



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VÝROBA KOMPOZITNÍHO DÍLCE S VYUŽITÍM PREPREGŮ BEZ AUTOKLÁVU

MANUFACTURING OF A COMPOSITE PART USING OUT OF AUTOCLAVE PREPREGS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Krátký

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim

Kupčák

BRNO 2024

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Jan Krátký**  
Studijní program: Základy strojírenského inženýrství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
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 bakalářské práce:

## Výroba 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 bakalářské práce:

- rešerše technologie výroby kompozitů se zaměřením na mimoautoklávové prepregy
- návrh technologie výroby součástí
- výroba součástí
- zhodnocení výsledků

### 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 bakalářské 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 bakalářská práce se zabývá problematikou výroby kompozitního dílce pomocí mimo-autoklávových prepregů. V teoretické části jsou popsány kompozitní materiály, jejich vlastnosti a různé technologie výroby se zvláštním důrazem na prepregy a proces vytvrzování. Praktická část zahrnuje návrh testovacího vzorku, přípravu forem, kladení prepregů, laminaci a vytvrzování. Byly provedeny tři laminace s použitím různých technologií. Výsledky ukazují, že kvalita povrchu kompozitních dílců je významně ovlivněna kvalitou formy a vytvrzovacím tlakem. Atmosférický tlak se během vakuového lisování ukázal být nedostatečný pro dosažení požadované kvality povrchu tvarových dílů. Hlavním závěrem práce je, že mimo-autoklávové technologie mají potenciál pro výrobu kvalitních kompozitních dílců, avšak vyžadují další optimalizaci procesů a materiálů.

### **Klíčová slova**

Kompozitní materiál, uhlíkové vlákno, prepreg, mimo-autoklávová technologie

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the production of a composite part using out-of-autoclave prepregs. The theoretical part describes composite materials, their properties and different manufacturing technologies with special emphasis on prepregs and the curing process. The practical part includes test specimen design, mould preparation, prepreg placement, lamination and curing. Three laminations were carried out using different technologies. The results show that the surface quality of the composite parts is significantly affected by the mould quality and curing pressure. Atmospheric pressure proved insufficient to achieve the desired surface quality of the moulded parts during vacuum pressing. The main conclusion of the paper is that off-autoclave technologies have the potential to produce high quality composite parts, but require further optimization of processes and materials.

### **Keywords**

Composite material, carbon fiber, prepreg, out-of-autoclave technology

---

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRÁTKÝ, Jan. *Výroba kompozitního dílce s využitím prepregů bez autoklávu* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157966>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Radim Kupčák.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci na téma Výroba 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

.....  
Jan Krátký

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

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

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

---

**OBSAH**

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD .....	10
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....	11
1.1 Vlastnosti polymerních kompozitů .....	11
1.2 Výztuž .....	12
1.2.1 Geometrie a skladba .....	12
1.2.2 Materiály vláken .....	13
1.2.3 Srovnání vláken .....	15
1.3 Matrice.....	15
1.3.1 Termosetická pojiva .....	16
1.3.2 Termoplastická pojiva .....	17
1.3.3 Srovnání termosetů a termoplastů .....	17
1.4 Technologie výroby kompozitních dílců.....	17
1.4.1 Ruční kladení za mokra .....	18
1.4.2 Navíjení .....	18
1.4.3 Infuze .....	18
1.4.4 Pultruze.....	19
1.4.5 Vstřikování .....	19
2 PREPREG.....	20
2.1 Druhy prepregů.....	20
2.2 Výroba prepregů.....	21
2.2.1 Pryskyřicové systémy .....	21
2.2.2 Metoda aplikace pryskyřice:.....	21
2.2.3 Stárnutí prepregů .....	23
2.2.4 Skladování a manipulace s prepregy .....	23
2.3 Kladení prepregů .....	23
2.4 Tvrzení/lisování prepregů.....	24
2.4.1 Autokláv .....	24
2.4.2 Mimoautoklávové způsoby vytvrzování .....	25
2.5 Použití prepregů .....	25
3 PRAKTICKÁ ČÁST .....	26
3.1 Motivace (představení problému).....	26
3.2 Seznámení se s technologií.....	26
3.2.1 Příprava formy (separace) .....	26



---

3.2.2	Kladení prepregů .....	27
3.2.3	Laminace .....	27
3.3	Geometrie vzorku .....	29
3.4	Návrh a výroba formy .....	30
3.5	Realizace .....	31
3.5.1	Příprava formy .....	31
3.5.2	Kladení.....	31
3.5.3	Vytvrzování .....	31
4	DISKUSE .....	34
4.1	Vyčíslení nákladů .....	34
4.2	Vyhodnocení .....	35
4.3	Navazující výzkum.....	35
	ZÁVĚR.....	36
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	37

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam příloh

---

## ÚVOD

Díky svým jedinečným vlastnostem jsou kompozitní materiály klíčovým prvkem v mnoha průmyslových odvětvích. Kombinují relativně vysokou pevnost s nízkou hmotností, což je nedocenitelné zejména pro letecké a vesmírné aplikace, kde snížení hmotnosti součástí snižuje spotřebu paliva a tím i náklady na přepravu. [1]

S nižšími náklady na výrobu součástí z kompozitních materiálů se s nimi čím dál častěji setkáváme i v každodenním životě. Například v automobilovém průmyslu má nižší hmotnost přímý vliv na nižší spotřebu paliva a následný pokles emisí. Použití kompozitů, jako je karbon, však často především podporuje prémiový vzhled běžných dílů, a to nejen v automobilech. [2]

V závislosti na požadovaných vlastnostech, geometrii a použitých materiálech existují různé technologie výroby kompozitních dílců. Nejuniverzálnější a prakticky nejjednodušší je použití prepregů. S touto technologií kompozitů je již dlouhou dobu spojen proces vytvrzování za použití autoklávu. Toto zařízení pracuje s vysokými teplotami a tlaky, čímž vytváří ideální podmínky pro pevné a odolné kompozitní konstrukce. [3]

Využití autoklávu má ale i nevýhody. Autoklávy jsou spojeny se značnými náklady na pořízení a provoz stroje, zejména u velkých dílů. Konstrukce dílů jsou omezeny dostupnými rozměry komor, a rychlost výroby je omezena. Velké autoklávy musí být někdy neefektivně využívány pro malé díly. Vzhledem k stále běžnějšímu používání kompozitních materiálů je snaha hledat technologie, které pro vytvrzení nebudou vyžadovat drahý autokláv, zejména takové, které umožňují vyrábět díly v autoklávové kvalitě. [4]

Cílem této práce je zkoumat technologii procesu výroby kompozitního dílce s použitím tzv. „mimo-autoklávových prepregů“. Cílem je vyrobit dílec a zhodnotit, zda dosahuje dostatečných vlastností i bez použití autoklávu, případně odladit chyby v procesu výroby touto technologií.

---

# 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozity představují obecně synergické spojení různých materiálů. V kontextu této práce se ale jedná konkrétně o polymerní kompozitní materiály. Tato skupina kompozitů zahrnuje všechny vyztužené plasty. Pravděpodobně nejznámější z nich je karbon (CFRM), a to především díky svým počátečním speciálním a prémiovým aplikacím. Díky novým technologiím se s ním ale nyní můžeme setkávat stále častěji i v každodenním životě.

## 1.1 Vlastnosti polymerních kompozitů

Kompozity jsou materiály vytvořené kombinací většinou dvou odlišných složek (typicky výtuzí a pojivem). Poskytují vlastnosti, které jednotlivé složky samy o sobě dosáhnout nedokážou. Vytuz je nejčastěji tvořena buď částicemi, nebo vlákny. Právě při použití vláken coby výtuz, získají kompozity svou specifickou vlastnost, anizotropii (materiál vykazuje v různých směrech rozdílné vlastnosti). Zároveň právě obsahem vláken je řízena pevnost kompozitních součástí.

Záleží na typu součásti a typu namáhání, jestli tato vlastnost je, nebo není žádaná. Právě v závislosti na aplikaci se volí nejen typ pojiva, materiál a geometrie vláken, jakož i jejich případná orientace, ale i technologie výroby. Návrh kompozitních součástí se tak značně komplikuje. Mimo anizotropii mají kompozity ve svém chování další zvláštnosti, které lze souhrnně popsat tzv. paradoxy kompozitních materiálů:

### **Paradox pevného materiálu**

Skutečná pevnost materiálu často nedosahuje úrovně, která by odpovídala teoretickým výpočtům (F. Zwicky).

### **Paradox vláknité struktury**

Vláknitý materiál může mít výrazně vyšší pevnost než ten samý materiál ve formě kompaktní hmoty. Čím jemnější je vlákno, tím vyšší je jeho pevnost (A. A. Griffith).

### **Paradox délky zatížení**

Naměřená pevnost jednotlivého vlákna se zvyšuje s jeho kratší délkou zatěžování.

### **Paradox kompozitního materiálu**

Kompozitní materiál jako celek může absorbovat napětí, které by slabší složku materiálu zničilo. Pevnější složka kompozitu může přenášet vyšší podíl teoretické pevnosti, než by tomu bylo při samostatném namáhání (G. Slayter).

Jedná se o základní principy chování polymerních kompozitů. Jednotlivé paradoxy detailněji vysvětlil prof. Dr. Ehrenstein v knize Polymerní kompozitní materiály[1].

## 1.2 Výztuž

Za výztuž se v kompozitním materiálu považuje ta fáze, která je diskontinuální, tedy nespojitá a vykazuje podstatně lepší mechanické vlastnosti (tvrdost, tuhost, pevnost) než matrice [5]. Její mechanické a chemické vlastnosti jsou ovlivněny různou geometrií, skladbou a různým materiálem.

### 1.2.1 Geometrie a skladba

Částicové výztuže mají všechny své rozměry podobné, mohou mít kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý nebo nepravidelný tvar. Vlákná mají v jednom směru výrazně větší rozměr než ve směrech ostatních [6]. Běžně mívají průměr od 5 do 27  $\mu\text{m}$ , jedná se o kompromis mezi vyšší pevností v tahu, a zdravotní nezávadností. U tenčích vláken roste riziko pronikání do plic (karcinogenost). Vlákná větších průměrů mají zase vyšší odolnost při zatížení tlakem (proti vzpěru). Dlouhá vlákna se vyrábí kontinuálně různými metodami vzhledem k jejich materiálu. Z elementárních kontinuálních vláken se vyrábí polotovary vhodné pro další zpracování. [1]

#### Krátká vlákna

Z kontinuálních vláken jsou vyráběny sekáním, nebo v případě křehkých vláken mletím. Mletá vlákna (délka 0,1 až 5 mm) se využívají jako výztuž termoplastů při vstřikování, sekaná vlákna (délka 25 až 50 mm) u rohoží určených k výrobě lisováním. [7]

#### Roving

Přímý roving neboli pramenec se, podle materiálu a aplikace, skládá z 6 až 50000 rovnoběžných, častěji nestočených kontinuálních vláken[1]. (Pokud by byla vlákna stočena kolem podélné osy, jedná se o tzv. „spředený roving“, případně „jednoduchou přízi“.) Roving je dále zpracováván sekáním, navíjením, nebo tkaním. Lze ho též použít samostatně na podélné vyztužení dílů. Charakteristickým parametrem rovingu je lineární hustota, případně jemnost. Jednotkou lineární hustoty je tex (hmotnost v gramech na kilometr rovingu). Jemnost se udává v tisících elementárních vláken na pramenec (např. 50 K). Čím je uvedené číslo nižší, tím je roving dražší (protože je jemnější). Rovingy jsou dodávány na válcových nebo kónických cívkách. [7]

#### Rohože

Jedná se o netkané textilie. Charakteristickým parametrem je „gramáž“ ( $\text{g}/\text{m}^2$ )[7]. Vyrábí se kontinuálně, nahodilým uspořádáním sekaných vláken (25 až 50 mm). Sekaná vlákna jsou spojena práškovými či emulzními pojivy [8]. Vzniklý polotovar podobný plsti lze navíjet na role.

Jiný způsob výroby je za použití kontinuálních vláken. Vlákná v těchto rohožích nemusí být spojeny pojivem. Soudržnost je zajištěna jen vzájemným propletením. Přesto se jednotlivé vrstvy rohože opět propojeny pojivem. [1]

Další kategorií jsou povrchové (závojové) rohože. Jedná se o jemné rohože s velmi nízkou gramáží (až 10krát nižší oproti běžným rohožím) [8]. Používají se jako vrchní vrstva laminátu. Mají vyšším obsah pryskyřice, díky čemuž mají zamezit vzniku trhlin. [1]

Existují i speciální rohože s voštinovými strukturami, nebo Corematy® různých druhů opět podle využití. Jejich velkou výhodou je menší spotřeba skelné výztuže a pryskyřice. Zvyšují pevnost a tloušťku kompozitu, a zároveň redukuje výslednou hmotnost. [8]

## Tkaniny

Tkanina je plochý útvar, který vzniká propojením dvou vzájemně kolmo probíhajících soustav pramenců (většinou nekroucených rovingů, s jemností kolem 3 K), osnovy a útku [7]. Jsou charakterizovány gramáží podobně jako rohože. Podle typu křížení vláken rozlišujeme tři základní druhy vazby (plátnová, keprová a atlasová). [1]

Podíl vláken v kolmých směrech může být různý, čímž lze dosáhnout různých vlastností pro různé směry. Vedle množství vláken v různých směrech lze kombinovat i různé materiály vláken, tyto tkaniny pak nesou přívlastek „hybridní“. To opět vede k vylepšení určitých vlastností pro různé aplikace. [7]

Tkaniny jsou určeny pro kontaktní laminování, pultruzi, navíjení a výrobu tkaninových prepregů [7]. Často se využívá v kombinaci s rohožemi pro zlepšení mechanických parametrů např. při výrobě lodí nebo nádrží [8]. Přízové tkaniny se většinou používají jen jako filtrační a izolační tkaniny, nikoli ke konstrukci. [7]

### 1.2.2 Materiály vláken

Volba materiálu je stěžejním faktorem návrhu, odvíjí se od ní nejen chemické, mechanické nebo kosmetické vlastnosti, ale i především cena. Ta se může i při volbě standardních typů lišit až 40násobně [1]. Existují různé materiály vláken pro různé matrice, tato práce je však zaměřena především na polymerní kompozitní materiály. Tudíž jsou zde zahrnuty pouze vybraná vlákna používaná u polymerních matric.

#### Skleněná vlákna

Z vyztužených plastů se lze setkat nejčastěji, s plasty vyztuženými skelnými vlákny. To je způsobeno tím, že právě skelná vlákna jsou v porovnání s ostatními materiály nejlevnější.

Dlouhá (kontinuální) vlákna se vyrábí tažením z trysek a následným dloužením. Mívají průměr 3,5 – 24  $\mu\text{m}$  [1]. Při výrobě je povrch vláken upraven nánosem dalších látek, ať se jedná o lubrikaci (ochrana povrchu před abrazí), vazebné látky (lepší soudržnost vláken s pryskyřicí), nebo sloučeniny upravující tvrdost vláken podle navazující technologie (např. „tvrdý roving“ pro sekání, „měkký roving“ pro navíjení). Následně se sdružují do pramene a navíjejí se na cívku. [7]

Podle aplikace existují různé druhy skloviny (různého chemického složení). Zde jsou ty nejčastější [1]:

- E – bezalkalické, nepoužívanější typ
- R – vysoce pevné, odolné
- C – odolné proti korozi
- ECR – bezalkalické, chemicky odolné
- AR – odolné proti alkáliím

O dalších typech skleněných vláken pro speciální aplikace, ve své práci pojednal docent Kořínek [7]. Používají se jako výztuž plastových dílů automobilů, leteckých kompozitech, lodních konstrukcích i sportovním vybavení. [7]

### Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou syntetická vlákna ze skupiny aromatických polyamidů. Kompozity s těmito vlákny nabízejí mimořádnou pevnost v tahu, tepelnou odolnost a vysoký poměr pevnosti k hmotnosti. Lze je kombinovat s všemi běžnými druhy polymerních matric. Úskalím použití těchto vláken je jejich hydrofilní chování (s následnou změnou vlastností), degradace UV zářením, nebo obtížná obrobitelnost kompozitů s těmito vlákny. [1; 9]

Existují dva hlavní typy aramidových vláken [10]:

- meta-aramidy – tepelná odolnost a elektroizolačními schopnosti (např. Nomex®).
- para-aramidy – vyšší pevnost v tahu a vyšší modulem pružnosti (např. Kevlar®).

Konkrétní příklady použití aramidových vláken v kompozitních materiálech zahrnují pancéřování, letectví, automobilový průmysl a sportovní vybavení. [9]

### Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se nejčastěji vyrábí z dloužených PAN (polyakrylonitridových) vláken. Toto dloužení má za výsledek vhodně orientovanou strukturu vzhledem k ose vlákna. Následně se vlákna stabilizují a karbonizují. Takto jsou vyráběny vlákna HT a IM s pevností i více než 5000MPa. [1]

Pro získání lepších vlastností tyto vlákna navíc prochází procesem grafitizace, který má za následek zvýšení poměru obsahu uhlíku. Pro výrobu ještě tužších vláken je používáno dloužení při grafitizaci. Při dloužení se zmenší úhel; odklonu mikrokrystalů od osy vlákna (vlákna UHM, “Ultra High Modulus”). [1]

Pro výrobu nejtuzších uhlíkových vláken se používá odlišný výchozí materiál, a to smoly („pitch“) (ropné, uhelné, nebo syntetické). Tyto vlákna mají oproti těm z PAN sice vyšší modul pružnosti (až 700GPa), ale nižší pevnost (2000MPa). [1]

Druhy uhlíkových vláken [1]:

- HAST – vysoce pevné, s nižší tuhostí
- HT – standartní typ (karbonizovaná)
- HM – s vysokým modulem pružnosti, pevné (grafitizovaná)
- IM – se střední tuhostí
- LM – s nízkou tuhostí
- UHM – s velmi vysokou tuhostí, nižší pevností (vlákna ze smol)

Vedle výše uvedených běžných druhů lze ale najít i speciální vlákna, jako jsou například [7]:

- dutá uhlíková vlákna (až o 40% lehčí oproti běžným vláknům)
- diskontinuální vlákna (SBCF, “Stretch-Broken Carbon Fiber”) s vyšší tvarovatelností
- krátká uhlíková vlákna (VGCF, “Vapour-Grown Carbon Fibers”)
- uhlíková vlákna z nanotrubiček
- uhlíkové whiskery GCN („grown Carbon nanoparticles“) monokrystalů
- mletá uhlíková vlákna
- recyklovaná uhlíková vlákna

Především výčet má především poukázat na široký výběr uhlíkových vláken.

## Přírodní vlákna

Mezi přírodní vlákna vhodná pro vyztužování plastů patří len, konopí, sisal, juta, nebo bavlna. Použití těchto vláken má několik výhod jako je například nízká hustota, nižší energetická náročnost (oproti vláknům syntetickým), nebo vhodnost pro likvidaci spalováním. Vedle toho ale mají svá omezení jako jsou nestálé vlastnosti vzhledem k podmínkám růstu, citlivost na vlhkost, nebo teplotní omezení (rozklad vláken při teplotách od 200 °C) [1]. Přesto, tato vlákna poskytují inovativní a udržitelnou alternativu k běžným materiálům. [11]

### 1.2.3 Srovnání vláken

Následuje tabulkové srovnání mechanických vlastností vybraných vláken.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [12].

	$E_t$	$\sigma_{Pt}$	$\rho$	$\sigma_{Pt}/\rho$	$\varepsilon_{f,krit}$
	GPa	MPa	$10^3 \text{kgm}^{-3}$	MPa / $\text{kgm}^{-3}$	%
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 Spektra	172	3000	0,97	3,09	1,7
Ocel	210	340-2500	7,8	0,0440-0,321	

Výše uvedená tabulka (Tab. 1) je v práci umístěna především pro ucelení informací o vláknech. Je pouze orientační a jsou v ní jen některé mechanické vlastnosti:

$E_t$  – modul pružnosti v tahu

$\sigma_{Pt}$  – pevnost v tahu

$\rho$  – hustota

$\sigma_{Pt}/\rho$  – měrná pevnost

$\varepsilon_{f,krit}$  – tažnost

## 1.3 Matrice

Matrice je spojitá, poddajnější složka kompozitního materiálu. Obklopuje a udržuje výztužná vlákna v požadované geometrii. Matrice může být z různých materiálů jako jsou polymery, kovy nebo keramika. Její hlavní funkcí je chránit výztužná vlákna, přenášet zatížení na výztuž a udržovat vlákna v požadované poloze. Kvalita spojení mezi výztuží a maticí má významný vliv na vlastnosti kompozitního materiálu. [1; 5]

Jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly 1.2.2 Materiály vláken, tato práce je zaměřena především na polymerní kompozitní materiály. Tudíž jsou zde zahrnuty pouze matrice na bázi polymerních pryskyřic. Základní dělení polymerních pojiv je na termosety a termoplasty. [1]

### 1.3.1 Termosetická pojiva

Jedná se o reaktivní (licí) pryskyřice, které jsou z kapalného stavu (během kterého se nanášejí na vlákna) vytvrzovány až do finálního tuhého stavu pomocí různých iniciátorů (tvrdidel, katalyzátorů a urychlovačů), případně s dodáním energie (zvýšení teploty) [1]. Stav reaktoplastu se pohybuje od A (většinou tekutý stav) přes B (částečně vytvrzený) do C (plně vytvrzený) [7]. Mezi nejčastěji používané pryskyřice se řadí nenasyčené polyesterové (UP-R), vinylesterové (VE-R) a epoxidové pryskyřice (EP-R). [1]

Existuje nespočet možných variant chemických složení jednotlivých druhů pryskyřic, v závislosti na tom se mění jak konkrétní mechanismy, ale také i vlastnosti a aplikace. Tato kapitola má za cíl čtenáři přiblížit nejběžnější pryskyřice a jejich mechanismy, proto bude velmi zjednodušená.

#### UP-R

Polyesterové pryskyřice jsou jedním ze základních typů pryskyřic. Často se dodávají v nenasyčené formě, jako roztok polyesteru a katalyzátoru (monomeru), kterým je obvykle styren [13]. Styren snižuje viskozitu pryskyřice a zároveň umožňuje její přechod z kapalného do pevného stavu zesíťováním molekulárních řetězců polyesteru (radikálová polymerizace). Díky tomu lze polyesterové pryskyřice lisovat bez nutnosti použití tlaku. Proto se často označují jako „nízkotlaké“ pryskyřice [14]. [15]

Tyto pryskyřice jsou levné a mají všestranné použití. Vykazují však velké smrštění po zgelovatění (6 až 9 %), což vede ke vzniku dutin (řešením je přidání plniv, jako je křída nebo kaolin) [1]. Zároveň obsah styrenu, a jeho emisivita během výroby, má dopad na bezpečnost výroby a životní prostředí. To kladlo nárok na zavedení vzduchotechniky, jako i na vývoj pryskyřičných systémů jež brání emitaci, nebo jej vůbec neobsahují. [14]

#### EP-R

EP-R jsou nejpoužívanějším typem pryskyřice. Přesné složení závisí na výrobcu a existuje jich proto celá řada. Na rozdíl od radikálové reakce UP-R je mechanismem tvrzení epoxidových pryskyřic polyadice [1]. Aby chemická reakce proběhla v pořádku, je nezbytné dosáhnout správného stechiometrického poměru směsi pryskyřice a tužidla. Pokud se molekuly tvrdidla a epoxidu dobře nepromíchají, může v matrici zůstat nezreagovaná pryskyřice nebo tužidlo, což negativně ovlivní vlastnosti kompozitu. [15]

Epoxidové pryskyřice nabízejí kompozitům řadu výhodných vlastností. Například jejich nízké smrštění (2 až 5 %). Toto smrštění probíhá ještě v kapalném stavu, takže rozdíl je dorovnán přitékající pryskyřicí. Vnitřní pnutí jsou minimalizována [1]. Epoxidové pryskyřice také umožňují vysokou elektrickou izolaci a dobrou chemickou odolnost. Běžně se používají s vysoce výkonnými výztužemi, jako jsou uhlíková nebo skleněná vlákna. [15]

#### VE-R

Běžným typem vinylesterů jsou nenasyčené estery epoxidových pryskyřic [14]. Spojují výhody epoxidových pryskyřic s lepší manipulací a rychlejším vytvrzováním, které jsou typické pro nenasyčené polyesterové pryskyřice. [15]

Vinylesterové pryskyřice se vyrábějí reakcí epoxidové pryskyřice s kyselinou akrylovou nebo metakrylovou. Tím vzniká nenasyčené místo, podobně jako u polyesterových pryskyřic. Výsledný materiál se rozpustí ve styrenu, čímž vznikne kapalina podobná polyesterové pryskyřici. Vinylestery se také vytvrzují běžnými organickými peroxidy používanými u polyesterových pryskyřic [13]. [16]



Jsou obvykle pevnější než polyesterové a odolnější než epoxidové pryskyřice [15]. VE-R mají také méně otevřených míst ve svém molekulárním řetězci, díky čemuž jsou odolnější vůči pronikání vody [1].

Vinylestery se vyznačují mechanickou houževnatostí a vynikající odolností proti korozi. Těchto zlepšených vlastností se dosahuje bez složitého zpracování, manipulace nebo speciálních výrobních postupů, které jsou typické pro epoxidové pryskyřice. [1]

### 1.3.2 Termoplastická pojiva

Termoplastická pojiva se v kontextu výroby kompozitů používají u převážně u technologií lisování, pultruze nebo vstřikování (kapitola 1.4 Technologie výroby kompozitních dílců). Mezi běžně používané termoplasty patří polyamidy, polykarbonáty a polyetylény. Výroba s tímto typem pojiva trvá pouze několik vteřin. Tato pojiva jsou však při pokojové teplotě (teplotě ručního kladení) v pevném stavu. Problémy se smáčivostí vláken viskózními taveninami termoplastů vyžadují speciální technologie přípravy prepregů [14]:

- nános pomocí rozpouštědel
- emulzní nanášení částic polymeru
- koextruze vyztužujících vláken a termoplastu
- výroba hybridních tkanin z vláken termoplastu a vyztužujících vláken

Pro zpracování navíc potřebují oproti reaktoplastům pro zpracování vyšší teploty (nad 300 °C), což brání výrobě nízkonákladovým způsobem [17].

### 1.3.3 Srovnání termosetů a termoplastů

Tyto dva materiály mají velmi rozdílné vlastnosti, každý z nich má své vhodné aplikace, avšak často se pracuje s kombinací obou (například pro lisování velkých dílů a preformů).[18]

#### Termosety

Termosetové kompozity jsou obecně levnější a snadněji se vyrábějí, protože s tekutou pryskyřicí se velmi snadno pracuje. Doba skladování prepregů s termosetickou maticí je omezená a musí probíhat při nízkých teplotách (-18 °C). Pro vytvrzení vyžadují chemickou reakci. Tyto kompozity se běžně používají pro vysokoteplotní aplikace, protože termosetová matrice se na rozdíl od termoplastů netaví. Termosety bývají křehké, avšak této a dalších negativních vlastností se dá vyhnout použitím modifikátorů. Tyto kompozity se velmi obtížně recyklují. [18]

#### Termoplasty

Termoplastické polymery jsou polymery, které lze tvarovat, přetvářet a recyklovat. Kompozity s termoplastickou maticí jsou houževnatější než termosety. Výrobní proces těchto kompozitů je energeticky náročnější kvůli vysokým teplotám a tlakům potřebným k roztavení plastu a impregnaci vláken maticí. Vysoká teplota zároveň představuje riziko v podobě tepelného ovlivnění vláken. Na druhou stranu v procesu výroby nevznikají žádné odpadní chemikálie. Doba skladovatelnosti je zde neomezená. [18]

## 1.4 Technologie výroby kompozitních dílců

Pro správné porozumění a použití technologie prepregů je důležité mít přehled i o ostatních možnostech výroby kompozitní součásti. Následující kapitola pojednává právě o nich.

### 1.4.1 Ruční kladení za mokra

Ruční kladení (wet lay-up) výztuže na otevřenou formu je jednou z nejstarších a stále široce používaných technologií. Tato metoda, známá jako otevřená technologie, zahrnuje aplikaci gelcoatové vrstvy na formu. Gelcoat poskytuje ochranu a estetický povrch dílce. Na něj se aplikují různě orientované vrstvy výztuže nejčastěji ve formě tkanin a rohoží. Ty se prosycují pryskyřicí (termosetická matrice) za použití štětce nebo válečku [19]. Laminát se vytvrzuje za normální nebo zvýšené teploty, bez nebo s přitlakem od vakua. Ruční kladení výztuže je vhodné pro výrobu široké škály výrobků, od malých po velké, od jednoduchých po složité, a je ideální pro výrobu prototypů a menší až střední sériové produkce. [19; 20]

### 1.4.2 Navíjení

Stroje pro navíjení jsou podobné soustruhům. Tato technologie je využívána pro výrobu široké škály kompozitních dutých těles, jako jsou trubky, nádrže a různé nádoby, které vykazují různé tvary i velikosti. Na jádro, které má tvar budoucího výrobku se postupně navíjí výztuž ve formě pramenců, nasycených pojivem. Při impregnaci výztuže se nastavuje předpětí, které pomáhá zajistit, aby se výztuž správně usadila na jádře. Kombinací rychlosti otáčení jádra a posunu ukládacího zařízení lze ovlivnit úhel návínů, což umožňuje variabilitu v uspořádání vláken a strukturu výsledného laminátu. Proces navíjení je většinou plně automatizován, což zajišťuje konzistentnost. I přes určitou počáteční investiční náročnost je tato metoda preferovanou volbou pro výrobu trubek a nádrží různých rozměrů a tvarů v průmyslu, leteckém průmyslu a dalších odvětvích. [21]

### 1.4.3 Infuze

Infuze (injekce) patří mezi uzavřené technologie. Tyto metody využívají nízko viskózní kapalné pryskyřičné systémy k prosycení suché výztuže v uzavřené formě [14]. Minimalizují únik škodlivých výparů styrenu během zpracování a tvrdnutí. Vzhledem k rostoucím požadavkům na ochranu životního prostředí se stávají stále důležitějšími alternativami k otevřeným technologiím. Pro prosycení celého preformu (který obsahuje „suchou“ rohož nebo tkaninu) je nutné použití většího množství pojiva [19]. Nižší podíl výztuže má pak za následek v porovnání s navíjením nebo pultruzí nižší mechanické vlastnosti. [22]

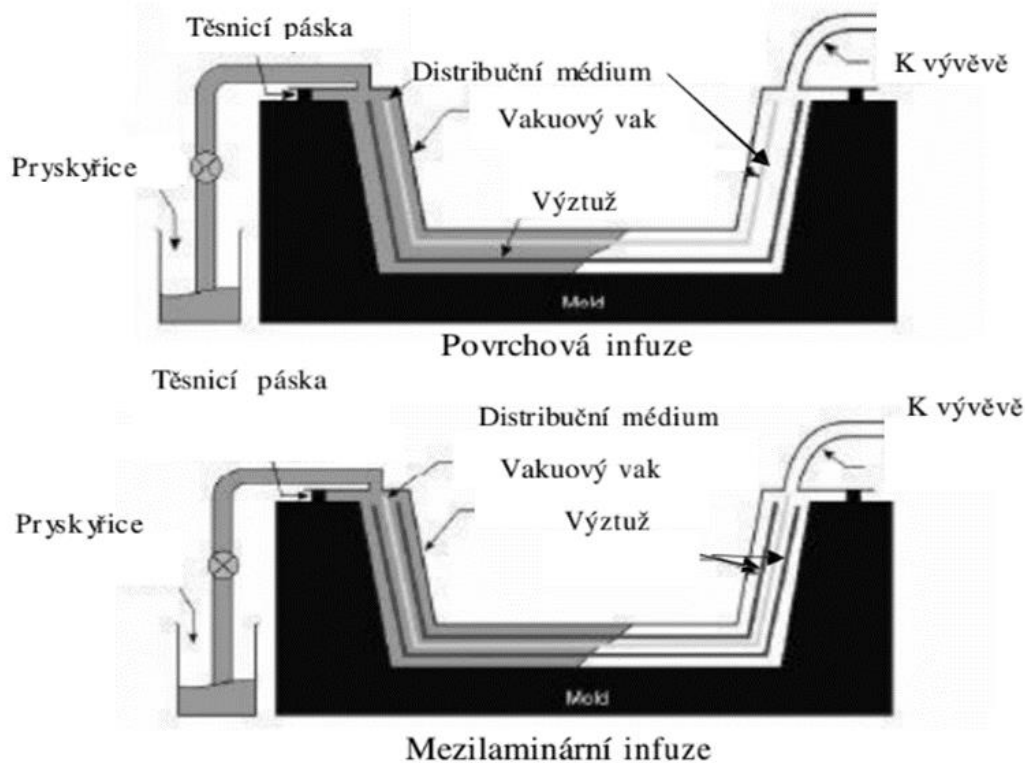
Sycení výztuže je realizováno různými metodami:

Vysokotlaké vstřikování (RTM) vyžaduje pevné formy, do kterých se skládá výztuž (pro větší série se používají tzv. předlisky). Do uzavřené formy se následně za vysokého tlaku vstřikuje pojivo. Vysoký tlak a dvoudílná kovová forma zajišťují hladký a přesný povrch dílů [19]. Tvrzení trvá cca 10–20 minut. Tato technologie je vhodná pro výrobu ve větších sériích, avšak vyžaduje značné investice do vybavení. [14]

Vakuem-asistované procesy (VARTM, RTM light) jsou realizovány v jednodílných formách. Druhá strana formy je tvořena fólií, filmem nebo vakem. Pro pohyb pryskyřice kombinují podtlak i vstřikovací trysku. Díky nižším tlakům (0,4–1 bar) umožňuje tato technologie použití méně odolných forem, což rozšiřuje možnosti výroby větších dílů. [14]

Vakuové prosycování (VI), nevyužívá injekční zařízení. Existují modifikace této technologie, kdy je vrchní část formy elastická nebo realizována fólií, což umožňuje regulaci přitlaku. Spodní část formy je pevná. Rozvod pojiva je realizován pomocí perforovaných trubiček nebo speciální sítí na povrchu výztuže. Podle druhu infuze (Obr. 1). se po vytvrzení distribuční médium buď odtrhne nebo zůstane v kompozitní součásti. Vakuové prosycování je ideální pro výrobu velkých dílů, kde by použití ostatních technologií bylo nevýhodné. Jedná se o trupy lodí, kapotáže lokomotiv, nebo lopatky větrných elektráren. Vzhledem k velikosti těchto dílů

je nutno použít vytvrzovací systémy s dlouhou dobou zpracovatelnosti. Tvrzení tím pádem trvá až několik hodin. [22]



Obr. 1 Vakuové prosycování s různými druhy s různým druhem infuze [22].

#### 1.4.4 Pultruze

Metoda pultruze, známá také jako tažení, je efektivní technologií pro výrobu kontinuálních profilů. Umožňuje vytvářet plné, duté i tvarově složité profily nebo desky s vysokým podílem výztuže (až 80 %). Výztuž může mít podle výsledného profilu různou formu (pramence, rohože, tkaniny, nebo jejich kombinace). Je impregnována pryskyřicí a následně vtahována do tvarovacích forem, které odpovídají požadovanému tvaru výrobku. Pultruze je klíčovou technologií pro výrobu kompozitních konstrukcí ve stavebnictví, automobilovém průmyslu, leteckém a lodním průmyslu a dalších odvětvích. [23]

#### 1.4.5 Vstříkování

Jedná se o vstříkování termoplastů s krátkými vlákny (SFRT). Tyto materiály tvoří stupeň mezi kompozity s kontinuálními vlákny a nevyztuženými plasty. Oproti čistému termoplastu má krátkovláknový kompozit vyšší tuhost, pevnost a rozměrovou stabilitu za vyšších teplot. Oproti kovovým výrobkům je pak často ekonomicky i funkčně výhodnější. Klasická příprava kompozitu se provádí smíšením taveniny polymeru a 3 až 12 mm dlouhých sekaných vláken (obsah výztuže bývá okolo 30 %), při homogenizaci směsi dochází k lámání vláken na délky menší než 1 mm, jinou variantou je použití již připraveného LFT granulátu. Následně je celá hmota vstříknuta do formy, podobně jako u výroby z běžných termoplastů. [1]

Nevýhodou představuje opotřebení činných částí vstříkovačského stroje a formy, které vyžadují speciální povrchové úpravy. Pro krátkovláknové kompozity jsou používána především skleněná vlákna z E skloviny. Materiál s touto výztuží je lehký a má dobré elektrické i tepelné izolační vlastnosti. Pro vyztužení špičkových termoplastů jsou cenově přijatelná také uhlíková, para-aramidová vlákna, keramická vlákna a whiskery. [19]

## 2 PREPREG

Prepregy souhrně označují různý typ výztuže předimpregnované různým typem matrice. Pro uhlíková vlákna je nejčastější použití tkaninový prepregů s termosetickou matricí. Tkanina je předem impregnována systémem pryskyřic, obvykle epoxidovou pryskyřicí. Tento pryskyřičný systém obsahuje vhodné vytvrzovací činidlo, což umožňuje, aby byl prepreg připraven k položení do formy bez nutnosti použití dalšího pojiva [24]. Výhodou je, že je složitý proces prosycování zcela oddělen od dalšího zpracování. To vede ke zvýšení kvality prosycení a tím ke vyšší kvalitě výsledné vyrobené součásti [1]. [25]

### 2.1 Druhy prepregů

Základní rozdělení prepregu je založeno na vlastnostech výztuže, jako je materiál vlákna, jemnost vlákna a výběr vazby tkaniny (kapitola 1.2 Výztuž) [26]. Případně podle matrice. Vedle běžných tkaninových prepregů existují ještě jejich různé modifikace. Ty mají napomocť k lepším mechanickým vlastnostem, vyztužení, nebo zrychlení produkce kompozitních součástí. [7]

#### Jednosměrné prepregy

Jednosměrné prepregy (UD prepregy) jsou specializovanou formou výztuže, skládající se z rovingů uspořádaných v jednom směru bez příčné vazby. Díky absenci útkových vláken mají vysoký objemový podíl vláken a tím i vynikající mechanické vlastnosti ve směru osy. Jsou vhodné pro mechanicky namáhané díly vyráběné kladením, navíjením pásů nebo pultruzí. Dodávají se v kotoučích různých šířek. [7]

#### Vícevrstvé prepregy

Pro rychlejší dosažení požadované tloušťky laminátu jsou používány vícevrstvé prepregy, které kombinují jednosměrně vyztužené vrstvy tkanin. Jednotlivé vrstvy jsou pootočený pod úhly ( $0^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$  a  $90^\circ$ ). Po spojení vrstev pomocí prošíání polyesterovou nití. [7]

#### Prepregy s diskontinuálními vlákny

Prepregy s diskontinuálními vlákny se vyznačují tím, že vlákna nejsou spojitá, ale jsou přerušovaná. Tato struktura umožňuje vytvářet kompozitní materiály s vyšší tvarovatelností, než je u prepregů s kontinuálními uhlíkovými vlákny. Výztuží nejsou kontinuální ani krátká ale diskontinuální dlouhá vlákna. Vyrábí se natahováním vláken bez povrchové úpravy, což způsobuje jejich lámání ve slabých místech. Jednotlivé fragmenty (s délkou okolo 10 cm) zůstávají rovnoběžné. Svazek vláken je následně opatřen epoxidovou povrchovou úpravou (vodný roztok epoxidu) a navinut na cívku. Snížená délka fragmentů nesnižuje mechanické vlastnosti, a přitom přináší lepší schopnost prepregu tvarovat se okolo hran, v prohlubních a vypuklinách. Lepší tvarovatelnosti je dosaženo díky skutečnosti, že se fragmenty mohou ve viskózní matrici, na rozdíl od kontinuálních vláken, nezávisle pohybovat. [7]

#### Kombinované prepregy

Tyto prepregy kombinují různé geometrie výztuže (jednosměrné prepregy, tkaniny s různou vazbou a orientací, rohože a rovingy) za účelem dosažení ideálních vlastností pro konkrétní výrobek. Tyto prepregy vždy mají velmi konkrétní použití a vyplatí se až pro velkoobjemovou výrobu. Typickým příkladem je kombinace tkaniny a rohože: vrstvy s tkaninovou výztuží se dávají na mechanicky více namáhanou stranu výrobků (při namáhání v ohybu na taženou stranu), vrstvy s rohoží na stranu vystavenou koroznímu prostředí (mají větší podíl pryskyřice). [7]

## 2.2 Výroba prepregů

Prosycení výztuže probíhá za kontrolovaných a reprodukovatelných podmínek na speciálních zařízeních. Způsob impregnace z velké míry závisí na typu matrice. Pryskyřice (resp. pojivo) může být dělena podle materiálu jakož i způsobu jakým je na tkaninu nanášena. [1]

### 2.2.1 Pryskyřicové systémy

Obecně platí, že při výrobě prepregové tkaniny z uhlíkových vláken používají různé typy pryskyřicových systémů. Podle volby systému se lehce mění technologie výroby prepregů.

#### Roztokové systémy (solution-dip systems)

Roztokové systémy používají rozpouštědlo k rozpouštění pryskyřice, čímž se snižuje její viskozita a zlepšují se její smáčecí vlastnosti. Po nasáknutí vlákna roztokem se rozpouštědlo za zvýšené teploty odpaří (proces sušení) a pryskyřice částečně polymerizuje ( fáze B, kapitola 1.3 Matrice), takže zůstane pouze pryskyřice a vlákno. [27]

Metoda s rozpouštědlem má nízké investiční náklady a jednoduchý proces. Rozpouštědlo však může zůstat v prepregu, což ovlivňuje pevnost konečného kompozitu. Zároveň mají výpary dopad na životního prostředí. [28]

#### Systémy s horkým tavením (hot-melt systems)

Systémy s horkým tavením využívají film pryskyřice, který je nanesen na nosič, obvykle natíraný průmyslový papír. Tkanina s pryskyřicí prochází zahřátými válci. Zahřátím pryskyřice klesá její viskozita, čímž se usnadňuje její rovnoměrné rozložení mezi vlákny. [27]

U technologie s použitím těchto systémů je obsah pryskyřice snadno ovladatelný, lze vynechat krok sušení a není zde žádné zbytkové tavidlo. Na druhou stranu je zde vysoká viskozita pryskyřice, což může způsobit deformaci vláken při impregnaci vlákných provazců. [28]

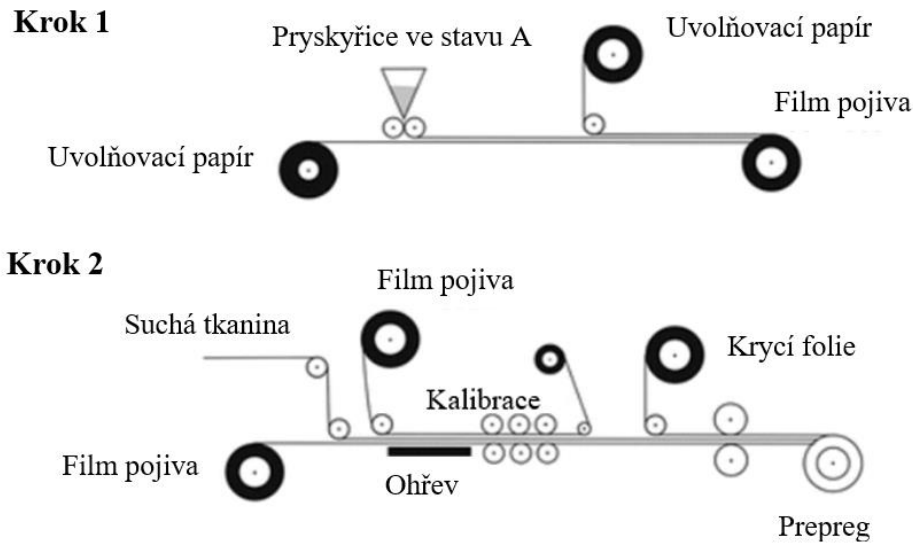
### 2.2.2 Metoda aplikace pryskyřice:

#### Filmové prepregy:

Existují různé varianty této technologie. Princip této technologie bude vysvětlen na obrázku (Obr. 2). Pryskyřice s přesným chemickým složením (ve stavu A) je nanesená ve vrstvě se specifickou tloušťkou mezi horní a spodní uvolňovací papír. Následně je film pojiva navinut na cívku. [28]

V druhém kroku je tento tenký film pryskyřice nanesen na tkaninu. Podle druhu prepregu je tkanina impregnována z jedné, nebo obou stran. Tkanina a papír potažený pryskyřicí se zavádí mezi válce současně. Podle typu pryskyřice je při nanášení použit ohřev tak, aby pojivo přešlo do stavu B. Pro lepší prosycení se vždy používají přítlačné a kalibrační válce. Válcovaný prepreg musí být zgelovatěn do stavu B v prostředí s řízenou teplotou a vlhkostí. [28]

Prepreg je veden do další stolice, kde je balen mezi nosnou a krycí folii. Výrobní proces na konci většinou zahrnuje i ořez okrajů. Jakmile je impregnovaná tkanina ochlazená nebo vysušena (kapitola 2.2.1 Pryskyřicové systémy), a zarovnána, navíjí se na cívku [28]. Na konci výrobního procesu je v prepregu pryskyřice stále ve stavu B, kdy již vzniklo zesílení molekul, ale síť má zatím velmi malou hustotu (pryskyřice je ve stavu lepivého gelu). [14]

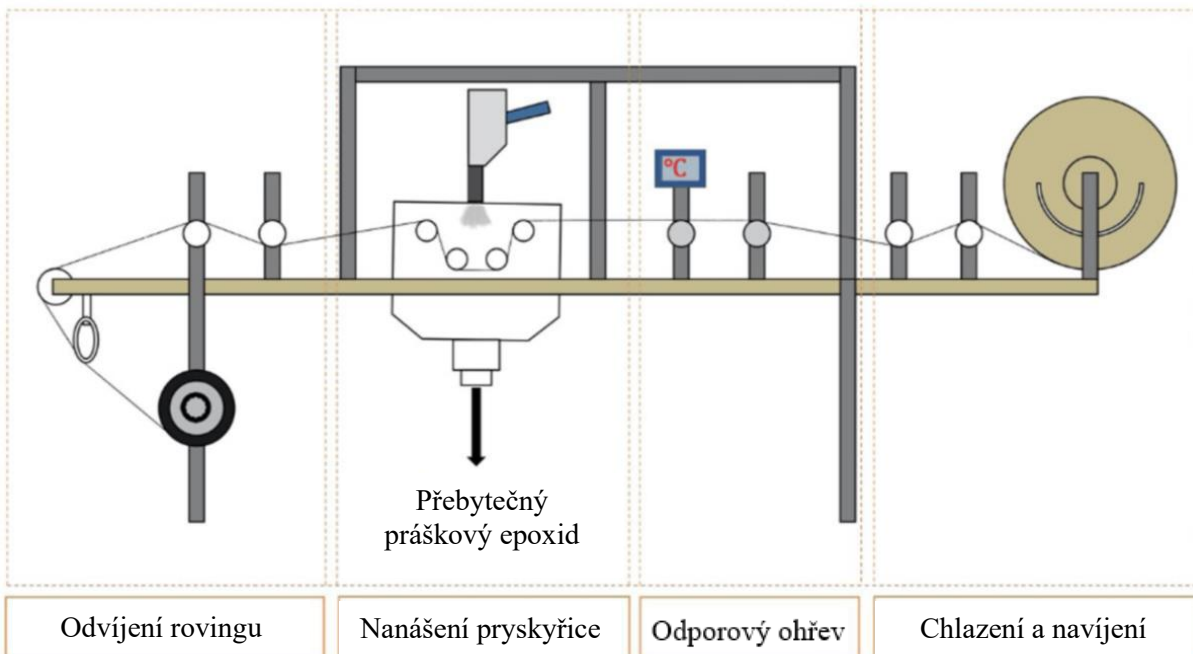


Obr. 2 Filmová metoda výroby prepregu [24] (upraveno).

### Mleté prepregy:

Přiskyřice je rozemleta do práškové formy a aplikována na tkaninu v suché formě. Jednou z hlavních výhod práškového epoxidu je jeho tání v rozmezí 40–60 °C, dosažení minimální viskozity při 120 °C a následné vytvrzení při 145 °C. Díky tomu, že je práškový epoxid pevný a stabilní při pokojové teplotě, jsou skladovací náklady podstatně nižší než u standardních systémů prepregů. [29]

Následuje vysvětlení technologie (Obr. 3). Uhlíková vlákna jsou odvíjena z cívky. Napnutost je udržována magnetickou brzdou, která automaticky upravuje napětí na základě dat ze senzoru. Během průchodu vláken přes smáčecí komoru je na ně nanášen elektrostaticky nabitý práškový epoxid. Na vodivé válce je přivedeno napětí. Pomocí Joulova tepla, vzniklého průchodem proudu, je dosaženo natavení práškového epoxidu. Teplota může být snadno měřena infračervenými senzory a řízena napětím. Towpreg je následně chlazen a navíjen. [29]



Obr. 3 Prášková metoda výroby termosetického prepregu [29] (upraveno).

### 2.2.3 Stárnutí prepregů

Podle druhu použitého systému pryskyřice – tvrdidlo mají prepregy různě dlouhou životnost. Stárnutí prepregů je proces, při kterém dochází k postupné degradaci materiálu (pryskyřice se pozvolna vytvrzuje) vlivem času a vnějších faktorů, jako je teplota, vlhkost nebo UV záření. Při stárnutí se postupně snižuje lepivost prepregů. Lepivost je technologická vlastnost sloužící ke správnému kladení vrstev prepregů. Zamezuje vzájemnému posouvání kladených vrstev jakož i tvorbě vzduchových polštářů mezi jednotlivými vrstvami. Důležitá je proto pečlivost při skladování a manipulaci s prepregy, aby se minimalizovalo jejich stárnutí a zachovaly se požadované vlastnosti pro následné zpracování a výrobu kompozitních dílů. [14]

### 2.2.4 Skladování a manipulace s prepregy

Správné skladování a manipulace s prepregy jsou klíčové pro zachování jejich kvality. Role prepregů jsou dodávány ve vzduchotěsně uzavřené v neprůhledných obalech tak, aby se zabránilo dopadu UV záření. Prepregy s reaktoplastickou matricí by se měly uchovávat v suchém a chladném stabilním prostředí při teplotě kolem  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Doporučuje se skladovat je ve vzduchotěsných obalech nebo kontejnerech, aby se minimalizovalo riziko kontaminace nebo expozice vlhkosti, a tak zabránit jejich poškození. Většinou je doporučené skladování předepsáno výrobcem. [14]

Po vyndání z mrazicího boxu se role nechá v ochranném obalu vytemperovat na teplotu místnosti, aby po rozbalení nedošlo k orosení povrchu prepregu a tím i k navlhnutí matrice a povrchů vláken. Se zmraženým prepregem by navíc ani nešlo pracovat (je tvrdý). [14]

Při manipulaci s prepregy je důležité nosit vhodné ochranné prostředky, jako jsou rukavice a ochranné brýle. S prepregy by se mělo zacházet opatrně, aby se minimalizovalo riziko poškození uhlíkových vláken nebo narušení impregnace pryskyřice. Je důležité vyvarovat se ohýbání, skládání nebo nadměrného napínání, které by mohlo ovlivnit strukturu nebo vlastnosti prepregů. Stejně jako u skladování je vhodné řídit se pokyny výrobce. [14]

## 2.3 Kladení prepregů

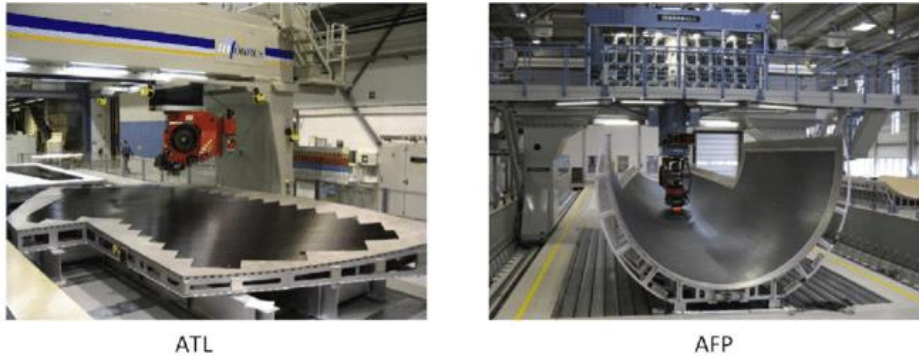
Prepregy mají po rozmrazení lepivý povrch. Lepivost napomáhá kladení do formy nebo na jádro (zamezuje vzájemnému posunu vrstev a tvorbě vzduchových polštářů). Během kladení dostává prepreg svůj finální tvar. Pro lepší manipulaci jsou prepregové tkaniny děleny na menší kusy. Podle složitosti geometrie výsledné součásti mohou být tyto přístřihy ještě naříznuty za účelem snazšího kladení. Většinou se na sebe klade několik vrstev prepregů. Je důležité dbát na orientaci založení první vrstvy, má totiž zásadní vliv na výsledný vzhled součásti. Další vrstvy se pro zajištění izotropních mechanických vlastností kladou pod různými úhly. Po položení vrstev do formy je třeba vrstvy stlačit, aby se spojily a odstranil zachycený vzduch a přebytečná pryskyřice. [24]

S rostoucími požadavky na kvalitu (opakovatelnost a přesnost) součástí, vyšší produkci výroby s nižšími náklady (automobilový průmysl) jakož, i na výrobu rozměrnějších dílů (letecký průmysl), je ruční kladení vícevrstevých laminátů stále častěji nahrazováno automatizovaným vrstvením. [30]

Existují dva základní druhy (Obr. 4):

- strojní kladení páskového prepregu (ATL)
- strojní kladení vláknového prepregu (AFP)

Technologie AFP umožňuje přesné umístění několika paralelních vláken nebo UD prepregů (obvykle 3 až 12 mm širokých) na formu. Tato technologie je vhodná i pro složitější, zakřivené geometrie (konvexní i konkávní). Je pomalejší, ale nabízí větší flexibilitu z hlediska složitosti dílu a orientace vláken [31]. ATL umisťuje kompozitní pásy (obvykle 75 až 300 mm široké) na rovné nebo mírně zakřivené plošné díly. V porovnání s AFP je proces kladení rychlejší ale méně tvarově flexibilní. [32]



Obr. 4 Technologie automatického kladení prepregů [45].

## 2.4 Tvrzení/lisování prepregů

Při laminaci jsou prepregy vystaveny zvýšené teplotě a tlaku, vlákna jsou přitlačena k sobě, vzduchové kapsy mezi vrstvami prepregu jsou vytlačeny, pryskyřice snižuje viskozitu a zaujme negativní tvar formy na povrchu výlisku.

Prepregy se obvykle vytvrzují v peci nebo pomocí jiných metod, jako je autokláv. V peci se materiál postupně zahřívá na specifickou teplotu, při které začne pryskyřice polymerizovat a tuhnout. Tento proces může trvat několik hodin, v závislosti na typu pryskyřice a tloušťce komponentu. [33]

### 2.4.1 Autokláv

Autokláv je obecně přetlaková nádoba používaná k procesům vyžadujícím vysoké teploty a tlaky. V kompozitní výrobě slouží k vytvrzování prepregů. Tento proces začíná umístěním nakladeného dílu do vakuového sáčku. Vakuování slouží k odstranění vzduchových bublin a zlepšení kontaktu mezi vrstvami materiálu. Následně je vakuovaný díl vložen do autoklávu, kde je postupně zahříván (cca 3 °C za minutu) na požadovanou teplotu, obvykle mezi 120 °C a 180 °C, v závislosti na specifikaci pryskyřice. Současně je aplikován vysoký tlak, obvykle mezi 3 a 7 barů, aby se zajistilo správné vytvrzení pryskyřice a odstranění všech zbývajících vzduchových kapes. Po vytvrzení se teplota v autoklávu postupně snižuje. [34]

Používání tohoto zařízení je považováno za standard díky své schopnosti konzistentně poskytovat dobré mechanické vlastnosti a kvalitativní povrch výrobků. Vedle toho má ale i nevýhody [33]:

- Vysoké náklady: Provoz a údržba autoklávů jsou nákladné, což může omezovat jejich použití v méně náročných aplikacích.
- Energetická náročnost: Autoklávy spotřebovávají velké množství energie, což zvyšuje provozní náklady a dopad na životní prostředí.
- Časová náročnost: Dlouhé cykly vytvrzování (několik hodin) v autoklávu mohou zpomalovat výrobní proces.



### 2.4.2 Mimoautoklávové způsoby vytvrzování

V procesu vytvrzování prepregů zajišťuje autokláv teplotu i tlak. Jeho nahrazení vyžaduje hledání alternativ pro obě tyto složky procesu vytvrzování [33]. Následuje výběr používaných technologií:

#### PCM (prepreg compression moulding)

Tento proces využívá prepregy s rapid-cure pryskyřicemi, které umožňují dosažení vytvrzení během 3 až 5 minut. Prepregy jsou předtvarovány, přeneseny do konvenčního horkého lisu a formovány. PCM nabízí srovnatelnou kvalitu s autoklávovým vytvrzováním, ale s výrazně nižšími náklady a několikanásobně rychlejšími časy cyklů. Navíc nabízí lepší kvalitu povrchu díky vysokému tlaku formování, což minimalizuje potřebu post-mold úprav. Tato technologie se využívá pro střední a velké výrobní série, zejména v automobilovém průmyslu. [34]

#### VBO (vacuum bag only)

Tato technologie je velmi podobná vytvrzování v autoklávu. Rozdíl je v tom, že na vakuovaný díl není aplikovaný přetlak. Lisovací tlak je vyvozen pouze vakuem (atmosferickým tlakem). Z toho vyplývá, že mechanické vlastnosti dílu stejně jako kvalita povrchu, nebudou tak dobré jako u použití autoklávu. Pro tuto technologii jsou však vyvinuty speciální prepregy, které omezují negativní dopad použití menšího tlaku. Tato technologie zpřístupňuje svou nízkou nákladností výrobu z karbonu i pro domácí kutily. Vytvrzování probíhá v pecích běžně do teplot 180 °C. [35]

#### Mikrovlonný ohřev

Stejně jako se mikrovlonný ohřev používá pro vytvrzování některých lepidel, může se použít i pro vytvrzování kompozitních dílů. Mikrovlonné vytvrzování nabízí úspory energie a času oproti tradičnímu vytvrzování v autoklávu. K rovnoměrnému ohřevu kompozitů využívá elektromagnetické vlny. Výhody zahrnují eliminaci teplotních gradientů, až o 80 % nižší spotřebu energie, 40 % kratší cyklus vytvrzování a možnost zaměřit teplo na specifické oblasti. Tato technologie se testovala pro výrobu velkoplošných dílů v leteckém průmyslu. Přetrvává výzva spočívající v odlišném chování materiálů na mikrovlny a nutnosti přesného monitorování teploty. [19; 36]

## 2.5 Použití prepregů

Prepregy přinášejí významné výhody, které jsou zásadní zejména v aplikacích vyžadujících maximální mechanické vlastnosti a opakovatelnost výroby. Jednou z klíčových výhod je mechanická pevnost, která je dosažena díky vysokému poměru vláken a pryskyřice (až 2:1). Tento fakt umožňuje dosáhnout nejlepších mechanických vlastností při zachování minimální hmotnosti kompozitu. Zároveň použití tkaninových prepregů přináší kompozitním součástem jejich charakteristický vzhled. [26; 37]

Dále prepregy poskytují významnou robustnost procesu. Jednodušší a čistší zpracování od řezání vrstev až po vyjmutí z formy vede k snížení možných chyb v procesu. Tato konzistence je klíčová zejména při výrobě vysoce kvalitních dílů s opakujícími se požadavky. [26; 37]

S použitím prepregů jsou však spojeny i vyšší náklady (na výrobu prepregu) a omezená doba použitelnosti. Přestože tyto aspekty mohou omezit jejich širší použití, zůstávají prepregy preferovanou volbou v oblastech, kde je klíčový důraz na kvalitu a opakovatelnost výsledného produktu. [26; 37]

### 3 PRAKTICKÁ ČÁST

Předešlá část práce měla čtenáře uvést do problematiky kompozitních materiálů, jakož mu i představit technologii prepregů. V této kapitole se autor věnuje další části zadání práce, a to je návrh technologie výroby součástí, samotná výroba součástí a zhodnocení výsledků.

#### 3.1 Motivace (představení problému)

Záměrem práce je navázat na předešlý výzkum vývojového oddělení ve firmě Meopta. Vývojové oddělení se vedle práce na optických systémech okrajově věnuje i technologii s mimoautoklávovými prepregy (OAA prepregy). Autorovým přínosem má být vedle rešerše trendů v oblasti OAA prepregů vyzkoušení aplikace této technologie i na další součásti, kterým se vývojáři v Meoptě dosud nevěnovali. Přínosem má být průzkum použitelnosti známých technologií lisování i na jiné tvary než ty, kterým byla doposud věnována pozornost. Toto poznání má prohloubit know-how a povědomí o možnostech a hranicích různých způsobů lisování nejen autora ale i vývojového oddělení firmy Meopta.

#### 3.2 Seznámení se s technologií

V rámci seznámení s praktickou částí této problematiky navštívil autor firmu Meopta, kde byl seznámen s doposud použitými a uvažovanými technologickými postupy pro výrobu z mimoautoklávových prepregů. Na základě této návštěvy vznikla následující podkapitola.

##### 3.2.1 Příprava formy (separace)

Negativní forma je vyráběna technologií FDM 3D tisku, nebo SLA 3D tisku. Poté je forma namokro broušena papírem, postupně zrnitostmi 800 a 1500. Následně leštěna filcem. Na takto upravenou formu se nanáší chemický přípravek pro zaplnění mikropórů (Obr. 5).

Ve firmě je používán přípravek Chemlease 15 Sealer EZ (Obr. 6) od společnosti Chem-Trend. Aplikace vyžaduje splnění bezpečnostních opatření a probíhá roztíráním podle pokynů výrobce, přesný postup kladení je uveden v datasheetu (Příloha 1) [38]. Následuje nanesení separačního nátěru Chemlease PMR-90 EZ (Obr. 7), opět podle pokynů výrobce (Příloha 2) [39].



Obr. 5 Aplikace povrchové úpravy.



Obr. 6 Přípravek pro zaplnění mikropórů.



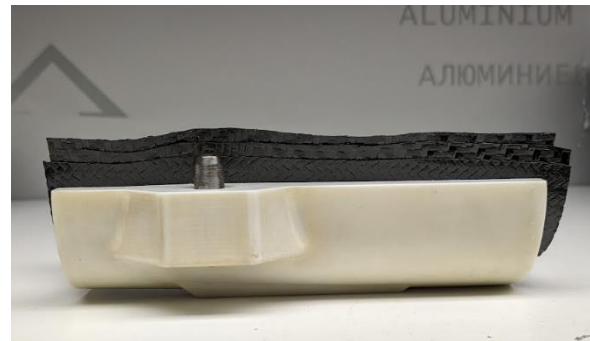
Obr. 7 Separací přípravek.

### 3.2.2 Kladení prepregů

Firma Meopta pracuje s mimoautoklávovými prepregy IMP503Z (Příloha 3) od firmy Impregnatex Compositi. Jedná se o tkaninový prepreg o tloušťce 0,3 mm. Tloušťka stěny tubusu není funkční rozměr, není proto požadována její přesná hodnota po vytvrzení. Běžně se kladou 3 až 4 vrstvy prepregu. Kladení probíhá na připravenou negativní formu. První vrstva je kvůli vzhledu součásti kladena opticky s osou výrobku (Obr. 8). Zároveň je tak poddajnější (diagonální) směr prepregu orientován podélně a příčně k ose součásti, což vede k snazšímu dotvarování ve formě. Další vrstvy jsou pootočené o 45°. Každá z vrstev je pečlivě dotlačena. Na dělicí rovině se provádí schodový překlad (Obr. 9). Obě poloviny formy se následně spojí (poloha je vymezena kolíky). V místě překladu je nutné dotlačit vrstvy prepregu. Vzniká tak nakladený díl, který se už může vytvrzovat.



Obr. 8 První nakladená vrstva.



Obr. 9 Schodový překlad.

### 3.2.3 Laminace

Vytvrzování probíhá za zvýšeného tlaku a teploty (lisování a ohřev). Obě tyto složky vytvrzování běžně zajišťuje autokláv. V Meoptě se k ohřevu používá pec od firmy Memmert s možností připojení vývěvy. Vytvrzovací cyklus prepregu IMP503Z trvá několik hodin. Skládá se z dvoustupňového ohřevu na teplotu 132 °C a setrvání na ní (Příloha 4). Pro lisování prepregu se doposud testovalo několik technologií: pomocí předepnutí, VBO a pomocí silikonového jádra.

#### Pomocí předepnutí

Lisování pomocí předepnutí bylo použito pouze pro testování povrchových úprav na plochem vzorku. Lisovací tlak byl vyvozen čtyřmi šrouby v rozích čtvercové desky. Tento způsob lisování používal kovové formy (desky), což napomohlo kvalitě povrchu vzorku. Testování mělo prověřit nejen kvalitu povrchu ale i odnímatelnost laminovaného vzorku z různých povrchových úprav (bez použití separátoru nelze vzorek bez jeho poškození oddělit od formy).

#### VBO

VBO, neboli lisování pomocí vakuového pytle, patří mezi nejběžnější OOA technologie. VBO bylo v Meoptě pilotní technologií pro výrobu tubusu. Tato technologie používá vakuum (přítlak atmosférickým tlakem). Na zaformovaný tubus je z vnitřní strany nalepena textilní strhávací páska (po vytvrzení se ze součásti strhne). Ta zajistí hrubý povrch, lepší proudění přebytečné pryskyřice a snazší odvod vzduchu z vnitřní strany tubusu. Následně je středem tubusu protažen vakuový pytel (vyčnívá z formy na obou stranách). Pytel je průchozí a je určen pro technologii VBO. Je uzpůsoben pro zvýšené teploty laminace a je od výrobce separován, aby se nepřilepil k výlisku [41]. Do pytle je následně z jedné strany vložen plastový kroužek, a následně je pytel zavařen. Kroužek slouží jako kotva a brání vytažení pytle ze středu tubusu. Forma je zvenku obalena odsávací rohoží, která má umožnit odvod vzduchu z pytle (Obr. 10). Přes formu s plstí se přetáhne druhá strana pytle. Do pytle se našroubuje vakuový ventil. Není potřeba nijak připravovat otvor, je vyříznut ventilem. Poté je

pytel zavařen i z druhé strany. Takto připravená forma (Obr. 11) je vložena do pece a připojena na vývěvu. Vývěva musí běžet po celou dobu tvrzení. Firma GRM je dodavatelem všech pomocných materiálů jako je strhávací páska, vakuový pytel, odsávací rohož, folie a ventil [41].



Obr. 10 Forma s protaženým vakuovým pytlek obalena odsávací rohoží.



Obr. 11 Forma připravená pro VBO laminaci.

### Pomocí silikonového jádra

Ve firmě Meopta se pro výrobu tubusů nejčastěji využívá lisování za pomoci silikonového jádra (Obr. 12). Tato technologie se osvědčila díky přijatelným nákladům a dobré kvalitě výrobku. Tato technologie používá k vyvození tlaku teplotní roztažnost silikonu. Duté jádro je vyrobeno odlitím silikonu do formy (Obr. 13).



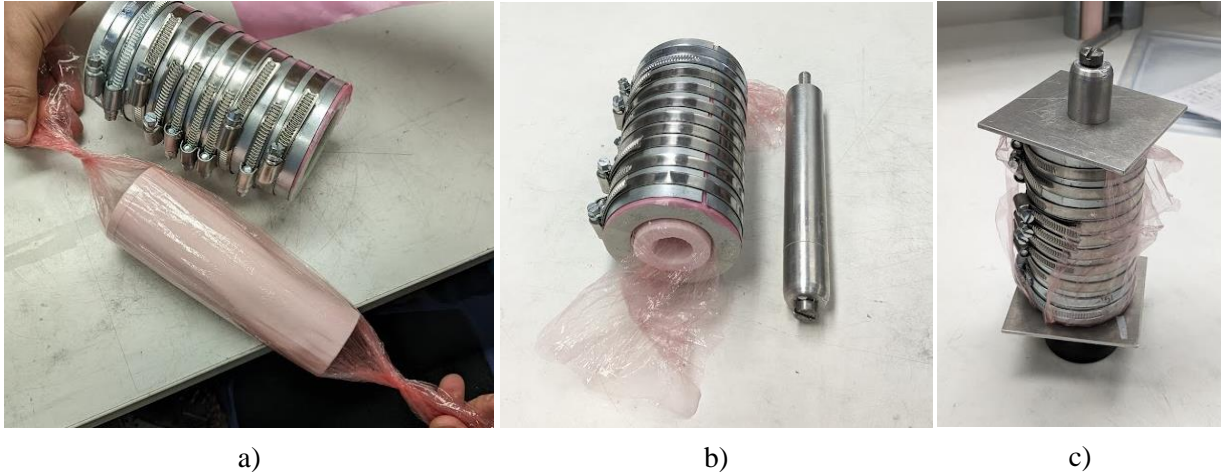
Obr. 13 Forma na odlití jádra.



Obr. 12 Silikonové duté jádro.

Vychází se z nakladené formy s upravenou vnější geometrií. Forma je z vnější strany čistě válcová, což je nezbytné pro tlakové předepnutí formy zvencí. Plastová forma se při zvýšené teplotě a tlaku deformuje, a proto je nutné, aby předepnutí bylo rovnoměrné. Toho se dosahuje stažením hadicovými sponami, pod které se pro zajištění ještě větší rovnoměrnosti předepínacího tlaku umísťuje plech (Obr. 14). Pro udržení čistoty předepínací soustavy (objímky a plechu) se mezi ně a formu vkládá fólie.

Na vnitřní stranu tubusu jsou nakladeny podélné proužky separační folie. Tyto proužky mají zamezit přilnutí silikonového jádra. To, že jsou podélné, má zajisti možnost příčného pohybu a snazší dotlačení. Jádro je také obaleno folií (Obr. 14a), aby byl umožněn snazší příčný pohyb mezi jádrem a nakladeným prepregem. Následně je jádro vloženo do formy (Obr. 14b). Do dutiny jádra je poté vstrčen lubrikovaný trn. Na tento trn jsou na koncích přišroubované desky (Obr. 14c), které brání axiálnímu roztažení silikonového jádra ve prospěch radiálního, tak je dosaženo ještě vyššího lisovacího tlaku. Takto zaformovaný kus je připraven k umístění do pece.



Obr. 14 Příprava formy pro lisování pomocí silikonového jádra.

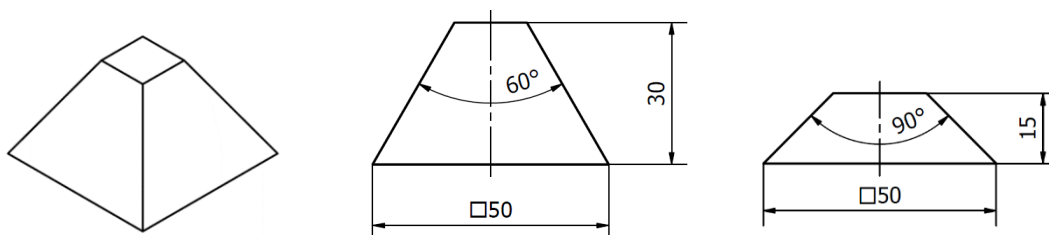
### 3.3 Geometrie vzorku

Vývojové oddělení se v kontextu výroby z prepregů zaměřovalo na výrobu tubusu dalekohledu (rotační tenkostěnný díl). Na dalekohledu se však vyskytují různé tvarové prvky, ať jde o spojení tubusů, upevnění optického hranolu, nebo různé kryty. Použití karbonu nejen na tubus bylo obhájeno v předešlé výzkumné práci Ing Kupčáka [40].

Účelem této práce bylo navrhnout benchmarkovou součást s následujícími požadavky:

- dostatečně jednoduchý tvar, aby dávalo smysl vyrábět ho z prepregu
- tvarové prvky na vzorku, aby jeho laminace přinesla nové zkušenosti s kladením, konstrukcí i volbou vhodné technologie
- potenciálně konstrukčně vhodný tvar pro použití v optice, a zároveň jiný než tubus, který už je do jisté míry ve firmě zvládnut

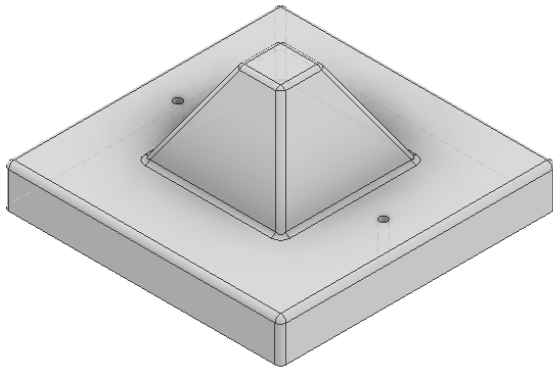
Po zhodnocení všech těchto požadavků padlo rozhodnutí na plášť komolého čtyřbokého jehlanu. S ohledem na možné technologie lze předpokládat, že výsledky laminace budou odlišné pro různé sklony bočních stěn jehlanu. Proto bylo rozhodnuto testování dvou různých sklonů (Obr. 15). Dále se v práci budou vzorky označovat jako „vzorek 60°“ a „vzorek 90°“.



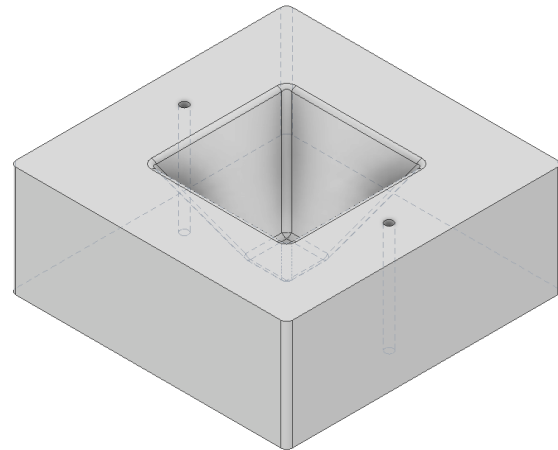
Obr. 15 Zkušební vzorky ve tvaru komolého jehlanu s různým vrcholovým úhlem.

### 3.4 Návrh a výroba formy

Pro výrobu těchto zkušebních vzorků lze vzhledem k jejich geometrii a nároku na nízkou nákladnost výroby uvažovat dvě následující technologie laminace: VBO, a lisování pomocí předepnutí svorkami. Pro technologii lisování pomocí předepnutí bude potřeba dvoudílná forma (Obr. 16, Obr. 17). Do obou polovin formy jsou předtisknuty dvě díry o průměru 3 mm. Tyto díry byly po vytištění vystruženy, a na horní polovině formy osazeny kolíky pro vymezení vzájemné polohy polovin formy během laminace prepregu. Pro technologii VBO lze použít jednu polovinu z formy pro lisování předepnutím. Druhou polovinu formy nahradí folie.

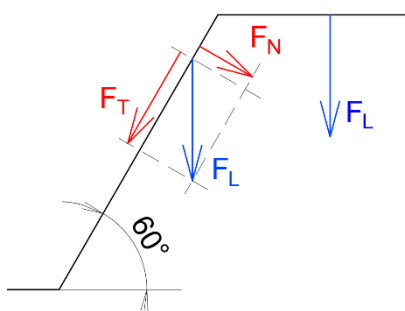


Obr. 17 Model dolní poloviny formy vzorku 60.

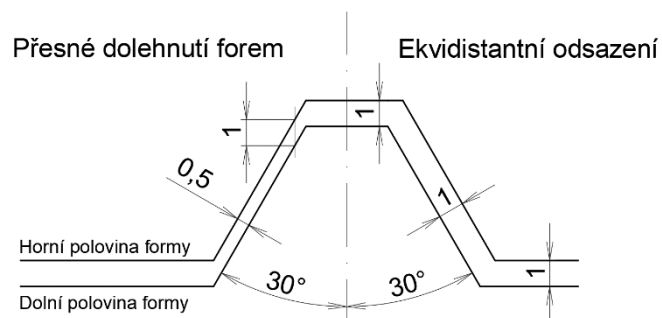


Obr. 16 Model horní poloviny formy vzorku 60.

Lisování mezi deskami potenciálně skýtá problém v laminaci stěn s velkým odklonem od normály lisovací síly. To je způsobeno rozkladem lisovací síly ( $F_L$ ) na normálovou ( $F_N$ ) a tečnou ( $F_T$ ) složku (Obr. 18). Negativní a pozitivní formy jsou proto navrženy tak, aby na sebe přesně doléhaly (Obr. 19). Díky tomu by mělo být dosaženo rovnoměrnějšího tlaku během lisování (za předpokladu lineární stlačitelnosti). Tato geometrie však způsobuje, že tloušťka stěny výlisku není ve všech místech konstantní. Ekvidistantní způsob odsazení byl zavřzen, protože by nezajistil konstantní tlak po ploše vzorku, což by mohlo vést k nižší kvalitě povrchu po vylisování.



Obr. 18 Silový rozklad (vzorek 60).



Obr. 19 Možnosti návrhu dutiny formy (vzorek 60).

Pro první laminace byly formy tisknuty z polykarbonátu (PC) od společnosti Kimya technologií FDM [42]. Druhý tisk formy byl realizován tiskem z fotopolymeru Composite X od společnosti Liqcreate technologií SLA [43]. S ohledem na nákladnost výroby forem, a časového vytižení Meopty, byla z fotopolymeru tisknuta pouze horní polovina formy pro vzorek 90. Negativní polovina formy má vliv na kvalitu povrchu „pohledové“ strany vzorku. Práce s mělkou formou s otevřenějším úhlem je snazší, ať už se jedná o její broušení, nebo kladení do ní. Forma byla po vytištění vytvrzen UV zářením. Tisk i postprocessing forem probíhal na zařízeních od firmy Prusa Research a.s. [44]. Modely forem jsou v příloze 5.

### 3.5 Realizace

Před zahájením realizace vznikla očekávání určitých výsledků. Předpokládá se, že lisování mezi deskami bude výhodné pro malý úhel stěny (vzorek 90), zatímco pro velký úhel stěny (vzorek 60) bude tato technologie nedostatečná, a to i přes příznivou geometrii dutiny formy. Metoda VBO by měla tento nedostatek eliminovat, neboť lisovací tlak je ve všech místech stejný. Pro výrobu vzorků byl použit prepreg IMP503Z (Příloha 3).

#### 3.5.1 Příprava formy

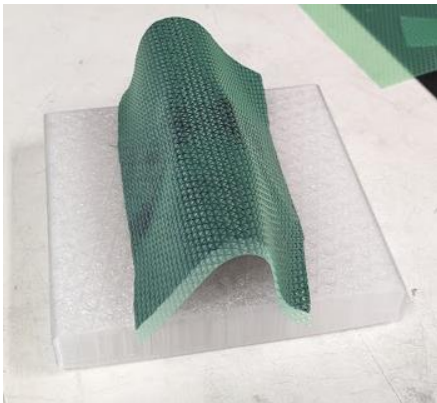
Forma z polykarbonátu nebyla broušena. Zároveň se na této formě vyskytují chyby z tisku. Jelikož se však jedná o testovací součást, může to být výhoda. Lze takto testovat, zda bude mít textura povrchu zásadní vliv na vyjímatelnost vzorku z formy. Případně, jak moc velký dopad má vynechání brusů na kvalitu povrch vylisované součásti. Forma tisknutá z fotopolymeru byla namokro broušena, aby bylo dosaženo vyšší kvality povrchu. Separace všech forem proběhla podle dříve popsaného postupu (kapitola 3.2.1 Příprava formy (separace)).

- Chemlease 15 Sealer EZ – 3 vrstvy po 15 minutách
- Zasychání – 1 hodina
- Chemlease PMR-90 EZ – 5 vrstev po 15 minutách

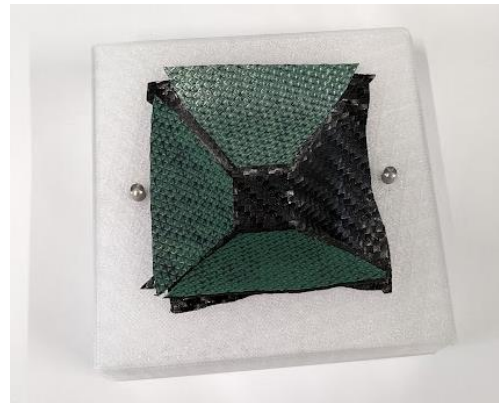
Po každém použití formy byl separační povrch obnoven dle pokynů výrobce. Po separaci se čeká 30 minut než přípravek zaschne, poté se přistoupí k procesu kladení.

#### 3.5.2 Kladení

Do naseparované formy se vždy kladly 4 vrstvy prepregu. Byly testovány různé způsoby kladení jak na pozitivní (Obr. 20), tak i do negativní formy (Obr. 21). Jako nejlepší způsob se ukázalo kladení do negativní formy s použitím hladítka pro dotlačení rohů. Pro další usnadnění kladení byl později pro obě geometrie vzorku navržen nástřihový plán (Příloha 6).



Obr. 20 Kladení na pozitivní formu.



Obr. 21 Kladení do negativní formy.

#### 3.5.3 Vytvrzování

Pro výrobu je nutné zajistit dostatečný tlak a teplotu. Vzhledem ke geometrii vzorku a nároku na nízkou nákladnost výroby přichází z dostupných technologií v úvahu následující způsoby výroby: Lisování mezi deskami a VBO. Z důvodu omezených časových možností firmy Meopta proběhly pouze 3 laminace. I tak se z nich dají vyvodit závěry. Vytvrzování probíhalo v peci Memmert vždy se stejným vytvrzovacím programem (Příloha 4).

## Laminace 1

První laminace probíhala způsobem lisování mezi deskami. Byly použity formy z polykarbonátu. Laminace probíhala na obou geometriích vzorku. Tlak byl vyvozen upnutím do svěráku a mezi svorky (Obr. 22, Obr. 23). Už při první laminaci se vedle kvality povrchu formy ukázaly i následující technologické nedostatky:

- se svorkami se obtížně pracuje
- není zajištěn rovnoměrný tlak

Po vytvrzení probíhalo vyjmutí z formy. Během něj se ukázalo, že pokud je forma správně separovaná, nemá textura povrchu na vyjmutí z formy zásadní vliv. Toto je stěžejní informace pro výrobu, kdy nezáleží na kvalitě povrchu dílu, na kterou má povrch formy pochopitelně vliv. Dalším poznatkem je rozdíl v odformování mezi jednotlivými geometriemi. Podle očekávání bylo vyjmutí vzorku 60 obtížnější, avšak s použitím tlakového vzduchu ne nemožné. Oproti tomu se vzorek 90 uvolnil samovolně.

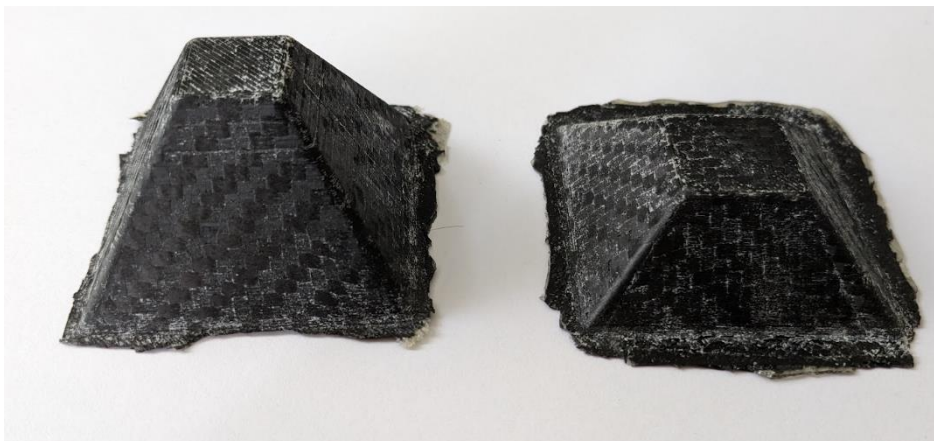


Obr. 22 Vzorek 60, připravený k vytvrzování.



Obr. 23 Vzorek 90, umístěný v peci Memmert.

Mezi vylisovanými vzorky není výrazný rozdíl v kvalitě povrchu (Obr. 24). Vzhledem k tomuto faktu v kombinaci s kapacitním vytížením firmy Meopta proběhly následné laminace pouze na vzorku 90.

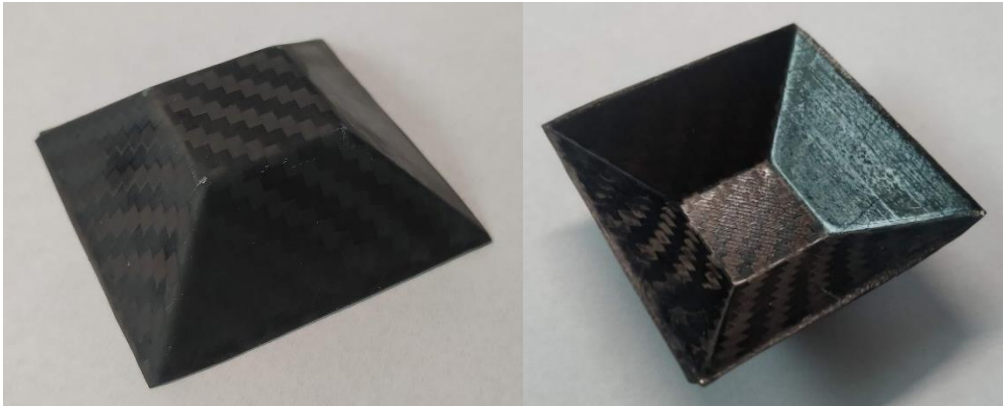


Obr. 24 Laminace 1 (vzorek 60 a vzorek 90).



### Laminace 2

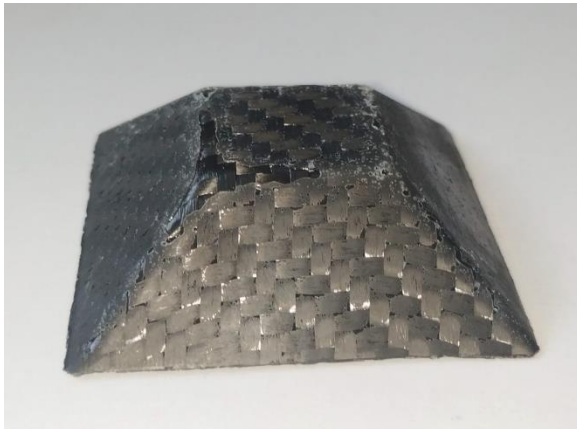
Druhá laminace proběhla podobným způsobem jako laminace 1, avšak s rozdílem v použití formy z fotopolymeru. Tato forma neměla žádné chyby z tisku, a byla broušena. To se výrazně odrazilo na kvalitě povrchu vytvrzeného dílu (Obr. 25).



Obr. 25 Laminace 2 (vzorek 90).

### Laminace 3

Třetí laminace proběhla podle technologie VBO (3.2.3 Laminace, VBO). Na vytvrzeném vzorku 90 (Obr. 26) se na hranách vyskytuje množství defektů (Obr. 27). Folie nedokáže dotlačit prepreg do rohu, VBO zároveň neposkytuje dostatečný lisovací tlak k vytlačení pryskyřice.



Obr. 26 Laminace 3 (vzorek 90).



Obr. 27 Laminace 3 (detail hrany).

Přestože byl laminován pouze vzorek 90, lze předpokládat, že by se tyto vady objevovali také u vzorku 60, a to především protože je hlubší a má ostřejší hrany.

## 4 DISKUSE

### 4.1 Vyčíslení nákladů

Záměrem práce bylo hledat vhodnou technologii pro výrobu tvarového dílce. S volbou technologie jsou nevyhnutelně spojené náklady. Jedná se o pouze o odhad.

Velikost přístřihu pro jednu vrstvu:

$$\text{Vzorek 60} \dots\dots (4370 \text{ mm}^2) \dots\dots 80 \text{ mm} \cdot 80 \text{ mm} = 6400 \text{ mm}^2$$

$$\text{Vzorek 90} \dots\dots (2980 \text{ mm}^2) \dots\dots 60 \text{ mm} \cdot 60 \text{ mm} = 3600 \text{ mm}^2$$

Spotřebovaný prepreg na jeden vzorek:

$$\text{Vzorek 60} \dots\dots 4 \cdot 6400 \text{ mm} = 25600 \text{ mm}^2 = 0,0256 \text{ m}^2$$

$$\text{Vzorek 90} \dots\dots 4 \cdot 3600 \text{ mm} = 14400 \text{ mm}^2 = 0,0144 \text{ m}^2$$

Cena prepregu (1099 Kč / m<sup>2</sup>) za jeden vzorek:

$$\text{Vzorek 60} \dots\dots 0,0256 \text{ m}^2 \cdot 1099 \text{ Kč} / \text{m}^2 = \mathbf{28,1 \text{ Kč (1x)}}$$

$$\text{Vzorek 90} \dots\dots 0,0144 \text{ m}^2 \cdot 1099 \text{ Kč} / \text{m}^2 = \mathbf{15,8 \text{ Kč (3x)}}$$

Cena celé formy z polykarbonátu ..... **400 Kč (2x)**

Cena poloviny formy z fotopolymeru ..... **800 Kč (1x)**

Cena pomocného materiálu jako jsou separace, plnič, fólie jsou vzhledem k velikosti formy a prototypové výrobě nepodstatná.

Během této práce byl spotřebován materiál v hodnotě 1675 Kč, proběhly 4 kladení a 3 vytvrzovací cykly.

Vzhledem k tomu, že uspokojivých výsledků dosáhla pouze Laminace 2, byly náklady spojené s výrobou jednoho dílu vypočteny pouze pro ni a pro hypotetickou výrobu v autoklávu, která v podstatě pracuje jako VBO umístěné v autoklávu. Dalším hypotetickým faktorem je předpoklad, že forma vydrží použitelná po dobu výroby 5 dílů.

Přibližné náklady na pracovníka (náklady pro zaměstnavatele 500 Kč / h) pro jeden díl:

$$0,25 \text{ h} \cdot 500 \text{ Kč} / \text{h} = \mathbf{125 \text{ Kč}}$$

Odhad nákladů na provoz pece na jeden díl ..... **50 Kč**

Odhad nákladů na provoz autoklávu na jeden díl ..... **100 Kč**

Odhad celkových nákladů na výrobu jednoho dílu (vzorek 90):

$$\text{Laminace 2: } 1000 / 5 + 125 + 15,8 + 50 = \mathbf{390,8 \text{ Kč}}$$

$$\text{Autokláv: } 800 / 5 + 125 + 15,8 + 100 = \mathbf{400,8 \text{ Kč}}$$

Tento výsledek je pochopitelně zkreslen odhady a není proto zcela nosný. Pokud by nebyly uvažovány náklady na pořízení autoklávu, bude vytvrzení v peci výhodnější až pro výrobu 4 a více dílů.

---

## 4.2 Vyhodnocení

Z praktické části lze vyvodit následující závěry:

### Laminace 1

- 1) Prepregy lze vytvrzovat i v nevybroušené formě tisknuté z PC snášejícího vysoké teploty. Pokud je forma opatřena separační vrstvou dle pokynů výrobce, není problém s vyjmutím dílu z formy po vytvrzení. Díly však vykazují nedostatečnou kvalitu povrchu.
- 2) Předpoklad, že lisování mezi deskami nebude vhodná technologie pro velký úhel stěny byl vyvrácen.

### Laminace 2

- 3) Kvalita povrchu dílu závisí na kvalitě povrchu formy, jakož i na vytvrzovacím tlaku.
- 4) Forma z fotopolymeru poskytuje oproti polykarbonátu výrazně vyšší kvalitu vytvrzeného dílu.

### Laminace 3

- 5) Předpoklad, že VBO bude vhodné pro laminaci vzorku s větším úhlem stěny byl vyvrácen. Při použití prepregu IMP503Z (Příloha 3), není atmosférický tlak pro vytlačení pryskyřice dostatečný, nezaručuje tak dostatečnou kvalitu povrchu.

## 4.3 Navazující výzkum

Vzhledem k pilotnímu testování technologie je očekávatelné, že tato práce bude mít limity, a položí řadu nových otázek.

- 1) V práci bylo testováno pouze rovnoměrné odsazení formy, které nezajišťuje konstantní tloušťku stěny výlisku. Kvalita povrchu byla zřejmě díky tomu zachována i pro velký úhel stěny jehlanu. Bylo by proto vhodné otestovat i ekvidistantní dutinu formy.
- 2) Jistě by bylo vhodné vyrobit díl i v autoklávu, pro možnost srovnání kvality vytvrzeného dílce.
- 3) Zajímavé by mohlo být pozorování kvality povrchu vzhledem k tlaku laminace. Toho by se dalo dosáhnout změnou konstrukce forem a změnou způsobu vyvození přítláčné síly (na způsob měřitelný).
- 4) Vzhledem k vynikajícím výsledkům i na velkém úhlu stěny by bylo vhodné prozkoumat limit jejího odklonu pro lisování mezi deskami. To ale představuje nové výzvy při konstrukci formy, vzhledem k rostoucí obtížnosti vyjmutí vzorku z formy.
- 5) Tato práce nepozoruje životnost forem, a tím pádem není schopna sledovat úplnou ekonomickou stránku výroby (co se týče formy, ostřihů, nebo některých spotřebních materiálů, jako jsou fólie nebo separační prostředky).
- 6) Zajímavé by jistě bylo i uvažování použití silikonu, kterého je už v Meoptě využíváno pro výzkum v oblasti výroby tubusu.
- 7) Vzorky nebyly testovány.

---

## ZÁVĚR

Tato práce se zabývala zkoumáním technologie výroby kompozitních dílců s použitím tzv. "mimo-autoklávových prepregů" (OAA prepregů). Cílem bylo vyrobit kompozitní dílec bez použití autoklávu a zhodnotit, zda dosahuje požadovaných kvalit. Případně identifikovat a optimalizovat chyby v procesu technologie výroby.

V teoretické části byla popsána problematika kompozitních materiálů, jejich vlastnosti, technologie výroby a specifika prepregů. Dále byly uvedeny alternativní způsoby vytvrzování prepregů, které nevyžadují použití autoklávu.

Praktická část práce zahrnovala přípravu formy, kladení prepregů, laminaci a vytvrzování. Byly provedeny tři různé laminace, během nichž se došlo k následujícím závěrům:

- Kvalita povrchu kompozitních dílců je významně ovlivněna kvalitou formy a vytvrzovacím tlakem.
- Forma vyrobená technologií SLA 3D tisku z fotopolymeru poskytuje dostatečnou kvalitu dílců po vytvrzení.
- Laminace mezi deskami je vhodná i pro dílce s malým odklonem stěny od nositelky lisovací síly.
- Atmosférický tlak při technologii VBO není dostatečný pro dosažení požadované kvality povrchu při použití prepregu IMP503Z.

Práce prokázala, že mimo-autoklávové technologie mají potenciál pro výrobu kvalitních kompozitních dílců, avšak vyžadují další optimalizaci procesů a materiálů. Výsledky ukázaly, že technologie vytvrzování prepregů mimo autokláv může být ekonomicky výhodná a technicky proveditelná, zejména pro menší série dílců.

Navazující výzkum by měl zahrnovat testování různých konstrukcí forem, změnu způsobu vyvození přítláčné síly a porovnání výsledků s dílci vyrobenými v autoklávu. Dále by bylo vhodné sledovat životnost forem a kompletní ekonomickou stránku výroby, včetně spotřeby materiálů a nákladů na jednotlivé výrobní kroky.

---

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. : il. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] VALIŠKA, Josef. Bude výroba z uhlíkových kompozitů levnější? *TechMagazín* [online]. 2020, **11**(11), 45 [cit. 2024-02-05]. ISSN 1804-5413. Dostupné z: <https://www.pablikado.cz/dokument/PXTPmwC2xKALXBnK>
- [3] FIBRE GLAST DEVELOPMENTS CORP. *Fibre Glast Developments Corp* [online]. 2024 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.fibreglast.com/>
- [4] CENTEA, T., L.K. GRUNENFELDER a S.R. NUTT. A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations. *Composites. Part A, Applied science and manufacturing* [online]. OXFORD: Elsevier, 2015, **70**, 132-154 [cit. 2023-11-08]. ISSN 1359-835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2014.09.029
- [5] MACEK, Karel. *Nauka o materiálu*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN isbn80-01-02543-8.
- [6] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. ISBN 80-7080-568-4.
- [7] , Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc. Vlákna. *Kompozity* [online]. 2016 [cit. 2024-01-22]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/13IaXaUZ1GDDetCdZ1KaufjHLRdTLNomu/view>
- [8] Výztuže. KORAL, S.R.O. *KORAL* [online]. 1992 - 2018 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://www.koral.biz/produkty/vyztuze/>
- [9] DEXCRAFT. Aramid. *Carbon fiber composites* [online]. 2020 [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: <http://www.dexcraft.com/articles/aramids/aramid-kevlar-composites/>
- [10] VEBA. *Materiály* [online]. 2023 [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: <https://www.veba.cz/cs/materialy>
- [11] SGRICCIA, N., M.C. HAWLEY a M. MISRA. Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. *Composites. Part A, Applied science and manufacturing* [online]. OXFORD: Elsevier, 2008, **39**(10), 1632-1637 [cit. 2024-02-03]. ISSN 1359-835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2008.07.007
- [12] VRBKA, Jan. ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ VUT V BRNĚ. *Mechanika kompozitů* [online]. 2008 [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/19075854-Mechanika-kompozitu-prof-rndr-ing-jan-vrbka-drsc-ustav-mechaniky-teles-mechatroniky-a-biomechaniky-fakulta-strojního-inženýrství-vut-v-brně.html>
- [13] PANIC, Vesna V, Sanja I SESLIJA, Ivanka G POPOVIC, Vuk D SPASOJEVIC, Aleksandar R POPOVIC, Vladimir B NIKOLIC a Pavle M SPASOJEVIC. Simple One-Pot Synthesis of Fully Biobased Unsaturated Polyester Resins Based on Itaconic Acid. *Biomacromolecules* [online]. United States: American Chemical Society, 2017, **18**(12), 3881-3891 [cit. 2024-02-05]. ISSN 1525-7797. Dostupné z: doi:10.1021/acs.biomac.7b00840
- [14] , Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc. Matrice. *Kompozity* [online]. 2016 [cit. 2024-01-22]. Dostupné z: [https://drive.google.com/file/d/1xKu2cZA3gkL3PC\\_DglXrOVUoFScAVFtL/view](https://drive.google.com/file/d/1xKu2cZA3gkL3PC_DglXrOVUoFScAVFtL/view)
- [15] Resin choice. *Exel Composites* [online]. 2024 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z:
-

- 
- <https://exelcomposites.com/guide-to-composites/resin-choices/>
- [16] MALLICK, P.K. *Composites engineering handbook*. New York: Marcel Dekker, 1997, viii, 1249 s. ISBN 0-8247-9304-8.
- [17] Toray Cetex® Thermoplastic Uni-directional Tapes and Woven Prepregs. *Advanced Composites* [online]. 2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.toraytac.com/products/thermoplastic/ud-tapes-and-prepregs>
- [18] Thermoset and Thermoplastic Composites ... What's the Difference? *Instron* [online]. 2023 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.instron.com/en/resources/blog/2014/april/thermoset-and-thermoplastic-composites-what-is-the-difference>
- [19] , Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc. Technologie. *Kompozity* [online]. 2016 [cit. 2024-01-22]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/1XXpHtDG9nm1Mv6zOd38ODPkXI-ABjUpU/view>
- [20] Ruční kladení. SPOLEK PRO TECHNICKOU PODPORU A PROPAGACI POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ. *POLYMERNÍ KOMPOZITY* [online]. 2024 [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/hand-lay-up/>
- [21] Navíjení. SPOLEK PRO TECHNICKOU PODPORU A PROPAGACI POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ. *POLYMERNÍ KOMPOZITY* [online]. 2024 [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/filament-winding/>
- [22] Injektážní a infuzní technologie. SPOLEK PRO TECHNICKOU PODPORU A PROPAGACI POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ. *POLYMERNÍ KOMPOZITY* [online]. 2024 [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/injektazni-infuzni-technologie/>
- [23] Pultruze. SPOLEK PRO TECHNICKOU PODPORU A PROPAGACI POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ. *POLYMERNÍ KOMPOZITY* [online]. 2024 [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/pultrusion/>
- [24] What Are Prepregs? FIBRE GLAST DEVELOPMENTS CORP. *Fibre Glast Developments Corp* [online]. 2024 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs>
- [25] CHAWLA, Krishan K. *Composite Materials: Science and Engineering*. Fourth edition. Cham: Springer Nature, 2019, 574 s. ISBN 9783030289836. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-28983-6
- [26] What Is Prepreg – Explanation, Advantages and Disadvantages. COMPOSITE ENVISIONS LLC. *Composite Envisions - Providing The Largest Selection of Composite Fabrics* [online]. 2024 [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://compositeenvisions.com/document/what-is-prepreg-explanation-advantages-and-disadvantages/>
- [27] Thermoset Prepreg Systems. *Litzler* [online]. 2020 [cit. 2024-03-23]. Dostupné z: <https://www.calitzler.com/prepreg-systems/thermoset-prepreg-systems/>
- [28] Výroba Prepregu-Surovina Z Uhlíkových Vlákén. SHANGHAI WANHOO CARBON FIBER INDUSTRY CO.,LTD: [//www.wanhoocomposite.com](http://www.wanhoocomposite.com) [online]. 2021 [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: <https://www.wanhoocomposite.com/fabrication-of-prepreg-product/>
- [29] ÇELIK, Murat, Thomas NOBLE, Frank JORGE, Rongqing JIAN, Conchúr M. Ó BRÁDAIGH a Colin ROBERT. Influence of Line Processing Parameters on Properties of Carbon Fibre Epoxy Towpreg. *Journal of Composites Science* [online]. 2022, 6(3), 1-3 [cit. 2024-03-23]. ISSN 2504-477X. Dostupné z: doi:10.3390/jcs6030075
- [30] LUKASZEWICZ, Dirk H.-J.A., Carwyn WARD a Kevin D. POTTER. The engineering
-

- 
- aspects of automated prepreg layup: History, present and future. *Composites. Part B, Engineering* [online]. OXFORD: Elsevier, 2012, **43**(3), 997-1009 [cit. 2024-03-15]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2011.12.003
- [31] GARDINER, Ginger. The next evolution in AFP. *CompositesWorld* [online]. 2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/the-next-evolution-in-afp>
- [32] Major Players - Automated Fiber Placements and Automated Tape Laying Machines Industry. CMI. *Automated Fiber Placements and Automated Tape Laying Machines Industry* [online]. 2023 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.coherentmarketinsights.com>
- [33] MAREK, Pavel. Moderní technologie výroby kompozitních dílů. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Www.mmspektrum.com* [online]. 2018 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-technologie-vyroby-kompozitnich-dilu>
- [34] MALNATI, Peggy. Prepreg compression molding makes its commercial debut. GARDNER BUSINESS MEDIA, INC. *CompositesWorld* [online]. 2015 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/prepreg-compression-molding-makes-its-commercial-debut>
- [35] MASON, Karen. Autoclave Quality Outside The Autoclave? *CompositesWorld* [online]. 2006 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/autoclave-quality-outside-the-autoclave>
- [36] SLOAN, Jeff. Microwave: An alternative to the autoclave? GARDNER BUSINESS MEDIA, INC. *CompositesWorld* [online]. 2011 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/microwave-an-alternative-to-the-autoclave>
- [37] Uhlíkové vlákno PREPREG. COMPOSITESPLAZA BV. *CompositesPlaza.com* [online]. 2020 [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://compositesplaza.com/cs/Kategorie-produktu/uhl%C3%ADk/uhl%C3%ADkov%C3%A9-vl%C3%A1kno-prepreg/>
- [38] Chemlease 15 Sealer EZ. *Freeman Mfg. & Supply Co.* [online]. 2024 [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: <https://www.freemansupply.com/products/accessories/semi-permanent-mold-release-systems-solvent-based/semi-permanent-mold-sealers/chemlease-15-sealer-ez>
- [39] Chemlease PMR-90 EZ Semi-Permanent Release Agent. *Freeman Mfg. & Supply Co.* [online]. 2024 [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: <https://www.freemansupply.com/products/accessories/mold-releases/semi-permanent-mold-release-systems-solvent-based/semi-permanent-solvent-based-mold-release-agents/chemlease-pmr-90-ez-semi-permanent-release-agent>
- [40] KUPČÁK, Radim. *Využití kompozitních materiálů pro konstrukci sportovní optiky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické.
- [41] *GRM Systems s.r.o.* [online]. 2024 [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <http://www.grm-systems.cz/>
- [42] Kimya PC-S 3D Filament. *Kimya.fr* [online]. 2024 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.kimya.fr/en/product/pc-s-kimya-3d-filament/>
- [43] Composite-X. LIQCREATE. *Strong engineering resin for 3D-printing* [online]. 2024 [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www.liqcreate.com/product/composite-x/>
- [44] Mycí a vytvrzovací stanice (CW1S). *Prusa3D by Josef Prusa* [online]. 2024 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/myci-a-vytvrzovaci-stance-cw1s/>
-

- [45] NGUYEN, Minh Hoang, Avinkrishnan A. VIJAYACHANDRAN, Paul DAVIDSON, Damon CALL, Dongyeon LEE a Anthony M. WAAS. Effect of automated fiber placement (AFP) manufacturing signature on mechanical performance of composite structures. *Composite structures* [online]. OXFORD: Elsevier, 2019, **228**, 111335 [cit. 2024-05-03]. ISSN 0263-8223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2019.111335



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
$E_t$	modul pružnosti v tahu	[GPa]
$F_L$	lisovací síla	[N]
$F_N$	normálová složka lisovací síly	[N]
$F_T$	tečná složka lisovací síly	[N]
$\varepsilon_{(f,krit)}$	tažnost vlákna	[%]
$\rho$	hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_{Pt}$	pevnost v tahu	[MPa]
$\sigma/\rho$	měrná pevnost	[MPa·m <sup>3</sup> /kg]

### Zkratky

Označení	Legenda
AFP	Automated Fiber Placement
ATL	Automated Tape Laying
CFRM	Carbon Fiber Reinforced Matrix
EPR	Epoxidové pryskyřice
FDM	Fused Deposition Modeling
GCN	Grown Carbon Nanoparticles
HT	Standartní typ uhlíkových vláken
IM	Uhlíková vlákna se střední ruhostí
LFT	Termoplast vyztužený dlouhými vlákny
OAA	Out Of Autoclave
PAN	Polyakrylonitrid
PC	Polykarbonát
PCM	Prepreg Compression Moulding
RTM	Resin Transfer Moulding
SBCF	Stretch Broken Carbon Fiber
SFRT	Termoplast vyztužený krátkými vlákny
SLA	Stereolithography 3D printing
UD	Unidirectional
UPR	Nenasycené polyesterové pryskyřice
UV	Ultraviolet
VARTM	Vacuum Asisted Resin Transfer Moulding
VBO	Vacuum Bag Only
VER	Vinylesterové pryskyřice
VGCF	Vapour Grown Carbon Fibers
VI	Vacuum Injection

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Datasheat Chemlease® 15 Sealer EZ
Příloha 2	Datasheat Chemlease® PMR-90 EZ
Příloha 3	Datasheat IMP503Z
Příloha 4	Vytvrzovací cyklus
Příloha 5	Modely forem
Příloha 6	Nástřihová plán

---