

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**



## **Diplomová práce**

**Výzkum mechanických vlastností a životnosti  
kompozitních rotorových listů určených pro akrobatický  
vrtulník**

**Tomáš Erlich**

© 2023 ČZU v Praze

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

Technická fakulta

# **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Bc. Tomáš Erlich

Inženýrství údržby

Název práce

**Výzkum mechanických vlastností a životnosti kompozitních rotorových listů určených pro akrobatický vrtulník**

Název anglicky

**Research on mechanical properties and lifetime of composite rotor blades determined for acrobatic helicopter**

---

## **Cíle práce**

Cílem diplomové práce je výzkum mechanických vlastností a životnosti nových, použitých a prototypových kompozitních rotorových listů určených pro akrobatické vrtulníky. Sekundárním cílem bude výzkum materiálových aspektů složení jader rotorových listů určených pro akrobatické vrtulníky. V teoretické části se diplomant zaměří na postup výroby, konstrukci a materiálové aspekty v oblasti rotorových listů s důrazem na konkrétní aplikaci. Výzkum mechanických vlastností bude realizován na univerzálním zkušebním stroji. Závěry výzkumu budou podpořeny poznatky získanými ze SEM analýzy. Diplomová práce bude řešena ve spolupráci s firmou MS Composit.

## **Metodika**

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.



### **Doporučený rozsah práce**

cca 60 stran

### **Klíčová slova**

analýza nákladů, materiály rotorových listů, mechanické vlastnosti, metody zkoušení, struktura rotorových listů

---

### **Doporučené zdroje informací**

- BROCKMANN, W.: Adhesive bonding: materials, applications and technology. Weinheim: Wiley – VCH, 2009.
- CAMPILHO, R. D. S. G.: Strength prediction of adhesively-bonded joints. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- EBNESAJJAD, S.: Adhesives technology handbook. Norwich: William Andrew, 2008.
- Firemní literatura, časopisy
- KARAS, J., TICHÝ, T.: Drony. Computer press. 2016.
- LAWRENCE, P.: Rc Helicopters: The Pilot's Essentials. Createspace Independent. 2017.
- MESSLER, R. W.: Joining of materials and structures from pragmatic process to enabling technology. Burlington: Elsevier, 2004.
- MITTAL, K. L.: Contact angle, wettability and adhesion. Boston: Brill Academic Publisher, 2003.
- PACKHAM, D. E.: Handbook of adhesion. Chichester: John Wiley and Sons, 2005.
- PIZZI, A., MITTAL, K. L.: Handbook of adhesive technology. New York: Dekker, 2003.
- 

### **Předběžný termín obhajoby**

2022/2023 LS – TF

### **Vedoucí práce**

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

### **Garantující pracoviště**

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 12. 1. 2022

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 13. 01. 2023

### **Čestné prohlášení**

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Výzkum mechanických vlastností a životnosti kompozitních rotorových listů určených pro akrobatický vrtulník vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne:

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé práce prof. Ing. Miroslavu Müllerovi, Ph.D. za jeho velkou ochotu a odbornou pomoc při psaní diplomové práce a taktéž při měření mechanických vlastností rotorových listů. Dále bych rád poděkoval Karlu Vorlovi z firmy MS Composit za dodané vzorky na měření a taktéž pomoci při psaní práce. Poděkování také patří Hugovi Markesovi za poskytnutí rotorových listů od ostatních výrobců.

## **Výzkum mechanických vlastností a životnosti kompozitních rotorových listů určených pro akrobatický vrtulník**

**Abstrakt:** V diplomové práci jsou zkoumány vlastnosti rotorových listů akrobatického rádiem řízeného vrtulníku. V úvodních statích jsou popsány a rozděleny kompozitní materiály, včetně výroby uhlíkových vláken. Následně je vysvětlen princip fungování vrtulníku, včetně rozdělení typů hlav užívaných v modelařině a odlišnosti zkoušených modelů oproti reálným helikoptérám. V praktické části jsou pozorovány změny struktury a mechanických vlastností kompozitního listu vyrobeného firmou MS Composit používaného jednu leteckou sezónu oproti nepoužitému listu a taktéž budou porovnány tyto listy s konkurenčními výrobci.

**Klíčová slova:** kompozitní materiály, struktura listů, porovnání modelů s reálnými vrtulníky, rozdíly mezi jednotlivými výrobci listů, mechanické vlastnosti

## **Research on mechanical properties and lifetime of composite rotor blades determined for acrobatic helicopter**

**Abstract:** The diploma thesis investigates the properties of rotor blades of an acrobatic radio-controlled helicopter. In the introductory articles, composite materials are described and divided, including the production of carbon fibers. Subsequently, the principle of operation of the helicopter is explained, including the division of the types of heads used in modeling and the differences of the tested models compared to real helicopters. In the practical part, changes in the structure and mechanical properties of the composite sheet manufactured by MS Composit used in one aviation season compared to the unused sheet are observed, and these sheets will also be compared with competing manufacturers.

**Keywords:** composite materials, blade structure, comparison of models with real helicopters, differences between individual blade manufacturers, mechanical properties

# Obsah

Úvod.....	1
<b>Cíl práce.....</b>	<b>2</b>
1. Kompozitní materiály .....	3
<b>1.1 Definice.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Nároky na kompozitní materiály .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Historie kompozitních materiálů .....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 Typy kompozitních materiálů a jejich adheze.....</b>	<b>6</b>
<b>1.5 Jádra kompozitních materiálů.....</b>	<b>8</b>
1.5.1 Typy použitých materiálů na jádra.....	8
<b>1.6 Složení matrice kompozitních materiálů .....</b>	<b>10</b>
1.6.1 Reaktoplastové matrice .....	10
1.6.2. Termoplastické matrice.....	14
1.6.3 Kovové matrice .....	15
1.6.4 Keramické matrice .....	15
<b>1.7 Složení výztuží kompozitních materiálů .....</b>	<b>16</b>
1.7.1 Přírodní vlákna .....	17
1.7.2 Skleněná vlákna.....	17
1.7.3 Aramidová vlákna .....	18
1.7.4 Uhlíková vlákna .....	19

1.7.5 Další typy vláken ve výztužích .....	21
<b>1.8 Výroba kompozitních materiálů.....</b>	<b>22</b>
1.8.1 Ruční kladení .....	22
1.8.2 Stříkání kompozitů.....	23
1.8.3 Nízkotlaké lisování za studena.....	23
1.8.4 Vakuové lisování.....	23
1.8.5 Lisování v autoklávu .....	23
1.8.6 Mokré lisování .....	24
1.8.7 Lisování předimpregnovaných výztuží .....	24
1.8.8 Vstřikovací metody .....	25
1.8.9 Navíjení a oplétání .....	26
<b>1.9 Následné využití kompozitních materiálů.....</b>	<b>27</b>
2.0 Mechanické chování jednosměrných kompozitů.....	28
<b>2.1 Kritéria únavového chování (Dynamické zkoušky).....</b>	<b>30</b>
<b>2.2 Statické zkoušky .....</b>	<b>31</b>
3.0 Vrtulníky .....	32
<b>3.1 Rozdělení vrtulníků a jejich modelářské počátky.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2 Části vrtulníku.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3 Namáhání a aerodynamika listů.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4 Rozdíly ve složení rotorových listů .....</b>	<b>40</b>
4.0 Praktická část .....	41

<b>4.1 Popis zkoušek.....</b>	<b>41</b>
4.1.1 Zkouška tahem .....	41
4.1.2 Zkouška ohybem .....	42
4.1.3 SEM analýza .....	44
<b>4.2. Výroba kompozitních listů u firmy MS Composit a konkurence.....</b>	<b>45</b>
4.2.1 Postup výroby .....	45
<b>4.3 Popis zkušebních těles.....</b>	<b>46</b>
4.3.1 Listy MS Composit .....	47
4.3.2 Listy Zeal Blades .....	47
4.3.3 Listy Rail Blades.....	48
4.3.4 Listy SAB.....	48
<b>4.4 Počet zkoumaných vzorků a jejich ceny .....</b>	<b>49</b>
<b>4.5 Příprava vzorků pro měření .....</b>	<b>50</b>
4.5.1 Příprava vzorků pro měření tahových vlastností.....	50
4.5.2 Příprava vzorků pro měření v ohybu.....	53
4.5.3 Příprava vzorků pro SEM analýzu .....	53
5.0 Naměřené výsledky .....	55
<b>5.1 Výsledky měření tahové zkoušky.....</b>	<b>55</b>
5.1.1 List 1A.....	55
5.1.2 List 2A.....	56
5.1.3 List 3A.....	56

5.1.4 List 4A.....	57
5.1.5 List 5A.....	58
5.1.6 List 6A.....	59
5.1.7 List 7A.....	59
5.1.8 List 8A.....	60
5.1.9 List 9A.....	61
5.1.10 List 10A.....	62
<b>5.2 Sumarizace naměřených výsledků tahové zkoušky .....</b>	<b>62</b>
<b>5.3 Výsledky měření ohybové zkoušky .....</b>	<b>64</b>
5.3.1 List 1B.....	64
5.3.2 List 2B.....	64
5.3.3 List 3B.....	65
5.3.4 List 5B.....	66
5.3.5 List 6B.....	66
5.3.6 List 7B.....	67
5.3.7 List 8B.....	68
5.3.8 List 9B.....	68
<b>5.4 Sumarizace naměřených výsledků ohybové zkoušky .....</b>	<b>69</b>
<b>5.5 Výsledky SEM analýzy .....</b>	<b>71</b>
Závěr .....	75
Zdroje .....	77



Seznam obrázků .....	80
Seznam tabulek .....	83
Seznam příloh .....	84

## Úvod

S postupným vývojem technických prostředků dochází taktéž k nucenému pokroku na poli materiálů. Jedním z nejvíce používaných materiálů v letectví se v posledních desítkách let stávají kompozitní materiály. Jejich výhoda tkví nejen v jejich lehkosti, ale i v mechanických vlastnostech. Například při pohledu na vývoj konstrukcí prvních letadel a vrtulníků bylo používáno výhradně dřevo potažené plátnem. V období před druhou světovou válkou se začalo přecházet na modernější konstrukce v podobě slitin hliníku nebo ocelí. Později dochází k nahrazování těchto materiálů pomocí kompozitů.

Taktéž u rádiem řízených akrobatických vrtulníků musí docházet s rostoucími letovými nároky k nahrazování dříve používaných plastových konstrukcí za uhlíkové rámy a hliníkové domky včetně nosných částí. Stejně tomu je u rotorových listů, kdy původně používané dřevo nahradily kompozitní materiály.

Tato diplomová práce je zaměřena na zkoumání mechanických vlastností rotorových listů s kladením důrazu na to, zda dochází ke změně vlastností po dobu jedné sezony, to je přes 300 startů používaného listu oproti novému. Teoreticky by u kompozitních materiálů nemělo docházet k výrazné změně jejich vlastností po používání takto krátkou dobu. Smyslem práce je si tuto hypotézu potvrdit nebo vyvrátit.

## **Cíl práce**

Cílem práce je v teoretické části popsat kompozitní materiály, historii jejich používání, rozdělení, výrobu jejich složek a aplikaci v leteckém průmyslu. Dále bude objasněn vývoj vrtulníků, jejich fungování při braní zřetelu na aplikaci v modelařině, a následně popsat výrobu kompozitních rotorových listů ve firmě MS Composit včetně složení listů a jejich porovnání s konkurencí a také čím se diferencuje složení oproti „skutečným“.

V praktické části budou zkoumány pevnostní a mechanické vlastnosti rotorových listů. Hlavním úkolem bude porovnat pevnostní odlišnosti listů jednu sezonu litaných oproti novým. Výsledky budou srovnány s konkurenčními výrobky, které se liší svým složením jader listů.

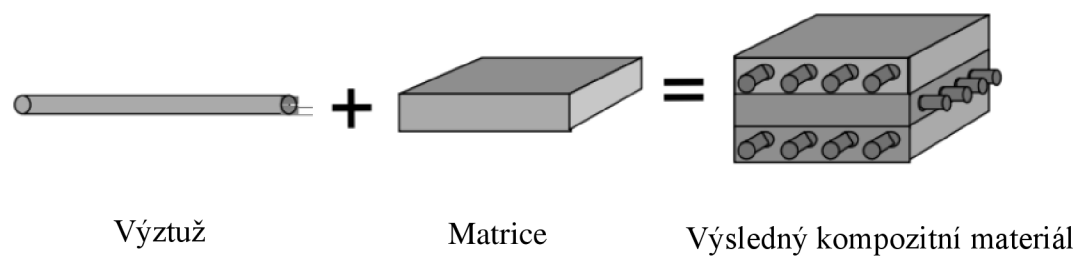
Dle mých předchozích praktických zkušeností by nemělo docházet za tak krátkou dobu používání kompozitních materiálů ke změně jejich letového chování, vlastností a vnitřní struktury.

# 1. Kompozitní materiály

V této kapitole budou nejprve pro pochopení práce definovány kompozitní materiály, dále budou uvedeny nároky na tyto materiály včetně jejich výhod pro využití v letectví, jejich rozdělení včetně postupného vývoje od primitivních kompozitů až po ty, které dnes využíváme v běžných technických aplikacích. Následně budou objasněny materiály využívané pro tvorbu matic, jader a výztuží s bráním zřetelu na zaměření diplomové práce. V posledních podkapitolách bude nastíněna jejich technologie výroby.

## 1.1 Definice

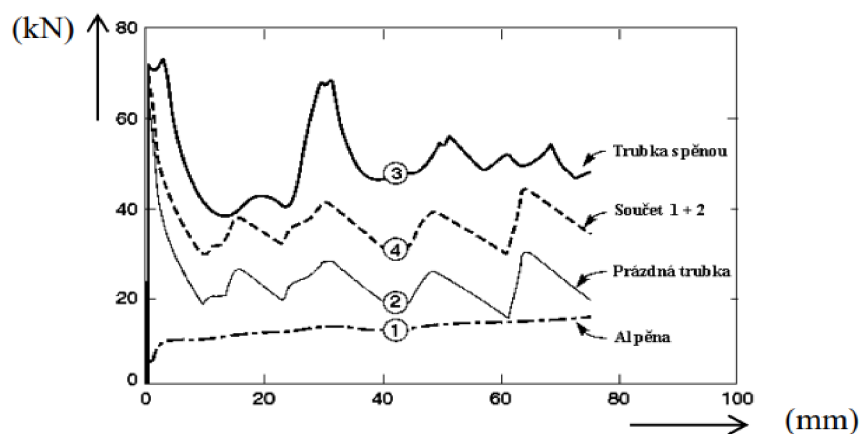
Kompozitní materiály vznikají spojením dvou a více odlišných materiálů, které se liší v makroskopickém měřítku svými vlastnostmi, aniž by docházelo při této kompozici k záměně jejich původní identity. Při tomto spojování nenastává rozpuštění ani homogenizace původních materiálů a každý materiál tvořící kompozici může být samostatně identifikován. Výsledný kompozitní materiál je tvořen výztuží a pojivem, kterému se říká matrice (Obrázek 1). Výztuž může být tvořena buď kovovými materiály, které zastupuje například železo nebo nikl, nekovovými materiály, jako je například uhlík nebo skelná vlákna, nebo organickými, které jsou často polymerního typu – například kevlar. Matrice je při kovové podobě tvořena většinou hliníkem nebo stříbrem, v nekovové podobě keramikou. Organické matrice jsou tvořeny většinou pryskyřicemi. [1] [2] [3]



Obrázek 1: Skladba kompozitu [29]

Mezi výhody kompozitních materiálů patří to, že dochází k výsledné synergii, tudíž k lepším výsledným vlastnostem materiálu, než ke kterým by došlo při pouhém sečtením vlastností jednotlivých prvků (Obrázek 2).

Cílem skladby kompozitních materiálů je dosažení co nejlepšího synergického výsledku. Většina kompozitních materiálů je anizotropní, tudíž při vhodném využití materiálů si můžeme kompozity upravit tak, že se jejich mechanické vlastnosti významně liší dle směru namáhání (měření), a tím se dosahuje například požadovaných pevností. Další výhodou je poměrová lehkost výsledného kompozitu vůči jeho mechanickým vlastnostem. Taktéž je třeba vyzdvihnout jejich dobrou odolnost vůči korozi při porovnání například se železnými materiály. Při využití epoxidových matric, které se zejména využívají v modelářství i v letectví, dochází takřka k vyloučení absorpce kapalných látek, přesněji u modelů vrtulníků létajících na nitromethan olejových mazadel do kompozitu. Velkou výhodou při skládání kompozitních materiálů je jejich téměř dokonalá tvarová přizpůsobivost dle připravené formy. [1] [4]



Obrázek 2: Synergie materiálů [1]

## 1.2 Nároky na kompozitní materiály

Kompozitní materiál musí obsahovat přinejmenším 1/20 výztuže. Obecně vzato má výztuž lepší tahové a pevnostní vlastnosti při porovnání s matricí. Taktéž by mělo být splněno, že oproti doposud používaným materiálům, které chceme nahradit kompozity, by měla být snížena schopnost materiálu absorbovat kapaliny. Díky tomu by mělo dojít ke značnému snížení hmotnosti i ceny. Při porovnání mechanických vlastností je pro kompozity záhodno, aby měly lepší pevnostní a pružnostní charakteristiky jak v provozních, tak při zvýšených teplotách. Z pohledu prostředí, ve kterém je materiál využíván, je vhodné volit takové materiálové složení, aby nedocházelo ke korozi výztuže nebo matrice. Například by se nemělo využívat železobetonové konstrukce v kyselém prostředí. Oproti konvenčně

využívaným materiálům musí být dosažena vyšší tepelná odolnost, tudíž lze kompozitní materiály využívat i při vyšších teplotách bez omezení. Taktéž by mělo docházet k prodloužení funkční doby daného prvku. [1] [2]

### **1.3 Historie kompozitních materiálů**

První záznamy o použití kompozitních materiálů ve stavebnictví mají kořeny již ve starověku (3 miliony – 3500 před naším letopočtem), kdy docházelo k využití spojení bahna a slámy na tvorbu zdíva domů. V některých kulturách taktéž docházelo na stavbách ke spojování dřeva a hlíny. Zhruba 3400 let před naším letopočtem v tehdejší Mezopotámii pokročila výroba primitivních kompozitních materiálů – vznikla překližka spojením lepidla a dřeva. [5]

První válečné využití kompozitů se váže ke křížáckým výpravám, kdy spojováním oceli se středním a vysokým obsahem uhlíku byla vytvářena tzv. damascenská ocel. V Asii zhruba ve 12. století našeho letopočtu byla realizována výroba luků pomocí spojení šlach, listů rohoviny a jader z bambusu. Takto vytvořené zbraně získávaly oproti běžně využívaným lukům výhodu pevnosti a dostřelu, kdy dostřel tohoto luku dosahoval vzdálenosti až půl kilometru. [5]

Doba, která se dá považovat za významnou v rozvoji modernějších kompozitních materiálů, se datuje od počátku 20. století. V roce 1917 dochází k prvnímu využití bakelitu v automobilovém průmyslu. Také dochází ke znatelnému posunu v oblasti polymerních pryskyřic a v technologii sloužící pro výrobu skelných vláken. V roce 1936 si americký chemik a vědec nechal patentovat nenasyčenou polyesterovou pryskyřici. Taktéž začátkem čtyřicátých let dvacátého století dochází k prvnímu nasazování epoxidů. [5]

Využívání kompozitních materiálů při tvorbě trupů a jiných doplňků v letectví se objevuje již za 2. světové války v podobě aplikace tzv. Plexiglasu a později Fiberglasu, který obsahuje skelná vlákna s matricí z reaktoplastu. Tento vynález byl hojně využíván například na bombardérech B-17 na tvorbu radarových překrytů a kokpitů. U bojových letounů je jedním z prvních představitelů využití kompozitních materiálů na trup letadla britský Spitfire, u kterého byl trup vyztužen pomocí sklolaminátových vláken. Na konci druhé

světové války byl taktéž využit sklolaminát u konstrukce čtyřmotorového letounu americké výroby B-15. Těsně po druhé světové válce byl vytvořen jeden z do dnes na světě největších letounů Hughes H-4, který využíval dřevěné konstrukce, kde bylo využito na nosnících křídel polymerní matrice a dřevěné výztuhy. Tento letoun se nikdy nedostal do sériové výroby. [6] [2] [5]

Díky poválečnému dobývání vesmíru věda zaznamenala obrovský pokrok v oblasti kompozitních materiálů. Koncem padesátých let 20. století bylo ve Spojených státech amerických vynalezeno uhlíkové vlákno z vyžukávk. V roce 1971 započala sériová výroba uhlíkových vláken z polyakrylonitrilu. V šedesátých letech přichází rozmach využívání polymerních vláken, kdy v roce 1965 je patentován kevlar. Taktéž v těchto letech věda zaznamenala posun na poli keramických vláken. [2]

U modelů rádiem řízených vrtulníků dochází nejprve ke konci 20. století k nahrazování dřevěných listů pomocí kompozitů na bázi uhlíkových vláken a epoxidové pryskyřice. Zhruba okolo roku 2000, jsou současně původní plastové bočnice nahrazovány tímto typem kompozitu. Mezi průkopníky tohoto trendu se zařadila německá společnost Robbe se svým modelem Millenium.

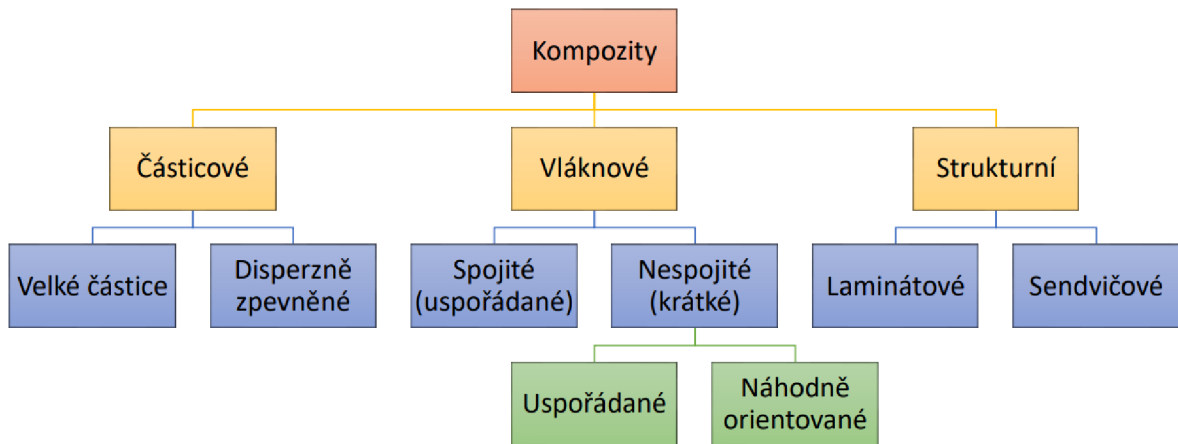
## **1.4 Typy kompozitních materiálů a jejich adheze**

Dle velikosti výztuže lze kompozitní materiály dělit na mikrokompozity, makrokompozity a nanokompozity. U materiálů s nanokompozitovou výztuží se v praxi pohybují rozměry výztuže v řádech nanometrů. Makrokompozity mají nejdelší výztuž, která dosahuje délky od jednotek po stovky mm. Mikrokompozitní materiály dosahují délek v řádu jednotek až stovek mikrometrů. [1]

Kompozitní materiály lze v zásadě rozdělit na částicové, vláknové a strukturní. Vláknové kompozity připomínají svou skladbou vláken rovinný směr, kterému se říká jednosměrná skladba ať již z dlouhých nebo krátkých vláken. Výztuž lze skládat i křížově, což se nazývá křížové skládání. Při vzniku vícesměrné skladby výztuže vznikají pěti a více úhelné obrazce. Dlouhá i krátká vlákna lze skládat i pomocí prosté nahodilé skladby. [3]

Výhodou částicových kompozitů je rozptyl jednotlivých částic v prostředí matrice, kdy se díky této dispergaci zvyšují mechanické vlastnosti kompozitního materiálu. [3]

U strukturních typů materiálů dochází k vrstvení jednotlivých vrstev na sebe. [3]



Obrázek 3: Rozdělení kompozitů [30]

Kompozitní materiály lze rozdělit dle typu disperzní fáze. Nejběžněji používaná disperze je z pevné fáze. Méně využívaná disperze je pomocí kapaliny. Typické pro tento druh fáze je, že vznikají pórovité konstrukce, které lze preparovat mazivy. Poslední typ disperzní fáze je plynná, která je ve většině případů reprezentována různými druhy pěn. [1]

Matrice lze také rozdělit na tři základní typy. První typ nese označení PMC a jedná se o využití materiálů na bázi plastu. Druhým typem je kovová matrice označovaná jako MMC. Poslední skupina, do které se zařazují mimo jiné i skelná vlákna, je matrice keramická, značená CMC. [1]

Adheze v kompozitních materiálech může být typu mechanického zaklínění, kdy je využíváno tvarových nerovnosti mezi povrchy, které jsou v kontaktu, a tím dochází k vzájemnému zaklínění. S rostoucími nerovnostmi těchto rozhraní rovněž narůstá jejich vzájemná pevnost. Fyzikální adheze je založena na vzájemné smáčivosti látek tvořících kompozit (předpokládá se, že je matrice tvořena kapalinou a výztuž tuhou látkou). Jedním z ukazatelů kvality fyzikální adheze je úhel smáčivosti. Pokud se látky pohybují v prvním kvadrantu, lze o nich mluvit jako o smáčivých. Jestliže se vyskytují v druhém kvadrantu,



jsou vzájemně nesmáčivé. Z tohoto důvodu je potřeba provádět lubrikaci vláken například pro skelná vlákna, jelikož sama o sobě mají nízkou přilnavost. Nízkou přilnavostí se taktéž vyznačují uhlíková vlákna. Chemická adheze se může realizovat na rozmezí matrice, pokud „matrice a disperze vzájemně difundují, na rozhraní vzniká difúzní vrstva s velmi silnou adhezí, nebo když matrice a disperze spolu chemicky reagují, na rozhraní vzniká mezivrstva chemické sloučeniny“. [1, s. 19]

Adheze se dá v materiálech měřit pomocí přímé metody, kdy dochází ke statickým tahovým, tlakovým, smykovým nebo ohybovým zkouškám. U těchto destruktivních zkoušek je zapotřebí posoudit tvary vzniklých lomů, díky kterým lze určit sílu adheze v kompozitu. Stejně tak lze přilnavost materiálů měřit pomocí vrýpaní diamantových hrotů. [1] [3]

## **1.5 Jádra kompozitních materiálů**

Pro vylepšení mechanických vlastností kompozitních výrobků lze uvnitř využívat jádra. Celé této struktuře se posléze říká sendvičová, jelikož vzniká spojením jádra, které je zastoupeno například v podobě jedolité pěny, papíru skládaného do vzorců připomínajících včelí plástve nebo čtyřúhelníky a dřeva. Toto jádro obklopuje svrchní materiál v podobě kompozitu. Takovéto spojení přináší další výhodu v podobě ušetření svrchních materiálů.

### **1.5.1 Typy použitých materiálů na jádra**

Balsově dřevo je hojně využívané v modelářství na stavbu trupů letadel. V poslední době se začínají realizovat sendvičové konstrukce, kde dochází ke spojení balsového jádra se svršky tvořenými uhlíkovými výztužemi a epoxidovou matricí. Mezi nevýhody balsy patří její náchylnost na nasákávání se vodou, kdy poté ztrácí své mechanické pevnosti. Při aplikaci balsy je důležité si uvědomit směr namáhání. Je vhodné aplikovat vlákna do směru namáhání tak jak je tomu u stromů, jelikož je zde vyšší pevnost, než je tomu při namáhání kolmo na směr vláken. [7] [8]

Dalším hojně využívaným typem jádra, ačkoliv už v klasickém průmyslovém letectví, jsou papíry nasycené pryskyřicí, kovové či polymerní materiály skládané do vzorců připomínajících včelí plástve. Jejich tvar, síla výztuhy a vzdálenost určují výsledné chování

kompozitního materiálu, přičemž lze dosáhnout silně odlišných vlastností v závislosti na směru namáhání. [8]

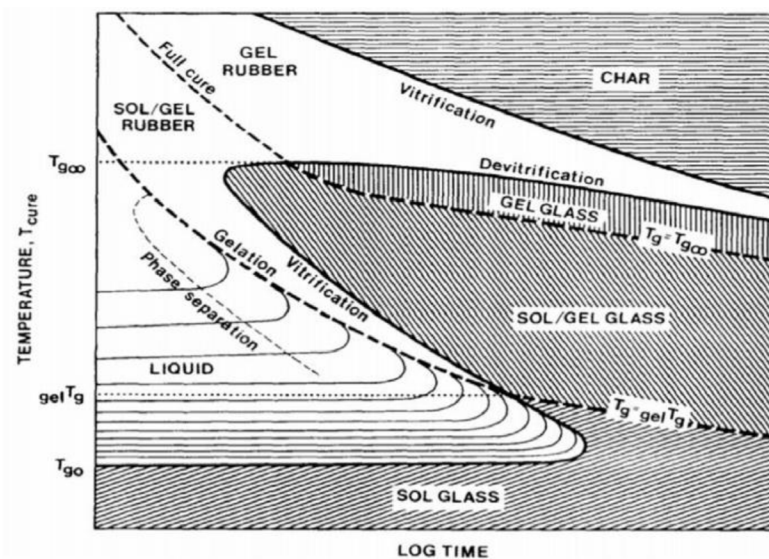
Použitím pěn jako jader kompozitních materiálů lze oproti předchozímu řešení ušetřit náklady na materiál, dosáhnout lepších hydrofobních a akustických vlastností, a také zjednodušit výrobní cyklus. Nevýhoda tkví v nižší tuhostní pevnosti. [8] Na tvorbu jader se nejčastěji využívají tyto materiály:

- Polyuretanová pěna se hodí spíše jako dobrý izolant nebo pro aplikace při nízkém mechanickém namáhání. Při její výrobě do ní lze přidávat retardéry hoření v podobě fosforu. [8]
- Polyvinylchloridová pěna je jedna z předně používaných pěn zásluhou jejích dobrých akusticko-izolačních nebo mechanických vlastností. PVC pěnu lze aplikovat ve dvou podobách, a to v zesíťované a termoplastické. Její nevýhoda tkví v náchylnosti k plasticitě při vyšších teplotách. V tomto ohledu je důležité brát zřetel na výrobní postup, aby nedošlo k degradaci pěny. [8]
- Polystyrenová pěna se běžně aplikuje do formy společně s nadouvadlem, které zapříčiňuje zvýšení objemu pěny při pečení kompozitu. Výhodou tohoto typu jádra je jeho relativně nízká pořizovací cena. Nejvíce je polystyrenová pěna využívána v aplikacích, kde slouží jako látka s nízkou tepelnou vodivostí. [8] Tato aplikace se využívá pro výrobu rotorových listů ve firmě Fun-key. Jejich technologie využití jader spočívá v opracování polystyrenových desek do požadovaného tvaru pomocí mechanických nástrojů nebo řezaček. Takto získané tvary jader se následně vloží do formy a začnou se na ně ručně klást jednotlivé vrstvy kompozitu.
- Tvrzené akrylátové pěny umožňují jako jedny z mála pečení při teplotách blízkých se k 200 °C. Z pohledu nákladů se však jedná o jedny z nejdražších běžně využívaných jader. Svou vyšší pořizovací cenu však nahrazují dobrými dielektrickými, chemickými nebo mechanickými vlastnostmi. V leteckém průmyslu se používá pod označením Rohacell. [8]

## 1.6 Složení matrice kompozitních materiálů

Matrice slouží jako spojovací část výztuže. Jejím úkolem je ochránit ve většině případů křehkou výztuž, zajistit přenos zatížení mezi vlákny a vytvořit požadovaný tvar kompozitního výrobku. U matrice je velice důležité, aby byla dodržena požadovaná adheze, ať už mechanická, fyzikální nebo chemická. Další zkoumaná vlastnost při výběru matrice je její hustota, Youngův modul pružnosti v tahu, mezní tažnost a napětí v tahu. [2] [3]

Mezi hojně využívané typy patří polymerní matrice zastoupené termoplasty či reaktoplasty. Výhodou reaktoplastů je, že po jejich vulkanizaci zůstávají ve své podobě, naopak termoplasty ve zvýšených provozních teplotách ztrácí své pevnostní a tvarové dispozice a stávají se tvárnými. Dále lze polymerní pryskyřice používat jako izolátory v elektrotechnice. Pomocí TTT diagramů se určují fázové přeměny daných materiálů v závislosti teploty na čase (Obrázek 4). [9] [3]



Obrázek 4: TTT diagram [9]

### 1.6.1 Reaktoplastové matrice

Reaktoplastové matrice jsou nejčastěji používané matrice u kompozitních materiálů. V základu jsou ve dvou skupenstvích, kapalném a pevném, přičemž pevné skupenství se zkapalňuje. K vytvrzování dochází za pomoci polyadice nebo polymerace. U níže popisovaných reaktivních pryskyřic dochází k požadovanému vytvrzení díky smíchání látek s tvrdidly. [10]

## **Nenasycené polyesterové pryskyřice – UP-R**

Nenasycené polyesterové pryskyřice mají slabě žluté zbarvení. Jsou vytvrzovány buď za pomoci zvýšené teploty, nebo při pokojových teplotách. „*K vytvrzování UP-R dochází radikálovou kopolymerizací dvojných vazeb v pryskyřici s dvojnými vazbami molekuly styrenu.*“ [10, s. 80] Jejich výhodou je, že při vytvrzování nevznikají žádné těkavé složky. Jednotlivé druhy polyesterových pryskyřic se od sebe liší dle základních molekul. Výroba nenasycených polyesterových pryskyřic je založena na smíchání glykolů s dikarbonovými kyselinami. Důležitá plniva obsažená v těchto pryskyřicích jsou kaolin, křída a hydroxid hlinitý. Při práci s těmito pryskyřicemi je důležité, aby při výrobě došlo k úplnému vytvrzení. Pokud by se tomu tak nestalo, v průběhu doby využívání produktu, by mohlo docházet ke změnám jak mechanickým, tak například rozměrovým. Z pohledu chemické odolnosti jsou nenasycené polyesterové pryskyřice odolné proti arenům nebo alkáliím. Bohužel tuto odolnost nelze kombinovat, tudíž jsou odolné proti jednomu nebo proti druhému. Při práci s těmito pryskyřicemi je nutné počítat až s 9% smrštěním z důvodu chemických reakcí a odváděním tepla. [10]

## **Vinylesterové pryskyřice – VE-R**

Na rozdíl od UP-R se zesíťování u vinylesterových pryskyřic provádí využitím koncových materiálových skupin, které taktéž obsahují esterové vazby. Tato pryskyřice se vyznačuje lehce modrozeleným vzhledem. Oproti základním UP-R jsou finančně nákladnější, na druhou stranu mají ale lepší mechanické vlastnosti a nižší viskozitu. Mezi jejich další výhody patří dobrá rezistivita proti vyšším pracovním teplotám a jsou odolné proti arenům. Mezi nevýhody při porovnání s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi založenými na propoxylovaném bisfenolu A patří jejich vyšší křehkost a nižší odolnost proti alkáliím. [10]

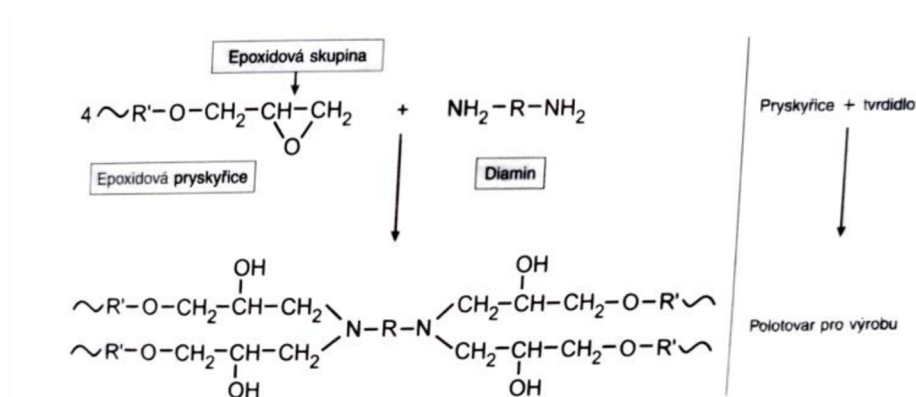
Tento typ reaktoplastových pryskyřic lze získávat pomocí tří způsobů. První je známý pod označením fenakrylátové pryskyřice, který je vytvrzován pomocí peroxidu. Druhý způsob je tvořen bisfenolem A a novolakem, jež jsou zesíťované pomocí  $C_8H_8$ . Poslední zástupce je Vinylesteruretanová pryskyřice, která se může pyšnit zlepšenými mechanickými vlastnostmi, a hlavně schopností snášet teploty okolo 200 °C.

Nejčastěji jsou rozmíšeny ve styrenu. Obecně lze ale říct, že VE-R snáší velmi dobře práci v korozním prostředí, a proto je možné nalézt je například na chladících věžích nebo komínech. [10]

### Epoxidové pryskyřice – ER-P

Epoxidové pryskyřice představují matrice, které se hojně využívají pro výrobu kompozitních materiálů v letectví. Po vytvrzení mají takřka průhledný vzhled. V modelařině je to naprostá většina kompozitů, které obsahují právě tento typ matrice, jelikož jsou význačné dobrými mechanickými, a zvláště pevnostními vlastnostmi. S těmito matricemi se lze setkat i u větrných elektráren.

Vyskytují se v pevném a kapalném skupenství ve většině případů s mírně nažloutlým vzhledem. Jsou význačné tím, že jsou v jedné molekule zahrnuty dvě epoxidové skupiny. Tvrdidlo se většinou objevuje v kapalném skupenství, v jehož molekule jsou navázány ionty vodíku. Jejich vznik je vázán na reakci pryskyřice a tvrdidla. K vytvrzování dochází díky polyadici. Reakce mezi tvrdidlem ve formě diaminu a pryskyřicí je popsána na Obrázku 5. [10]



Obrázek 5: Polyadice pryskyřice s tvrdidlem [10]

Epoxidový ekvivalent vyjadřuje, jaký počet epoxidových skupin je obsažen v jednom molu. Díky tomuto ekvivalentu se vypočítává potřeba tvrdidla a epoxidové pryskyřice pro danou aplikaci. Epoxidové číslo udává, kolik tvrdidla je zapotřebí při využití 0,1 kg pryskyřice. Vlastnosti výsledné epoxidové pryskyřice jsou dány výběrem tvrdidla a možných přísad. [10]

Pracovat s epoxidy lze za zvýšených nebo běžných teplot. Při běžných teplotách je zapotřebí využít urychlovačů. Při aplikaci epoxidových pryskyřic, kdy dochází při výrobě ke gradaci teploty a posléze po vytvrzení k pozvolné degradaci teploty, se tímto lze vyhnout vnitřnímu pnutí v materiálu. Oproti UP-R u epoxidových pryskyřic je zhruba okolo 4 % nižší smrštění. To má za následek lepší odolnost proti deformaci, ale je to vykoupeno delší dobou tvrdnutí. Dále jsou zhruba o 300 % dražší než UP-R a je nutné dodržet epoxidové číslo, jinak nedojde ke správnému vytvrzení, a tím k požadovaným mechanickým vlastnostem. Při srovnání zdravotních rizik při aplikaci může dojít u použití kapalných epoxidových pryskyřic k alergickým reakcím zejména v oblasti rukou nebo očí. [10]

Epoxidové matrice se, jak již bylo zmíněno, hodí například pro rotorové listy, jelikož umí snášet dynamická zatížení. U této aplikace matrice je vhodné využít uhlíková vlákna jako výztuž. V tabulce 1 jsou popsány příklady a využití ER-P. [10]

Název pryskyřice a tvrdidla	Využití
Roztok s bromem	Prepregy
Bisfenol A + formulované aminiové tvrdidlo	Odolné vůči hydrolýze
Cykloalifatická pryskyřice + anhydridové tvrdidlo	Pro vysokou teplotní odolnost
Bisfenol A + formulované aminiové tvrdidlo	Pro navíjení
Formulovaná epoxidová pryskyřice + cykloalifatické aminiové tvrdidlo	Pro laminování
Houževnatá epoxidová pryskyřice + aminové tvrdidlo	Vyšší mechanické pevnosti
Formulovaná epoxidová pryskyřice + aminové tvrdidlo	Průmyslová aplikace
Formulovaná epoxidová pryskyřice + alifatické polyamidy	Listy větrných elektráren
Formulovaný epoxidový systém	Listy větrných elektráren
Epoxidová novolaková pryskyřice tvrzená pomocí aminu	Letecký průmysl
Monomer kyanátosteru	Letecký průmysl

Tabulka 1: ER-P a jejich využití [10]

### Fenolické pryskyřice – PF-R

Fenolické pryskyřice se získávají kondenzací z kapalných aldehydů a fenolů. Dle molárního poměru fenolu a formaldehydu se určuje, zda jde o rezoly či novolaky. Při práci s těmito pryskyřicemi se z nich při zhruba 80 °C začíná odpařovat voda a při tom dochází ke změkčování hmoty, která do této chvíle neztvrdla. Výsledný produkt při zpracování těchto matric se označuje jako rezit. Jak již bylo zmíněno, rezoly se nejčastěji vytvrzují pomocí tepla. Druhá možnost vytvrzení je pomocí kyselin. Při práci s těmito pryskyřicemi je nutné

používat nástroje, které jsou rezistivní proti kyselinám. Během vytvrzování se uvolňují těkavé látky jako je například čpavek. Bez použití aditiv jsou PF-R v základu velice křehké. Uplatnění těchto pryskyřic lze nalézt například při výrobě tepelných izolací. [10]

### Další možnosti reaktoplastických matric

Za zmínku dále stojí metakrylátové pryskyřice zvané MA-R a izokyanátové pryskyřice.

	$\rho(10^3 \text{ kgm}^{-3})$	$E_t(\text{GPa})$	$\sigma_{pt}(\text{MPa})$	$\varepsilon_{m,krit}(\%)$
Epoxidová pryskyřice	1,1 - 1,4	2,1 - 6	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	1,2 - 1,9	3,0 - 3,1	80 - 190	2-40

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti reaktoplastů [3]

### 1.6.2. Termoplastické matrice

Termoplastické materiály jsou většinou ve formě pevného skupenství, které je potřeba pro dosažení ideální kapalnosti zahřát na více jak na 200 °C. U těchto látek je nevhodné používat rozpouštědla, jelikož se poté dosahuje nižší korozní odolnosti při působení silových účinků. [10]

Pokud je potřeba u termoplastů využít výtuhu v podobě krátkých vláken, je nutné tak učinit pouze v případech, pokud se znatelně zlepší mechanické vlastnosti nebo se sníží náklady. Pokud tomu tak není, je lepší využít nevyztužené termoplasty. Také je důležité brát v potaz procento obsahu těchto vyztužovacích vláken při kompozici, během jejich využití musí dojít ke stejnému smočení všech vláken. Výztuž u krátkých vláken je možno provádět zhruba do ½ celkového obsahu látek. Při vyztužování termoplastické matrice pomocí dlouhých vláken přináší výhody v pevnostních charakteristikách, ceně a jednodušším zpracování. Při využití výztuže z dlouhých vláken v termoplastických maticích lze dosáhnout vysokopevnostních kompozitních materiálů. [10] V tabulce 3 jsou popsány vlastnosti vybraných termoplastických matric.

Značná nevýhoda oproti reaktoplastům je zhruba 100 - 1000x větší viskozita při práci s termoplasty. [3]



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

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti termoplastů [3]

V tabulce 4 je provedeno srovnání termoplastických a reaktoplastických matric.

	<b>Termoplasty</b>	<b>Reaktoplasty</b>
<b>Cena</b>	Závislá na druh aplikace	Nízká
<b>Skladování</b>	Neomezené	Omezená skladovatelnost z důvodu probíhající reakce
<b>Teplota při zpracování</b>	Teplota taveniny	Teplota okolí
<b>Ruční kladení</b>	Nevhodné	Vhodné pro větší díly
<b>Mechanické vlastnosti</b>	Houževnaté, sklony k tečení materiálu (krípu)	Dynamicky zatížitelné
<b>Stárnutí</b>	Malá odolnost	Vysoká odolnost
<b>Možnost opravy</b>	Omezená	Snadná

Tabulka 4: Porovnání termoplastických a reaktoplastických matric [10]

### 1.6.3 Kovové matrice

Kovové matrice jsou vhodné pro využití při vyšším mechanickém namáhání. Typičtí zástupci kovových matric jsou hliníkové, titanové, hořčíkové, měděné a niklové. Výhodou těchto matric je jejich vysoká poměrová mechanická pevnost při podílu s hmotností. Také dobře odolávají vysokým provozním teplotám při zachování si tvaru nebo kontaktem s mazivy či palivy. Příklady využití těchto materiálů lze hledat například v automobilovém průmyslu, kde se uplatňují jako vložky válců nebo jako kotouče brzd, dále v ložiskách, na výrobu rámců jízdních kol, v leteckém či kosmonautickém průmyslu na výrobu motorů. [11]

### 1.6.4 Keramické matrice

Výhodou keramických matric je jejich tvarová a pevnostní stálost při vysokých provozních teplotách. Oproti samotné keramice jsou keramické kompozitní materiály



mnohem odolnější proti prasklinám a současně mechanicky pevnější. Nevýhodou využití keramických matic je jejich nízká odolnost při tlakovém namáhání. [12]

Výroba CMC nejčastěji probíhá pomocí pyrolýzy. Běžně využívané výztuže jsou uhlíkové, oxidy hlinité a karbidy křemíku, ať již v podobě krátkých nebo dlouhých vláken, která lépe přenáší namáhání. [12]

Aplikaci CMC lze nalézt například v tepelných výměnících, v raketových motorech, v hořácích a dalších velmi tepelně namáhaných součástkách. [12]

## 1.7 Složení výztuží kompozitních materiálů

Vlákna kompozitních materiálů se vyskytují v mnoha podobách. Většina skladeb se hodí například jak pro uhlíkové výztuže, tak pro skleněné apod.

- Roving se vyskytuje v podobě sloučených rovnoběžných pramenů vláken, které jsou vyskládány vedle sebe. Takto dokončené prameny se navijí na špulky podobné například 3D tiskovým, akorát s mnohanásobně větší hmotností.
- Rohože se vyskytují ve formě buď z kontinuálně průchozích vláken nebo sekaných. V obou případech dochází při skladbě ke svévolnému pokládání vláken a jsou smáčena polymerním pojivem, aby držela požadovanou strukturu
- Rovingové tkaniny jsou tvořeny skládáním rovingových pramenů, které jsou přes sebe příčně a podélně překládány
- Tkaniny z vláken, jak již název napovídá, vznikají tkaním jednotlivých vláken přes sebe, přičemž stejně jako u rovingových tkanin lze zaměňovat poměr překladů ve vodorovném a svislém směru.
- Hybridní tkaniny se skládají z výztuží, které jsou heterogenní. Často se využívá spojení uhlíku a skleněných vláken pro dosažení lepšího synergického efektu.
- Prepregy jsou výztuže většinou z uhlíkových nebo skelných vláken již z výroby opatřených pryskyřicí. Prosycená vlákna musí být zchlazena, aby

došlo k zastavení tuhnutí, a tím znemožnění výrobní aplikace. Prepregy se musí spotřebovat do půl až roku od vyrobení a musí být skladovány v teplotách okolo  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Výhodou využití prepregů je opakovatelnost kvality výroby při porovnání s ručním kladením a prosycováním výztuže. Pro úplné vytvrzení tohoto materiálu je zapotřebí pec schopná vytopit prostor v rozmezí  $80\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$  dle aplikace s formou na požadovaný tvar obsahující prepreg, do které je přivedeno vakuum. [10] [13] [14]

### **1.7.1 Přírodní vlákna**

Přírodní vlákna mohou tvořit buď zvířata, nebo mohou být za tímto účelem pěstována. Patří mezi jedny z hojně rozšířených vláken, které se nevyužívají pro výrobu lidmi používaných kompozitů, nýbrž k chytání potravy, jsou pavoučí vlákna. Další přírodní výztuži může být v kompozitních materiálech například bavlna, konopí nebo kokosová vlákna. Tato vlákna mají jeden společný prvek, a tím je celulóza. V zemích třetího světa jsou tyto suroviny velmi hojně využívány a jsou z nich realizovány kompozitní materiály na značnou část vyráběných produktů. [1]

### **1.7.2 Skleněná vlákna**

Skleněná vlákna se získávají po roztavení materiálů obdobným těm, které jsou potřeba při výrobě klasického skla, jako je například křemičitý písek, vápenec, kaolin a další. Tyto prvky se roztaví a promíchají, kdy poté sklovina opouští tavící pec pomocí trysek a dále je navíjena a prodlužována na záhodnou tloušťku. Označení sklovin se liší dle kontinentů, například při vyšším využití oxidu křemičitého, a tím dosažení lepších mechanických parametrů ve sklovině se na evropském kontinentě takováto sklovina označuje písmenem R, ve Spojených státech amerických se značí písmenem S a v Asii T. Využitím skloviny neobsahující alkalické složky lze dosáhnout velice dobrých izolačních vlastností. Vlákna pro využití v elektronice se značí písmenem E. Sklovina pro využití v chemicky ztížených prostředích, zvláště pro kontakt s kyselinami, se označuje C. Skleněná vlákna jako taková dosahují izotropních vlastností. Další dobrá vlastnost těchto výztuží je, že jsou rezistivní vůči ohni. Ani při teplotě okolo  $523\text{ K}$  (bezmála  $\frac{1}{4}$  tisíce stupňů celsia) nedochází ke změnám mechanického chování výztuže. [10]

Při tvorbě kompozitních materiálů ze skelných vláken je doporučováno provádět vláknennou lubrikaci za účelem dosažení lepší adheze, jak tomu bylo již popisováno ve stati 2.4. skelná vlákna v podobě výztuže lze použít jak u reaktoplastických, tak u termoplastických matric. [10]

Dle skladby vláken lze dosáhnout odlišných mechanických a při práci se skelnými materiály technologických odlišností. Plátňovou skladbu si lze představit jako prolínání jednotlivých vláken mezi sebou. Při využití keprové skladby jsou vždy dvě vlákna vedle sebe a jsou protahována dalšími dvěma vlákny střídavě pod a nad nimi. Tato vazba se hodí pro rozměrově náročnější díly. Saténovou skladbu si lze představit jako přeložení skladby příčných a podélných vláken po určitém počtu vláken a jen jedním překladem a vrácením se do původní polohy. Touto skladbou lze docílit takřka rovinnosti výsledné plochy. [10]

V modelářské branži se využívají laminátové výztuže většinou pro maketové hlavní a vrtulkové listy, přičemž skladba skelných vláken je plátňová.

### **1.7.3 Aramidová vlákna**

Pro aramidová vlákna jsou příznačné dobré mechanické a pevnostní vlastnosti. Vyznačují se dobrým tlumením dynamického zatěžování, které je zhruba devítinásobně vyšší než u výztuží založených na uhlíkových vláknech. Oproti skleněným vláknům je to zhruba šestinásobek. Jedná se o vyztužující vlákno s nejnižší hmotností při porovnání s běžně využívanými vlákny. Aramidové výztuže se vyznačují značnou anizotropií. Při volbě aplikace pro tato vlákna je vhodné brát v potaz druh namáhání, pro aramidová vlákna je příznačné, že se hodí pro namáhání tahem. Je nutné brát v potaz prostředí, ve kterém budou výrobky provozovány, jelikož u těchto vláken při dopadu ultrafialového záření dochází k degradaci výztuže, a produkt tak ztrácí své mechanické pevnosti. [10]

Molekuly ve vláknech, které jsou založeny na organických polymerech, spojují vodíkové můstky. Jejich výroba začíná spojením 80 hmotnostních %  $H_2SO_4$  s 20 hmotnostními % v podobě vláken tvořených polymery. Společně se tyto látky smíchají v míchačce, kde jsou následně z trysky vytlačovány, spřádány a navíjeny. Před aplikací vedoucí ke vzniku kompozitního materiálu se vlákna musí zbavit veškeré vody, kterou by mohla vázat na sebe. Představitelem těchto výztuží jsou para-aramidová vlákna – kevlar. Ten nachází velké využití jak ve vojenském prostředí na výrobu helem a vest, tak například

i v leteckém nebo sportovním prostředí, kde tyto vlákna slouží k vyztužování konstrukcí. [1] [3] [10]

#### 1.7.4 Uhlíková vlákna

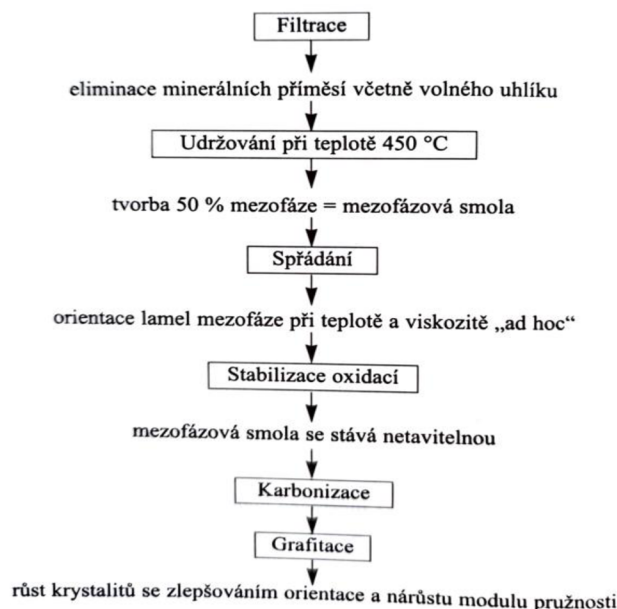
Při srovnání kompozitních materiálů na bázi uhlíkové výztuže s běžně využívanými oceli mají uhlíková vlákna zhruba 4x menší hustotu při zachování stejných, v některých případech i lepších mechanických vlastností, než je tomu u ocelí. Uhlíková vlákna jsou vyráběna pomocí pyrolýzy organických látek, jakými jsou například smola nebo polymery. Pyrolýza se skládá ze dvou základních stavů, prvním stavem je tzv. koksování, kdy výsledným produktem je koks. Druhý stav se označuje jako karbonizace, která vede až ke vzniku uhlíkových vláken. Pro změnu vlastností výsledných materiálů se používá grafitace, která začíná při teplotách nad 2500 °C. [15]

Nejrozšířenější látkou při výrobě uhlíkových vláken pro kompozitní materiály je polyakrylonitril, zvaný PAN. Při výrobě jsou nově vzniklá vlákna v podobě roztaveného termoplastu vycházejícího z trysek dále tažena a prodlužována za účelem změny směřování molekul do požadovaného natočení, a to rovnoběžně s osou vlákna. Následuje proces stabilizace, kdy se při teplotách v rozmezí 200 až 300 °C vlákno za působení tahového napětí zbavuje vody. Výsledkem je vlákno načernalé barvy s dobrou flexibilitou. Po tomto kroku přichází na řadu karbonizace, při které je zhruba půl minuty až minutu vlákno vystaveno teplotám až 1500 °C. Toto celé má za následek zvýšení modulu pružnosti v tahu a zhruba 4/5 celkového množství ve vlákne tvoří uhlík. Další technologická operace při výrobě uhlíkových vláken pomocí PAN je grafitizace v pecích založených na indukčním principu ohřevu za přítomnosti ochranné atmosféry v podobě argonu. Celý tento proces trvá až 20 vteřin a dosahuje se při něm teplot přesahujících 2500 °C, obvykle maximálně do 3000 °C. Toto celé má za následek obsažení ještě vyššího procenta uhlíku ve vláknu, a tím dalšímu navýšení modulu pružnosti v tahu. Poslední částí tohoto výrobního cyklu je povrchová úprava. Jak již bylo zmíněno v dřívějších statích, při výrobě kompozitních materiálů je potřeba, aby mezi maticí a výztuží byla dobrá přilnavost. Jen díky tomu lze docílit požadovaného chování výsledného produktu. Při povrchové úpravě dochází k cílené oxidaci buď pomocí plynů nebo kapalin. [10] [15] [1]

Vlákna vyrobená ze smoly mají při normálním výrobním cyklu mechanické vlastnosti ve všech směrech stejné. Úpravou výrobního procesu a přidáním aditiv však lze docílit požadované změny vlastností těchto vláken při zlepšení mechanického chování v určitém směru namáhání. Srovnáním výrobních nákladů spojených s těmito dvěma výrobními postupy vychází lépe vyrábět pomocí PAN. Před výrobním cyklem vláken ze smoly je důležité zajistit: [15]

- Aby směs neobsahovala částice, které při dané teplotě nejdou přetavit
- Vazkost smoly a procento zastoupení uhlíku v ní
- Teplotu, při které smola začne být tvárná

Celý výrobní cyklus vláken ze smoly je popsán na obrázku 6. První operací ve výrobním řetězci je filtrace, kdy dochází k eliminaci částic, které nejdou roztavit. Následuje vznik stavu, který je označován jako mezofáze, tudíž se látka ocitá na rozhraní mezi skupenstvími. Celý tento děj probíhá zhruba při 400 stupních celsia za následné další filtrace. Další operací je vytlačování smoly z trysek a její spřádání, kdy jsou vlákna ovívána vzduchem, a to umožňuje jejich cílenou přeměnu na pevné skupenství. Poslední tři technologické operace jsou takřka totožné v předešle popisovaném výrobním procesu vláken z PAN. [15]



Obrázek 6: Výroba vláken ze smoly [15]

Uhlíková vlákna vyrobená pomocí celulózy se na mechanické namáhání příliš nehodí. Své uplatnění našla v oblasti tepelných izolantů. [10]

Vliv dynamického namáhání kompozitních materiálů, které se liší složením výztuží na pevnosti je popsán v tabulce 5. Jsou porovnávány naměřené hodnoty po sto milionech cyklů ku desetitisícům cyklů.

	<b><i>Kompozitní materiály vyztužené</i></b>		
	<b>matrice + sklo</b>	<b>matrice + aramid</b>	<b>matrice + uhlík</b>
$\sigma_k/\sigma_p$	45 %	40 %	83 %

Tabulka 5: Vliv dynamického namáhání výztuží na pevnosti [10]

### 1.7.5 Další typy vláken ve výztužích

V předchozích statích byly popsány dle mého názoru nejvíce využívané výztuže v kompozitních materiálech. Ale pro některé aplikace se spíše hodí jiné typy výztuží nebo nejsou například takové nároky na pevnost, a tím lze ušetřit i nákupní cenu surovin.

Kovová vlákna mají při porovnání s ostatními vlákny výhodu v jejich poměrně nízké ceně (samozřejmě závisí na typu kovu). Jejich značnou nevýhodou je vyšší hmotnost. Při srovnání pevností mají ocelové výztuže zhruba poloviční pevnost v tahu oproti boru. Vlákna z boru (pokud považujeme, že patří do kovů) lze využít například u prepregů buď samostatně, nebo při kombinaci s jinými výztužnými materiály, například Borsic vlákny. Dalšími materiály kovových vláken je například beryllium nebo wolfram. U těchto vláken dochází ke skládání wolframového jádra, na kterém je nanesen bor a jako obal slouží karbid křemíku. Aplikují se v oblastech, kde je potřeba dostatečně zvýšit pevnost v nejvíce rovinně namáhaných částech, jelikož se vlákna z boru nehodí pro ohybové namáhání. Keramická vlákna se hodí spíše do dílů, které jsou vystavovány vysokým teplotám nebo zhoršeným chemickým podmínkám. Polymerní vlákna se vyznačují poměrně dlouhým kluzem při překročení působících sil. Při vystavení vyšším teplotám nebo provozování těchto vláken na slunci nebo jiném prostředí, kde dochází k působení ultrafialového záření dochází k jejich pozvolnému ztracení vlastností. Představitelem polymerních vláken je již dříve popisovaný kevlar, PET, PI nebo PBI. [3] [1] [14]

## 1.8 Výroba kompozitních materiálů

Technologie využitá na výrobu kompozitních materiálů se v zásadě liší dle kvant odváděných výrobků, dle jejich tvarové náročnosti, požadované jakosti povrchu výsledného výrobku. S počtem vyráběných kusů je nutno brát v potaz investiční náklady na formy a další vybavení potřebného pro danou technologii. V neposlední řadě technologie výroby má přímý vliv na výsledné mechanické vlastnosti finálního kompozitního materiálu. [16]

### 1.8.1 Ruční kladení

Ruční kladení je jedna z prvních technologií na výrobu kompozitních výrobků, ale dodnes pro menší kusovost často využívaná. Nevýhodou tohoto postupu je však přímá náchylnost výsledné kvality kompozitu na znalostech a zkušenostech pracovníka, který operaci provádí. Kromě vstupních materiálů a formy je potřeba váleček a v některých případech se hodí rozprašovací tlaková hlavice na nanášení pryskyřic. Jako první se do formy nanese vrstva separátoru, na který se pomocí rozprašování nebo válečkem položí vrstva vysoká od 3 do 6 desetin mm Gelcoatu. Jedná se o pryskyřici, která pomáhá zadržet proniknutí výztuže až k povrchovým vrstvám, a tím degradaci estetičnosti výrobku. Do této vrstvy je možnost přivádět barvy pro dosažení požadovaného finálního vzhledu. Na tuto vrstvu se postupně na sebe pokládají výztuže, u kterých je potřeba provést nasycení většinou pomocí epoxidových nebo polyesterových pryskyřic. Při kladení je potřeba se zbavit bublin v matrici a dodržet správný směšovací poměr závislý na použitých materiálech, ale většinou se jedná zhruba o dvou hmotnostních dílech matrice na jeden díl výztuže. Pro většinu využití této technologie není potřeba pecí ani podtlakových aplikací. Pryskyřicím stačí po nanesení běžné teploty okolo 20 °C. [16] [10] Technologie výroby je naznačena na obrázku 7.



Obrázek 7: Ruční nanášení [16]

### **1.8.2 Stříkání kompozitů**

Při nanášení kompozitních materiálů stříkáním se využívají stejné formy jako při ručním kladení. Prvotní fáze postupu je totožná s předešle zmiňovaným ručním kladením. V prvním kroku je zapotřebí nanést gelcoatovou vrstvu, na kterou se pomocí pneumatické dvoukomorové pistole nanáší pryskyřice a z druhé komory rovingová vlákna. Tato vlákna se před opuštěním pistole sekají na délku 2-5 cm. Po nanesení každé vrstvy je nutno pomocí válečku zbavit matici bublin a rovnoměrně rozprostřít kompozit. Při porovnání s prostým ručním kladením lze docílit vyššího výrobního taktu. Nevýhodou je nutná investice do pneumatických zařízení. [16] [10]

### **1.8.3 Nízkotlaké lisování za studena**

Nízkotlaké lisování za studena se provádí při tlaku do 10 barů udržovaným v dělených formách. Na tuto technologii stačí dosáhnout pokojové teploty. Pro dosažení požadovaného tlaku slouží šroubové svěrky. [16]

### **1.8.4 Vakuové lisování**

Vakuové lisování se realizuje při pokládce výztuže a matrice stejně jako je tomu popsáno ve statích 2.7.1 a 2.7.2 s tím rozdílem, že je nutno na vrchní vrstvy prosycené výztuže umístit strhávací tkaninu a na ni položit separátor a rohož, která má za úkol cíleně odsávat pryskyřici, jež se nemůže uplatnit při tvorbě kompozitu z důvodu jejího možného nadbytku. Následuje zamezení možných vniknutí vzduchu do formy. K tomu slouží těsnění po obvodu formy vakuovací fólie, která je k formě přilepena většinou pomocí oboustranné pásky. Při vytvoření vakua ve formě dochází u nově vznikajícího kompozitního materiálu k eliminaci bublin v matici. U skleněných nebo uhlíkových vláken je vakuování a následné tvrdnutí prováděno při pokojových teplotách. Pokud jsou použity prepregy, je záhodno formu vyhřívat z důvodu splnění požadované teploty pro vytvrzení matrice. [16] [10]

### **1.8.5 Lisování v autoklávu**

Tato technologie je určena výlučně pro prepregy, které se většinou ručně nebo strojně u velkých dílů pokládají do formy. U tohoto lisování je potřeba z důvodu využitých



materiálů přivádět teplo, aby došlo k správnému zpevnění pryskyřice. Je možno dosahovat teplot do 200 °C. Technologický postup spočívá v pokládce prepregu ve stejném pořadí jako je tomu ve stati 2.7.4 včetně fólie, a poté dojde zprvu k vysátí vzduchu z formy o podtlaku dosahujícím řádově desetin baru, a dále přívodu vzduchu do formy v podobě přetlaku v hodnotě jednotek barů. Jak již bylo zmíněno, tato technologie se hodí pro tvorbu rozměrných kompozitních dílů, které se využívají například u nosných částí dopravních letounů. Využití tohoto způsobu lisování pro malé díly prakticky nemá smysl z důvodu velkých pořizovacích nákladů. [16] [10]

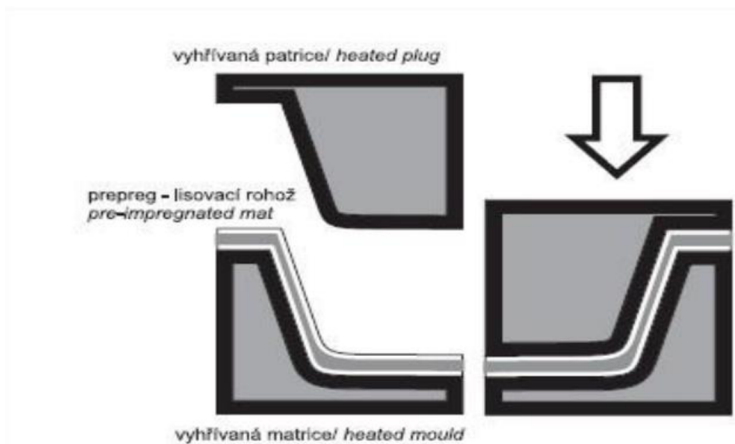
### **1.8.6 Mokrý lisování**

Mokrý lisování je založeno na kladení výztuží na sebe do formy, kdy nakonec dojde k prolití matrice ve formě pryskyřice do formy. Takto připravené složky lze lisovat jak za běžných, tak při zvýšených teplotách. Lisovací tlaky se pohybují v rozmezí desetin až jednotek barů. Rozdíl je také ve formách, kdy je pro lisování za tepla nutno používat tepelně stálé materiály – nejvíce se na tuto technologii využívá ocel. Pro lisování za studena je často využíván kompozitní materiál ve formě plastbetonu. [10]

### **1.8.7 Lisování předimpregnovaných výztuží**

Pro technologii využívající předimpregnované výztuže se získává potřebné teplo pomocí topných spirál nebo ropnými produkty na bázi uhlovodíků. Pro dosažení ideálního tlaku jsou využívány lisovací lisovací lisy s hydraulickou kapalinou. Tlak lisu může dosahovat desítek až v některých aplikacích stovek barů vyvozených pomocí tzv. tvárníku, který působí na ocelovou formu. Tato forma musí mít ideálně co nejméně porézní povrch, aby bylo dosaženo kvalitního výsledného povrchu výlisku a musí být dělitelná. Technologický postup se zakládá na vložení lisovacích rohoží do forem. Po vložení prepregu do formy následuje stlačení materiálu lisem při tlaku dosahujícím až 140 barů a působením teploty dosahující hodnot až 200 °C. Pokud je potřeba povrchové úpravy dílce, lze využít dělený postup výroby, kdy dojde k částečnému vytvrzení výrobku, na který je dále nanášena požadovaná povrchová úprava nebo přidání aditiv, a poté se znovu pokračuje ve vytvrzování působením tlaku a teploty. Na obrázku 8 je popsána výroba lisovaných rohoží. Výhodou této

technologické operace je vysoký takt výroby a dosažení kvality výstupních dílců. [10] [17]



Obrázek 8: Výroba lisovaných rohoží [16]

### 1.8.8 Vstřikovací metody

První vstřikovací metodou je vysokotlaké vstřikování. Při tlaku v řádu jednotek až desítek baru je pomocí trysky vstřikována do dvoudílné uzavřené formy pryskyřice s možností přidání aditiv. Celý výrobní proces spočívá v nanesení separační látky v podobě gelcoatu do formy, na který je posléze vyskládána výztuž. Skládání většinou probíhá ručně, pokud jsou aplikovány výztuhy v podobě vláken. Druhá možnost vkládání jsou již předpřipravené předlisky. Následuje uzavření a zatěsnění formy, aby nedocházelo k neplánovaným únikům vzduchu nebo matrice mimo speciální odvzdušňovací kanálky, které mají za úkol formu zbavit přebytečného vzduchu, který je vytlačován pomocí proudění pryskyřice do formy. Jakmile dojde k vytlačení vzduchu z formy, v kanálcích umístěných většinou na vršku formy se objeví pryskyřice. V tuto chvíli je ukončeno tlakové sycení pryskyřicí a jsou uzavřeny kanálky včetně vtokových. Vytvrzení může probíhat jak za pokojových teplot, tak za zvýšených, přičemž tato volba závisí na druhu pryskyřice, tloušťce kompozitu a požadovanému taktu výroby. Po vytvrzení je forma otevřena a nově vzniklý kompozitní materiál vyjmut. [18] [16]

Na základní výše popsanou metodu navazuje výroba zvaná VARTM. Jedná se o obdobný technologický postup, u kterého je navíc ve formě udržováno vakuum. Díky využití vakua nejsou potřeba již tak velké vstřikovací tlaky. Tlak vstřikované pryskyřice se pohybuje v řádu desetin baru. Celá tato technologie má výhodu v tom, že lze ušetřit náklady jednak na

vysokotlakých pumpách a také na formách, jelikož nemusí být tolik pevné z důvodu nižších tlaků. [16]

Pro využití pěnových jader kompozitních materiálů je často využíváno vakuové prosycování. Rozdíl oproti metodě VARTM tkví v tom, že o mísení pryskyřice s výztuží se stará čistě jen vakuum. Matrice je buď již obsažena ve formě při uzavření, kdy se vakuum stará jen o její rovnoměrné rozmístění, nebo je možnost ji obstarávat pomocí nasávání z nádob, které jsou propojeny s formou a obsahují pojivo. Vrchní díl formy nemusí nutně tvořit kovový materiál, nýbrž lze využívat kompozity nebo fólie. [16]

### **1.8.9 Navíjení a oplétání**

Navíjení je automatizovaná výrobní operace kompozitních materiálů, při které se rovingové prameny výztuží odvíjející vedle sebe. Získávají pojivo díky máčení se ve vaně s pryskyřicí a jsou průběžně navíjeny na rotující jádro. Pro náročnější tvary výrobků se používají například pěnová nebo sádrová jádra. Takzvaný support, který obsahuje již zmíněnou vanu s pryskyřicí, slouží jako pojezd a zároveň držák pramenů, které se dále nasycené odvíjí na trn nebo jádro. Použitím pohyblivého supportu se docílí rozprostření pramenů na trn a také jeho přejížděním zprava doleva křížovou skladbou pramenů. Tato technologie se využívá pro výrobu tlakových nádob nebo nosníků. [10] [16]

Metody založené na oplétání se ve sportovním průmyslu stávají stále více oblíbené. Mezi aplikace této technologie lze řadit například výrobu kompozitních hokejek pro pozemní hokej. Oproti navíjení se při oplétání pohybuje hlava obsahující rovingové pramence a trn nebo jádro je statické. Další odlišností oproti navíjení je, že pramence nejsou prosyceny pojivem, ale to je dodáváno až později pomocí technologie popsané ve stati 2.7.8. Výhodou oplétání je možnost vytvoření prostorově náročnějších tvarů těles. [10] [16]

Jednotlivé materiálové typy použité při výrobě kompozitních materiálů jsou popsány v tabulce 6.

<b>Použitá technologie</b>	<b>Dlouhé vlákno + organická matrice</b>	<b>Dlouhé vlákno + kovová matrice</b>	<b>Krátké vlákno</b>
Ruční kladení	ano		ano
Lisování v autoklávu	ano		ano
Vstříkování			ano
Lisování	ano	ano	ano
Stříkání			ano

Tabulka 6: Materiály dle výrobní technologie [3]

## 1.9 Následné využití kompozitních materiálů

Po skončení životnosti kompozitních výrobků, jako je tomu například při pádu modelu vrtulníku, kdy dojde k rozlámání většiny těchto dílů, je potřeba vhodně naložit s touto surovinou a pokud možno ji recyklovat a zpětně využít v podobě druhotné suroviny.

Při recyklaci kompozitních materiálů je třeba počítat se zhoršenými vlastnostmi nově vznikajícího prvku s přidavkem recyklátu. U většiny kompozitních materiálů, které jsou vytvrzeny reaktoplastickými matricemi, již nelze pouhým působením tepla povolit matici a pomocí vhodné technologie z kompozitního materiálu částečně odstranit výztuže nebo přeměnit výsledný tvar výrobku. U těchto matric musí přijít na řadu drcení pomocí kladivového drtiče. Tuto drť lze přidávat do nově vznikajícího prepregu až v ¼ jeho objemu, kdy dojde ke smíchání drtě teď již v podobě výztuže s pryskyřicemi a novou výztuží. Mezi vedlejší efekty této recyklace patří zhoršený finální vzhled jak již nově vzniklého prepregu, tak finálního výrobku. V tomto případě lze volit takovou aplikaci, u které nezáleží na vzhledu, jako je tomu například u betonů. Je vhodné na prepreg s částečnou recyklací při výrobě nanášet povrchovou úpravu nebo počítat s tím, že vzhledová kvalita bude horší, než je tomu při výrobě z nepoužitých materiálů. [10]

Kromě drcení uhlíkových kompozitních materiálů za účelem jejich druhotného využití se jeví poměrně výhodně jejich energetické využití v podobě spalování. Avšak čistota této metody je závislá mimo materiálového složení matrice a výztuže i na aditivech obsažených v kompozitu. [10] Porovnání výhřevností jednotlivých materiálů je popsáno

v tabulce 7. Z pohledu výhřevnosti jsou na tom stejně prepregy jako svážený komunální odpad.

<b>Materiál</b>	<b>Výhřevnost (MJ/kg)</b>
Hnědé uhlí	8–15
Černé uhlí	26–34
Biomasa	14–17
Topné oleje	41
Prepreg R30	10
Komunální odpad	10

Tabulka 7: Výhřevnosti materiálů [19] [20] [10]

Při chemické recyklaci jsou získávány vlákna a suroviny z matric, která ovšem díky působení vysokých teplot a chemických prostředků ztrácejí část svých mechanických vlastností. Jako rozkladových médií je využíváno alkoholů, vodíku, vodních par nebo čistě tepla a tlaku. Nevýhodou chemického rozkládání je, jak již bylo zmíněno, snížení užitných vlastností druhotné suroviny, přičemž při následných recyklacích bude toto snižování postupně klesat. Druhou nevýhodou je celková ekonomická (hlavně energetická) náročnost této recyklace. [10]

## **2.0 Mechanické chování jednosměrných kompozitů**

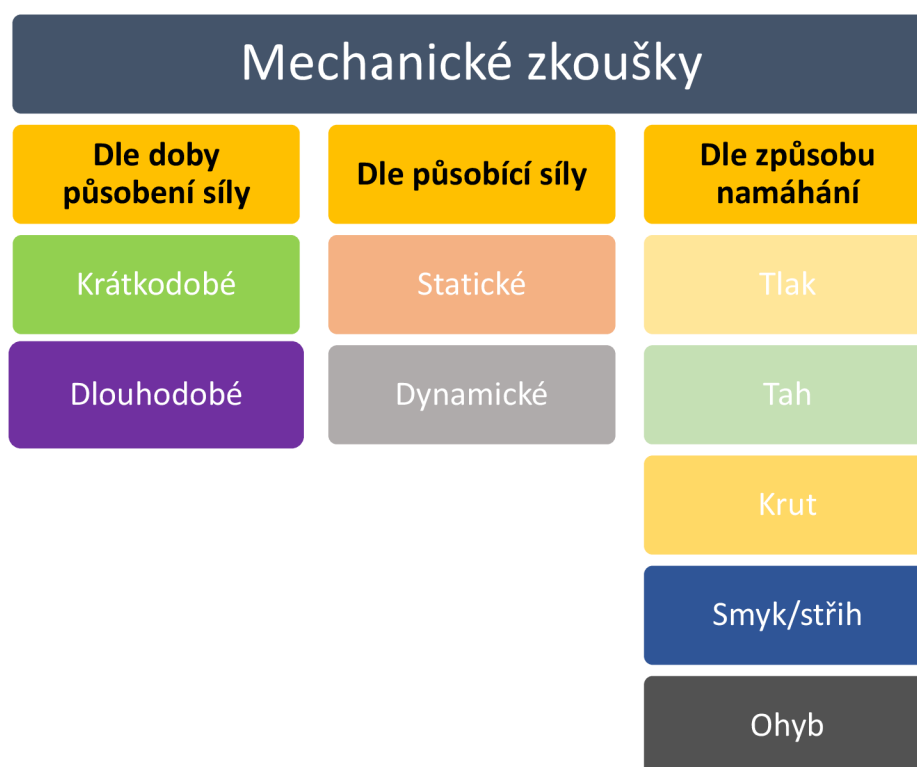
V této kapitole bude popsáno mechanické chování kompozitních materiálů včetně rozdělení typu zkoušek, pomocí kterých jsou tyto materiály laboratorně zkoušeny. Bude bráno v potaz i rozdělení defektů, které v kompozitních materiálech vznikají.

Výsledné chování kompozitního materiálu při zátěži ovlivňuje řada faktorů, mezi které se řadí například kvalita výrobního procesu, na které má přímý dopad kvalita rozprostření výztuže a matrice po výrobku, jejich vzájemná přilnavost, kazy vzniklé v matrici či geometrie skladby vláken. [3]

Při úvaze, že se na listu vrtulníku při akrobacii vyskytují hlavně tahové a kroutící síly, které se v závislosti různých zaletěných akrobatických figur značně liší, lze považovat zatížení za dynamické. Pokud by došlo ke změření těchto působících sil například pomocí

tenzometru, vyšel by jakýsi neharmonický průběh kmitající okolo rovnovážné polohy s měnící se velikostí zatížení a periody dle daných akrobatických obrátů.

Testování kompozitních materiálů z hlediska jejich mechanických a pevnostních charakteristik lze provádět pomocí dvou hlavních zatížení. První zatížení je tvořeno silou, která může v průběhu času měnit svou velikost, ale nemění v čase svůj směr působení – jedná se o statické zatížení. Druhým typem zatížení je dynamické, u kterého dochází ke změně působení síly na zkoušené těleso. Obecné rozdělení typů zkoušek je popsáno na obrázku 9.



Obrázek 9: Rozdělení mechanických zkoušek [31]

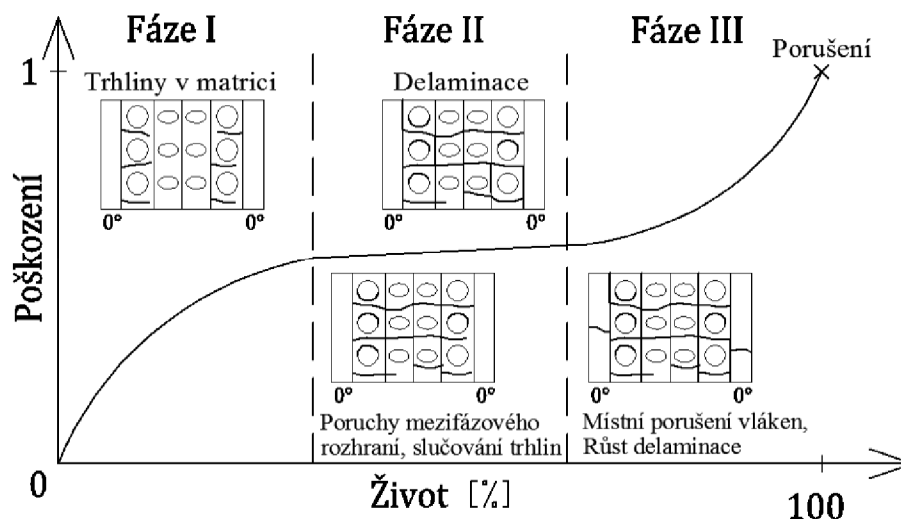
Defekty začínají ze začátku jako u klasických materiálů na bázi mikroskopických rozměrů, které se posléze přeměňují na makroskopické. Je zřejmé, že po delším časovém úseku používání materiálů nebo jeho přetěžování bude docházet k jeho ochabování. [3] Mezi běžné poruchy kompozitních materiálů patří:

- Defekty vláken
- Porušení celistvosti matrice
- Separace pojiva a výztuže
- Separace vrstev

## 2.1 Kritéria únavového chování (Dynamické zkoušky)

Trhliny a lomy uvnitř materiálů lze rozdělit na dvě základní skupiny: únavové lomy, kdy byla překročena mez únavy materiálu, která se u kovových výztuží vyznačuje vyhlazeným povrchem a statický lom, který má zrnitý vzhled. Dle poměru těchto lomových ploch lze určit, jestli byl materiál dostatečně houževnatý na dané zatížení či nikoliv. [21]

Dle zaměření práce bude brán zřetel na únavové opotřebení materiálů. Ke sledování tohoto jevu slouží Wöhlerovy křivky, grafy sledující změnu tuhosti nebo pevnosti v závislosti na cyklech nebo čase, a rozvíjení se poškození v závislosti na životnosti výrobku. Na tomto grafu jsou zobrazeny postupné vady objevující se v kompozitním materiálu až do jeho zničení (tento graf je popsán na obrázku 10). [10]

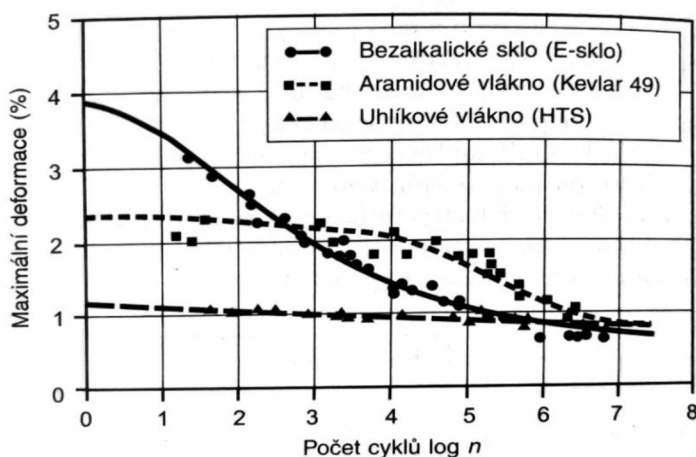


Obrázek 10: Vývoj poškození kompozitního materiálu [32]

Wöhlerova křivka lze rozdělit na tři základní oblasti dle dosahované životnosti výrobku. Jedná se o křivku zobrazující závislost normálového napětí na počtu kmitů až do porušení výrobku. První základní oblast v grafu se nazývá kvazistatická, kdy k lomu dochází

v prvních jednotkách až desítkách kmitů. Tato oblast nelze označit za únavovou z důvodu malého počtu kmitů, tudíž dochází takřka okamžitě ke statickému lomu. Druhou oblastí grafu je tzv. nízkocyklová únava, ke které dochází v řádu stovek až desetitisíců kmitů. Poslední částí grafu je vysokocyklová únava, jež se začíná projevovat na vzorku po překročení padesáti tisíc kmitů. [22]

Z pohledu rezistivity materiálů vůči únavovému opotřebení zkoumající tažnost v závislosti na počtu cyklů, vychází nejlépe kompozitní materiály vyztužené uhlíkovými vlákny. Při tomto zkoušení bylo u všech vzorků použito stejné epoxidové pojivo. Nejhůře dopadly skelné výztuže, které dosáhly propadu 75 % své tažnosti již po desetitisících kmitech. [10] Celý průběh je vyneseno na grafu (Obrázek 11).



Obrázek 11: Pokles tažnosti v závislosti na cyklech [10]

## 2.2 Statické zkoušky

Statické zkoušky slouží jako ukazatel pevnosti/houževnatosti materiálů jak u nových výrobků, tak také mohou sloužit po dynamických zkouškách, kde nedošlo k destrukci zkoušeného prvku a například po určitém počtu cyklů je provedeno statické destruktivní změření například zbytkové pevnosti výrobku. Při vykonávání zkoušek je třeba brát zřetel na doporučení norem v podobě tvarů, výztuží nebo provádění zkoušek. Kromě klasických krátkodobých zkoušek, jako jsou tah, tlak, smyk, ohyb, se realizují i dlouhodobější zkoušky v podobě kríповých zkoušek. Tyto zkoušky lze realizovat dle potřebného časového horizontu v podobě hodin ale klidně i desítek let. Po uplynutí jednoho roku zkoušky dochází



již ke skoro lineárnímu průběhu, který lze s určitou přesností předpovídat do určitých následujících let. [10]

### **3.0 Vrtulníky**

Z důvodu zabývání se práce rotorovými listy je důležité, aby bylo uvedeno i rozdělení a fungování vrtulníků včetně popsání jeho jednotlivých částí. V dalších podkapitolách bude popsáno namáhání rotorových listů za letu a porovnání rozdílů ve složení mezi modelářskými a „dospělými“ listy.

#### **3.1 Rozdělení vrtulníků a jejich modelářské počátky**

Vrtulníky lze dělit dle několika kritérií. Co mají „dospělé“ a modely vrtulníků společné je rotorová hlava. Na základě běžných provedení nosných částí lze rotorové systémy v modelech dělit na:

- Jedn rotorové – jsou zastoupené jak v armádním, tak komerčním využití. Mezi jejich hlavní výhody patří méně mechanicky náročná konstrukce. Z této výhody plyne i teoreticky nižší náchylnost na poruchovost. Mezi nevýhody této konstrukce se řadí nutnost zařazení zadního vyrovnávacího rotoru (lidově vrtulky), která slouží jako kompenzace reakčního momentu vyvolaného hlavním rotorem. Taktéž vrtulka slouží pro rotaci trupu vrtulníku. Další nevýhodou použití vyrovnávacího rotoru jsou výkonové ztráty na motoru, které ale jsou potřeba pro její pohon a narůstající konstrukční složitost. U modelů vrtulníků je tato konstrukce v naprosté většině strojů, jelikož umožňuje dobré letové vlastnosti s relativně nízkou hmotností a jednoduchost na projektování nebo opravu modelu. [23]
- Dvourotorové protiběžné – výhodou této konstrukce je odstranění nutnosti využívat vyrovnávací rotor, jelikož má vrtulník dva nosné rotory, které rotují v opačném směru, díky čemuž dojde ke vzájemnému vyrušení reakčních momentů. Mezi další výhody této konstrukce patří lepší využití kroucího momentu dodávaného rotorem, kdy se dosahuje zhruba o 15 % vyšší

efektivity oproti jednorotorovým konstrukcím. Naproti tomu je třeba počítat s vlivy rotorů, které jsou ve své blízkosti a vzájemně na sebe působí, a vyšší konstrukční složitostí. Toto konstrukční řešení je hojně využíváno v ruské armádě, konkrétně na vrtulnících Kamov třídy Ka. [23]

- Dvourotorové tandemové – tento koncept se využívá hlavně pro vysoko zátěžovou leteckou dopravu. Skládá se ze dvou rotorů, které jsou řazeny za sebou, přičemž přední rotor umístěn nad kabinou je níže než zadní rotor umístěný v zádi. Díky tomuto překryvu listů lze dosáhnout menších rozměrů vrtulníku při zachování nosností. Nevýhodou tohoto uspořádání je vzájemné negativní působení rotorů při překryvu a složitou soustavou přenášející kroutící moment z motorů. Nejznámějším typem této koncepce je americký CH-47 Chinook. [23]

U modelů vrtulníků se provádí rozdělení pomocí tzv. velikostních tříd. Tato třída dříve byla udávána velikostí spalovacího motoru. V dnešní době je ale většina modelů poháněna na elektrický pohon pomocí Li-Po baterií, tudíž se vžilo rozdělování dle velikostí listů. Toto rozdělení včetně nejvíce používaných modelů je zobrazeno v tabulce 8. Vrtulníky třídy 700 a 550 od firmy Tron jsou zobrazeny na obrázku 12.



Obrázek 12: Vrtulníky třídy 700 a 550

<b>Třída</b>	<b>Velikost listů (mm)</b>	<b>Modely</b>
200	180-200	Logo 200, OMP M2
450	325	T-rex 450, FW 450
380	360-380	Goblin 380, Protos 380
500	420-430	Goblin Raw 420, Protos 500
550	550-570	Tron 5.5, Xl Power 550
580	580	Tron 5.8, Goblin Raw 580
600	600-660	Logo 600, Goblin 630, Blackthunder
700	690-730	Tron 7.0, Goblin 700, Xlpower Specter
800	770-800	Goblin Maverick, Logo 800

Tabulka 8: Rozdělení modelů vrtulníků do tříd

Historie vývoje modelů vrtulníků se datuje zhruba od 14. století na území dnešní Číny. Jednalo se o primitivní a neřiditelné stroje, které postupem času dostaly pohon v podobě stočené gumy a tím bylo dosaženo možnosti se déle udržet samovolně ve vzduchu. Velký rozmach radiem řízených modelů vrtulníků ovšem přichází až ve druhé polovině 20. století. Tento rozmach byl zapříčiněn lepší dostupností žhavicích motorů, ale také značným pokrokem na poli elektroniky, kdy bylo dosaženo vývoje prvních více kanálových vysílačů určených pro řízení modelů. Mezi jedněmi z prvních inženýrů prosazující moderní prvky konstrukce vrtulníku, podobnou, jak ji známe dnes, byl Ing. Schlüter. Postupným vývojem se dostávají do popředí v Německu a Japonsku vyráběné vrtulníky, které se „na výsluní“ drží až do příchodu elektricky poháněných vrtulníků. Posléze se většina výroby přesunula na asijský kontinent, hlavně do Číny a Taiwanu, kdy je tomu tak dodnes. I přes to, že je většina konstrukcí vyprojektována na území mimo Asii, tak jak je tomu například u firmy SAB nebo Tron, celková výroba probíhá právě v Asii. [24]

Stejně tomu je u rotorových listů – ještě zhruba po přelomu tisíciletí existovali japonští, němečtí i čeští výrobci rotorových listů. Bohužel s postupem času došlo buď k ukončení výroby listů, nebo jejímu přesunu do Číny, nebo přeorientování těchto firem na jiný druh podnikání. V dnešní době jsou, co se týče akrobatických rotorových listů, na světě jen dva hlavní výrobci. Jedním z nich je dříve zmíněný český MS Composit, kde kompletní výroba probíhá v Tursku, a druhým je čínská firma Fun-key. Tato firma funguje

na principu zakázkové výroby listů pro společnosti. Vyrábějí listy pro firmy Spinblades, Azure, Switch blades, Rail blades a VTX. [24] [25]

### 3.2 Části vrtulníku

Modely s dospělou předlohou mají společné hlavní části konstrukce. Jedná se o trup (nebo šasi), přistávací ústrojí, mechanismus sloužící pro přenos kroutícího momentu motoru, řídicí ústrojí, nosnou část představující hlavu rotoru a případně dle koncepce také vyrovnávací rotor. [23]

Hlavní rotor má za úkol vytvářet vztlak, díky kterému vrtulník dostane možnost překonat gravitační (tíhovou) sílu a aerodynamické odpory a tím vzlétnout. Poměr vztlakové a tíhové síly udává stoupání a klesání vrtulníku. U akrobatických modelů vrtulníků je hlavní rotor tvořen centrálním nosným kamenem, který má za úkol propojit hlavní hřídel jdoucí z převodového ústrojí a taktéž uložit příčnou hřídel jdoucí do unašečů listů. Hlavní hřídel je přichycena na kameni hlavy pomocí většinou jediného příčného šroubu. Dále jsou zde tlumící gumy, ve kterých je umístěna příčná hřídel, které slouží pro snižování vibrací vznikajících při letu z listů. Na některých vrtulnicích je uprostřed kamene na příčné hřideli umístěn aretační kroužek, který pomáhá vymezovat namáhání gum v uložení. Po bocích kamene jsou umístěna anti-rotační ramena sloužící pro zamezení rotačního pohybu a tím znemožnění ovládní v důsledku otáčení se hlavy rotoru. Na příčné hřideli jsou umístěny unašeče, které slouží jako držáky listů a také se působením sil přenášených z desky cyklinky pomocí táhel naklání, a tím se dosahuje požadovaného náklonu. Uvnitř unašečů jsou vždy dvě radiální a jedno axiální ložisko. Nosný kámen a unašeče listů se u většiny vrtulníků v modelové třídě 700 vyrábí z hliníku třídy 7075. Poslední částí nosného rotoru je deska cyklinky, pomocí které (jak již bylo zmíněno) je ovládán náklon listů vrtulníku. Jedná se typicky o desku, která svírá 120 ° na ovládní. Každý ze tří jejích výstupků je ovládán pomocí serva. [25] Kompletní rotorová hlava z vrtulníku Tron 7 včetně detailu na nosný kámen je znázorněna na obrázku 13.



Obrázek 13: Rotorová hlava Tron [26]

Zhruba do roku 2005 byla využívána padla sloužící jako stabilizace vrtulníku. Dále se díky nim ovládal náklon vrtulníku. Jednalo se ovšem o mechanismus, který byl jednak mechanicky složitější a také určitá část energie rotoru byla kvůli nim zmařena. Proto byly vyvíjeny systémy, které vylučují nutnost používání padel. Jejich činnost je simulována elektronicky pomocí gyr a pohybů serv. Touto změnou se dosáhlo značného navýšení přesnosti v pilotování modelů. Mezi sériově vyráběnými modely převyšuje dvoulistá koncepce rotorové hlavy. Pro speciální aplikace, jako je tomu například pro F3C akrobacii, jsou hojně využívány třílisté hlavní a vyrovnávací rotory z důvodu dosažení vyšší efektivity a stability při nižších otáčkách. Pro klasickou akrobacii se tento třílistý koncept moc neuchytil, jelikož dochází k vyššímu odporu vzduchu a tím vyšším proudovým špičkám a celkové spotřebě energie. Také se rozdíl mezi třílistou a dvoulistou hlavou projeví na ceně při případném pádu, kdy je třílistá sada listů samozřejmě dražší. [25]

Řízení vrtulníku je realizováno pomocí čtyř servomotorů. Tři servomotory jsou využívány pro řízení cykliky a čtvrté servo ovládá zadní rotor. Zadní vrtulkové servo je

většinou přiděláno v kompozitním rámu pod trubkou držící zadní rotor. Pomocí táhla je docíleno změny úhlu náběhu rotorových listů na zadním rotoru. Servomotory ovládající desku cyklyky jsou umístěny tím způsobem, aby bylo docíleno výsledného požadovaného  $120^\circ$  rozložení na desce cyklyky. Řízení se rozděluje na dvě části, kolektivní, kdy dochází ke stejnému posunu všech serv tak, aby bylo docíleno stejného úhlu náběhu na všech listech rotoru. Druhý typ řízení je cyklické. Při tomto řízení dochází ke specifickým pohybům serv, díky kterým se dosáhne požadovaných pohybů vrtulníku, například dopředu, dozadu, doprava a doleva. U akrobatického vrtulníku je potřeba, aby bylo dosaženo lineárních výchylek kolektivu do kladné a záporné polohy náběžné hrany. Je to z důvodu toho, že pokud je vrtulník rotorem dolů, je potřeba opačným úhlem náběhu vytvářet dostatečný vztlak. Ve většině případů se nastavují úhly kolektivu  $\pm 12.5^\circ$  a na cyklice  $8^\circ$ . [23] [25]

Pohon modelů vrtulníků je ve většině případů tvořen pomocí elektromotoru, nebo ve Spojených státech ještě stále oblíbenými spalovacími motory létající na nitromethan. Nevýhodou spalovacích modelů je nižší výkon, nutnost ladění motoru dle venkovní teploty a hustoty nasávaného vzduchu nebo až 10x vyšší náklady na provoz oproti elektrickým modelům. U větších maket se využívá turbín. Z pohonné jednotky se přechází na rozvodovou soustavu, která je buď tvořena přímo z motoru pomocí řemene na řemenici, ze které následně vychází pastorek spojený s hlavním kolem připevněným na hřídeli otáčející hlavou. Takto řešený rozvod kroutícího momentu má italská firma SAB. Druhý, v zásadě jednodušší způsob, je přímé napojení hlavního kola spojeného s hlavní hřídelí nábojem na pastorek motoru. Tento převod je rozměrově náročnější, jelikož u řešení používaném SAB se požadovaný převodový poměr rozdělí mezi dvě hnaná kola, ale v tomto druhém případě je poměr dosažen pomocí jediného. Obě řešení mají své výhody a nevýhody, ale zatím převládá u výrobců využití jednoho převodového kola a pastorku. Rozvodná soustava musí být navržena tak, aby zvládala přenést výkon dodávaný motorem, který dosahuje dle tabulek až 11 kW. Pro hlavní kola přímo spojená s motorovým pastorkem se volí většinou modul 1 nebo u menších modelů 0.7. Nad hlavním nebo pod hlavním kolem je umístěno tzv. autorotační kolo uložené na jednosměrném ložisku sloužící pro možnost využití zadního rotoru při autorotaci. Autorotační kolo je spojeno se zadním rotorem buď pomocí kardanu nebo řemene. V dnešní době převládá řemen, jelikož je méně náročný na údržbu a jeví se pevněji. [25] [26]

Šasi vrtulníků je tvořeno nejčastěji z kompozitních materiálů tvořených uhlíkem a epoxidovou matricí. Rám je dělen na dvě části. Horní část je nosná a obsahuje veškerou elektroniku včetně všech důležitých mechanických částí. Spodní část je k horní přidělena buď pomocí plastových průchodek staženými šrouby, díky kterým dojde při pádu k oddělení částí rámu a tím snížení rizika jeho zlomení, nebo napevno pomocí hliníkových vzpěr. Spodní část rámu tvoří ochranný obal pro baterie a dále jsou na něm přichyceny přistávací ližiny.

Jelikož nejsou na akrobatické vrtulníky využívány žádné plné trupy, je zadní domek vrtulky přichycen na většinou hliníkové trubce ať již válcových, oválných nebo více úhelných tvarů. Systém zadního vyrovnávacího rotoru je do jisté míry podobný tomu na hlavním rotoru, smykátko ovládá pomocí táhel úhel natočení unašečů vrtulky a tím změnu směru otáčení. [25] [23]

Výpočet Reakčního momentu vyrovnávacího rotoru je uveden ve vztahu 5.1

$$M_R = \frac{P_m \cdot \xi}{\omega} \quad (5.1)$$

$M_R$  Reakční moment (Nm)

$P_m$  Výkon motoru (W)

$\xi$  Mechanická účinnost (-)

$\omega$  Úhlová rychlost nosného motoru (Rad/s)

### 3.3 Namáhání a aerodynamika listů

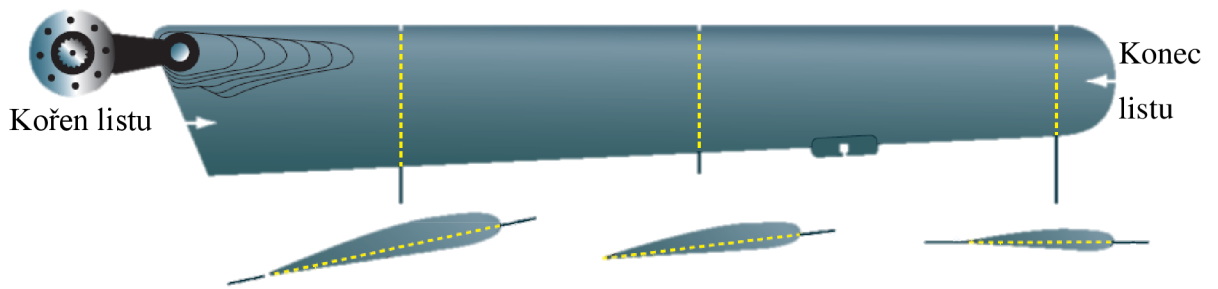
U všech nosných ploch v letectví, které slouží ke tvorbě vztlaku, je snaha tento prvek tvarovat tak, aby dosahoval, co možno nejnižšího odporu, který klade při proudění, a naopak dosahoval co nejvyššího vztlaku. Pokud je nosný prvek příčně rozříznut, výsledný obraz řezu se nazývá profil. V průbězích zobrazujících součinitele vztlaku v závislosti na úhlu náběhu listů má tato vztlaková křivka přímo úměrný nárůstový charakter až do dosažení kritického úhlu náběhu, poté již dojde ke snižování součinitele vztlaku. Při grafickém zobrazení odporových součinitelů na úhlu náběhu listů je výsledný průběh odporů exponenciálně rostoucí. V závislosti na náběžném úhlu listu rotoru dochází zprvu na náběžné hraně k laminárnímu proudění. Při obtékání vzduchu profilem listu však dojde obtékající

proud k místu, kde dochází k přechodu laminárního proudění k přechodu na turbulentní. Toto místo přechodu proudění je dáno jednak tvarem profilu listu, ale také i například náběžnými úhly, pod kterými je list provozován. [23]

U všech vrtulníků je třeba brát v potaz mávání a kývání listů. Kývání listů je jev, který vzniká při pohybu vrtulníku a je zapříčiněn změnami odporových sil v závislosti na změně náběhu listu při otáčení, jelikož při nahnutí desky cyklicky dochází při jedné otáčce listu ke změnám jeho úhlů náběhů. Proto se listy uchycují pomocí kolmého čepu. Díky tomuto uložení je možno omezit chvění vrtulníku, protože kdyby byly listy uchyceny napevno, jak tomu bylo dříve, v důsledku kývání listů docházelo ke značnému chvění. Dále je nutno na uchycující čep nebo šroub umístit všechny listy rotoru se stejným utahovacím momentem, jelikož při nesymetrii dotahování by došlo k vyššímu rozdílu kývání a tím opět vzniku chvění. Mávání listů lze rozdělit na dvě rozdílné situace. K první dochází při visu vrtulníku. Při tomto manévru dochází pouze k průhybu listů, které při kolmém pohledu na celý rotorový disk připomínají písmeno V. Závislost na otáčkách, materiálech nebo profilech rotorových listů se liší úhel odklonu listů od vodorovné osy. U akrobatických modelů vrtulníků s uhlíkovými kompozitními listy se tento odklon pohybuje v řádu maximálně jednotek stupňů. Ke druhé situaci dochází při jakékoliv změně polohy vrtulníku. Velikost vymávnutí je závislá na rychlosti, jakou vrtulník letí a náklonu. Při pohybu vrtulníku dochází v závislosti na mávání ke změně úhlů náběhů listů při jedné otáčce rotoru. Celý tento průběh si lze představit jako sinusový, kdy se se zvyšujícím vymávnutím snižuje rychlost vymávnutí a opačně. Během jedné otáčky se vždy po  $90^\circ$  natočení listu mění maximum a minimum vymávnutí. Aby tento efekt způsobující zhoršení ovládání vrtulníku byl minimalizován, je na „dospělých“ vrtulnicích hlavní hřídel konstrukčně nahnuta o nižší jednotky stupňů směrem ke kabině (u těchto vrtulníků se předpokládá, že většinu doby letu budou v dopředném letu). U akrobatických modelů tato úprava není možná, jelikož svůj směr letu model mění i několikrát za sekundu. [23]

Při otáčení rotoru dochází na listech k rozdílným rychlostem otáčení kolem osy a tím i rychlostem obtékání vzduchu kolem profilu listu. Při návrhu listů se musí brát v potaz fyzikální princip, kdy je nižší rychlost otáčení v blízkosti kořene než na konci listu. Celý tento jev má za následek vznik krutu listu a tím rozdílný úhel náběhu po délce listu. [27] Znázornění této mechanické změny je zobrazeno na obrázku 14.





Obrázek 14: Změna úhlu náběhu listu v důsledku krutu [27]

### 3.4 Rozdíly ve složení rotorových listů

U prvních modelů vrtulníků se využívaly dřevěné listy. Složení těchto listů se skládalo z jakéhosi sendviče tvořeného nosným prvkem v podobě tvrdého dřeva, na který byla přilepována balsa, a takto vzniklá kompozice byla ještě přetažena folií. Na dřívě méně výkonných motorech a méně náročné akrobacii takto vytvořený list pevnostně i svými letovými vlastnostmi stačil, ale s rozvojem techniky a létání se tyto listy začaly nahrazovat sklolaminátovými nebo uhlíkovými listy. Kompozice uhlíku a epoxidové pryskyřice je v dnešní době nejvíce rozšířená. [24] Snímek otevřeného listu třídy Rapid 700 od firmy MS Composit je na obrázku 15.



Obrázek 15: Řez listem Rapid

## **4.0 Praktická část**

Po úvodní literární rešerši následuje praktická část diplomové práce, která se skládá z popsání zkoušek, dále nastínění postupu výroby rotorových listů, jejich základního popisu a přípravy na zkoušení. Dále budou zkoumány mechanické vlastnosti rotorových listů v laboratorním prostředí pomocí SEM analýzy, statického namáhání v ohybu a zkoušek tahem. Zpracuje se porovnání již použitých a nových rotorových listů při těchto zkouškách. Následně se povede diskuse nad naměřenými výsledky a porovnáním s konkurenčními značkami. V závěru práce bude popsáno, zda má na mechanické vlastnosti listů vliv použití jádra, či nikoliv. Také se porovnájí výsledky zkoušek nových a létaných listů od firmy MS Composit.

### **4.1 Popis zkoušek**

Ve třech podkapitolách budou nastíněny metody, pomocí kterých bude prováděno testování rotorových listů.

#### **4.1.1 Zkouška tahem**

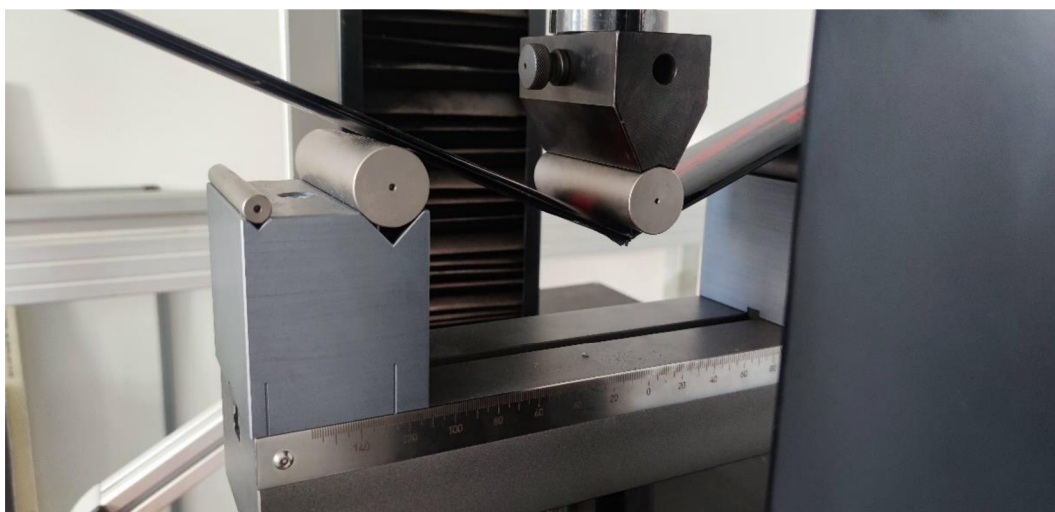
Tahová zkouška bude prováděna pomocí hydraulického trhacího stroje od značky Tempos, který je představen na obrázku 16. Zkoušený předmět se upne do čelistí pomocí kořene listu. List bude zkrácen na délku 425 mm, jelikož je dutý, a na konec listu bude pomocí gelového vteřinového lepidla připevněno jádro vytisknuté z PLA materiálu. Ze stejného materiálu se vytisknou a přilepí klínky kopírující aerodynamický tvar listu, díky kterým bude dosažena rovinnost dosedacích ploch do čelistí. U listů, které již z výroby obsahují jádro, budou jen vytisknuty klínky po obvodu. U vzorku číslo 4 se zkrátí délka z původních 700 mm na 680 mm. Tento rozměr byl zvolen z důvodu zkoumání rozdílného chování v závislosti na délce. Po uložení listu do čelistí trhacího stroje bude na list působit tahová síla, dokud nedojde k přetržení. Výstupem tohoto měření je porovnání vlivu cyklů listu na změně pevnosti v tahu. Pomocí deformačních křivek bude posouzeno pevnostní chování jednotlivých vzorků. Jelikož je cílem zkoumat chování listu jako celku, nebude zkouška provedena dle norem. Zkoušeny budou vzorky s označením A číslo 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10.



Obrázek 16: Trhací stroj Tempos

#### 4.1.2 Zkouška ohybem

Při tomto zkoušení bude docházet k ohybovému namáhání na podporách položeného listu do univerzálního zkušebního stroje. Univerzální zkušební stroj bude ohýbat zkušební předmět silou působící příčně na list. Celá tato zkouška slouží ke sledování průhybu listu při působení síly  $F$ . Síla bude působit válcovým předmětem o průměru 30 mm uprostřed vzorku, přičemž zkoušený předmět bude podložen pomocí dvou krajních válcovitých držáků o průměru 30 mm, které jsou od sebe vzdáleny 254 mm. Hlavním cílem této zkoušky je posoudit ohybové vlastnosti nových listů s těmi, které již byly létány. Na obrázku 17 je znázorněno umístění a ohýbání zkoušeného listu až do porušení. Zkouška ohybem bude prováděna na univerzálním zkušebním stroji LabTest 5.50ST (obrázek 18). Zkoušeny budou vzorky s označením B číslo 1,2,3,5,6,7,8,9. Jelikož je cílem zkoumat chování listu jako celku, nebude zkouška provedena dle norem.



Obrázek 17: Zobrazení ohybové zkoušky



Obrázek 18: LabTest 5.50ST

### 4.1.3 SEM analýza

Při tomto způsobu zkoušení vzorků dochází k jejich umístění do vakua a předmět musí být z vodivého materiálu. Pokud se jedná o dielektrický materiál, musí být na něj nanesena vodivá vrstva v podobě kovového prášku. Při zkoušení dochází k vyzáření elektronů z elektronového děla, kdy tento vyzářený paprsek projde přes soustavu elektromagnetických čoček. Při dopadu elektronového svazku na zkušební předmět dojde k odražení vyzářených elektronů a k odpoutání druhotných elektronů z tělesa. Tyto elektrony jsou dále snímány pomocí detektoru a následně převedeny na obraz a zobrazeny. [28]

Pro tuto analýzu byly vybrány vzorky s čísly 7,8,10 a 11 s označením A. Jedná se o vzorky, které již byly podrobeny tahové zkoušce. Celé měření bylo provedeno na elektronovém mikroskopu TESCAN MIRA3 MXU uvedeném na obrázku 19. Pro pozlacení vzorků sloužil přístroj Quorum Q150R ES (obrázek 20).



Obrázek 19: TESCAN MIRA3



Obrázek 20: Quorum Q150R ES

## 4.2. Výroba kompozitních listů u firmy MS Composit a konkurence

V následujícím textu bude objasněna technologie využívaná pro výrobu rotorových listů využívanou v české firmě MS Composit. Tato technologie bude následně porovnána s konkurenční firmou.

### 4.2.1 Postup výroby

Ve firmě MS Composit je využíváno epoxidového prepregu pro výrobu kompozitních listů. Metoda výroby je nazývána zápusťkové lisování v ocelových formách, kde je materiál stlačen silou 8 barů při teplotě 150 °C. Pro výrobu listů řady Rapid se využívají jednoúčelové stroje. Jedná se o lisovací pece s NC řízením, kde se naplněná forma prepregovým materiálem vloží do pece a celý proces probíhá automaticky od ohřevu, po udržování tlaku, teploty a chlazení.

Proces výroby začíná přípravou materiálu, při které je nutné vyřezat přířezy z prepregových tkanin, jež jsou důležité pro vznik výsledné kompozice v listu. Následně se jednotlivé vrstvy materiálů skládají na sebe, kde je důležité brát na zřetel orientace vláken a složení jednotlivých vrstev. Vrstvy obsahují povrchovou uhlíkovou prepregovou tkaninu orientovanou na pevnost v krutu, vlákna svírají úhel 45 °C k výrobku. Druhá vrstva se skládá z pojiva, které je přidáno samostatně z pomocné matrice pro dostatečné prosycení povrchu z důvodu omezení bublin. Třetí vrstva definuje mechanickou pevnost listu na ohyb,



kteřou zastupují jednosměrná vlákna. Poslední vrstva je v podobě suché skelné tkaniny, která slouží jako pomocná příčná vazba pro jednosměrná vlákna. Tyto přířezy jsou následně vysekány do podoby polotovarů používaných do forem. Takto připravené polotovary jsou vloženy do dvoudílných forem, kde po jejich položení dochází k vložení drátu do náběžné hrany, který slouží jako závaží pro dosažení těžiště listu. Na závěr se do formy vloží znovupoužitelné jádro, uzavře se a vloží se do lisovacího stroje. Tento stroj uzavře formu požadovaným tlakem a zahřeje ji na teplotu dle procesních taktů. Následně po dosažení žádané tvrdosti výrobku se forma vychladí na teplotu potřebnou pro její další případné využití. Forma je vyjmuta ze stroje, vyňat výrobek, dále je forma vyčištěna a připravena na další výrobní cyklus. Z formy je po ochlazení vytažen polotovar, na kterém jsou posléze opracovány obvodové hrany a upevňovací otvor na NC fréze. Výrobek je následně zkrácen na délku pro danou modelovou třídu, přičemž konec listu je otevřen a zaslepen pomocí plastové koncovky, jež se vlepují lepidlem. Takto vzniklý list se leštěním upravuje na požadovanou povrchovou jakost. Dalším krokem je nalepení designových prvků v podobě nálepek a následně dochází ke třídění listů na statické a dynamické váze. Díky tomu jsou párovány k sobě listy, které jsou si podobné na základě statických a dynamických vah. Nově vzniklé páry jsou poté finálně dováženy na požadované tolerance. Poslední částí výrobního procesu je balení párů do prodejních obalů a jejich expedice.

V konkurenční čínské firmě Fun-Key se na výrobu listů využívá proces ruční laminace, kdy se nejdříve čistá separovaná forma pokryje barvou pomocí masek, do kterých je následně laminováno. Tato laminace se skládá z ručního prosycení jednotlivých vrstev epoxidovou pryskyřicí a válečkem, kdy je jako první vrstva využívána skelná tkanina pro vzhled a do dalších se již skládají uhlíkové pevnostní tkaniny. Do formy je následně vloženo opracované polystyrenové jádro a závaží. Forma se uzavře a umístí do temperované pece. Zbytek výroby je již obdobný jako u výše zmíněného postupu.

### **4.3 Popis zkušebních těles**

V této kapitole budou popsána zkušební tělesa včetně jejich základních parametrů, popřípadě doby používání u létaných listů.

### 4.3.1 Listy MS Composit

Vzorky listů Rapid ke zkoušení, které jsou nové, jsou označeny čísly 1, 2, 3 a 4. Svou délkou patří do třídy 700.

Rozměrově stejné Rapidy, ale již používané, mají označení 5. Tyto listy mají za sebou zhruba 60 startů. Oproti ostatním testovaným listům se jedná o padlové provedení. Rozdíl je ve váze, kdy jsou tyto listy o 20 g lehčí, a také mají větší předstih oproti bezpadlovým.

Vzorek číslo 6 od firmy MS Composit má za sebou 250 startů.

Vzorek 7 má odlétáno nejvíce, a to 500 letů, což odpovídá zhruba 25 letovým hodinám.

Vzorek číslo 8 jsou stejně jako číslo 7 létané jednu leteckou sezonu s tím rozdílem, že mají nalétáno 370 startů, jelikož listy sloužily v záložním modelu.

Rapid	
Délka listu (mm)	700
Šířka listu (mm)	64
Kořen listu (mm)	12
Díra pro šroub (mm)	5

Tabulka 9: Rozměry listů Rapid 700



Obrázek 21: List Rapid 700

### 4.3.2 Listy Zeal Blades

Vzorek označený číslem 9 je vyroben firmou Fun-Key pro firmu Zeal. Jedná se o listy s polystyrenovým jádrem. Oproti listům Rapid je na výrobcích Zeal provedena barevná úprava.



Zeal Blades	
Délka listu (mm)	700
Šířka listu (mm)	60
Kořen listu (mm)	12
Díra pro šroub (mm)	5

Tabulka 10: Rozměry listů Zeal



Obrázek 22: List Zeal 700

### 4.3.3 Listy Rail Blades

Třetí testovaná firma nabízí na trhu listy vyráběné firmou Fun-Key pod hlavičkou firmy Rail Blades. Oproti Zealům a Rapidům mají tyto listy užší odtokovou a náběžnou hranu u konce listu. Při akrobatickém letu tato změna profilu dle mého názoru nemá takřka žádný vliv na řízení, spíše má list jiný zvukový projev.

Vzorky listů Rail Blades jsou označeny číslem 10.

Rail Blades	
Délka listu (mm)	716
Šířka listu (mm)	62,5
Kořen listu (mm)	12
Díra pro šroub (mm)	5

Tabulka 11: Rozměry listů Rail



Obrázek 23: List Rail 716

### 4.3.4 Listy SAB

Další zkoumané listy vyrábí italská firma SAB. Jejich profil je podobný listům Rail Blades s tím rozdílem, že mají užší provedení u kořene na odtokové vrstvě. Jelikož jsou tyto zkoumané listy po pádu, budou sloužit pro SEM analýzu a jako vzorky, na kterých bude

ověřena funkčnost nastavení parametrů a průběhu tahové zkoušky. Tyto vzorky mají označení 11.

SAB	
Délka listu (mm)	700
Šířka listu (mm)	64
Kořen listu (mm)	12
Díra pro šroub (mm)	5

Tabulka 12: Rozměry listů SAB



Obrázek 24: List SAB S700

#### 4.4 Počet zkoumaných vzorků a jejich ceny

Celkový počet zkoušených prvků a jejich výrobci jsou uvedeny v tabulce 13.

Počet listů ke zkoušení	Výrobce
16	MS Composit
2	Sab
2	Zeal Blades
1	Rail Blades

Tabulka 13: Počet zkušebních předmětů

Ceny jednotlivých výrobců jsou popsány v tabulce 14. Cena listů Zeal Blades již ve skutečnosti moc neodpovídá, jelikož se tato firma pomalu stahuje z trhu a většina jejich nabízeného zboží je již v doprodeji se slevou. U zbytku se jedná o nezlevněné prodejní ceny. Sazba je uváděna vždy za pár listů.

Typ rotorových listů	Cena s DPH
Rail Blades 716	3 704,00 Kč
Rapid 700	2 602,00 Kč
Zeal Blades 700	2 214,00 Kč
Sab S700	3 420,00 Kč

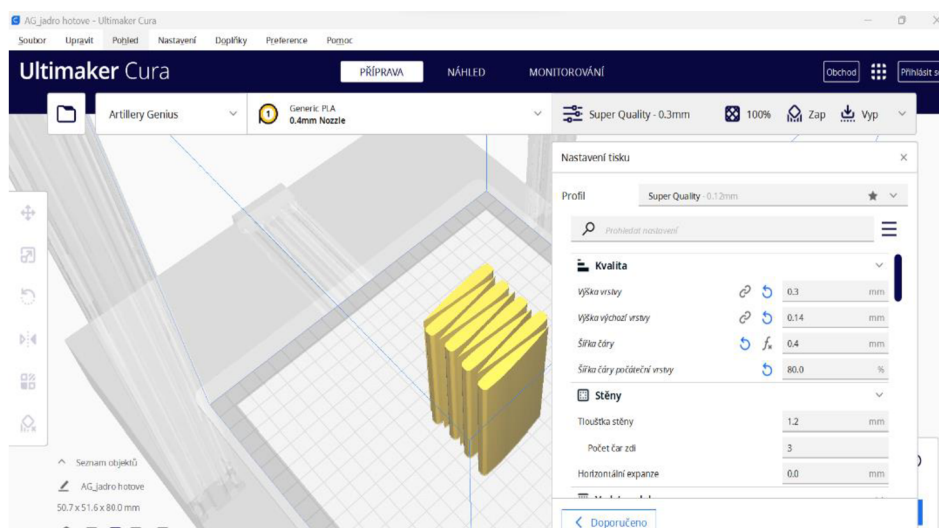
Tabulka 14: Ceny rotorových listů dle výrobců

## 4.5 Příprava vzorků pro měření

V následujících podkapitolách bude popsán průběh přípravy vzorků pro tahové a ohybové zkoušky a také SEM analýzu.

### 4.5.1 Příprava vzorků pro měření tahových vlastností

Pro zkoušku tahem bylo nutné zkrátit délku rotorových listů z původních 700 mm na 425 mm z důvodu rozměrových dispozic univerzálního zkušebního stroje. Jelikož jsou listy od MS Composit duté, bylo nutné vymodelovat pomocí CAD softwaru jádro dlouhé 80 mm, které sloužilo jako podpora listu proti poškození upínaných částí do čelistí zkušebního stroje. Na prvním zkušebním tělese bylo pro lepší uchycení do čelistí původně zamýšleno nalepit přes celý konec listu gumový, zhruba 1 mm vysoký materiál. Po prvotním upnutí bylo rozhodnuto, že z důvodu aerodynamického tvaru listů bude lepší vymodelovat pomocí CAD systému klínky, které by obepínaly odtokovou hranu listů a tím vytvořily rovinný povrch listu upínaný do čelistí. Pokud by se tyto klínky neudělaly, list by držel jen pomocí náběžné hrany a tím by byla větší pravděpodobnost smyku testovaného prvku ze zkušebního stroje. Všechny tyto díly byly vytisknuty pomocí 3D tiskárny z PLA materiálu od firmy Průša. Výška tisku byla záměrně nastavena na 0,3 mm z důvodu lepší následné adheze pomocí vteřinového gelového lepidla. Výsledná příprava tisku jader listů byla provedena slicovacím softwarem Ultimaker Cura demonstrovaným na obrázku 25.



Obrázek 25: Prostředí Ultimaker Cura

Při prvních zkouškách byl list v kořenu upnut pomocí šroubu dodaného výrobcem vrtulníku Tron, který byl určený pro testování prototypu vrtulníku. První testy uložení proběhly na jednom listu SAB po pádu a druhém používaném listu MS Composit. Při obou testech došlo k ohybu šroubů v unašeči a tím poškození a následné vytržení kořene listu. Výsledek porušení kořene listu je zachycen na obrázku 26. Tento fakt ovlivňoval naměřené hodnoty, kdy byla naměřena síla odpovídající necelým dvou tunám tahu při porušení vzorků. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto vyměnit šrouby za pevnostní, přesněji třídy 12.9. Dle předpokladů měl tento šroub vydržet namáhání, ale tomu se tak nestalo. Při zkušebním testu šroub při zatížení necelých 9500 N uprostřed praskl, zničil kořen listu, a jak pokračovala tahová síla, došlo i k ohybu unašeče listů. Výsledná deformace unašeče a poškození kořene listů je zaznamenána na obrázku 27. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto opustit od dříve preferovaného co nejpřesnějšího nasimulování podmínek uchycení, které jsou na vrtulníku. Na místo toho byl list uchycen do trhacího zařízení „napřímo“ za kořen. Při následné zkoušce nedocházelo k prokluzu mezi čelistmi a zkušebním vzorkem, ale bohužel univerzální zkušební stroj LabTest 5.50ST nedokázal vyvinout dostatečnou tahovou sílu k porušení vzorku. Zkušební stroj se dostal na tahovou hodnotu nepřesahující 45 kN a dál již nebyl schopný zvyšovat sílu. Při tomto tahovém zatížení se ze zkušebního listu ozývalo jen lehké občasné praskání, ale nedošlo k porušení integrity materiálu. Proto bylo rozhodnuto změnit pro tahovou zkoušku LabTest za stroj od značky Tempos.

Po upnutí do trhacího stroje patřící katedře mechaniky a strojnictví byl proveden první test, při kterém došlo k vytržení části odtokové hrany listu, kde byl přilepen klínek, a zbytek listu zůstal neporušený. Celé to bylo pravděpodobně zapříčiněné drobnou nepřesností, kdy výška výtisku byla nepatrně vyšší než výška náběžné hrany. To způsobilo lepší „zakousnutí“ se čelistí do měkčího a vyššího materiálu v podobě PLA a uhlíkové náběžné hrany a při tahové síle 33000 N došlo k vytržení již zmíněné odtokové hrany.

Aby došlo k omezení prokluzu konce listu v čelistech trhacího stroje, bylo nutné upravit klínky z PLA na bloky, které budou kopírovat tvar listů a v čelistech budou zabírat co největší plochu, která minimalizuje prokluz. Také bylo zapotřebí tyto bloky vymodelovat tak, aby nedocházelo po upnutí kořene listu a konce listu k torní síle. Takto upravené bloky se přilepily pomocí gelového vteřinového lepidla Loctite k listům.



*Obrázek 26: Poškozený kořen listu*



*Obrázek 27: Lom šroubu a deformace unašeče*

#### 4.5.2 Příprava vzorků pro měření v ohybu

Pro toto měření nebylo nutné upravovat listy co se týče jejich délky nebo dolepování klínek. Rozměry listů budou ponechány dle tabulky 9, 10, 11 a 12. Jediná povinnost při přípravě měření spočívala v tom, že bylo nutné pootočit uchycení vzorku čepu podpor o 90 °. Díky tomuto pootočení šlo listy umístit do zkušebního stroje napříč a tím se nemusely zkracovat. Nastavení programu TIRAtest spočívalo v nastavení zkušební rychlosti na 30 mm/min a dále poklesu síly na 65 %. Při nastavení většího poklesu síly docházelo již k takovému průhybu, že zkušební předmět narazil v místě působení síly na spodní část držáku podpor.

#### 4.5.3 Příprava vzorků pro SEM analýzu

Vzorky pro SEM analýzu již byly podrobeny tahovým zkouškám, tudíž se budou zkoumat lomové plochy. U vzorků s označením 7 a 8 bude zkoumána část u kořene, jelikož zde došlo k lomu. Zde byla nutná úprava pro analýzu v podobě provedení řezu 5 mm za lomovou plochou. Toto zkrácení bylo nutné udělat pro úsporu práškového materiálu v podobě zlata sloužícího pro zvodivění předmětu. Listy číslo 10 a 11 byly přerušeny při tahové zkoušce v oblasti nezúženého průřezu materiálu. U čísla 11 byl proveden řez ve vzdálenosti 8 mm od hlavní lomové plochy tak, aby byla zachována celistvost vzorku, protože se jedna větev trhlin šířila příčně na oblast lomu. Vzorek číslo 10 byl upraven řezem ve vzdálenosti 5 mm od lomového místa.

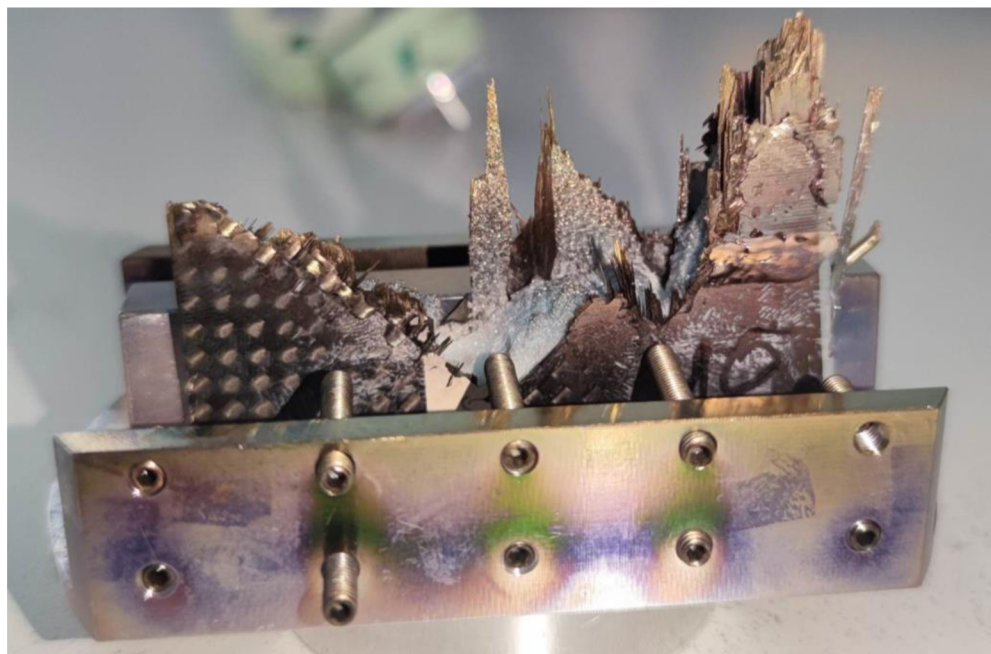
Zvodivění materiálu bylo provedeno na všech vzorcích dvakrát. Nastavené parametry přístroje při pozlacování jsou uvedeny v tabulce 15.

Parameter	Value
Material	Gold
Sputter Current (mA)	20
Sputter Time (sec)	60
Tooling Factor	1
Stage Rotate	No
Stage Rotate Speed	60

Tabulka 15: Parametry nastavené při pozlacování



Po dokončení nanášení zlata byly vzorky přidělány páskou a oboustrannou páskou na držák, který se následně vložil do mikroskopu. Připravený vzorek pro analýzu je zobrazen na obrázku 28.



*Obrázek 28: Vzorek připravený pro SEM analýzu*

## 5.0 Naměřené výsledky

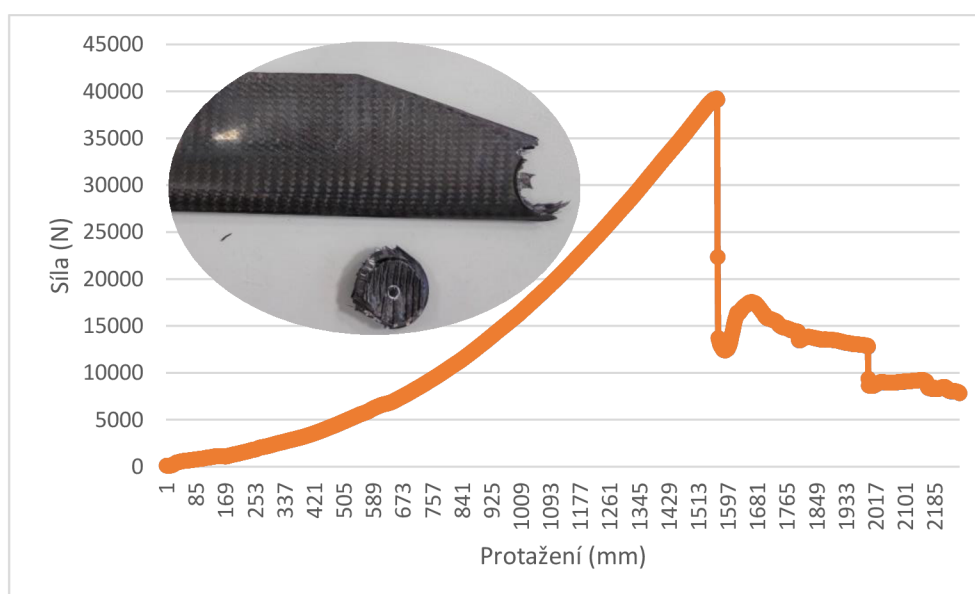
V této kapitole budou prezentovány naměřené výsledky prováděných zkoušek. Dále budou diskutovány odlišnosti při měřeních a jejich možné důvody vzniku.

### 5.1 Výsledky měření tahové zkoušky

Tato stať se bude zaměřovat na grafické vynesení maximální tahové síly na protažení včetně komentáře dosažených výsledků.

#### 5.1.1 List 1A

U testovacího vzorku číslo jedna došlo k úplnému odtržení kořene listu od těla. Důvod odtržení v tomto místě má vysvětlení v tom, že kořen je tvořen plným materiálem, ve kterém je vyvrtaná díra pro šroub unašeče. Při následném napojení zbytku listu, které je duté na kořen, vznikne místo, které je i co se týče oproti zbytku listu tvarově užší a v něm dochází k porušení celistvosti materiálu v celém průřezu. Na tomto vzorku bylo naměřeno 39261,5 N tahové síly a při této síle bylo prodloužení 10,36 mm. Po dosažení maximální tahové síly došlo k jejímu propadu na 12372 N a jejímu následnému růstu k 17543,5 N a poté dalšímu pozvolnému poklesu vedoucímu až k odtržení kořene. Grafické znázornění zkoušky a výsledek zkoušky na listu je zaznamenán na obrázku 29.

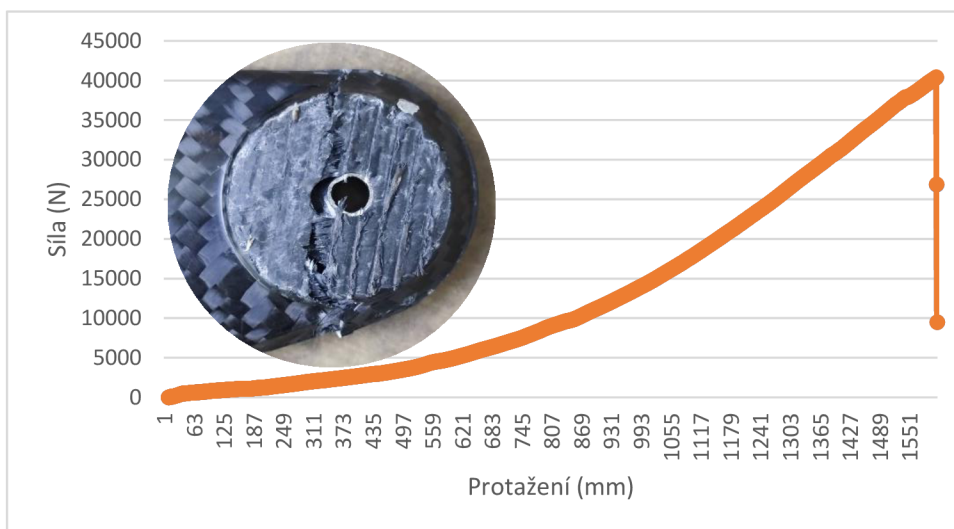


Obrázek 29: List 1A průběh tahové zkoušky



### 5.1.2 List 2A

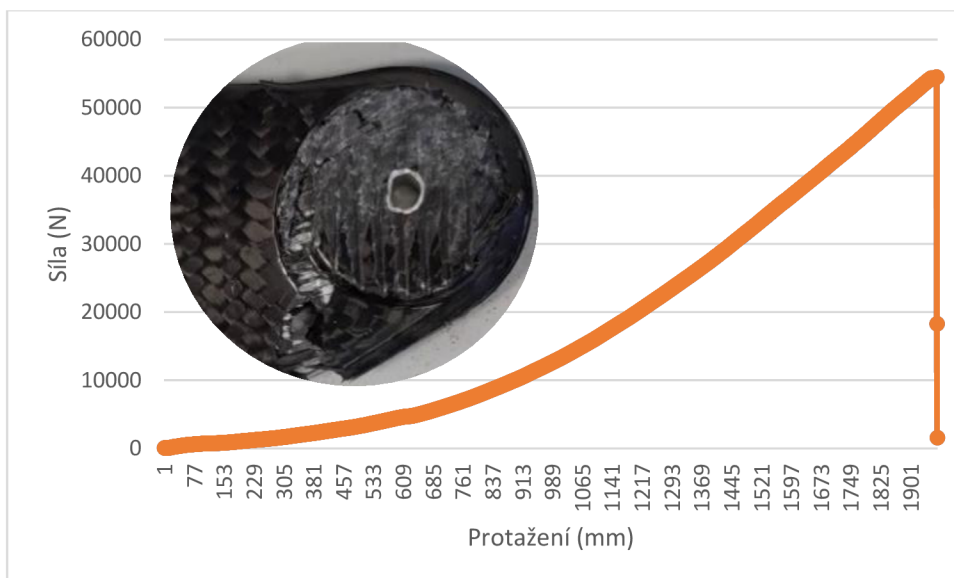
U tohoto listu došlo zprvu k porušení celistvosti materiálu v okolí díry na šroub v kořeni, ale poté tato lomová oblast pokračovala příčně na druhou stranu listu, kde byl porušen v místě spojení duté části a kořene listu. Maximální tahová síla byla 40400 N a při ní prodloužení 10,62 mm. Rozdíl průběhu zkoušky oproti vzorku 1A je zřetelný v tom, že nedošlo k úplnému mechanickému oddělení částí listu. Graf a vzhled lomové plochy listu jsou na obrázku 30.



Obrázek 30: List 2A průběh tahové zkoušky

### 5.1.3 List 3A

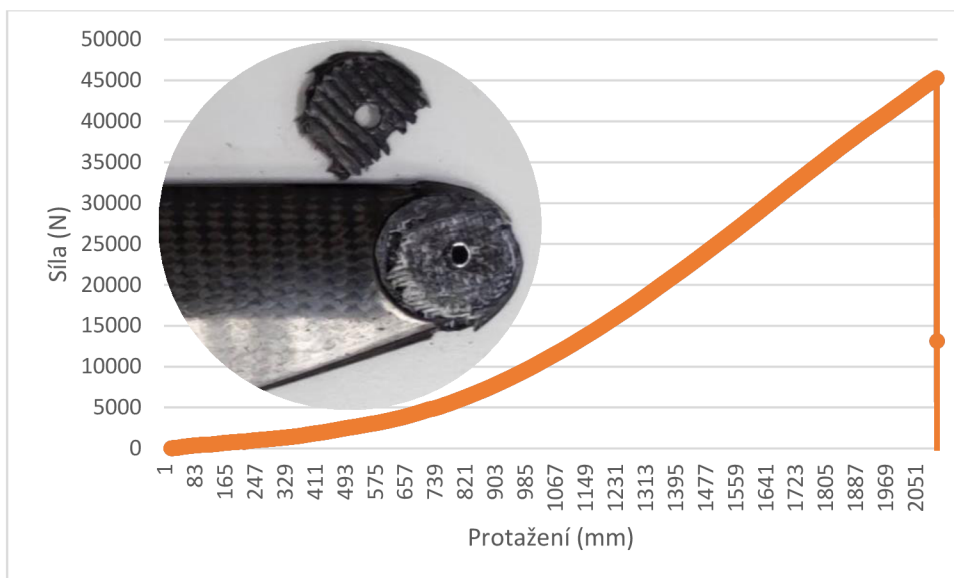
Tento vzorek dosáhl největší tahové síly, konkrétně 54470,5 N při prodloužení 13,04 mm. K porušení celistvosti listu došlo opět v přechodu mezi kořenem a dutou částí listu. Na vzorku je i zjevné poškození vložky v díře pro uchycení šroubu. Průběh zkoušky byl ukončen při hodnotě 1543 N. Průběh tahové zkoušky s detailem zachycení poškození prezentovaným na obrázku 31.



Obrázek 31: List 3A průběh tahové zkoušky

#### 5.1.4 List 4A

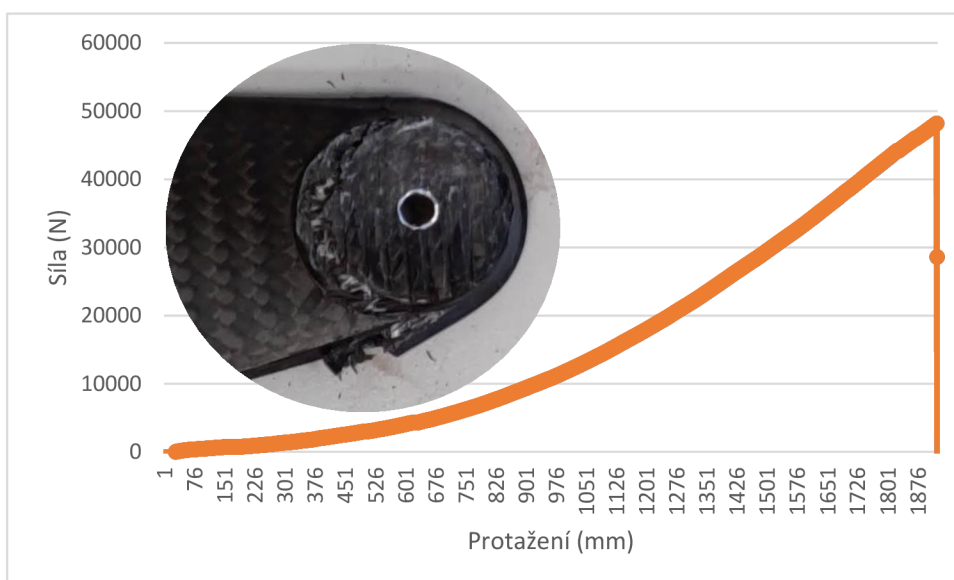
Při zkoušení byla naměřena maximální tahová síla 45275,5 N a při ní bylo dosaženo prodloužení 13,86 mm. Průběh zkoušky tvarově odpovídá vzorkům 2A a 3A, čili po překročení maximální síly došlo ke strmému poklesu tahové síly bez dalších nárůstů. Změna ale nastala v poškození vzorku. Jednak došlo k lomu ve stejné oblasti jako při předchozích měřeních, ale s tou změnou, že navíc došlo k oddělení svrchní vrstvy materiálu listu, která byla uchycena v čelistech trhačického stroje. Průběh zkoušky se zachycením vzniklých vad na obrázku 32.



Obrázek 32: List 4A průběh tahové zkoušky

### 5.1.5 List 5A

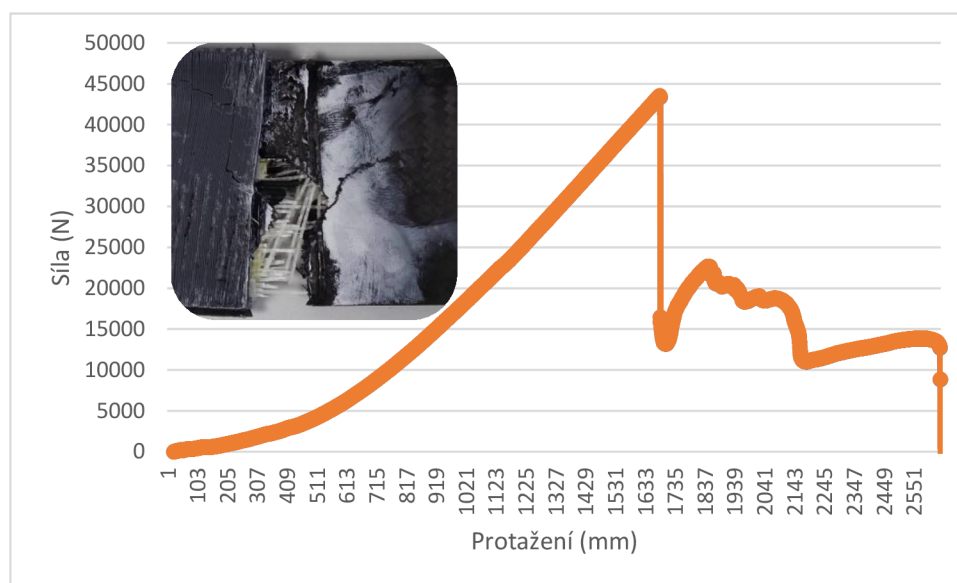
U měřeného vzorku číslo 5 došlo pouze k porušení celistvosti materiálu v místě napojení se duté části listu na kořen. Maximální tahová síla dosáhla hodnoty 48195 N při prodloužení o 12,61 mm. Výsledné grafické znázornění a poškození je vyneseno na obrázku 33.



Obrázek 33: List 5A průběh tahové zkoušky

### 5.1.6 List 6A

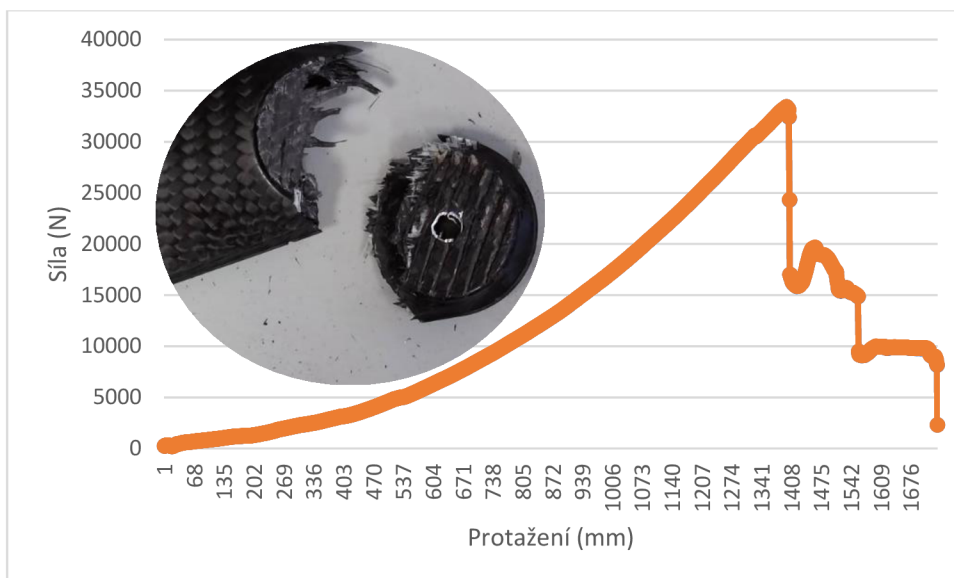
Při porovnání s předchozími vzorky došlo k rozdílu místa lomové plochy. Zde byl materiál porušen v místě konce listu, kde byl přilepen PLA klínek. Průběh tahové zkoušky je obdobný vzorku 1A. Po dosažení maximální tahové síly 43513 N došlo ke strmému propadu síly na 13184,5 N, poté jejímu nárůstu na 21821 N a jejímu následnému postupnému snižování. Při zkoušce došlo k protažení při maximální působící síle o 11,03 mm. Průběh zkoušky včetně poškození listu je na obrázku 34.



Obrázek 34: List 6A průběh tahové zkoušky

### 5.1.7 List 7A

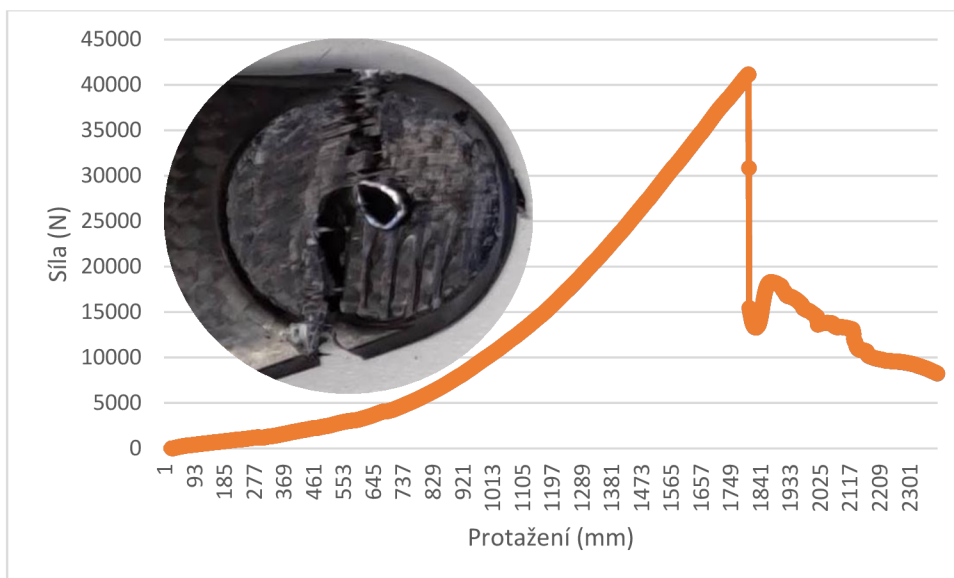
Oproti předchozím měřeným listům od firmy MS Composit dosáhl vzorek 7 nejnižší hodnoty maximální tahové síly. Bylo naměřeno 33406,5 N, což je o 21064 N méně, než tomu bylo u vzorku 3A. Při působení této tahové síly se vzorek protáhl o 9,21 mm, což je druhé nejmenší protažení ze všech zkoušených vzorků. Tahový diagram se vyznačuje propadem síly po jejím maximálním účinku, poté nárůstem k hranici 33101 N a následným propadem s postupným nárůstem až do přetržení vzorku. Celý tento průběh včetně zobrazení odlomení kořene od zbytku listu je zdokumentováno na obrázku 35.



Obrázek 35: List 7A průběh tahové zkoušky

### 5.1.8 List 8A

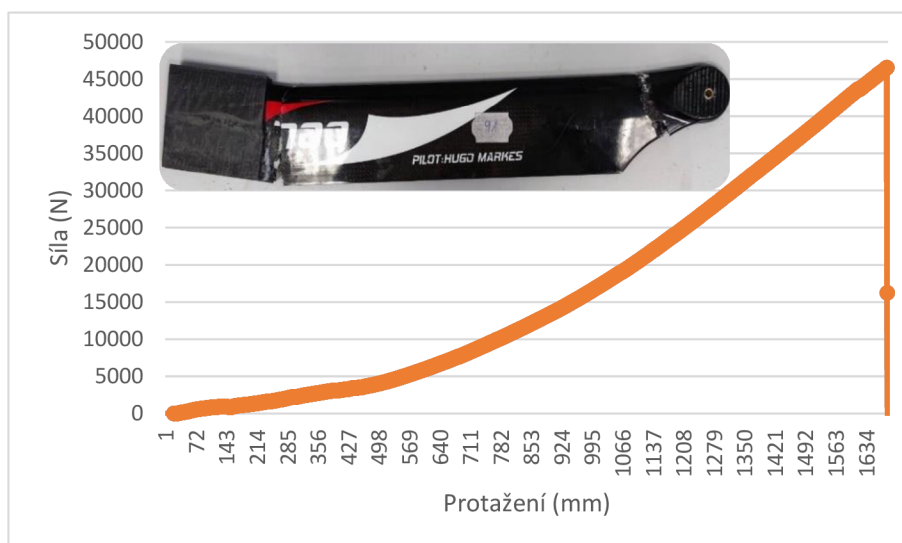
Vzorek číslo 8 byl poškozen v kořeni v oblasti díry pro šroub při maximální tahové síle rovnající se 41174,5 N, při níž se dosáhlo protažení vzorku o 11,82 mm. Tahový diagram se vyznačuje strmým propadem síly po dosažení jejího maxima, poté jejímu pozvolnému nárůstu na 18321,5 N a dále jejímu takřka lineárnímu poklesu až do ukončení zkoušky. Při podrobnějším prozkoumání této lomové plochy s obdobnou na vzorku 2A je zjevné, že kořen listu byl upnut v čelistech hlavně za část nad vyvrtanou dírou, jelikož jsou zde vidět rýhy od čelistí, zatímco v části kořene pod dírou je zjevné, že zde čelisti spíše klouzaly. To by vysvětlovalo, proč došlo k prasknutí v tomto místě, a ne v místě obvyklém pod kořenem listu v místě přechodu na dutý profil. Vše je zachyceno na obrázku 36.



Obrázek 36: List 8A průběh tahové zkoušky

### 5.1.9 List 9A

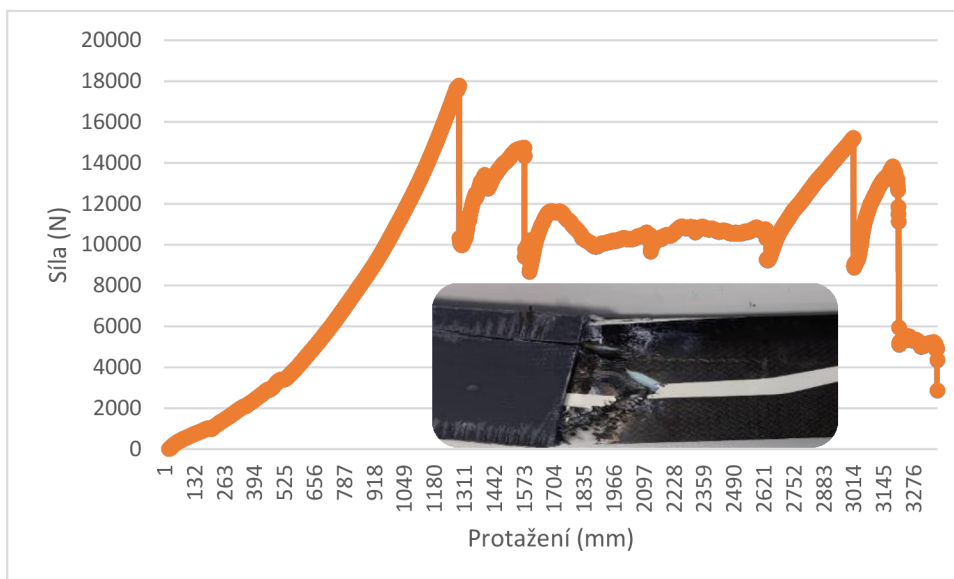
U vzorku číslo 9 došlo ke změně výrobce a tím mimo jiné jeho profilu a vlastnosti složení listu. Oproti předchozím je zde využito jádro. Tento fakt se projevil na místě lomu, který se objevil u kořene i na jeho konci. Lomová plocha se nachází v blízkosti klínku z PLA materiálu (obrázek 37). Dvě lomové plochy na odlišných místech jsou během jednoho měření něco, co vybočuje z předchozích měřících výsledků. Maximální tahová síla byla naměřena 46535 N při prodloužení vzorku o 11,02 mm. Po dosažení maximální síly došlo k jejímu propadu, jelikož materiál už nekladl odpor.



Obrázek 37: List 9A po tahové zkoušce

### 5.1.10 List 10A

Vzorek 10 obsahuje stejně jako je tomu u vzorku 9 jádro. Rozdíl je v tom, že došlo k lomu jen na jednom místě, které se nachází zhruba ve stejné vzdálenosti od PLA klínku jako u vzorku 9. Rozdíl oproti všem ostatním vzorkům je však v maximální dosažené síle, která je zde nejnižší a dosahuje 17776 N. Tento vzorek dosáhl také nejmenšího protažení, a to o 8,42 mm proti klidovému stavu. Zajímavý je také průběh grafu, kdy mimo obvyklého propadu tahové síly po dosažení jejího maxima je zde dalších 5 oblastí, kdy dojde ke zvyšování síly a jejímu následnému propadu po dosažení lokálního maxima. Celý tento průběh včetně zachycení poškození jsou vyneseny na obrázku 38.



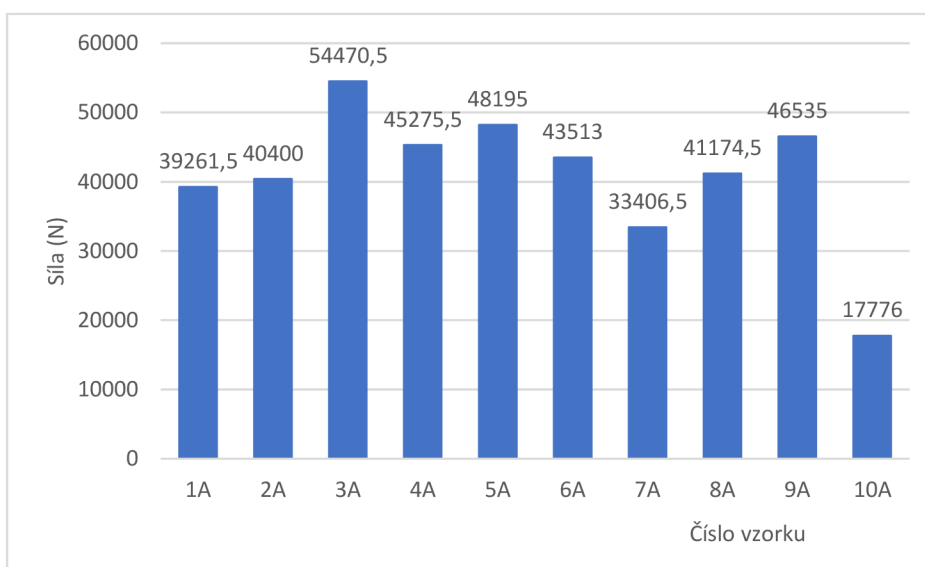
Obrázek 38: List 10A průběh tahové zkoušky

## 5.2 Sumarizace naměřených výsledků tahové zkoušky

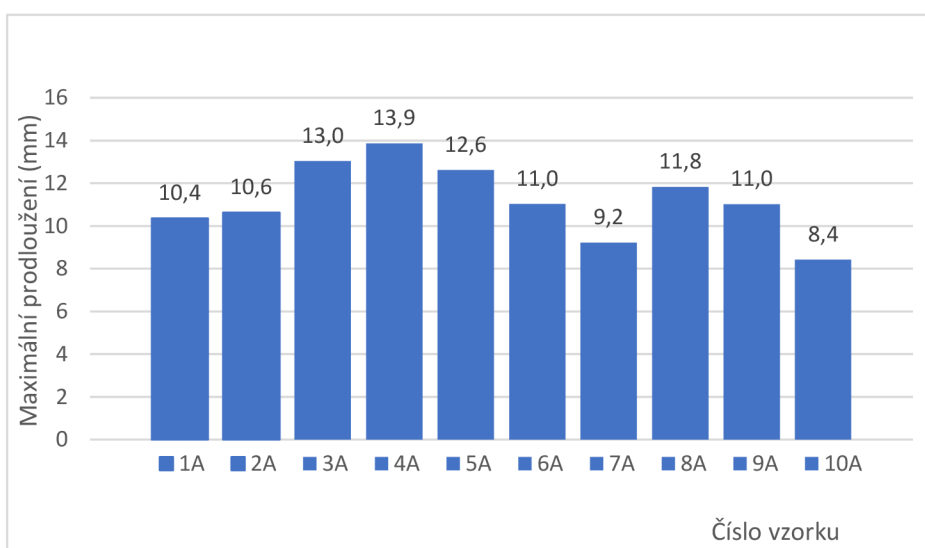
Při měření tahových vlastností rotorových listů nejlépe z pohledu dosažené maximální síly vyšel vzorek číslo 3, který pochází od českého výrobce. Naopak nejhůře dopadl vzorek číslo 10, což je celkem překvapující, jelikož je v tomto vzorku použito jádro. Průměrná hodnota nových listů od MS Composit dosahovala 44851,875 N. Oproti tomu litané listy od stejné značky dosáhly průměru 41572,25 N. Z grafu lze vyčíst, že nejvíce litaný vzorek číslo 7 má oproti zbytku testovaných vzorků od MS Composit nejnižší tahovou pevnost a také nejmenší prodloužení. Výsledky zkoušky ukazují i na poměrně veliký

pevnostní rozptyl u nových vzorků. Tento fakt může mít na svědomí rozdílnost šarží dodávaných materiálů, či drobné odlišnosti při ručním skládání materiálů do formy. Zkrácení vzorku číslo 4 o 20 mm nemělo vliv na hodnotu maximální tahové síly a naměřené hodnoty nevybočují z trendu. Při porovnání prodloužení listu při maximální síle už ovšem došlo k největšímu prodloužení u tohoto vzorku, celé to bylo způsobeno tím, že síla působila na delší prvek. Naměřené výsledky dokazují, že vliv použití jádra v listu sebou nenese žádnou zjevnou pevnostní výhodu z pohledu tahového namáhání.

Grafy maximálních sil a prodloužení při působení těchto sil jsou vyneseny na obrázcích 39 respektive 40.



Obrázek 39: Porovnání maximálních tahových sil vzorků



Obrázek 40: Porovnání prodloužení vzorků při maximálním tahovém napětí

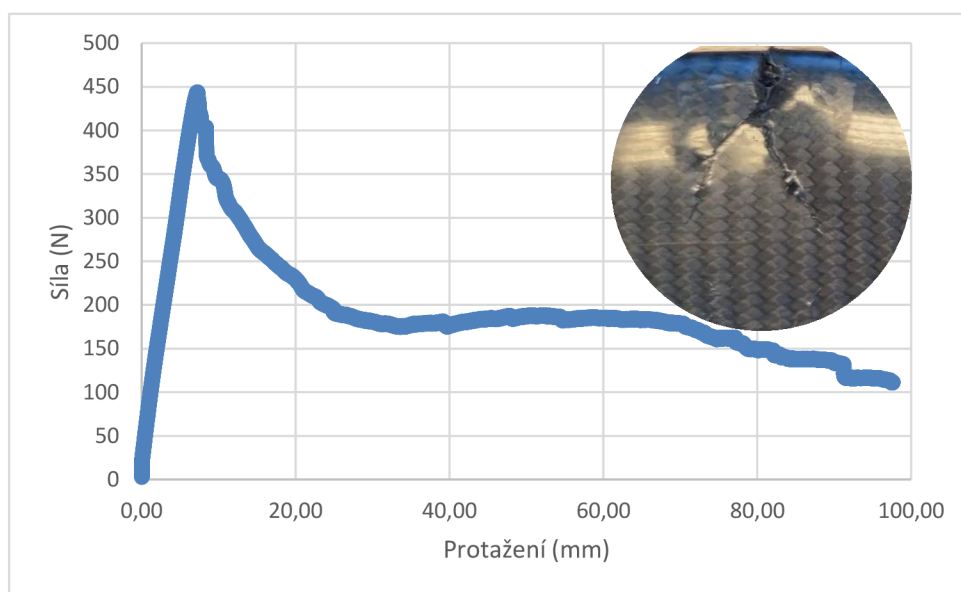


## 5.3 Výsledky měření ohybové zkoušky

### 5.3.1 List 1B

Při zkoušení pevnosti vzorku v ohybu byl nastaven požadovaný pokles síly na 80 %, jenže při tak velkém poklesu stále nedošlo k úplnému přelomení zkoušeného vzorku. Zkoušku bylo třeba ručně ukončit, jelikož již došlo ke kontaktu listu a rámu podpěr držáku. Materiál jevil menší známky trhlin ve spodní části listu, kde docházelo k tahovému namáhání na materiál. Horní strana listu, na kterou při ohýbání působila tlaková síla, zůstala z makroskopického hlediska více poškozena a trhliny se v ní rozvětvují. Praskliny se šíří směrem od náběžné hrany listu. Maximální ohybová síla, která působila na těleso, byla 443,65 N. Protážení při maximální síle bylo 7,22 mm.

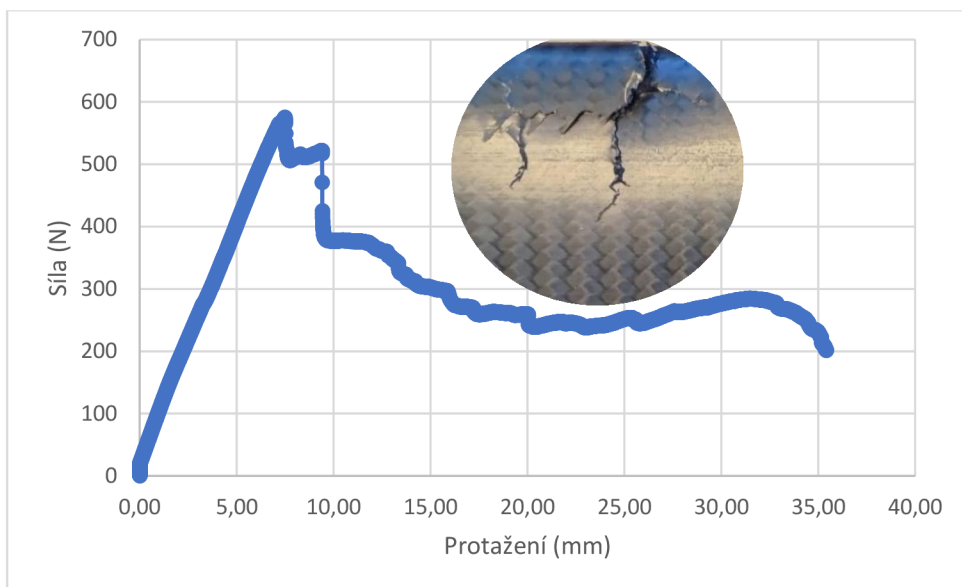
Závislost ohybové síly na protažení a poškození je zachyceno na obrázku 41.



Obrázek 41: List 1B průběh ohybové zkoušky

### 5.3.2 List 2B

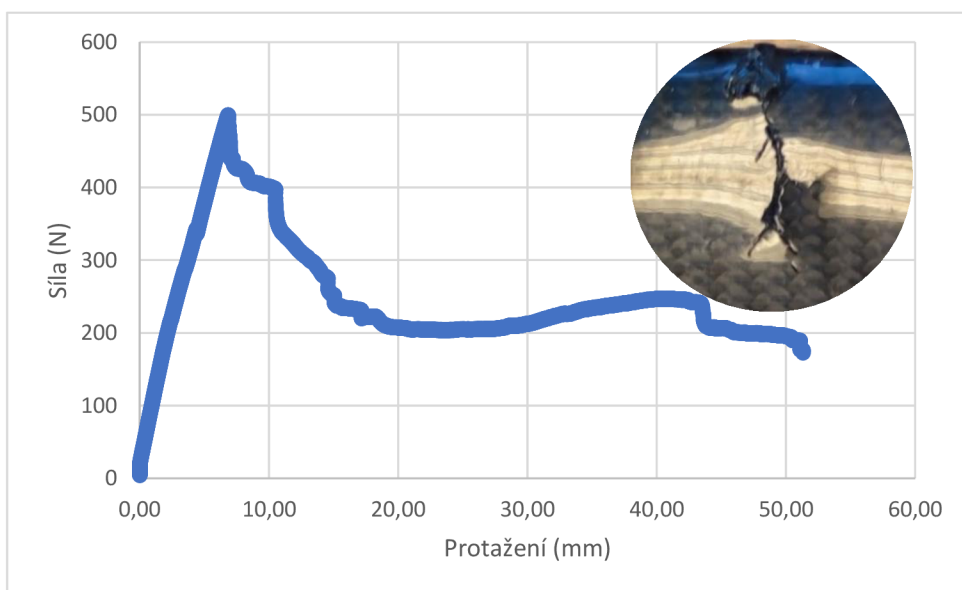
Při zkoušení toho listu již došlo ke změně nastavení programu, kdy bylo nastaveno ukončení zkoušky při poklesu síly o 65 %. Směr trhliny se šířil směrem od náběžné hrany, přičemž zhruba po 8 mm dochází k jejímu podélnému šíření, kde po 12 mm přechází opět na šíření příčné. Ve vzorku okolo trhliny nevznikla žádná prohlubeň. Maximální ohybová síla byla naměřena 575,2 N při protažení 7,48 mm. V průběhu grafu jsou zřejmé oblasti, kdy docházelo ke kolísání síly. Tento průběh včetně detailu je na obrázku 42.



Obrázek 42:List 2B průběh ohybové zkoušky

### 5.3.3 List 3B

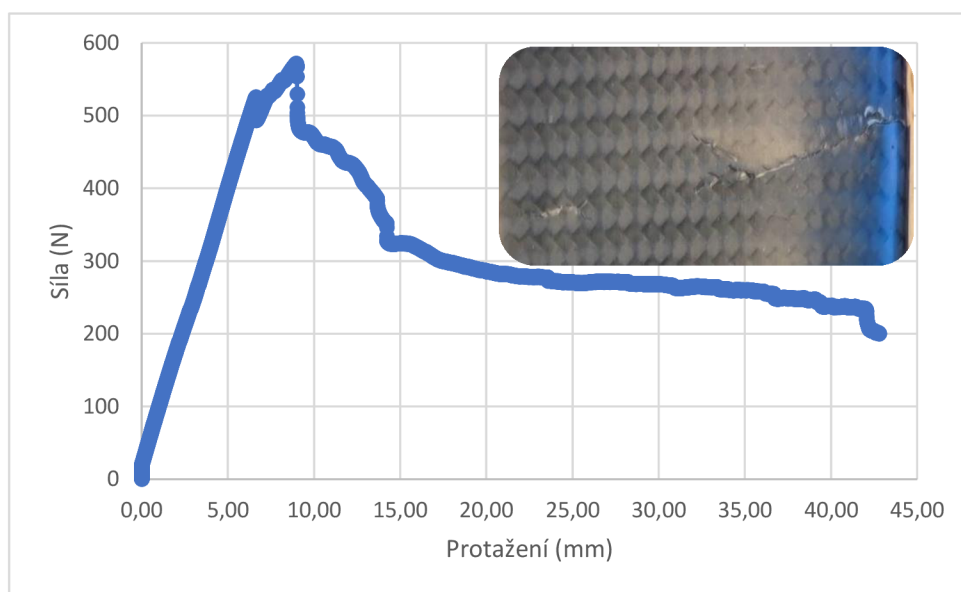
Během měření ohybových vlastností tohoto vzorku byla vyvozena maximální ohybová síla 499,6 N, při které byl zaznamenán průhyb 7,48 mm. Směr šíření trhlin je stejný jako u vzorku 1B s tím rozdílem, že rozvětvení trhlín do tvaru V dochází ve vzdálenosti 25 mm od náběžné hrany. U vzorků 1,2 a 3 si lze všimnout, že materiál si zanechává „paměťový efekt“, kdy se po testování při ručním ohybu listu vrátí do původní polohy a není patrná větší prohlubeň v okolí trhlín. Zkouška je zaznamenána na obrázku 43.



Obrázek 43:List 3B průběh ohybové zkoušky

### 5.3.4 List 5B

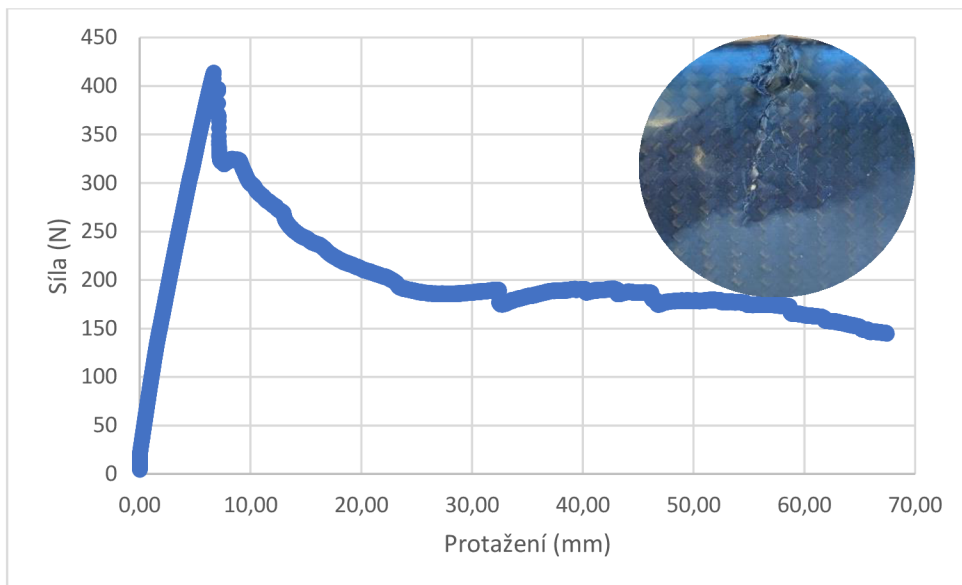
Oproti předchozím vzorkům byl tento již podroben létání. Tvar trhlinového šíření směřující od náběžné hrany je velice podobný předchozím vzorkům a na konci dochází k rozvírání trhlín do tvaru V. Oproti tomu na listu vzniká druhé místo šíření trhlín, které směřuje od odtokové hrany s tím, že se taktéž na konci rozevívá. Maximální ohybová síla byla 571,9 N a průhyb při ní činil 8,97 mm. Průběh zkoušky je vyneseno v grafu se zachycením poškození na obrázek 44.



Obrázek 44: List 5B průběh ohybové zkoušky

### 5.3.5 List 6B

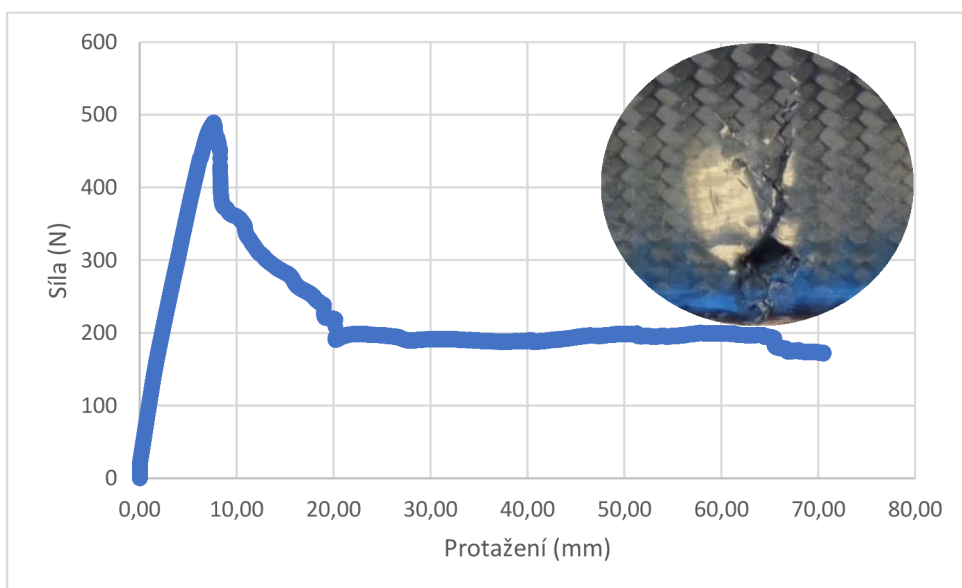
Oblast šíření trhlín má oproti předchozím vzorkům rozdíl v tom, že nedochází k rozvětvení trhlíny. U náběžné hrany došlo vlivem ohybu ke vzniku prohlubně okolo trhlíny. List již oproti vzorkům 1, 2 a 3 nemá po ručním ohybu takovou tendenci se vracet do původní polohy. Dále si lze na obrázku 45 všimnout vzniku drobné trhlíny šířící se směrem od odtokové hrany do středu listu. Maximální ohybová síla dosáhla hodnoty 413,75 N a při jejím působení vzniklo protažení vzorku o 6,67 mm. Závislost síly na protažení je na obrázku 45.



Obrázek 45: List 6B průběh ohybové zkoušky

### 5.3.6 List 7B

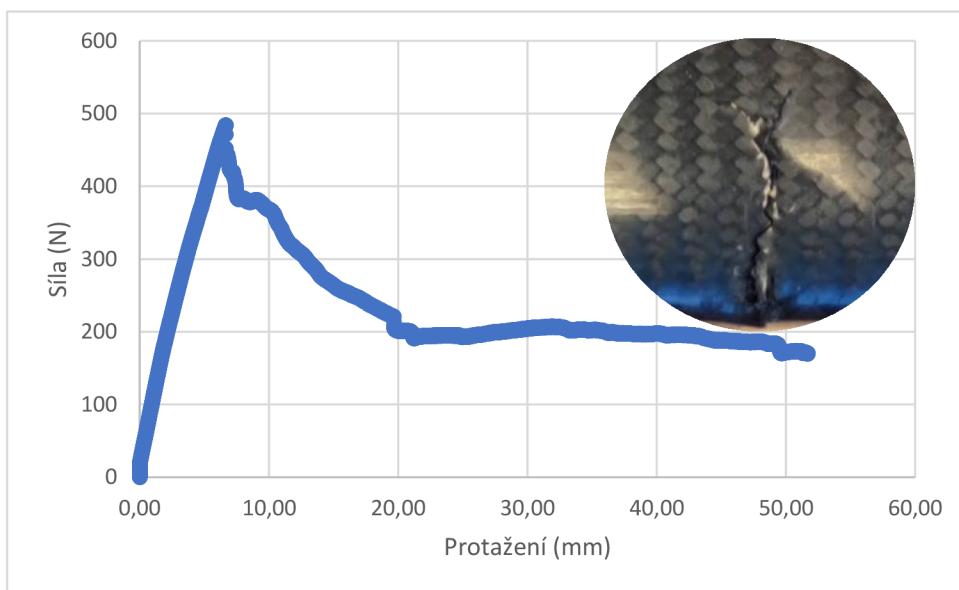
Při ohýbání tohoto listu bylo dosaženo maximálního zatížení silou 489,35 N. Průhyb při působení této síly byl 7,61 mm (popis jednoho bodu obrázku 46). Trhliny se na vzorku šířily ze směru od náběžné a odtokové hrany směrem do středu listu. U náběžné hrany je zřetelné rozdělení trhlin do tvaru V, přičemž zhruba 7 mm ve vzdálenosti od náběžné hrany vnikla 3D nerovnost překryvu materiálů ve tvaru stříšky. List zůstal po zkoušce trvale ohnut v řádu jednotek stupňů.



Obrázek 46: List 7B průběh ohybové zkoušky

### 5.3.7 List 8B

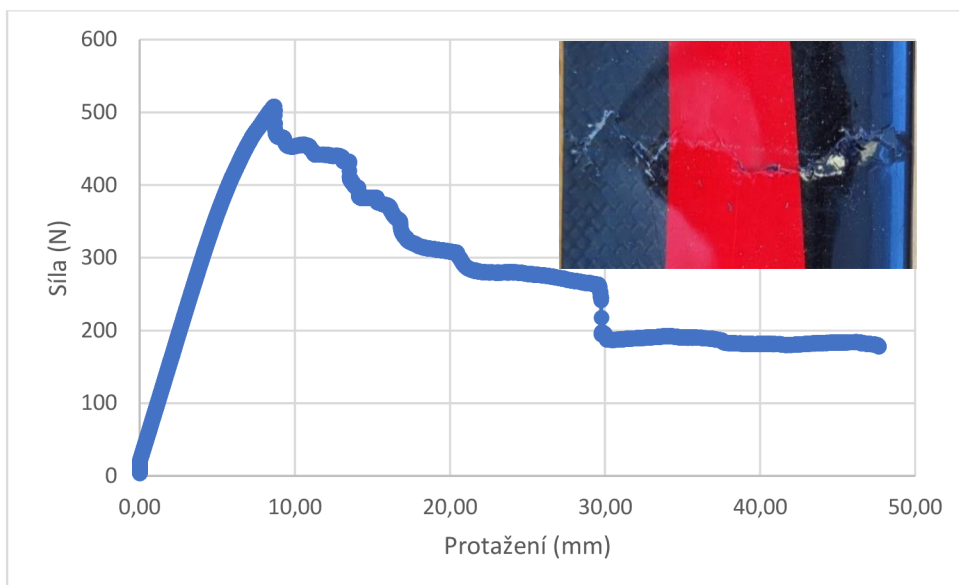
Tento list má za sebou nejvíce letů ze všech testovaných vzorků. Při pohledu na trhlinu je zřejmé úplné oddělení všech vrstev materiálu od sebe v místě trhliny, při bližším prozkoumání je i v jejím místě zřetelná prohlubeň. Naproti tomu nedošlo k makroskopickému šíření trhlin ve směru od náběžné hrany. Maximální zatěžovací síla byla 484,35 N a protažení při jejím působení bylo 6,65 mm, což je nejmenší protažení ze všech vzorků. Grafické zpracování zkoušky je na obrázku 47.



Obrázek 47: List 8B průběh ohybové zkoušky

### 5.3.8 List 9B

Vzorek s číslem 9 jako jediný pochází od jiné značky, než je MS Composit. Rozdíl obou vzorků je tvořen hlavně tím, že list 9B má v sobě jádro. Díky jádru došlo k rozdílnému tvaru šíření trhlin, kdy se trhlinka šíří od náběžné až po odtokovou hranu. Také je zřetelná prohlubeň v místě trhliny a odpadnutí kousků povrchu listu hlavně v okolí náběžné hrany. Maximální ohybová síla dosáhla hodnoty 507,9 N při průhybu 8,66 mm. Průběh zkoušky je vyneseno na obrázku 48.



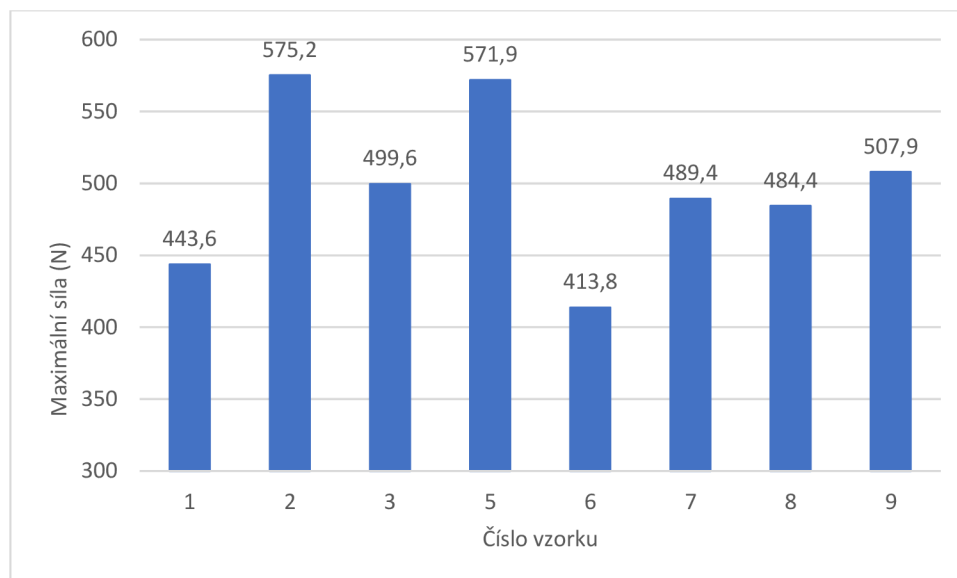
Obrázek 48: List 9B průběh ohybové zkoušky

#### 5.4 Sumarizace naměřených výsledků ohybové zkoušky

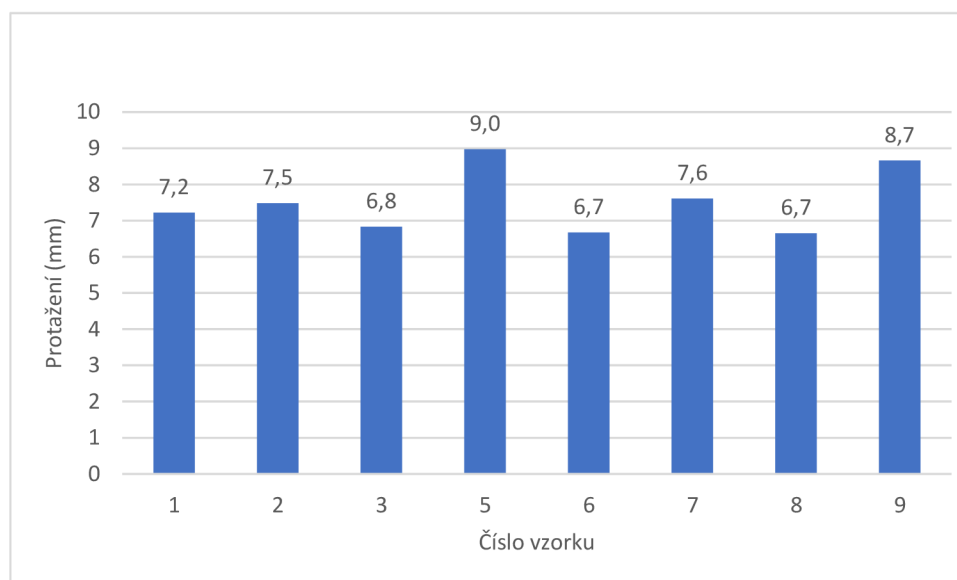
Porovnáním vzorků vyrobených výrobcem MS Composit vyšel nejlépe vzorek číslo 2, který dosáhl maximální ohybové síly 575,2 N. Nejhůře dopadl vzorek číslo 6 s 413,75 N. Průměrná maximální síla nových MS Composit listů byla 506,15 N. Oproti tomu létané listy dosáhly průměrné hodnoty 489,84 N. Při počítání průměrných hodnot protažení při maximální ohybové síle se dosáhlo u nových listů na hodnotu 7,18 mm a u létaných listů 7,48 mm. Grafické vynesení výsledků zkoušky je na obrázcích 49 a 50.

U ohybové zkoušky se potvrzuje trend nastolený při tahové zkoušce. Listy bez použití jádra nevybočují svými průměrnými hodnotami nad listy s jádrem. Z pohledu této zkoušky se jeví jako zbytečné použití jádra uvnitř listů.

Pokud se porovnají výsledky tahových a ohybových zkoušek vzorků 1-8, lze dojít k závěru, že pokud daný vzorek byl nejlepší či nejhorší v jedné zkoušce, neznamená to, že i v té druhé by na tom byl z pohledu pořadí stejně.



Obrázek 49: Graf maximální ohybové síly dle vzorků



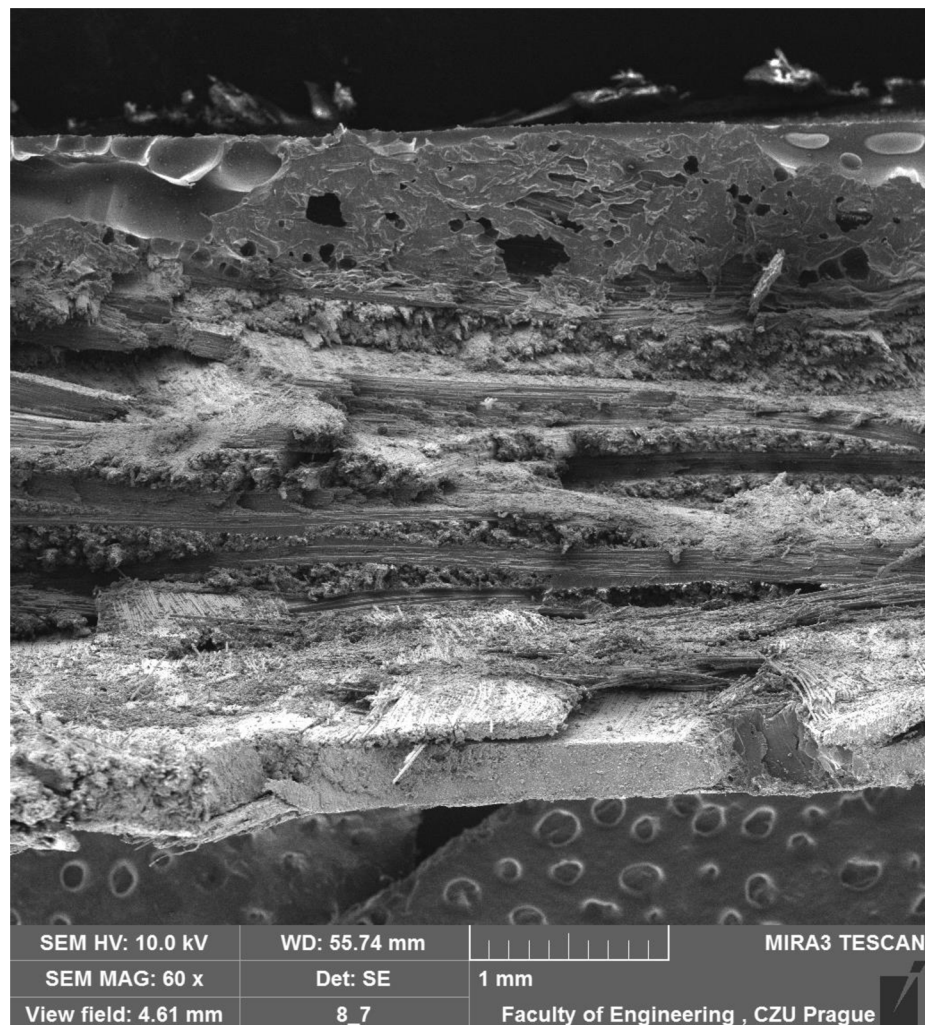
Obrázek 50: Graf protažení vzorků při působení maximální ohybové síly



## 5.5 Výsledky SEM analýzy

Z výsledků SEM analýzy byly vybrány snímky, které reprezentují odlišnosti mezi jednotlivými vzorky, přesněji mezi listy s jádrem a bez něj.

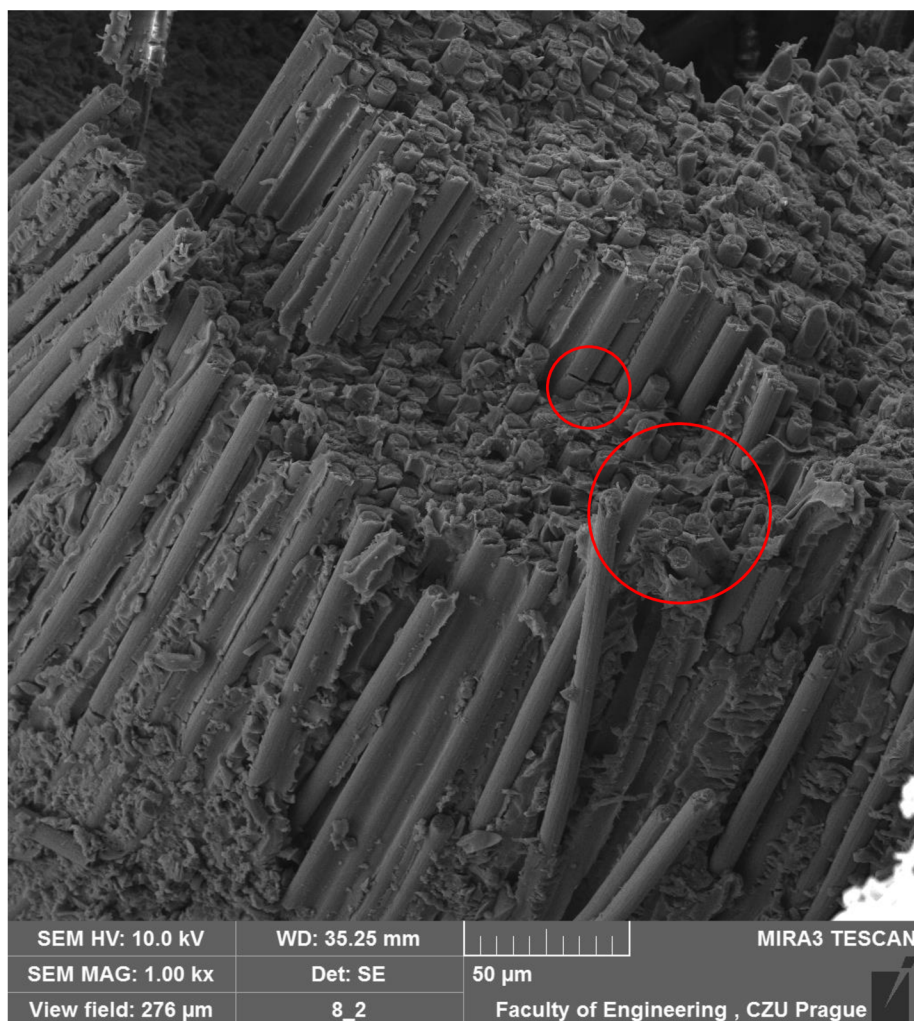
Na obrázku 51 je vzorek číslo 7 bez jádra. Na tomto snímku je zachycena struktura jednotlivých kompozitních vrstev. Je zde vidět, že výrobce kromě prepregové vrstvy přidává další v podobě skelných a jednosměrných uhlíkových vláken. Zjevná je i pórovitá struktura epoxidu. Ve spodní části fotografie si lze všimnout delaminace uhlíkového materiálu. Pracovní vzdálenost značená WD byla 55,74 mm, napětí 10 kV a šedesátinásobné přiblížení, označené pod značkou MAG.



Obrázek 51: Struktura vzorku 7

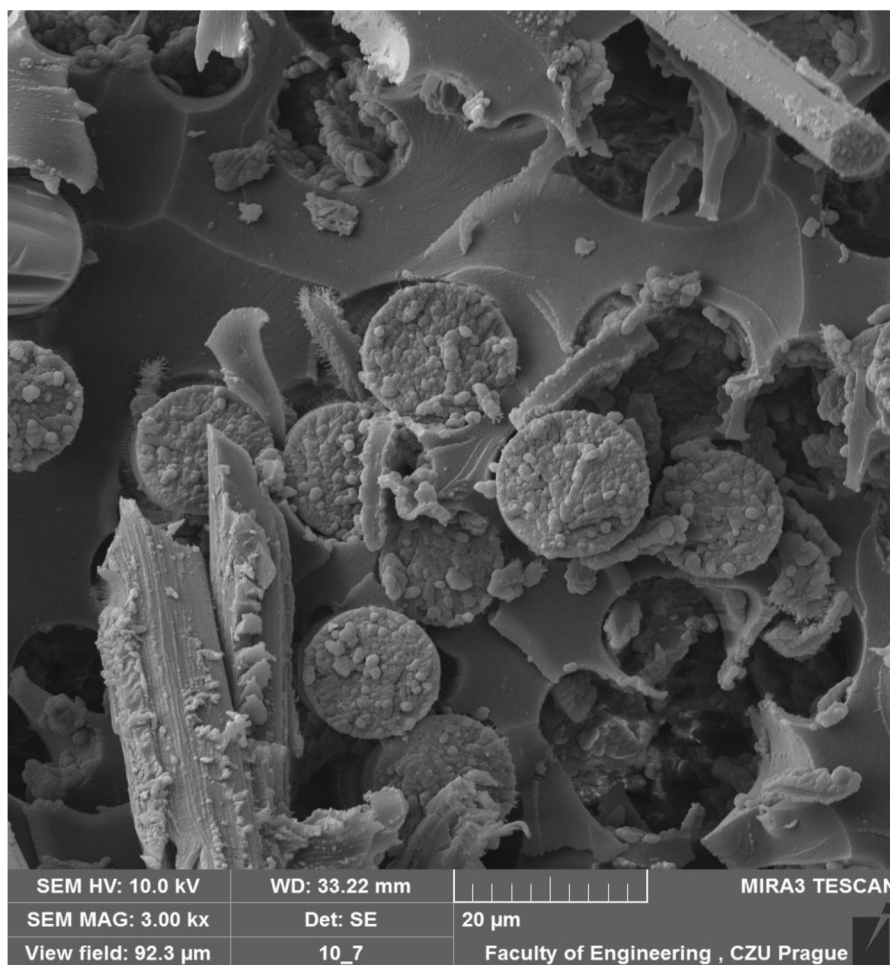


Na obrázku 52 je zřetelný směr uhlíkových vláken včetně jejich spojení pojivem. Dle skladby lze usoudit, že se jedná o prepreg, u kterého svírají vlákna v listech firmy MS Composit 45 °. Dále je zřetelná lomová struktura vláken, kdy na některých vláknech jsou patrné trhliny. Pro tento snímek bylo nastaveno tisícínásobné přiblížení při pracovní vzdálenosti 35,25 mm.



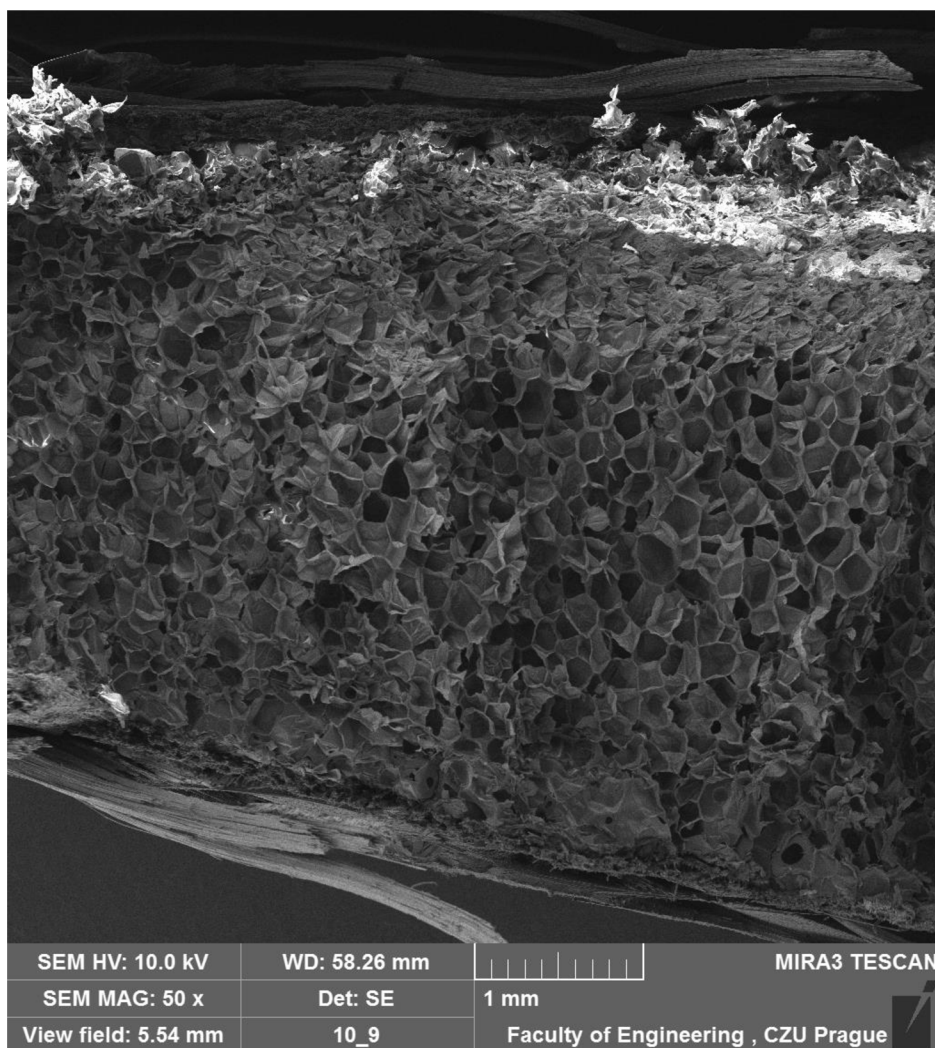
Obrázek 52: Skladba vláken vzorku 8

Lomová struktura je prezentována na obrázku 53. Ze struktury vláken a matrice jsou zjevné části statického lomu. Na epoxidové vrstvě nejsou známky větší pórovitosti. Vzniklé dutiny jsou pravděpodobně po vláknech, která se zlomila hlouběji a byla vytržena z povrchu lomu. Na zachycené fotografii je zřetelná přilnavost jednotlivých vláken mezi sebou. Při zkoumání bylo využito třítisícové přiblížení s pracovní vzdáleností 33, 22 mm.



Obrázek 53: Lomová plocha vzorku 10

Struktura jádrové výplně při padesátinásobném přiblížení je na obrázku 54. Je zde patrná velká pórovitost materiálu, která je u vzorků číslo 11 a 10 takřka stejná. V dolní a horní části snímku je zjevný přechod výplně na uhlíkovo-epoxidovou vrstvu. Dále si lze ve spodní části snímku všimnout delaminace materiálu. Při snímání bylo nastaveno napětí 10 kV a pracovní vzdálenost 58,26 mm.



Obrázek 54: Jádro vzorku 10

## Závěr

Diplomová práce se zabývala zkoumáním mechanických vlastností rotorových listů, které se používají na rádiem řízených akrobatických vrtulnicích. Cílem práce bylo naměřit změny pevnosti listů v tahu a ohybu u nových a létaných listů. Sekundárním cílem bylo ověřit, zda má použití jádra v listech vliv na výsledné mechanické vlastnosti.

Přínos této práce tkví v prokázání, že kompozitní rotorové listy v průběhu doby používání mění své pevnostní vlastnosti. Použití jader v listech nepřináší znatelně lepší výsledky tahových či ohybových zkoušek.

Při porovnání ohybových a tahových vlastností nových a létaných listů od firmy MS Composit dochází v průběhu doby létání k pevnostním změnám. Při zkouškách listů v tahu dosáhly nové listy v průměru o 7,89 % vyšší maximální síly v tahu oproti létaným listům. Je nutné vzít v potaz, že každý létaný vzorek měl rozdílný letový čas. Nejhůře při tomto testu dopadl vzorek číslo 7, tudíž nejvíce létaný. Oproti průměrné hodnotě nových listů došlo k poklesu pevnosti v tahu u tohoto vzorku o 25,52 %. Tato hodnota změny je vcelku vysoká a vyvrací mé přesvědčení o tom, že by nemělo docházet v průběhu „života“ listu k výraznějším pevnostním změnám. Na druhou stranu je nutno podotknout, že list byl namáhán akrobatickými lety tak, jak ho 99 % pilotů nezatíží. I po jedné odlétané sezoně na tomto vzorku při těchto pevnostních změnách nedošlo ze subjektivního pohledu ke změně letových vlastností, ani k žádnému flatování při akrobatických manévrech.

Doba létání při testování listů v ohybu měla jen minimální dopad na pokles pevnosti. Průměrná odlišnost nových a létaných listů MS Composit dosáhla 3,22 %. Tato hodnota je opravdu zanedbatelná a vzorek číslo 7, který dopadl v tahovém testu nejhůře, zde nikterak nevybočoval z nastoleného trendu.

Při porovnání mechanických vlastností listů s použitím jádra a bez jeho použití nedošlo v ohybovém testu takřka k žádným mechanickým odlišnostem a vzorek číslo 9 s jádrem zapadl do trendu. Ovšem během tahových zkoušek vzorek číslo 10 s jádrem znatelně pevnostně propadl o 60,37 % oproti průměrné hodnotě nových MS Composit listů. Vzorek číslo 9 opět nevybočoval z řady hodnot listů MS Composit.

Výsledné snímky SEM analýzy přehledně prezentují skladbu materiálů rotorových listů od firmy MS Composit. Dále jsou u všech zkoušených listů zřetelné lomové plochy výztuže a matrice, které vznikly během zkoušek tahem.

Z čistě mechanického pohledu se jeví použití jádra v listech jako ne zcela zbytný aspekt. Z ekonomického hlediska bude dle mého názoru ale rozdíl znatelný, jelikož při použití jádra dochází k úspoře kompozitního materiálu tvořícího vnější část listu.

## Zdroje

- [1] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [2] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Definice a historie kompozitních materiálů* [online]. In: . [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/1buTHQ0wJf-MA5sFzvi89f5Tm9r0qKFAb/view>
- [3] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Brno, 2008.
- [4] *Kompozity* [online]. In: . [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: <https://www.shimeq.cz/kompozit>
- [5] *History Of Composites* [online]. [cit. 2022-06-03]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/composites-101/history-of-composites/>
- [6] *Plasty a kaučuk v období 2. světové války* [online]. [cit. 2022-06-03]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/plasty-a-kaucuk-v-obdobi-2-svetove-valky\\_44186.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/plasty-a-kaucuk-v-obdobi-2-svetove-valky_44186.html)
- [7] BURAGOHAJN, Manoj Kumar. *Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*.
- [8] ZENKERT, Dan. *THE HANDBOOK OF SANDWICH CONSTRUCTION*. 1997.
- [9] *Matrice* [online]. [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: [https://drive.google.com/file/d/1xKu2cZA3gkL3PC\\_DglXrOVUoFScaVFtL/view](https://drive.google.com/file/d/1xKu2cZA3gkL3PC_DglXrOVUoFScaVFtL/view)
- [10] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [11] *Kovokeramické kompozity v lehkých kovových konstrukcích* [online]. [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/metal-matrix-composites/>

- [12] *What Are Ceramic Matrix Composites?* [online]. [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: <https://lffurnace.com/blog/what-are-ceramic-matrix-composites/>
- [13] *What Are Prepregs?* [online]. [cit. 2022-06-15]. Dostupné z: [https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning\\_Center](https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center)
- [14] *Vlákna pro kompozity* [online]. [cit. 2022-06-11]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/13IaXaUZ1GDDetCdz1KaufjHLRdTLNomu/view>
- [15] LEGENDRE, André. *Uhlíkové materiály: od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Praha: Informatorium, 2001. ISBN 80-860-7382-3.
- [16] *Technologie výroby kompozitů* [online]. [cit. 2022-06-16]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%C3%BDroby%20kompozit%C5%AF.pdf>
- [17] *Technologie výroby* [online]. [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/>
- [18] AUSPERGER, Aleš. *TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ* [online]. [cit. 2022-06-20]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/18.html>
- [19] MATĚNA, Štěpán, Milan TŮMA a Jiří BRAUNER. *Výroba a rozvod elektrické energie*. 2., upr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978. Řada elektrotechnické literatury.
- [20] *Uhelné elektrárny skupiny ČEZ* [online]. [cit. 2022-06-22]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez\\_group\\_and\\_coal\\_power\\_plants.pdf](https://www.cez.cz/edee/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez_group_and_coal_power_plants.pdf)
- [21] POŠTA, Josef. *Provozní schopnost strojů: [učební texty]*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2002. ISBN 80-213-0966-0.
- [22] RŮŽIČKA, Milan. *Dynamická pevnost a životnost*. Praha: České vysoké učení technické, 1987.
- [23] PETRÁSEK, Miloslav. *Základy letu - vrtulník (082 00)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. Učební texty pro teoretickou přípravu



dopravních pilotů vrtulníků dle předpisu JAR-FCL 2. ISBN 978-80-7204-588-4.

- [24] *Modely vrtulníků* [online]. [cit. 2022-07-15]. Dostupné z: <https://www.pelikandaniel.com/?sec=page&id=5>
- [25] BROŽ, Vladimír. *Modely RC vrtulníků*. Brno: Computer Press, 2004. Modelářství. ISBN 80-251-0189-4.
- [26] Tron. In: *Tronhelicopters* [online]. [cit. 2022-07-13]. Dostupné z: <https://tronhelicopters.com/>
- [27] *Helicopter flying handbook*. Federal Aviation Administration, 2012. ISBN FAA-H-8083-21A.
- [28] *SEM analýza SEM-EDS analýza* [online]. [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.labaratuar.com/cs/testler/malzeme/sem-analizi-sem-eds-analizi/>
- [29] *9 Interesting Facts to Know About Aircraft Composite Materials* [online]. [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: <https://www.keyshone.com/9-interesting-facts-know-aircraft-composite-materials/>
- [30] *MTP-5-Kompozity* [online]. [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: <http://mech.fd.cvut.cz/members/valach/mtp-1/MTP-5-kompozity.pdf>
- [31] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. [cit. 2022-06-23]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [32] *Únava vláknů vyztužených kompozitů s polymerní maticí* [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: [http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace\\_UTAM.pdf](http://www.csm-kompozity.wz.cz/Prezentace_UTAM.pdf)



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Skladba kompozitu [29] .....	3
Obrázek 2: Synergie materiálů [1] .....	4
Obrázek 3: Rozdělení kompozitů [30] .....	7
Obrázek 4: TTT diagram [9] .....	10
Obrázek 5: Polyadice pryskyřice s tvrdidlem [10].....	12
Obrázek 6: Výroba vláken ze smoly [15] .....	20
Obrázek 7: Ruční nanášení [16].....	22
Obrázek 8: Výroba lisovaných rohoží [16].....	25
Obrázek 9: Rozdělení mechanických zkoušek [31] .....	29
Obrázek 10: Vývoj poškození kompozitního materiálu [32].....	30
Obrázek 11: Pokles tažnosti v závislosti na cyklech [10].....	31
Obrázek 12: Vrtulníky třídy 700 a 550 .....	33
Obrázek 13: Rotorová hlava Tron [26] .....	36
Obrázek 14: Změna úhlu náběhu listu v důsledku krutu [27].....	40
Obrázek 15: Řez listem Rapid .....	40
Obrázek 16: Trhací stroj Tempos.....	42
Obrázek 17: Zobrazení ohybové zkoušky.....	43
Obrázek 18: LabTest 5.50ST .....	43
Obrázek 19: TESCAN MIRA3 .....	44
Obrázek 20: Quorum Q150R ES .....	45

Obrázek 21: List Rapid 700 .....	47
Obrázek 22: List Zeal 700.....	48
Obrázek 23: List Rail 716 .....	48
Obrázek 24: List SAB S700.....	49
Obrázek 25: Prostředí Ultimaker Cura.....	50
Obrázek 26: Poškozený kořen listu.....	52
Obrázek 27: Lom šroubu a deformace unašeče .....	52
Obrázek 28: Vzorek připravený pro SEM analýzu .....	54
Obrázek 29: List 1A průběh tahové zkoušky .....	55
Obrázek 30: List 2A průběh tahové zkoušky .....	56
Obrázek 31: List 3A průběh tahové zkoušky .....	57
Obrázek 32: List 4A průběh tahové zkoušky .....	58
Obrázek 33: List 5A průběh tahové zkoušky .....	58
Obrázek 34: List 6A průběh tahové zkoušky .....	59
Obrázek 35: List 7A průběh tahové zkoušky .....	60
Obrázek 36: List 8A průběh tahové zkoušky .....	61
Obrázek 37: List 9A po tahové zkoušce .....	61
Obrázek 38: List 10A průběh tahové zkoušky .....	62
Obrázek 39: Porovnání maximálních tahových sil vzorků .....	63
Obrázek 40: Porovnání prodloužení vzorků při maximálním tahovém napětí .....	63
Obrázek 41: List 1B průběh ohybové zkoušky .....	64

Obrázek 42:List 2B průběh ohybové zkoušky .....	65
Obrázek 43:List 3B průběh ohybové zkoušky .....	65
Obrázek 44: List 5B průběh ohybové zkoušky .....	66
Obrázek 45: List 6B průběh ohybové zkoušky .....	67
Obrázek 46: List 7B průběh ohybové zkoušky .....	67
Obrázek 47: List 8B průběh ohybové zkoušky .....	68
Obrázek 48: List 9B průběh ohybové zkoušky .....	69
Obrázek 49: Graf maximální ohybové síly dle vzorků .....	70
Obrázek 50: Graf protažení vzorků při působení maximální ohybové síly .....	70
Obrázek 51: Struktura vzorku 7 .....	71
Obrázek 52: Skladba vláken vzorku 8 .....	72
Obrázek 53: Lomová plocha vzorku 10 .....	73
Obrázek 54: Jádro vzorku 10 .....	74

## Seznam tabulek

Tabulka 1: ER-P a jejich využití [10] .....	13
Tabulka 2: Mechanické vlastnosti reaktoplastů [3] .....	14
Tabulka 3: Mechanické vlastnosti termoplastů [3].....	15
Tabulka 4: Porovnání termoplasických a reaktoplastických matric [10].....	15
Tabulka 5: Vliv dynamického namáhání výztuží na pevnosti [10] .....	21
Tabulka 6: Materiály dle výrobní technologie [3] .....	27
Tabulka 7: Výhřevnosti materiálů [19] [20] [10].....	28
Tabulka 8: Rozdělení modelů vrtulníků do tříd.....	34
Tabulka 9: Rozměry listů Rapid 700 .....	47
Tabulka 10: Rozměry listů Zeal.....	48
Tabulka 11: Rozměry listů Rail .....	48
Tabulka 12: Rozměry listů SAB .....	49
Tabulka 13: Počet zkušebních předmětů .....	49
Tabulka 14: Ceny rotorových listů dle výrobců.....	49
Tabulka 15: Parametry nastavené při pozlacování .....	53

## **Seznam příloh**

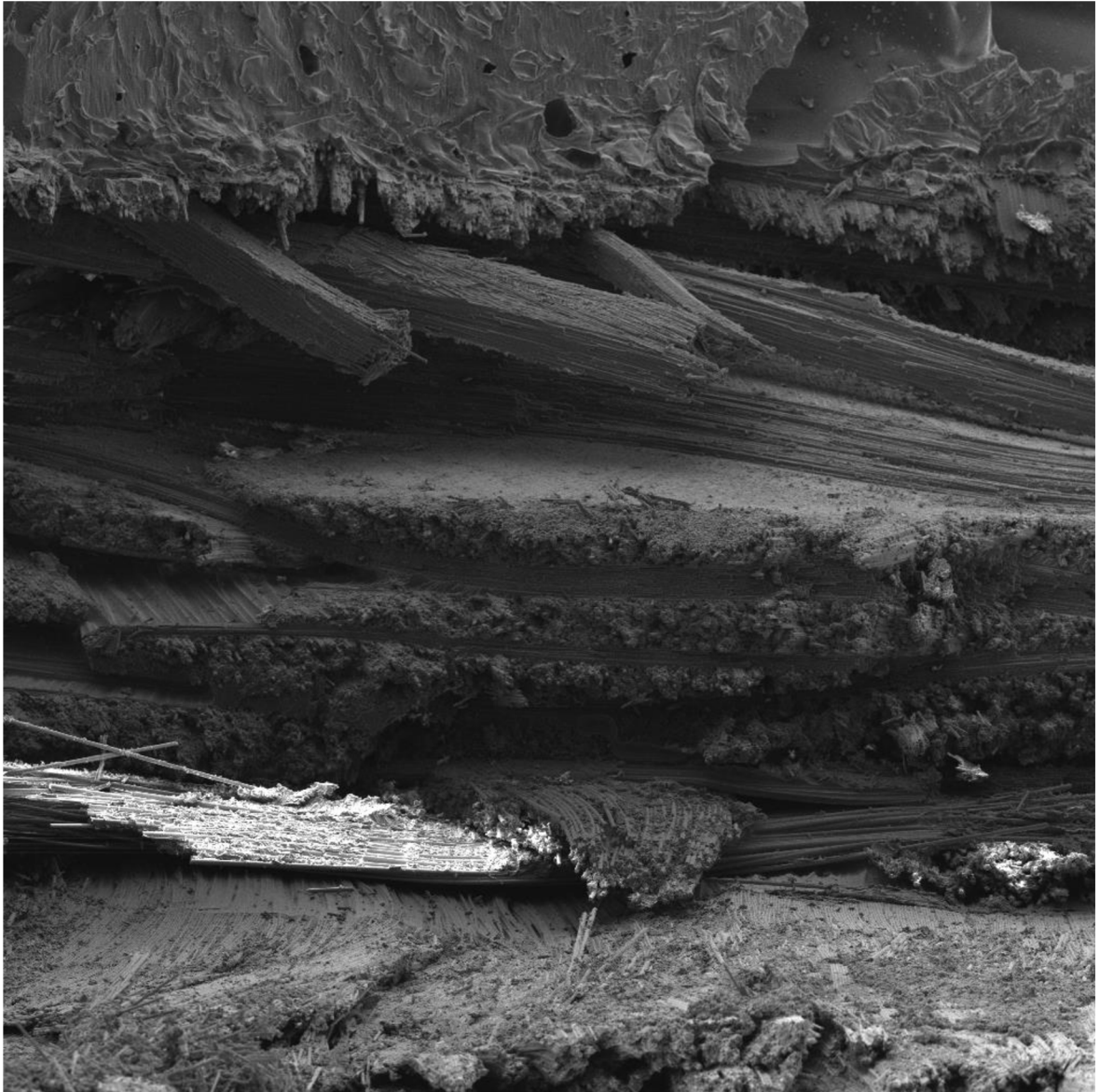
Příloha PI Snímky ze SEM analýzy

## Příloha PI:

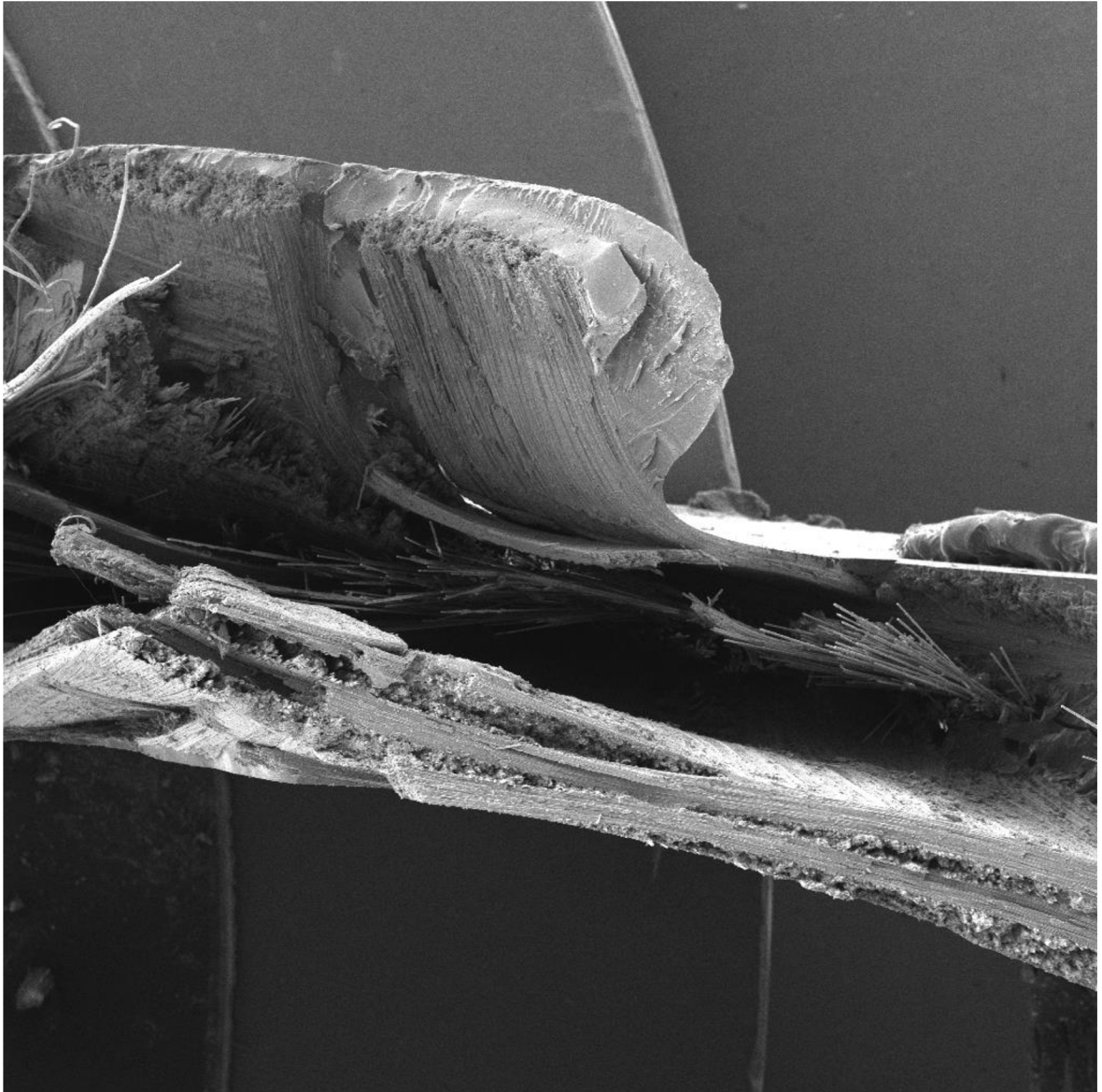
Na následujících obrázcích jsou snímky lomových ploch vzorků zajištěné pomocí SEM analýzy. Mezi důležité sledované parametry patří SEM HV značící napětí, SEM MAG je přiblížení, WD je pracovní vzdálenost a číslo vzorku je před podtržítkem, za ním je pořadové číslo fotografie daného vzorku.



SEM HV: 10.0 kV	WD: 30.05 mm	MIRA3 TESCAN
SEM MAG: 150 x	Det: SE	500 $\mu\text{m}$
View field: 1.85 mm	10_2	Faculty of Engineering , CZU Prague
View field: 554 $\mu\text{m}$	10_6	Faculty of Engineering , CZU Prague

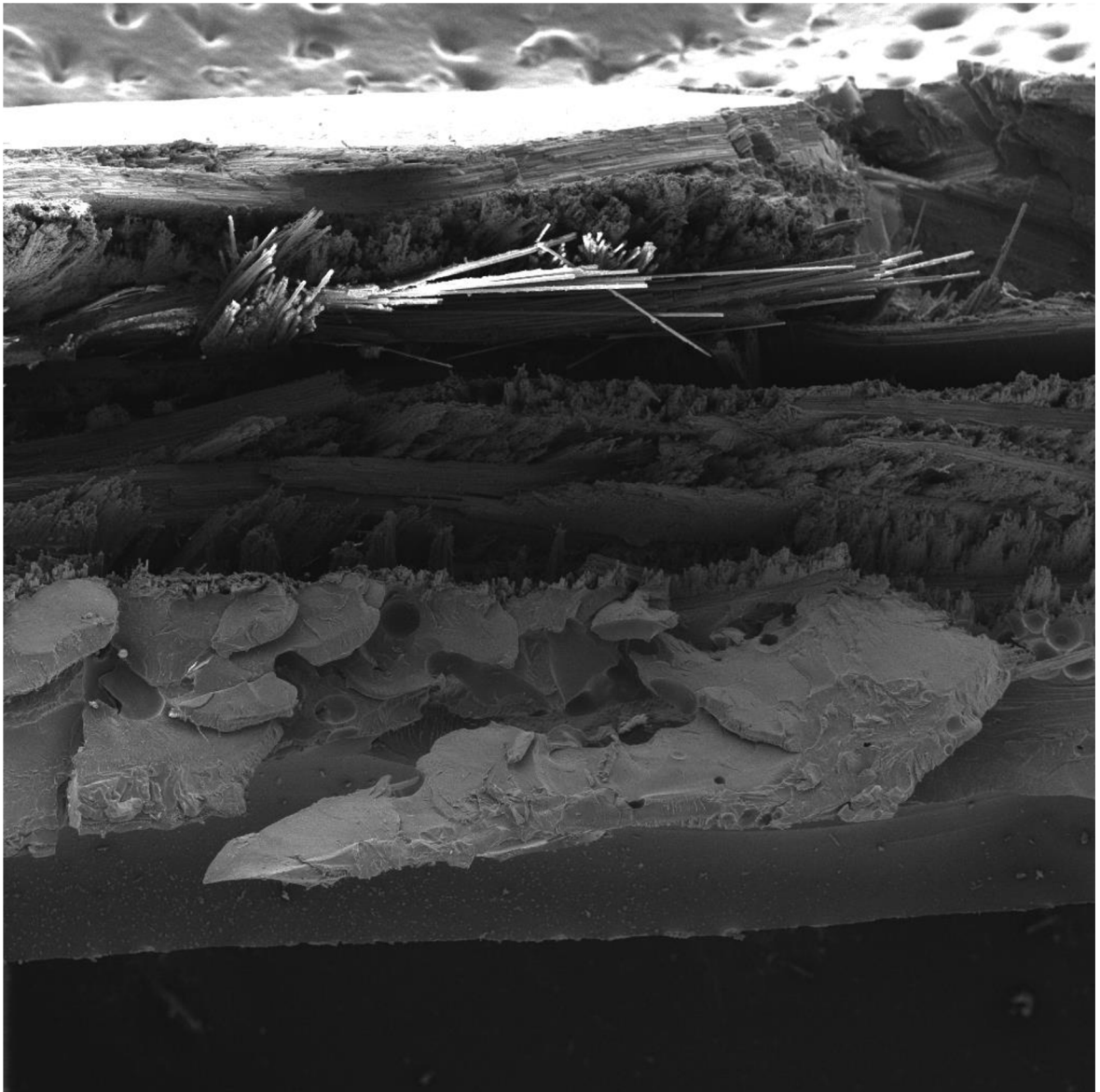


SEM HV: 10.0 kV	WD: 55.74 mm		MIRA3 TESCAN
SEM MAG: 100 x	Det: SE	500 $\mu$ m	
View field: 2.77 mm	8_8	Faculty of Engineering , CZU Prague	

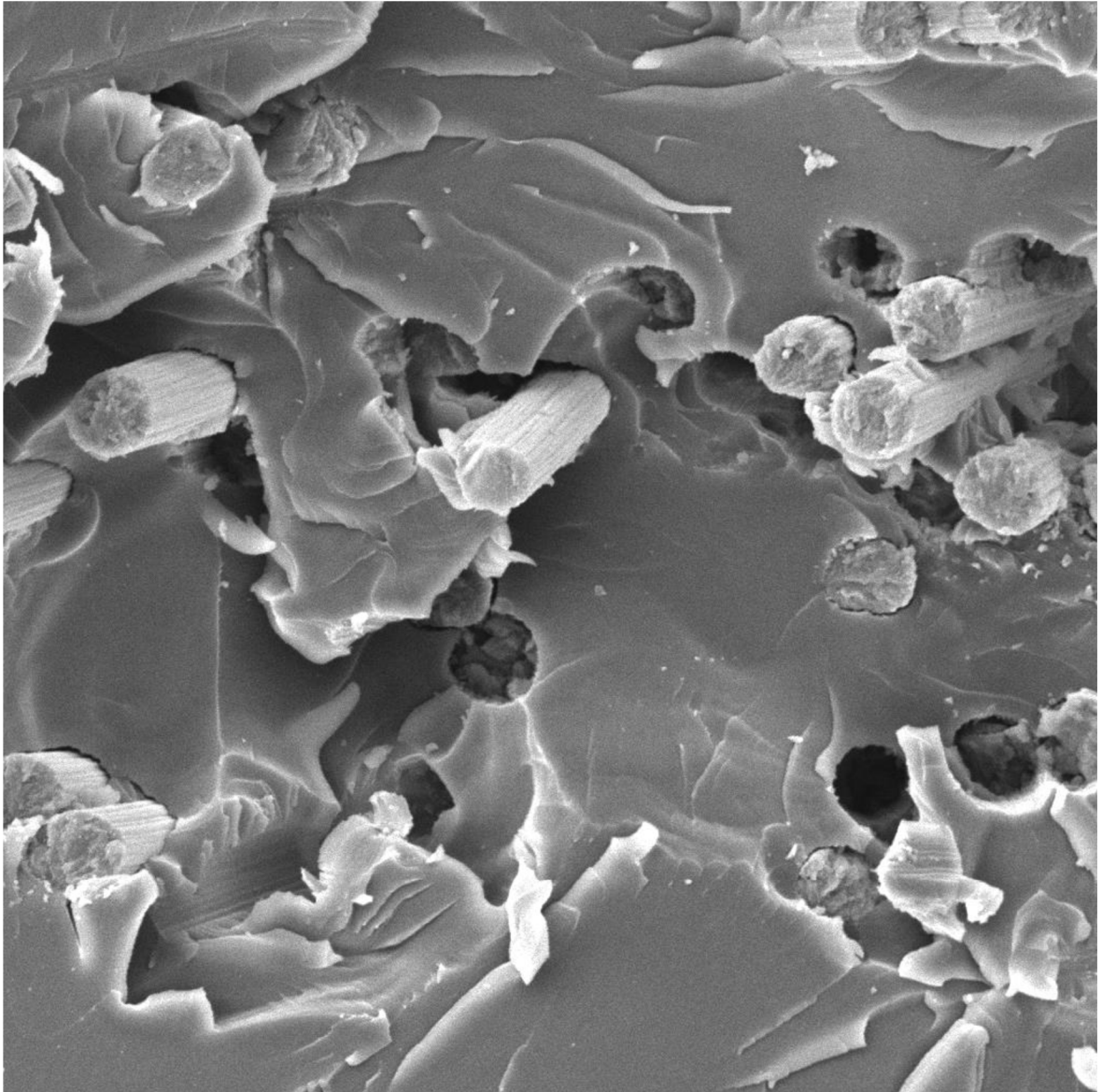


SEM HV: 10.0 kV	WD: 55.74 mm		MIRA3 TESCAN
SEM MAG: 50 x	Det: SE	1 mm	
View field: 5.54 mm	7_3	Faculty of Engineering , CZU Prague	

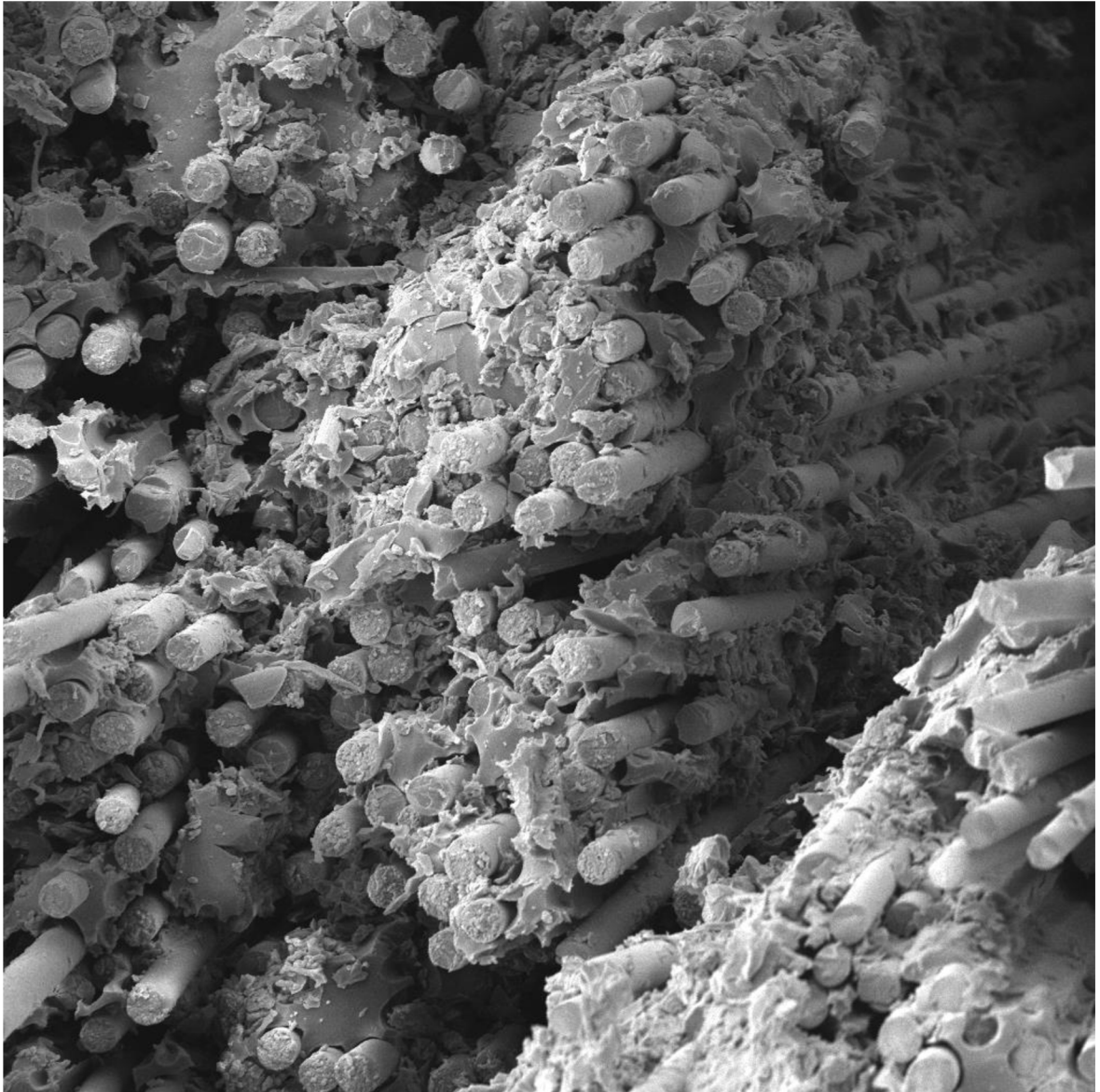




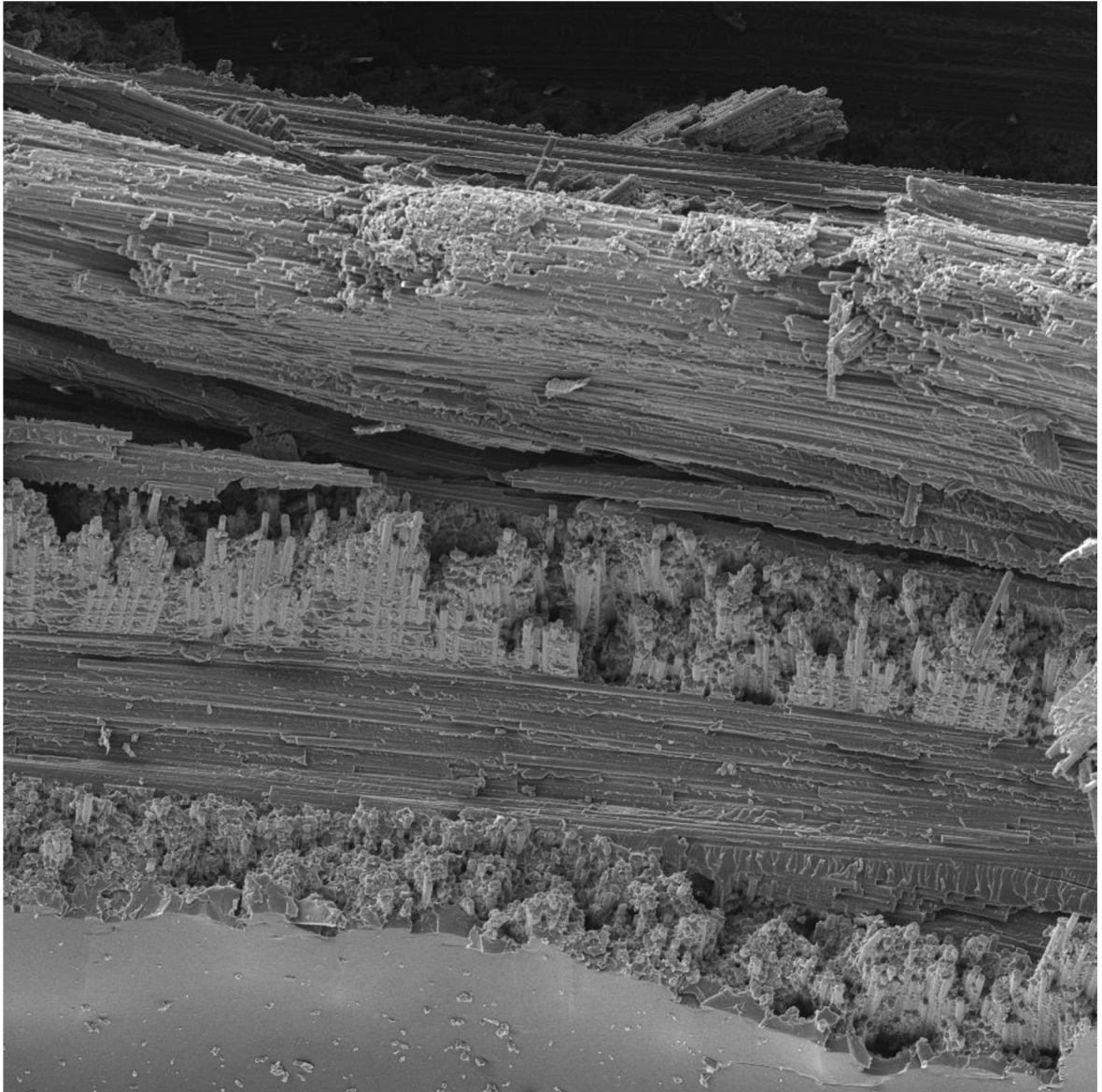
SEM HV: 10.0 kV	WD: 45.06 mm	MIRA3 TESCAN
SEM MAG: 75 x	Det: SE	1 mm
View field: 3.67 mm	8_3	Faculty of Engineering , CZU Prague





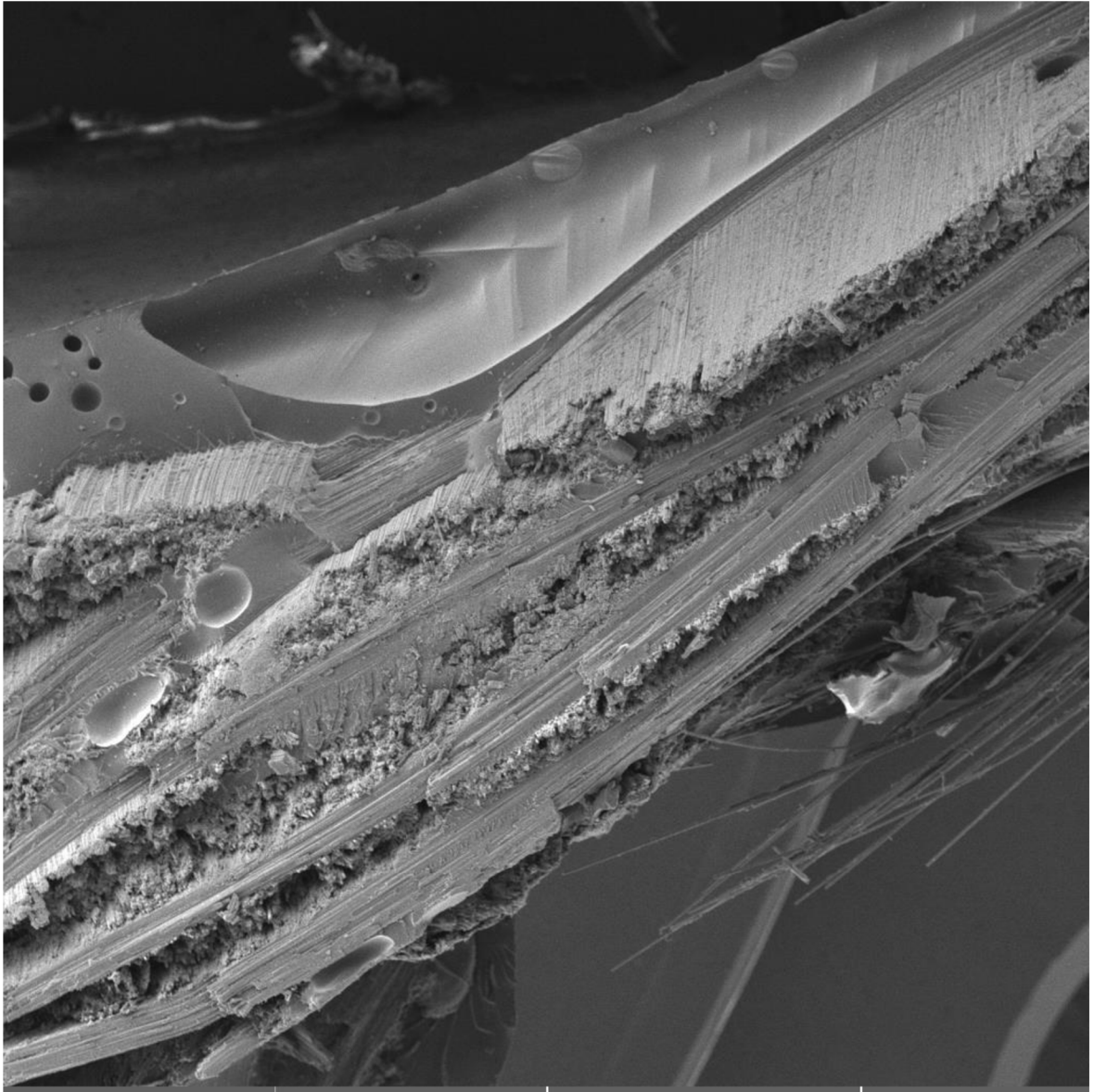
SEM HV: 10.0 kV	WD: 57.55 mm	MIRA3 TESCAN
SEM MAG: 3.00 kx	Det: SE	20 $\mu$ m
View field: 92.4 $\mu$ m	9_4	Faculty of Engineering , CZU Prague



SEM HV: 10.0 kV	WD: 29.50 mm	MIRA3 TESCAN
SEM MAG: 750 x	Det: SE	100 $\mu$ m
View field: 369 $\mu$ m	10_5	Faculty of Engineering , CZU Prague




SEM HV: 10.0 kV	WD: 49.32 mm		MIRA3 TESCAN
SEM MAG: 250 x	Det: SE	200 $\mu$ m	
View field: 1.11 mm	8_4	Faculty of Engineering , CZU Prague	



SEM HV: 10.0 kV	WD: 50.39 mm	MIRA3 TESCAN
SEM MAG: 80 x	Det: SE	1 mm
View field: 3.46 mm	8_6	Faculty of Engineering , CZU Prague





SEM HV: 10.0 kV	WD: 55.74 mm		MIRA3 TESCAN
SEM MAG: 50 x	Det: SE	1 mm	
View field: 5.54 mm	8_9	Faculty of Engineering , CZU Prague	