav v počátečním ději. Z toho vyplývá, že dobře prosycují a smáčejí vlákna výztuže. Z čehož také vychází snadná předimpregnace vláken. Pro kompozity reaktoplastickou

matricí se nejčastěji využívají polotovary ve formě prepregu, které se dají využít v širokém spektru technologií výroby. Mezi nevýhody patří dlouhé časy vytvrzování. Reakční teplota, při které dochází k vytvrzení výrobku je 140 až 160 °C a lisovací tlak je okolo 20 až 50 $N.mm^{-2}$. Z hlediska mechanických vlastností je tento typ možné dynamicky zatěžovat, ale trpí na křehký lom. Jsou velmi odolné vůči creepu a vyšším teplotám, protože zůstávají tuhé i při vysokých teplotách. [1][7][8][9]

2.2.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Řadí se mezi nejvíce používané pryskyřice zejména kvůli nízké ceně, dobrému smáčení vláken, nízké viskozitě a možnosti rychlého vytvrzení. UP-R jsou bezbarvé, až slabě nažloutlé. Tento lineární nenasycený polyester je připravován radikálovou reakcí za normální nebo zvýšené teploty, při které nevznikají žádné vedlejší těkavé produkty, ale dochází k objemovému smrštění o 5 až 9 %, což je nežádoucí kvůli následné křehkosti a vzniku mikrotrhlin v matrici. Reaktivnost UP-R vzrůstá s počtem polymerizovatelných dvojných vazeb ve výchozí surovině. Pryskyřice s velkou reaktivností mají dobrou tuhost, ale musí se vytvrzovat za vysoké teploty. Velkou výhodou UP-R je možnost volby výchozího materiálu, a s tím souvisejících výsledných vlastností produktu. Pro tyto úpravy je možné přidat přísady nebo změnit chemickou strukturu. Například pro změnu viskozity se přidává nebo odebírá obsah styrenu, jenž je v rozsahu 30 až 50 %. Pro snížení smrštění se přidávají vyztužující vlákna, plniva a speciální aditiva, s kterými je možné dosáhnout na hodnotu smrštění okolo 0,05 %. [7][10]

2.2.1.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)

V porovnáním s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi jsou vinylesterové pryskyřice houževnatější, více chemicky odolné, více odolné vůči mikrotrhlinám a mají větší mezilaminární smykovou pevnost. To vše v důsledku jiného umístění dvojné vazby u makromolekuly. Výroba VE-R probíhá z bisfenolu A nebo jsou vyráběny jako novolaké pryskyřice. Reakční mechanismus probíhá také na základě radikálové reakce. VE-R pryskyřice se používají především v korozním prostředí.

2.2.1.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Epoxidové pryskyřice mají velmi velký rozsah výsledných vlastností, které se dají ovlivnit typem použité pryskyřice a typem tvrdidla. Mezi velmi dobré vlastnosti EP-R řadíme mechanické

vlastnosti, odolnost proti únavě a creepu, adhezi k vláknům, chemickou odolnost a elektrické vlastnosti. Díky velmi dobrým mechanickým vlastnostem se EP-R používají jako matrice pro vysoce kvalitní materiály, a to především ve spojení s uhlíkovými vlákny. Tomu také odpovídá jejich cena, která je až 4x vyšší než u UP-R. Jsou také hůře zpracovatelné než předešlé pryskyřice. Polyadice je základním reakčním mechanismem EP-R. Na rozdíl od radikálové reakce probíhá polyadice poměrně pomalu a vstupuje do ní jedna molekula pryskyřice s jednou molekulou tvrdidla. Tato reakce začíná při nízkých teplotách, které zvolna stoupají, poté se teplota ustálí na určité hodnotě, ze které zase zvolna klesá, aby nedocházelo k vnitřnímu pnutí. Matrice na bázi epoxidové pryskyřice s uhlíkovými vlákny se využívají v leteckém a kosmickém průmyslu a také se z tohoto materiálu vyrábí lopatky větrných elektráren. [7][10]

2.2.2 Termoplastické matrice

Termoplasty jsou za pokojových teplot pevné látky, proto se s nimi musí pracovat až nad teplotou 200 °C, kde dochází k přechodu na kapalinu. Tento typ matrice je vhodný pro velkosériovou výrobu, ale nevhodný pro ručení kladení z důvodu vysoké teploty pro zpracování. Výhodou termoplastů je jejich neomezená doba skladování, jelikož nedochází k samovolné chemické reakci. [8]

2.3 Kovové matrice

Pro kompozity s kovovou matricí se nejvíce používají lehké slitiny. Mezi které se nejčastěji řadí slitiny hliníku, slitiny titanu a slitiny hořčíku. Slitiny mědi a stříbra se používají pro elektrotechnické účely. [7]

2.3.1 Technologie výroby kompozitu s kovovou matricí

2.3.1.1 Pevný stav

Pro tento typ technologie existují dvě metody. První metoda spočívá v proložení polymerních vláken kovovými fóliemi a následného lisování za tepla. V druhé metodě je smíchán kovový prášek s krátkými vlákny, whiskery nebo částicemi. Výsledná směs se lisuje za zvýšených teplot. [1]

2.3.1.2 Kapalný stav

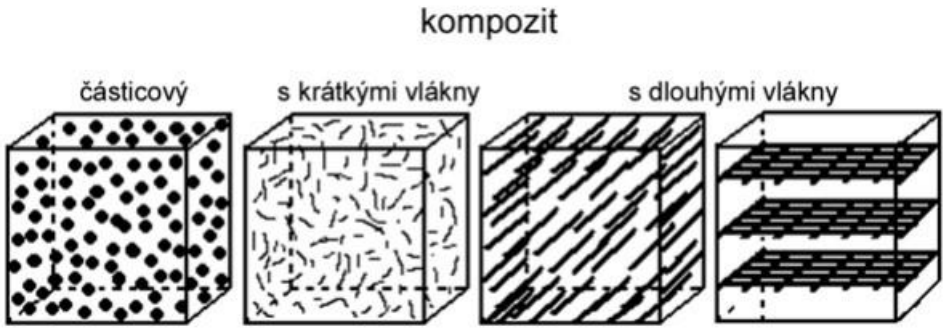
Částicová vlákna nebo whiskery jsou přimíchaný do roztaveného kovu, z kterého vznikne po vychladnutí finální výrobek. [1]

2.4 Keramické matrice

Kompozity s keramickou matricí se používají pro vysokoteplotní aplikace, jelikož mají i za zvýšených teplot (1000 až 2500 °C) dobré mechanické vlastnosti oproti polymerním a kovovým matricím. Výztuž je také keramická a může být ve formě dlouhých vláken, krátkých vláken, částic, whiskerů nebo nanovláken. Nejvíce využívané materiály pro keramické matrice jsou SiC, Al_2O_3, $Al_2O_3 – SiO_2$. [1][7][11]

3 Výztuž

Výztuž je druhou základní složkou kompozitu. Ideální rozložení výztuže v kompozitu je rovnoměrné, protože dochází k nejlepšímu přenášení namáhání, které je na daný výrobek vyvíjeno. To vychází z předpokladu, že má obecně lepší mechanické vlastnosti než matrice, a to především co se týče pevnosti v tahu a tuhosti (větší modul pružnosti). Zásadním je také rozložení výztuže v matrici. Základní dva druhy výztuže jsou výztuž vláknová, která se dále dělí na dlouhá a krátká vlákna, a výztuž částicová *(viz obrázek 2)*. Dalším druhem výztuže jsou whiskery. [8]

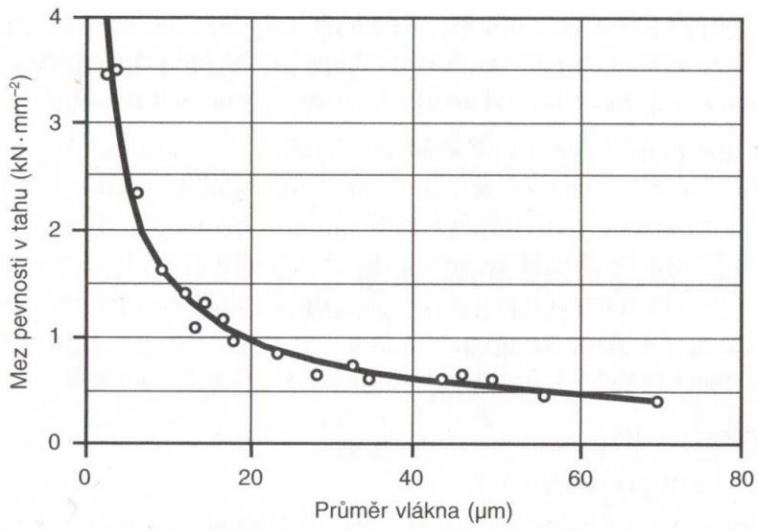


Obrázek 2: typy výztuže[4]

3.1 Vláknové výztuže

Popisujeme u nich jejich délku (krátká vlákna, dlouhá vlákna) a také jejich sdružování do pramenů, tkanin, rovingů, netkaných tkanin a rohoží. Dělíme je na organické a anorganické. Do anorganických se řadí například skelná a uhlíková vlákna. Do organických zařazujeme mimo jiné polymerní (aramidová, PE, …) a přírodní vlákna. [8]

Z mechanických vlastností je pro vlákna důležitý zejména modul pružnosti, který udává tuhost kompozitních konstrukcí. Dále také mez pevnosti v tahu a tažnost. Stejně důležitá vlastnost je i velikost průřezu vlákna. Je známo, že materiál je mnohonásobně pevnější ve formě vlákna, než je tomu u kompaktní formy materiálu. Z *obrázku 3* je zřejmé, že čím je velikost průřezu menší, tím vyšší je mez pevnosti v tahu materiálu. Avšak výroba vláken o průměru menším než 14 µm není vhodná ze zdravotních důvodů, jelikož je možnost vdechnutí. [8]



Obrázek 3: graf zobrazující závislost průměru vlákna na jeho pevnosti [7]

Pro vlákna zavádíme veličinu „tržná délka“, která nám udává teoretickou hodnotu délky vlákna v okamžiku přetržení jeho vlastní vahou. Z *tabulky 1* je patrné, že největší tržnou délku mají uhlíková vlákna, naopak nejmenší je u slitin hliníku. [8]

$$L_R = \frac{R_m}{\rho . g} \; [m, km]$$

Kde: L_R … tržná délka [m, km]

R_m … mez pevnosti v tahu [MPa]

ρ … hustota [$kg.m^{-3}$]

g … gravitační zrychlení [$m.s^{-2}$] [8]

Tabulka 1: Orientační hodnoty tržné délky vybraných materiálů [8]

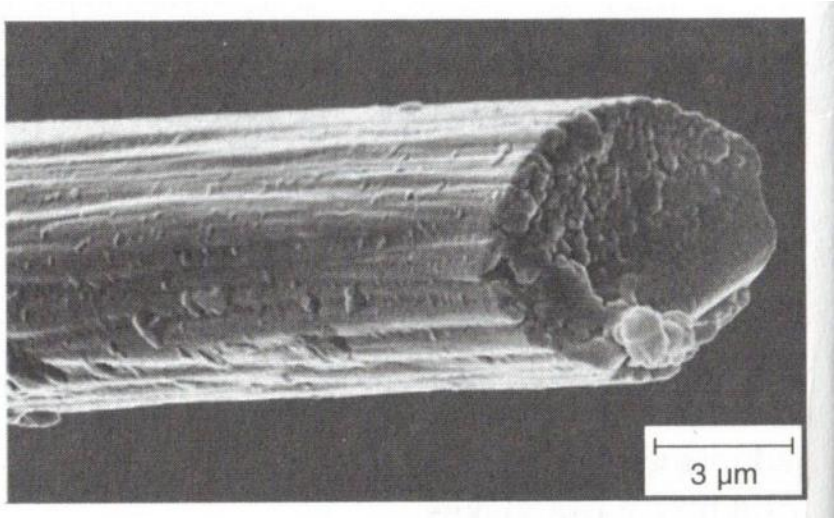
Materiál	Tržná délka L_R[km]
Ocel	6
Ocel lanová	20
Slitiny hliníku	3
Aramidové vlákno	260
Skelné vlákno	90–180
Uhlíkové vlákno	200–340

3.1.1 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna vynikají vysokým modulem pružnosti při nízké hmotnosti. Spolu s vynikajícími mechanickými vlastnostmi (extrémně vysoká tuhost a pevnost, nízká tažnost) jsou uhlíková vlákna předurčena pro použití v nejnovějších technologiích. Mikroskopický detail uhlíkového vlákna je zobrazen na *obrázku 4*. Uhlíková vlákna se dělí na vysokopevnostní (HS-high strenght,

HT-high tenacity), na vlákna se středním modulem pružnosti (IM-intermediate modulus) a s vysokým modulem pružnosti (HM-high modulus, UHM-ultrahigh modulus). [2][7][8]

Vysokou pevnost a vysoký modul pružnosti u uhlíkových vláken zajišťuje co nejtěsněji uložená kontinuální síť těsných vazeb. Pro tuto síť se používají prvky z prvních dvou řad periodické tabulky, aby byla zajištěna nízká hmotnost. Jelikož uspořádání kovalentních vazeb probíhá v ose vlákna, vlastnosti uhlíkového vlákna jsou vysoce anizotropní. Poměr modulů pružnosti v kolmém a v rovnoběžném směru vzhledem k ose vlákna je typicky $\frac{E_{\parallel f}}{E_{\perp f}} = 28$. [7]



Obrázek 4: detail uhlíkového vlákna [7]

3.1.1.1 Výroba uhlíkových vláken

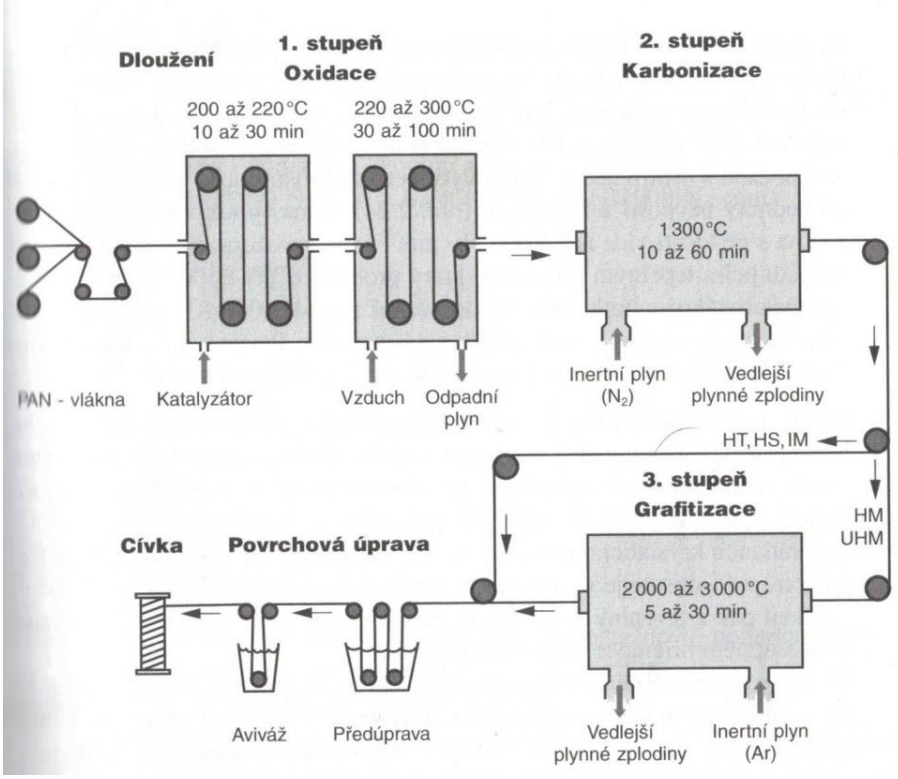
Výroba uhlíkových vláken probíhá řízenou pyrolýzou organických prekurzorů, anebo katalytickým rozkladem plynných uhlovodíků. Dále bude vysvětlena výroba uhlíkových vláken na bázi PAN a výroba ze surovin bohatých na uhlík. [12]

Výroba na bázi polyakrylonitrilu (PAN) tvoří největší objemové zastoupení v produkci uhlíkových vláken. PAN vlákno je nejprve dlouženo, aby byla dosažena co největší orientace molekul do směru osy vlákna. Následně probíhá oxidace na vzduchu při teplotě 200 až 300 °C mechanickým napětím. PAN se dehydruje a přemění na žebříčkovitý polymer. Tento děj stabilizuje strukturu vlákna a zabrání měknutí vlákna při karbonizaci. Dalším krokem výroby je přeměna žebříčkovité struktury na grafitickou strukturu pyrolýzou. Pyrolýza (karbonizace) probíhá v inertní atmosféře N_2 při teplotách 1100 až 1400 °C. Tento postup zajišťuje vysokou pevnost výsledných vláken. Pro vysoký modul pružnosti musíme ještě provést tzv. grafitizaci.

Grafitizace probíhá při teplotách 2500 °C v indukčních pecích a zajišťuje lepší uspořádání grafenových vrstev. Posledním krokem je povrchová úprava vlákna, která probíhá apretací směsí na bázi epoxidové pryskyřice *(viz obrázek 5)*. [7][8][12][13]

Druhý typ výroby využívá smoly na bázi černouhelného dehtu nebo dehtu vznikajícího při výrobě ropy. Smoly jsou ohřáty na teplotu 350 °C, kde dojde k přeměně na mezofázi. Následuje spřádání, při kterém je mezifázová smola vytlačována tryskou o průměru 0,3 – 0,4 mm. Průchodem tryskou se lamely smoly uspořádají do směru osy vlákna, za tryskou dochází k tuhnutí těchto vláken. Následný postup stabilizace, karbonizace a grafitizace je podobný jako u výroby PAN vláken, s tím rozdílem že už není potřeba další napínání, aby vlákna dosáhla vysoce orientované struktury. [7][8][12][13]

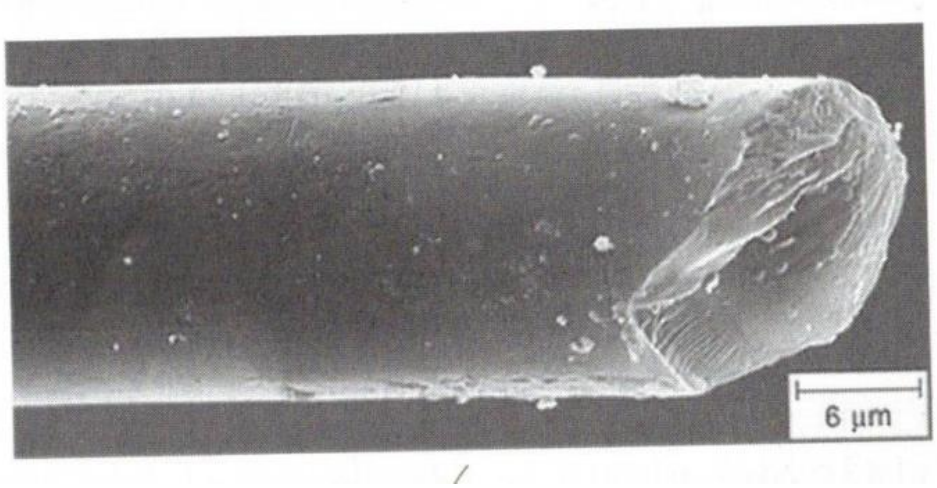
Posledním krokem je povrchová úprava vlákna, která probíhá apretací směsi na bázi epoxidové pryskyřice. [7]



Obrázek 5: schéma výroby uhlíkových vláken [7]

3.1.2 Skelná vlákna

Skelná vlákna jsou široce používána v elektronice, v letectví a v automobilovém průmyslu. Detail skelného vlákna je zobrazen na *obrázku 6*.



Obrázek 6: detail skelného vlákna [7]

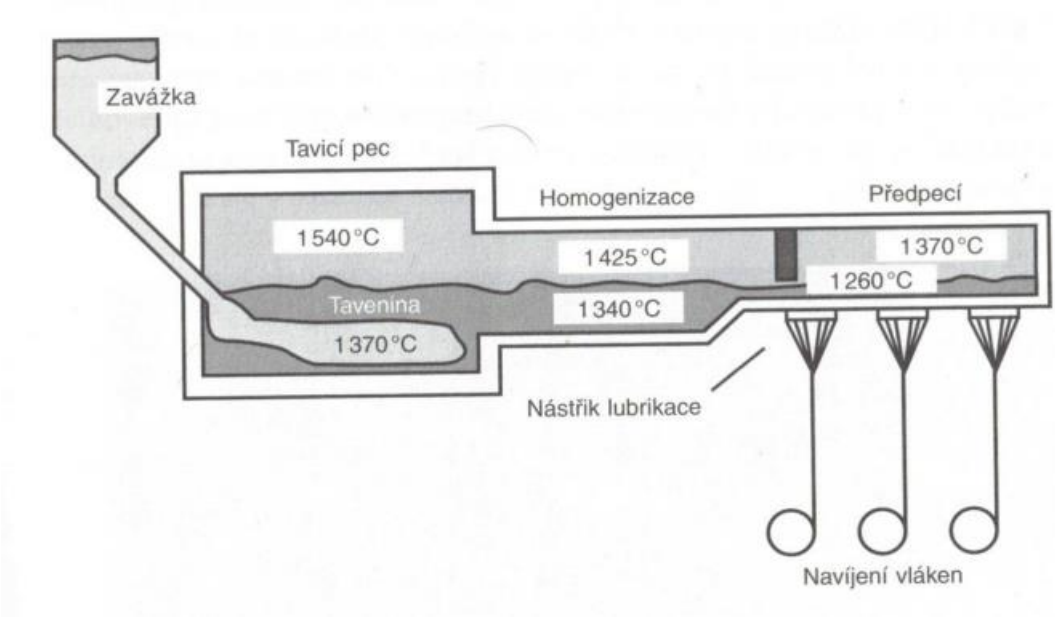
Základní složkou skelných vláken je silikát SiO_2. Druhy skelných vláken se liší podle přídavku kovů (např. Ca, B, Mg, Na, K, Al, …). Rozeznáváme několik druhů skelných vláken.

E-sklo je výborným elektrickým izolantem za pokojové teploty a má vysokou prostupnost pro záření. Je složeno především z oxidu křemičitého, calcia, hliníku a bóru. V dnešní době se vyvíjejí E-skla bez bóru, která mají ještě větší chemickou odolnost.

S-sklo (v Evropě značené jako R-sklo) se vyznačuje vysokou pevností. Největší pevností v tahu zhruba o 50% vyšší než E-sklo má typ označený S-2-sklo. Tento typ je relativně drahý.

Vysokou chemickou odolnost má C-sklo. Odolnost proti alkáliím charakterizuje ACR sklo, které se používá pro vyztužení betonu. [1][7][8][14]

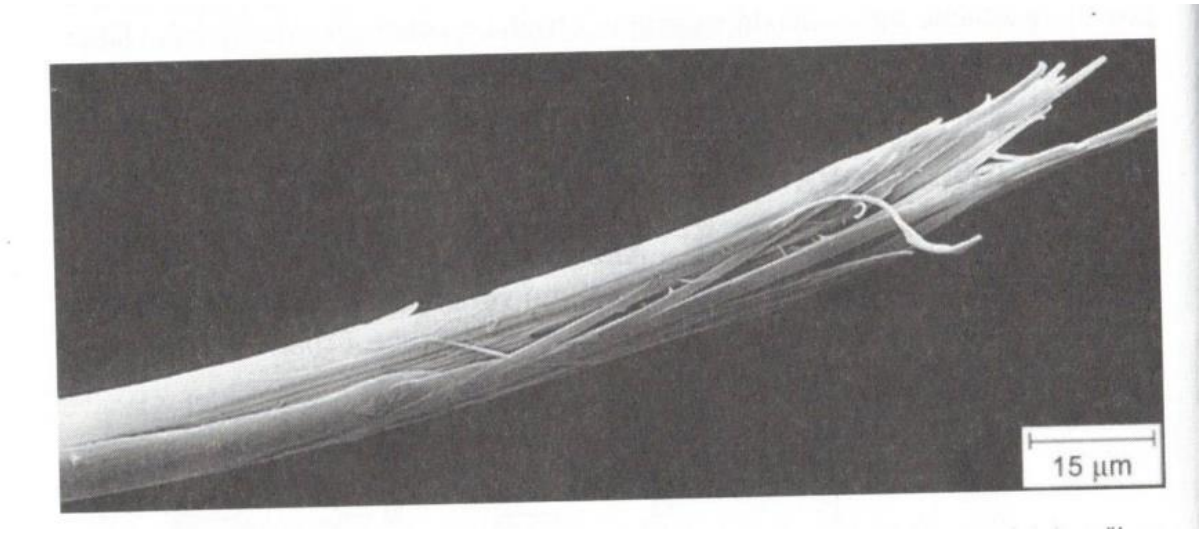
Výroba skelných vláken probíhá zvlákňováním taveniny s následným dloužením. Nejprve se vstupní materiál roztaví za teploty 1 400 °C, následně je roztavený materiál veden do spřádacích trysek, na jejichž výstupu má vlákno průměr 2 mm. Navíjením na vysoce rychlostní kladky se vlákno prodlužuje a získává potřebný průměr např. 10 µm. V průběhu výroby vlákna se na něj nanáší lubrikant, který zajišťuje ochranu povrchu vlákna a také lepší vazby mezi matricí a vláknem *(viz obrázek 7)*. [7][8]



Obrázek 7: schéma výroby skelných vláken [7]

3.1.3 Aramidová vlákna

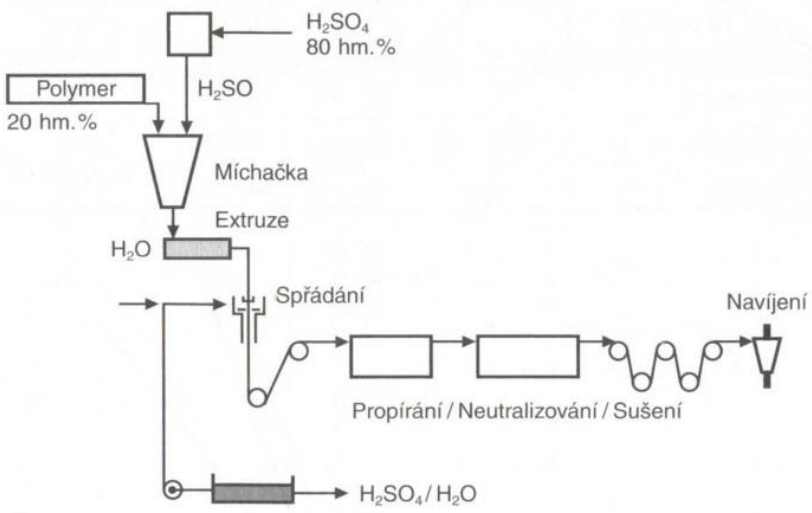
Jedná se o organické vlákno, které se používá v technických kompozitech. Předností aramidového vlákna oproti jiným typů vláken je jeho odolnost vůči rázu z tohoto důvodu se využívá např. ve výrobě neprůstřelných vest, pancéřování nebo pro výrobu náběhových hran křídel. Mechanické vlastnosti jako je pevnost a modul pružnosti jsou poměrně vysoké. Zároveň je to vyztužující vlákno s nejmenší hmotností. Orientace lineárních organických polymerů je rovnoběžná s osou, stejně tak jejich kovalentní vazby, což způsobuje silnou anizotropii vláken, a díky tomu jsou ideální pro lehké konstrukce namáhané především tahem ve směru vláken. Detail vlákna je zobrazen na *obrázku 8.* [2][7][8]



Obrázek 8: detail aramidového vlákna [7]

Rozlišujeme dva druhy aramidů (aromatické polyamidy) mezi první patří meta-aramidy (MPIA – např. Nomex), které mají vysokou teplotní odolnost a elektroizolační vlastnosti, mezi druhé patří para-aramidy (PPTA – např. Kevlar), které vynikají vysokým modulem pružnosti i vysokou pevností. [8]

Vlákna se vyrábí spřádáním z vysokoviskózního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové. Dále se jednotlivá elementární vlákna spojují a mnohokrát propírají, neutralizují a opatřují aviváží (pomocný textilní prostředek pro zlepšení zpracovatelských a kluzných vlastností). Následně se navíjejí na cívku *(viz obrázek 9)*. [7]



Obrázek 9: schéma výroby aramidových vláken [7]

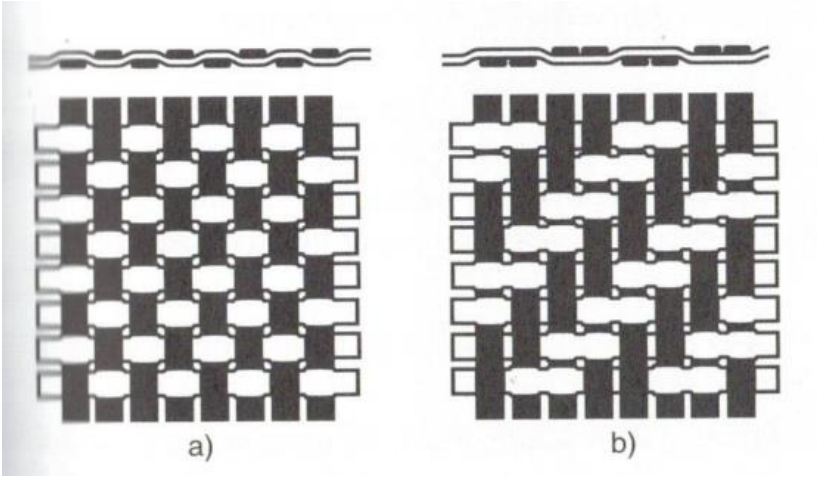
3.1.4 Typy polotovarů vláknových výztuží

3.1.4.1 Pramen

Prameny jsou výztuže, které vznikají spojením zhruba 200 elementárních vláken bez kroucení.[7]

3.1.4.2 Tkanina

Tkanina je složena z propletených vláken, které se vzájemně kříží. Je plošná, dobře zpracovatelná a nechá se vrstvit do formy. Tkanina se nechá splétat různými způsoby dle potřeby a požadavků na výsledný výrobek *(viz obrázek 10)*. [7]



Obrázek 10: druhy vazeb vyztužujících tkanin a) plátnová vazba, b) keprová vazba [7]

3.1.4.3 Rohož

Stejně jako tkanina je rohož plošná výztuž, která je dobře zpracovatelná. Skládá se z nekonečných nebo sekaných pramenců vláken, která jsou nahodile orientovaná a spojená pojivem. [7]

3.1.4.4 Roving (pramenec)

Skládá se z 6 až 12 000 elementárních vláken spojených v rovnoběžně uložená nezkroucená vlákna. [7]

3.1.5 Částicová výztuž

Nutnou podmínkou pro částicovou výztuž je charakteristický rozměr částic větší než 1 µm. Pokud je charakteristický rozměr částic menší než 1 µm, jedná se buď o nanokompozity nebo

o disperzně zpevněné kompozity. Na velikosti částic nejvíce závisí mechanismus vyztužení výsledného kompozitu. Větší částice přenáší zatížení a zamezují makrodeformace. Menší částice jsou odpovědné za disperzní zpevnění, jenž zabraňuje pohybu dislokací. Pro ideální mechanické vlastnosti výsledného kompozitu je nutné dodržet pravidelné rozložení částic v matrici. Poměr částic v kompozitu určuje jeho tvrdost, otěruvzdornost a pevnost. Při určitém poměrném množství částic v matrici dochází k poklesu pevnosti. [7]

Tento typ výztuže můžeme najít u materiálů s kovovou, polymerní i keramickou matricí. Typickým zástupcem částicové výztuže u materiálů s kovovou matricí je karbid křemíku (SiC) a oxid hlinitý (Al_2O_3). [7]

3.1.6 Whiskery

Whiskery jsou monokrystalická vlákna, pro které je charakteristický vysoký poměr délky k tloušťce. Mají vysokou pevnost řádově 10^4 MPa, což je způsobeno minimem mřížkových poruch. Whiskery se vyrábí pomocí katalyticky podporované kondenzace přesycených par na podložce nebo pyrolýzou prekursorů. [7][10]

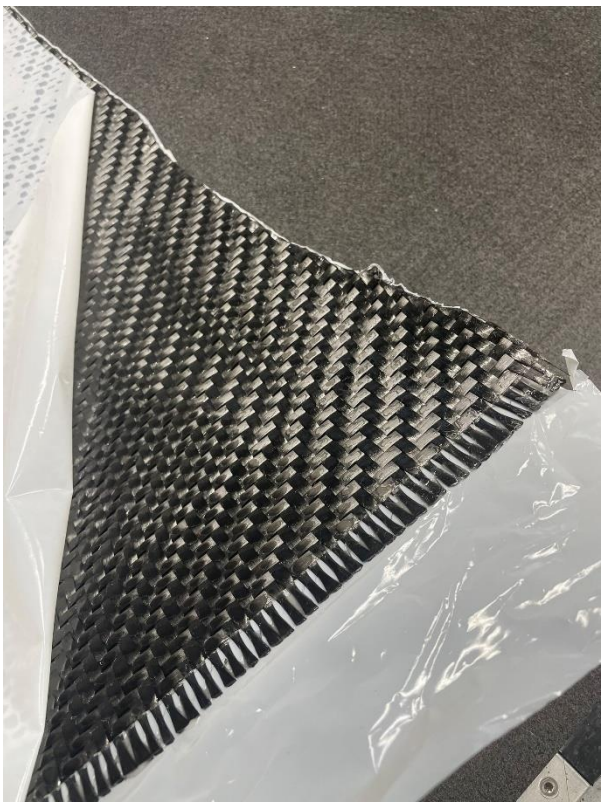
4 Výroba dílů s vláknovou výztuží a polymerní matricí

Pro výrobu dílů s dlouhými vlákny budou potřeba speciální technologie jako například navíjení, ruční kladení nebo pultruze. Druh technologie bude velmi záležet na výsledném tvaru výrobku a na typu vláknové výztuže. Zásadním kritériem je také sériovost výroby. [8]

4.1 Polotovary

4.1.1 Prepreg

Předimpregnovaná tkanina s pryskyřičnou matricí *(viz obrázek 11)*. Polotovar je v tzv. B-stavu. V tomto stavu je pryskyřice tuhá a lepkavá a na vláknech ulpívá, ale stále je možné prepreg tvarovat do požadovaných tvarů. Je nutné mít takto předimpregnovanou tkaninu uloženou v prostředí o teplotě ideálně okolo -18 °C, jelikož při pokojové teplotě dochází k rychlému a samovolnému vytvrzování pryskyřice. Správné skladování dokáže životnost prepregu prodloužit až o měsíce. [8]

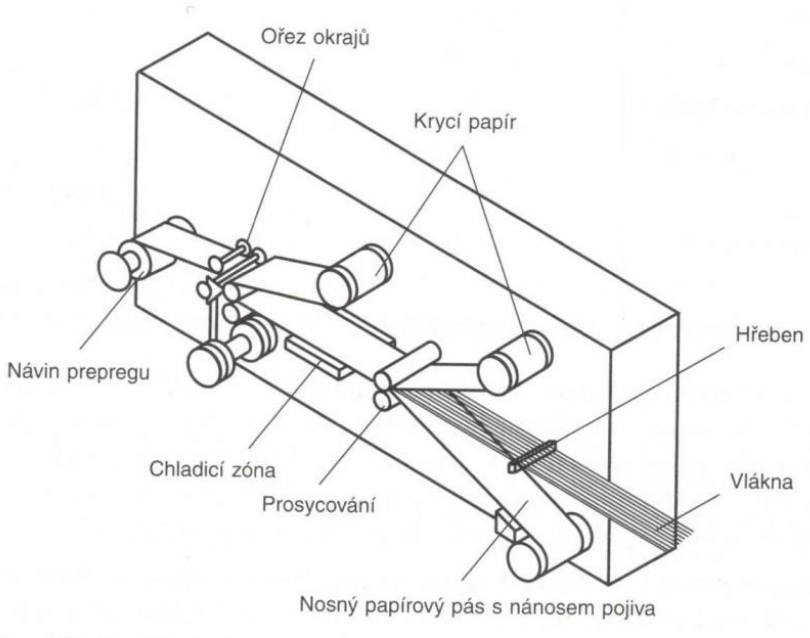


Obrázek 11: prepreg v ochranných fóliích

4.1.1.1 Výroba prepregu

Výroba jednosměrně orientovaného prepregu probíhá odvíjením pramenů vlákna z cívky, které se ukládají na papírový nosič opatřený silikonovou vrstvou, na němž je vrstva pryskyřice. Tento papírový nosič pokračuje na vytápěný válec kalandru, kde pomocí tlaku a teploty jsou prosycována vlákna pryskyřicí. Prepreg je opatřen ochranným papírem z obou stran a následně zchlazen, aby byla zastavena reakce pryskyřice *(viz obrázek 12)*. Takto ošetřený prepreg je navinut na roli a připraven do cutteru, kde jsou z něj vyřezány potřebné tvary. [7]

Velkou výhodou při výrobě z prepregu je již předem definovaný poměr mezi výztuží a matricí. Toto je nejdůležitější pro sériovou výrobu, kde musí být zaručena stálost kvality výrobku. [8]

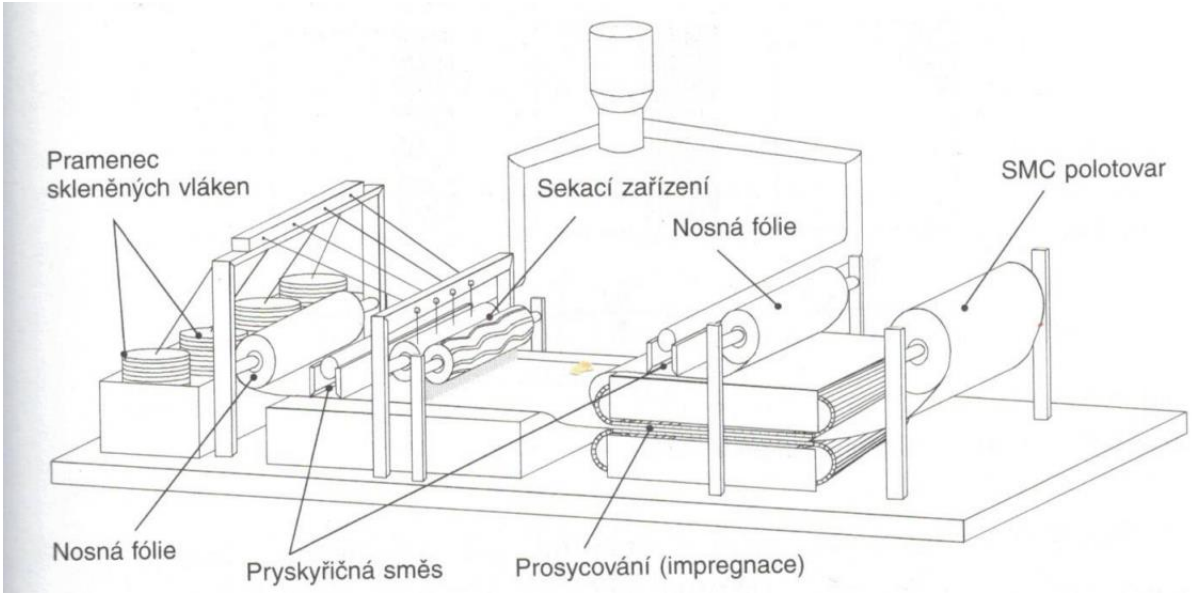


Obrázek 12: výroba jednosměrně orientovaného prepregu [7]

4.1.2 Plošné lisovací materiály (SMC)

Tyto polotovary jsou využívány především v aplikacích, kde nezáleží na kvalitě povrchu, ale spíše na mechanických a fyzikálních vlastnostech. Výroba SMC je kontinuální proces, při kterém se sekané pramence v délkách 25 nebo 50 mm nanášejí na polyethylenovou nebo nylonovou plastovou fólii, na které je nanesena reaktoplastická matrice *(viz obrázek 13)*. Obdobnou fólii je materiál chráněn i z vrchní strany. Takto upravený sendvič se válcuje na danou délku a nechá se 48 hodin zrát. Připravený polotovar se dále řeže a tvaruje do forem, kde je tepelně lisován. Obsah pramenů v kompozitu je v rozmezí od 15 do 65 %. Výztuž nemusí být jenom sekaná

vlákna, ale mohou to být i tkaniny nebo kontinuální vlákna. Využití nachází v automobilovém průmyslu i u vysoce odolných elektrických dílů. [7][8][15][16]

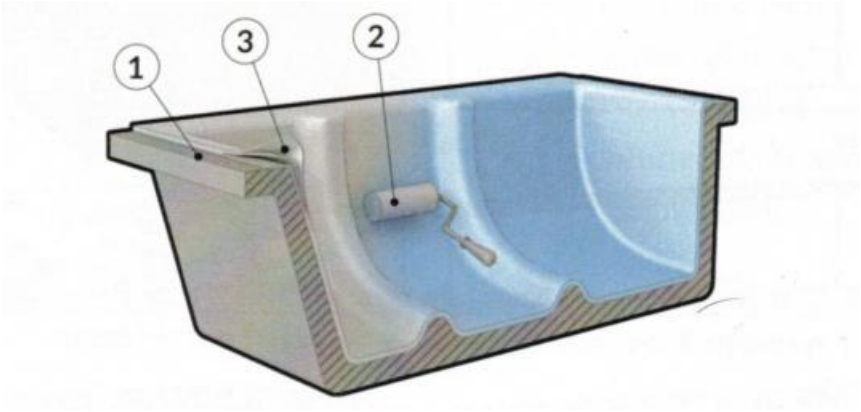


Obrázek 13: zařízení na výrobu SMC [7]

4.2 Technologie výroby

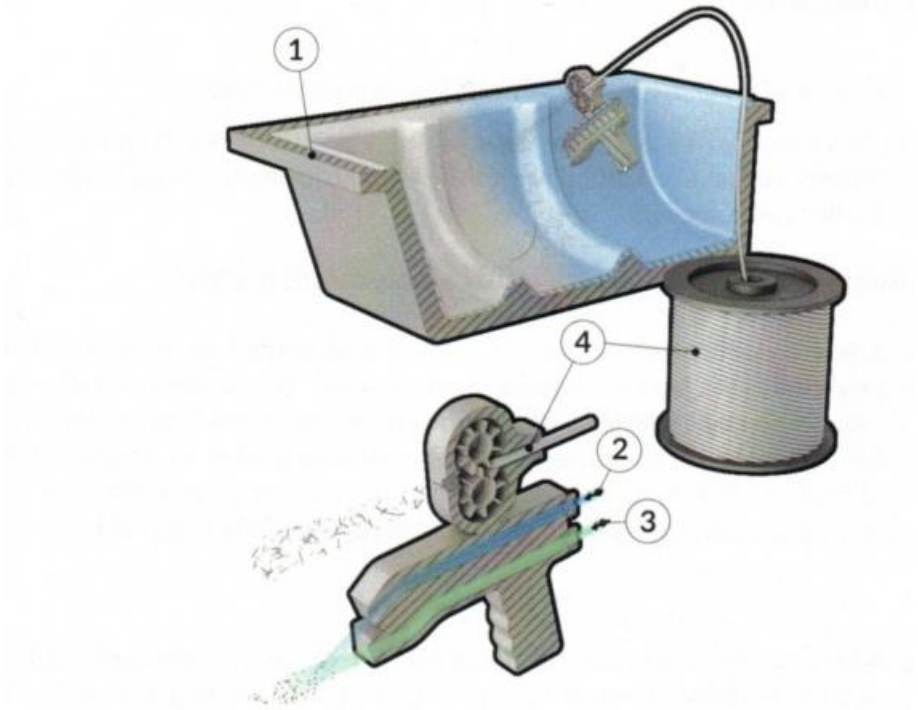
4.2.1 Ruční kladení

Metoda ručního kladení (ruční laminace) patří mezi nejstarší a nejjednodušší metody výroby kompozitních materiálů na bázi polymerní matrice. Pro výrobu tvarově složitých výrobků je třeba forma, která má negativní tvar výsledného výrobku (tzv. kopyto). Na formě je nanesena separační vrstva gelcoatu, který zajišťuje estetickou podobu povrchu výrobku, a také tvoří ochranu proti okolnímu prostředí. Výztuž (pramence, tkaniny, rohože) se klade postupně na formu, a tlakem válečku nebo štětce se hutní a zároveň prosycuje pryskyřicí *(viz obrázek 14)*. Výsledný počet vrstev je dán konstrukčními požadavky výsledného výrobku. Jednotlivé vrstvy vláken je možné orientovat pod různými úhly pro dosažení cílových vlastností. Vytvrzení závisí na použitém typu matrice, buď probíhá za pokojové teploty nebo za zvýšené teploty s dodržením postupného zahřívání a ochlazování. [8][17]



Obrázek 14: schéma výroby ruční laminací; 1 - forma; 2 - nanášení pryskyřice; 3 – tkanina [8]

Dalším způsobem ručního nanášení kompozitu na formu je nástřik. Při nástřiku se využívá speciální pistole, do které jsou přiváděny vlákna z cívky, v pistoli jsou rozsekána a rozprášena na formu. Dále je do pistole přivedena pryskyřice, která je také pomocí stlačeného vzduchu a trysek rozprášena na formu *(viz obrázek 15)*. Po nanesení požadovaného počtu vrstev dochází k vytvrzení stejně jako u předešlé technologie výroby. [8]

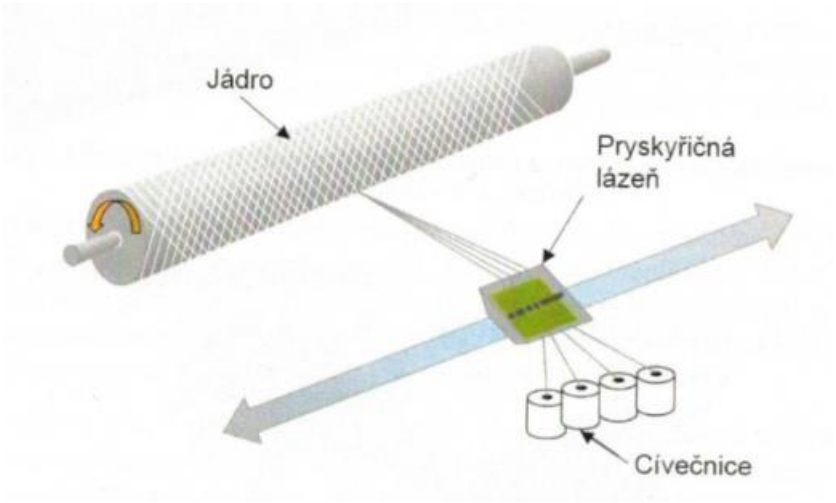


Obrázek 15: schéma výroby při nástřiku; 1 - forma; 2 - přívod stlačeného vzduchu; 3 - přívod pryskyřice; 4 - pramen vlákna [8]

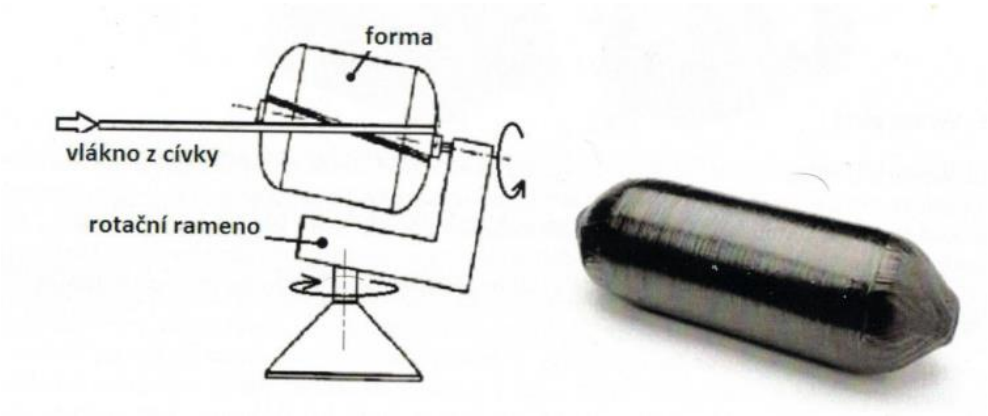
Jelikož se jedná výhradně o ruční výrobu je složité zajistit dobrou opakovatelnost a stejnou kvalitu výrobku. Z těchto důvodů se tyto metody používají především pro kusovou výrobu a opravy. Na druhou stranu je tento typ technologie cenově nejdostupnější. [8][16][17]

4.2.2 Navíjení

Tato technologie se využívá pro výrobu nádrží, trubek a jiných dutých profilů. Dělí se na základní dva typy navíjení, a to na šroubovicové *(viz obrázek 16)* a pólové *(viz obrázek 17)*. U šroubovicového se navíjí pramence, které jsou namotané na cívce. Tyto předimpregnované pramence se navíjejí na jádro ve tvaru výrobku. Impregnace v pryskyřici probíhá buď průchodem pramenců skrz pryskyřičnou lázeň, nebo je pryskyřice přivedena pomocí kotouče, přes kterého jsou vedena vlákna. Orientace a skladbu vláken je možné měnit a regulovat pomocí poměru rychlosti posuvu cívky a rychlosti otáčení jádra. Jádra se následně u menších výrobků vytlačují pomocí lisu a u větších jsou segmentové a po dokončení navíjení se sklopí. Existují také tzv. obětovaná jádra, která se nechají ve výrobku a mohou zajišťovat např. tlakotěsnost. U šroubovicového navíjení je nevýhoda v nutnosti použití vík, pro dokončení nádoby, jelikož nedokážeme navinout pramence i z čela nádoby. Tuto možnost nám dává druhá technologie navíjení, tzv. pólové navíjení. U této technologie je jádro rotačně uloženo na speciálním stroji, který je schopen pramence navíjet i z čel nádoby. [8][18]



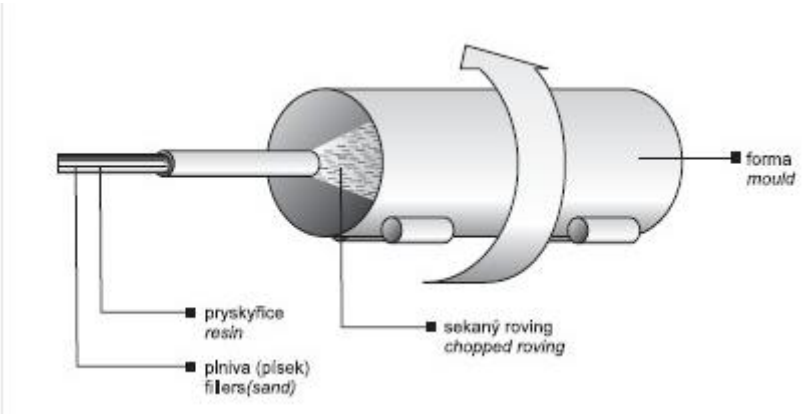
Obrázek 16: schéma šroubovicového navíjení



Obrázek 17: schéma pólového navíjení

4.2.3 Odstředivé lití

Odstředivé lití probíhá v dutém válci (forma), který se otáčí okolo své osy a je do něj přivedena výztuž i pryskyřice *(viz obrázek 18)*, které jsou rovnoměrně vstřikovány na vnitřní plochu válce. Jako výztuž se převážně používají nasekaná skleněná vlákna. Jednotlivé nanesené vrstvy se díky působení odstředivé síly zhutňují. Pro lepší spojení vláken a matrice se forma vyhřívá nebo je vyhřívána teplým vzduchem, který je do formy přiveden. Technologie odstředivého lití je na rozdíl od navíjení výhodnější pro trubky silnostěnné. [19][20]

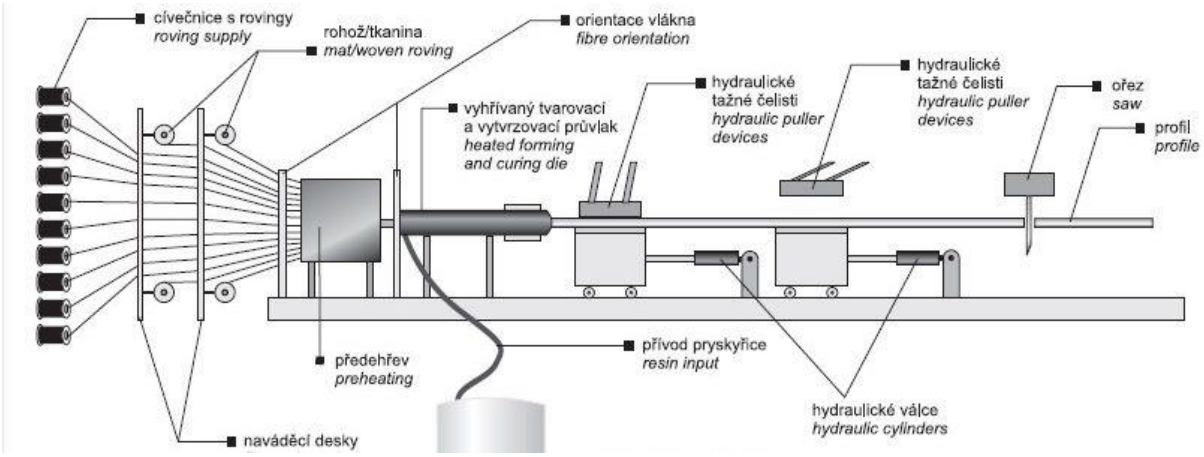


Obrázek 18: schéma výroby pomocí odstředivého lití [19]

4.2.4 Pultruze (tažení)

Tato metoda spočívá v kontinuálním tažení výztuže, která je prosycovaná matricí. Touto metodou se dají vyrábět profily různých tvarů. Jako výztuž jsou nejčastěji používány uhlíkové či skelné pramence, které se mohou kombinovat se stuhami z tkaniny nebo rohoží, aby bylo dosaženo příčné vyztužení. Prosycená výztuž je protahována ocelovou formou pro dosažení

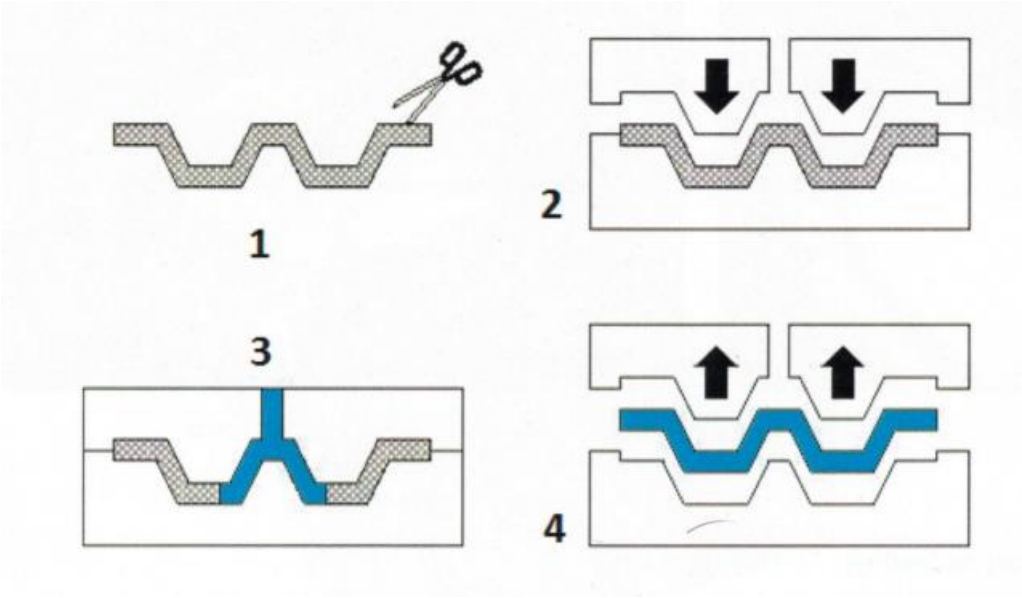
výsledného tvaru profilu *(viz obrázek 19)*. Díky působení tepla ve formě dochází k vytvrzení kompozitu. Následně se takto vytvrzený profil dělí na požadované délky, např. 6 m. Touto metodou je možné dosáhnout velmi vysokého obsahu výztuže až 80 %. Tvary a rozměry výsledného profilu jsou závislé na použitém stroji. Mohou mít maximální šířku 1000 mm a výšku 500 mm. Tloušťka stěny se pohybuje od 1 mm do 50 mm. [16][21]



Obrázek 19: schéma výroby metodou pultruze [21]

4.2.5 RTM (Resin transfer moulding)

Jedná se o technologii vysokotlakého vstřikování pryskyřice do předem vytvarované výztuže. Výztuž se nejprve natvaruje do formy, ve které je za použití tepla a tlaku předlisována, aby mohlo dojít k následnému prosycení pryskyřicí. Prosycování pryskyřicí probíhá v odvětrávané formě, která je předem impregnována gelcoatem, aby bylo možné odseparovat výztuž od formy. Forma může být z jednoho nebo ze dvou kusů, a jako protikus se používá vosková fólie *(viz obrázek 20)*. Pro lepší vytvrzení materiálu může být použita technologie vakua, která zajistí dokonalé prosycení vláken. Pro prosycování s využitím vakua se užívá název VARTM (vakuum-assisted resin transfer moulding). RTM má velmi dobrou opakovatelnost, proto se využívá pro sériovou výrobu. [1][22]



Obrázek 20: schéma výroby pro metodu RTM; 1 - nástřih a předtvarování tkaniny; 2 - skladba tkaniny do formy; 3 - prosycení pryskyřicí; 4 - odformování dílu

4.3 Autoklávová technologie

Vytvrzování pomocí technologie autoklávu probíhá za zvýšené teploty a tlaku, který působí zároveň na daný výrobek. Tento postup dovoluje zařízení autokláv, což je tlaková nádoba, která umožňuje řízeně zvyšovat a snižovat teplotu a tlak. Jeho vnitřní prostor je válcový, kvůli stabilnějšímu tlakovému prostředí. Autokláv je buď parní nebo elektrický, záleží na potřebě použití. Pro vytvrzování kompozitních materiálů se používá elektrický autokláv. Největší nevýhoda tohoto autoklávu je jeho vysoká pořizovací cena, jelikož musí splňovat všechny požadované normy a legislativní nařízení. S větším autoklávem se cena na jeden výrobek snižuje, protože se může vytvrzovat více výrobků najednou. [23][24]

Výchozím materiálem jsou prepregy, jenž jsou uloženy v chladném skladu ve formě rolí. Nejprve je nutné, aby se prepreg dostal na pokojovou teplotu, následně je na řezacím stroji nařezán na požadované tvary. Připravený prepreg se skládá do formy podle orientování a skladby vláken, typicky tak, aby první vrstva byla pod úhlem -45°, druhá 0°, třetí +45°, čtvrtá 90°, pátá +45°, šestá 0° a poslední zase pod úhlem -45°. Toto skládání závisí na počtu skládaných vrstev a typu použitého prepregu, v některých prepregách už může být orientace vláken dána. Na připravené prepregy se umístí děrovaná nebo neděrovaná separační fólie, musí se dbát na to, aby se při vakuování v žádném rádiusu neprotrhla, proto se v takových místech zkrabatí a zamezí se tak nebezpečnému pnutí. Následuje odsávací rohož (např. fleece),

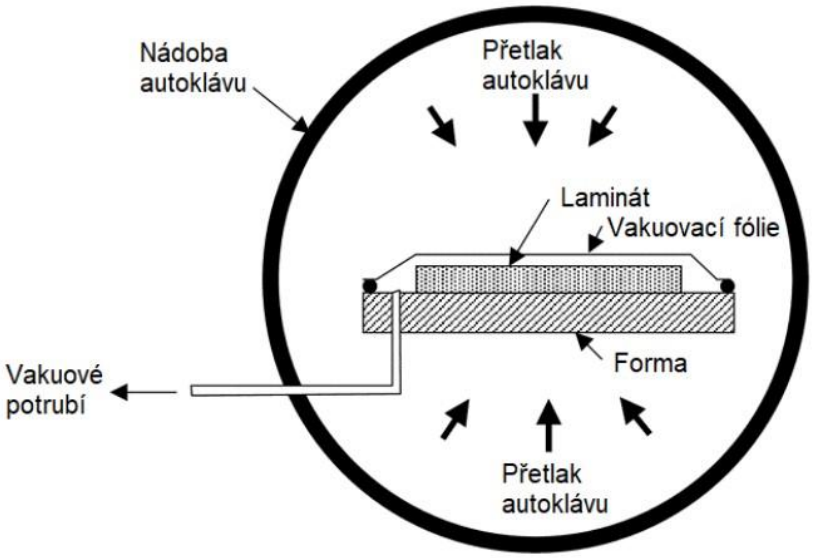
která vstřebá přebytečné pojivo a dokáže odsát přebytečné vzduchové bublinky, které se mohou vytvořit při odsávání vzduchu v nedostupných záhybech a tím vznikne vakuum po celé ploše dílu. Na závěr se použije pružná fólie nebo pryžová plachetka, tzv. sak. Tato poslední vrstva musí být zajištěna tak, aby mohlo dojít k vytvoření vakua, proto se na obvodu přilepí oboustranně lepící páskou nebo těsnícím tmelem. Do poslední vrstvy je vložen ventil pro odsání vzduchu. V připravené formě se odsaje vzduch, aby vzniklo vakuum ve formě podtlaku cca 0,8 baru. A následně je zavezena do autoklávu *(viz obrázek 21)*, kde se malé dílce vytvrzují 3 až 5 hodin a velké se mohou vytvrzovat až 16 hodin. [1][20][25]

Obrázek 21: vytvrzování v autoklávu

4.3.1 Proces vytvrzování v autoklávu

Vytvrzování v autoklávu probíhá za působení tlaků a teploty. Princip diference tlaků pomáhá dosažení lepších výsledků vytvrzení. Diferencí tlaků se rozumí rozdílný tlak uvnitř a vně saku *(viz obrázek 22)*. Uvnitř saku je vytvořen podtlak, který působí tlakovou silou na prepreg a na vnější část působí tlak vyvolaný v autoklávu. Tlak v autoklávu je vyvolán nejčastěji inertními plyny jako je dusík, aby nedocházelo ke zvýšení rizika požáru nebo oxidace. Pro stabilizaci a snížení porozity výsledného výrobku se používá nejčastěji tlak okolo 6 baru. Působící tlak vyvolává smykové síly, které zvyšují tok pryskyřice a smáčivost vláken. Účinnost přenosu tlaku

na součástku je dána typem vakuovací fólie, stavbou laminátu a objemem vláken v použitém prepregu. Díky těmto faktorům je možné dosáhnout výborných mechanických vlastností výrobku a maximálního podílu vláken a to přes 60 %. [26][27][28]

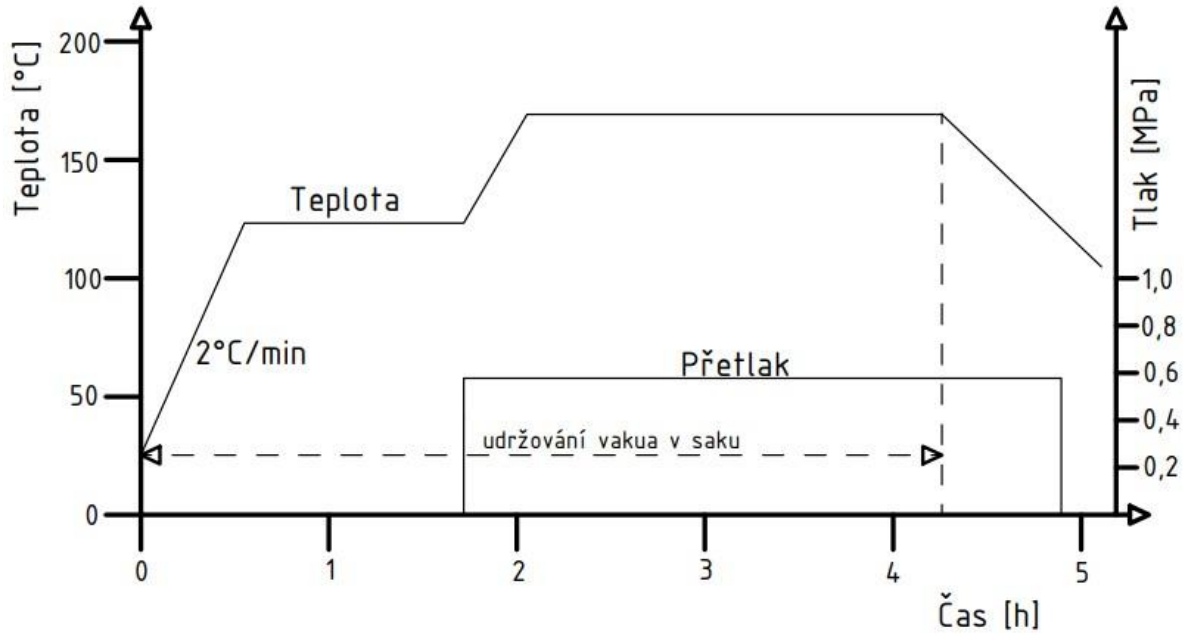


Obrázek 22: schéma diference tlaků v autoklávu [27]

Při vytvrzování v autoklávu nastavujeme ideální teplotu a tlak podle následujících kritérií:

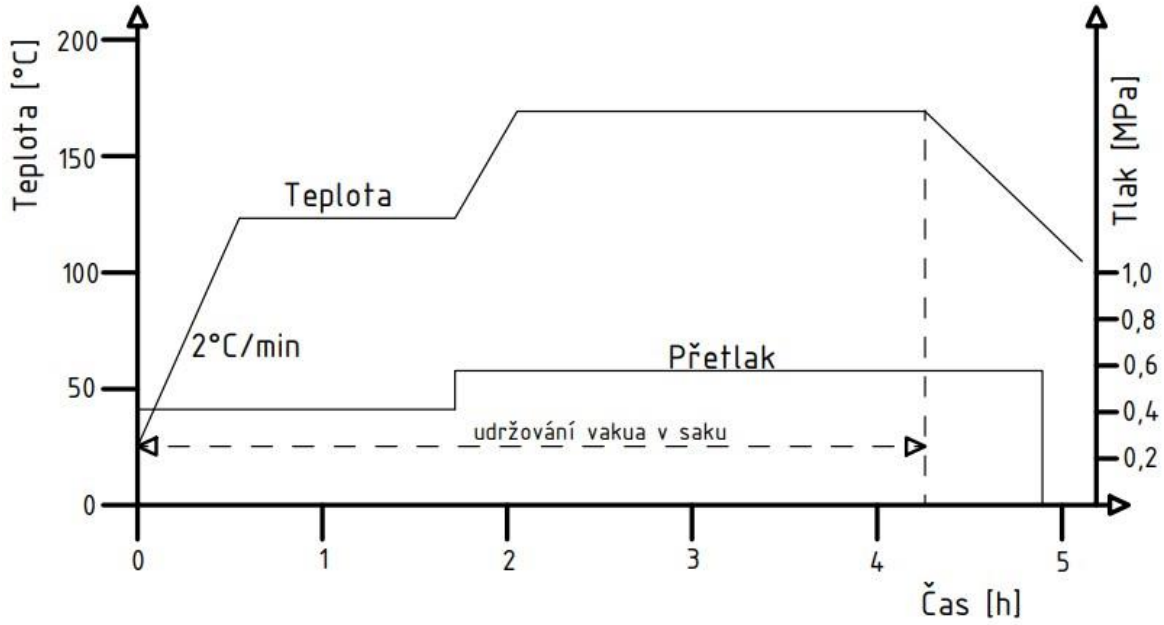
- Dostatečně vysoký tlak, aby došlo k vytlačení nadbytečné pryskyřice z prepregů
- Nesmí být překročena maximální dovolená teplota materiálu
- Dosažení maximálního stupně vytvrzení pryskyřice v co nejkratším čase [26]

Průběh konvenčního vytvrzovacího cyklu autoklávu je znázorněn na *obrázku 23*. Z obrázku je zřejmé, že v první fázi ohřevu a první výdrži na izotermě je výrobek vystaven pouze působení vakua. Při druhé fázi ohřevu je tlak navýšen na cca 6 baru. Díky tomuto tvaru tlakového profilu je zajištěno odstranění těkavých látek a vzduchu z výrobku. Pokud by došlo k předčasnému navýšení tlaku, vzduch a těkavé látky by zůstali ve výrobku. [20][26]



Obrázek 23: graf konvenčního vytvrzovacího cyklu autoklávu, dle [26]

Výše uvedený konvenční cyklus autoklávu má určitá rizika, která jsou v praxi kontroverzní. Velké riziko představuje pryskyřice, která začne vytvářet gel během první izotermy, tuto zgelovatěnou pryskyřici již není možné vytlačit, a tudíž tlak není schopen snížit pórovitost a zlepšit mechanické vlastnosti. Další problém vzniká, pokud na prepreg působí pouze vakuum a hydrostatický tlak pryskyřice je moc nízký nebo dokonce záporný. Jelikož hydrostatický tlak pryskyřice určuje rozpustnost těkavých látek v matrici, a pokud je tento tlak nižší než tlak par těkavých látek, tak se těkavé látky vyloučí z matrice a vytvoří póry. Aby se předcházelo těmto problémům je v praxi běžné vytvořit přetlak (cca 60 až 80 % maxima) z počátku vytvrzovacího cyklu *(viz obrázek 24)*. Nejvíce náročné je správné načasování navýšení přetlaku, což má největší vliv na výsledné vlastnosti výrobku. Ideální okamžik navýšení tlaku je, když viskozita matrice v nejvyšší vrstvě dostatečně klesne, aby přetlak zajistil její tok v celém objemu kompozitu. Při předčasném navýšení tlaku je velké riziko přílišné ztráty pryskyřice z prepregu. Naopak, při pozdním navýšení už může mít pryskyřice nadměrně vysokou viskozitu a dojde k jejímu nevhodnému toku. Načasování navýšení přetlaku také závisí na intenzitě nárustu teploty v autoklávu. Maximální přetlak by měl být zaveden tím dřív, čím je vyšší nárůst teploty. [26]



Obrázek 24: graf vytvrzovacího cykluu autoklávu v praxi, dle [26]

4.3.2 Automatizace autoklávové technologie

Automatizace pro tuto metodu je ekonomicky a časově výhodná hlavně při vyvezení ze skladu a řezání. Pro řezání se využívá ultrasonický vibrační nůž, vodní paprsek nebo laser. Automatické vkládání do formy se příliš nevyužívá, jelikož tvar formy a potřeba uložení do formy je velice komplexní krok a často se vyrábí v malých sériích. Ovšem, najdou se i výjimky, kde není forma tak geometricky složitá a je potřeba velmi přesné uložení prepregu, například při výrobě pláště křídla letadla, kdy se automatizace vyplatí. [20]

5 Zkoušky mechanických vlastností

5.1 Typické chování kompozitů při zkouškách mechanických vlastností

Vliv na chování kompozitních materiálů při mechanickém namáhání má především obsah a orientace vláken, vytvrzení matrice, rozložení plniva nebo vláken. Z tohoto důvodu se nesmí opomenout při vzájemném srovnávání velikost obsahu vláken. [7]

Porušení a únavové vlastnosti u kompozitních materiálů jsou mnohem složitější než u homogenních materiálů. Porušení určuje vznik, případně rychlost šíření jednotlivé trhliny, stav poškození a tím životnost materiálu. [7]

Lokální poškození, která způsobují porušení vláken, předcházejí lomu materiálu při dynamických i statických zkouškách pevnosti kompozitů. Hlavně ve vrstvách, které jsou náchylné na vznik mezivláknové poruchy, např. když zatěžujeme vlákna kolmo na jejich směr nebo zatížení smykem pod úhlem 45°, vzniknou trhliny, které se negativně projevují i u vrstev zatížených ve směru vláken. Z takového předpokladu plyne, že vlákna rovnoběžná se směrem zatížení mají větší pevnost samotné, než když jsou stejně zatěžována, ale jsou v kombinaci s vláknami natočenými o 90°. Při zatížení tlakem je snížena lokální schopnost podepření vláken matricí a dochází k jejich lokálnímu vybočení. Při zatížení tahem vedou vzniklá vrubová napětí a lokální přerozdělení napětí ke koncentracím napětí a vrubovým účinkům v přilehlých vrstvách. Vlivem různého působení lokálních poškození a jejich dalšího nového vzniku, jsou při dynamickém zatěžování míjivá namáhání příznivější než střídavá. [7]

U vysokopevných a tuhých kompozitů s anizotropními vlastnostmi mohou okrajové podmínky jako například upnutí tělesa do sklíčidel výrazně ovlivnit výsledek zkoušky. V oblasti upnutí dochází k počátečním deformacím a k bráněním v příčné kontrakci, což vyvolá zvýšenou úroveň trojrozměrné napjatosti. [7]

5.2 Tahová zkouška

Tahová zkouška pro kompozitní materiály je navržena pro mnoho tvarů a geometrií vzorků. Tyto geometrie a tvary jsou popsány v normách pro příslušnou skladbu a typ materiálu, mezi takové normy řadíme např. ČSN EN ISO 527-1 až 5. Rozměry měřeného vzorku se liší podle druhu materiálu a průběhu tahové zkoušky. Vzorek by měl být na koncích zesílen o materiál

s přibližně stejným modulem pružnosti (viz obrázek 22). Síla působí na vzorek smykem přes vrstvu lepidla. Přetržení neboli lom by měl nastat uvnitř měrné délky, minimálně 10 mm od konců zesílení.

Pevnost v tahu je určena jako maximální napětí, které materiál vydrží, než se začne průřez vzorku výrazně smršťovat. Definována je jako tah, který se měří jako síla na jednotku plochy. U některých nehomogenních materiálů může být pevnost v tahu uváděna pouze jako síla. [29]

Při dostatečně malé deformaci můžeme modul pružnosti ve směru *x*, tedy ve směru natahování tělesa, určit pomocí rovnice,

$$E_x = \frac{F\Delta l_0}{A_0 l_0} = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x}$$

kde je

A_0 – původní průřez zkušebního tělesa uvnitř měrné délky l_0, platí že $A_0 = b \cdot h$,

F – zatěžovací síla,

l_0 – původní měrná délka (Δl_0 je její změna vyvolaná silou F)

ε_x – deformace ve směru osy *x*,

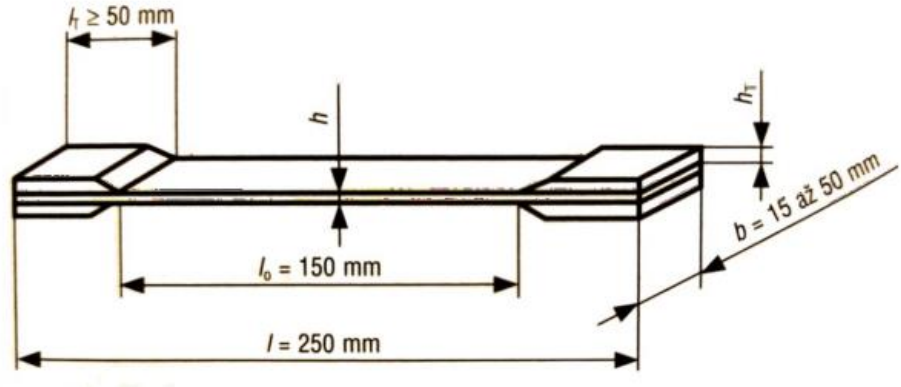
σ_x – napětí ve směru osy *x*. [7]

Pro deformaci ve směru osy *x* platí:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l_0}{l_0}$$

Pro napětí ve směru osy *x* platí:

$$\sigma_x = \frac{F}{A_0}$$



Obrázek 25: rozměry zkušebního tělesa [7]

Praktická část

6 Použitý materiál

Pro výrobu vzorků na tahovou zkoušku byly vybrány tři typy prepregů s různými typy vláken. Bylo vybíráno dle skladby a typu prepregů, které se používají v produkci firmy Mubea Transmission Components s.r.o. Firma se zabývá výrobou pro automotive. Většina dílů je vyráběna z epoxydové pryskyřice vyztužené uhlíkovými vlákny. Vybrané skladby a typy prepregů se používají například pro skořepinu sedaček nebo středový panel mezi předními sedačkami. Tyto materiály jsou zkoumány na pevnost v tahu.

6.1 Skladba materiálů

Vzorek 1

Tabulka 2: skladba vzorku 1

Vrstva	Označení	Orientace vláken
1.	PREG, GG800T-DT120-36	0/90
2.	PREG, GG800T-DT120-36	± 45
3.	PREG, GG800T-DT120-36	0/90

Vzorek 2

Tabulka 3: skladba vzorku 2

Vrstva	Označení	Orientace vláken
1.	PREG, M49/45%/245T2/CCF-3K//1250mm	0/90
2.	PREG, M49/32%/600S8//GE-2x136/1250 “SIC	± 45
3.	PREG, M49/45%/245T2/CCF-3K//1250mm	0/90

6.2 Popis použitých prepregů

Pro vzorek 1 byl použit jeden typ prepregu. Prepreg od firmy Deltapreg označen GG800T-DT120-36 s parametry shrnutými v tabulce 4. Výrobce neudává všechny potřebné parametry v datovém listu prepregu.

Tabulka 4: parametry prepregu GG800T-DT120-36

Typ vlákna	Tenax STS40 F13 24K	
Konstrukce	Kepr 2x2	
Základní hmotnost	g/m^2	802
Hustota vláken	g/cm^3	-
Obsah pryskyřice	Hmotnost v %	-
Pevnost v tahu	MPa	-

Vzorek 2 byl vyroben z druhu prepregu s označením M49 od firmy HEXCEL. Pro tento druh prepregu platí následující vlastnosti.

- Vysoce tvrzený epoxid
- Dobrá odolnost proti nárazu
- Autoklávový proces pro kosmetické aplikace
- Samolepicí na voštinu
- Vakuový proces s dosaženou nízkou úrovní pórovitosti
- Dobrá stabilita při UV záření
- Dlouhá skladovatelnost a životnost při pokojové teplotě
- Vynikající přilnavost a přetažitelnost

Pro vzorek 2 byly zvoleny dva typy tohoto prepregu. První je prepreg s označením M49/45%/245T2/CCF-3K//1250mm, pro který platí následující charakteristiky shrnuté v *tabulce 5*.

Tabulka 5: parametry M49/45%/245T2/CCF-3K//1250mm

Typ vlákna	Vysokopevnostní karbon 3K	
Konstrukce	Kepr 2x2	
Základní hmotnost	g/m^2	445
Hustota vláken	g/cm^3	1,78
Obsah pryskyřice	Hmotnost v %	45
Pevnost v tahu	MPa	1050

Druhý typ prepregu je M49/32%/600S8//GE-2x136/1250 “SIC, jehož vlastnosti jsou shrnuty v *tabulce 6*.

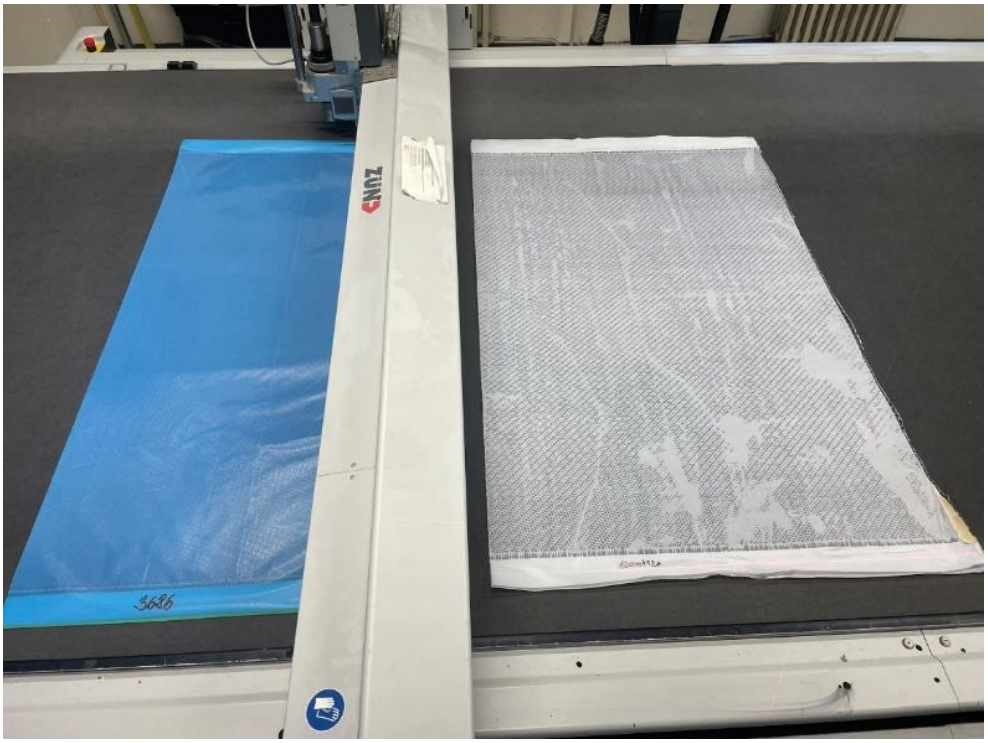
Tabulka 6: parametry prepregu M49/32%/600S8//GE-2x136/1250 “SIC

Typ vlákna	Skelná vlákna	
Konstrukce	Satin 8	
Základní hmotnost	g/m^2	600
Hustota vláken	g/cm^3	1,2
Obsah pryskyřice	Hmotnost v %	50,5
Pevnost v tahu	MPa	550

7 Výroba kompozitů

7.1 Řezání prepregů

Velikost vyráběných desek byla zvolena tak, aby z nich šlo na vodním paprsku nařezat minimálně 20 kusů zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku. Pro jistotu byl rozměr desek zvolen ještě větší, než bylo nutné, a to 500x400 mm. Byl naprogramován program pro automatický nožový řezač prepregu značky Zünd *(viz obrázek 26)*, na kterém bylo nařezáno 6 obdélníků z výše popsaných typů prepregu. Tyto obdélníky byly nařezány tak, aby bylo možné dodržet skladbu vláken, a to 0°, 45° a 90°. Pro úhel 45° musely být obdélníky řezány, také pod úhlem 45°, vůči ose posuvu řezacího nože. Následně byli nařezané desky popsány, v jakém pořadí dojde k jejich skladbě.



Obrázek 26: řezání prepregu

7.2 Předehřev a separace formy

Nejprve byl povrch formy očištěn bílou utěrkou namočenou do acetonu *(viz obrázek 27)*, aby na povrchu nezůstali žádné nečistoty a mastnoty od předchozího použití formy. Následoval předehřev formy pro lepší uchycení separačního prostředku *(viz obrázek 28)*. Předehřev formy

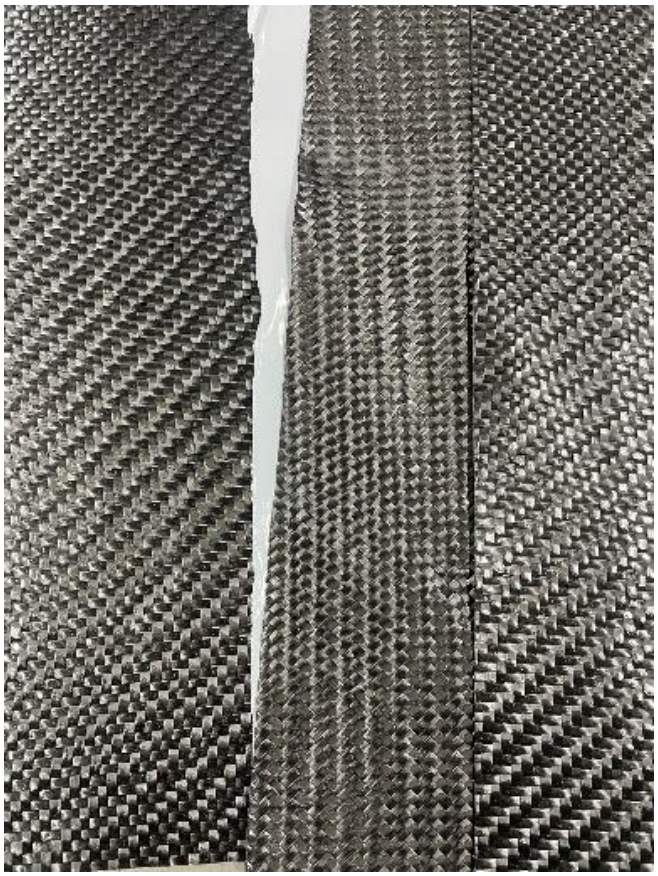
probíhal cca 10 minut na zhruba 50 °C, pomocí tepelného zářiče. Po předehřevu byla nanesena separační vrstva separátoru frekote 700 NC, která 5 minut vysychala. Poté se forma znovu umístila pod tepelný zářič, aby docházelo k vytvrzení separátoru, které trvá 15–20 min, čímž byla forma připravena na pokládku prepregu.

Obrázek 27: očištění formy

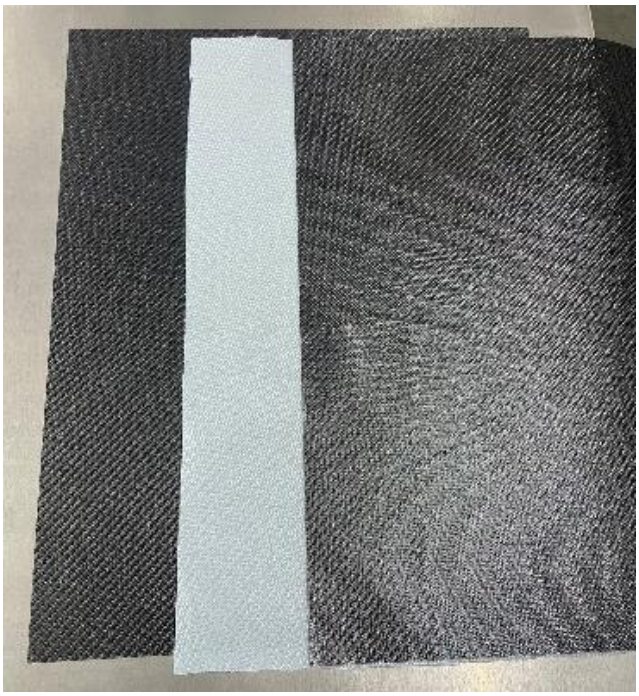
Obrázek 28: ohřev formy

7.3 Kladení prepregů

Z nařezaných prepregů musela být nejprve odstraněna polyethylenová separační fólie, která zamezuje jejich poškození nebo slepení vrstev dohromady, když je prepreg namotán v roli. Nejjednodušší odstranění fólie je možné po stříknutí na roh fólie stlačeným oxidem uhličitým, který má po uvolnění ze spreje teplotu pod bodem mrazu, a takto zmraženou fólii je jednoduché separovat od prepregu. Prepregy je potřeba co nejméně natahovat a po přiložení na první vrstvu prepregu už nestrhávat, jelikož může dojít k dislokaci vláken a prepreg se může zdeformovat, což vede k nepřesnému nalepení a znehodnocení výrobku, jak je vidět z *obrázku 29*. Prepreg se skelnými vlákny byl nalepen jako prostření vrstva vzorku 2, což vychází z podkladů od výrobce. Skladba vzorku 1 je znázorněna na *obrázku 30*.

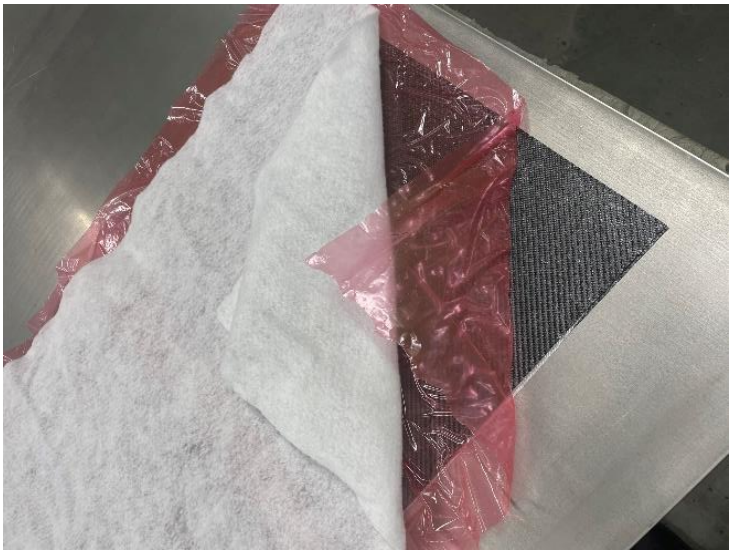


Obrázek 29 skladba vzorku 1



Obrázek 30 skladba vzorku 2

Je třeba zabezpečit, aby byla i nepohledová strana separovaná od vakuovacího saku. Proto byla použita děrovaná fólie. Fólie byla ustřižena o cca 100 mm delší na každé straně, aby mohlo dojít k jejímu zkrabacení, čímž se zabrání jejímu přetržení v rozích nebo na hranách desky. Na separační fólii byla umístěna odsávací rohož (tzv. fleece), aby došlo k rovnoměrnému podtlaku na celé ploše obou desek a také k odsátí přebytečné pryskyřice. Jakmile byly desky překryty separační fólií a odsávací rohoží *(viz obrázek 31)*, mohlo se přejít k vakuování.



Obrázek 31 překrytí prepregu

7.4 Vakuování

K tomuto kroku bylo zapotřebí vakuovací fólie, těsnící oboustranně lepící páska *(viz obrázek 32)* a ventil na odsávaní vzduchu (tzv. vakuovací ventil zobrazený na *obrázku 33*). Stejně jako separační fólii, bylo potřeba ustřihnout vakuovací fólii o cca 100 mm delší ze všech stran, aby mohlo dojít ke zkrabatění na hranách desek a dokonalému vytvoření vakua. Podél okrajů fólie byla nalepena těsnící páska, která zajišťovala neprodyšné spojení fólie s formou. Na vakuovací ventil byla připojena hadice vývěvy. Po spuštění odsávání bylo dosaženo podtlaku cca -0,85 bar. Pokud podtlak nezůstal na hodnotě cca -0,85 baru, musela být těsnící páska důkladněji přitlačena k formě. Při setrvání podtlaku v zavakuovaném výrobku je výrobek připraven na vytvrzovací cyklus v autoklávu.

Obrázek 32 zavakuování

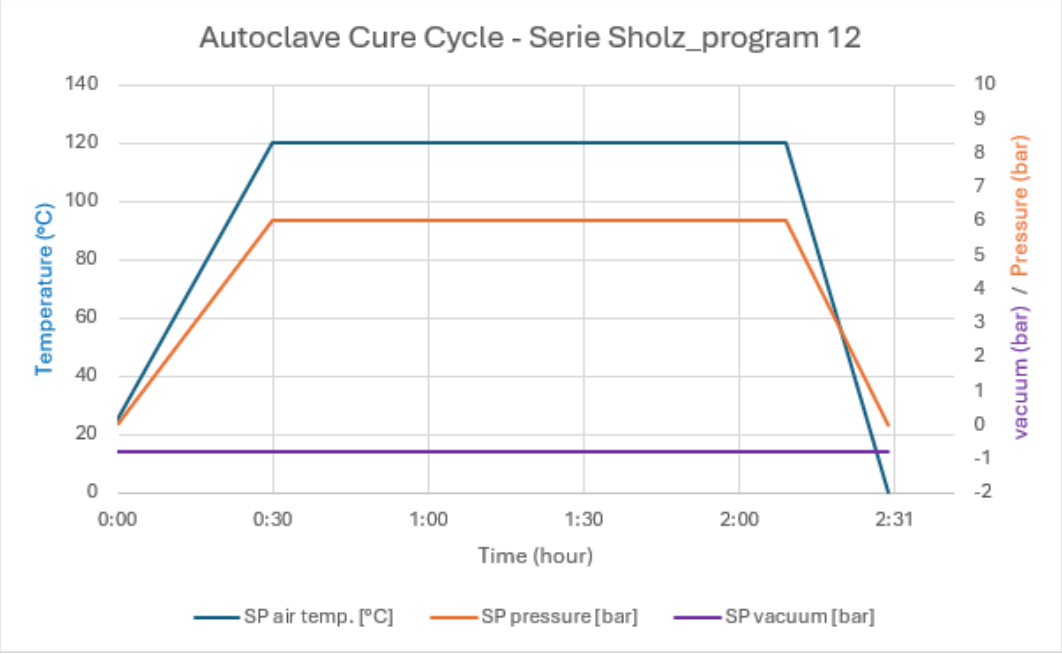
Obrázek 33 vakuovací ventil

7.5 Vytvrzení v autoklávu

Vytvrzovací proces probíhal v autoklávu značky Scholz. Na vytvrzování byl použit stejný cyklus jako při výrobě automobilových dílů ze stejného materiálu ve firmě Mubea Transmission Components s.r.o. Tento cyklus autoklávu je shrnut v *tabulce 7*, popřípadě na *obrázku 34*, kde je zobrazen graf cyklu. Jak je patrné z tlaku v autoklávu, jedná se o cyklus využívaný více v praxi, jak bylo popsáno v teoretické části. V autoklávu je možné připojit teplotní čidla přímo na vakuovací sak dílu, proto je možné teplotu měřit přímo na díle. Díky tomu dochází k přesnějšímu ohřátí vzduchu, aby byla požadovaná teplota přímo na výrobku.

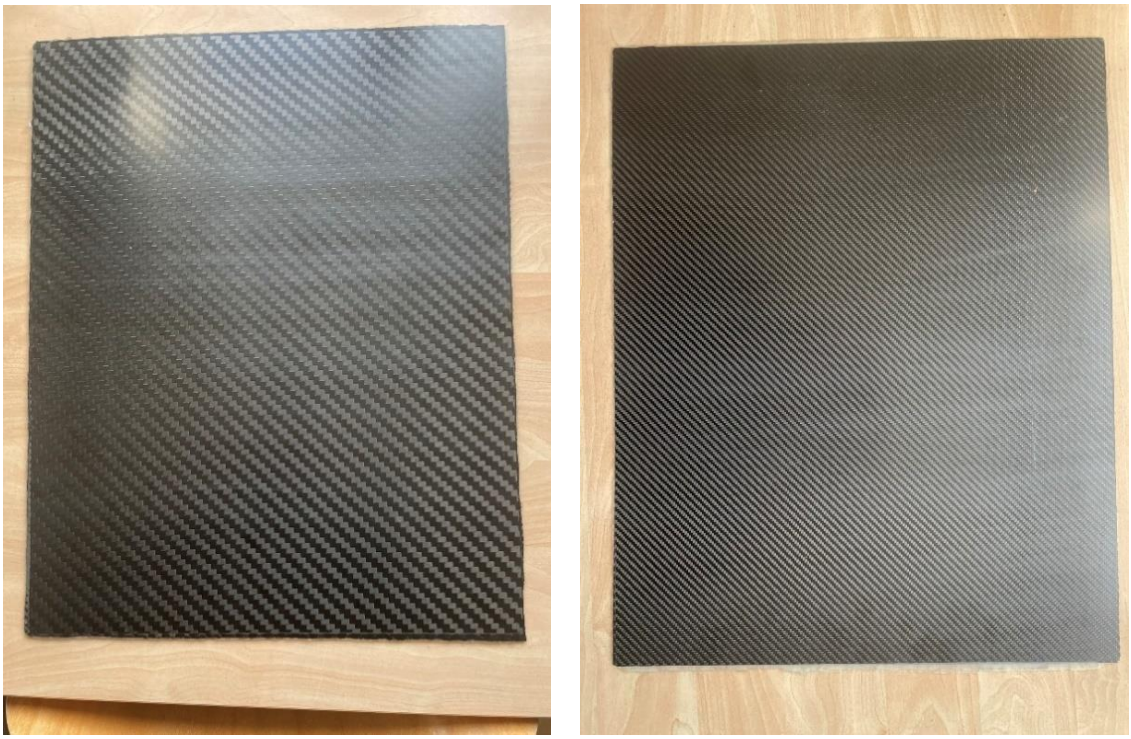
Tabulka 7: cyklus autoklávu

zařízení		MDK	autokláv Scholz		
program		pr 12	série Scholz		
segment	Krok procesu	Čas segmentu	Teplota vzduchu [°C]	Tlak v autoklávu [bar]	Vakuum v saku [bar]
Počáteční hodnoty	start/stop	0:00:00	25	0	-0,8
1	operace	0:30:00	120	6	-0,8
2	operace	1:40:00	120	6	-0,8
3	start/stop	0:00:00	0	0	-0,8



Obrázek 34: cyklus autoklávu

Po vyjmutí z autoklávu byly obě desky vytvrzené a mohly být vyjmuty z vakuovacího saku, fleecu a děrované fólie *(viz obrázek 35)*. Na vzorku 1 je patrná hrubší struktura uhlíkových vláken, což je dáno typem použitého prepregu.



Obrázek 35 vytvrzené desky vlevo vzorek 1, vpravo vzorek 2

7.6 Příprava vzorků

Z každé připravené desky bylo vyřezáno 20 zkušebních vzorků. Zkušební vzorky byly nařezány ve firmě AWAC, spol. s. r. o. pomocí technologie řezání vodním paprskem *(viz obrázek 36)*. Rozměry zkušebních těles byly dle normy ČSN EN ISO 527-4, akorát u vzorku 2 nedosahovala tloušťka požadovaných 2 mm, ale jenom 1 mm.

Obrázek 36 nařezaná tělesa

Kvůli uchycení do zkušebního stroje bylo nutné na konce zkušebních těles nalepit hliníkové destičky *(viz obrázek 37)*. Nejprve bylo potřeba zdrsnit povrch těles, aby došlo k lepší adhezi ve spoji lepidla s povrchem tělesa, zdrsnění bylo provedeno excentrickou bruskou s brusným papírem o zrnitosti P80. Poté byl povrch očištěn a odmaštěn technickým lihem. Hliníkové destičky byly nalepeny pomocí dvousložkového epoxidového lepidla LOCTITE EA 9466 s dobou vytvrzení 3 hodiny. Při lepení byla dodržena vzdálenost 115 mm mezi hliníkovými destičkami požadovaná normou, tak aby od středu tělesa byl vnitřní kraj destičky 57,5 mm.

Obrázek 37 nalepení hliníkových destiček

8 Tahová zkouška

8.1 Zkušební stroj

Všechna vyrobená testovací tělesa byla testována na půdě ČVUT v Praze. Tahová zkouška probíhala na stroji LabTest Model 5.100SP1 *(viz obrázek 38)*. Stroj je určen pro statickou tahovou zkoušku a je na něm možné měřit prodloužení těles pomocí laserového snímače. Parametry stroje jsou shrnuty v *tabulce 8*.

Obrázek 38 stroj na tahovou zkoušku

Tabulka 8: parametry stroje LabTest Model 5.100SP1

Technická data	5.100SP1
Jmenovité zatížení [kN]	100
Max. zkušební rychlost [mm/min]	600
Přesnost řízení rychlosti [%]	±0,5
Rozlišení příčníku [µm]	1
Tuhost rámu [mm/N]	1,6x 10-6
Rozpětí sil [kN]	500-600
Přesnost měření síly [%]	±0,3 z hodnoty v rozsahu
Přesnost dráhy [µm]	1 - ČSN EN ř513
Přesnost měření napětí [%]	±0,5 průtahoměru

8.2 Postup měření

Nejprve byla u všech zkušebních těles změřena šířka *b[mm]* a tloušťka *h[mm]*. Měření rozměrů bylo realizováno pomocí digitálního posuvného měřidla. Zkušební tělesa byla upínána do zkušebního stroje pomocí mechanických čelistí. U každého vzorku bylo potřeba zajistit, aby byl kolmo k vodorovné ploše čelistí, aby nedocházelo ke znehodnocení experimentu, jak bylo popsáno v teoretické části. Upínací síla nesměla být příliš velká, aby nedošlo ke zničení zejména tenčích zkušebních těles. Rychlost zatěžování byla pro každé těleso stejná a to 10 *mm/min*. Zkouška vždy končila úplným selháním zkušebního tělesa.

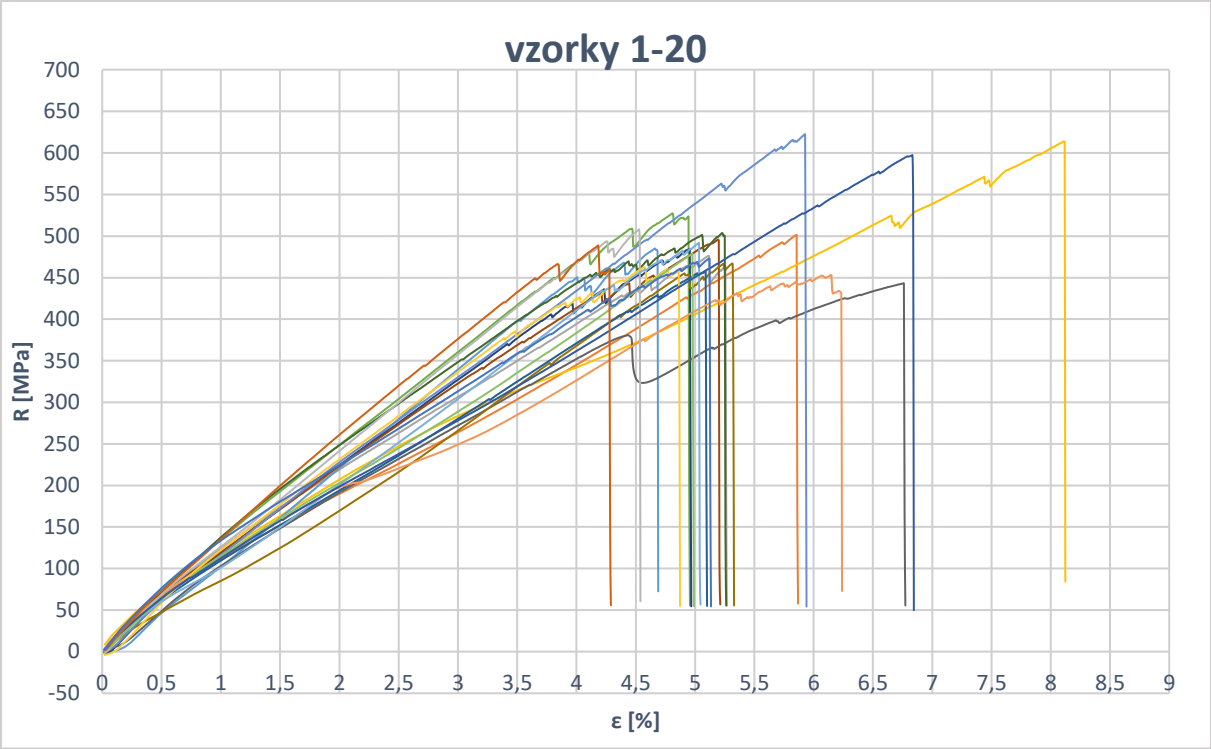
8.3 Výsledky měření

Zkouška v tahu byla provedena pro dva různé vzorky. Od každého vzorku bylo zkoumáno 20 zkušebních těles, kde pro vzorek 1 jsou zkušební tělesa číslovány 1-20 a pro vzorek číslo 2 jsou zkušební tělesa číslovány 21-40. Výstupem měření u každého vzorku byly 2 hodnoty napětí na mezi pevnosti – R_m, síla při přetržení – F_m. Z těchto hodnot byl následně pro každý vzorek vypočten aritmetický průměr $\bar{x}$, směrodatná odchylka $s_{\bar{x}}$ a variační koeficient dané veličiny $v_{\bar{x}}$. Průběh každého měření byl graficky zaznamenán v podobě tahové křivky, která zobrazuje závislost napětí na poměrné deformaci.

8.4 Vzorek 1

Tabulka 9: výsledky zkoušky v tahu pro vzorek 1

Výsledky pro vzorek 1				
n=20	b [mm]	h [mm]	Rm[N/mm]	Fm[N]
1	9,92	2,3	501	11438,9
2	9,95	2,4	476	11370,1
3	9,94	2,45	614	14951,1
4	9,91	2,4	485	11538,8
5	9,92	2,38	527	12450,8
6	9,96	2,4	484	11578
7	9,92	2,38	496	11702,5
8	9,93	2,38	443	10473,3
9	9,94	2,38	467	11047
10	9,94	2,4	458	10916
11	9,94	2,42	504	12115,7
12	9,93	2,4	623	14837
13	9,94	2,38	453	10719
14	9,97	2,36	508	11951,4
15	9,94	2,38	463	10949,8
16	9,97	2,38	492	11670,8
17	9,96	2,39	479	11355,4
18	9,91	2,4	597	14208,8
19	9,95	2,41	489	11717,8
20	9,93	2,44	473	11456,3
$\bar{x}$	**9,94**	**2,39**	**501,6**	**11922,4**
$s_{\bar{x}}$	**0,02**	**0,03**	**50,2**	**1244,7**
$v_{\bar{x}}$ [%]	**0,18**	**1,24**	**10**	**10,4**



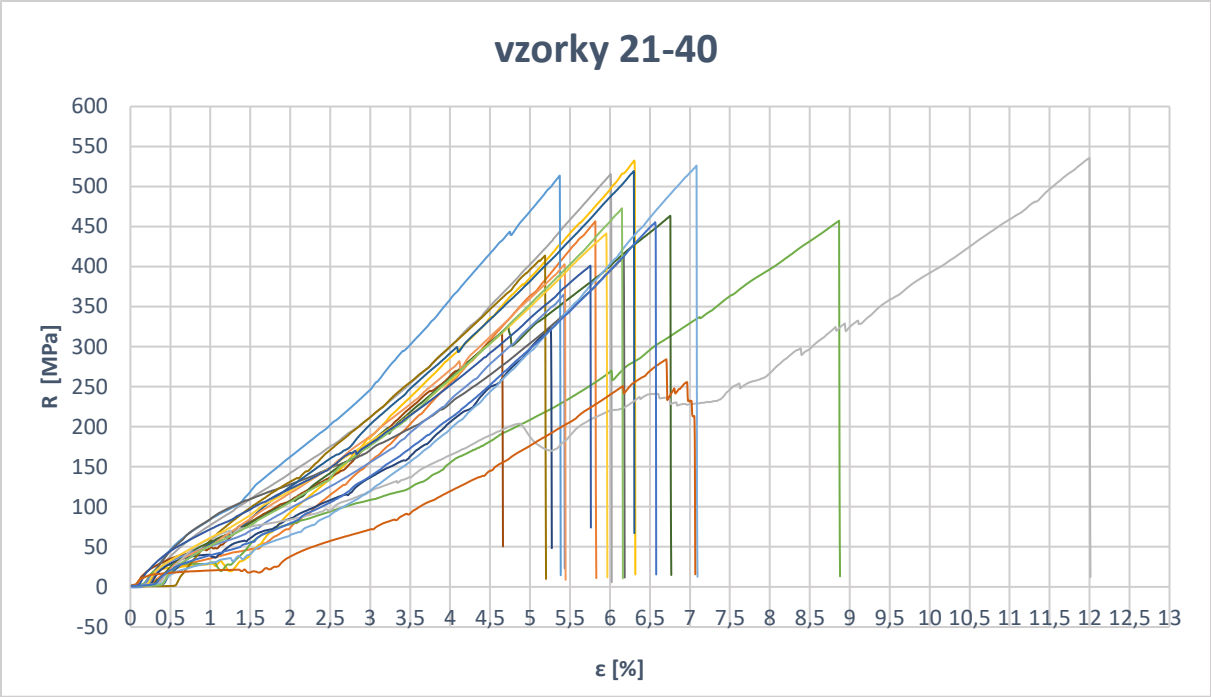
Obrázek 39: graf průběhů tahových křivek u vzorku 1

V *tabulce 9* a na *obrázku 39* je možné vidět naměřená a zpracovaná data ze zkoušky tahem. Odhad aritmetického průměru výběrového souboru stanovených z 20 měření s odhadem směrodatné odchylky pro mez pevnosti v tahu R_m činí 501,6 ± 50,2 MPa. Z grafu můžeme pozorovat větší odchylku v poměrném prodloužení jednoho zkušebního tělesa. Tato nepřesnost mohla vzniknout postupným přetržením vláken nebo v důsledku špatného upnutí tělesa do sklíčidel stroje.

8.5 Vzorek 2

Tabulka 10: výsledky zkoušky v tahu pro vzorek 2

Výsledky pro vzorek 2				
číslo vzorku	b [mm]	h [mm]	Rm[N/mm]	Fm[N]
21	9,77	1	456	4459,7
22	9,87	0,98	516	4986,4
23	9,86	0,97	532	5092,9
24	9,82	0,94	514	4741,4
25	9,82	0,96	457	4310,7
26	9,84	0,97	324	3088,1
27	9,83	0,98	318	3059,2
28	9,85	0,96	412	3895,9
29	9,86	0,96	414	3916,7
30	9,84	0,96	519	4905,7
31	9,84	0,97	463	4423,2
32	9,79	1,03	365	3680,9
33	9,85	0,95	403	3770,4
34	9,84	0,96	536	5060,7
35	9,85	0,97	441	4217,4
36	9,82	0,97	526	5012,1
37	9,83	0,97	473	4508,3
38	9,83	0,95	401	3746,4
39	9,85	0,97	284	2715,9
40	9,84	0,98	455	4392,1
$\bar{x}$	**9,84**	**0,97**	**440,45**	**4199,21**
$s_{\bar{x}}$	**0,02**	**0,02**	**73,35**	**687,08**
$v_{\bar{x}}$ [%]	**0,23**	**1,93**	**16,65**	**16,36**



Obrázek 40: graf průběhů tahových křivek u vzorku 2

V *tabulce 10* a na *obrázku 40* je možné vidět naměřená a zpracovaná data ze zkoušky tahem. Odhad aritmetického průměru výběrového souboru stanovených z 20 měření s odhadem směrodatné odchylky pro mez pevnosti v tahu R_m činí 440,45 ± 73,35 MPa. Z grafu můžeme pozorovat větší odchylku v poměrném prodloužení u dvou zkušebních těles. Tato nepřesnost mohla vzniknout postupným přetržením vláken nebo v důsledku špatného upnutí těles do sklíčidel stroje. U vzorků s nízkou mezí pevnosti v tahu okolo 300 MPa, mohlo jít o roztřepení vláken v důsledku řezání skelným paprskem a neopatrné manipulace nebo se mohlo jednat o místa s nedokonalým těsněním fólie a díky tomu mohlo dojít k nedokonalému vytvrzení matrice.

8.6 Shrnutí výsledků

Z naměřených hodnot vyplývá že pro vzorek 1, kde byl využit prepreg se skelným vláknem, vychází nižší mez pevnosti v tahu. Zároveň můžeme konstatovat, že mez pevnosti v tahu vychází menší než pro samotný skelný prepreg, u kterého výrobce udává mez pevnosti v tahu 550 MPa, i přes to že vzorek byl složen i s prepregu s uhlíkovými vlákny, který má mez pevnosti v tahu 1050 MPa. Tato chyba mohla vzniknout nenormalizovanou tahovou zkouškou, kde vzorek 1 měl o polovinu menší tloušťku, než je vyžadováno u normalizovaného vzorku pro tahovou zkoušku. Výrobce udává hodnoty pro normalizovanou tahovou zkoušku. Pro vzorek 2 výrobce neudává hodnotu meze pevnosti u samotného prepregu, proto byla tato hodnota zjišťována. Při srovnání obou vzorků je patrné, že vzorek, který obsahoval pouze uhlíková vlákna má větší mez pevnosti než vzorek, ve kterém jsou i skelná vlákna.

Závěr

Hlavním cílem bakalářské práce bylo zjistit mez pevnosti v tahu pro dva vzorky materiálů, které se využívají ve firmě Mubea Transmission Components s.r.o. pro výrobu dílů do automobilového průmyslu. Byli vyrobeny dvě desky pomocí autoklávové technologie. Z každé bylo pomocí vodního paprsku nařezáno 20 zkušebních těles. Tato tělesa byla následně přetržena na stroji pro tahovou zkoušku a byla zjišťována mez pevnosti daných kompozitů.

Jak vyplývá z naměřených hodnot, vzorek 1 vykazuje nižší mez pevnosti než vzorek 2, a to z toho důvodu, že byl využit prepreg se skelnými vlákny v jeho skladbě. Jak vychází i z teoretické části skelná vlákna mají menší mez pevnosti v tahu, než uhlíková vlákna což se nám tímto experimentem také potvrdilo. Ačkoliv pro vzorek 1 udává výrobce prepregu vyšší hodnoty meze pevnosti v tahu jak pro prepreg s uhlíkovými vlákny, tak i pro prepreg se skelnými vlákny v experimentu vyšla mez pevnosti výsledného vzorku nižší. Tato skutečnost může být dána nenormalizovaným typem zkušebního tělesa, především jeho dvakrát menší tloušťkou nebo nedokonalou distribucí sil mezi fázemi výsledného kompozitu.

Pro vzorek 2 nebyla dána výrobcem hodnota meze pevnosti v tahu pro prepreg, ze kterého byl vzorek vyroben, proto byla tato hodnota zjišťována. Ačkoliv hodnota samotných uhlíkových vláken tohoto prepregu činní 4300 MPa je zřejmé, že výsledná hodnota vzorku je zhruba 7,8krát menší. Toto zmenšení je dáno především přechodem mezi fázemi kompozitu a nedokonalou distribucí sil mezí vlákny, jelikož epoxidová pryskyřice má nízkou mez pevnosti. Také toto snížení pevnosti může způsobovat orientace vláken v kompozitu. Tento předpoklad platí také pro vzorek 1.

Pro pokračování ve výzkumu mechanických vlastností může být u vzorků zkoumán modul pružnosti v tahu, tento údaj bychom dokázali zjistit při připojení tenzometru ke zkušebnímu tělesu u tahové zkoušky. Dále bych navrhl zkoumání vzorku na ohybové vlastnosti, jako je mez pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu. Poté by mohla být zkoumána struktura vzorku pomocí metalografického výbrusu.

Seznam použité literatury

[1] JONES, Frank R. *Composites science, technology, and engineering*. New York, NY: Cambridge University Press, [2022]. ISBN 978-1-107-03612-3.

[2] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.

[3] KSANDR, Václav. *KOMPOZITY NA KONCI SVÉHO ŽIVOTA*. Online. MATERIAL TIMES. 2021. Dostupné z: https://www.materialtimes.com/tema/kompozity-na-konci-sveho-zivota.html. [cit. 2023-11-24].

[4] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Online. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pages-img/obsah.html. [cit. 2023-12-05].

[5] HALAMA, Radim; FOJTÍK, František; FUSEK, Martin; ROJÍČEK, Jaroslav a ADÁMKOVÁ, Ludmila. *VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ*. Online. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3027-8. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_014/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF/02%20Text%20pro%20e-learning/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF%2013.pdf. [cit. 2023-11-24].

[6] MAZUMDAR, Sanjay K. *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-493-0585-3.

[7] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.

[8] KREBS, Stefan; KOLAŘÍK, Ladislav a BRYKSÍ STUNOVÁ, Barbora. *Technologie zpracování plastů a kompozitů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.

[9] *MECHANIKA KOMPOZITŮ*. Online, Publikace. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008. Dostupné z: https://adoc.pub/mechanika-kompozit-prof-rndr-ing-jan-vrbka-drsc-ustav-mechan.html. [cit. 2023-11-24].

[10] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Vlákna*. Online. Kompozity. 2016. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/13IaXaUZ1GDDetCdz1KaufjHLRdTLNomu/view. [cit. 2023-11-23].

[11] *What Are Ceramic Matrix Composites*. Online. L&L SPECIAL FURNACE CO, INC. 2018. Dostupné z: https://llfurnace.com/blog/what-are-ceramic-matrix-composites/. [cit. 2023-11-23].

[12] LEGENDRE, André. *Uhlíkové materiály: Od černé keramiky k uhlíkovým materiálům: od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Praha: Informatorium, 2001. ISBN 80-860-7382-3.

[13] MORGAN, Peter. *Carbon fibers and their composites*. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2005. ISBN 08-247-0983-7.

[14] SATHISHKUMAR, T; SATHEESHKUMAR, S a NAVEEN, J. Glass fiber-reinforced polymer composites. Online. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2014, roč. 33, č. 13, s. 1258-1275. ISSN 0731-6844. Dostupné z: https://doi.org/10.1177/0731684414530790. [cit. 2023-11-23].

[15] *Custom Formulated Sheet & Bulk Molding Compounds*. Online. IDI composites international. C2023. Dostupné z: https://www.idicomposites.com/smc-bmc-overview.php. [cit. 2023-11-28].

[16] *Technologie výroby*. Online. Prefa Kompozity. C2018. Dostupné z: https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/smc/. [cit. 2023-11-28].

[17] *Ruční kladení*. Online. SEDLÁČEK, Radek; ŠČERBA, Marek a PADOVEC, Zdeněk. Polymerní kompozity. C2023. Dostupné z: https://polymer-composites.cz/hand-lay-up/. [cit. 2023-11-30].

[18] *Navíjení*. Online. SEDLÁČEK, Radek; ŠČERBA, Marek a PADOVEC, Zdeněk. Polymerní kompozity. C2023. Dostupné z: https://polymer-composites.cz/filament-winding/. [cit. 2023-11-30].

[19] *Odstředivé lití*. Online. SEDLÁČEK, Radek; ŠČERBA, Marek a PADOVEC, Zdeněk. Polymerní kompozity. C2023. Dostupné z: https://polymer-composites.cz/centrifugal-casting/. [cit. 2023-11-30].

[20] SABU, Thomas; KURUVILLA, Joseph; SANT KUMAR, Malhotra; KOICHI, Goda a MEYYARAPPALLIL SADASIVAN, Sreekala (ed.). *Polymer Composites Volume 1: Macro- and Microcomposites*. Markono Print Media Pte Ltd, Singapore: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2012. ISBN 978 3-527-32624-2.

[21] *Pultruze (tažení)*. Online. SEDLÁČEK, Radek; ŠČERBA, Marek a PADOVEC, Zdeněk. Polymerní kompozity. C2023. Dostupné z: https://polymer-composites.cz/pultrusion/. [cit. 2023-11-28].

[22] *Injektážní a infuzní technologie*. Online. SEDLÁČEK, Radek; ŠČERBA, Marek a PADOVEC, Zdeněk. Polymerní kompozity. C2023. Dostupné z: https://polymer-composites.cz/injektazni-infuzni-technologie/. [cit. 2023-11-30].

[23] *INDUSTRIAL AUTOCLAVES AND HOW THEY FUNCTION*. Online. BONDTECH. Bondtech corporation. C2023. Dostupné z: https://bondtech.com/blog/how-industrial-autoclaves-work/. [cit. 2023-12-05].

[24] STRONG, A. Brent. *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. Online. 2nd ed. Society of Manufacturing Engineers, c2008. ISBN 0-87263-854-5. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=aCm9yvodiJcC&oi=fnd&pg=PR11&ots=qgenF35R8k&sig=3nEfcv79d5Z_R0iv-sEnv2A9qrk&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. [cit. 2023-12-05].

[25] *Lisování*. Online. SEDLÁČEK, Radek; ŠČERBA, Marek a PADOVEC, Zdeněk. Polymerní kompozity. C2023. Dostupné z: https://polymer-composites.cz/press-moulding/. [cit. 2023-12-05].

[26] LENGSFELD, Hauke. *Composite technology: prepregs and monolithic part fabrication technologies*. Cincinnati: Hanser Publications, 2016. ISBN 978-1-56990-599-9.

[27] CAMPBELL, F. C. *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. Boston: Elsevier, 2006. ISBN 978-185-6174-954.

[28] CAMPBELL, F.C. *Manufacturing processes for advanced composites*. Oxford: Elsevier, 2004. ISBN 18-561-7415-8.

[29] PARK, Soo-Jin. *Carbon fibers*. Springer series in materials science. Dordrecht: Springer, [2015]. ISBN 978-94-017-9477-0.

Seznam zkratek

Zkratka	vysvětlení
Např.	například
Tzv.	takzvaně

Seznam použité symboliky

Symbol	[jednotka]	vysvětlení
L_R	[m, km]	tržná délka
R_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
ρ	[kg.m^{-3}]	hustota
g	[m.s^{-2}]	gravitační zrychlení
$E_{\parallel f}$	[MPa]	modul pružnosti v rovnoběžném směru osy vláken
$E_{\perp f}$	[MPa]	modul pružnosti kolmý ke směru osy vláken
l_0	[mm]	původní měrná délka
A_0	[mm^2]	původní průřez zkušebního tělesa uvnitř měrné délky l_0
h	[mm]	tloušťka zkušebního tělesa
b	[mm]	šířka zkušebního tělesa
F	[N]	zatěžovací síla
ε_x	[mm]	deformace ve směru osy *x*
σ_x	[MPa]	napětí ve směru osy *x*
R_m	[MPa]	mez pevnosti
F_m	[MPa]	síla při přetržení
$\bar{x}$		aritmetický průměr

$s_{\bar{x}}$	směrodatná odchylka
$v_{\bar{x}}$	variační koeficient
N_2	dusík
SiC	karbid křemíku
Al_2O_3	oxid hlinitý
$Al_2O_3 – SiO_2$	mullit
SiO_2	oxid křemičitý
Ca	vápník
B	bor
Mg	hořčík
Na	sodík
K	draslík
Al	hliník

Seznam obrázků

Obrázek 1: synergický efekt [4] 14

Obrázek 2: typy výztuže[4] 20

Obrázek 3: graf zobrazující závislost průměru vlákna na jeho pevnosti [7] 21

Obrázek 4: detail uhlíkového vlákna [7] 22

Obrázek 5: schéma výroby uhlíkových vláken [7] 23

Obrázek 6: detail skelného vlákna [7] .....**Chyba! Záložka není definována.**

Obrázek 7: schéma výroby skelných vláken [7] 25

Obrázek 8: detail aramidového vlákna [7] 26

Obrázek 9: schéma výroby aramidových vláken [7] 26

Obrázek 10: druhy vazeb vyztužujících tkanin a) plátnová vazba, b) keprová vazba [7] 27

Obrázek 11: prepreg v ochranných fóliích 29

Obrázek 12: výroba jednosměrně orientovaného prepregu [7] 30

Obrázek 13: zařízení na výrobu SMC [7] 31

Obrázek 14: schéma výroby ruční laminací; 1 - forma; 2 - nanášení pryskyřice; 3 – tkanina [8] 32

Obrázek 15: schéma výroby při nástřiku; 1 - forma; 2 - přívod stlačeného vzduchu; 3 - přívod pryskyřice; 4 - pramen vlákna [8] 32

Obrázek 16: schéma šroubovicového navíjení 33

Obrázek 17: schéma pólového navíjení 34

Obrázek 18: schéma výroby pomocí odstředivého lití [19] 34

Obrázek 19: schéma výroby metodou pultruze [21] 35

Obrázek 20: schéma výroby pro metodu RTM; 1 - nástřih a předtvarování tkaniny; 2 - skladba tkaniny do formy; 3 - prosycení pryskyřicí; 4 - odformování dílu 36

Obrázek 21: vytvrzování v autoklávu 37

Obrázek 22: schéma diference tlaků v autoklávu [27] 38

Obrázek 23: graf konvenčního vytvrzovacího cyklu autoklávu, dle [26] 39

Obrázek 24: graf vytvrzovacího cykluu autoklávu v praxi, dle [26] 40

Obrázek 25: rozměry zkušebního tělesa [7] 42

Obrázek 26: řezání prepregu 47

Obrázek 27: očištění formy 48

Obrázek 28: ohřev formy 48

Obrázek 29 skladba vzorku 1 49

Obrázek 30 skladba vzorku 2 50

Obrázek 31 překrytí prepregu 50

Obrázek 32 zavakuování 51

Obrázek 33 vakuovací ventil 51

Obrázek 34: cyklus autoklávu 52

Obrázek 35 vytvrzené desky vlevo vzorek 1, vpravo vzorek 2 53

Obrázek 36 nařezaná tělesa 54

Obrázek 37 nalepení hliníkových destiček 54

Obrázek 38 stroj na tahovou zkoušku 55

Obrázek 39: graf průběhů tahových křivek u vzorku 1 58

Obrázek 40: graf průběhů tahových křivek u vzorku 2 60

Seznam tabulek

Tabulka 1: Orientační hodnoty tržné délky vybraných materiálů [8] 21

Tabulka 2: skladba vzorku 1 44

Tabulka 3: skladba vzorku 2 44

Tabulka 4: parametry prepregu GG800T-DT120-36 45

Tabulka 5: parametry M49/45%/245T2/CCF-3K//1250mm 46

Tabulka 6: parametry prepregu M49/32%/600S8//GE-2x136/1250 “SIC 46

Tabulka 7: cyklus autoklávu 52

Tabulka 8: parametry stroje LabTest Model 5.100SP1 55

Tabulka 9: výsledky zkoušky v tahu pro vzorek 1 57

Tabulka 10: výsledky zkoušky v tahu pro vzorek 2 59

Seznam příloh

Příloha 1: materiálový list prepregu GG800T-DT120-36 73

Příloha 2: materiálový list vláken Tenax STS40 F13 24K 74

Příloha 3: materiálový list prepregu M49/32%/600S8//GE-2x136/1250 “SIC 75

Příloha 4: materiálový list pro prepreg M49/45%/245T2/CCF-3K//1250mm 76

Příloha 5: průběh tahové zkoušky u zkušebního tělesa 1 78

Příloha 6: průběh tahové zkoušky u zkušebního tělesa 21 79

Příloha 1: materiálový list prepregu GG800T-DT120-36

SCHEDA DI FABBRICAZIONE
(Production data sheet)

Codice Articolo
PGG800T0236
Nome prodotto:

GG800T-DT120-36 (H 120 cm)

DATI RESINA

Resina:	DT120B
Consumo (Kg/m²):	0,45

CONDIZIONAMENTO PRE-PREG IN BOX

Temperatura:	**30**	Pesi Avvolgitore:	
Ora:	**24**	Compattatore "PE"	
		Lampada di riscaldamento:	

DATI TESSUTO SECCO

Stile di tessitura:	twill 2x2
Tipo di fibra:	
Tenax STS40 F13 24K	
Grammatura (g/m²):	802 ± 30
Densità fili in ordito (fili/cm):	2,50 +/- 0,10 fili/cm
Densità fili in trama (fili/cm):	2,50 +/- 0,10 fili/cm
Altezza:	1.200,00±5,00
Codice interno:	TICC800T1120

FORNITORI DI TESSUTO SECCO

PARAMETRI DI PROCESSO

Velocità di linea (m/min):	2,8	
Tensione di svolgimento (Kg):	0,3	
Pressione gruppo tensionamento (atm):	4,0	
Densità resina standard / ap. tulli (mm):	1,045	/ 1,34
Densità resina altenativa 1 / ap rulli (mm):		/
Densità resina altenativa 2 / ap rulli (mm):		/
Ap. rulli minima (mm):		
Temperatura forno n°1 (°C):	85 ± 4	
Temperatura forno n°2 (°C):	115 ± 4	
Temperatura forno n°3 (°C):	115 ± 4	
Temperatura forno n°4 (°C):	100 ± 4	
Ventilazione forno n°1 (%):	80 ± 5	
Ventilazione forno n°2 (%):	80 ± 5	
Ventilazione forno n°3 (%):	80 ± 5	
Ventilazione forno n°4 (%):	80 ± 5	
Numero bacchette:	1:1	
Raffreddamento:	Vero	

FORMATO E IMBALLAGGIO

FORMATO DEI ROTOLI

Lunghezza standard:	27 ± 3

POLIETILENE TUBOLARE

Lunghezza (cm):	650
Grammatura (g/m²):	100 ± 20

POLIETILENE GOFFRATO

Altezza (cm):	134 ± 3
Goffratura:	Siliconato
Orientamento Int:	Pe sil.sul PP
Orientamento Est:	Pe sil.sul PP
Colore:	Bianco int/Trasp.est
Numero lati:	1 PE sil bia. 1 PE sil.trasp
Grammatura (g/m²):	50 ± 5

ANIME DI CARTONE

Diametro interno (mm):	152
Larghezza (cm):	1440

SCATOLE

Tipo:	AUSCAT146
Larghezza (cm):	325

PARAMETRI DI CONTROLLO

Contenuto di resina (%):	36 +/- 3 % in peso
Contenuto di volatili (%):	< 2,0 % in peso (3)
Gel time	29 ÷ 33 min @ 100°C 8 ÷ 13 min @ 120°C

NOTE

-REGISTRARE SU FOGLIO DIFETTO ALTEZZA DI OGNI ROTOLO DI PRE PREG
-USARE ANIME DA 6"
-QUANDO IL CLIENTE E' RIBA O TOP CARBON STARE A 36% RC ED EVITARE IL CONDIZIONAMENTO.MAIL L.ROSSI 06-06-2013(AGGIORNATA MAIL DEL 25-07-2013)
-REGISTRARE TUTTE LE ALTEZZE DEI ROTOLI SUL MODULO M-PRD.03

Ultimo Agg. S.F.: 17/03/2008

M-PRD.15 Rev. 1.10 del 02/05/2017

TohoTenax

TEIJIN

Delivery programme and characteristics for Tenax® STS filament yarn

Brand name		**Tenax®**	**Tenax®**
Production site		**J / E**	**J / E**
Product designation		**STS40 F13 24K 1600tex**	**STS40 F13 48K 3200tex CP**
Sizing properties		F13	F13
Number of filaments		24.000	48.000
Nominal linear density [1]	[tex]	1600	3200
Twist	[t/m]	0	0
Running length per kg	[m/kg]	625	312
Package weight, net	[kg]	2 / 4 / 6 / 8	6 / 8 / 10

1) without sizing

Characteristics (typical values)

Filament diameter	[µm]	7.0	7.0
Density	[g/cm^3]	1.77	1.77
Tensile strength	[MPa]	4000	4000
Tensile modulus	[GPa]	240	250
Elongation at break	[%]	1.7	1.6

Sizing properties for fiber family STS

STS is a special type suitable for modern industrial applications and it can be processed for all common fiber processing methods.

F13 = Type with approx. 1.0 % sizing based on polyurethane
CP = Center Pull (tube removable)

Please contact our sales team any time for choosing the right type. The stated numbers are typical values. For design purposes please request fiber specification.

Please note the application (aerospace or industry & sports) on your order.

The export or transfer of carbon fibers can be subject to authorization, depending on end-use and final destination.

Toho Tenax Europe GmbH Kasinostraße 19-21 42103 Wuppertal, Germany Tel.: +49 202 32 - 2339 Fax: +49 202 32 - 2360 www.tohotenax-eu.com sales@tohotenax-eu.com (04/2010)

HexPly® M49
120°C curing epoxy matrix

HEXCEL
Product Data Sheet

Prepreg Physical Properties (Examples only. For the wider prepreg range contact Hexcel)

Product Designation		M49/42%/ 200T2X2/ CHS-3K	M49/42%/ 245T2/ AS4-3K	M49/42%/ 370T2/ CHS-12K	M49/39%/ 600T2X2/ CHS-12K	M49/32%/ 600S8/ GE-300
Fibre	-	HS Carbon	HS Carbon	HS Carbon	HS Carbon	E Glass
Tow	-	3K	3K	12K	12K	-
Weave	-	Twill 2x2	Twill 2x2	Twill 2x2	Twill 2x2	Satin 8
Mass	g/m²	200	245	370	60 0	600
Nominal Cured Ply Thickness	mm	0.235	0.286	0.433	0.659	0.473
Nominal Fibre Volume	%	47.8	47.6	47.5	50.6	49.5
Nominal Laminate Density	g/ cm³	1.47	1.47	1.47	1.47	1.20

Cured Prepreg Mechanical Properties (Examples only. For the wider prepreg range contact Hexcel)
Mechanical Properties are based on 120°C cure for 60 minutes, at 7 bar pressure and -0.9 bar vacuum.

Data is the result from several tests on autoclave cured laminates. Some of the values achieved will have been higher, and some lower than the figure quoted. These are nominal values.

Test	Methods	Units	M49/42%/ 200T2X2/ CHS-3K	M49/42%/ 245T2/ AS4-3K	M49/42%/ 370T2/ CHS-12K	M49/39%/ 600T2/ CHS-12K	M49/32%/ 600S8/ GE-300
Tensile Strength	Carbon EN2561	MPa	1050	980	1000	840	550
Tensile Modulus	Glass EN 2747	GPa	68	66	66	63	20
Flexural Strength	Carbon EN 2562	MPa	1000	960	800	780	660
Flexural Modulus	Glass EN 2746	GPa	60	60	55	55	21
ILSS	Carbon EN 2563 Glass EN 2377	MPa	60	57	60	62	56
Comp. Strength	EN 2850 B	MPa	730	760	650	500	460

NB : Data normalised to Fibre Volume Content (55% for fabrics; 60% for UD) except for ILSS and Flexural.

Copyright © 2015 – Hexcel Corporation – All Rights Reserved.

HexPly® Epoxid Matrix M49/45%/245T2/CCF-3K

HEXCEL

Datenblatt

Beschreibung

HexPly® M49/45%/245T2/CCF-3K ist ein Epoxid Prepreg aus einem Gewebe High Strength Carbon. M49 ist die Harzbezeichnung, 45% der Harzgehalt in Gew.-%; 245T2/CCF-3K ist die Bezeichnung des Verstärkungsmaterials und CCF-3K gibt High Strength Carbon an. Dieses Datenblatt ist mit dem M49 Harzsystemdatenblatt abgestimmt, welches für Zusatzinformationen angefordert werden kann.

Verstärkungsmaterial						
			0°	90°		
Flächengewicht	g/m²	245	122,5	122,5		
Aufbau		Köper 2x2				
Fasertype		High Strength Carbon 3K				
Faserdichte	g/cm³	1,78				

PrimeTex™: eine Auswahl an speziell verarbeiteten HexForce Karbon Geweben mit einer feinen, geschlossen Webstruktur für ein einheitliches Erscheinungsbild. Produktdatenblatt auf Anfrage erhältlich.

Matrixeigenschaften		
Glasübergangstemperatur vom Laminat	°C	105 (DMA onset, 5°C/min, 1Hz, 15µm),
(Härtungszyklus: 90 min @ 120°C)		
Harzdichte	g/cm³	1,18

Prepreg Daten		
Flächengewicht	g/m²	445
Harzgehalt	Gew. %	45
Tack		stark klebrig

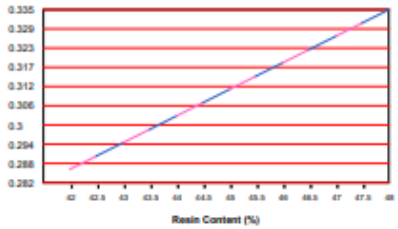
Verarbeitung			
Härtungszyklus		@ 90 °C	360 min
	oder	@ 120 °C	90 min
	oder	@ 140 °C	30 min
vorgeschlagene Aufheizrate		°C/min	3 - 5
Druck		bar	3 - 7

Der optimale Härtungszyklus, die Aufheizrate und die Verweilzeit hängen von der Größe des Bauteils, dem Laminataufbau, der Ofenkapazität und der Art der verwendeten Vorrichtung ab.

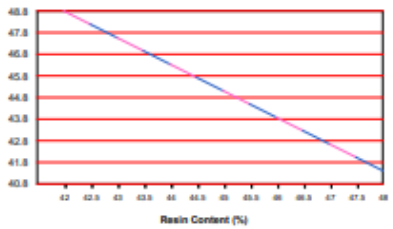
Laminateigenschaften

(Laminatdichte 1,45 g/cm³)

HARZGEHALT % vs EINZELLAGENDICKE



HARZGEHALT % vs FASERVOLUMENGEHALT %



Die oben angeführten Grafiken ermöglichen die Bestimmung der Lagendicke und des Faservolumengehaltes in Abhängigkeit des Harzgehaltes. Die Berechnung setzt keinen Harzverlust voraus.

Copyright 2017 - Hexcel Corporation - All Rights reserved.

Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften basieren auf einer Aushärtung bei 120 °C für 90 Minuten, und einem Druck von 7 bar und 0.90 bar Vakuum.

Diese Werte sind Mittelwerte mehrerer Messungen und bewegen sich. Die Prüfplatten wurden im Autoklav - Verfahren hergestellt.

(bezogen auf 55% Faservolumen, gilt nicht für ILSS)

Kette (RT / Unkonditioniert)	Zugfestigkeit	Biegefestigkeit	ILSS	Compression
Festigkeit (MPa)	1050	900	60	600
E-Modul (GPa)	68	57	.	56
Testmethode	EN 2561	EN 2562	EN 2563	EN 2850B

NB: Biegewerte sind nicht normalisiert

Lagerbeständigkeit des Prepregs

Lagerstabilität[1]: 12 Monate bei -18°C/0°F (ab Herstellungsdatum).

[1] Die Lagerstabilität ist die maximale Lebensdauer für HexPly® Prepreg, wenn dieses Material immer in der verschlossenen Verpackung bei -18°C/0°F oder 5°C/41°F gelagert wird. Die maximale Lagerstabilität bei Raumtemperatur bezieht sich auf die Zeit zwischen der Entnahme aus dem Kühlhaus und der Aushärtung.

Lagerstabilität[2] : 30 Tage bei Raumtemperatur.

[2] Lagerstabilität: ist die maximale Lagerdauer bei Raumtemperatur, von der Kühllagerentnahme bis zur Verarbeitung.

Das Prepreg soll an einem kühlen, trockenen Ort oder in einem Kühlraum gelagert werden. Nach Entnahme aus dem Kühlraum müssen Prepregs – um die Kondensation von Feuchtigkeit auf den Rollen zu verhindern – in der verschlossenen Verpackung auf Raumtemperatur konditioniert werden. Dies kann bis zu 48 Stunden dauern.

Vorsichtsmaßnahmen

Die üblichen Vorsichtsmaßnahmen bei der Handhabung von ungehärtetem Harz- und Fasermaterial sollten beachtet werden. Der Gebrauch von Wegwerfhandschuhen bietet dem Anwender Schutz und vermeidet Verunreinigungen am Material und an den Komponenten. Bei Hautkontakt mit Seife und Wasser waschen. Keine Lösungsmittel verwenden. Ein Sicherheitsdatenblatt ist für dieses Produkt verfügbar.

Wichtig

Alle Informationen sind vermutlich richtig, werden aber ohne jede Haftungsübernahme gegeben. Die Benützer sollten selbst die Bewertung der Eignung eines Produktes für einen bestimmten Zweck vornehmen. Alle Verkäufe sind unseren allgemeinen Verkaufsbedingungen unterworfen, welche Haftungsbeschränkungen und andere wichtige Bestimmungen enthalten.

Weiterführende Informationen

Hexcel gehört zu den weltweit führenden Anbietern von Verbundwerkstoffen für die Luft- und Raumfahrt und eine Vielzahl von Industriebranchen. Unser umfangreiches Produktangebot umfasst:

- HexTow® carbon fibers
- HexForce® reinforcements
- HiMax™ multiaxial reinforcements
- HiTape™ advanced reinforcements
- HexPly® prepregs
- HexMC® molding compounds
- HexFlow® RTM resins
- Redux® adhesives
- HexTool® tooling materials
- HexWeb® honeycombs
- Acousti-CAP® sound attenuating honeycomb
- Engineered core
- Engineered products

Für Angebote, Bestellungen und Produktinformationen innerhalb der USA können Sie kostenlos unter 1-800-688-7734 anrufen. Ein Verzeichnis unserer weltweiten Auslandsvertretungen mit Telefonnummer und vollständiger Anschrift finden Sie unter:
http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg

© 30/11/2017 | Hexcel Corporation - Alle Rechte vorbehalten. Die Hexcel Corporation und ihre Tochtergesellschaften (nachstehend „Hexcel") gehen davon aus, dass die technischen Daten und sonstigen hierin enthaltenen Informationen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Dokuments im Wesentlichen richtig waren. Hexcel behält sich das Recht vor, diese technischen Daten und Informationen jederzeit zu aktualisieren, zu überarbeiten oder zu ändern. Alle angegebenen Leistungswerte werden als repräsentativ erachtet, können und sollen jedoch keinen Ersatz für eine von Ihnen selbst durchzuführende Prüfung der Eignung unserer Produkte für Ihren speziellen Verwendungszweck darstellen. Hexcel schließt alle ausdrücklichen oder stillschweigenden Zusicherungen und Gewährleistungen einschließlich unter anderem der implizten Gewährleistung der Marktfähigkeit und der Eignung für einen bestimmten Zweck aus und übernimmt keinerlei Haftung für Schäden, die aus oder im Zusammenhang mit der Verwendung oder dem Vertrauen auf die in diesem Dokument enthaltenen technischen Daten oder Informationen entstehen.

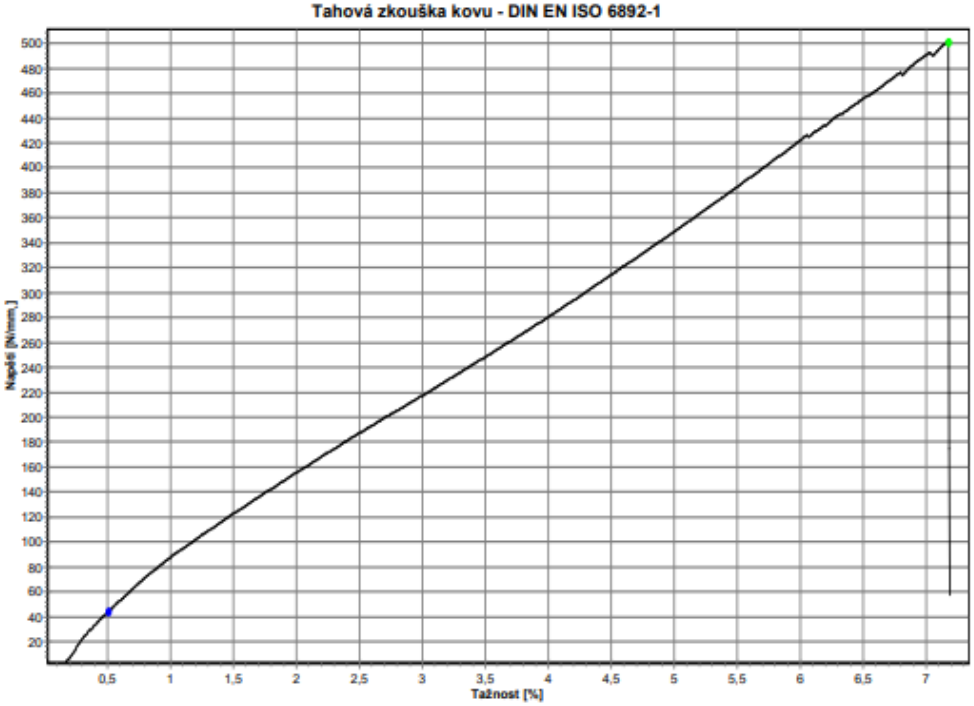
Copyright 2017 - Hexcel Corporation - All Rights reserved.

Příloha 5: průběh tahové zkoušky u zkušebního tělesa 1

Zkoušející: Zach
Materiál:
Datum: 09.04.24
Čas: 09:42
Název souboru: C:\Documents and Settings\Trhacka\Plocha\Rozpracované projekty\Vojtěch Zach kompozity zkouška tahem\Tlustší\1.MVI

Zkušební parametry

Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	Dráha
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	h = 1 mm; m = 1 g
Zadání délek:	Le = 50 mm; Lc = 99 mm; L0 = 80 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 10 mm/min; V1 = 10 mm/min
Přepínací body:	F0 = 1000 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 80000 N; dF = 80 %



Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	Rm N/mm²	Fm N
1	x	09.04.24	09:42			501	11438,90

Statistika a = 1

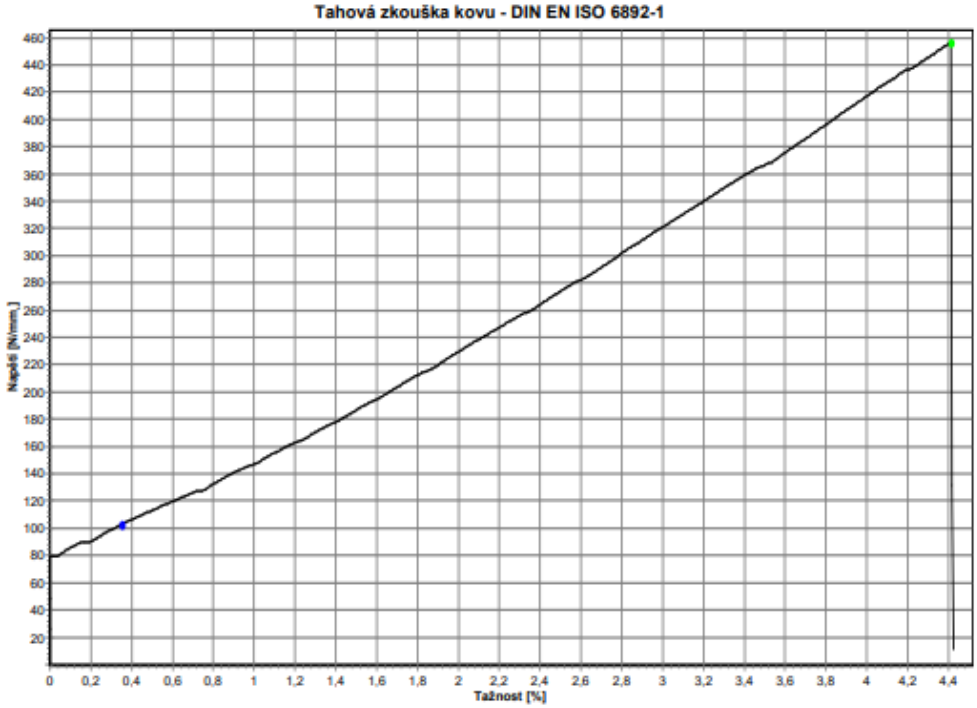
Rm N/mm²	Fm N

Příloha 6: průběh tahové zkoušky u zkušebního tělesa 21

Zkoušející: Zach
Materiál:
Datum: 09.04.24
Čas: 11:27
Název souboru: C:\Documents and Settings\Trhacka\Plocha\Rozpracované projekty\Vojtěch Zach kompozity zkouška tahem\Tenčí\21.MV

Zkušební parametry

Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	Dráha
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	h = 1 mm; m = 1 g
Zadání délek:	Le = 50 mm; Lc = 99 mm; L0 = 80 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 10 mm/min; V1 = 10 mm/min
Přepínací body:	F0 = 1000 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 80000 N; dF = 80 %



Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	Rm N/mm²	Fm N
21	x	09.04.24	11:27			456	4459,70

Statistika a = 21

Rm N/mm²	Fm N

Test&Motion
Stránka 1 z 1