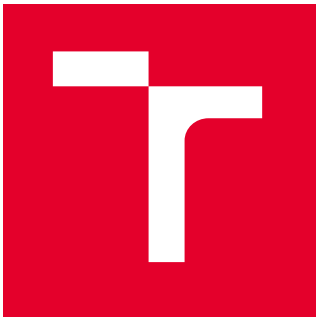


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍHO DÍLCE S VYUŽITÍM PREPREGŮ BEZ AUTOKLÁVU

DESIGN OF MANUFACTURING TECHNOLOGY OF A COMPOSITE PART USING OUT OF AUTOCLAVE PREPREGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Adam Tellinger**

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Radim Kupčák**

SUPERVISOR

BRNO 2024

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Adam Tellinger**
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	**Ing. Radim Kupčák**
Akademický rok:	2023/24

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

Návrh technologie výroby kompozitního dílce s využitím prepregů bez autoklávu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor se bude zabývat návrhem technologie výroby kompozitního dílu s použitím tzv. „mimo–autoklávových prepregů“. Výroba pomocí prepregů má řadu výhod, ale náklady spojené s pořízením autoklávu či vyhřívaného lisu tvoří významnou překážku pro malé firmy. Použití mimo–autoklávových prepregů eliminuje tyto počáteční investiční nároky, avšak vyžaduje pečlivé upravení výrobního procesu pro dosažení kvalitních výsledků.

Cíle diplomové práce:

– rešerše technologie výroby kompozitů se zaměřením na mimoautoklávové prepregy
– návrh několika variant prototypové výroby zadané součásti
– prototypová výroba součásti
– zhodnocení výsledků, volba vyhovující varianty technologie výroby
– tvorba technologické návodky

Seznam doporučené literatury:

EHRENSTEIN, G. W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.

CAMPBELL, F. C. Structural Composite Materials. Materials Park: ASM International, 2010. ISBN 9781615030378.

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

BOGOLJUBOV, N. N., BRATUKHIN, A. G. Composite Manufacturing Technology. London: Chapman & Hall, 1995.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou výroby kompozitního dílu z prepregů mimoautoklávovou technologií. První částí diplomové práce je rešerše kompozitních materiálů a technologií výroby kompozitů. Navazuje další část, jež se zaměřuje na mimoautoklávové způsoby výroby kompozitních dílů s využitím prepregů. Obsahem praktické části je návrh několika variant prototypové výroby zadané součásti a následná výroba dílu. Výstupem je zhodnocení dosažených výsledků, porovnání výrobních metod, volba vyhovující varianty technologie výroby a tvorba technologické návodky pro tento zvolený způsob výroby kompozitního dílu.

Klíčová slova

kompozit, uhlíková vlákna, mimoautoklávový prepreg, optika, 3D tisk, forma

ABSTRACT

This master's thesis deals with the production of a composite part from prepregs using non-autoclave technology. The first part of the thesis is research of composite materials and composite manufacturing technologies. This is followed by a section that focuses on non-autoclave methods of manufacturing composite parts using prepregs. The practical part includes the design of several prototype production variants of the specified part and subsequent production of the part. The output is an evaluation of the achieved results, a comparison of the various production methods, the selection of a suitable production technology variant, and the creation of a technological guideline for this chosen method of composite part manufacturing.

Keywords

composite, carbon fiber, out-of-autoclave prepreg, optics, 3D print, mould

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TELLINGER, Adam. *Návrh technologie výroby kompozitního dílce s využitím prepregů bez autoklávu* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157968. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Radim Kupčák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh technologie výroby kompozitního dílce s využitím prepregů bez autoklávu vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Adam Tellinger

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi byli nápomocni při zpracovávání této diplomové práce.

Děkuji zejména vedoucímu práce Ing. Radimu Kupčákovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

Dále děkuji společnosti Meopta – optika, s.r.o. a také všem jejím zaměstnancům, kteří se na této diplomové práci podíleli.

V neposlední řadě patří díky mé rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

Zadání práce
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

ÚVOD 9
1 ROZBOR ZADÁNÍ 10
2 KOMPOZITY 11
2.1 Mechanické vlastnosti kompozitů 11
2.1.1 Synergismus 11
2.1.2 Izotropie, anizotropie, ortotropie 12
2.1.3 Paradoxy kompozitních materiálů 15
2.2 Vrstvení 15
2.3 Rozdělení kompozitních materiálů 18
2.4 Výztužná vlákna 20
2.4.1 Polymerní vlákna 22
2.4.2 Skelná vlákna 23
2.4.3 Uhlíková vlákna 24
2.5 Matrice 25
2.6 Výroba kompozitů 27
2.6.1 Mokré kladení 27
2.6.2 Kladení prepregů 28
2.6.3 Navíjení 29
2.6.4 Infuze 30
2.6.5 Pultruze 32
3 MIMOAUTOKLÁVOVÁ TECHNOLOGIE 33
3.1 Specifika mimoautoklávových prepregů 34
3.2 Výroba prepregů 37
3.3 Skladování prepregů 39
3.4 Vývoj mimoautoklávových prepregů 40
4 NÁVRH PROTOTYPOVÉ VÝROBY 41
4.1 Metoda vakuového pytle 41
4.2 Metoda silikonového jádra 42
4.3 Skladba vrstev a volba prepregu 43
5 NÁVRH A VÝROBA FOREM 44
5.1 Laminační forma 44
5.2 Forma pro silikonové jádro 51
5.3 Odlévání silikonového jádra 53
6 PROTOTYPOVÁ VÝROBA 54

6.1 Postup výroby dílu metodou vakuového pytle 54
6.2 Postup výroby dílu metodou silikonového jádra 57
7 ZHODNOCENÍ 60
ZÁVĚR 63

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratek
Seznam příloh

ÚVOD

S neustálým růstem využití kompozitů dochází postupně k rozšiřování této skupiny materiálu i do „běžnějších“ aplikací. Na základě toho roste zejména u menších firem, resp. firem s kompozity teprve začínajících poptávka po zjednodušení procesu výroby. V tomto ohledu se jeví jako ideální stále používanější technologie výroby kompozitních dílů z prepregu. Jako prepreg se označuje výztuž (obvykle tkanina) předem naimpregnovaná odpovídajícím množstvím matrice (pryskyřice) vhodná pro velkosériovou výrobu. Díky jednoduchosti použití a čistotě výrobního postupu jsou však prepregy vhodné i pro začátečníky.

Problémem je, že pro dosažení dobré kvality vyráběného dílu je potřeba většinu současných prepregů vytvrzovat v autoklávu. Autokláv je v podstatě vyhřívaná tlaková nádoba (pec), vybavená vývěvou pro odsávání vzduchu z vakuového pytle vyráběného dílu. Oproti nákladům na formy a jiné menší položky je však pořízení autoklávu zcela zásadní investicí, pořizovací náklady tohoto zařízení jsou enormní, pro začínající výrobce (experimentující s kompozity) zcela nesmyslné. Pro eliminaci této výrazné investice, a tím i minimalizaci počátečních nákladů při výrobě kompozitních dílů pomocí prepregů je vhodné uvažovat o použití tzv. „mimoautoklávových“ metod výroby.

Mimoautoklávové způsoby výroby jsou využívány také v průmyslových oblastech, kde jsou díly s ohledem na kvalitu a maximální možnou úsporu hmotnosti vyráběny z prepregů, ale svými rozměry již neumožňují standardní vytvrzení v autoklávu. Tato situace často nastává např. v kosmických a leteckých aplikacích, výrobci jsou tak nuceni použít některý z mimoautoklávových způsobů výroby.

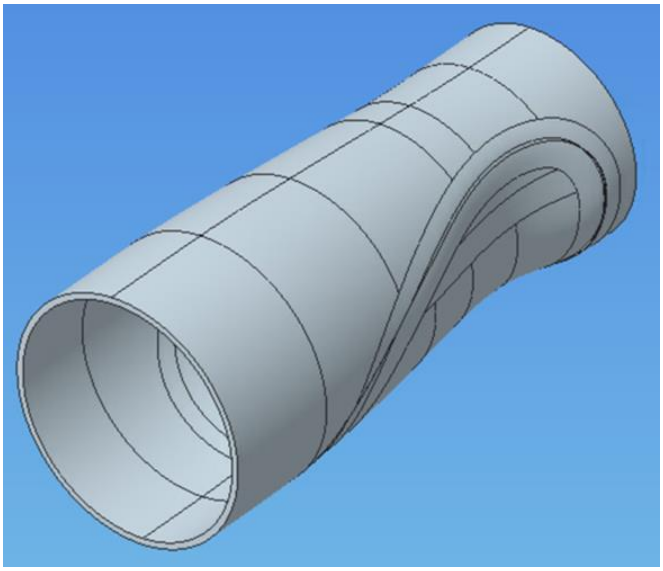
Jedním z cílů této diplomové práce je proto tvorba přehledu technologií výroby kompozitů, především pak se zaměřením na mimoautoklávové způsoby produkce s využitím prepregů. Poznatky získané při zpracování rešerše by měly být následně aplikovány při návrhu několika variant technologie výroby a samotné prototypové výrobě zadaného kompozitního dílu.

Motivací pro volbu tohoto tématu byla mimo jiné autorova dlouhodobá spolupráce s firmou Meopta – optika, s.r.o. a zájem vývojového oddělení firmy o rozšíření využití kompozitů z uhlíkových vláken ve výrobě průmyslové i sportovní optiky. Aplikace karbonu by mohla mít pozitivní vliv na redukci hmotnosti rozměrných komponentů, snížení teplotní roztažnosti optických sestav, a v případě sportovní produkce také atraktivitu designu výrobků.

1 ROZBOR ZADÁNÍ

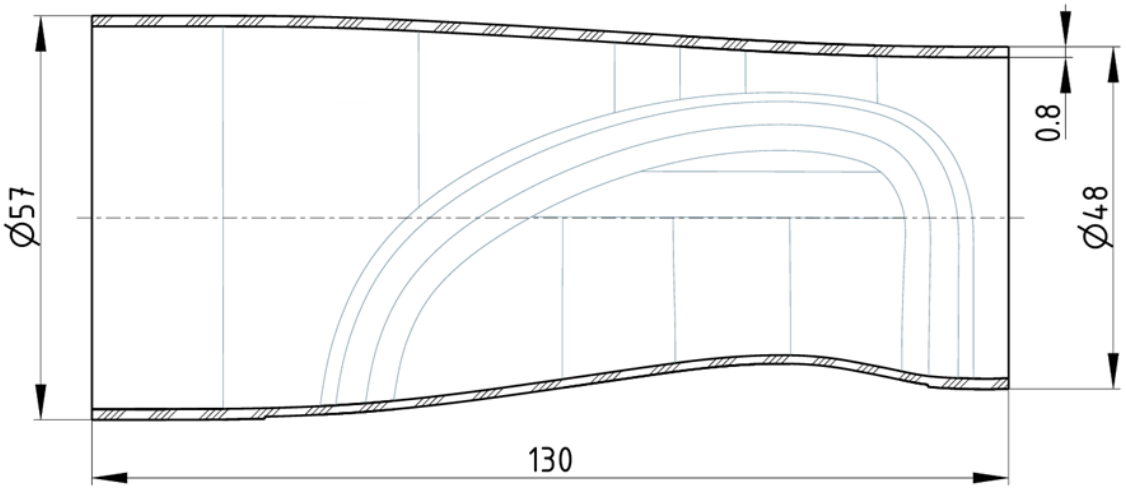
Diplomová práce vznikla ve spolupráci se společností Meopta – optika, s.r.o., sídlící v Přerově. Firma se zabývá výzkumem, vývojem a výrobou opticko-mechanických produktů, především pro průmyslové, vojenské a sportovní aplikace. Zájem vývojového oddělení firmy o rozšíření využití kompozitů na bázi uhlíkových vláken vedl ke vzniku tématu, které se zabývá mimoautoklávovou výrobou kompozitních dílů s využitím prepregů.

Náplní první poloviny této práce proto bude rešerše, jejíž cílem je vytvořit ucelený přehled možných technologií výroby kompozitů, zejména se zaměřením na mimoautoklávové metody produkce a jejich specifika. Druhá polovina práce se bude zabývat návrhem několika variant prototypové výroby zadané součásti (obr. 1), výrobou potřebných forem a dílu samotného. V závěru bude posouzena kvalita vyrobených dílů a zhodnoceny dosažené výsledky. Na základě toho bude doporučen vhodný výrobní postup a vytvořena technologická návodka.



Obr. 1 3D model zadané součásti.

Vyráběná součást je jedna ze základních komponent optického pozorovacího přístroje. Jejím účelem je vytvoření nosné základny pro montáž dalších komponentů, zároveň však plní funkci vnějšího, pohledového obalu přístroje. Jedná se o tenkostěnný, ergonomicky tvarovaný tubus, jež byl od počátku konstruován s úmyslem využití uhlíkového kompozitu při jeho výrobě. Základní geometrii a rozměry tubusu uvádí obr. 2.



Obr. 2 Základní rozměry tubusu.

2 KOMPOZITY

Kompozitní materiály neboli kompozity jsou moderní materiály, jež jsou typicky složeny ze dvou nebo více složek (fází). Tyto složky mají výrazně rozdílné mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Pevná, tuhá, tvrdá nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá se matrice. Kompozity jsou široce využívány v mnoha odvětvích, včetně automobilového průmyslu, leteckého a kosmického průmyslu, stavebnictví, zdravotnictví a sportovního vybavení (obr. 3). [1; 2]

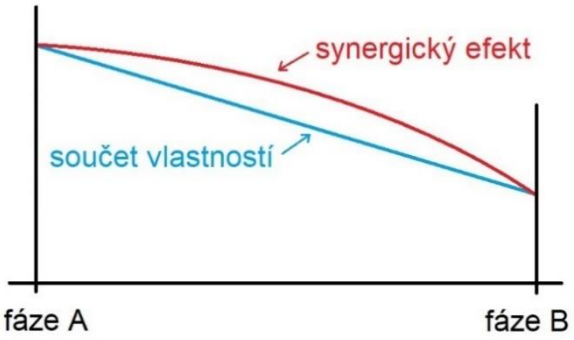
Obr. 3 Karbonový puškohled Kruger KC8 [3].

2.1 Mechanické vlastnosti kompozitů

Kompozitní materiály se svým pojetím a složením už z principu výrazně odlišují od běžně ve strojírenství používaných materiálů, což je především široká škála kovů a jejich slitin. Kovy se vyznačují poměrně dobrou homogenitou struktury a izotropií mechanických vlastností, kompozity jsou v těchto ohledech přímý opak, proto bude následující kapitola věnována specifickým vlastnostem kompozitů. [1; 4]

2.1.1 Synergismus

Velmi významnou vlastností kompozitů je tzv. synergismus. Podstata synergismu spočívá v součtu vlastností jednotlivých složek kompozitu. Díky tomu lze na základě volby komponent kompozitu jeho výsledné vlastnosti významně ovlivnit tak, aby odpovídal požadavkům pro danou aplikaci. Toto umožnuje vysokou variabilitu při designu a konstrukci vyráběných součástí, což je jedna z největších výhod kompozitních materiálů. Častým synergickým jevem je to, že mechanické vlastnosti jsou jiné (lepší), než by odpovídalo pouhému poměrnému součtu vlastností dílčích složek. Je výhodné, aby byl synergický efekt co možná nejvýraznější. Synergický efekt je zobrazen na obr. 4, kde je modrou čarou zobrazen průběh pouhého poměrného součtu dané vlastnosti matrice a výztuže, červená křivka zobrazuje skutečný průběh dané vlastnosti kompozitního materiálu. [1; 5]



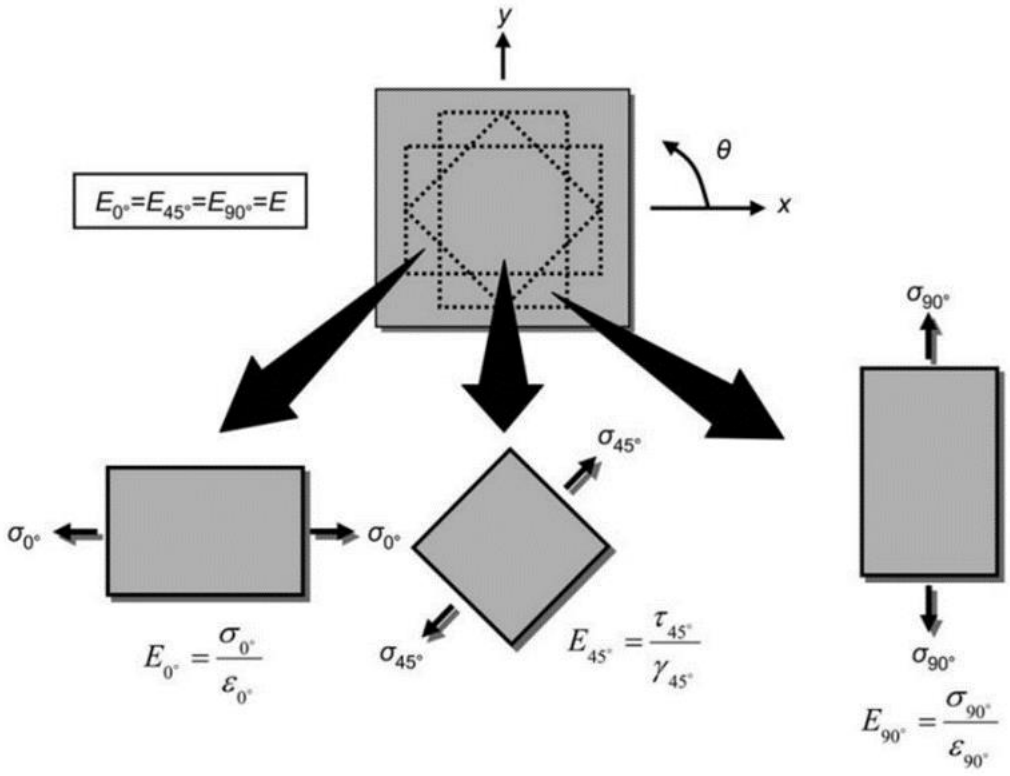
Obr. 4 Synergický efekt kompozitu [6].

2.1.2 Izotropie, anizotropie, ortotropie

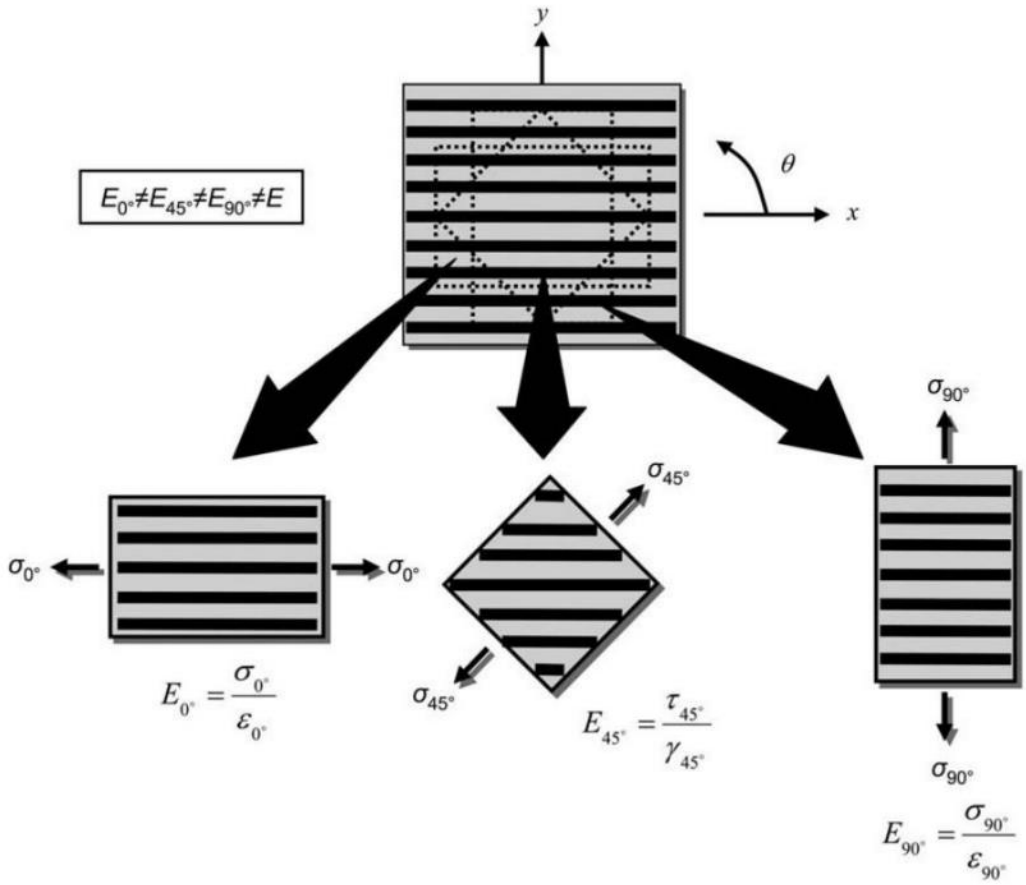
Většina běžně používaných konstrukčních materiálů, jako jsou např. oceli, hliníkové slitiny nebo polymery, se vyznačuje izotropním chováním. To znamená, že vlastnosti takového materiálu nezávisí na orientaci, poloze nebo směru a materiál tak vykazuje shodné vlastnosti ve všech směrech. Při normálovém zatížení izotropního materiálu vzniká pouze normálové napětí. Určitá míra anizotropie může vzniknout i u standartně izotropního materiálu, dobrým příkladem je např. jednosměrně válcovaná ocel. U kompozitů je anizotropie ale daleko výraznější. [1; 7]

Anizotropní chování kompozitů je způsobeno především přítomností dvou složek materiálu (vláken a matrice), z nichž každá má naprosto odlišné vlastnosti. Dominantním faktorem ovlivňujícím mechanické vlastnosti kompozitů je orientace výztužných vláken. Ve směru vláken jsou kompozity mnohem pevnější než kolmo na ně, proto je pro plné využití potenciálu kompozitního materiálu nutno uzpůsobit konstrukci součásti tak, aby směr vláken odpovídal směru zatížení. [1; 8]

Materiál je považován za izotropní, pokud jsou jeho vlastnosti nezávislé na orientaci. Na obr. 5 je znázorněn element izotropního materiálu, který je zatěžován pod úhly 0°, 45° a 90°. Ze znázornění vyplývá, že směr zatížení nemá vliv na výsledný modul pružnosti **E** tohoto izotropního materiálu. Oproti tomu je na obr. 6 znázorněn element anizotropního materiálu, který je totožně zatěžován pod úhly 0°, 45° a 90°. Z tohoto obrázku je patrné, že orientace materiálu má naprosto zásadní vliv na výsledný modul pružnosti v daném směru. Závislost na orientaci neplatí pouze pro modul pružnosti, ale také pro většinu ostatních materiálových vlastností, jako je např. pevnost v tahu, Poissonova konstanta nebo i koeficient teplotní roztažnosti. [9]

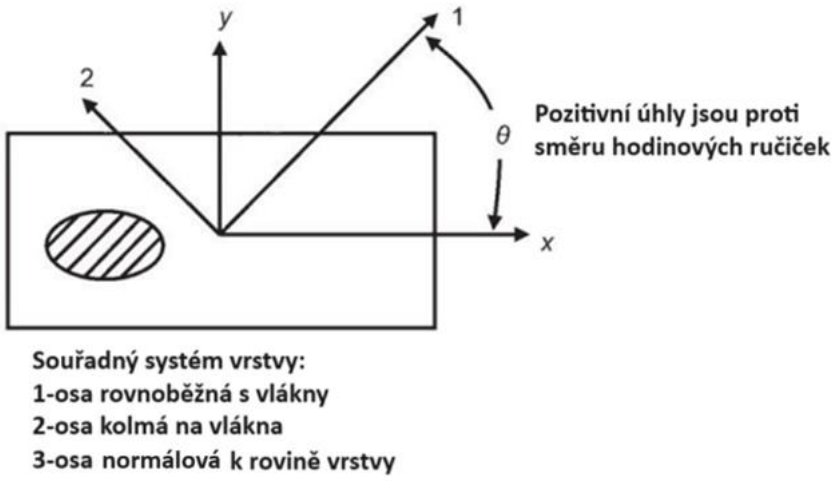


Obr. 5 Zatížený element izotropního materiálu, upraveno dle [9].



Obr. 6 Zatížený element anizotropního materiálu, upraveno dle [9].

V případě vrstvy jednosměrně vlákny vyztuženého kompozitu (označovaného jako lamina), je souřadnicový systém označen osami 1-2-3, viz obr. 7. Osa 1 je orientována jako rovnoběžná s vlákny (0°), osa 2 je orientována kolmo na vlákna (90°) a zároveň leží v rovině kompozitního panelu, osa 3 je pak definována jako normála k rovině panelu (tzn. i k ose 1 a 2). Tento souřadný systém je označen jako hlavní souřadný systém. [9; 10]

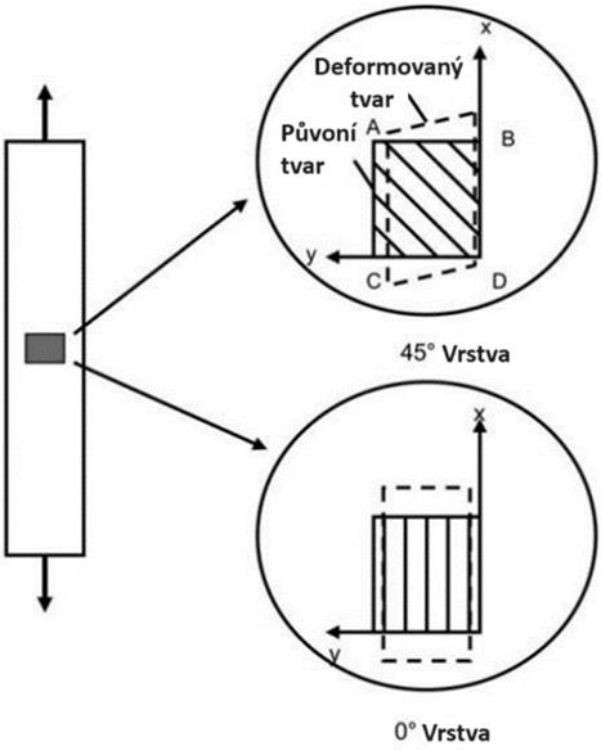


Obr. 7 Souřadný systém vrstvy, upraveno dle [9].

Je-li kompozitní panel zatížen rovnoběžně s vlákny (0° až 1°) modul pružnosti $\mathbf{E_{11}}$ se blíží hodnotě modulu pružnosti vlákna, pokud je panel zatížen kolmo na vlákna (2° až 90°), modul pružnosti $\mathbf{E_{22}}$ nabývá výrazně nižších hodnot a blíží se modulu pružnosti matrice. Poté tedy, když modul pružnosti $\mathbf{E_{11}} >> \mathbf{E_{22}}$ a mění se směrem v materiálu, je tento materiál anizotropní. [9; 10]

Kompozity patří do podtřídy anizotropních materiálů, které jsou označovány jako ortotropní. Vlastnosti ortotropních materiálů jsou rozdílné pro každý z třech vzájemně kolmých směrů. Tyto materiály obsahují tři vzájemně kolmé osy symetrie, přičemž zatížení materiálu ve směru s těmito osami produkuje pouze normálová napětí. Pokud je však materiál zatížen v jiném směru než rovnoběžném s osami, tak dochází ke vzniku normálového i smykového napětí. Z tohoto důvodu jsou mechanické vlastnosti ortotropních materiálu přímo závislé na orientaci materiálu a zatížení. [9; 10]

Pro názornost bude uvažován jednosměrný vláknový kompozit, jež má všechna vlákna orientována pod úhlem 45° k ose x. V malém izolovaném prvku čtvercového tvaru to znamená, že vlákna jsou rovnoběžná s úhlopříčkou AD a kolmá na úhlopříčku BC (obr. 8). Výsledkem je větší tuhost prvku podél úhlopříčky AD než BC. Po zatížení tahovým napětím se vzorek deformuje do tvaru rovnoběžníku, přičemž se uhlopříčka AD deformuje méně než úhlopříčka BC. Příčinou tohoto jevu je právě výše zmíněná rozdílná tuhost ve směru diagonál AD a BC. Vzniká tak smyková deformace $\boldsymbol{\gamma_{xy}}$ jako důsledek spojení rovinných deformací $\boldsymbol{\varepsilon_{xx}}$ a $\boldsymbol{\varepsilon_{yy}}$. [9]



Obr. 8 Vznik smykové deformace, upraveno dle [9].

Jsou-li vlákna vzorku orientována rovnoběžně se směrem aplikovaného napětí (0°), ke spojení $\boldsymbol{\varepsilon_{xx}}$ a $\boldsymbol{\varepsilon_{yy}}$ nedochází. Tahové napětí v tomto případě způsobí prodloužení ve směru x a zúžení ve směru y, deformovaný prvek však zůstává obdélníkový. Ke spojovacímu efektu, který vykazují kompozity, proto dochází pouze v případě, kdy jsou napětí a deformace vztaženy k vedlejšímu souřadnému systému materiálu. Pokud jsou vlákna orientována rovnoběžně (0°) nebo kolmo (90°) ke směru aplikovaného napětí, nazývá se tato lamina jako speciálně ortotropní vrstva ($\boldsymbol{\theta}$ = 0° nebo 90°). Lamina, která není takto orientována, je označována jako obecná ortotropní vrstva ($\boldsymbol{\theta} \neq$ 0° nebo 90°). [9]

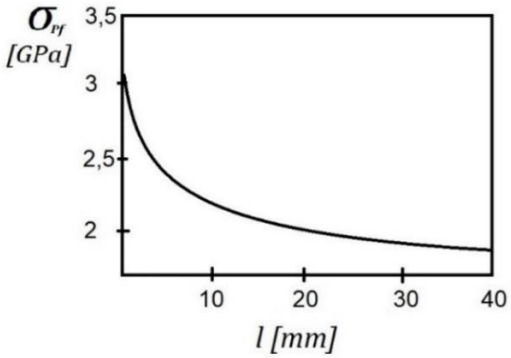
2.1.3 Paradoxy kompozitních materiálů

Paradox vláknité struktury

Materiál ve formě vlákna má výrazně vyšší pevnost než stejný materiál ve formě kompaktní. Tento jev je způsoben tím, že vlákno s menším průměrem má menší pravděpodobnost výskytu vad v materiálu, což přispívá k celkové vyšší pevnosti materiálu. Čím jsou vlákna tenčí, tím je vyšší jejich pevnost. Dalším faktorem při použití jemných vláken, který přispívá k celkově vyšší pevnosti je větší celková plocha povrchu vláken než při použití stejného objemu hrubších vláken. Pro vysokou pevnost je tedy vhodné používat co nejjemnější vlákna. [1; 11]

Paradox délky zatížení

S klesající délkou zatěžovaného vlákna roste jeho měrná pevnost σ_{Pf} (obr. 9). Tento jev způsobují stejné faktory jako v předchozím případě vlivu průměru vlákna. Opět zde hraje významnou roli výskyt vad v materiálu, které při prodlužování zatěžované oblasti mohou nabývat větších rozměrů a početnějších hodnot ve srovnání s menší zatěžovanou délkou. Při rovnoměrném rozložení vláken v matrici se tato délka blíží k nule. Tím se místní poruchy vláken projevují méně výrazně a pevnost jednotlivých vláken je efektivněji využita. [1; 11]



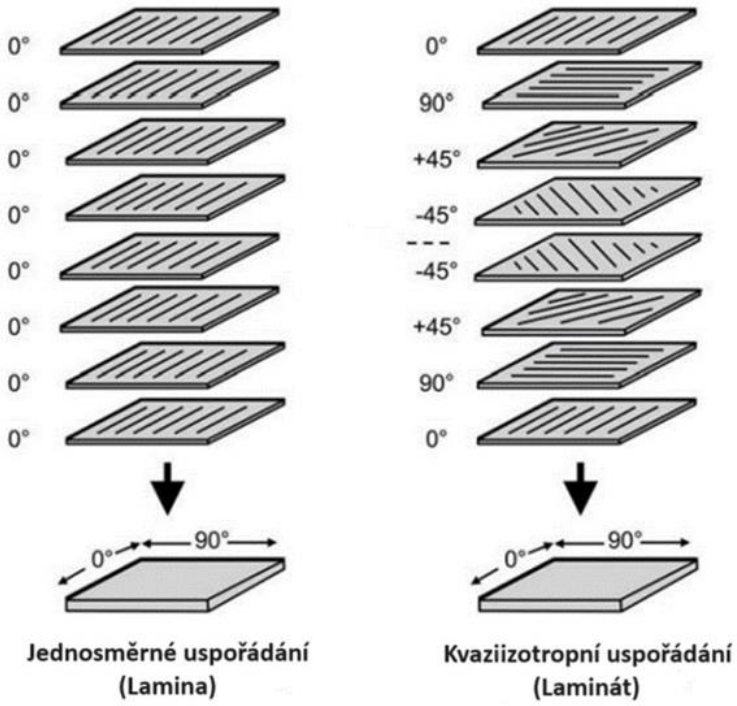
Obr. 9 Závislost meze pevnosti vlákna na jeho délce, upraveno dle [4].

Paradox kompozitního materiálu

Kompozit jako celek je schopen přenášet vyšší zatížení než jeho jednotlivé složky, zejména matrice. Tato vlastnost vychází z předchozích dvou paradoxů a také je dána synergickým efektem interakce mezi jednotlivými složkami. Výhodná je především schopnost matrice efektivně rozkládat zatížení mezi jednotlivá vlákna. Tento jev je zvláště patrný při zatížení tahem, kde matrice rovnoměrně distribuuje síly mezi vlákna. Nicméně tato vlastnost nemusí platit při zatížení tlakem, ohybem nebo smykem, kdy jednotlivé složky kompozitu nemohou efektivně převzít svůj podíl přenášeného zatížení kvůli porušení geometrického uspořádání výztuže v matrici. [1; 11]

2.2 Vrstvení

Jednotlivá vrstva nebo i celá kompozitní deska, ve které jsou všechny vrstvy uloženy se stejnou orientací vláken, se nazývá jako lamina. Pokud jsou jednotlivé vrstvy kompozitu orientovány pod různými úhly (v tomto případě kvaziizotropně), pak se toto uskupení nazývá jako laminát (obr. 10). Kompozity s nepřetržitými vlákny jsou obvykle laminované materiály, ve kterých jednotlivé vrstvy zlepšují únosnost primárně ve směru vláken. Jednosměrné laminy jsou extrémně pevné a tuhé ve směru 0°, naopak jsou velmi slabé ve směru 90°, jelikož v tomto směru musí být veškeré zatížení přenášeno nejčastěji polymerní matricí, jejíž pevnost je oproti vláknům daleko nižší. Zatímco některé typy vysoce pevných vláken mohou dosahovat pevnosti v tahu i přes 3500 MPa, pevnost v tahu běžné polymerní matrice standartně nabývá hodnoty od 35 do 70 MPa. [9]



Obr. 10 Jednosměrné a kvaziizotropní uspořádání, upraveno dle [9].

Podélná tahová a tlaková zatížení jsou přenášena převážně vlákny. Matrice rozkládá zatížení mezi vlákna, stabilizuje je, zabraňuje jejich vybočení a vyboulení při tlakovém zatížení. Matrice je také primárním nositelem zatížení v interlaminárním smyku (smyku mezi vrstvami) a příčném tahu (90°). Úloha vláken, matrice a jejich vliv na mechanické vlastnosti jsou shrnuty v tab. 1. [9]

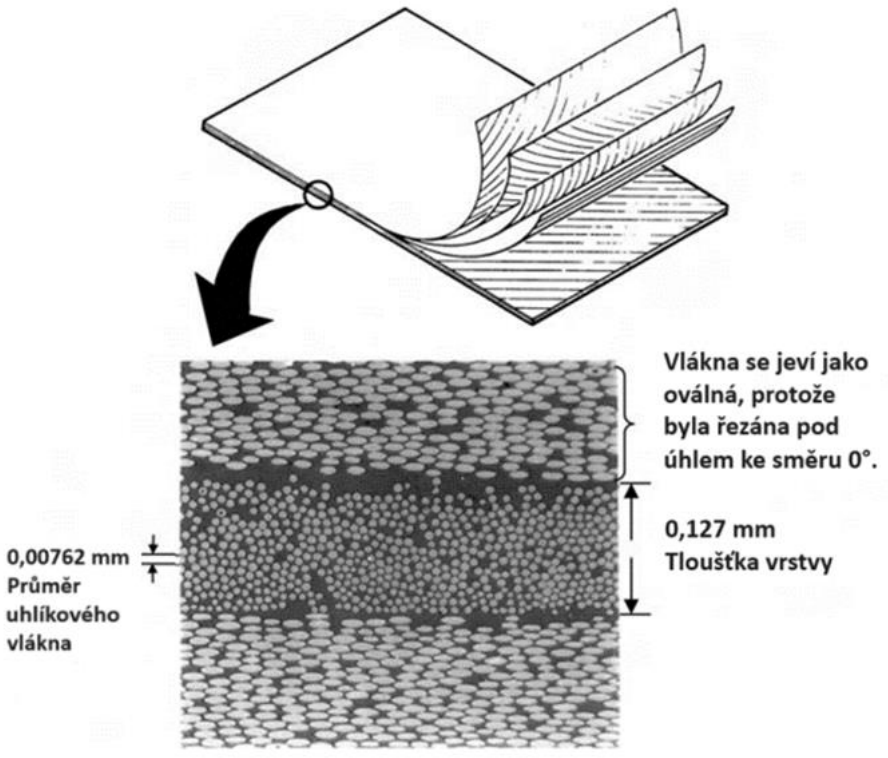
Tab. 1 Vliv vláken a matrice na mechanické vlastnosti, upraveno dle [9].

Mechanické vlastnosti	**Dominantní složka kompozitu**	
	Vlákno	**Matrice**
Lamina		
0° tah	✓	…
0° tlak	✓	✓
Smyk	…	✓
90° tah	…	✓
Laminát		
Tah	✓	…
Tlak	✓	✓
Smyk	✓	✓
Mezilaminární smyk	…	✓

Existuje více způsobů, jak označit pořadí a orientaci jednotlivých vrstev laminátu. Všechny jsou ale založeny na podobném principu. Nejprve je nutné definovat nulový směr vláken (0°). Jakmile je definován směr vláken 0° a tím i osa x, musí být vrstvám, které nejsou orientovány ve směru 0°, přiřazen úhel jejich natočení **θ** vůči ose x. Otáčení ve směru hodinových ručiček znamená kladný úhel a otáčení proti směru hodinových ručiček značí záporný úhel. [12]

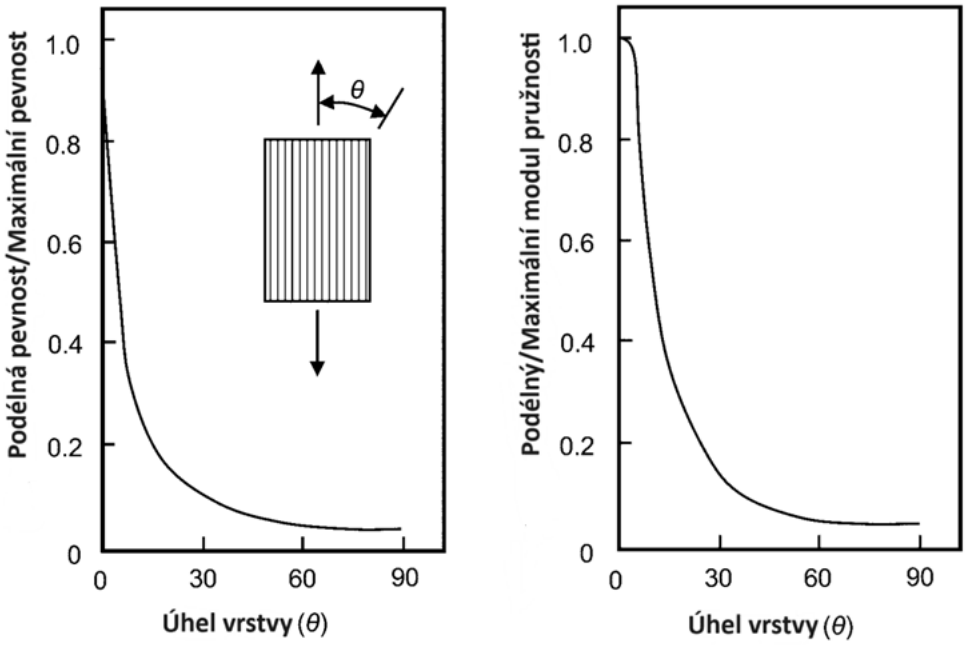
Standartně se značí lamináty od vnější (nejvzdálenější vrstvy), kdy se do hranatých závorek vypisují úhly jednotlivých vrstev oddělené čárkou. V případě symetrické skladby se zapisují pouze úhly vrstev po rovinu symetrie a za závorku s uvedenými úhly je uvedeno písmeno „S“, které znamená „symetrickou“ skladbu. Pokud se jedná o nesymetrickou skladbu, tak se vypisují úhly všech vrstev a za závorkou se pak často uvádí „T“ (total). V pravé části obr. 10 je znázorněna skladba [0, +90, +45, -45, -45, +45, +90, 0]T, jedná se o symetrickou skladbu, tudíž je možné zjednodušit zápis na [0, +90, +45, -45]S. V levé části obr. 8 je znázorněna jednosměrná skladba [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]T, což lze zjednodušit na [0_8]T nebo [0_4]S. [12]

Protože orientace vláken přímo ovlivňuje mechanické vlastnosti, zdá se logické orientovat co nejvíce vrstev v hlavním směru přenášení zatížení. Ačkoli tento přístup může u některých konstrukcí fungovat, obvykle je nutné vyvážit schopnost materiálu nést zatížení v několika různých směrech, jako je např. 0°, +45°, -45° a 90°. Obr. 11 ukazuje mikrofotografii řezu křížem vrstveného kontinuálního laminátu z uhlíkových vláken a epoxidu. Vyvážený laminát se stejným počtem vrstev ve směru hodinových ručiček 0°, +45° a -45° a 90° se nazývá kvaziizotropní laminát, protože přenáší stejná zatížení ve všech čtyřech směrech. [9]



Obr. 11 Řez do kříže vrstveným kompozitem, upraveno dle [9].

Obr.12 zobrazuje vliv orientace vláken na pevnost a tuhost kompozitu. Když zatížení působí rovnoběžně s vlákny (0°), je vrstva mnohem pevnější a tužší, než když zatížení působí ve směru kolmém na vlákna (90°). Lze pozorovat dramatický pokles pevnosti a tuhosti, který vyplývá z pouhých několika stupňů nesouososti se směrem 0°. [9]



Obr. 12 Vliv orientace vláken na pevnost a tuhost kompozitu, upraveno dle [9].

2.3 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze klasifikovat na základě různých hledisek. Nejčastěji se však jedná o rozdělení podle tvaru (obr. 13), materiálu výztužné fáze a druhu matrice. [5; 13]

Dělení kompozitů dle geometrie výztužné fáze [5; 13]:

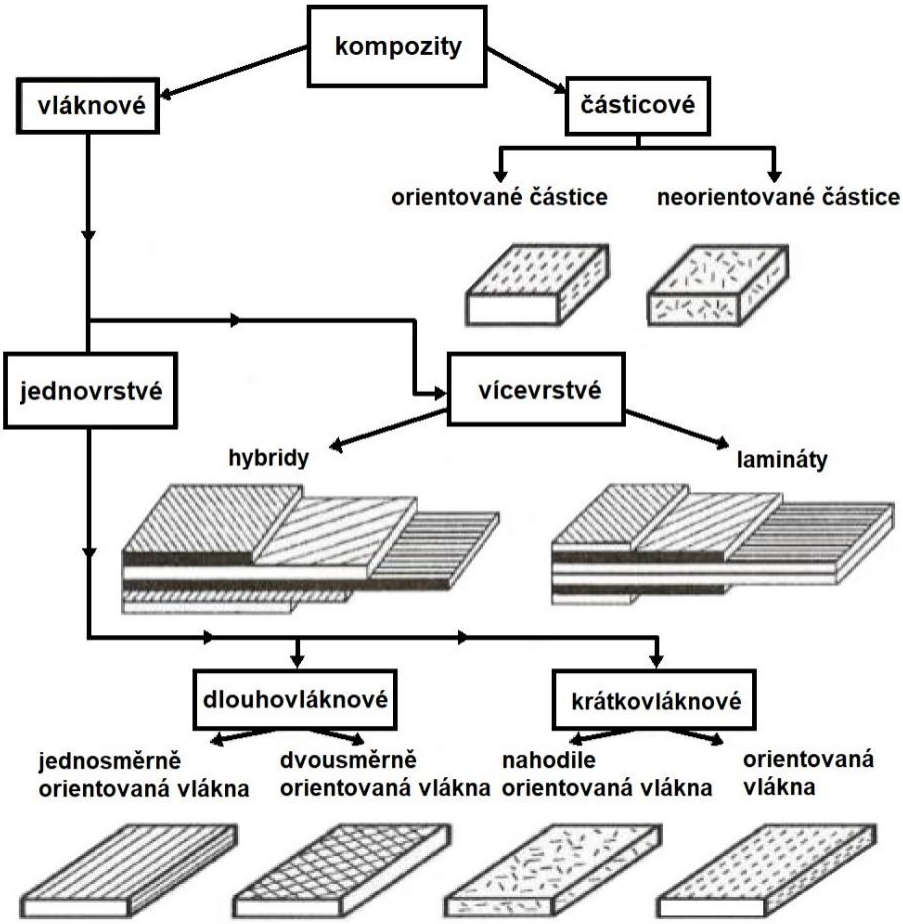
- vláknové,
- částicové.

Dělení kompozitů dle druhu výztužné fáze [5; 13]:

- se skleněnou výztuží,
- s uhlíkovou výztuží,
- s keramickou výztuží,
- s kovovou výztuží,
- s polymerní výztuží,
- s organickou výztuží.

Dělení kompozitů dle druhu matrice [5; 13]:

- s polymerní matricí,
- s keramickou matricí,
- s kovovou matricí.



Obr. 13 Rozdělení kompozitů podle tvaru výztužné fáze [14].

Kompozity s výztužnými vlákny

Úloha vláken, coby výztuže v kompozitním materiálu, spočívá především v zajištění mechanických vlastností, jako je pevnost a tuhost. Vláknový kompozit je charakterizován tím, že délka jeho výztuže výrazně převažuje nad průměrem. Tento fakt však vede k anizotropii, což znamená, že materiál má různé mechanické vlastnosti v různých směrech. Kvůli tomuto jevu a také díky tomu, že nelze kombinovat vlákna a matrice s libovolnými mechanickými vlastnostmi, je důležité dodržovat specifické zásady [11; 15]:

- vlákna výztuže musí mít vyšší mez pevnosti v tahu než matrice,
- vlákna výztuže musí mít vyšší modul pružnosti v tahu než matrice,
- matrice musí mít větší mezní prodloužení než výztuž (nesmí se porušit dřív než výztuž).

Pro výrobu kompozitních dílů jsou ve velké míře používány metody výroby, které jsou založeny na využití různých typů dlouhovláknových výztuží ve formě tkanin, rohoží, příze. Zajímavou alternativou pro výrobu určitého typu dílů může být využití kompozitů s krátkovláknovou výztuží, příkladem může být tzv. Forged carbon. Tato technologie byla vyvinuta společností Lamborghini ve spolupráci se společnostmi Boeing a Callaway golf company. První zveřejnění tohoto materiálu se uskutečnilo při představení vozu Lamborghini Sesto Elemento na autosalonu v Paříži v roce 2010. [16; 17; 18]

Proces výroby Forged carbonu začíná nasycením nasekaných karbonových vláken pryskyřičnou matricí. Takto připravený materiál je následně vložen do formy, kde je za působení vysokého tlaku a teploty lisován do požadovaného tvaru. Výsledkem je lehký vysokopevnostní materiál. Tato technologie má oproti klasickým způsobům výroby hned několik výhod. Náhodnou orientací výztužných vláken vzniká homogennější struktura, která vykazuje menší anizotropii. Výrobní proces je rychlý, umožňuje automatizaci, z čehož vyplývá poměrně vysoká produktivita. Nezanedbatelnou vlastností takto vyrobených dílů je naprosto jedinečný vzhled (obr. 14), který má u pohledových dílů významný vliv na konečnou atraktivitu produktu. [16; 17; 18]

Obr. 14 Přítlačné křídlo vyrobené technologií Forged carbon [19].

Kompozity s výztužnými částicemi

Jako částicové kompozity lze označit všechny materiály, jejichž struktura je tvořena matricí zpevněnou drobnými částicemi. Tyto částice jsou rozmístěny v matrici a nevytvářejí vlastní strukturu. Hrají klíčovou roli v omezení plastických deformací v materiálu matrice a také se podílejí na přenosu zatížení, avšak v menší míře než vlákna. Vzhledem k zadání práce se následující části práce budou zabývat především kompozity vláknovými. [14]

2.4 Výztužná vlákna

Výztužná vlákna jsou základním prvkem pro výrobu kompozitních materiálů. Mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti výsledného kompozitu, tvorbu nosné struktury a přenos zatížení. Současný trh nabízí poměrně širokou škálu typů vláken, dále proto budou uvedeny pouze ty nejběžnější a nejpoužívanější, jako jsou polymerní, skelná a uhlíková vlákna. Mechanické vlastnosti zmíněných i dalších materiálů jsou porovnány v tab. 2. [11; 20]

Tab. 2 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [4].

	E_t	σ_{Pt}	ρ	σ_{Pt} / ρ	$\varepsilon_{f,krit}$
	GPa	**MPa**	**10^3 kgm^{-3}**	**MPa / kgm^{-3}**	**%**
Sklo – E	72,4	3500	2,54	1,38	2,5
Sklo – S	85,5	4600	2,48	1,85	2,5
Grafit – E	390	2100	1,9	1,1	0,7
Grafit – S	240	2500	1,9	1,3	0,7
Bor	385	2800	2,63	1,1	0,8
Wolfram	414	4200	19,3	0,22	-
Aramid Kevlar 49	130	2800	1,5	1,87	2,5
Azbest	160	3100	2,56	1,21	1,9
SiC	250	2200	2,6	0,85	0,9
Polyethylen – PE	172	3000	0,97	3,09	1,7
Ocel	210	340–2500	7,8	0,044–0,321	-

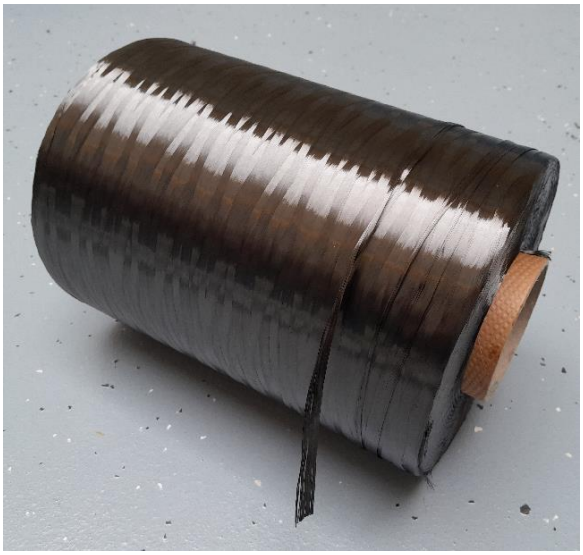
Kde E_t je modul pružnosti v tahu, σ_{Pt} je pevnost v tahu, ρ je hustota, σ_{Pt} / ρ je měrná pevnost, $\varepsilon_{f,krit}$ je tažnost.

Jednotlivá vlákna jsou samostatně téměř nepoužitelná, proto se nejčastěji používají ve formě předpřipravených polotovarů, jako jsou [11]:

- tkanina (obr. 15) s různými typy vazeb (obr. 16),
- příze – pramenec (obr. 17,18),
- netkaná rohož.

Obr. 15 Tkanina z uhlíkových vláken v keprové vazbě [21].

Obr. 16 Nejběžnější druhy vazeb vyztužujících tkanin [11].



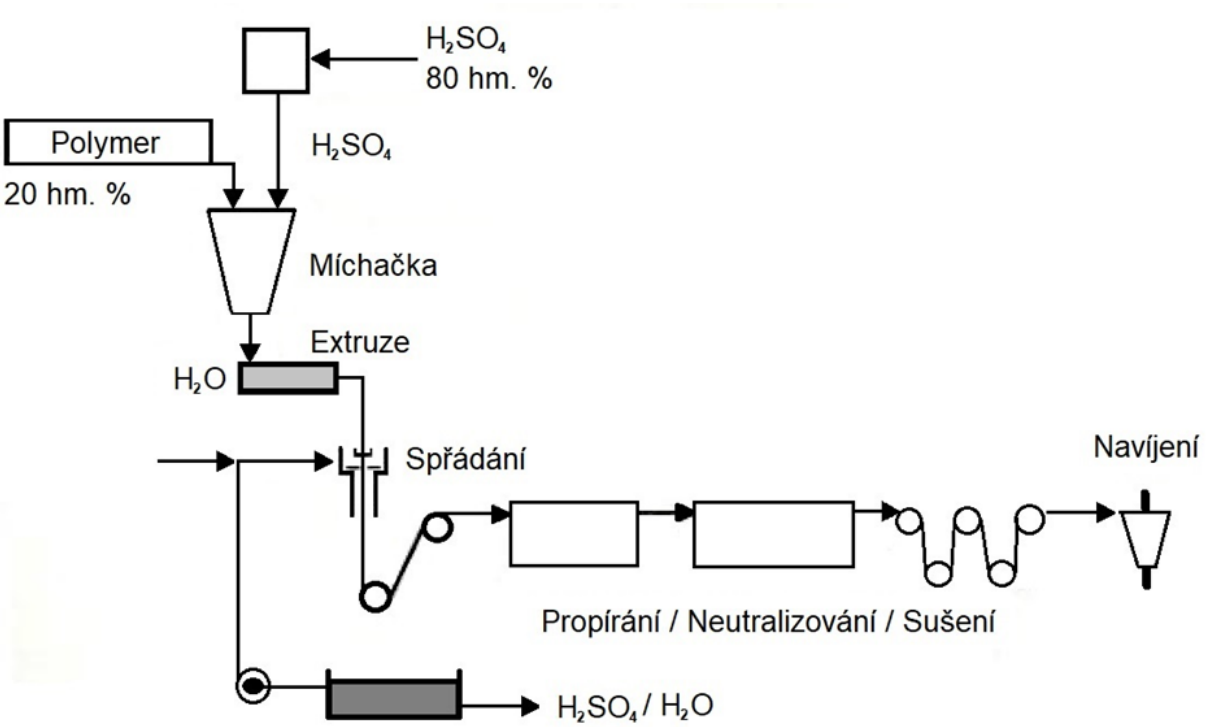
Obr. 17 Příze uhlíkových vláken.

Obr. 18 Příze aramidových vláken.

2.4.1 Polymerní vlákna

Pravděpodobně nejznámějším vláknem z této skupiny je aramidové vlákno vyvinuté společností DuPont v roce 1965, které je známé pod obchodním názvem Kevlar, nebo také Nomex v případě ohnivzdorného provedení. Jedná se o organické vlákno s vysokou pevností a nízkou měrnou hmotností. Detailní chemické složení nebylo nikdy zveřejněno a je předmětem výrobního tajemství společnosti DuPont. Při výrobě (obr. 19) se polymer nejprve rozpouští v 20% roztoku kyseliny sírové. Poté je roztok propouštěn kapilárami, kde se tyčinkovité částice uspořádávají do delších formací ve směru os budoucích vláken. Roztok je následně vytlačen skrz kapiláry do ledové vodní lázně, kde dochází k vymytí kyseliny a neutralizaci. Na závěr jsou vlákna vysušena a navinuta na cívky. [1; 11; 20]

Aramidová vlákna vykazují díky polárním skupinám N-H a C=O hydroskopické vlastnosti, to však nemá vliv na jejich mechanické kvality. Aramidová vlákna jsou také citlivá na ultrafialové záření, které již negativně jejich strukturu a pevnost ovlivňuje. Pokud jsou ale aramidová vlákna použita v kompozitech, mohou být chráněna proti účinkům UV záření pomocí matrice. Kevlarová vlákna jsou známá svou vynikající odolností proti abrazi, díky tomu nevyžadují žádnou dodatečnou povrchovou úpravu. Naopak je důležité provést úpravu vláken pro zlepšení mezifázové adheze. Tuto úpravu lze provést chemickou cestou nebo pomocí plazmatu. [4; 9]



Obr. 19 Schéma výroby aramidových vláken [11].

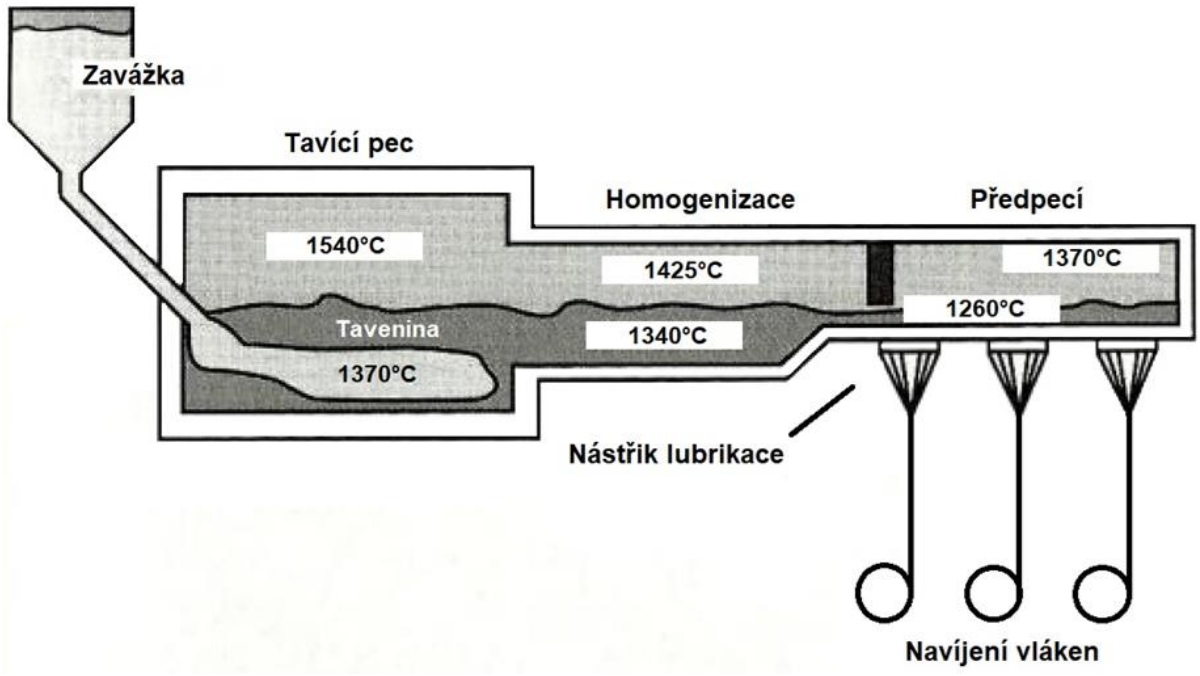
Tkaniny z aramidových vláken jsou často využívány pro výrobu ochranných oděvů. Kevlar je již běžně součástí lesnických protiprořezových obleků a motocyklového textilního oblečení. Jeho ohnivzdorná varianta Nomex pak nabízí ochranu proti žáru coby součást kombinéz pro hasiče a také motorsport. Kompozity s aramidovými vlákny jsou využívány jako výztuže balistických vest, přileb, dále slouží k výrobě tlakových nádob, částí karoserie, nebo jako součást sportovního vybavení. Upravené varianty materiálů Kevlar 29 a 49 nacházejí uplatnění taktéž v aerospace průmyslu. [20; 22; 23]

2.4.2 Skelná vlákna

Mezi tradiční a stále široce využívaná výztužná vlákna patří vlákna skelná, která vychází ze silikátového základu SiO_2. Tato vlákna jsou vyráběna tažením taveniny směsi oxidů Si, často s příměsí oxidů Al, Ca, Mg, Pb a B a obvykle obsahují i malé množství oxidů alkalických kovů Na a K. Pro dosažení požadovaného průměru vláken se využívá postupu dloužení taveniny skla. Tavenina během tohoto postupu protéká přes platinorhodiové trysky obvykle s průměrem otvoru 1 až 2 mm, které jsou umístěny na dně zvlákňovací hlavy. Konkrétní průměry vláken jsou určeny rozdílem mezi rychlostí výtoku skloviny z trysek a rychlostí odtahu vláken. Následně jsou vlákna ochlazena a pokryta ochrannou vrstvou, která zabraňuje okysličení a také zvyšuje přilnavost a smáčivost organickými matricemi. Po provední povrchové úpravě se jednotlivá vlákna spojují do pramene a jsou navíjena na cívku, celý proces výroby je znázorněn na obr. 20. [1; 4; 9; 11]

Skelná vlákna jsou nejčastěji dostupná ve třech základních variantách [4; 9]:

- typ S (Strenght – vysoká pevnost),
- typ E (Electric – elektroizolační vlastnosti),
- typ C (Corrosion – odolnost vůči chemikáliím).



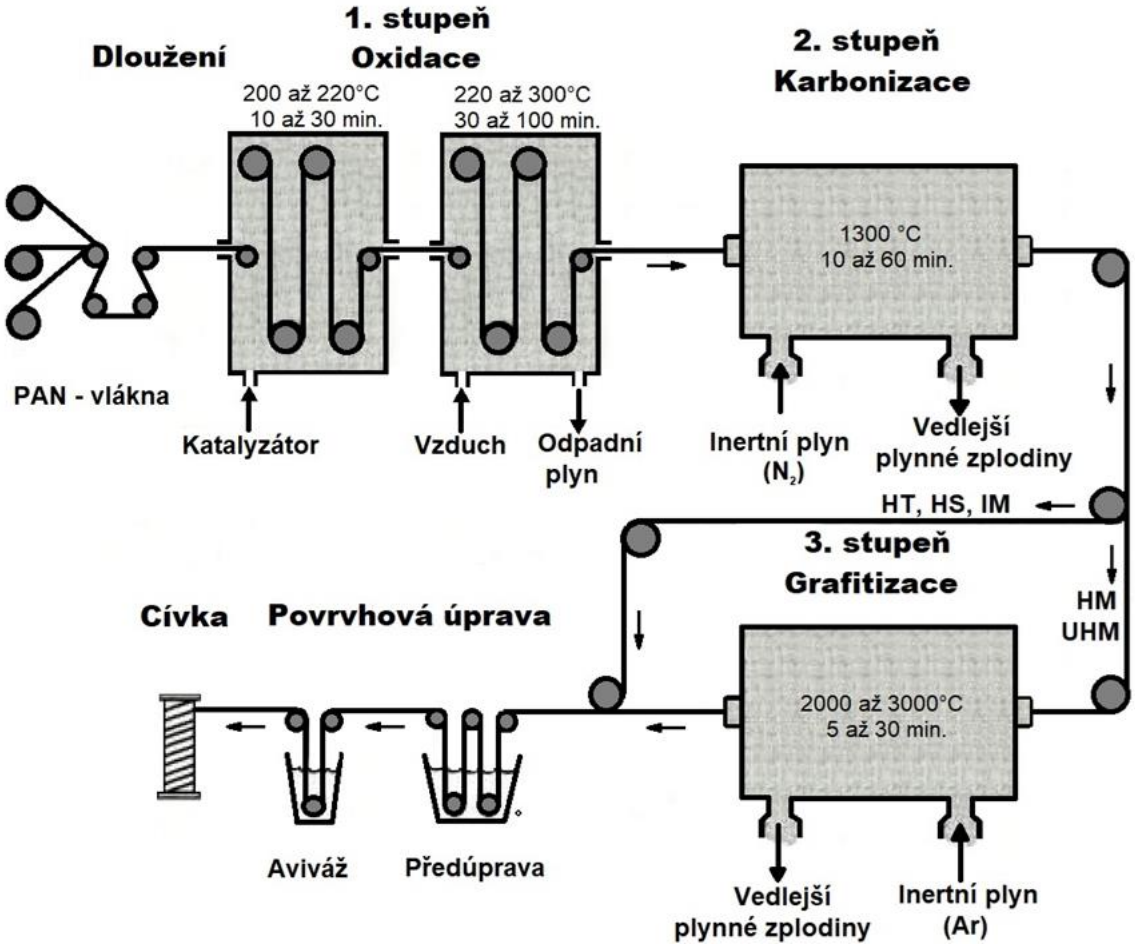
Obr. 20 Schéma výroby skelných vláken [11].

V současné době jsou samotná skelná vlákna hojně využívána v mnoha odvětvích, například ve stavebnictví, kde ve formě skelné vaty plní funkci tepelné, elektrické nebo akustické izolace. Kompozity na bázi skelných vláken (sklolaminát) jsou využívány například jako části karoserie silničních vozidel, opláštění vlaků, letadel, příp. krytování pracovních strojů. [20; 24]

2.4.3 Uhlíková vlákna

Především díky široké škále vynikajících mechanických vlastností dominují uhlíková vlákna coby výztuž v současných kompozitech. Tato vlákna vykazují vysokou pevnost, modul pružnosti, teplotní odolnost a vysokou únavovou pevnost při zachování nízké měrné hmotnosti. Jejich křehkost však způsobuje poměrně nízkou odolnost proti nárazu. Uhlíková vlákna jsou tvořena krystalickým uhlíkem, podle jeho obsahu se dělí na karbonová s přibližně 95 % C a na grafitová s více než 99 % C. Průměr jednotlivých uhlíkových vláken se typicky pohybuje mezi 5 a 10 mikrometry. V tomto odvětví, stejně jako v jiných průmyslových oblastech, existuje mnoho různých marketingových označení, která mohou značně komplikovat terminologii tohoto rozdělení. [1; 11; 20]

Uhlíková vlákna jsou vyráběna dvěma hlavními procesy, a to jsou PAN (obr. 21) a Pitch (smola), přičemž rozdíl spočívá především ve vstupní surovině. Při běžnějším PAN procesu jsou vlákna vytvořena pyrolýzou polyakrylonitrilových vláken. Ta jsou nejprve zahřívána a protahována, aby byla dosažena požadovaná orientace molekul. Následuje stabilizace v okysličující atmosféře při teplotě 220 až 300 °C, poté probíhá karbonizace v inertní atmosféře při teplotě 1000 až 1500 °C s dodatečným protahováním. Výsledná karbonová vlákna mají velmi velkou pevnost, proto se nazývají vysokopevnostní a označují se HS (High Strength). Dalším krokem procesu výroby může být grafitizace vláken v inertní atmosféře při teplotách 2000 až 3000 °C pod napětím. Takto získaná grafitová vlákna se díky zhrublému zrnu vyznačují nižší pevností, mají však vyšší modul pružnosti v tahu, proto se nazývají vysokomodulová a bývají označována HM (High Modulus). [1; 4; 9]



Obr. 21 Schéma výroby uhlíkových vláken PAN procesem [11].

Od doby prvního nasazení uhlíkových vláken v aerospace průmyslu uplynulo již mnoho let, dnes tento materiál nachází široké využití v mnoha dalších odvětvích. Často lze narazit na uhlíková vlákna v automobilovém průmyslu, stejně tak ve vrcholových sportovních produktech, jako jsou například rámy jízdních kol, závodní lodě, hokejky, rybářské pruty atd. [5; 20]

2.5 Matrice

Další, neméně důležitou (klíčovou) složkou kompozitních materiálů jsou matrice. Matrice jsou pojiva, jejichž hlavní funkcí je spojení výztuže do požadovaného celku, dále přenos a rovnoměrné rozložení zatížení na všechna vlákna a také ochrana výztužných vláken před vnějšími vlivy, jako je oxidace, koroze, UV záření a mechanické poškození. Matrice má zásadní vliv na celkové parametry kompozitu, včetně jeho mechanických (například šíření trhlin a únava), elektrických, tepelných a chemických vlastností. [1; 4; 11]

Polymerní matrice

Nejpoužívanějším druhem matric, zejména pro kompozitní materiály s kontinuálními vlákny, jsou organické polymerní matrice. Ty se dále dělí do skupin, typicky na termosetické a termoplastické. Termosety zůstávají v pevném stavu i po ohřátí, díky tomu jsou odolnější vůči creepu (tečení pod zatížením) a vyšším teplotám. Při vytvrzování termosetu (reaktoplastu) dochází k vytvoření trvalé prostorové polymerní sítě. V konstrukčních aplikacích kompozitů s vláknovou výztuží termosety dominují. Mezi nejčastěji používané typy termosetů patří

epoxidové pryskyřice, nenasycené polyestery, fenolové pryskyřice, polyimidy a vinylestery. Možnosti pro recyklaci termosetů jsou velmi omezené, proto neustále roste tlak po jejich nahrazení termoplasty. Mechanické vlastnosti vybraných termosetů uvádí v tab. 3. [4; 25]

Tab. 3 Mechanické vlastnosti vybraných termosetů [4].

	ρ	E_t	σ_{Pt}	$\varepsilon_{m,krit}$
	10^3 kgm^{-3}	GPa	MPa	%
Epoxidové pryskyřice	1,1–1,4	2,1–6,0	35–90	1–10
Polyestery	1,1–1,5	1,3–4,5	45–85	1–5
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50–60	1–3
Polyimidy (až do teploty 350 °C)	1,2–1,9	3,0–3,1	80–190	2–40

Termoplasty jsou po vytvrzení stejně tak jako termosety tuhé látky, situace se ale výrazně mění při zvýšení teploty nad určitou kritickou hodnotu, kdy začínají měknout a téct. Po zpětném ochlazení tuhnou. Jejich strukturu charakterizují dlouhé lineární molekuly, které jsou tvořeny opakováním stejných stavebních jednotek. Nevýhodou termoplastů je jejich vysoká viskozita během zpracování, která je o 2 až 4 řády vyšší než u termosetů, což může vést k vzniku defektů, jako jsou bubliny, nesmočená vlákna a další. Tento problém lze částečně řešit použitím vláken předimpregnovaných termoplastem, avšak na úkor zvýšených nákladů. Výhodou termoplastů je vysoká tažnost. Termoplastické matrice jsou dominantní v oblasti částicových kompozitů a plněných plastů. Mezi nejčastěji používané termoplastické matrice patří polypropyleny a polyamidy. Mechanické vlastnosti vybraných termoplastů jsou uvedeny v tab. 4. [4; 25; 26]

Tab. 4 Mechanické vlastnosti vybraných termoplastů [4].

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

Kovové matrice

Předností kovových matic oproti polymerním je především jejich teplotní odolnost, tepelná a elektrická vodivost, zásadní jsou také mechanické vlastnosti jako je pevnost, tuhost a únavová odolnost. Kovové matrice se nejčastěji používají ve spojení s kovovou nebo keramickou výztuží, jak ve formě vláken, tak ve formě částic. Vhodné spojení matrice a výztuže posiluje výše zmíněné vlastnosti. Nejčastější materiály, využívající se jako matrice, jsou slitiny hliníku, hořčíku, titanu, kobaltu a niklu. [1; 13; 27]

Keramické matrice

Mezi výhody keramických matric oproti matricím polymerním a kovovým patří zejména dobrá chemická odolnost, žáruvzdornost, tvrdost, a odolnost vůči creepu. Naopak nevýhodou je výrazná křehkost a obtížná obrobitelnost. Keramické matrice nevedou elektřinu, mohou tak zároveň plnit funkci izolace. Základ keramických matric zpravidla tvoří Al_2O_3 nebo ZrO_2. Pro kombinaci s keramickými matricemi se jako výztuž často využívají uhlíková vlákna různých délek, keramická vlákna SiC, Si_3N_4 nebo B_4C. Funkci plniva mohou podobné materiály zastat i ve formě prášku. [1; 13; 26]

2.6 Výroba kompozitů

V dnešní době je k dispozici široká škála technologií pro výrobu kompozitů. Další část práce proto bude věnována přehledu nejrozšířenějších metod a postupů výroby kompozitních dílů pro různé aplikace. Bude zmíněna metoda mokrého kladení, kladení prepregů, navíjení, různé varianty infuze a nakonec pultruze.

2.6.1 Mokré kladení

Mokré ruční kladení je jeden z nejstarších a nejjednodušších způsobů výroby kompozitů. Tato metoda nevyžaduje složité nákladné vybavení a umožňuje výrobu dílů o libovolně velkých rozměrech. Nezbytným vybavením pro výrobu požadovaného dílu je forma, v případě mokrého kladení bývá většinou jednodílná. Pro snazší vyjmutí hotového dílu z formy je před začátkem kladení potřeba formu ošetřit separátorem. Samotný proces kladení začíná nanesením vrstvy pryskyřice, jedná se o takzvaný gelcoat. Jeho úkolem je pokrýt celý povrch formy jednolitou vrstvou, která bude na hotovém dílu chránit vlákna před poškozením. Zároveň bude společně s první vrstvou výztuže (nejčastěji tkaniny) plnit estetickou funkci, z tohoto důvodu gelcoat často obsahuje různá barviva a plniva. Poté se pokračuje aplikací vrstev výztuže, které jsou následně prosyceny pryskyřicí pomocí štětce, válečku, nebo stříkací pistole (obr. 22). Tento postup se opakuje, dokud není dosaženo požadované skladby vrstev. Důležité je zajistit rovnoměrné prosycení tkaniny a pokud možno minimalizovat tvorbu vzduchových bublin. Množství vzduchu lze omezit pomocí vakuového pytle. Doba a způsob vytvrzení se odvíjí od druhu použitého materiálu (pryskyřice), může probíhat za pokojové teploty, nebo v peci. Na kvalitu výsledného dílu mají naprosto zásadní vliv zkušenosti a preciznost pracovníků během výroby. [1; 11; 28; 29]

Obr. 22 Schéma metody mokrého kladení, upraveno dle [30].

2.6.2 Kladení prepregů

Tento způsob výroby využívá předpřipravené materiály (prefabrikáty), nazývané prepregy. Prepreg je předpřipravená výztuž, která již obsahuje adekvátní množství matrice, obvykle termosetické pryskyřice. Při výrobě prepregů se výztuž strojově prosytí matricí (pryskyřicí), dojde k částečnému vytvrzení pryskyřice (tzv. B-stage), následně je pro zpomalení vytvrzovací reakce pryskyřice takto připravený prepreg zmrazen a uchováván v chladu (až -20 °C). [20; 30]

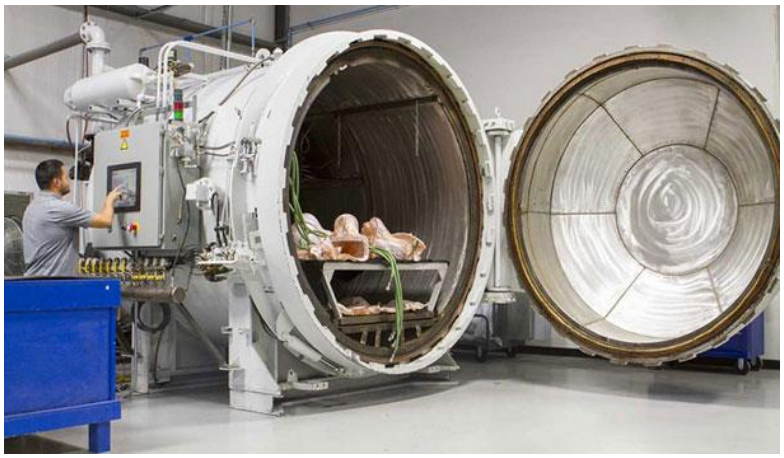
Prepregy slouží jako základní stavební prvek pro výrobu vysoce výkonných kompozitních konstrukcí v kosmickém, leteckém, automobilovém, sportovním a energetickém průmyslu, kde je nejvyšší prioritou nízká hmotnost a mechanické vlastnosti výsledného dílu. Pro tyto účely bývají nejčastěji používána uhlíková a aramidová vlákna v kombinaci s epoxidovými pryskyřicemi. [31; 32]

Na počátku procesu výroby kompozitu s využitím prepregů je nejprve zapotřebí důkladně připravit formu. Příprava formy spočívá v jejím očistění, vyleštění a nanesení separačního prostředku, který usnadňuje vyjmutí dílu z formy. Následně jsou podle nářezového plánu připraveny jednotlivé pláty prepregu. V případě velkého množství kusů a dobré technické vybavenosti výrobního zázemí se tak děje na specializovaném řezacím plotru, jinak lze prepregy řezat ručně za použití např. odlamovacího nože. Poté jsou do formy podle předem určené skladby laminátu pokládány předpřipravené orientované prepregy (obr. 23). Po položení požadovaného počtu vrstev se na vrchní vrstvu dílu nejčastěji pokládá vrstva tenké separační folie, na ni vrstva netkané textilie, která umožňuje rovnoměrný odvod vzduchu při jeho odsávání. Tento celek je zabalen do vakuového pytle s hrdlem pro připojení vývěvy, jíž je z pytle odsát vzduch. Následuje vytvrzení dílu v autoklávu, dle předepsaného vytvrzovacího cyklu. [33; 34]

Obr. 23 Ruční kladení prepregu [35].

Většinu dnes dostupných prepregů je nutno pro dosažení odpovídající kvality vyráběného dílu vytvrzovat v autoklávu (obr. 24). Autokláv je vyhřívaná tlaková nádoba, která umožňuje odsátí vzduchu z vakuového pytle pomocí vývěvy a zároveň vytvoření přetlaku v nádobě obvykle okolo 6 až 8 bar. Společným účinkem těchto dvou faktorů dojde ke stlačení vrstev prepregu a po zvýšení teploty v autoklávu začíná řízené vytvrzení pryskyřice. Působící tlak také potlačuje pórovitost, hlavní výrobní vadu dílů na bázi prepregů tím, že vytlačuje pryskyřici do suchých oblastí a sráží bubliny zachyceného vzduchu a těkavých látek vzniklých vytvrzováním. Zvýšená teplota současně snižuje viskozitu pryskyřice, což umožňuje,

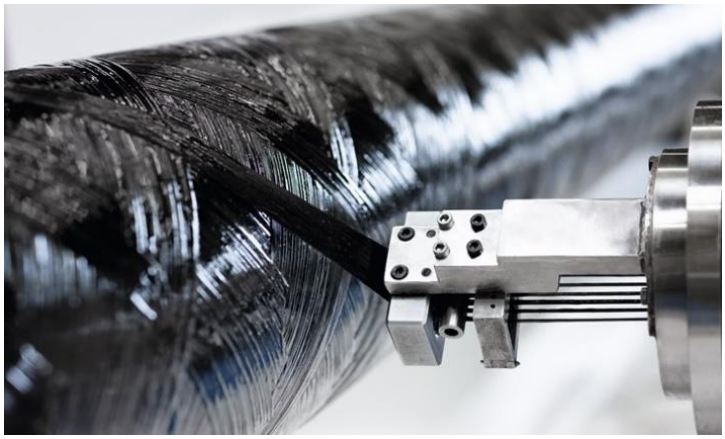
aby pryskyřice tekla a smáčela výztuž před úplným vytvrzením. Typický teplotní rozsah v autoklávu se pohybuje mezi 120 až 200 °C. Pro bezchybné vytvrzení je nezbytně nutné dodržet specifické parametry konkrétního vytvrzovacího cyklu v závislosti na použitém typu prepregu/pryskyřice. Ochlazování dílu obvykle probíhá pomalu, aby se předešlo vzniku vnitřních napětí způsobených rozdílnou teplotní roztažností jednotlivých složek kompozitu a různě orientovaných vrstev. [1; 25; 30]



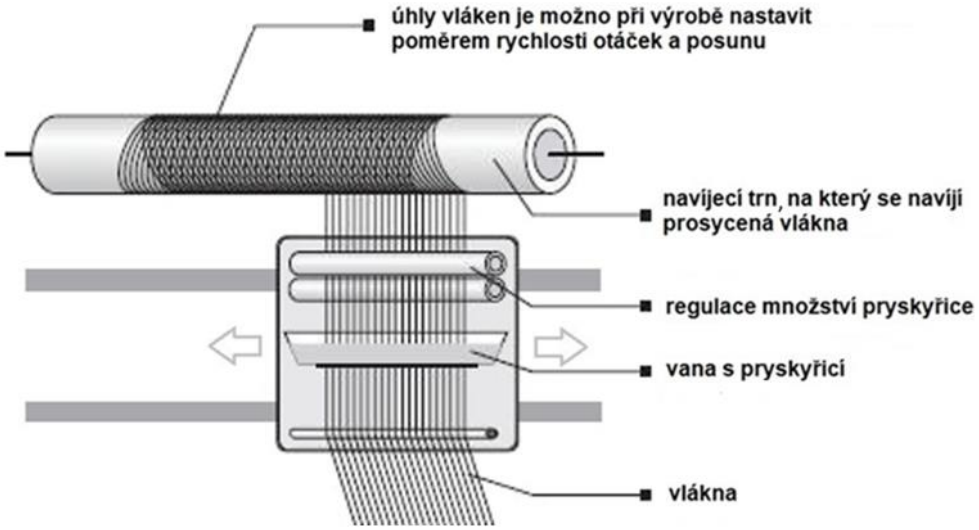
Obr. 24 Autokláv [36].

2.6.3 Navíjení

Tato technologie spočívá v navíjení pramence (rovingu) nejčastěji z uhlíkových nebo skelných vláken na trn (obr. 26). Před samotným navíjením jsou vlákna máčena v lázni pryskyřice, odkud jsou následně přes vodící mechanismus vytahována a navíjena na trn. Vhodnou kombinací otáček vřetene a podélného posuvu vodícího mechanismu lze poměrně dobře řídit úhel a směr navíjení jednotlivých vrstev vláken. Cílenou orientací vláken lze výrazně ovlivňovat mechanické vlastnosti návinu v požadovaných směrech s ohledem na budoucí zatížení výrobku. Vytvrzení probíhá obdobně jako u předchozích metod v závislosti na typu použité matrice za pokojové teploty, zvýšené teploty v peci, případně působením UV záření. Hlavními přednostmi tohoto způsobu výroby je zejména přesnost uložení vláken, rozměrová přesnost, automatizace procesu, rychlost produkce a opakovatelnost výsledků. Další výhodnou vlastností je velká variabilita výroby, možnost pracovat s širokým rozsahem rozměrů a tvarů. Omezením jsou pouze mechanické parametry zařízení. Proces je vhodný především pro výrobu rotačně symetrických součástí jako jsou trubky, tlakové nádoby, hřídele (obr. 25), poloosy, a podobně. S využitím specializovaných nástrojů a přípravků není problém ani s výrobou komponentů s jinými než rotačně symetrickými profily. [9; 37; 38]



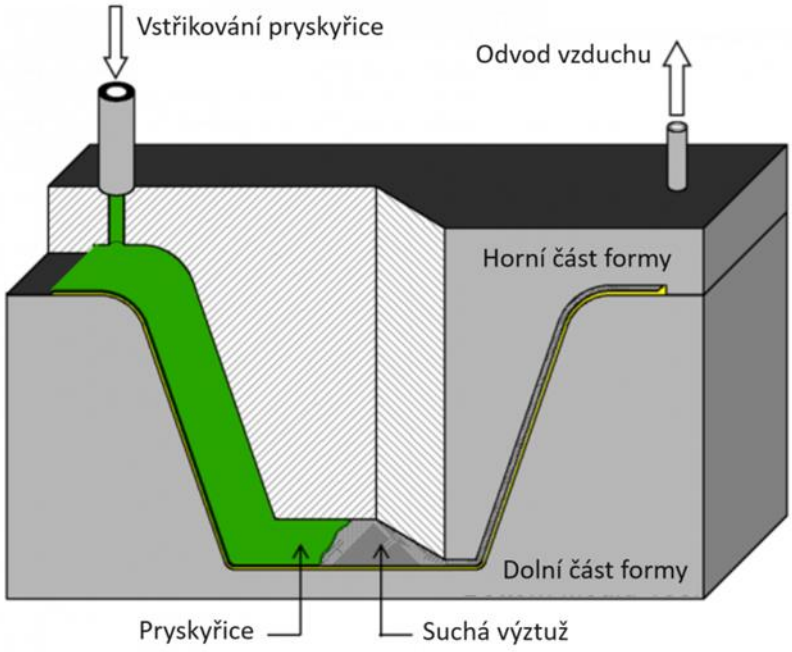
Obr. 25 Navíjení hřídele z uhlíkové příze [39].



Obr. 26 Schéma metody navíjení, upraveno dle [30].

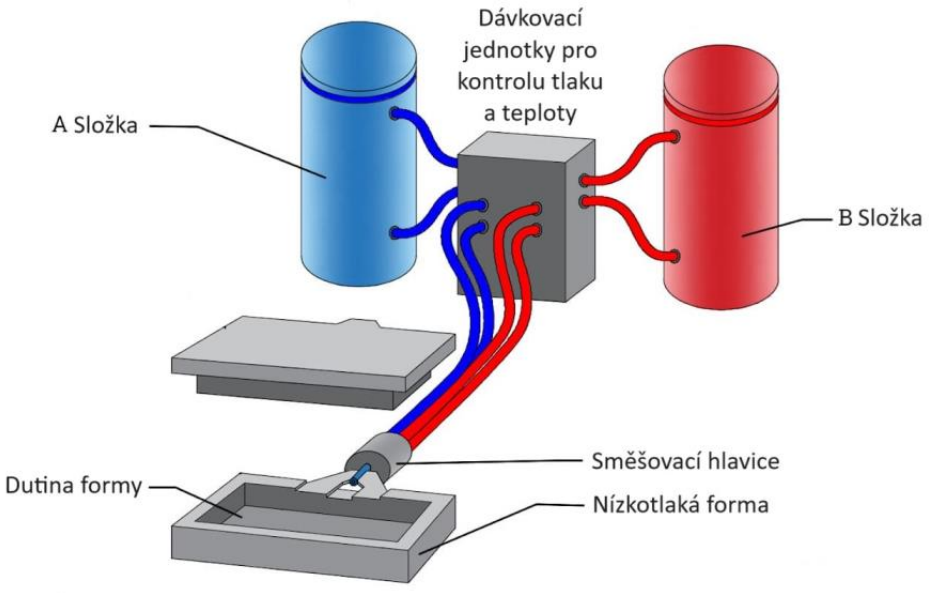
2.6.4 Infuze

Technologie infuze se v počátku výrazně podobá technologii mokrého kladení, kdy je suchá tkanina uložena do formy, v tomto případě ovšem není bezprostředně prosycována pryskyřicí. Pryskyřice je po suchém nalaminování požadovaných vrstev skladby aplikována do formy podle zvolené metody vstříknutím pod tlakem (RTM – Resin Transfer Moulding) nebo nasáta pomocí podtlaku (VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding). Metoda RTM (obr. 27) zpravidla využívá pevnou dvoudílnou formu, u níž je z důvodu vstřikování pryskyřice pod tlakem velmi důležitá těsnost. Během procesu prosycování proudí pryskyřice od vstupního ventilu k výstupnímu, přičemž před sebou vytlačuje vzduch z formy ven, k výstupnímu ventilu je připojena nádoba pro zachycení přebytečné pryskyřice. Infuze končí ve chvíli, kdy je z formy vytlačen veškerý vzduch a z výstupního ventilu proudí pouze čistá pryskyřice. Tato metoda bývá nejčastěji využívána při výrobě pohledových karosářských dílů jako jsou například kapoty, blatníky, nárazníky, spojlery atd. Obrovským benefitem dvoudílné formy je možnost vytvoření pohledového povrchu z obou stran vyráběného dílu. [9; 37]



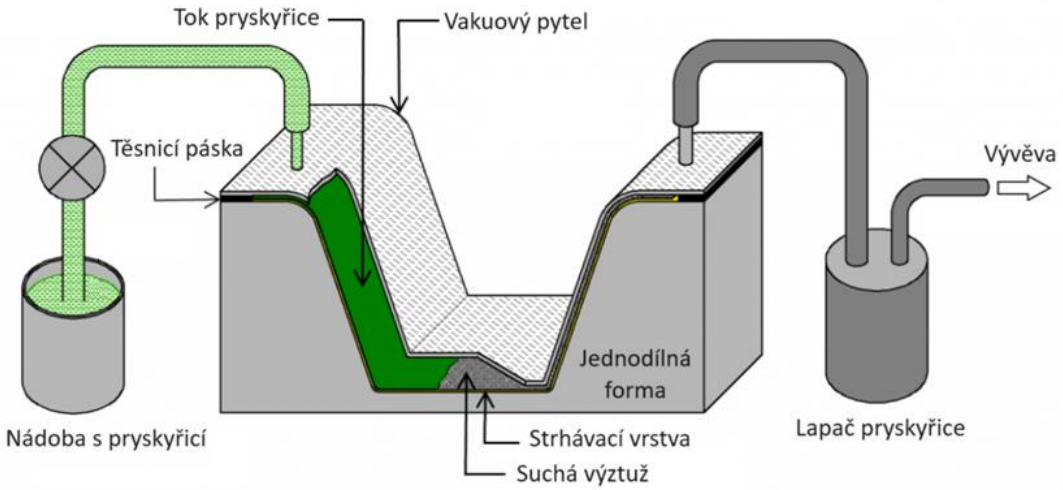
Obr. 27 Schéma infuzní metody RTM, upraveno dle [40].

Potřeba zkrácení výrobního cyklu při využití velmi reaktivních pryskyřic měla za následek rozvoj technologie RIM (Reaction Injection Moulding). Oproti technologii RTM, kde jsou složky nejprve smíchány a až poté vstříknuty do formy, se u technologie RIM složky skladují odděleně a k jejich promísení dochází až ve formě (obr. 28). Do formy jsou tyto složky vstřikovány v přibližně stejném množství obvykle pod tlakem 10 až 20 MPa, po smíchání složky okamžitě reagují, získávají gelovou konzistenci a rychle tvrdnou. Velkým benefitem tohoto způsobu výroby je možnost dosáhnout extrémně krátkých vytvrzovacích časů (v řádu minut), důsledkem toho je vysoká produktivita výroby a s tím související nižší cena výrobku. Přínosná je rovněž dlouhodobá skladovatelnost jednotlivých složek. [1; 9; 41]



Obr. 28 Schéma infuzní metody RIM, upraveno dle [42].

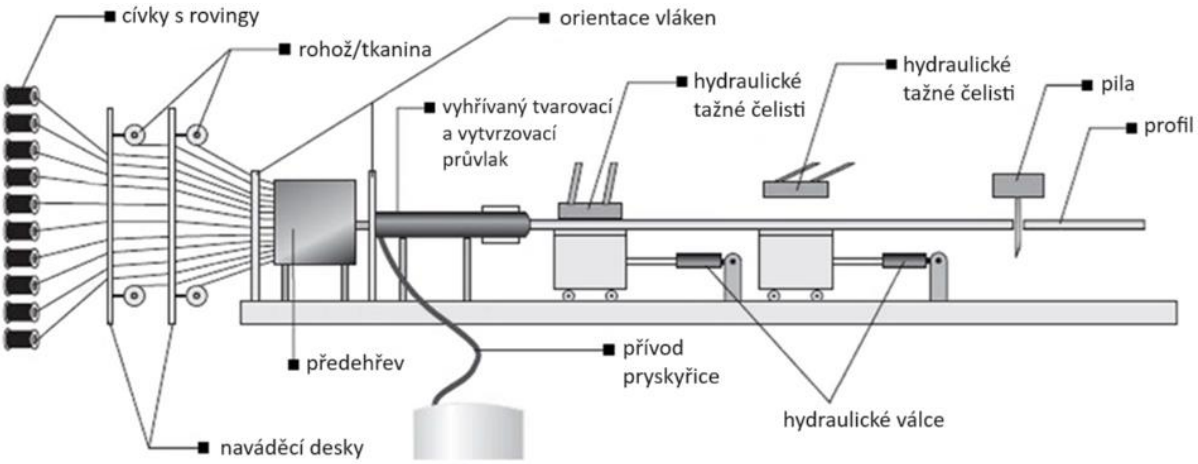
Poslední zde zmíněnou variantou bude VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding), znázorněná na obr. 29. Oproti předchozím způsobům je infuze v tomto případě provedena pomocí podtlaku (vakua). Přestože i tato metoda umožňuje použití pevné dvoudílné formy jako v předchozích případech, právě použití jednodušší, méně nákladné, jednodílné formy v kombinaci s vakuovým pytlem může znamenat výraznou úsporu výrobních nákladů pro malosériové aplikace. Vakuová infuze je hojně využívána pro výrobu velkorozměrných dílů, může se jednat například o lopatky větrných elektráren, kapotáže a krytování různorodých strojů, trupy a paluby lodí... [43; 44]



Obr. 29 Schéma infuzní metody VARTM, upraveno dle [40].

2.6.5 Pultruze

Proces výroby kompozitů pultruzí (obr. 30) je určen především pro výrobu standardizovaných/normalizovaných profilů. Základní princip může vzdáleně připomínat metodu navíjení, nejprve jsou prameny vláken protaženy pryskyřičnou lázní, kde dojde k jejich prosycení. Poté jsou vlákna za pomoci průtahů a válcovacích stolic formována do požadovaného profilu. Finální vytvrzení profilu probíhá kontinuálně ve specializované vytvrzovací hlavici. Po naimpregnování a nakrácení na požadované délky je profil připraven k expedici. Přednostmi procesu je bezpochyby vysoká produktivita, dobré mechanické vlastnosti profilu, vysoká míra automatizace a možnost vyrábět poměrně širokou škálu průřezu profilu. [9; 43; 45]



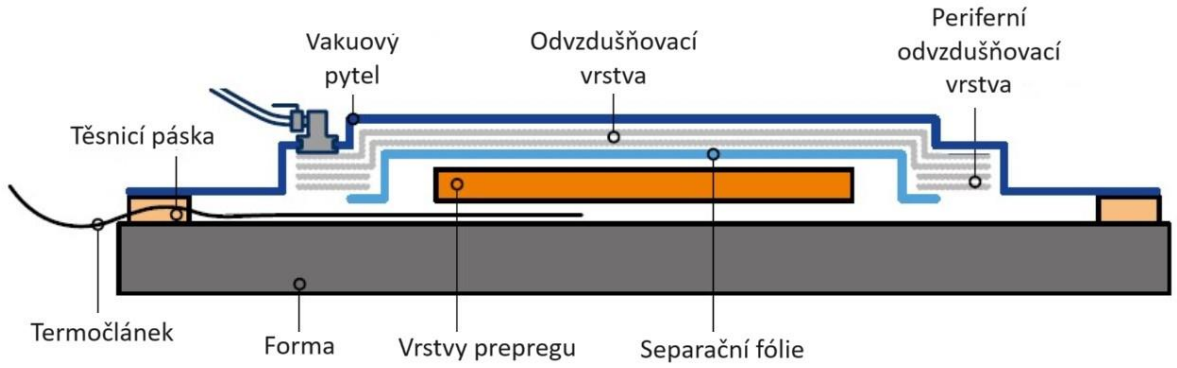
Obr. 30 Schéma výroby kompozitních profilů pultruzí, upraveno dle [30].

3 MIMOAUTOKLÁVOVÁ TECHNOLOGIE

Pokročilé kompozitní materiály na bázi termosetických polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny se již poměrně dlouhou dobu běžně využívají např. v leteckých a kosmických aplikacích, automobilovém průmyslu, high-end sportovních potřebách, ve větrných elektrárnách. Většina těchto produktů, zejména pro letecký průmysl, je s ohledem na kvalitu a maximální možnou úsporu hmotnosti vyráběna ze široké škály polotovarů ve formě prepregů o rozmanitých vlastnostech dle požadavku konkrétní konstrukce. S rostoucím počtem, velikostí a složitostí těchto kompozitních dílů se potřeba rychlejší, nákladově efektivnější a univerzálnější výroby dostává do konfliktu s omezeními tradičních metod zpracování. Tradiční způsob výroby dílů z prepregů spočívá v uzavření formy s laminátem do vakuového pytle, odsátí vzduchu a následným vytvrzením v autoklávu (viz výše). [46; 47]

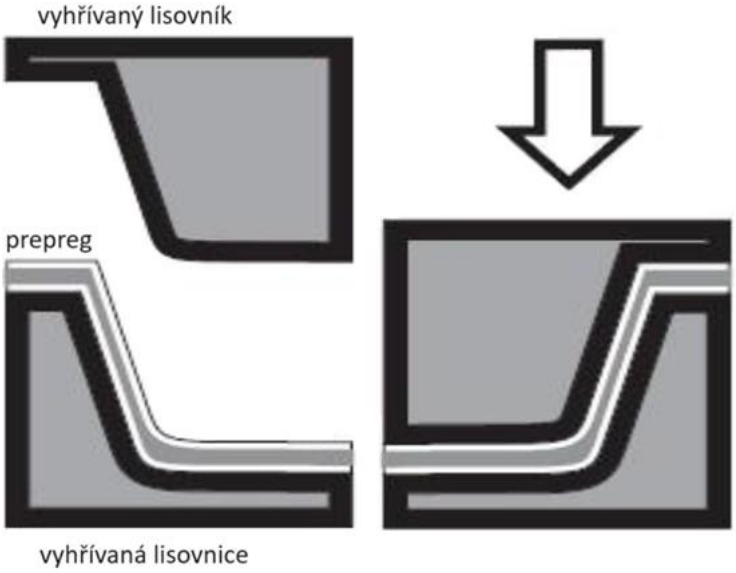
Zpracování v autoklávu je robustní a ověřený proces, stojí za ním rozsáhlý výzkum a zkušenosti získané při širokém průmyslovém využití. Nadále proto zůstává měřítkem pro konkurenční procesy. Autoklávy jsou však spojeny se značnými náklady na pořízení a provoz, což představuje velkou překážku zejména pro malé firmy a subjekty, které s výrobou dílů na bázi prepregů teprve začínají. Autoklávy také představují relativně nepružné výrobní prostředí. Potenciální konstrukce dílů jsou omezeny rozměry nádob, rychlost výroby je omezena plánováním, velké autoklávy musí být někdy neefektivně využívány pro malé díly a možnosti subdodavatelů jsou často omezené. Z těchto důvodů a také vzhledem k předpokládanému růstu trhu s kompozitními materiály je pro uspokojení budoucí poptávky nutné uvažovat o rozšíření použití mimoautoklávových (OOA – Out Of Autoclave) technologií, které umožňují vyrábět díly v autoklávové kvalitě. [46; 48]

Jako „mimoautoklávovou“ lze v podstatě označit jakoukoliv technologii výroby, ve které není žádným způsobem využit autokláv. Ve spojitosti s využitím prepregů však většina dostupných zdrojů uvadí především metodu konsolidace ve vakuovém pytli (VBO – Vacuum Bag Only). Tento proces je téměř totožný s autoklávovým způsobem výroby, je zde využíván v podstatě totožný vakuový pytel včetně skladby separačních a odvzdušňovacích vrstev (obr. 31). Rozdílné jsou ovšem používané prepregy, které využívají rozdílné materiály matric v kombinaci se specifickým způsobem prosycení tkaniny. Proces vytvrzení začíná odsátím vzduchu z pytle za pomoci vývěvy, dle předepsaného teplotního cyklu následuje vytvrzení v peci, na rozdíl od autoklávu však již bez působení dalšího přetlaku. Nižší vytvrzovací tlak při vytvrzování VBO navíc může eliminovat vady způsobené autoklávem, jako je rozdrcení voštinového jádra, což umožňuje použití lehčích a levnějších jader. [32; 46; 48]



Obr. 31 Schéma skladby vrstev při využití vakuového pytle, upraveno dle [48].

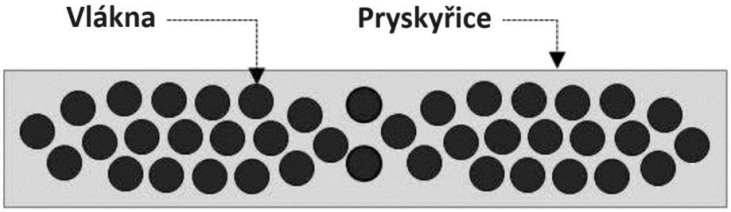
Mezi mimoautoklávové metody využívající prepregy patří také metody lisování (obr. 32), které bývají v případě dutých dílů spojeny s využitím jader schopných vyvodit určitý tlak na stěny formy. Toho bývá docíleno pomocí nafukovacích prvků, jako jsou vaky a membrány, nebo pomocí prvků využívající teplotní roztažnosti materiálů. Tyto metody jsou často nasazovány v kombinaci s vyhřívanými nástroji (obdobně jako např. u technologie Forged carbon), vytvrzení může rovněž probíhat v konvenční peci, nebo např. pomocí topných deček. [46; 48]



Obr. 32 Schéma lisování prepregů za tepla, upraveno dle [30].

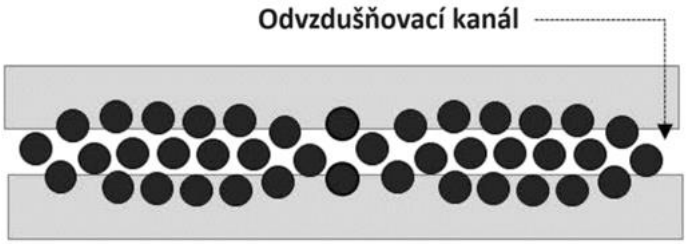
3.1 Specifika mimoautoklávových prepregů

Autoklávové prepregy jsou obvykle vyráběny jako plně impregnované (obr. 33). Vytvrzení v autoklávu spočívá ve vysokém konsolidačním tlaku 5 až 8 bar (0,5 až 0,8 MPa), který zabrání vzniku a růstu dutin. Pro autoklávové prepregy tedy plné nasycení snižuje pravděpodobnost suchých míst a dalších vad vznikajících nedostatečným tokem pryskyřice, rovněž přispívá k vytvoření vysoce kvalitní mikrostruktury s nízkým počtem vad. Plné nasycení také snižuje objemový (bulk) faktor, což je rozdíl mezi počáteční a konečnou tloušťkou prepregu. [46; 49]



Obr. 33 Schéma autoklávového prepreg, upraveno dle [49].

Mimoautoklávové prepregy mají naopak částečně impregnovanou mikrostrukturu, která zahrnuje suché i pryskyřicí nasycené oblasti (obr. 34). Maximální dostupný konsolidační tlak během vytvrzení mimo autokláv při použití vakuového pytle je cca 1 bar (0,1 MPa), což nestačí k zabránění vzniku a růstu dutin. Proto výroba dílů s nízkým počtem vad vyžaduje důkladné odsátí zadrženého vzduchu, vypařené vlhkosti a dalších plynů přítomných v laminátu před zahájením vytvrzování pryskyřice. Suché oblasti v původní mikrostruktuře prepregu tvoří propustnou interní síť, která umožňuje transport plynu během počátečních nízkoteplotních fází vytvrzování. Následně jsou při vysoké teplotě tato suchá místa zaplněna pryskyřicí, která infiltruje z vedlejších oblastí s vysokým obsahem pryskyřice. [46; 49]



Obr. 34 Schéma mimoautoklávového prepregu, upraveno dle [49].

Vlastnosti prepregů

Prepregy pro mimoautoklávové použití se tedy vyznačují především tím, že mají částečně impregnovanou strukturu, která poskytuje lepší prodyšnost/propustnost. Tato vlastnost umožňuje lepší odvod vzduchu a ideálně výrobu dílů s nízkou porozitou i v nepřítomnosti tlaku z autoklávu. [49; 50]

Vlastnosti pryskyřic

Úspěšné vytvrzení mimoautoklávového prepregu vyžaduje vhodnou volbu systému pryskyřice a architektury vláken. Velmi důležitá je kompatibilita pryskyřice a vláken během zpracování. Zatímco většina literatury na téma mimoautoklávových prepregů se týká systémů uhlíkových vláken a epoxidových pryskyřic, teoreticky lze k výrobě využít jakýkoli typ pryskyřice. Zásadní pro mimoautoklávové vytvrzení je pečlivě navržená kinetika a reologie procesu vytvrzení, která má vliv na robustnost a bezproblémovost výroby. [49; 50]

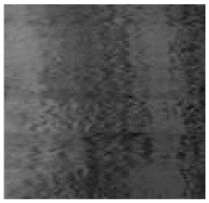
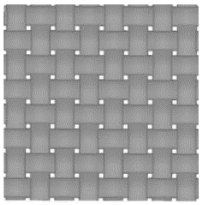
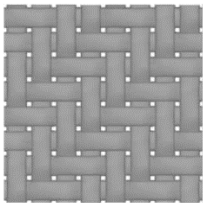
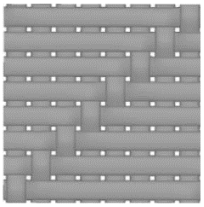
Kinetika vytvrzení a reologie pryskyřice jsou velmi důležitými faktory ovlivňujícími vznik vad v hotovém výrobku. Ve spojení se speciálními způsoby částečné impregnace prepregu usnadňují odsávání zadrženého vzduchu během procesu vakuování při pokojové teplotě. Důležité je, aby viskozita pryskyřice při pokojové teplotě byla dostatečně vysoká, předešla „studenému proudu“ a zabránila předčasnému uzavření kanálů pro odvod vzduchu. Zároveň však musí být dostatečně tekutá za zvýšené teploty, aby během teplotního cyklu došlo k vyplnění všech prázdných míst, sjednocení struktury dílu a zamezilo se tak vzniku pórů a dutin, což jsou nejčastější závady dílů vyrobených mimoautoklávovými způsoby. [49; 50; 51]

Obecně musí mimoautoklávové systémy pryskyřic vykazovat také dostatečně dlouhou dobu zpracovatelnosti při pokojové teplotě (25 °C), což umožňuje výrobu rozměrných dílů. Typicky se doba zpracovatelnosti (working life) při pokojové teplotě pohybuje okolo 3 až 4 týdnů. Jedním z hlavních důvodů použití mimoautoklávových prepregů je snížení nákladů výroby, proto jsou používány pryskyřice umožňující vytvrzení při nízké teplotě (<120 °C). Nízká teplota vytvrzovacího cyklu rovněž umožňuje použití forem vyrobených z méně nákladných materiálů. V současnosti se většina systémů mimoautoklávových prepregů používaných především pro metodu vakuového pytle skládá z částečně vytvrzených epoxidových pryskyřic. Jsou však dostupné i komerční produkty, které využívají jiné typy pryskyřic, včetně kyanátových esterů, bismaleimidů a benzoxazinů. [46; 49; 51]

Vlastnosti vláken

Teoreticky lze pro mimoautoklávový způsob výroby použít libovolnou architekturu vláken, pokud jsou splněny klíčové požadavky, stejně jako u systému pryskyřice. Výztuž vysokovýkonných mimoautoklávových prepregů používaných v leteckém průmyslu se typicky skládá z jednosměrných výztužných pásů (přibližně 145 g/m^2) a tkanin (190 až 370 g/m^2) s prameny 3K až 12K (3 až 12 tisíc vláken). Tab. 5 shrnuje vlastnosti těchto typických architektur vláknových výztuží. [46; 49]

Tab. 5 Typické architektury výztuže mimoautoklávových prepregů, upraveno dle [49].

Typ výztuže				
	Jednosměrná (145 g/m^2)	Plátno (190 g/m^2)	2x2 Kepr (370 g/m^2)	8 Satén (375 g/m^2)
Tloušťka vytvrzené vrstvy prepregu	0,14 mm	0,19 mm	0,38 mm	0,37 mm
Vlnitost tkaniny	Nízká	Vysoká	Střední až vysoká	Střední
Pórovitost	Ne	Ano	Ano	Ano
Tvarovatelnost	Nízká	Střední	Střední	Vysoká

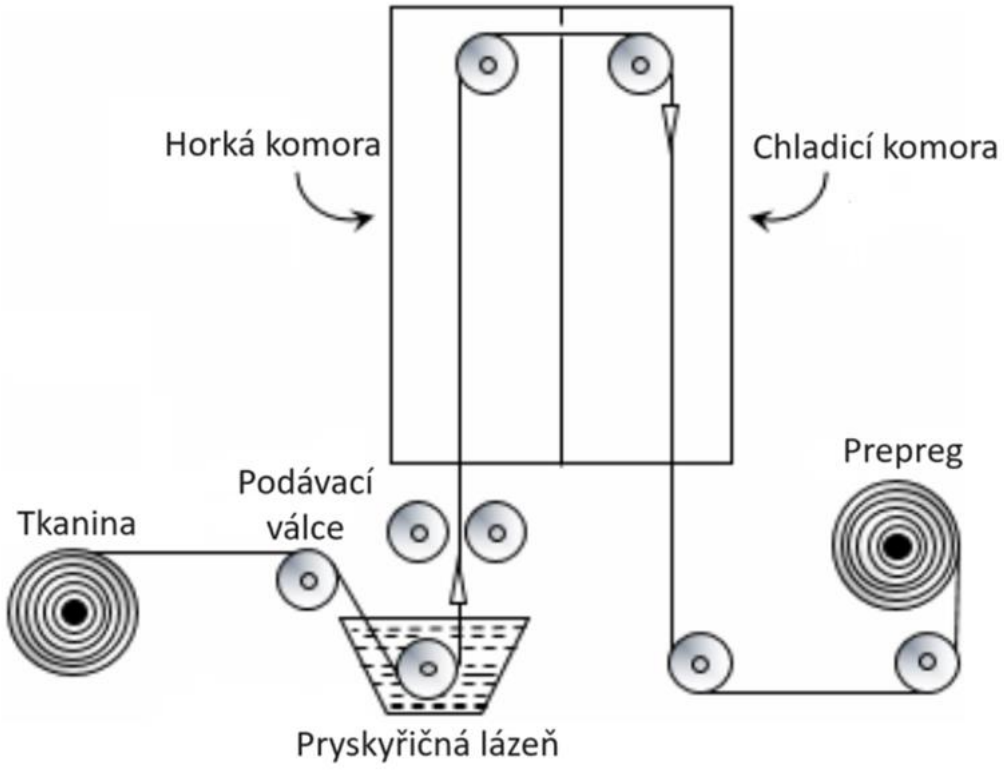
Hlavním požadavkem při výběru architektury vláken je kompatibilita se systémem pryskyřice. Konkrétně musí objemový podíl vláken a průchodnost výztuže umožnit částečnou impregnaci ve výchozím stavu a plné nasycení během procesu vytvrzování před plným vytvrzením pryskyřice. Architektura vláken rovněž ovlivňuje následující procesní problémy [49]:

- Tloušťka vytvrzené vrstvy: Výztuže s vyšší plošnou hmotností mohou usnadnit vrstvení, protože pro dosažení požadované tloušťky je třeba nalaminovat méně vrstev. Těžší výztužné vrstvy však mohou vykazovat vyšší tzv. bulk faktor (poměr počáteční a konečné tloušťky) a mohou být obtížněji zhutnitelné pod tlakem vzduchu, který při použití vakuového pytle dosahuje pouhého cca 1 bar (0,1 MPa).
- Zachycení vzduchu: U výztuže s nerovnoměrnou morfologií povrchu (např. tkané textilie) je větší pravděpodobnost, že se vzduch zachytí mezi jednotlivými vrstvami nebo na rozhraní nástroje a dílu, než u výztuží s hladkým povrchem (např. jednosměrné výztuže). Pokud není zachycený vzduch dostatečně odsátý, během mimoautoklávového procesu vytvrzování může vést vyšší hladina zachyceného vzduchu k vyšší pórovitosti vytvrzeného dílu.
- Propustnost: Efektivní rovinná a příčná propustnost prepregu závisí na vnitřní propustnosti vláknové výztuže. Ve všech případech je propustnost ovlivněna objemovým podílem vláken, u tkaných látek je propustnost ovlivněna také dvojrozměrnou konstrukcí výztuže a relativním množstvím mikropórů (uvnitř vláken) a makropórů (mezi vlákny).
- Tvarovatelnost: Jednosměrné výztuže a tkaniny s vyšší hustotou vazby jsou obvykle méně tvárné než tkaniny s volnější vazbou. Při absenci autoklávu mohou být tyto materiály obtížně přizpůsobitelné geometrii nástroje s těsnými tvary a zakřiveními.

3.2 Výroba prepregů

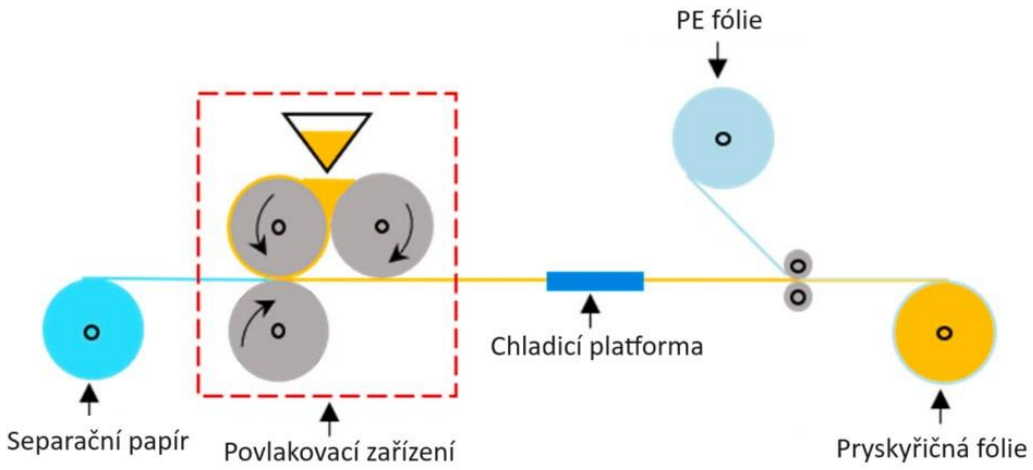
Prepregy s termosetickými matricemi lze vyrábět několika rozdílnými postupy, patří mezi ně impregnace pomocí rozpouštědla (solvent dip impregnation), metoda horkého tavení (hot melt process), nebo také metoda přímého nanesení (direct coating). Distribuce pryskyřice, stupeň nasycení výztuže, vlastnosti vláken a pryskyřice jsou obvykle optimalizovány tak, aby vyvážily zpracovatelnost s požadovanými vlastnostmi vyráběného dílu. [52]

Impregnace rozpouštědlem spočívá v nasycení vláknové výztuže ponořením do lázně obsahující pryskyřici (matrici) rozpuštěnou pomocí nízkoviskózního rozpouštědla (obr. 35). Takto naimpregnovaná výztuž je následně ohřáta v horké komoře, kde dojde k vypaření rozpouštědla, částečnému vytvrzení (tzv. B stage), následuje ochlazení, zabalení prepregu do ochranných a separačních fólií, formátování a balení např. do rolí. Tato metoda dokáže zajistit plné nasycení výztuže pryskyřicí. V případě, kdy by při výrobě nebylo veškeré rozpouštědlo dokonale odpařeno, může při výrobě dílu během vytvrzovacího cyklu docházet k tvorbě dutin. Procesem impregnace rozpouštědlem jsou vyráběny pouze prepregy s výztuží ve formě tkaniny. [52; 53]



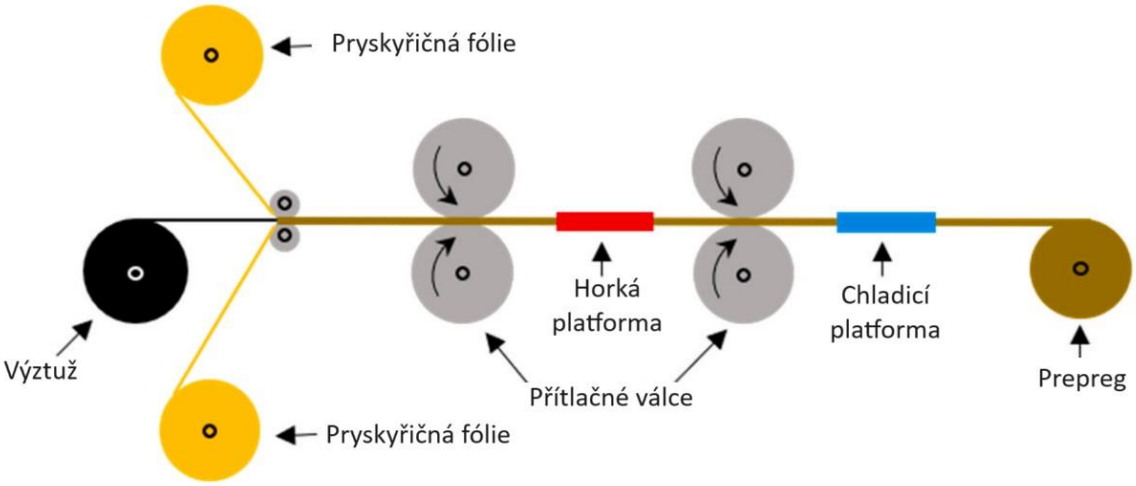
Obr. 35 Schéma výroby prepregu pomocí impregnace rozpouštědlem, upraveno dle [54].

Metoda horkého tavení je dvoufázový proces, který eliminuje nanášení rozpouštědla a sušení používané u impregnace rozpouštědlem. První fází tohoto procesu je výroba pryskyřicí potažených nosných fólií (obr. 36) s přesnou a rovnoměrnou tloušťkou vrstvy pryskyřice. K tomuto účelu slouží (většinou samostatné) speciální stroje zvané „filmery“. [52; 53; 55]



Obr. 36 Schéma výroby pryskyřičné fólie, upraveno dle [55].

Fólie jsou poté aplikovány na jednu nebo obě strany vláknové výztuže a pomocí přesných zhutňovacích vyhřívaných válců je tento celek stlačen (obr. 37). Působením tepla a tlaku dojde k přenosu filmu pryskyřice z nosné fólie na vláknovou výztuž a také k částečnému vytvrzení (tzv. B stage). Takto připravený prepreg je společně s ochrannými vrstvami navíjen na cívky. V závislosti na konfiguraci může většina strojů vyrábět prepregy z různých typů tkanin i jednosměrných výztuží. Oddělením výroby „pryskyřičné“ fólie od samotné impregnace umožňuje proces horkého tavení přesnou kontrolu nad obsahem pryskyřice a rozsahem impregnace. Proto je naprostá většina prepregů určených pro mimoautoklávové použití vyráběna metodou horkého tavení. [52; 53; 55]



Obr. 37 Schéma výroby prepregu procesem horkého tavení, upraveno dle [55].

Prepregy mohou být rovněž vyráběny přímým nanesením (direct coating) pryskyřice na vláknovou výztuž. Při tomto způsobu výroby se pryskyřice nejprve nanese na vyhřívaný válec, kde k řízení tloušťky slouží stírací nůž. Poté se válec použije k přenosu pryskyřice na vláknovou výztuž. Přímé nanesení je jednoduchý jednostupňový proces, který nevyžaduje ani rozpouštědla, ani výrobu nosné fólie. Rozložení pryskyřice tak závisí především na topologii povrchu výztuže, přesná kontrola obsahu pryskyřice může být proto obtížná. Z tohoto důvodu se pro výrobu prepregů pro letecké účely obvykle používají metody horkého tavení nebo impregnace rozpouštědlem. [31; 52]

3.3 Skladování prepregů

Protože u termosetických prepregu obstarává úlohu matrice obvykle nějaký druh epoxidové pryskyřice v již aktivovaném stavu (částečně vytvrzeném), mají tyto prepregy omezenou dobu skladování (tzv. shelflife). Čím vyšší je teplota skladování prepregu, tím rychlejší je jeho vytvrzení. Pro zpomalení procesu vytvrzení pryskyřice, a tím i prodloužení možné doby skladování, by tedy měl být prepreg uchováván při nízkých teplotách, ideálně pod bodem mrazu. Obvykle platí, že při pokojové teplotě (25 °C) je doba skladování cca 1 měsíc, při teplotě 0 až 5 °C lze dobu skladování prodloužit na 3 měsíce. Pokud je teplota nižší než -18 °C, lze dobu skladování prodloužit na více než 6 měsíců. Uvedené délky skladování jsou pouze orientační a mohou se pro jednotlivé materiály od různých výrobců lišit, převážně v závislosti na konkrétním typu použité matrice. [31; 50; 56]

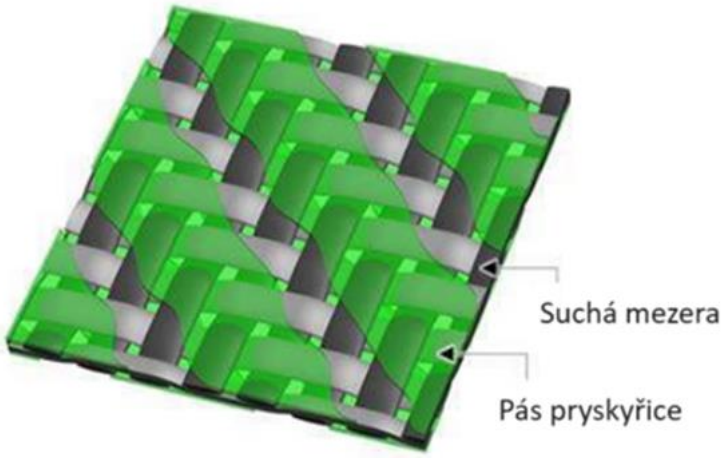
Valná většina společností zabývající se výrobou kompozitních dílů z prepregů má proto k dispozici mrazáky, chladírenské boxy (obr. 38) nebo sklady pro jejich uchovávání. V ideálním případě by měly být totožné podmínky dodrženy i při přepravě, vozidla by měla být vybavena záznamníky teploty a vlhkosti. Při dodání prepregu musí kupující obdržet údaje ze záznamového zařízení, zkontrolovat přepravní prostředí a vyhodnotit zbývající dobu skladovatelnosti prepregu, aby se usnadnilo určení a provedení následného výrobního plánu. Při skladování je vhodné prepregy uchovávat v originálním, nebo jiném hermeticky uzavřeném obalu. Rovněž při rozmrazování před použitím je vhodné prepreg ponechat v tomto obalu, tím se zabrání kontaktu skladovaného prepregu s okolní atmosférou, kondenzaci vzdušné vlhkosti na studeném povrchu a navlhnutí prepregu. Zároveň je vhodné prepregy skladovat v tmavém prostoru, aby se minimalizovalo působení UV záření, které může negativně ovlivnit vlastnosti pryskyřice. [31; 48]

Obr. 38 Chladírenský box pro skladování prepregů [57].

Skladování prepregů s termoplastickou matricí vyžaduje méně přísné skladovací podmínky, většinu termoplastických prepregů lze skladovat při pokojové teplotě po dobu několika měsíců, aniž by ztratily zpracovatelnost. Termoplastické prepregy by měly být stejně jako termosetické prepregy uchovávány mimo dosah zdrojů UV záření, tepla a chemicky agresivních prostředí. [48; 58]

3.4 Vývoj mimoautoklávových prepregů

Technologie mimoautoklávových prepregů se neustále vyvíjí, souvisí to s rozvojem nových materiálových systémů a rozšiřováním oblasti aplikací tohoto způsobu výroby kompozitních dílů. Během poslední dekády výzkumu mimoautoklávového zpracování prepregů došlo k lepšímu porozumění vztahu mezi architekturou vláken, termochemickým chováním pryskyřice, průchodností vzduchu a impregnací prepregu. Jak je zmíněno v předchozí části, k výrobě mimoautoklávových prepregových systémů lze použít několik strategií. Výsledné úrovně a vzory impregnace pryskyřice mohou mít významný vliv na zpracovatelnost prepregu. Obr. 39 zobrazuje speciálně navržený prepreg "USCpreg", jehož cílem je výrazné zvýšení průchodnosti vzduchu skrz jednotlivé vrstvy. Takový systém je méně citlivý než tradiční mimoautoklávové prepregy založené na kontinuálně, ale pouze částečně impregnovaných pryskyřicových filmech, a může dosáhnout nízkých úrovní porozity i za obtížných podmínek zpracování. Tento příklad ilustruje, že budoucí vývoj by měl být zaměřen na optimalizaci vlastností pryskyřice a struktury prepregu pro konkrétní aplikace, protože požadavky na materiál se mohou lišit v závislosti na konkrétních konstrukčních návrzích a výrobních podmínkách. [46; 49]

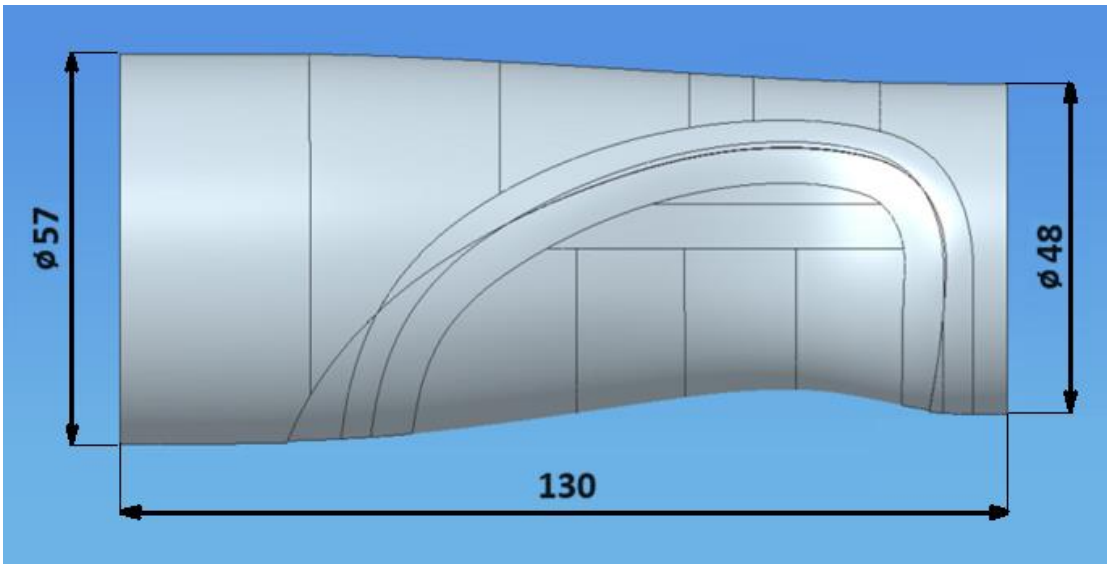


Obr. 39 Ilustrace částečně syceného prepregu USCpreg, upraveno dle [49].

4 NÁVRH PROTOTYPOVÉ VÝROBY

Hlavním obsahem praktické části je návrh několika variant prototypové výroby kompozitního dílu (obr. 40) mimoautoklávovou technologií s využitím prepregů. Součásti toho je návrh forem, přípravků, skladby vrstev kompozitu a volba materiálů. Následuje stručná dokumentace postupu výroby forem a prototypové výroby samotného dílu.

Mimoautoklávový způsob produkce kompozitního dílu z prepregů nabízí několik možných variant výrobního postupu. V dostupných zdrojích je často zmiňován postup s využitím vakuového pytle, který bývá využíván i při produkci velkorozměrových dílů např. pro letectví, proto bude tento způsob zvolen jako výchozí, referenční. Vzhledem ke geometrii zadaného dílu je další možnou variantou výroby postup s využitím jádra. Úkolem jádra bude vytvořit tlak a přitlačit tak nalaminovaný prepreg na stěny formy. Vytvrzení bude probíhat za zvýšené teploty v peci podle doporučeného cyklu dle výrobce prepregu.



Obr. 40 3D model zadané součásti se základními rozměry.

4.1 Metoda vakuového pytle

Jedná se v podstatě o standartní metodu využívanou i při vytvrzování dílů v autoklávu, kdy je forma s nalaminovaným prepregem a dalšími pomocnými technickými vrstvami uzavřena do vakuového pytle (obr. 41), ze kterého je následně vývěvou odsát vzduch (obr. 42). Tím vznikne uvnitř pytle podtlak a laminovaný dílec je tak stlačován okolním atmosférickým tlakem (1 bar), v případě autoklávu pak obvykle přetlakem o velikosti 5 až 8 bar, následuje vytvrzení při zvýšené teplotě (120 až 200 °C). Při mimoautoklávovém způsobu výroby bude místo autoklávu využita pouze vývěva a elektrická pec, která bude zajišťovat teplotní cyklus nutný pro plné vytvrzení dílu. Chybějící tlak při mimoautoklávovém vytvrzení často způsobuje pórovitost hotového dílu. Pro dosažení požadované kvality je potřeba tomuto jevu v maximální možné míře zabránit. Zásadní vliv na tento jev by měla mít volba vhodného prepregu pro mimoautoklávový způsob výroby, preciznost při kladení prepregů do formy, balení a vakuování dílu. Cílem je maximální přiblížení se autoklávové kvalitě dílu při mimoautoklávovém způsobu výroby.

Obr. 41 Balení formy s laminátem do pytle.

Obr. 42 Odsávání vzduchu z pytle.

4.2 Metoda silikonového jádra

Jako druhý způsob produkce byl s ohledem na geometrii zadaného tělesa zvolen postup s využitím silikonového jádra. Použití pro výrobu dílu ve tvaru tubusu (obecně součásti trubkovitého tvaru) se přímo nabízí. Při této metodě dochází k náhradě vakuového pytle a přetlaku autoklávu tlakem silikonového jádra (obr. 43), které má díky výrazné teplotní roztažnosti při ohřevu tendenci zvětšovat svůj objem. Zvětšení objemu jádra brání forma s nalaminovaným prepregem, tím vzniká tlak, jež stlačuje zmíněný laminát. V závislosti na vůli/přesahu jádra při dané teplotě se ekvivalentně snižuje/zvyšuje jádrem vyvolaný tlak. Pro vytvoření tlaku na dílec je nutno formu kompletně uzavřít tzn. včetně čel a zamezit tak úniku objemu jádra do volného prostoru. Silikonové jádro bude vyrobeno odlitím do samostatné, k tomu určené formy.

Obr. 43 Sestavená forma se silikonovým jádrem.

4.3 Skladba vrstev a volba prepregu

Podle zadané geometrie dílu a tloušťky stěny tubusu bylo rozhodnuto o použití čtyř vrstev prepregu v keprové vazbě o tloušťce 0,2 mm. Vnější vrstvy byly orientovány tak, aby optické linie keprové vazby souhlasily se směrem osy tubusu (byly rovnoběžné), což znamená orientaci osnovy prepregu pod úhlem 45° vůči ose tubusu. Další vrstvy byly orientovány tak, aby bylo dosaženo vyvážených (kvaziizotropních) vlastností dílu ve všech směrech a zároveň bylo docíleno symetrické skladby, která přirozeně předchází nežádoucím deformacím při vytvrzení dílu. Vrstvy tedy byly orientovány v pořadí [+45° ; 0° ; 0° ; +45°]T, neboli [+45° ; 0°]S.

Na základě výše zmíněných požadavků byl u dodavatele GRM Systems s.r.o. poptán prepreg pro mimoautoklávový způsob výroby. Dodavatel konstatoval, že s těmito typy prepregů má velice omezené zkušenosti, jelikož tento typ výrobku nemá prozatím velký odbyt. Přesto bylo vyhověno poptávce a došlo k návrhu vhodného typu materiálu a dodání (obr. 44). Zvolen byl prepreg od výrobce G. ANGELONI s.r.l., typ GG-204 T IMP503Z 46% H=100cm (obr. 45).

Tab. 6 Parametry použitého prepregu.

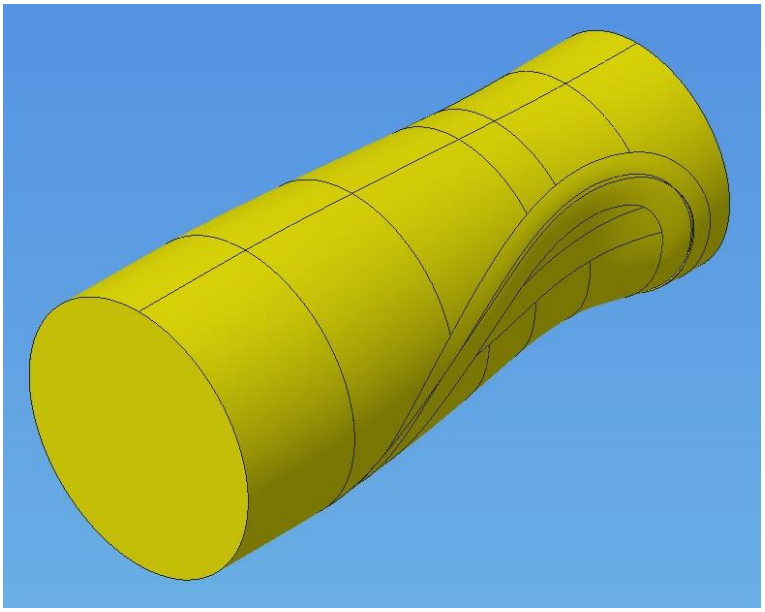
Označení prepregu	Gramáž výztuž (g/m^2)	Gramáž prepreg (g/m^2)	Vazba	Materiál / Lineární hustota		Tloušťka (mm)	Pryskyřice, obsah (%)
				Osnova	Útek		
GG-204 T	206	383	kepr 2/2	uhlík 200 tex	uhlík 200 tex	0,20	IMP503Z 46 %

Obr. 44 Role prepregu.

Obr. 45 Štítek s popisem prepregu.

5 NÁVRH A VÝROBA FOREM

Vstupem pro návrh forem byl plošný 3D model zadané součásti ve formátu step. Pro tvorbu 3D modelu forem bylo využito firemního softwaru PTC Creo Parametric. Nejprve bylo nutné zpracovat model tubusu. To spočívalo v jeho rozložení na jednotlivé plochy a uzavření čel pomocí kruhových ploch. Poté byla soustava ploch zpětně spojena a převedena na objemový model (obr. 46). Ten byl následně využit při tvorbě modelů laminačních forem.



Obr. 46 Objemový 3D modelu tubusu.

5.1 Laminační forma

Volba technologie výroby a materiálu forem

Pro výrobu laminačních forem, jejichž účelem má být pouze prototypová výroba karbonových tubusů, byla zvolena technologie 3D tisku. Konkrétně byla zvolena metoda MSLA (Masked stereolithography), především z důvodu dobré kvality povrchu vytištěných těles a schopnosti velmi kvalitně vytvářet i jemné detaily formy, jako jsou např. ostré přechody a odsazení. Takto vytištěné jednotlivé části formy budou následně dokončeny úpravou některých prvků obráběním (např. dělící rovina) a následným ručním mokrým broušením laminačních ploch. Na závěr bude povrch formy opatřen hydrofobním separačním nátěrem, tím se zamezí přilnutí vyráběného dílu k povrchu formy.

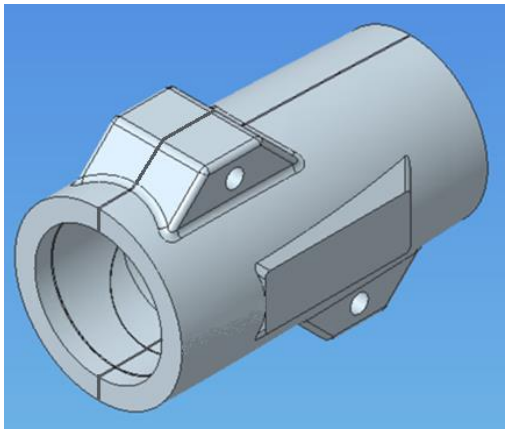
Zvolený postup je pro prototypovou výrobu vhodný zejména z důvodu větší operativnosti výroby, jelikož těmito technologiemi přímo disponuje vývojové oddělení firmy Meopta – optika, s.r.o., ve spolupráci s nímž tato práce vznikla. Dalším faktorem je finanční nákladnost výroby kovové formy, což by výrazně prodražilo výrobu několika kusů prototypů. Použití kovové formy pro laminovaný dílec je uvažováno pro případnou sériovou výrobu dané součásti.

Technologie MSLA pracuje s materiály na bázi fotopolymeru a v současné době nabízí velmi širokou škálu použitelných materiálů. Formy pro kompozitní díly musí být s ohledem na zvolené technologie výroby odolné určitému mechanickému zatížení, musí mít dostatečnou povrchovou tvrdost, a především musí opakovaně zvládat teplotní zatížení během vytvrzovacího cyklu v peci. Z těchto důvodů byl zvolen fotopolymer Composite-X od výrobce Liqcreate (obr. 47). Tento materiál disponuje na poměry fotopolymerů vysokou pevností, tuhostí, dobrou chemickou odolností a velmi malým smrštěním [59].

Obr. 47 Fotopolymer Liqcreate Composite-X.

Návrh formy

Pomocí objemového modelu tubusu byly provedeny „otisky“, čímž došlo k vytvoření funkčních ploch formy. Jako dělící rovina byla přirozeně zvolena rovina symetrie zadaného tubusu. V dalších krocích byly následně upraveny vnější tvary a rozměry formy (obr. 48). Prvotní návrh formy (obr. 49) počítal se sesazením formy na dva diagonálně umístěné ocelové kolíky a se spojením pomocí šroubů a matic (obr. 50). Pro metodu vakuového pytle se jednalo o funkční řešení.



Obr. 48 Prvotní návrh formy.

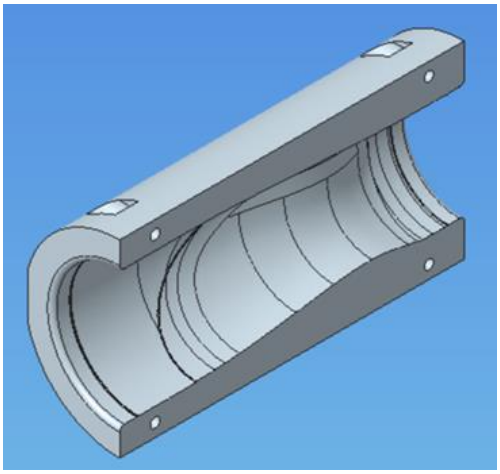
Obr. 49 Vnitřní strana formy.

Obr. 50 Vnější strana formy.

Při použití metody silikonového jádra se však toto řešení ukázalo jako nedostatečné. Příčinou byl velký tlak silikonu, jemuž forma nebyla schopna odolat, došlo k vylomení kolíku (obr. 51) a pootevření formy.

Obr. 51 Poškozená forma – vylomený kolík.

Proto došlo k iteraci designu formy, byl zvětšen počet vodících kolíků na čtyři, naopak bylo upuštěno od stahování formy šrouby. Místo toho byl upraven vnější tvar na válcový s předpokladem stažení formy z vnějšku za pomoci ocelových pásek (obr. 52).

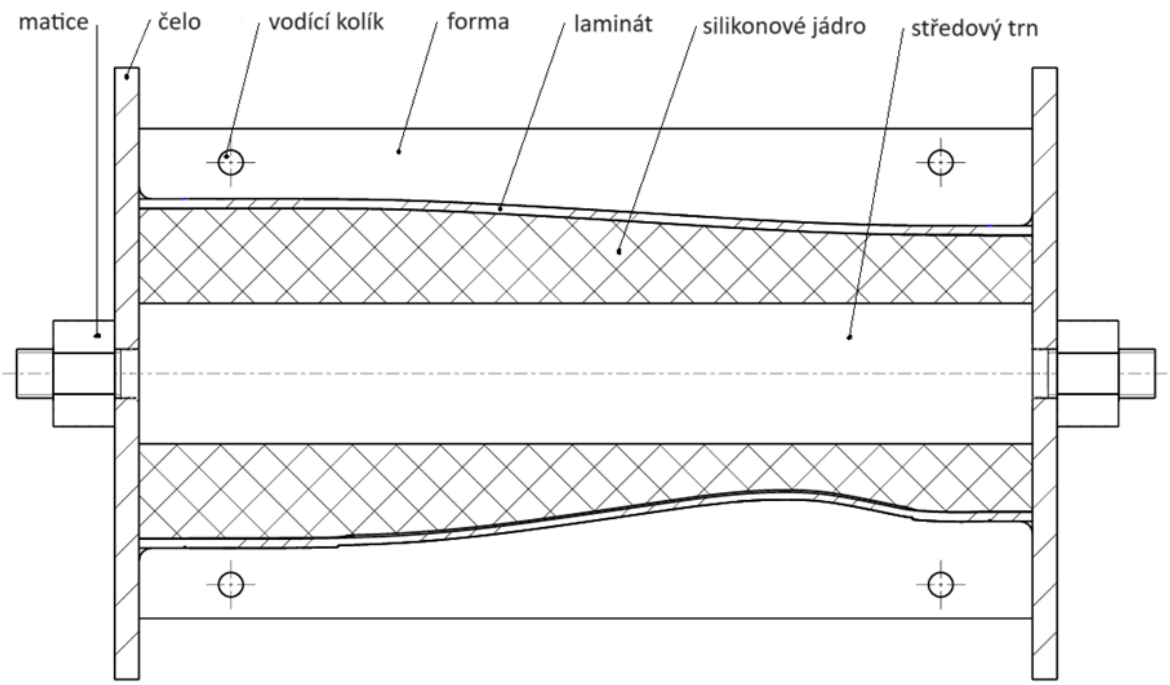


Obr. 52 Upravený návrh formy.

I toto řešení mělo nedostatky. Tím byly výše zmíněné pásky, respektive materiál formy, který nevydržel vnitřní přetlak v kombinaci s kontaktním tlakem od stažení páskami, a došlo tak k vyboulení formy v mezerách mezi páskami. Tento problém byl následně vyřešen zabalením složené formy do tenkého ocelového plechu, který měl za úkol zrovnoměrnit tlak na formu. Toto řešení obstálo a bylo tak možné pokračovat v řešení daného úkolu.

Středový trn a čela

Pro již výše zmíněné uzavření formy na čelech bylo navrženo použití přířezů z plechu upevněných na soustružený středový trn (obr. 53). Samotné jádro bylo navrženo jako duté, zejména pro možnost jeho snazší deformace a tím pádem i snazšího zavedení na požadovanou pozici. Pro vymezení volného objemu je tak nutno použít tento středový trn. Jeho vůlí/přesahem společně s jádrem lze také poměrně výrazně regulovat tlak na stěny formy.



Obr. 53 Řez sestavou.

Výroba formy – 3D tisk

Tisk laminačních forem probíhal na tiskárně typu MSLA, konkrétně Original Prusa SL1S (obr. 54). Na vytištění jedné poloviny laminační formy bylo spotřebováno 214 ml fotopolymeru. Tisk trval 10h 27 min.

Obr. 54 Tisk formy.

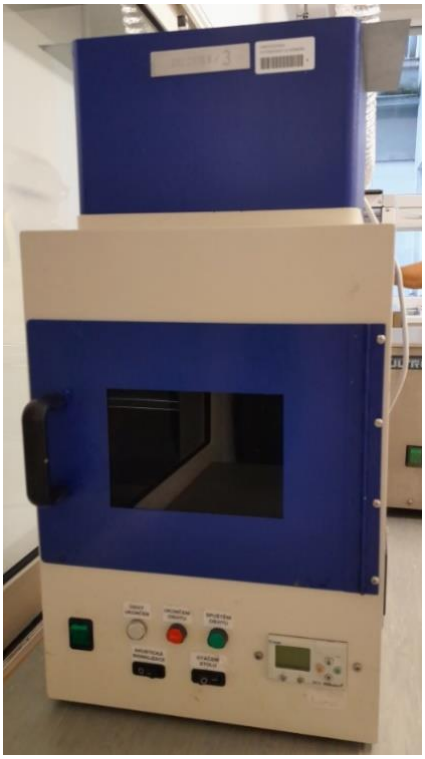
Po ukončení tisku následovalo mechanické oddělení výtisku od podložky (obr. 55). Hotový výtisk je potřeba omýt od nevytvrzeného fotopolymeru (obr. 56). K tomuto účelu byla použita mycí a vytvrzovací stanice PRUSA CW1S, která pro tento účel používá korozivzdornou nádrž naplněnou izopropylalkoholem a magnetickou vrtulí. Magnetická vrtule vytvoří vír, který z modelu omyje zbytky nevytvrzeného polymeru. Tato metoda je mnohem šetrnější než ultrasonické čištění a vymyje i velmi malé objekty.

Obr. 55 Oddělení výtisku od podložky.

Obr. 56 Mytí výtisku.

Vytvrzení je rovněž možno provést ve stanici CW1S, v tomto případě ale bylo pro vytvrzení použito jiné UV vytvrzovací zařízení (obr. 57). Jeho výhodou je možnost UV osvitu při určité teplotě atmosféry v pracovním prostoru a také volitelná délka vytvrzovacího cyklu. Pro zvolený materiál se jedná o teplotu 60 °C a délku vytvrzovacího cyklu 1h. Před procesem vytvrzení je nutné omytý model osušit, zabrání se tak vzniku skvrn na výtisku, které by se jinak mohly v průběhu vytvrzování vytvořit. Vytvrzení po vytisknutí a omytí je důležitý krok, který dodá povrchu modelu optimální vlastnosti. [60]

Po vytvrzení byl podle doporučení výrobce polymeru proveden cyklus „vypékaní“ v elektrické peci (obr. 58). Jednalo se o ohřev na teplotu 100 °C, výdrž na teplotě po dobu 1 h, poté pomalé ochlazení v peci.



Obr. 57 UV vytvrzovací zařízení.

Obr. 58 Elektrická pec.

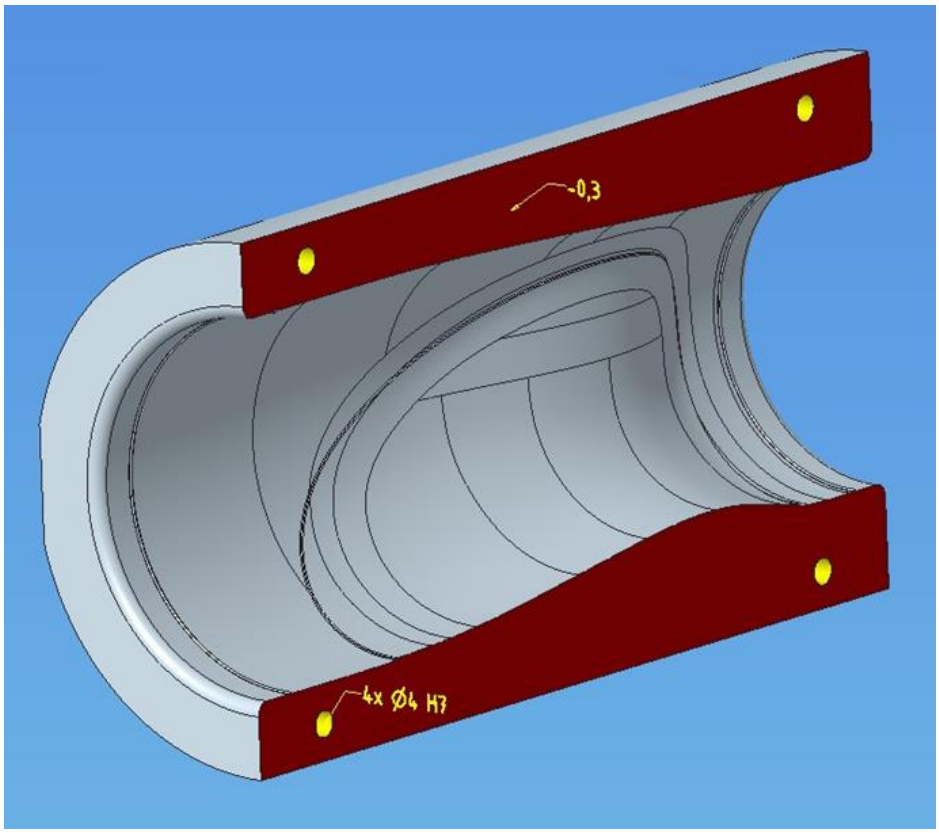
Při tisku objemných součástí je u tohoto typu tiskárny zapotřebí hlídat a případně doplňovat hladinu fotopolymeru v nádobce. V případě jeho nedostatku dojde k přerušení tisku a následně již není zaručena bezproblémová návaznost dalších vrstev výtisku (obr. 59).

Obr. 59 Vadný výtisk – nedostatek polymeru při tisku.

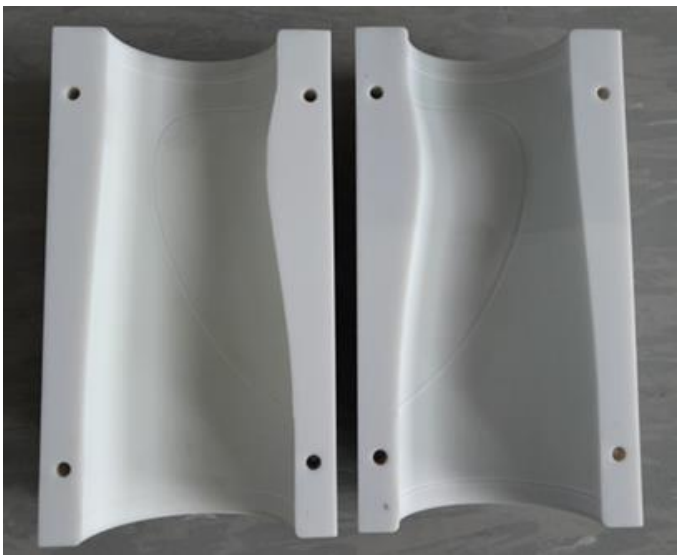
Výroba formy – obrábění

Po vytištění a vytvrzení jednotlivých částí formy následovalo jejich obrobení na konvenční frézce. Jednalo se o obrobení kontaktních ploch dělící roviny formy a o vyvrtání otvorů pro vodící kolíky (obr. 60). Použitý materiál obsahuje určité procento keramické přísady, proto je velmi špatně obrobitelný a standardní nástroje se tak velmi rychle otupují. Vhodné je použití speciálních nástrojů k tomu určených, např. pro obrábění kompozitů nebo skla.

Finálním krokem mechanické úpravy formy bylo zabroušení a vyleštění především funkčních ploch formy, tzn. ploch, které budou v přímém kontaktu s laminátem (obr. 61).



Obr. 60 Model s vyznačením obráběných plochy.

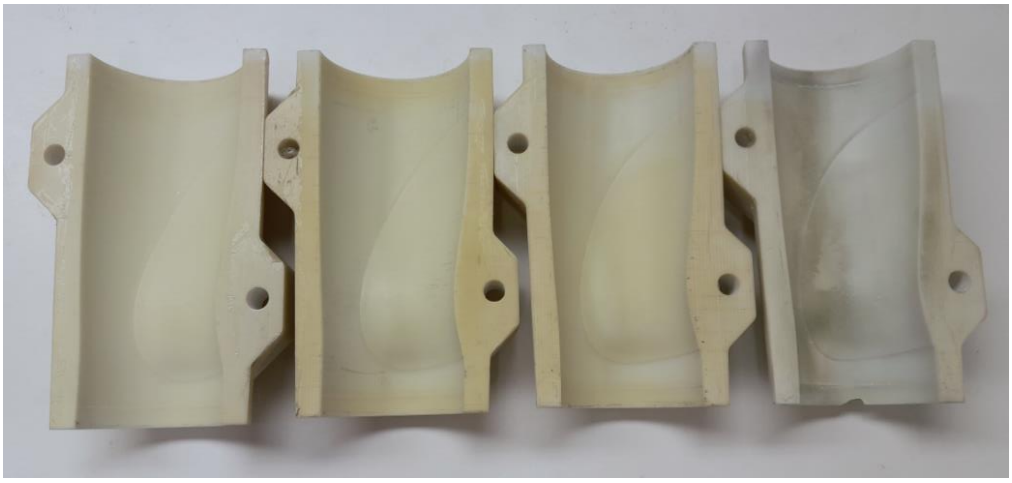


Obr. 61 Obrobená a obroušená forma.

Výroba formy – povrchová úprava

Pro povrchovou úpravu formy bylo otestováno několik variant hydrofobních nátěrů (obr. 62). Jednalo se o tyto povrchové úpravy:

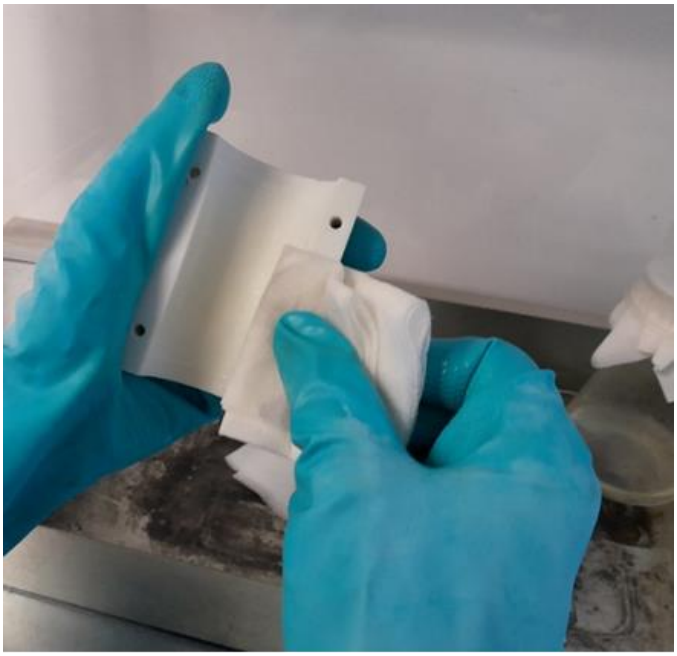
- Weicon teflon – suché mazivo na bázi PTFE, bez tuků, se separačním účinkem.
- Pikatec – nanoochranná politura na bázi keramiky.
- Vodní sklo – vodný roztok křemičitanu sodného (Na_2SiO_3).
- Chem trend – speciální přípravky pro ochranu a separaci forem.



Obr. 62 Povrchy s testovanými povlaky.

Nejlepších výsledků ochrany formy a separačních vlastností pro vyjmutí hotového výrobku z formy bylo dosaženo při použití speciálních prostředků od výrobce Chem-Trend L.P. (obr. 63) Konkrétně se jednalo o plnič Chemlease® 15 Sealer EZ a separátor Chemlease® PMR-90 EZ. Plnič byl nanesen v 10 tenkých vrstvách v patnáctiminutových intervalech, po zaschnutí byl nanesen separátor (obr. 64) v 6 tenkých vrstvách, taktéž v intervalu po patnácti minutách. Povlak separátoru byl po každých dvou vyrobených kusech kompozitního dílu obnoven.

Obr. 63 Chemlease® plnič a separátor.

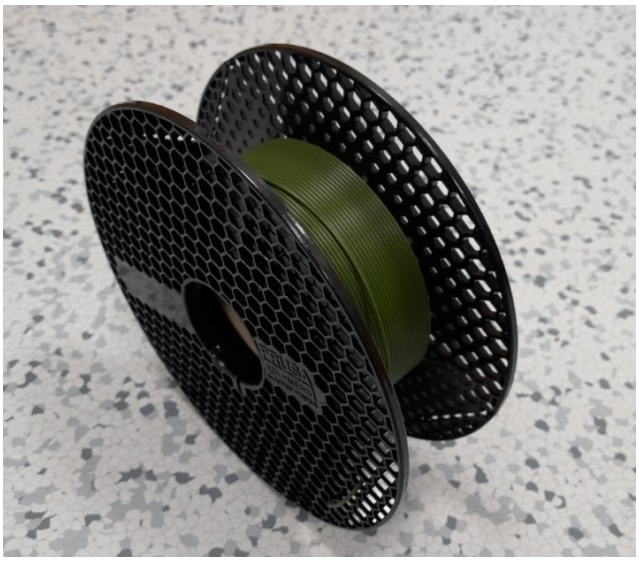


Obr. 64 Aplikace separačního přípravku.

5.2 Forma pro silikonové jádro

Volba technologie výroby a materiálu formy pro silikon

Silikonové jádro bylo vyrobeno odlitím do formy. Forma pro odlévání byla vyrobena obdobně jako laminační forma pomocí technologie 3D tisku. V tomto případě byla ale zvolena metoda FFF (Fused filament fabrication). Jedná se o levnější a rozšířenější alternativu tisku, která se obecně vyznačuje nižší kvalitou tištěných součástí. Nicméně kvalita povrchu formy je pro účely odlévání silikonového jádra dostatečná, a naopak levný a relativně rychlý tisk je výhodou. FFF tiskárny pracují se vstupním materiálem ve formě struny a umožňují tisk širokého spektra materiálů. S ohledem na co nejnižší ekonomickou náročnost byl pro tisk formy silikonového jádra zvolen běžně používaný materiál PLA od výrobce Prusa Research a.s. (obr. 65). Základ materiálu tvoří kukuřičný nebo bramborový škrob, proto je tento materiál plně biologicky odbouratelný, což je dalším benefitem tohoto materiálu.



Obr. 65 Filament PLA Prusament.

Návrh rozměrů jádra/formy pro odlévání

Rozměry jádra mají společně s vlastnostmi použitého materiálu zásadní vliv na velikost tlaku, který vzniká při ohřevu během vytvrzovacího cyklu kompozitu. Znalost konkrétní hodnoty tlaku, kterým je kompozit stlačován při vytvrzování, by umožnila srovnání vytvrzovacích podmínek s ostatními výrobními metodami. Velikosti tlaku by bylo možné zohlednit i při pevnostním dimenzování formy.

Výpočtové řešení této úlohy je však poměrně komplikované. Silikony obecně patří do skupiny materiálů nazývaných elastomery. Tyto materiály se vyznačují hyperelastickým chováním, jsou tak schopny dosahovat velkých hodnot přetvoření bez porušení a bez plastické deformace. Elastomery jsou považovány za izotropní materiály s malou objemovou stlačitelností (vysoké hodnoty Poissonova čísla **μ**). Zásadní překážkou pro výpočet je mimo jiné nelineární elastické deformační chování, které znemožňuje přesný analytický výpočet založený na Hookeově zákoně. Komplikovaný je i postup při využití numerické simulace. Většina běžných simulačních softwarů není schopna pracovat s materiálem bez oblasti plastické deformace, při výpočtech s elastomery se proto pracuje s měrnou deformační energií. Nejčastěji používané hyperelastické konstitutivní izotropní modely jsou [61; 62; 63]:

- Neo-Hooke,
- Mooney-Rivlin,
- Polynomický,
- Ogden,
- Arruda-Boyce.

Pro identifikaci parametrů hyperelastických modelů konkrétního materiálu je nezbytné provést řadu zkoušek[61; 64]:

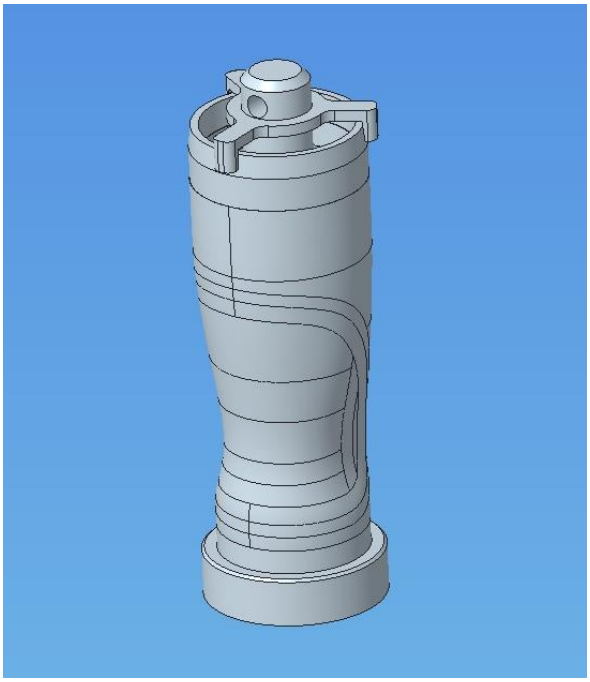
- jednoosá tahová zkouška,
- biaxiální zkouška,
- tah/tlak v rovinné deformaci,
- zkouška smykem,
- zkouška objemové stlačitelnosti.

V případě použití hyperelastického modelu pro simulaci materiálu zatíženého teplotním cyklem je nutno každou ze zkoušek provést při několika různých pracovních teplotách. Složitost zmíněné problematiky, rozsah a pracnost testování značně převyšují možnosti této diplomové práce, proto bylo od výpočtu tlaku jádra upuštěno a byl zvolen experimentální přístup k návrhu a výrobě jádra. [61; 63]

Silikonové jádro bylo navrženo jako duté, což výrazně usnadňuje manipulaci při jeho zasouvání do formy s nalaminovaným prepregem. Vnější rozměry jádra kopírují plochu laminační formy s odsazením 0,8 mm, což odpovídá předpokládané tloušťce stěny laminovaného dílu. Dutinu jádra následně zcela vyplňuje středový trn, je tak zaplněn celý objem dutiny formy.

Návrh a výroba formy

Forma pro silikonové jádro byla navržena jako sestava čtyř dílů (obr. 66) s předpokladem výroby 3D tiskem na FFF tiskárně. Při následném tisku tak nebylo potřeba použít jakýchkoliv tiskových podpor, ani žádných dokončovacích operací. Díly formy byly vytištěny na tiskárně Original Prusa MK4. Bylo použito 15% vyplnění dílů, na vytištění všech částí formy tak bylo spotřebováno 157472 mm^2 filamentu. Při použití filamentu o průměru 1,75 mm to odpovídá 65 m struny. Tisk trval 7 h 33 min. Ihned po vytištění byla forma připravena k použití (obr. 67).



Obr. 66 3D model formy pro odlévání silikonu.

Obr. 67 Rozložená forma na silikon.

5.3 Odlévání silikonového jádra

Pro výrobu jádra odléváním byl zvolen dvousložkový silikon Mold Max™ 20 od výrobce Smooth-On (obr. 68). Jedná se o materiál primárně určený na výrobu forem pro odlévání voskových a sádrových modelů. Po přípravě odlévací formy byly v míchací nádobě dle předepsaného hmotnostního poměru smíseny obě složky silikonu. Po důkladném ručním promíchání byla nádoba se silikonem vložena do vakuové komory (obr. 69) a bylo provedeno několik vakuovacích cyklů. Díky tomuto postupu došlo k výrazně redukci vzduchových bublin v silikonu, což přispělo ke kvalitě odlitku.

Obr. 68 Dvousložkový silikon pro výrobu jádra.

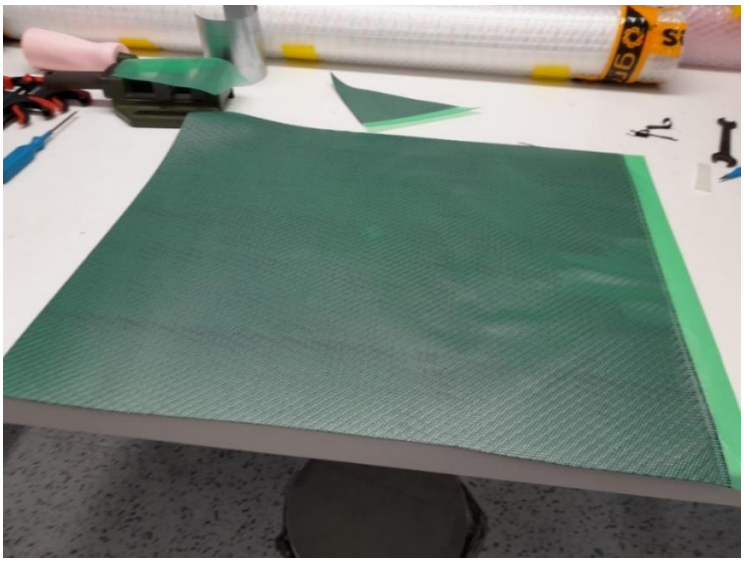
Obr. 69 Vakuová komora.

6 PROTOTYPOVÁ VÝROBA

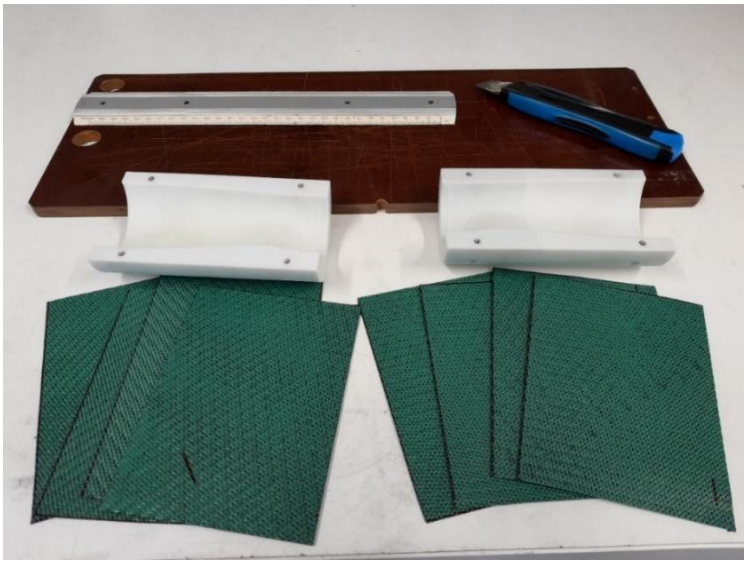
Po přípravě laminačních forem, jádra a veškerých potřeb přišla na řadu samotná prototypová výroba zadané součásti. V podstatě se jednalo se o výrobu karbonového tubusu dvěma způsoby, základem obou postupů je ruční laminace prepregů do formy. Metody se od sebe liší způsobem vytvrzení dílů. První metoda spoléhá na vytvrzení v peci s využitím vakuového pytle, druhý způsob využívá rovněž pece, ale v kombinaci se silikonovým jádrem. Další části této kapitoly se proto věnují podrobnějšímu popisu obou výrobních metod a stručné dokumentaci pracovního postupu.

6.1 Postup výroby dílu metodou vakuového pytle

Výroba laminovaného dílu začala nařezáním vytemperovaného prepregu (obr. 70) na požadované rozměry. Při tomto úkonu bylo potřeba zohlednit velikost formy i tvarovou složitost součásti a na základě toho zvolit vhodný přídavek. Zároveň bylo nutné brát v úvahu orientaci tkaniny. Vzhledem ke zvolené skladbě vrstev laminátu byly pro každý jeden vyráběný tubus pomocí zalamovacího nože, pravítka a řezací podložky připraveny čtyři kusu prepregu s orientací 0° a čtyři kusy s orientací 45° vůči směru osnovy tkaniny (obr. 71).

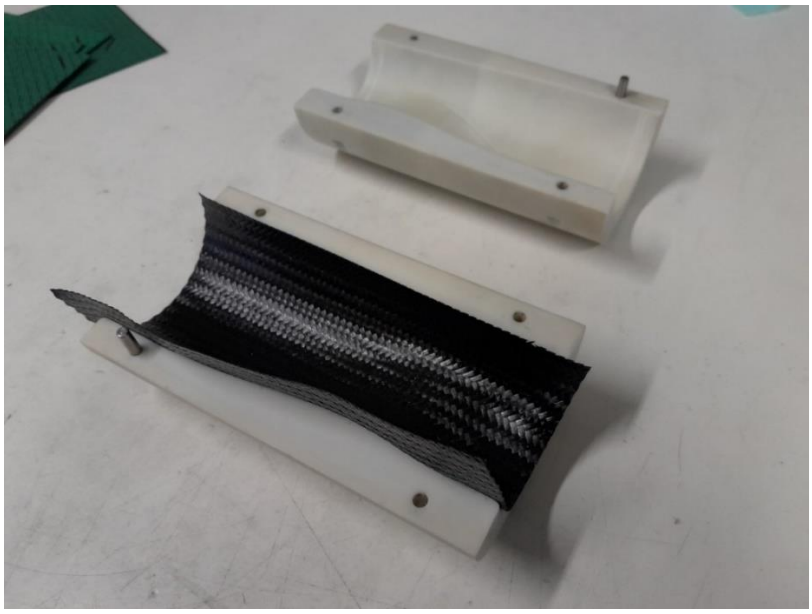


Obr. 70 Vytemperovaný plát prepregu.



Obr. 71 Příprava prepregů a forem.

Po přípravě prepregů bylo možné přistoupit k samotnému laminování jednotlivých vrstev. S ohledem na výše zmíněnou skladbu byla uložena první (vnější) pohledová vrstva s orientací 45° (obr. 72). Tato orientace v případě tkaniny s keprovou vazbou vytváří „pohledové linie“ rovnoběžné s osou tubusu.



Obr. 72 Kladení prepregu do formy.

Položená vrstva byla důkladně přitisknuta a dotlačena k formě tak, aby tkanina kopírovala každý detail požadovaného tvaru. Následně byl prepreg zakrácen tak, aby nepřevyšoval okraje formy. Výjimku tvořila jedna podélná strana, kde bylo nutno ponechat přesah pro následné spojení s druhou polovinou dílu. Obdobným způsobem byly nakladeny i další vrstvy, lišila se pouze orientace směru vláken. Po nakladení dvou vrstev prepregu byly obě poloviny formy zakryty separační fólií, prodyšnou netkanou textilií a vloženy do vakuového pytle (obr. 73). Netkaná textilie umožňuje rovnoměrný odvod vzduchu z celého objemu pytle. Následně byl proveden tzv. debulk, jedná se o odsátí vzduchu z pytle, vytvoření podtlaku a jeho udržení po dobu cca 30 min. Působením okolního atmosférického tlaku dojde k dokonalému přilnutí dosud položených vrstev prepregu k povrchu formy.

Obr. 73 Balení do vakuového pytle – debulk.

Po debulku byly formy s nalaminovanými prepregy vybaleny z pytle a pokračovalo laminování dalších dvou vrstev prepregu. Tím bylo laminování ukončeno. Následovalo uzavření formy, vyložení vnitřní plochy vrstvou separační folie, obalení prodyšnou netkanou textilií a uzavření této sestavy do vakuového pytle.

Obr. 74 Odsávání vzduchu vývěvou.

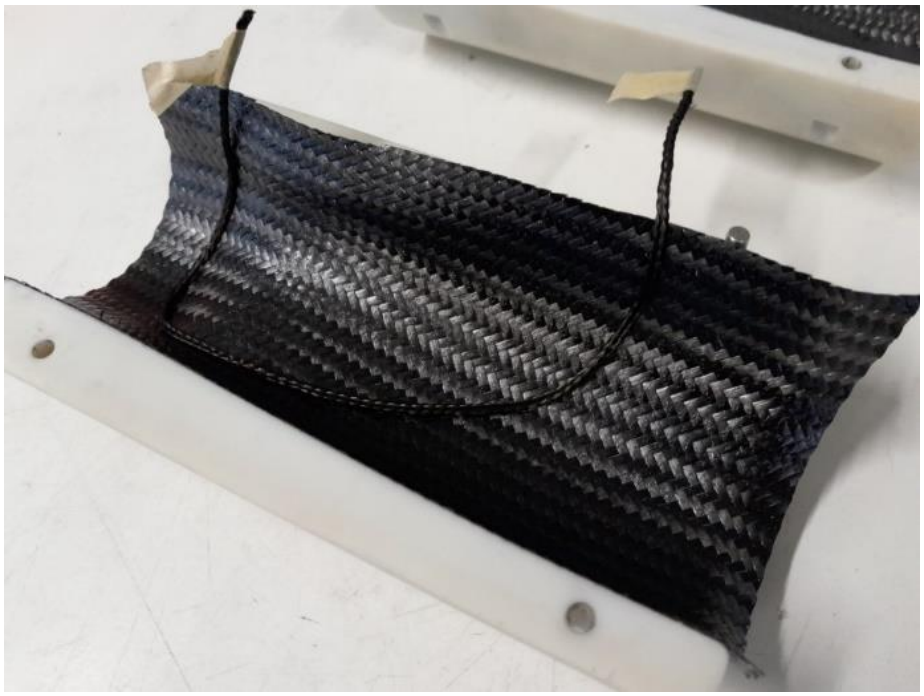
Poté byl vakuový pytel s formou vložen do elektrické pece a připojen na vývěvu. Vývěva z pytle odsála vzduch (obr. 74), následně byla pec spuštěna a při předepsaném teplotním cyklu (obr. 75) došlo k vytvrzení dílu.

Obr. 75 Průběh vytvrzovacího cyklu.

Po vychladnutí byla forma vytažena z pece a vytvrzený kompozitní díl byl vyjmut. Vizuální kontrolou tubusu byla zjištěna pórovitost celého vnějšího povrchu, zejména pak v hraniční oblasti ostrého odsazení plochy (obr. 76).

Obr. 76 Díl vyjmutý z formy.

Pro odstranění vad ve zmíněné oblasti byla upravena skladba vrstev. Mezi první a druhou vrstvu prepregu byl na tuto problematickou hranu umístěn provázek z uhlíkového vlákna (obr. 77). Zbývající část postupu byla totožná jako v předchozím případě.



Obr. 77 Laminace uhlíkového provázku.

Tato úprava zlepšení ve zmíněné oblasti přinesla, nicméně stále zůstávala drobná pórovitost vnějšího povrchu celého dílu. Proto bylo od metody vakuového pytle prozatím upuštěno a další kusy byly vyrobeny metodou silikonového jádra.

6.2 Postup výroby dílu metodou silikonového jádra

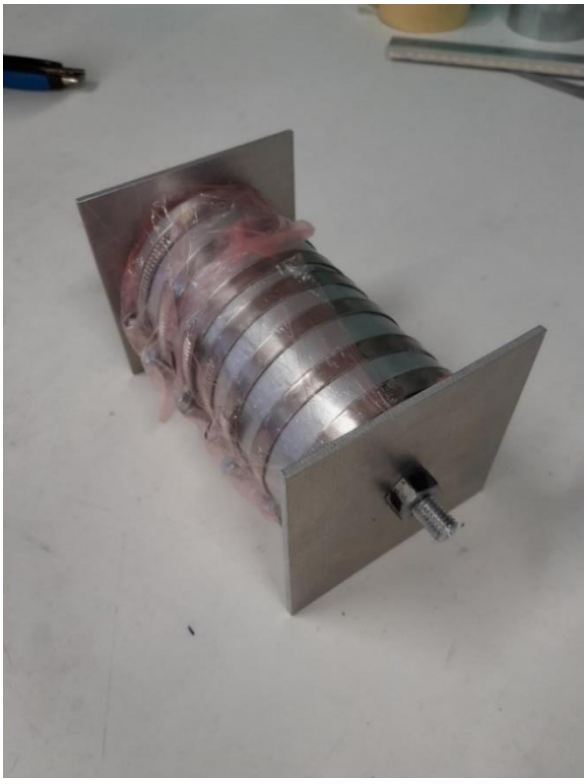
Postup výroby metodou silikonového jádra se od metody vakuového pytle v počáteční fázi nelišil, laminace probíhala totožně, pouze nebyl proveden debulk, protože u této metody neměl prokazatelný vliv na výslednou kvalitu dílu. Rozdíl v postupu nastal až při spojení obou polovin formy (obr. 78), v tomto případě se jednalo o obalení tištěné formy plechem a důkladné stažení ocelovými páskami (obr. 79).

Obr. 78 Spojení formy.

Obr. 79 Stažení ocelovými páskami.

Vnitřek formy byl následně vyložen separační fólií a bylo zavedeno silikonové jádro. Při zavádění bylo potřeba dbát na správné natočení jádra tak, aby souhlasilo s tvarem formy. Poté byl do jádra zaveden středový trn (obr. 80). Jeho úkolem je vymezit volný prostor dutiny jádra, zároveň však umožňuje uzavření formy na čelech (obr. 81).

Obr. 80 Zavádění středového trnu.



Obr. 81 Uzavření formy na čelech.

Po vytvrzení a vychladnutí byla forma vytažena z pece a kompozitní díl byl vyjmut. Při vizuální kontrole dílu byl na první pohled patrný rozdíl v kvalitě povrchu oproti předchozí metodě. Díl měl souvislý jednolitý povrch bez jakékoliv známky pórovitosti nebo odchylky tvaru. Zejména ostrý přechod odsazení plochy, který byl u předchozích kusů problematický, byl dokonale ostrý

a bez vad. Jediným defektem byl vrásčitý „přetok“ pryskyřice, který byl způsoben popraskáním formy v oblasti největšího průměru součásti (obr. 82).

Obr. 82 Díl po vyjmutí z formy.

Vzorový kus tubusu, který měl sloužit pro prezentační účely, byl následně zakrácen na požadovanou délku. Nedostatky v podobě drobných přetoků v místě defektu a dělící roviny byly odstraněny jemným broušením (obr. 83).

Obr. 83 Zakrácený tubus.

7 ZHODNOCENÍ

Poslední částí diplomové práce je zhodnocení dosažených výsledků a volba vyhovující varianty technologie výroby. Tato kapitola se proto věnuje hodnocení kvality vyrobených dílů, popisu chyb vzniklých během výroby a doporučení pro další postup.

Kvalita dílů – metoda vakuového pytle

Všechny díly vyrobené metodou vakuového pytle vykazovaly velkou pórovitost celého povrchu. Dalším problémem byla také „suchá místa“, jež pravděpodobně vznikla nedostatečným odsátím vzduchu a velkou viskozitou pryskyřice během vytvrzovacího cyklu. Jedná se především o tvarově složité oblasti dílu, zejména pak přechod tvarového osazení vnější plochy tubusu (obr. 84). Nízké kvality dosahoval rovněž vnitřní povrch tubusu. Vyskytovaly se zde vrásčité struktury pryskyřice, které se nepravidelně střídaly s oblastmi poměrně hladkého povrchu (obr. 85). Tyto nedostatky byly způsobeny nedokonalým rozložením separační folie po vnitřním povrchu. V případě požadavku na lepší kvalitu vnitřního povrchu dílu (s ohledem např. na lepení vložek do tubusu) by bylo možné na povrch během procesu laminace aplikovat strhávací tkaninu, která by byla z hotového dílu po vytvrzení odstraněna.

Obr. 84 Vnější povrch součásti.

Obr. 85 Vnitřní povrch součásti.

Kvalita dílů – metoda silikonového jádra

Oproti předchozímu způsobu výroby všechny díly vyrobené metodou silikonového jádra vykazovaly hladký jednolitý povrch bez jakýchkoliv známek pórovitosti. Všechny detaily včetně ostrého odsazení vnější plochy byly velmi dobře otištěny (obr. 86). Jediným defektem byl drobný vráscitý „přetok“ pryskyřice, který byl způsoben popraskáním formy v oblasti největšího průměru součásti. Vnitřní povrch tubusu byl rovnoměrný bez výrazných vad (obr. 87). Vnější povrch tubusu se jevil jako matný, což souviselo s kvalitou povrchu formy, která má zásadní vliv na výsledný vzhled dílu.

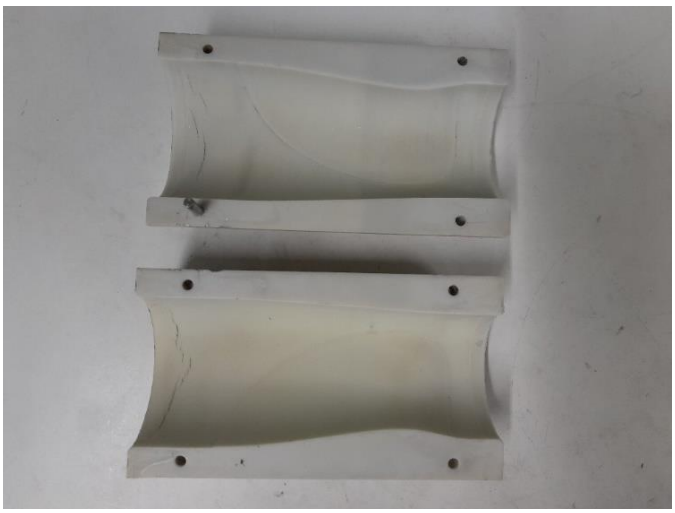
Obr. 86 Vnější povrch součásti.

Obr. 87 Vnitřní povrch součásti.

Chyby v procesu – poškození forem

Při výrobě metodou silikonového jádra došlo po produkci několika kusů tubusu k poškození tištěného těla laminační formy. Ve válcové části vnitřní plochy formy se objevily drobné praskliny (obr. 88), jejich směr odpovídal vrstvám 3D tisku. Do prasklin následně zatekla

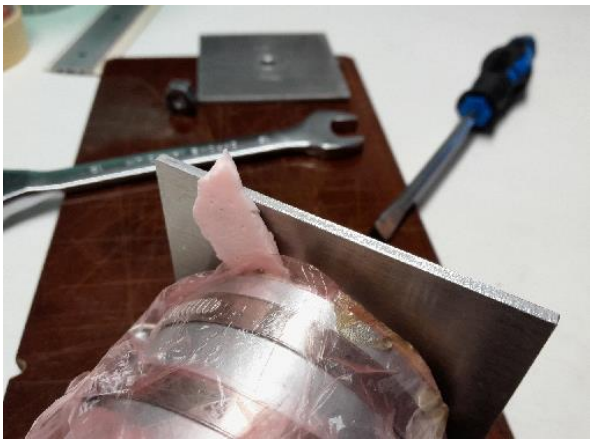
pryskyřice a v těchto místech na povrchu vyráběného tubusu vznikl drobný přetok (zvrásněný povrch). Další defekty se projevily i na čelech formy, kde došlo ke vzniku radiálních trhlin (obr. 89). Ty byly způsobeny vnitřním přetlakem vyvolaným rozpínáním jádra při vytvrzování dílu v kombinaci s koncentrátory napětí ve formě frézovaných plošek na vnější straně formy. Tyto plošky původně sloužily jako technologická základna při dokončování formy obráběním.



Obr. 88 Poškození formy – praskliny v ploše.

Obr. 89 Praskliny na čele.

Při popraskání formy došlo k jejímu částečnému pootevření. Díky tomu silikon zatekl do prostoru vzniklého mezi tělem formy a čelním uzávěrem. To mělo za následek poškození silikonového jádra.



Obr. 90 Pootevřená forma.

Obr. 91 Poškozené jádro.

Doporučení pro další výrobu

Dá se usuzovat, že všechny výše uvedené problémy byly způsobeny nízkou životností materiálu laminační formy. Pro případnou sériovou výrobu by bylo vhodné provizorní tištěnou formu nahradit leštěnou kovovou formou (např. z hliníkové slitiny). Při použití takové formy se dá očekávat větší odolnost, tuhost a trvanlivost. Nehrozí její popraskání, odpadne také riziko poškození jádra. S použitím leštěné kovové formy by také mělo dojít ke zlepšení kvality povrchu, díl by tak měl vykazovat lesklý povrch již po vytažení z formy, bez nutnosti dalších dokončovacích operací.

Obě metody přinesly své výsledky, výrazně lepší kvality dílů bylo ale dosaženo při použití metody silikonového jádra. Pro další rozvoj a produkci je proto doporučen tento výrobní postup.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce přináší přehled technologií pro výrobu kompozitů. Zaměřuje se především na mimoautoklávové způsoby produkce, které pro výrobu kompozitních dílů využívají polotovary ve formě prepregu. Jedná se tak například o metodu konsolidace ve vakuovém pytli s vytvrzením v peci, nebo metodu lisování. Část rešerše se také zabývá specifiky mimoautoklávových prepregů, způsoby jejich produkce a skladováním.

Cílem praktické části práce byl návrh několika variant prototypové výroby a následná výroba zadaného dílu. Byly tedy navrženy dvě výrobní metody. Jednalo se o metodu s využitím vakuového pytle a metodu se silikonovým jádrem. Součástí byl také návrh a výroba forem pro laminaci kompozitního dílu i pro odlití jádra. Při produkci forem bylo využito 3D tisku, konkrétně metod MSLA a FFF. Oba navržené výrobní postupy byly funkční, každou metodou tak bylo vyrobeno několik kusů zadané součásti.

Díly byly následně porovnány především se zaměřením na kvalitu povrchu a defekty struktury. Tubusy vyrobené metodou s využitím vakuového pytle se vyznačovaly poměrně velkou pórovitostí a nejednotnou strukturu povrchu. Oproti tomu tubusy vyrobené metodou silikonového jádra vykazovaly hladký jednotný povrch bez výrazných defektů. Drobné vady u některých dílů byly způsobeny popraskáním formy. Materiál, z něhož byla prototypová forma vyrobena, nedisponoval dostatečnou odolností a trvanlivostí, nevydržel tak opakovanou zátěž v podobě zvýšené teploty v kombinaci s tlakem silikonu při vytvrzení kompozitu v peci. Defekty formy následně způsobily částečné poškození jádra.

Přes veškerá poškození forem a jádra však metoda silikonového jádra dosáhla výrazně lepší kvality vyrobených součástí. Proto je pro další rozvoj a produkci doporučen právě tento způsob výroby. Bližší popis výrobního postupu metodou silikonového jádra uvádí technologická návodka (Příloha 1). Pro případnou sériovou produkci by pravděpodobně byla použita leštěná kovová forma, která by zamezila vzniku zmíněných problémů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. TELLINGER, Adam. *Přesné lepení kompozitních materiálů*. Bakalářská práce, vedoucí Radim Kupčák. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie., 2022. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139736.
2. KOŘÍNEK, Zdeněk. *Definice a historie*. Online. Kompozity. 2017. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/1buTHQ0wJf-MA5sFzvi89f5Tm9r0qKFAb/view. [cit. 2024-04-06].
3. *New From Kruger Optical: KC8 1-8×24 Carbon Fiber Scope*. Online. In: Thetruthaboutguns.com. 2016. Dostupné z: https://cdn0.thetruthaboutguns.com/wp-content/uploads/2016/01/DSC04462.jpg. [cit. 2024-04-06].
4. VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Online. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně. Brno, 2008. Dostupné z: https://docplayer.cz/19075854-Mechanika-kompozitu-prof-rndr-ing-jan-vrbka-drsc-ustav-mechaniky-teles-mechatroniky-a-biomechaniky-fakulta-strojniho-inzenyrstvi-vut-v-brne.html. [cit. 2024-04-06].
5. DAĎOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
6. MACHÁŇ, Ladislav. *Využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou matricí*. Online, Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=111135. [cit. 2024-04-07].
7. SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R. a BUDYNAS, Richard G., VLK, Miloš (ed.). *Konstruování strojních součástí*. Přeložil Martin HARTL. Překlady vysokoškolských učebnic. V Brně: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
8. KUPČÁK, Radim. *Využití kompozitních materiálů pro konstrukci sportovní optiky*. Diplomová práce, vedoucí Ing. Jan Zouhar, PhD. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2019.
9. CAMPBELL, F.C. *Structural composite materials*. Online. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010. ISBN 978-1-62708-314-0. Dostupné z: https://dl.asminternational.org/technical-books/monograph/143/Structural-Composite-Materials. [cit. 2024-04-07].
10. MUSIL, Martin. *Vliv orientace a skladby materiálů na výsledné vlastnosti kompozitního systému*. Bakalářská práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 2017.
11. EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
12. NETTLES, A.T. *Basic Mechanics of Laminated Composite Plates*. Online. NASA Technical Reports Server. 1994. Dostupné z: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19950009349/downloads/19950009349.pdf. [cit. 2024-04-14].
13. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-720-4130-4.
14. LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-704-3273-X.
15. KRATOCHVÍL, Bohumil; ŠVORČÍK, Václav a VOJTĚCH, Dalibor. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.

16. *What is Forged Carbon Fiber? The Ultimate Guide To Forged Composites*. Online. Carbon Fiber Gear. 2007. Dostupné z: https://carbonfibergear.com/blogs/carbonfiber/what-is-forged-composite-a-new-way-of-using-carbon-fiber. [cit. 2024-05-09].
17. *Technical data sheet Forged Composites®*. Online. Automobili Lamborghini S.p.A. 2024. Dostupné z: https://www.lamborghini.com/sites/it-en/files/DAM/lamborghini/forged/Forged%20presentation_EN.pdf. [cit. 2024-05-09].
18. FERABOLI, Paolo; GASCO, Federico; WADE, Bonnie; MAIER, Steve; KWAN, Roger et al. *Lamborghini "Forged composite®" Technology*. Online. In: Advanced Composite Structures Laboratory (ACSL). 2011. Dostupné z: https://www.lambolab.org/wp-content/uploads/03research/pub/05chop/2011-ASC-montreal-forged-suspens-ICE.pdf. [cit. 2024-05-09].
19. *How Performance Automotive Innovates: Lamborghini's Case Study*. Online. RccDB Cars. 2021. Dostupné z: https://www.rccdbcars.com/automotive-blog/how-performance-automotive-innovates-lamborghinis-case-study. [cit. 2024-05-09].
20. KOŘÍNEK, Zdeněk. *Vlákna*. Online. Kompozity. 2016. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/13IaXaUZ1GDDetCdz1KaufjHLRdTLNomu/view. [cit. 2022-04-20].
21. *Set Weave Carbon Fibre Twill – 200gm/m²*. Online. © 2024 Trojan Fibreglass. Dostupné z: https://trojanfibreglass.com.au/product/set-weave-carbon-fibre-twill-240gm%C2%B2/. [cit. 2024-04-17].
22. *Kevlar*. Online. Top-ArmyShop.cz. Dostupné z: https://www.top-armyshop.cz/slovnik-pojmu/kevlar. [cit. 2024-04-17].
23. *Woven Aramid / Kevlar Cloth Reinforcements*. Online. Easy Composites Ltd. Dostupné z: https://www.easycomposites.co.uk/aramid-kevlar-cloth. [cit. 2024-04-17].
24. KNOB, Antonín. *Povrchové úpravy skleněných vláken pro polymerní kompozity*. Disertační práce, vedoucí Prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=136341.
25. MALLICK, P.K. *Composites engineering handbook*. New York: Marcel Dekker, 1997. ISBN 0-8247-9304-8.
26. KOŘÍNEK, Zdeněk. *Matrice*. Online. Kompozity. 2016. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/1xKu2cZA3gkL3PC_DglXrOVUoFScaVFtL/view. [cit. 2022-04-21].
27. KRATOCHVÍL, Bohumil; ŠVORČÍK, Václav a VOJTĚCH, Dalibor. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
28. JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
29. *How to Hand Laminate & Vacuum Bag a Simple Carbon Fibre Part*. Online. Easy Composites Ltd. Dostupné z: https://www.easycomposites.co.uk/learning/hand-laminate-vacuum-bag-simple-part. [cit. 2022-04-22].
30. *Technologie výroby kompozitů*. Online. Havel composites. Dostupné z: https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%C3%BDroby%20kompozit%C5%AF.pdf. [cit. 2022-04-21].
31. BHATNAGAR, Ashok. *Lightweight Ballistic Composites*. Woodhead Publishing, 2006. ISBN 978-1-85573-941-3.

32. *A Brief Look Inside the Prepreg Manufacturing Process*. Online. Composites One. 2024. Dostupné z: https://www.compositesone.com/a-brief-look-inside-the-prepreg-manufacturing-process/. [cit. 2024-05-12].
33. CAMPBELL, F. *Structural composite materials*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010. ISBN ISBN 978-1-61503-037-8.
34. *How to Make Prepreg Carbon Fibre Moulds Using Tooling Prepreg*. Online. Easy Composites Ltd. Dostupné z: https://www.easycomposites.co.uk/learning/how-to-make-prepreg-carbon-fibre-moulds. [cit. 2022-04-22].
35. *Prepreg carbon fiber parts / composites, autoclave composites*. Online. Dexcraft. 2019. Dostupné z: http://www.dexcraft.com/articles/carbon-fiber-composites/prepreg-autoclave/. [cit. 2024-05-10].
36. *Autoclave*. Online. Composites One. 2024. Dostupné z: https://www.compositesone.com/process/autoclave/. [cit. 2024-05-10].
37. KOŘÍNEK, Zděněk. *Technologie*. Online. Kompozity. 2016. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/1T7PXbyTzBYqLZ4fr4fPnWihE5DpTlUKb/view. [cit. 2022-04-21].
38. *Filament winding*. Online. Addcomposites Oy. 2023. Dostupné z: https://www.addcomposites.com/post/filament-winding. [cit. 2024-04-17].
39. *Composite output shaft ready for automotive proving ground*. Online. CompositesWorld. 2020. Dostupné z: https://www.compositesworld.com/articles/composite-output-shaft-ready-for-automotive-proving-ground. [cit. 2024-05-10].
40. *Resin transfer moulding processes*. Online. CSIR- National Aerospace Laboratories. 2020. Dostupné z: https://www.nal.res.in/en/techniques/resin-transfer-moulding-processes. [cit. 2024-05-10].
41. *Vacuum Infusion Complete Guide*. Online. Fibre Glast Developments Corp. Dostupné z: https://www.fibreglast.com/product/vacuum-infusion-Guide/Learning_Center. [cit. 2022-04-22].
42. *Reaction Injection Molding Process*. Online. IQS Directory. Dostupné z: https://www.injection-molded-plastics.net/reaction-injection-molding/. [cit. 2024-05-10].
43. ADVANI, Suresh G a HSIAO, Kuang-Ting. *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*. Online. Woodhead Publishing, 2012. ISBN 9780857096258. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780857090676500109?via%3Dihub. [cit. 2024-04-18].
44. *Vacuum assisted resin transfer molding process (VARTM)*. Online. JHM Technologies, Inc. Dostupné z: https://www.rtmcomposites.com/process/vacuum-assisted-resin-transfer-molding-vartm. [cit. 2022-04-22].
45. CAMPBELL, F.C. *Manufacturing processes for advanced composites*. Oxford: Elsevier, 2004. ISBN 18-561-7415-8.
46. CENTEA, Timotei.; GRUNENFELDER, Lessa a NUTT, Steven. *A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations*. Online. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2014. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.029. [cit. 2024-05-12].
47. PARK, Sang Yoon; CHOI, Chi Hoon; CHOI, Won Jong a HWANG, Seong Soon. *Applied Composite Materials*. Online. 2018. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s10443-018-9688-y. [cit. 2024-05-12].

48. *Storage, Handling and Processing Method Statement for: BhorPreg® Prepreg Systems*. Online. Bhor Chemicals and Plastics Pvt. Ltd. 2021. Dostupné z: https://bhor.com/AdminMedia/file/61b0c2d5f1c4f.pdf. [cit. 2024-05-11].
49. HUBERT, Pascal; CENTEA, Timotei; GRUNEFELDER, Lessa; NUTT, Steven; KRATZ, James et al. 2.4 Out-of-Autoclave Prepreg Processing. Online. In: *Comprehensive Composite Materials II*. Elsevier, 2018, s. 63-94. ISBN 9780081005347. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09900-8. [cit. 2024-05-10].
50. *Epoxy prepreg processing*. Online. Gurit Services AG. 2018. Dostupné z: https://www.gurit.com/wp-content/uploads/2022/12/Prepreg-Processing-Guide.pdf. [cit. 2024-05-11].
51. GRUNENFELDER, Lessa; DILLS, Andy; CENTEA, Timotei a NUTT, Steven. *Effect of prepreg format on defect control in out-of-autoclave processing*. Online. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.027. [cit. 2024-05-12].
52. *Thermoset Prepreg Systems*. Online. C.A.Litzler Co. 2020. Dostupné z: https://www.calitzler.com/prepreg-systems/thermoset-prepreg-systems/. [cit. 2024-05-12].
53. *Composite Prepregs – Manufacturing, Benefits and Applications*. Online. AZO materials. 2013. Dostupné z: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8353. [cit. 2024-05-12].
54. DIMESKI, Dimko a SREBRENKOSKA, Vineta. *Advanced prepreg ballistic composites for military helmets*. Online. International scientific conference on defensive technologies OTEH. 2014. Dostupné z: https://core.ac.uk/download/pdf/35337928.pdf. [cit. 2024-05-12].
55. *Enhanced longitudinal compressive strength of CFRP composites with interlaminar CNT film prepreg from hot-melt pre-impregnation*. Online. ZHU, Zaibin; LU, Kangyi; LING, Hui; YU, Yunhua; LI, Gang et al. Science direct. 2022. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101457. [cit. 2024-05-12].
56. *Do you know the storage temperature of carbon fiber prepreg?* Online. Tanchain. 2022. Dostupné z: https://www.tchaintech.com/NDETAIL/Do_you_know_the_storage_temperature_of_carbon_fiber_prepreg. [cit. 2024-05-11].
57. *Behind the curtain*. Online. Argonaut Cycles USA. 2020. Dostupné z: https://argonautcycles.com/2020/03/31/behind-the-curtain/. [cit. 2024-05-12].
58. *Prepreg and b-stage Transportation and Storage Guidelines*. Online. Norplex Micarta. 2021. Dostupné z: https://www.norplex-micarta.com/wp-content/uploads/2021/02/Prepreg_Transportation_Storage.pdf. [cit. 2024-05-11].
59. *Liqcreate Composite-X*. Online. Liqcreate. 2021. Dostupné z: https://www.liqcreate.com/downloads/tds/TDS%20Liqcreate%20Composite-X%20%5BV1%20jan%202021%5D.pdf. [cit. 2024-05-22].
60. *Mycí a vytvrzovací stanice (CW1S)*. Online. Prusa Research. 2024. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/produkt/myci-a-vytvrzovaci-stanice-cw1s/. [cit. 2024-05-22].
61. ŘIHÁČEK, Jan. *Osobní konzultace: Materiálové modely v MKP*. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2024.
62. SEBERA, Václav a TIPPNER, Jan. *Možnosti využití hyperelastických materiálových modelů v numerické analýze lisování dřevotřískového koberce*. Online. Acta Universitatis

Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2009. Dostupné z: https://acta.mendelu.cz/pdfs/acu/2009/04/10.pdf. [cit. 2024-05-22].

63. DARIJANI, Hossein a NAGHDABADI, Reza. Hyperelastic materials behavior modeling using consistent strain energy density functions. Online. *Acta Mechanica*. 2010, roč. 213, č. 3-4, s. 235-254. ISSN 0001-5970. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s00707-009-0239-3. [cit. 2024-05-22].

64. *Defining hyperelastic behavior using test data*. Online. IT Procurement and Licensing Solutions Documentation Server. 2022. Dostupné z: https://docs.software.vt.edu/abaqusv2022/English/SIMACAEGSARefMap/simagsa-c-matdefinehyper.htm. [cit. 2024-05-22].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
E	modul pružnosti	[GPa]
E_t	modul pružnosti v tahu	[GPa]
E_{11}	modul pružnosti rovnoběžně s vlákny	[GPa]
E_{22}	modul pružnosti kolmo na vlákna	[GPa]
γ	poměrné smykové přetvoření	[-]
γ_{xy}	smyková deformace xy	[-]
ε	poměrné délkové přetvoření	[-]
$\varepsilon_{f,krit}$	kritické délkové přetvoření-tažnost vlákna	[%]
$\varepsilon_{m.krit}$	kritické délkové přetvoření-tažnost matrice	[%]
ε_{xx}	rovinná deformace ve směru x	[-]
ε_{yy}	rovinná deformace ve směru y	[-]
θ	úhel orientace vláken	[°]
μ	Poissonovo číslo	[-]
ρ	hustota	$[10^3 kgm^{-3}]$
σ	normálové napětí	[MPa]
σ_{Pf}	mez pevnosti vlákna	[MPa]
σ_{Pt}	mez pevnosti v tahu	[MPa]
σ_{Pt}/ρ	měrná pevnost v tahu	$[MPa/kgm^{-3}]$
τ	smykové napětí	[MPa]

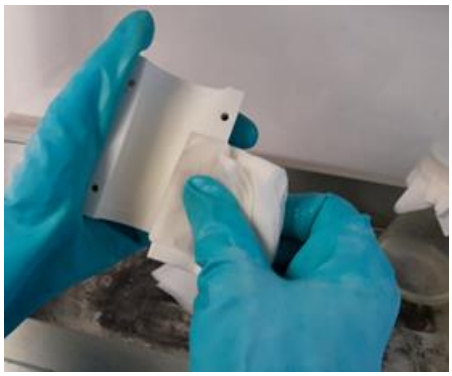
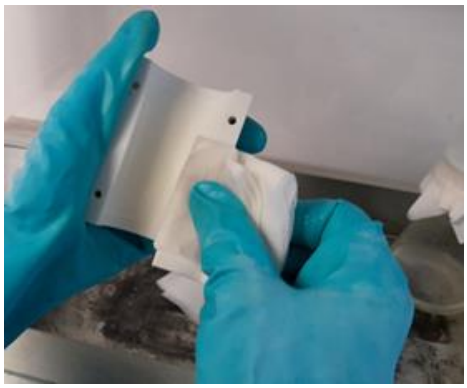
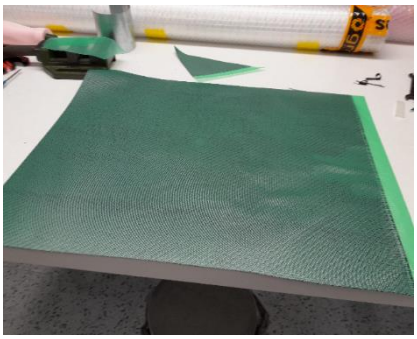
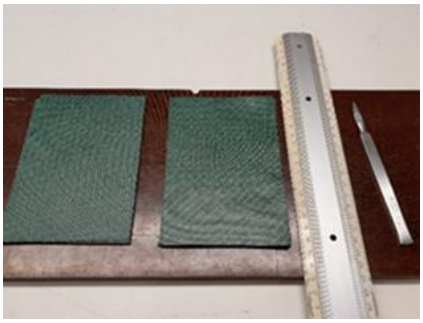
Zkratky

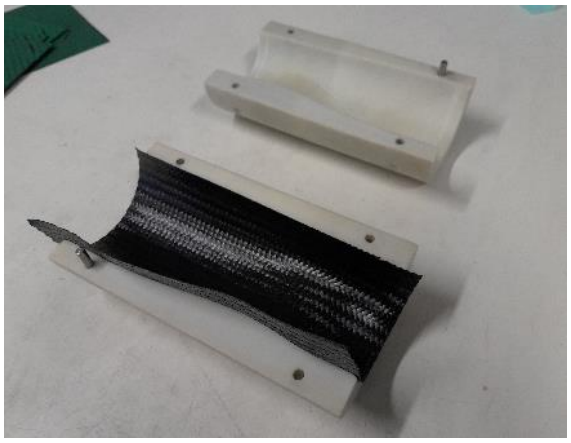
Označení	Legenda
B-stage	částečné vytvrzení
C	Corrosion (koroze)
E	Electric (elektrické)
FFF	Fused Filament Fabrication (tisk z termoplastu)
HM	High Modulus (vysoký modul pružnosti)
HS	High Strength (vysoká pevnost)
MSLA	Masked Stereolithography (makovaná stereolitografie)
OOA	Out Of Autoclave (mimoautoklávový)
PAN	polyacrylonitril
PE	polyethylen
PLA	polylaktid (kyselina polymléčná)
PTFE	polytetrafluorethylen
RIM	Reaction Injection Molding (vstřikování s reakcí)
RTM	Resin Transfer Molding (vstřikování pryskyřice)
S	Symetric (symetrická)
S	Strenght (pevné)
T	Total (celková)
UV	UltraViolet (ultrafialové)
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (vstřikování pryskyřice pod vakuem)
VBO	Vacuum Bag Only (vytvrzení ve vakuovém pytli)

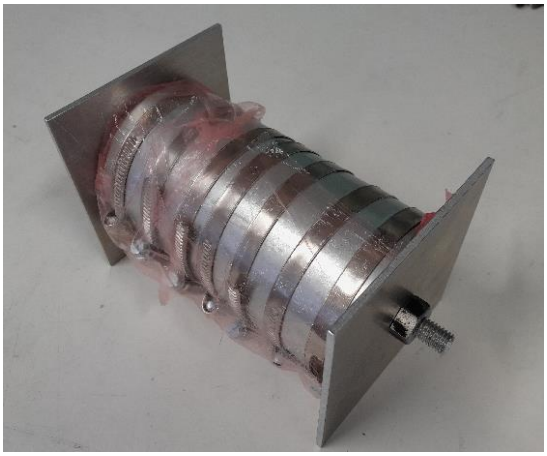
SEZNAM PŘÍLOH

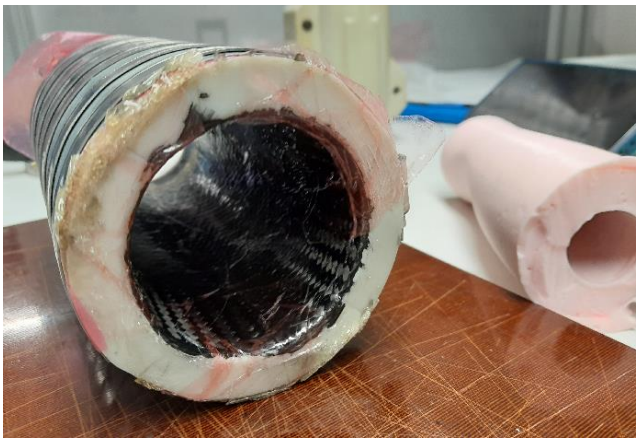
Příloha 1 Postup výroby kompozitního dílu metodou silikonového jádra

Příloha 1 – Postup výroby kompozitního dílu metodou silikonového jádra

Krok	Činnost	Ilustrační obrázek
1	Příprava nové formy: nanesení plniče Chemlease® 15 Sealer EZ – 10 tenkých vrstev po 15 minutách, 1 h pro plné vytvrzení. Tento krok pouze u nové formy.	
2	Příprava formy: očištění, nanesení separátoru Chemlease® PMR-90 EZ – 6 tenkých vrstev po 15 minutách, 30 min pro plné vytvrzení. Obnova vrstvy vždy po 2 vyrobených dílech.	
3	Příprava prepregu: vytažení z mrazáku, temperování na pokojovou teplotu v uzavřeném obalu (cca 30 min). Vytažení prepregu z pytle.	
4	Příprava prepregu: Řezání na požadovaný formát, s ohledem na orientaci vláken. Dle požadované skladby 4 kusu prepregu s orientací 0° a 4 kusy s orientací 45°.	

5	Kladení prepregu do formy. Zakrácení přesahů prepregu, na jedné podélné straně ponechán přesah 20 mm pro spojení s druhou polovinou.	
6	Spojení formy. Vyložení dutiny separační fólií.	
7	Obalení formy plechem, stažení ocelovými páskami.	
8	Zavedení jádra do formy.	

9	Zavedení středového trnu do dutiny jádra.	
10	Uzavření formy na čelech.	
11	Vložení formy do pece, spuštění vytvrzovacího cyklu.	
12	Vytvrzení dílu dle předepsaného teplotního cyklu (4 h 20 min).	

13	Vyjmutí formy z pece, otevření formy, vyjmutí dílu z formy.	
14	Pohledová kontrola dílu.	
15	Zakrácení na požadovanou délku, zabroušení hran a drobných přetoků.	