



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta textilní



# **VLIV ANORGANICKÉ VÝZTUŽE NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITU**

Ing. Martina Novotná

DISERTAČNÍ PRÁCE

**Název disertační práce:** Vliv anorganické výztuže na mechanické vlastnosti kompozitu

**Autor:** Ing. Martina Novotná

**Obor doktorského studia:** Textilní technika a Materiálové inženýrství

**Forma studia:** Prezenční

**Školící pracoviště:** Katedra materiálového inženýrství

**Školitel:** Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.

**Školitel specialista:** Ing. Michal Petrů, Ph.D.

**Složení komise pro obhajobu disertační práce**

**Předseda:**

**Místopředseda:**

**Členové:**

S disertační prací je možno seznámit se na děkanátu Fakulty textilní Technické univerzity v Liberci.

Liberec 2017



## **Anotace**

Disertační práce se zabývá výrobou kompozitu do automobilového průmyslu – kompozitního rámu, který bude vyroben pomocí ovíjení vláken. Zaměřena je především na nalezení vhodné výztuže a struktury kompozitu z hlediska vzájemné kompatibility a mechanických vlastností výsledných kompozitních částí. V práci je také zahrnuta i ekonomická stránka problému a v závěru je použito materiálových a numerických modelů, které popisují problém složeného zatížení v tahu.

### **Klíčová slova:**

Uhlíkové vlákno, skleněné vlákno, čedičové vlákno, roving, mechanické vlastnosti.

## **Annotation**

The thesis deals with the production of composites in the automotive industry - composite frame, which will be made using winding fibers. It is mainly focused on finding appropriate support and composite structure in terms of mutual compatibility and mechanical properties of the resulting composite parts. The paper also includes the economic aspect of the problem, and in the end several materials and numerical models are used to describe the problem of compound load in the stroke.

### **Keywords:**

Carbon fiber, glass fiber, basalt fiber, roving, mechanical properties.

## **Anmerkung**

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Herstellung von Verbundwerkstoffen in der Automobilindustrie - Verbundrahmen, der mit Wickelfasern hergestellt wird. Es ist vor allem darauf ausgerichtet, eine angemessene Unterstützung und Struktur in Bezug auf die gegenseitige Kompatibilität und die mechanischen Eigenschaften der resultierenden zusammengesetzten Teile zu finden. Das Papier enthält auch den wirtschaftlichen Aspekt des Problems, und am Ende werden mehrere Materialien und numerische Modelle verwendet, um das Problem der zusammengesetzten Belastung im Schlaganfall zu beschreiben.

### **Schlüsselwörter:**

Kohlefaser, Glasfaser, Basaltfaser, Roving, mechanische Eigenschaften.

# Obsah

Seznam symbolů a zkratk.....	9
1 ÚVOD .....	10
1.1 PŘEDMĚT A CÍLE DISERAČNÍ PRÁCE.....	11
1.2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU.....	13
1.2.1 Vývoj použití kompozitu v automobilovém průmyslu .....	14
1.2.2 Využití kompozitů.....	15
1.2.3 Příklady využití kompozitů v sériově vyráběných automobilech .....	16
2 KOMPOZITY .....	18
2.1 SYNERGICKÝ EFEKT.....	19
2.2.1 Vliv vazeb na vlastnosti rozhraní.....	22
2.2.2 Adheze na rozhraní mezi materiály.....	22
2.2.3 Materiálové mechanické charakteristiky kompozitních materiálů.....	24
2.3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ S TEXTILNÍ VÝZTUŽÍ.....	26
2.3.1 Ruční kladení .....	27
2.3.2 Vysokotlaké vstřikování - RTM (“Resin Transfer Molding”) .....	27
2.4 VLÁKNA PRO KOMPOZITY .....	29
2.4.1 Typy produktů z vláken .....	30
2.4.2 Skleněná vlákna .....	30
2.4.2.1 Výroba skleněných vláken .....	31
2.4.2.2 Vlastnosti skleněných vláken.....	31
2.4.2.3 Úprava povrchu skleněných vláken .....	31
2.4.3 Uhlíková vlákna .....	33
2.4.3.1 Výroba uhlíkových vláken .....	34
2.4.3.2 Úprava povrchu uhlíkových vláken .....	35
2.4.3.3 Vlastnosti uhlíkových vláken.....	37
2.4.4 Čedičová vlákna.....	39
2.4.4.1 Výroba čedičových vláken.....	40
2.4.4.2 Vlastnosti čedičových vláken.....	40
2.4.4.3 Využití čedičových vláken.....	41
2.4.5 Srovnání použitých vyztužujících vláken .....	41

2.5	MATRICE.....	42
2.5.1	Matrice polymerního kompozitu.....	42
2.6	TESTOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITŮ.....	44
2.6.1	Zkouška tahem .....	44
2.6.2	Statická ohybová zkouška .....	45
2.6.3	Charpy test .....	46
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	48
3.1	TESTOVÁNÍ ROVINGŮ – VLÁKNA.....	48
3.1.1	Popis použitého materiálu.....	48
3.1.2	Popis použitého měření.....	49
3.1.2.1	Cyklické opotřebení rovingů.....	49
3.1.3	Hodnocení opotřebení .....	50
3.1.4	Závěr ze zkoušení rovingů .....	52
3.2	TESTOVÁNÍ ROVINNÝCH KOMPOZITŮ.....	53
3.2.1	Popis použitého materiálu - Výroba kompozitů.....	53
3.2.2	Popis použitého měření.....	55
3.2.2.1	Tahová zkouška – rovinné kompozity .....	55
3.2.2.2	Ohybová zkouška .....	55
3.2.2.3	Charpy test .....	55
3.2.3	Výsledky měření rovinných kompozitů .....	55
3.2.3.1	Výsledky tahové zkoušky .....	55
3.2.3.2	Výsledky statické ohybové zkoušky .....	59
3.2.3.3	Výsledky Charpyho testu .....	62
3.2.4	Závěr z testování rovinných kompozitů .....	63
3.3	VÝROBA A ZKOUŠENÍ KOMPOZITNÍCH TRUBEK.....	65
3.3.1	Popis použitého materiálu na výrobu kompozitních trubek.....	65
3.3.2	Popis měření.....	67
3.3.2.1	Charpy test vyrobených trubek .....	67
3.3.2.2	Objemový podíl vláken .....	67
3.3.2.3	Zpracovatelnost uhlíkového materiálu .....	68
3.3.2.4	Kompatibilita matrice vůči vláknům.....	68
3.3.2.5	Míra prosycení vláken.....	69
3.3.3	Vyhodnocení získaných dat .....	70
3.3.3.1	Vyhodnocení Charpy testu segmentů trubek .....	70

3.3.3.2 Výsledky objemového podílu vláken.....	71
3.3.3.3 Výsledky zpracovatelnosti uhlíkového materiálu .....	72
3.3.3.4 Vyhodnocení kompatibility matrice vůči vláknům.....	72
3.3.3.5 Vyhodnocení míry prosycení vlákenné vrstvy.....	82
3.3.3.6 Mechanické vlastnosti trubek.....	83
4 MODELOVÁNÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK KOMPOZITNÍCH TRUBEK .	91
5 ZÁVĚR .....	97
Literatura.....	102

## Seznam symbolů a zkratek

A	tažnost [%]
ACP	Advanced Composite Processor
$a_{CU}$	rázová houževnatost
b	šířka vzorku [mm]
BMC	Bulk Moulding Compounds
CAD	Computer aided design
CF	carbon fibers
CVI	Controlled Vacuum Infusion
DOF	degreese of freedom
DMC	Dough Moulding Compounds
E	modul [MPa]
EDS	elektronový skenovací detektor
$E_c$	energie [J]
F	síla [N]
FASTRAC	Fast Remotely Actuated Resin Channeling
GF	glass fibers
$\sigma$	napětí [MPa]
h	tloušťka vzorku [mm]
K	počet elementárních vláken v rovingu (v tisících)
L	rozpětí podpěr [mm]
OA	aparatura na opotřebení
PAN	polyakrylonitril
PUR/PU	polyuretan
REM	rastrovací elektronový mikroskop
RI	Resin Infusion
RTM	Resin Transfer Molding
S	plocha [m]
SHM	s extrémě vysokým modulem pružnosti
SMC	Sheet Moulding Compouds
SCRIMP	Seemann Composite Resin Infusion Molding Process
VARTM	Vacuum Assisted RTM
VW	Volkswagen



VIP	Vacuum Infusion Process
VARIM	Vacuum Assisted Resin Infusion Molding
VFI	Vacuum Foil Infusion
$\nu$	Poissonův poměr
X	průhyb [mm]
3PB	three point bending
Y	Povrchové napětí [mN/m]

# 1 ÚVOD

Vývoj, inovace a optimalizace jsou základní úkoly ke zvyšování efektivity. Každým rokem rostou celosvětově požadavky na snižování energetické náročnosti použitých částí automobilů a materiálů při zachování požadované funkce zařízení nejen v automobilovém průmyslu. Roste však i poptávka kvalitativní s ohledem na výkon vůči spotřebě, ekologických požadavků a samozřejmě také bezpečnosti. V rámci těchto kritérií je potřeba stále vyvíjet a inovovat materiály a obecně technologie pro budoucí stroje a zařízení.

Z materiálového hlediska se jedná o vývoj konstrukčních materiálů, které budou zejména lehčí, odolnější, ekologické, atd. Všechny výše zmíněné aspekty jsou spojeny ekonomickou stránkou věci, která se celkově projevuje na chodu společnosti a určuje další směry výrobců. Docílení výhodnějších vlastností je možné při využití klasických materiálů typu oceli a hliníku, ale mnohem snáze a efektivněji za použití kompozitu. Vlastnosti kompozitního materiálu jsou jednak dány konstrukčními požadavky, pro které má být daný materiál použit, ale hlavně technologickými možnostmi výroby.

## 1.1 PŘEDMĚT A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Tématem disertační práce je: „Vliv anorganické výztuže na mechanické vlastnosti kompozitu“.

Cílem disertační práce bylo otestovat a zvolit vhodnou výztuž, která bude navíjena na PUR jádro, z kterého bude následně vyroben kompozit a nalézt vhodnou strukturu výsledného kompozitu, který nahradí jakýkoliv stávající materiál různého tvaru, ale bude mít vysokou tuhost a hlavně bude mít nízkou hmotnost. Takové díly vyráběné z kompozitního materiálu např. v sériovém automobilovém průmyslu chybí. Hotový výrobek by měl být použit zejména při výrobě elektromobilů, které musí být co nejlehčí.

První část práce se zabývá přehledem současného stavu výzkumu kompozitních struktur, historií a vývojem použití kompozitu v průmyslu. Dále pak zahrnuje poznatky o kompozitech a jejich složkách (matrice a výztuže), jaké jsou jejich vlastnosti a postupy výroby kompozitů, které byly v této práci použity. Důležitou částí je pak problematika mezifázového rozhraní v kompozitech. V závěru této části byly vysvětleny metody testování kompozitů,

Druhá část se zabývá testováním samotné výztuže, dále pak testováním rovinného kompozitu s různými druhy výztuže a testováním cílového kompozitu. Důležité bylo najít optimální materiál, otestovat vlastnosti rovingové výztuže, která bude namáhána navíjením. Vyrobí rovinné kompozity a zjistit optimální strukturu výztuže. Dále vyrobí části kompozitů, jejichž výsledky testování napomohou při výrobě celých kompozitních dílů. Zároveň také zajistit mechanické vlastnosti a kompatibilitu mezi vlákny a matricí, aby nedocházelo k poškozování vazby mezi výztuží a matricí.

Výzkumy uváděné v této práci zahrnovaly mezioborové propojení, které přispělo ke zlepšení spolupráce mezi akademickou a průmyslovou sférou.

Dílčí cíle disertační práce je možné rozdělit do následujících okruhů:

- vytvoření metodiky vhodného testování uhlíkových, skleněných a čedičových rovingů,
- nalezení vhodného rovingu pro navíjení,
- výroba a testování vybraných kompozitních materiálů,
- nalezení vhodné struktury kompozity,
- modelování mechanických vlastností kompozitů.

## 1. 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

Normy Evropské unie o snižování emisí a cena ropy jsou faktory, které tlačí na snižování spotřeby paliva. S tím souvisí snižování hmotnosti automobilů a ostatních dopravních prostředků, materiály na jejich výrobu je nutné zlehčovat a nahrazovat, mechanické vlastnosti a bezpečnost je ale nutné zachovat. [1, 2]

Např. MIGLIARESI [3] ve své práci uvedl, že kompozitní materiály mají díky svému složení velkou pevnost, která je ovlivněna způsobem kladení výztuže. Dále počtem vrstev, úhlem orientace vláken vůči ose kompozitu, způsobem provázání mezi jednotlivými vrstvami a druhem matrice, jak je také uvedeno v práci CHUL-JIN [4], že úhly vinutí vláken mají významný vliv na selhání kompozitních struktur.

Jednou z pozitivních vlastností kompozitů je také vynikající utlumení nárazů. Vlákný vyztužený polymerní kompozit patří do skupiny nejprogressivněji se rozvíjejících konstrukčních materiálů. Vstupní materiály (vlákna, rovingy, tkaniny, pleteniny a ostatní polotovary) lze programově vrstvit a skládat a výsledné vlastnosti optimalizovat. Např. PIEKARCZYK [5], který se zabýval pevností v tlaku u betonových válců, které byly obalené kompozitem s uhlíkovými vlákny. Zjistil, že pevnost v tlaku se zvýší pouze použitím vysocepevnostních uhlíkových vláken v obvodovém směru.

Optimalizace vlastnosti však předpokládá znalost vlastností jednotlivých komponent a jejich vzájemného působení. Výsledné vlastnosti kompozitního materiálu lze predikovat na základě známých modelů, ale pro uplatnění v praxi je podstatné potvrdit teoretické poznatky praktickými testy.

Výzkumem a studii kompozitních struktur vyztužených dlouhými vlákny se zabývala celá řada autorů. Autoři se shodují, že mechanické vlastnosti těchto kompozitů nelze uceleně analyticky ani experimentálně popsat. Jejich vlastnosti se výrazně liší s daným typem vlákna a matrice, neboť jen nepatrnou změnou vznikají různé kombinace s řádově rozdílnými vlastnostmi v mechanickém chování.

S využitím kompozitů na bázi uhlíkových, skleněných, aramidových a ostatních vláken se setkáváme velmi často; v široké míře jsou využívány v leteckém průmyslu, při výrobě dopravních prostředků a v průmyslových aplikacích. [1, 2]

Nevýhodou uhlíkových kompozitů je jejich vysoká cena, jednak díky vysokým výrobním nákladům samotných vláken, jednak kvůli specifikům při výrobě jednotlivých polotovarů. V současné době již není problém vyrobit z různých materiálů vybranou technologií konstrukčně velmi složitý kompozitní díl, důležitým faktorem je výsledná cena kompozitu. Proto je nutné s novými a neustále se rozvíjejícími metodami výroby kompozitních dílů brát ohled nejen na kvalitu výrobku, na mechanické nebo fyzikální vlastnosti, ale v neposlední řadě i na výrobní náklady na výrobu jednoho kusu produktu. Aby měl nový kompozitní díl či technologie výroby úspěch v tak již nabitém a technologicky vyspělém strojírenském průmyslu, je bezpodmínečně nutné skloubit dobré vlastnosti s nízkou výrobní cenou. Ve většině aplikací lze výrazně uspořit náklady použitím levnějšího materiálu. V tom případě je nezbytné zvážit, zda vlastnosti levnějšího materiálu jsou stále vyhovující pro daný účel použití. [47, 48]

Výroba kompozitů obecně nepředstavuje problém, týká-li se menších výrobních objemů. Naopak pokusí-li se společnost využít kvalitního kompozitu při velkovýrobě několika modelů vozidel současně, musí se řadě problémů vyvarovat. Především se jedná o materiál vyztužený uhlíkovým vláknem, který umožňuje splnit požadavky kladené na konstrukční díly a je také z obdobných materiálů v současnosti nejvíce používán. Rozhodující je způsob výroby, který výrobce zvolí. Avšak je potřeba rozlišovat používání takového materiálu pro exteriér a interiér. V exteriéru, tedy karoserii, jsou od materiálu požadovány určité mechanické vlastnosti, kterých lze dosáhnout cílenou výrobou tkaniny. Naopak v interiéru mechanické vlastnosti nejsou často až tak podstatné, protože kompozit zde slouží k odlehčení nebo jako designérský prvek, takže výroba takového prvku nemusí být tedy tak důkladná a není potřeba využívat složitých vyztužovacích vrstev. To znamená, že výrobce musí investovat do různých způsobů výroby nebo si kompozity nechat vyrábět externí firmou. To s sebou nese řadu inovací a především rozšíření výrobních linek. [1, 2, 49, 50, 57]

### 1.2.1 Vývoj použití kompozitu v automobilovém průmyslu

Ačkoli historicky první kompozit byl vyvinut již v roce 1908, v automobilech byl kompozitní materiál poprvé aplikován v roce 1941 Henry Fordem (obr. 2.1), materiál byl vytvořen převážně z oleje, který tvořil základ fenolové pryskyřice vyztužené konopným vláknem. Tehdejší zdroje uvádějí, že tento materiál byl až 10x odolnější proti průrazu než ocel o stejné tloušťce použitá na původních karosériích. [27]



Obr.1.2.1 – První auto z kompozitu [27].

Ve 30. letech byla objevena skleněná vlákna, která spolu s polyesterovou pryskyřicí dala možnost vzniku materiálu, jenž byl a stále je využíván, a sice je to tzv. sklolaminát. Ačkoli sklolaminát je materiál dnes velmi hojně využíván, tak v minulém století byla jeho kvalita zpočátku nedostatečná. Na konci 50. a začátkem 60. let byl sklolaminát využíván převážně v nízko nákladových společnostech ke konstrukci karosérií vozidel. Toto období znamenalo velký rozmach sklolaminátu, ale kvůli nákladné výrobě a nedostatečné technologii úpravy jej prozatím nebylo možné využívat ve velkovýrobě. [28]

Rok 1979 znamenal zlom v automobilových kompozitech, když v závodním sektoru Formule 1 v závodní týmu Brahbham bylo poprvé využito uhlíkové vlákno. Byl použit klasický hliníkový rám, ale nově vyztužený uhlíkovým vláknem. Na základě této koncepce bylo možné využít hliníkové profily o menší tloušťce a následně je vyztužit pro dosažení požadované tuhosti. To se pozitivně odrazilo v hmotnosti rámu oproti předchozí verzi. V roce 1975 probíhaly experimenty na konstrukci předního a zadního přítláčného křídla, které ale do provozu závodní tým Brahbham uvedl až o několik let později. V roce 1981 byl představen legendární a zároveň přelomový formulový vůz McLaren, kde bylo využito uhlíkového vlákna na výrobu rámu, kde byly efektivně zkombinovány jak uhlíkové, tak nově kevlarová vlákna. Ve výsledku došlo k velkému nárůstu pevnosti při současném snížení hmotnosti, což znamenalo začátek nové éry využití uhlíkových vláken u konstrukce nejen závodních vozidel. [26]

V průběhu 80. let byl zaznamenán pokrok i v oblasti sériově vyráběných vozidel, zejména americká značka Pontiac jako první uskutečnila velkovýrobu. Karoserie byla vytvořena z celkem 4 variant vyztuženého polymeru. Jednotlivé varianty se odlišovaly hlavně různým typem výroby, což mělo za následek, jednak pokrok v designovém tvarování komponent vozidla, ale hlavně schopnost přizpůsobit výrobu té dané součásti pro konkrétní typ zatížení při zachování nízkých výrobních nákladů. [29]

V roce 1992 vznikl osobní supersportovní automobil McLaren F1. Tento vysoce nadčasový vůz byl prvním sériovým silničním automobilem, jehož nosná karoserie byla tvořena monokokem z laminátu vyztuženém uhlíkovými vlákny. Další díly z hliníku a hořčíku byly při výrobě přímo zapracovány do monokoku pro dosažení vysoké výsledné pevnosti. Další výrobci s postupem času navázali na koncept McLarenu s tím, že podstata využití zůstala podobná, nicméně byl inovován způsob výroby laminátového monokoku kvůli navýšení produkce, ale naopak snížení výrobních nákladů. V současné době nalézají uhlíkové kompozity své místo jak v supersportovních, tak už i v běžně dostupných sériově vyráběných vozech, jako je tomu v případě firmy BMW, kde například u vozu i3 dosáhli toho, že automobil díky kompozitu je 6x pevnější a o 30 % lehčí, než kdyby byl vyráběn z klasického hliníku. [26, 57]

### **1.2.2 Využití kompozitů**

Výrobci se snaží využívat kompozitních materiálů v co nejhojnějším množství a jejich velkoplošné využití je limitováno zejména poměrem kupní a prodejní ceny. Výhody jejich využití přesto značně převyšují jejich nevýhody. Jedná se tedy zejména o nízkou hmotnost při zachování výborných mechanických vlastností, dále navýšení bezpečnosti a v neposlední řadě také nižší technickou náročnost při tvarování složitých konstrukčních celků.

Snížení hmotnosti při zachování stejných nebo dokonce lepších pevnostních parametrů je největší důvod využití kompozitu. Při vyšší hmotnosti vozidla je tedy nutné používat silnější motor. Příklad efektivního využití kompozitu je možno vidět např. u sportovního modelu značky BMW M3, kde namísto původní 1,8 mm tlusté

ocelové střechy byla použita CFRP střecha o tloušťce pouhých 1,2 mm. Toto řešení mělo za následek zmenšení hmotnosti vozu o celých 6 kg. [26, 57]

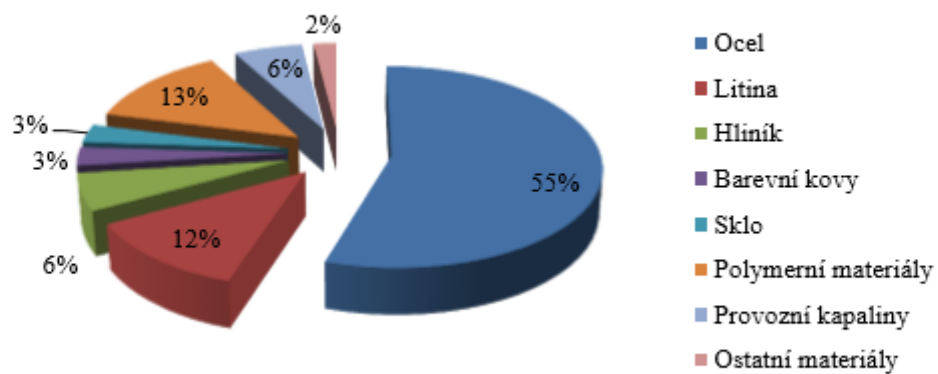
### **1.2.3 Příklady využití kompozitů v sériově vyráběných automobilech**

Sériová vozidla představují širokospektré využití kompozitních materiálů. Tyto materiály našly své uplatnění mimo osobní vozidla i v autobusech nebo nákladních vozidlech. Značnou převahu zde mají polymerní matrice, kovové jen výjimečně.

Konstrukční prvky založené na kompozitu tvořeného kovovou maticí nejsou v automobilovém průmyslu příliš využívány. Je to dáno především jejich vyšší výrobní cenou, která se nepříliš projeví v získaných vlastnostech. Jejich využití tak spočívá spíše ve sportovně zaměřených vozidlech, kde jsou využívány z důvodu jejich lepší tepelné vodivosti např. u brzdových kotoučů či v motorovém prostoru. [44]

V osobních vozidlech jsou kompozity nejčastěji zastoupeny ve formě různých typů sklolaminátů odlišující se konkrétní maticí a výrobním postupem. Sklolaminát je využíván např. pro stavbu sklápěcí střechy a výklopné zadní části vozu Renault Wind nebo spodní části dělených 3. dveří u vozidla Smart. VW Amarok jej využívá jako kryt zadního nákladového prostoru. Společnost Dodge v roce 2010 dokázala výrobou sportovního kupé modelu, že kompozity zdaleka nejsou určeny jen pro levnější a obyčejné vozy a použila je pro výrobu střechy, kapoty, předních i zadních blatníků a víčka nádrže. Další možností využití skleněných vláken je ve využití u pojistkových a spínacích skříní nebo předních a zadních reflektorů, např. Peugeot 206. [28]

Uhlíkovým vláknem vyztužené kompozity jsou zatím výhradně používány pro sportovní vozidla, kde spíše představují zkrášlující doplněk místo konvenčních materiálů. Výjimkou je Audi RS4 Avant, který využilo uhlíkového kompozitu jak v interiéru, tak v kombinaci s keramikou i na aplikaci brzdových kotoučů. U Porsche Cayenne Turbo S, byl uhlíkový kompozit použit na kompletní karosérii, ale také v interiéru [27]. Specialitou v oblasti polymerních kompozitů u sériových vozidel bylo v roce 1955 v Německu použití tzv. duroplastu, což byl kompozit tvořený pryskyřicí a bavlněným odpadem. Tento lehký a snadno vyrobitelný materiál byl využíván pro stavbu karoserie legendárního Trabantu. Mezi největší výhody patřila jeho plná odolnost vůči korozi a dobré výsledky při nárazových testech, při nichž Trabant dopadl lépe než některá vozidla z 90. let tvořené konvenčními materiály. Výroba duroplastu byla ale spolu s Trabantem v roce 1991 ukončena a od té doby již tento kompozit nenalezl další uplatnění. Obrázek 2.2 zobrazuje zastoupení konstrukčních materiálů. [12]



Obr. 1.2.2 – Zastoupení konstrukčních materiálů v sériové výrobě [12].

Podle současných prognóz automobilních společností by mělo použití kompozitů na sériových vozidlech exponenciálně narůstat každý rok. Nemaý podíl na tom také má použití výkonných simulačních systémů, které s těmito materiály počítají a je tak možné provádět pevnostní výpočty již s konkrétním typem kompozitu, což je podstatné. Jakmile velkosériová výroba překoná nevýhody kompozitů, představující překážky v masové rozšíření, zejména snížení nákladů na jejich výrobu a nalezení, popř. rozšíření vhodného způsobu recyklace, naleznou tyto materiály nezastupitelné místo v automobilech všech tříd a cenových kategorií. [26]



## 2 KOMPOZITY

Kompozitní materiál je typ materiálu, ve kterém jsou specifickým způsobem kombinovány dvě nebo více komponent, u nichž se výrazně liší mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Výsledné vlastnosti kompozitu jsou dány kombinací vlastností všech obsažených složek a jejich objemových podílů. U kompozitních materiálů jsou podstatné dvě složky, tzv. komponenty. Jsou jimi matrice a výztuž. Matrice neboli nosič má především za úkol obklopovat a vzájemně spojovat výztuž, přenášet zatížení mezi jednotlivými vlákny, formovat a fixovat plnivo a vytvářet tvar výsledného profilu. Úlohou výztuže je pak přenos hlavního zatížení na matici. Kombinací matrice a výztuže tvořících soustavu heterogenních složek vzniká výsledný homogenní materiál, který vykazuje určité vlastnosti v daném směru zatížení, což ale neplatí pro zatížení ve směru jiném (anizotropie vlastností). Velkou výhodou je ovlivnění těchto vlastností pro daný směr cílenou výrobou materiálu. Pro nejjednodušší představu kompozitu je možné uvést klasičtější silnici, kde matici tvoří asfalt a výztuhu šterkový podklad. [11,49]

S pokročilými výrobními postupy a technologiemi nacházejí dnes kompozity uplatnění v mnoha výrobních, ale i provozních oblastech. Ve strojírenství nacházejí nejširší uplatnění v dopravě, ať už letecké, námořní nebo silniční, dále pak v kosmonautice a také jsou hojně využívány pro vojenské aplikace. Největší podíl na trhu stále tvoří kompozity založené na vyztužování polymerů, především polyesterových nebo vinylesterových pryskyřic. [11, 50]

Podle současného chápání pojmu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splněny následující podmínky:

- podíl výztuže musí být větší než 5 %;
- vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice;
- kompozit musí být připraven smícháním složek. [2]

## 2.1 SYNERGICKÝ EFEKT

Synergie (spolu-pracovat) znamená společné působení. Označuje situace, kdy výsledný účinek současně působících složek je větší než souhrn účinků jednotlivých složek. Při navrhování samotného kompozitu je hledáno nejvhodnější uspořádání složek tak, aby synergický efekt byl co nejvyšší [59].

Vlastnosti kompozitních materiálů jsou dány jejich výrobou a především použitým typem matrice a výztuže. Každý průmyslový podnik si připravuje kompozit tzv. „na míru“ a je si vědom všech jeho pozitivních i negativních vlastností. Přesto existuje několik obecných výhod i nevýhod při jejich využití. [11, 47]

Výhody kompozitních materiálů:

- vysoká pevnost a tuhost,
- nízká hmotnost,
- odolnost vůči korozi,
- dobré vlastnosti při statickém i dynamickém zatěžování,
- dobré tlumicí vlastnosti,
- možnost vyrábět designově složité díly.

Nevýhody kompozitních materiálů:

- specifické, mnohdy složité způsoby výroby a zpracování,
- horší mechanické vlastnosti ve směru kolmo k orientaci uložení vláken (týká se vláken vyztužených kompozitů),
- vysoké náklady při dimenzování náročných konstrukcí,
- špatná opravitelnost (pokud se kompozit poškodí, už nikdy nebude mít takové vlastnosti jako před porušením),
- lokální poškození, např. po nárazu, se obtížně identifikuje a opravuje ve srovnání s konvenčními materiály.

V automobilovém průmyslu jsou nejčastěji používány kompozity s polymerní nebo kovovou maticí vyztužené vláknem. Polymerní matrice se konkrétně dále dělí na matrice z termosetu nebo matrice termoplastickou. Jako výztuž jsou používána skleněná, aramidová a uhlíková vlákna. V dalších krocích bude věnována pozornost pouze těmto komponentám, protože ostatní kombinace nejsou podstatné pro pochopení dané problematiky v oblasti použití kompozitních materiálů v automobilní technice.

Tab. 2.1 – Polymery vyztužené vlákny – porovnání vlastností [58].

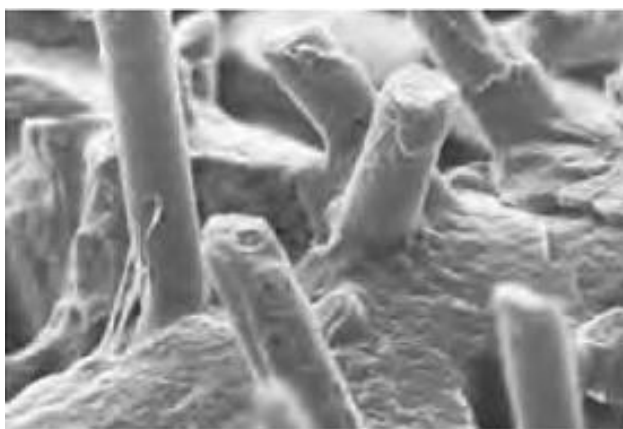
<b>Materiál</b>	<b>Pevnost v tahu [MPa]</b>	<b>Elastický Modul [GPa]</b>	<b>Protažení při přetrhu [%]</b>
Ocel běžná konstrukční	363-1080	200	max 0,14
Skleněná vlákna	480-1,600	35-51	1.2-3.1
Čedičová vlákna	1,035-1,650	45-59	1.6-3.0
Aramidová vlákna	1,720-2,540	41-125	1.9-4.4
Uhlíková vlákna	1,720-3,690	120-580	0.5-1.9

## 2.2 ROZHRAŇÍ MEZI VLÁKNY A MATRICÍ

Vláknny vyztužené kompozity mají široké využití v mnoha průmyslových oblastech (automobilová, námořní a letecká doprava, stavebnictví, elektrotechnický a spotřební průmysl). Jejich užité vlastnosti závisí na materiálových vlastnostech vyztužujících vláken, polymerní matrice, ale také na tenkých hraničních vrstvách (mezivrstvách) na rozhraní mezi vyztužujícím vláknem a polymerní matricí. Vlákna jsou účelově povrchově upravována nanášením tenkých vrstev (sizing) s cílem zlepšit smáčivost jejich povrchu a adhezi vláken k matrici, a tím zajistit zvýšení užité vlastností kompozitu (pevnost, houževnatost). Komerční povrchové úpravy vláken mají svá omezení, a proto vzrůstá potřeba najít nové přístupy a technologie pro přípravu funkčních mezivrstev s vhodnými vlastnostmi. [37]

Kompozit je materiál, ve kterém jsou specifickým způsobem kombinovány dvě nebo více komponent s výrazně se lišícími fyzikálními vlastnostmi. Úkolem matrice je jednak udržovat ji v požadovaném směru vůči namáhání a dále umožnit přenos vnějších napětí do výztuže. Nositelem pevnosti a tuhosti jsou u dlouhovláknových (poměr délky vlákna k jeho průměru  $> 100$ ) polymerních kompozitů vyztužující vlákna a matrice k nim výrazněji nepřispívá. Tedy vyztužující vlákna mající o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s matricí se při vnějším namáhání deformují méně než polymer. Vlastnosti tenkých hraničních vrstev na rozhraní vlákno-polymer určují velikost přenosu napětí z nepevné matrice do vláken a odolnost celé kompozitní struktury vůči působení okolního prostředí. Tenké hraniční vrstve říkáme mezivrstva a společně s modifikovanou částí polymerní matrice tvoří kompozitní mezifázi. [48,49]

V případě dokonalé adheze mezi polymerem a vláknem nesou dlouhá vlákna veškerá napětí na kompozitním materiálu, takže nepevná, ale deformovatelná matrice je prakticky bez napětí. S nárůstem objemového podílu vláken v kompozitu a poklesem průměru vláken vzrůstá význam mezivrstev (mezifáze). Při obvyklém objemovém podílu vláken 30 – 60 % a průměru vláken 8 – 16 mm je vliv mezifáze na mechanické vlastnosti kompozitu dominantní. Špatná adheze vede ke ztrátě vyztužujícího efektu vláken a tedy ke snadnému poškození kompozitního materiálu. [37]



Obr.2.2.1 – Fázové rozhraní vlákno-matrice [66].

### 2.2.1 Vliv vazeb na vlastnosti rozhraní

Povaha vazeb mezi matricí a vlákny je dána uspořádáním atomů, chemickými vlastnostmi vláken, konformací a chemickým složením polymerní matrice. Pevnost vazeb je dána zejména adhezí. Mezi pět hlavních mechanismů adheze patří:

- Adsorpce a smáčení (hromadění určité látky na fázovém rozhraní účinkem mezipovrchových přitažlivých sil),
- Vzájemná difuze (autoadhese),
- Elektrostatická přitažlivost,
- Chemická vazba (chemické skupiny na povrchu vláken + chemická skupina matrice),
- Mechanická adheze (dva povrchy do sebe čistě mechanicky zapadají).

Mechanismy vytváří vazbu mezi vlákny a matricí, působí buď izolovaně nebo společně. Mezi další proměnné ovlivňující vlastnosti kompozitů patří vlastnosti složek (mechanické, tepelné, elektrické), geometrický tvar a rozložení složek, včetně pórů a interakce složek. Složky kompozitu volíme podle toho, jakou funkci mají splňovat [59].

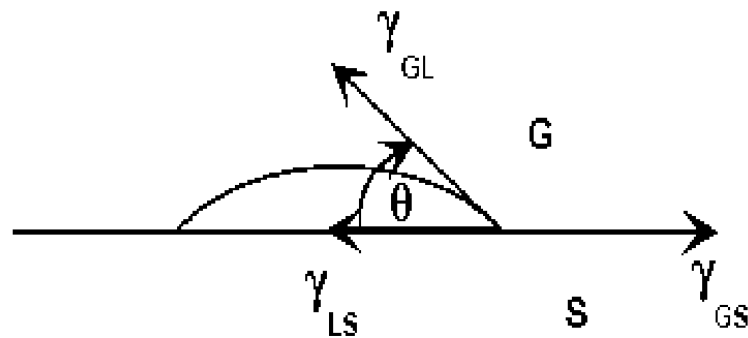
### 2.2.2 Adheze na rozhraní mezi materiály

Adheze při každém rozhraní musí být řešena individuálně, ale zásady pro její posuzování jsou obecnějšího charakteru. Prvním předpokladem dobré adheze je těsný kontakt povrchů dvou materiálů, který je zobrazen např. na obrázku 2.2.1 a s ním související smáčivost povrchů charakterizovaná povrchovou energií. Povrchové energie vláken a polymerních (kapalných) matric jsou obecně známé. V systémech, kde povrchová energie vláken je mnohem větší než povrchová energie matrice, je velmi pravděpodobné dobré smáčení vláken polymerem. Např. skleněná a uhlíková vlákna by mohla být dobře smáčená polyesterovými či epoxidovými pryskyřicemi. To však neplatí o polyetylenových vláknech. Dalším faktorem, který ovlivní kvalitu adheze, je druh vazby mezi dvěma styčnými plochami. [43, 47]

Při těsném kontaktu povrchů dvou materiálů se může uplatnit slabá vazba prostřednictvím van der Waalsových sil. V případě jisté drsnosti povrchů je adhezní vazba zprostředkována navíc také mechanicky. Tento typ vazby se projeví především při namáhání ve smyku. Uvedené typy vazby patří mezi slabé interakce a u kompozitů nejsou dominantní. Významnější typ adhezní vazby vzniká na rozhraní dvou polymerních materiálů, kdy může dojít k vzájemné difúzi (interdifúze) volných konců molekulárních řetězců a vytvoření spletenců. Tohoto typu je využíváno u kompozitů s termoplastickou matricí, kde vyztužující vlákna jsou povrchově upravena pomocí vazebných činidel. Obecně k vzájemné difúzi může dojít i u nepolymerních materiálů. Nejpevnějším typem adhezní vazby je chemická vazba (kovalentní, iontová). Když dojde k chemické reakci na rozhraní mezi dvěma materiály, dojde k provázání obou materiálů prostřednictvím chemické vazby. Tohoto typu vazby je využito u skleněných vláken vyztužených polymerních kompozitů, kde matricí je termosetová pryskyřice [37].

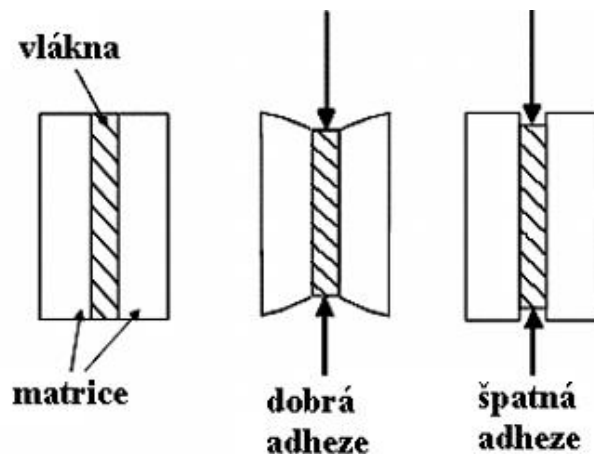
Hlavní roli hraje vzájemná smáčivost. Na obrázku 2.2.2 je schéma smáčení v kompozitu. Symbol S představuje povrchovou disperzi, L je kapalná matrice a G je okolí plynné prostředí. Povrch je smáčen pro  $\gamma_{GS} > \gamma_{LS}$ , pak při růstu rozhraní LS na úkor GS klesá povrchová energie. Silová rovnováha je popsána vztahem (2.1).

$$\gamma_{GS} = \gamma_{LS} + \gamma_{GL} \cdot \cos \theta \quad (2.1)$$

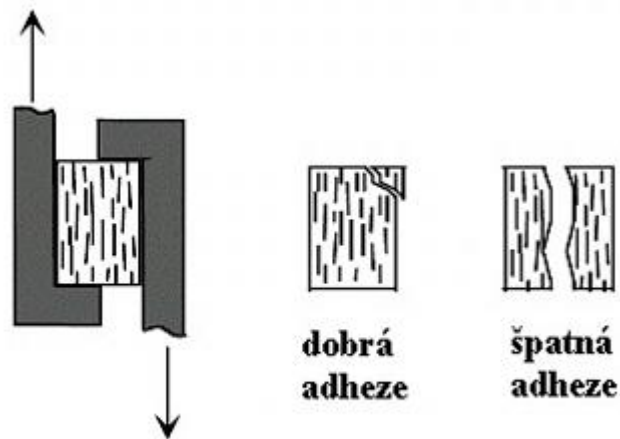


Obr.2.2.2 - Schéma smáčení v kompozitu [20].

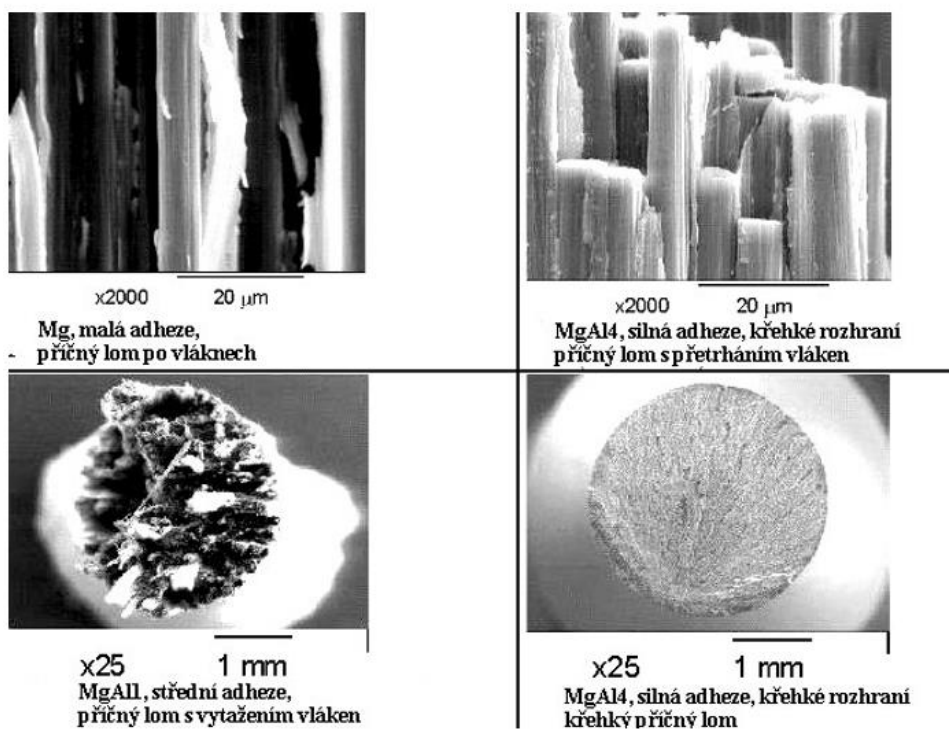
Pro posuzování adheze na kompozitu se používají dva typy. První je zobrazen na obrázku 2.2.3 kde se porovnávají konce vláken při tahovém zatížení kompozitu. Druhý způsob je zobrazen na obrázku 2.2.4 kde se sleduje porušení při přestřižení kompozitu. Dále se adheze posuzuje dle snímků z mikroskopu, hlavně tedy v lomu. Na obrázku 2.2.5 je zobrazen rozdíl mezi dobrou a špatnou adhezí.[20]



Obr. 2.2.3 - Posuzování adheze při tahovém zatížení [20].



Obr. 2.2.4 - Posuzování adheze při přestřižení [20].



Obr. 2.2.5 - Posuzování adheze v lomu [20].

### 2.2.3 Materiálové mechanické charakteristiky kompozitních materiálů

Materiálové charakteristiky kompozitních materiálů závisí na materiálových charakteristikách komponent, podílu složek (vlákněná výztuže a matrice), geometrickém uspořádání výztuže v matrici a kvalitě mezisložkového rozhraní. V praxi jsou tyto charakteristiky značně ovlivněny úrovní technologického výrobního procesu a to zejména pevnostní materiálové charakteristiky. Hmotnostní a objemové množství vláken a matrice ve vzorku z kompozitní struktury lze definovat podle následujících vztahů (2.2 - 2.6).

$$m_c = m_f + m_m, \quad (2.2)$$

$$M_f = \frac{m_f}{m_c}, M_m = \frac{m_m}{m_c}, \quad (2.3)$$

$$M_f = 1 - M_m, \quad (2.4)$$

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}, V_m = \frac{v_m}{v_c}, \quad (2.5)$$

$$V_f = 1 - V_m, \quad (2.6)$$

Kde  $m_c$  je celková hmotnost kompozitní struktury,  $m_f$  a  $m_m$  je hmotnost vláken a matrice,  $M_f$  a  $M_m$  je hmotnostní množství vláken a matrice,  $V_f$  a  $V_m$  je objemové množství vláken a matrice,  $V_c$  je celkový objem kompozitní struktury,  $v_f$  a  $v_m$  objem vláken a matrice. Objemové množství vláken  $V_f$  a matrice  $V_m$  lze také vyjádřit pomocí měrné hmotnosti vláken  $\rho_f$  a měrné hmotnosti matrice  $\rho_m$ , neboť platí vztah (2.7). Celková měrná hmotnost  $\rho_c = m_c/v_c$  lze následně vyjádřit jako součet složek výztuže a matrice (2.8).

$$V_f = \frac{M_f / \rho_f}{M_f / \rho_f + M_m / \rho_m}, M_f = \frac{V_f \rho_f}{V_f \rho_f + V_m \rho_m}, \quad (2.7)$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m. \quad (2.8)$$

Gay a Hoa [6] uvádí, že při navíjení vláken na tvarované geometrie se může docílit objemového podílu vláken v kompozitu v rozmezí maximálně 55 % - 80 % z celkového objemu kompozitní struktury. Dále ale studie uvádí, že by kompozit neměl mít více než 60% objemového podílu vláken, protože pak ztrácí svoje vlastnosti a účel použití kompozitu.



## 2.3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ S TEXTILNÍ VÝZTUŽÍ

Jak vyplývá již z charakteru jednotlivých složek a základního rozdělení plastů, vzniká (až na výjimky) vláknový kompozit – laminát teprve při výrobě výrobku. Je třeba posuzovat technologický postup při výrobě vyztužených plastů za velmi podstatný faktor, který v zásadě určuje jak jeho konečné vlastnosti, tak i ekonomiku výroby. Volba technologie je závislá především na způsobu použití kompozitu, počtu požadovaných výrobků, velikosti a složitosti vyráběných dílců. V úvahu je nutno brát také výrobní čas, náklady a použitý materiál. Obvykle je třeba volit určitý kompromis, aby bylo možno alespoň do jisté míry vyhovět všem požadavkům nebo se těm, které jsou nejdůležitější, co nejvíce přiblížit.

Je zřejmé, že dílce v malých sériích není možno vyrábět strojními technologiemi, naopak velké série není ekonomické vyrábět ručním kladením. Některé technologie připouštějí pouze určité tvary (např. navíjení), některé postupy lze aplikovat pouze na jednoduché tvary (strojní stříkání). Některými postupy lze získat pouze jednostranně kvalitní povrch od formy. Většina mechanických vlastností závisí na obsahu a orientaci výztuže v kompozitu a i na typu použité pryskyřice. Tyto faktory jsou značně závislé na použité technologii.

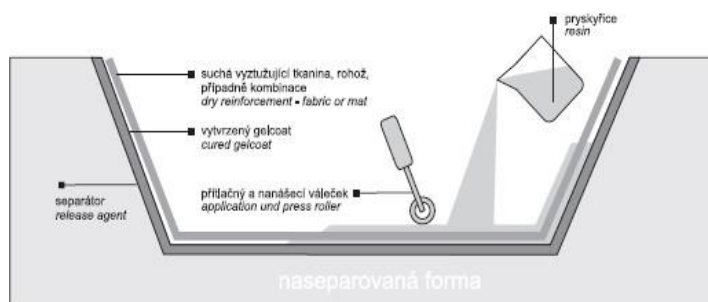
Pro náročné výrobky jsou využívány technologie zajišťující směrové uspořádání vyztužujících vláken - pultruze, dále o lisování předimpregnovaných pásů – prepregů, tlakové prosycování výztuže předtvarované technologií RTM nebo navíjením. Nejnovější technologie využívají pojiva v tenkých fóliích, z nichž prosycují předem uspořádanou výztuž za vakua. Kde je požadováno isotropní uspořádání výztuže, je využíváno injekční vstřikování termoplastických pojiv. Technologií výroby kompozitů je velké množství, proto v této práci bylo zaměřeno pouze na ty nejdůležitější. Technologie použité v této práci jsou popsány v dalších kapitolách. [2, 38, 42]

Tab. 2.3.1 – Přehled technologií a polymerů pro matrice kompozitu

Technologie	Polymerní matrice
IM, SMC, BMC, DMC, TMC SCRIMP, VIP, RTM Kontaktní laminace (ruční kladení za mokra) Navíjení za mokra, pultruze	Nenasycené polyesterové
IM, SMC, RTM, SCRIMP, VIP, Kontaktní laminace (ruční kladení za mokra) Navíjení za mokra, pultruze	Vinyl-esterové
SMC, LPMC, RTM, RIM, SRIM	Akrylamaty
Navíjení za mokra, pultruze Kontaktní laminace (ruční kladení za mokra) OOA, RTM, VIP, Prepregy (ATL) Navíjení prepregů, AFP	Epoxidy
RIM, RRIM, SRIM, pultruze, navíjení	Tvrdé polyurethanové pryskyřice
Kontaktní laminace, BMC, RTM, IM	Formaldehydové

### 2.3.1 Ruční kladení

Ručním kladením výztuže na otevřenou formu (obr. 2.3.1) lze vyrobit i velmi rozměrné výrobky. Výztuž musí být v podobě tkaniny nebo rohože, pryskyřice při teplotě výroby musí téci. Prosyčování výztuže tekutou pryskyřicí je prováděno ručně (pomocí štětce, stěrky nebo válečku). Odpařování reaktivního rozpouštědla u PU a VE pryskyřic ovzduší je možno potlačit použitím pryskyřic s vosky, vytvářejícími na povrchu stojící pryskyřice nepropustnou vrstvu (pryskyřice se sníženou emisí rozpouštědla). Při prosycování výztuže je však účinek vosku zanedbatelný. Vyrobené díly s UP pryskyřicemi se vytvrzují nejčastěji za studena, tj. při pokojové teplotě a dotvrzují za zvýšené teploty (80 °C). Ruční kladení za mokra s PU pryskyřicí lze použít pouze tehdy, neklesne-li teplota pod 15°C. Proces vytvrzování závisí na použitém vytvrzovací systému. Dobu do želatinování pryskyřice lze zmenšit použitím urychlovače. Pro mechanicky namáhané díly jsou nejvhodnější tkaniny rovingové s prameny bez zákrutů. [2, 42]

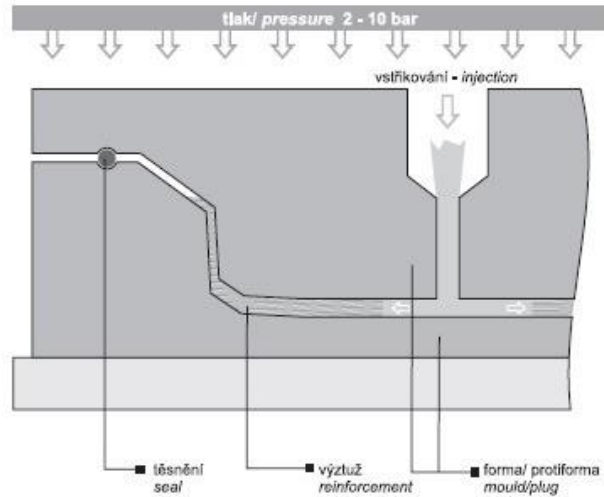


Obr. 2.3.1 – Ruční kladení [42].

### 2.3.2 Vysokotlaké vstřikování - RTM (“Resin Transfer Molding”)

Formy jsou robustní konstrukce, kovové nebo polymerbetonové, aby snesly vysoké vnitřní tlaky. Do formy, opatřené gelcoatem, se vyskládá suchá výztuž dle konstrukčního návrhu, při velkoseriové výrobě se vkládají tzv. předlisky z výztužného materiálu. Vyztužující materiál, ať už na bázi skleněných nebo jiných vláken, musí mít strukturu umožňující snadný tok pryskyřičného systému, aby se dosáhlo úplného prosycení v krátkém čase. Forma se poté uzavře vrchním dílem podobně tuhé konstrukce a zajistí rychloupínacím systémem. Do vstřikovacího otvoru se umístí injektážní pistole, kterou se přivádí pojivo ze speciálního strojního zařízení – vysokotlaké pumpy se spřaženým regulovatelným směřováním iniciátoru. Pojivo se vstřikuje tak dlouho, pokud nezačne vytékat z kontrolních otvorů na okrajích formy, což znamená, že výztuž je zcela prosycena v celém objemu dílce. Pojivový systém je volen tak, aby vytvrzovací reakce s využitím exotermu proběhla v řádu 10-20 minut. Vysokotlaké RTM (obr. 2.3.2) je díky krátkým výrobním cyklům a reprodukovatelné kvalitě vhodná technologie pro vyšší série – několik stovek až tisíců kusů. Je třeba počítat s dost vysokou investicí na vstřikovací zařízení a s náklady na středně finančně náročné formy. Náklady na protikus formy lze snížit použitím tzv. distančních voskových folií o různé tloušťce odpovídající tloušťce výrobku, odpadá tak výroba druhého modelu.

Modifikací klasické technologie RTM, získáme technologii VARTM (“Vacuum Assisted RTM”), kdy k prosycení výztuže napomáhá vakuum. Výhodou této technologie je díky nižším tlakům možnost konstruovat formy méně robustní, což umožňuje výrobu i větších dílců. [2, 42]



Obr.2.3.2 – Vysokotlaké RTM [42].

## 2.4 VLÁKNA PRO KOMPOZITY

Úlohou vyztužujících vláken v kompozitu je především zajistit mechanické vlastnosti materiálu, jako je pevnost a tuhost. Na základě těchto dvou vlastností jsou stanoveny podmínky vyztužujícího účinku, které musí být splněny [11].

- Vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice,
- vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice,
- matrice se nesmí porušit dříve než vlákno.

Neméně důležitá je také otázka elektrických vlastností, která může v případě uhlíkových vláken hrát velkou roli v omezení při jejich využití. Největší pevnost a tuhost dosahují vláknové kompozity s kontinuálními vlákny. Matrice (pojivo výztuže) může být:

- polymerní (reaktoplastická nebo termoplastická), kovová, skleněná, sklokeramická, keramická a uhlíková.

Kontinuální vlákna mohou být:

- skleněná, čedičová, uhlíková, polymerní, proteinová, borová, keramická.

Vláknové mikrokompozity obsahují vlákna o průměru 1 až 100  $\mu\text{m}$ . Některé kompozity obsahují vlákna o průměru pod 1  $\mu\text{m}$  v podobě krátkých (diskontinuálních) nanovláken a zařazují se proto mezi nanokompozity. Pevnost vláken je vždy významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Příčinou je malý příčný průřez vláken. V tenkých vlákních jsou minimalizovány rozměry vrozených vad materiálu a také nebezpečnost povrchových vad je při velmi malých příčných rozměrech menší (tenká vlákna mají oproti stejně dlouhým vláknům větších průměrů významně menší povrch). Vady existují jen v podobě submikroskopických až mikroskopických trhlinek a dutinek, které jsou přednostně orientovány (protaženy) v podélném směru vlákna. Whiskery jsou monokrystaly o velmi malých příčných rozměrech (nm) a krátké délce. Dosahují velmi vysoké pevnosti (řádově  $10^4$  MPa), protože neobsahují defekty. Tabulka 2.4.1 zobrazuje vlastnosti některých vláken vhodných pro výrobu kompozitů a porovnání s dalšími materiály. [2, 43, 53]

Tab. 2.4.1 – Přehled vláken a jejich vlastností [55].

Typ vlákna	sklo	aramid	vysocepevnostní uhlík	hliník	ocel
Modul pružnosti v podélném směru [MPa]	74 000	130 000	150 000	75 000	210 000
Modul pružnosti v příčném směru [MPa]	74 000	5 400	15 000	75 000	210 000
Modul pružnosti ve smyku [MPa]	30 000	12 000	50 000	30 000	81 000
Pevnost v tahu [MPa]	2 100	3 000	5 000	500	1 800
Hustota [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2 500	1 500	1 600	2 700	7 850
Cena [USD/kg]	30	250	185	2	1

### 2.4.1 Typy produktů z vláken

Sdružením elementárních vláken (monovláken) vznikají prameny. Ty jsou dále zpracovány na následující polotovary:

- sekané prameny,
- mletá vlákna,
- prameny bez zákrutů.
- Rovingy (kabilky) (angl. "tow") jsou sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů (méně než 40 zákrutů/m) pro výrobu profilů tažením (pultruzí), pro navíjení a pro výrobu prepregů. Jsou dodávány na válcových cívkách o větší hmotnosti (u skleněných vláken do 15 kg). Pro výrobu tkanin jsou rovingy dodávány na menších cívkách s kónickým zakončením (rovingy kolem 3K, číslo udává kolik tisícovek elementárních vláken je v rovingu). Jemnost rovingu v metrické soustavě je udávána v tex je délková hustota v metrické soustavě, jednotkou je g/km. Udává kolik gramů má 1000 m vlákenného produktu. Často je použita větší jednotka dtex, která udává počet gramů 10000 m vlákenného produktu. Starší míra je denier, hmotnost v gramech při délce produktu 9000 m.
- Jednoduchá příze a kablovaná příze,
- rovingové tkaniny, tkané z rovingů,
- hybridní tkaniny kombinují vlákna různých druhů, například uhlíková vlákna + aramidová vlákna, uhlíková vlákna + skleněná vlákna,
- tkaniny z příze. Nejsou určeny pro výrobu kompozitních konstrukcí, ale slouží jako izolační, filtrační tkaniny a geotextilie,
- rohože - netkané textilie, rouna,
- prepregy- Jsou to různě široké role nebo kotouče. [2]

Běžně užívaným typem výztuže je skleněné a uhlíkové vlákno. Samostatná vlákna jsou ale parametrově nevýznamná a využívána jen výjimečně, proto je nutné z nich vytvořit svazek vláken bez zákrutu (nebo s minimálním zákrutem), tzv. roving. Roving může být v kompozitu různě orientován. Jeho hlavní využití spočívá u jednodušších konstrukcí, které jsou namáhány na tah ve směru průběhu vláken.

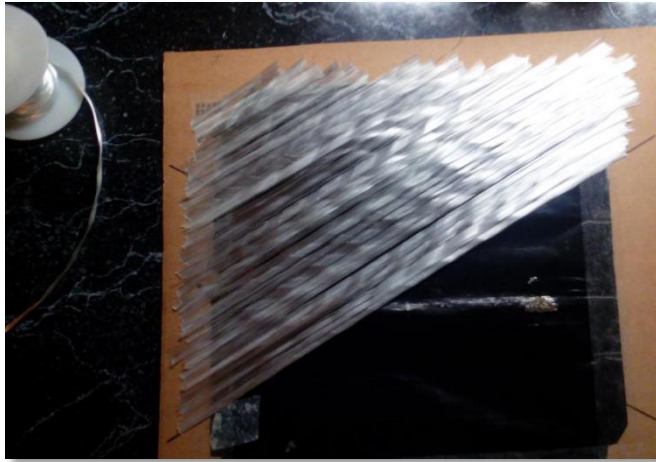
Ze strojírenského hlediska jsou často ale konstrukční profily vystaveny zatížením na tah ve směru průběhu vláken, ale zároveň také na tlak kolmo ke směru vláken. U takto zatížených konstrukcí je nutné použít rohože nebo tkaniny zhotovené z rovingu, popř. ze samostatných vláken. [43]

### 2.4.2 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna (obr. 2.4.1) jsou anorganická vlákna, která možnostmi použití zabírají širokou škálu průmyslových odvětví.

Vlastnosti vláken umožňují použití především při výrobě ochranných pracovních oděvů, dále je možné tato vlákna vidět ve sportu v podobě lodí. V oblasti technické se skleněná vlákna využívají jako tepelné a zvukové izolace a zpevňovací materiál pro

plasty a také se používají v elektrotechnice. Tato vlákna využívá ve velké míře i stavební, chemický a letecký průmysl. [2]



Obr. 2.4.1 - Skleněný roving během kladení výztuže.

#### **2.4.2.1 Výroba skleněných vláken**

Skleněná vlákna mají silikátový základ. Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidu Si (s příměsí oxidů Al, Ca, Mg a B) a většinou s malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K. Potřebného průměru vláken se dosáhne dlužením proudu skla tekoucího tryskami (průměr trysky 1 mm) ve dnu zvláknovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování vlákna. Jednotlivá vlákna se po povrchové úpravě (sizing) sdružují do pramene a navíjejí se na cívku. Sdružením pramenů vzniká roving (kabílek). [2, 43]

#### **2.4.2.2 Vlastnosti skleněných vláken**

Mezi nejvýznamnější vlastnosti skleněných vláken patří jejich pevnost, nízká tažnost, vysoká křehkost, nízká odolnost vůči oděru, odolnost vůči dlouhodobému statickému namáhání a značná tepelná odolnost (teplota měknutí se pohybuje kolem 700°C, max. teplota pro dlouhodobé použití je 450°C). Pokud je ve vlákně přítomna vlhkost, vláknu se silně snižuje pevnost. K absorpci této vlhkosti dochází především u čerstvě zvlákněných skel. Skleněná vlákna odolávají ohni a řadě chemikálií. Poškozují se pouze koncentrovanými kyselinami, např. jako kyselina sírová a fosforečná, dále také silnými zásadami za studena a slabými za tepla.

#### **2.4.2.3 Úprava povrchu skleněných vláken**

Při manipulaci s nechráněnými vlákny dochází při jejich vzájemném kontaktu k abrazi a následnému snížení pevnosti. Proto se každé jednotlivé vlákno ihned po vytažení z platinové trysky ve dnu tavicí pece, vydloužení a ochlazení na teplotu okolí pokrývá tenkým ochranným povlakem, jehož tloušťka odpovídá hmotnostnímu podílu 0,3 až 1,5 %. Jsou používány:

- Lubrikační látky (vosk, olej, škrob, želatina, polyvinylakohol), které usnadňují další textilní zpracování vláken. Lubrikační látku je nutno před výrobou kompozitu z povrchu vláken odstranit, aby bylo dosaženo potřebné soudržnosti vláken a matrice.
- Vazebné prostředky, které mají dobrou afinitu jak ke skleněným vláknům, tak k polymerní matrici.

K pozitivním účinkům ochranných prostředků patří snížení adsorbovaného podílu vody (mají určitý hydrofobizační účinek) a antistatické působení (vlákna méně přitahují prach). Běžné vazebné prostředky pro silikátová skla jsou organokovové sloučeniny a organosilany (zkráceně silany). Chemická struktura silanů je komplikovaná, stejně jako mechanismus jejich změn před spojením s polymerem a sklem. Vazebné prostředky nanášené ve vodném roztoku nevytvářejí na povrchu vláken souvislý film, ale jsou přítomny v podobě mikroskopických kapiček ulpívajících na sklu v místech s vyšším podílem reaktivních skupin (povrch skla má poněkud jiné složení než jádro). Již z tohoto důvodu nezabraňují např. silany (přes určité hydrofobní vlastnosti vnějších vrstev povlaků) působení vody na povrch vláken, spíše jenom znesnadňují difúzi molekul vody do kompozitu podél vláken. Molekuly vody, které k vláknům difundují, skrze polymerní matrici znovu hydrolyzují vazbu vazebného prostředku k povrchu skla. Ačkoliv jde v podstatě o reverzibilní proces, tj. po vysušení se kovalentní vazby opět obnoví, u mechanicky zatížených kompozitů tato hydrolyza umožňuje smykové posuvy vláken vůči matrici, zvyšování množství adsorbované vody a nakonec může dojít i k úplnému porušení rozhraní vláken a matrice. U laminátu se skleněnou výztuží se takové porušení projevuje zbělením poškozeného místa. V praxi jsou používané úpravy rozlišovány také podle tvrdosti:

- měkká úprava,
- polotvrdá úprava,
- tvrdá úprava.

Tvrdost vazebného prostředku, daná jeho chemickou strukturou, určuje vhodnost rovingu pro další technologie. Tvrdá úprava, např. methakrylsilanem nebo chromkomplexem (je používán termín „tvrdý roving“) zaručuje dobrou sekateľnost rovingu a rovnoměrný rozpad vláken při sekání, tj. vlastnosti potřebné při výrobě dílů pomocí stříkacího zařízení nebo při přípravě prepregu pro lisovací technologii (SMC). Je vhodná i při výrobě jednosměrných prepregů a rohoží. Měkká úprava (tzv. měkký roving) např. vinylsilanem nebo aminosilanem zajišťuje rychlou smáčivost vláken polyesterovou pryskyřicí a používá se u rovingů pro navíjení, tažení profilů a pro tkaniny určené k výrobě členitých dílů. U dražších skel typu S, používaných pro kompozity s epoxidovými matricemi, se užívá jiná úprava. Firma Owens-Corning opatřuje vlákna povlakem na bázi epoxidové pryskyřice. Jsou studovány povlaky na bázi polyimidu a organického křemičitého prekurzoru, v nichž hlavní složku tvoří  $\text{SiO}_2$ . Zvláštní povrchovou úpravu vyžadují skleněná vlákna do fenolformaldehydových pryskyřic. Místo silanů se používají povlaky na epoxidové bázi. Ochranný povlak

(sizing) PA845 založený na polyamidu se vyznačuje velkou tepelnou stabilitou a je nutné jej použít s pryskyřicemi, vyžadujícími vytvrzení při velkých teplotách. [2, 43]

### 2.4.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se stala důležitou součástí řady konstrukčních materiálů. Tato lesklá černá vlákna jsou tvořena převážně z atomů uhlíku spojených v dlouhých grafitových krystalech, které jsou více či méně orientovány paralelně k ose vlákna. Toto krystalové uspořádání poskytuje vláknům výjimečné vlastnosti.

Uhlíková vlákna jsou materiálem s vysokou pevností v tahu, vysokým modulem pružnosti a poměrně nízkou hustotou (1600-2200 kg/m<sup>3</sup>). Specifickými vlastnostmi jsou srovnatelné s materiálem jako je ocel, jenže jsou cca 5x lehčí, navíc jsou elektricky vodivá a odolná vůči mechanickému či chemickému poškození.

Uhlíkové vlákno (obr. 3.10) je nejvíce používané jako výztuž v kompozitních materiálech, které se používají při výrobě částí letadel, závodních vozidel (Formule 1), sportovního vybavení jako jsou závodní kola, listů větrných generátorů, a dalších součástí, které jsou hodně mechanicky namáhány. Obrázek 2.4.2 zobrazuje sektory využití uhlíkových vláken. Uhlíková vlákna nacházejí též uplatnění u ozbrojených složek (výroba neprůstřelných vest), při výrobě hudebních nástrojů, membrán apod. V tabulce 2.4.2 je přehled největší výrobců uhlíkových vláken. [38, 43, 52]



Obr. 2.4.2 – Uhlíkový roving.



Tab. 2.4.2 - Přehled největších výrobců uhlíkových vláken [56].

Název firmy [výroba v tunách]	Název vlákna	2011	2012	2013	2014	2015
Toray Group, Japan	Torayca	17 600	17 600	20 800	23 300	26 800
Toho Tenax Group, Japan	Tenax	13 500	13 900	13 900	13 900	13 900
Mitsubishi Rayoh, Japan	Pyrohl, Grafil	7 400	7 400	7 400	7 400	7 400
Zoltek Goup	Panex	13 200	13 200	17 000	21 000	26 000
SGL Group	Sigrafil	6 000	7 500	9 000	9 000	9 000

### 2.4.3.1 Výroba uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna mají dlouhou výrobní tradici sahající až do doby Edisona, který v roce 1878 vyrobil neúmyslně první uhlíkové vlákno. Převodl bavlnu a později bambusové odřezky na uhlíková vlákna použitá v elektrických žárovkách. Po roce 1910 průmysl vyrábějící lampy začal používat wolframová vlákna a tím byla produkce uhlíkových vláken ukončena. Zájem o uhlíková vlákna byl obnoven kolem roku 1950.

Uhlíková vlákna se dnes vyrábějí převážně pyrolýzou z polymerních prekurzorů (obr. 2.4.3), které jsou charakteristické dlouhými řetězci molekul spojených atomy uhlíku. Mezi tyto prekurzory patří viskózová vlákna, polyakrylonitrilová vlákna (PAN 13 vlákna) a vlákna na bázi smol z dehtu jako zbytků krakování ropy. Viskóza se dnes téměř nepoužívá, jelikož při její pyrolýze dochází k velkým ztrátám hmoty. Výtěžek uhlíkových vláken činí pouze 20–25 %. U PAN prekurzorů je výtěžek 45–50 % a největší výtěžnost mají prekurzory ze smol, která představuje 75–80 %. Příprava těchto prekurzorů spočívá v úpravě výchozího materiálu buď tavným zvlákňováním, nebo zvlákňováním z roztoku a následným tažením vlákna do požadovaného průměru. [2]

#### Uhlíková vlákna z PAN

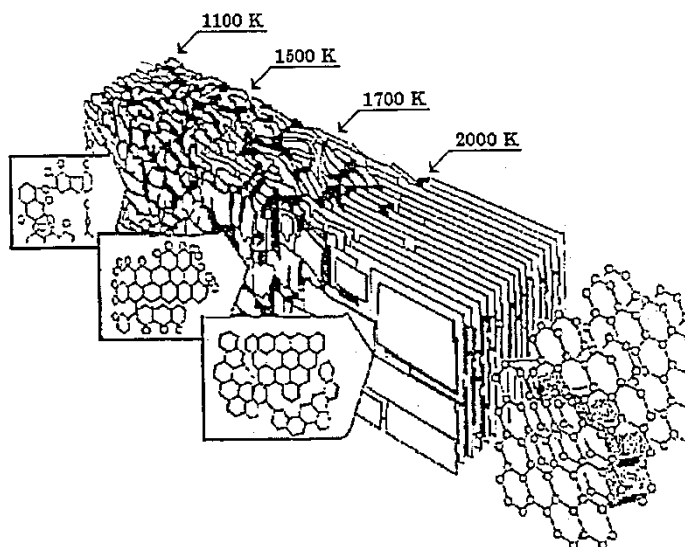
V současné době jsou nejpoužívanější surovinou pro výrobu uhlíkových vláken vlákna na bázi polyakrylonitrilových prekurzorů, z nichž se vyrábí 90 % uhlíkových vláken. Kvalitnější uhlíková vlákna dává kopolymer než-li homopolymer PAN. Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN je možno rozdělit do tří hlavních etap [37, 52]:

**Stabilizace PAN vlákn** – probíhá v oxidačním prostředí při teplotě 220 až 300°C, za současného napínání. Dojde k cyklizaci vazeb v řetězci makromolekuly PAN (vytvoření paralelních žebříčkovitých makromolekul) a k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými můstky. Vlákno zčerná a stane se netavitelným.

**Karbonizace** – se uskutečňuje v inertním prostředí při teplotách od 1000 do 1500°C. Proběhne odstranění vodíku a snížení obsahu dusíku a kyslíku. Uhlík tvoří 80 až 95 % hmoty. Vlákno dosáhne maximální pevnosti v tahu a vytvoří se hexagonální uhlíková síť.

**Grafitizace** – v inertním prostředí při teplotách od 1800 do 3000°C. Zvýší se obsah uhlíku a umožní se vznik dokonalejších mikrokrystalů, což má za následek zvětšení tuhosti vlákna. U standardních vláken z PAN je přírůstek tuhosti dosažen za cenu poklesu pevnosti, jelikož zvětšení velikosti mikrokrystalů vede též k zvětšování defektů mezi nimi. Dloužení při grafitizaci je používáno u nejtužších vláken. Dochází

ke zmenšení úhlu odklonu mikrokryсталů od osy vlákna (tzv. vysokomodulová vlákna z PAN).



Obr. 2.4.3. - Vliv teploty zpracování na změny struktury uhlíkových vláken [38].

### Uhlíková vlákna ze smol

Smoly jsou izotropní směsi získané jako vedlejší produkty při zpracování černouhelného dehtu a zpracování petroleje. Vlákna připravená z těchto smol jsou izotropní a mají nízké moduly a pevnosti. Jejich mechanické vlastnosti se nezlepší ani, když jsou karbonizovány za vysokých teplot. Jediným způsobem jak tyto vlastnosti zlepšit, je prodloužení ve velmi vysokých teplotách 2700 - 3000°C, což je velmi drahý a nepraktický proces. Vlákna z izotropní smoly jsou většinou užívána jako relativně levné plniče v plastech a zlepšují pevnost a nepoddajnost betonu.

Vhodným tepelným zpracováním černouhelných dehtů vzniká termoplastická mezofázová smola (smola s kapalnými krystaly) poskytující špičková, vysoce tuhá a přitom pevná vlákna. V mezofázových smolách jsou aromatické roviny různé molekulové hmotnosti uspořádány paralelně, tj. i v tekuté smole jsou krystaly. Při zvláknění smoly ve viskózním stavu (po zahřátí na potřebnou teplotu) se aromatické roviny orientují podél osy vlákna. Při následné oxidaci vzniká zesíťování a následuje předkarbonizace, karbonizace a grafitizace při teplotách 2500 - 2700°C. [2, 52]

#### 2.4.3.2 Úprava povrchu uhlíkových vláken

Po karbonizaci a grafitizaci jsou vlákna podrobována povrchovým úpravám, jejichž cílem je kromě ochrany povrchu (sizing) velmi jemných vláken např. vnesení aktivních skupin na povrch vláken. Tyto skupiny mohou zvyšovat polaritu povrchu a účastnit se vazebných a nevazebných interakcí s molekulami pojiv v kompozitech. Vyrobena uhlíková vlákna jsou podobně jako vlákna skleněná dodatečně upravena. Účelem je:

- odstranit z povrchu vláken látky bránící kontaktu s matricí,
- omezit další adsorpci plynů na povrch vláken,
- zvýšit reaktivitu povrchu vůči vazebným prostředkům a matricím,

- chránit vlákna před vzájemnou abrazí (uhlíková vlákna jsou křehčí než skleněná).

Jestliže reaktivita ploch aromatických rovin je malá, jejich hrany a rohy jsou vysoce reaktivní a vážou kyslík, oxidy uhlíku, karboxylové kyseliny, karboxylové a hydroxylové a případně aminové a kyanové skupiny. Vlhkost a plynné látky mohou způsobit potíže při výrobě kompozitů, protože zůstávají pouze fyzikálně vázány. Během vytvrzování matrice za vyšších teplot se odpařují za vzniku mikroskopických plynových bublinek obalujících vlákna. Zabránit se tomu dá buď:

- odplyněním povrchů vláken vakuovou desorpčí,
- nebo rozpuštěním adsorbovaných látek v pryskyřici při vhodném režimu vytvrzování,
- nebo úpravou povrchu vláken.

Nejčastěji se vyrobená vlákna chrání polymerními povlaky na bázi epoxidů nebo polyimidů, jejichž účelem je zabránit adsorpci látek a zároveň poskytnout vláknům ochranu před abrazí. U vláken s aromatickými rovinami rovnoběžnými s povrchem (standardní vlákna z PAN) je účelné reaktivitu povrchu zvýšit a povrch vlákna zdrsňit. Nejběžnější je mokrá způsob, spočívající v čistě chemickém působení oxidačních látek (chromová kyselina, chlornatan sodný) nebo elektrochemický způsob, spočívající v anodické oxidaci vláken v elektrolytech, např. v sulfidu amonném. U vláken s příznivější mikrotexturou lze aplikovat i suchý proces - termickou oxidaci. Nejnověji je používána kontinuální úprava studeným vysokofrekvenčním plazmatem, vytvářeným reaktorem pracujícím při frekvencích střídavého proudu okolo 15 MHz. Podle použitého plynného prostředí (kyslík, argon, čpavek a další látky, např. monomery) je dosahováno různých účinků:

- leptání a zdrsňování povrchu, doprovázené často i poklesem pevnosti (při použití kyslíku),
- očištění vlákna, které vede k zvětšení povrchové energie a k zlepšení smáčivosti pryskyřicí,
- implantace funkčních skupin na očištěný povrch (při použití čpavku jde o aminové skupiny),
- polymerace monomeru na povrchu vláken, jestliže se do proudu plynu přidává vhodný monomer. Lze ionizačními, disociačními, rekombinačními a dalšími reakcemi atomů plynu a monomeru docílit připojení vznikajícího polymeru na povrch vlákna.

Pro epoxidové matrice se osvědčilo plazmatové zpracování s připouštěním čpavku, (případně s atmosférou směsi čpavku a argonu), které vede k téměř dvojnásobnému zvýšení smykové pevnosti rozhraní vlákna a matrice. Plazmatovou polymerací lze vytvořit na uhlíkovém vlákně dobře ulpívající polymerní (např. polypropylenový) povlak, a tak dosáhnout afinity k polymerní (např. polypropylenové) matrici. Často je po implantaci chemických skupin na povrch vlákna pozorováno

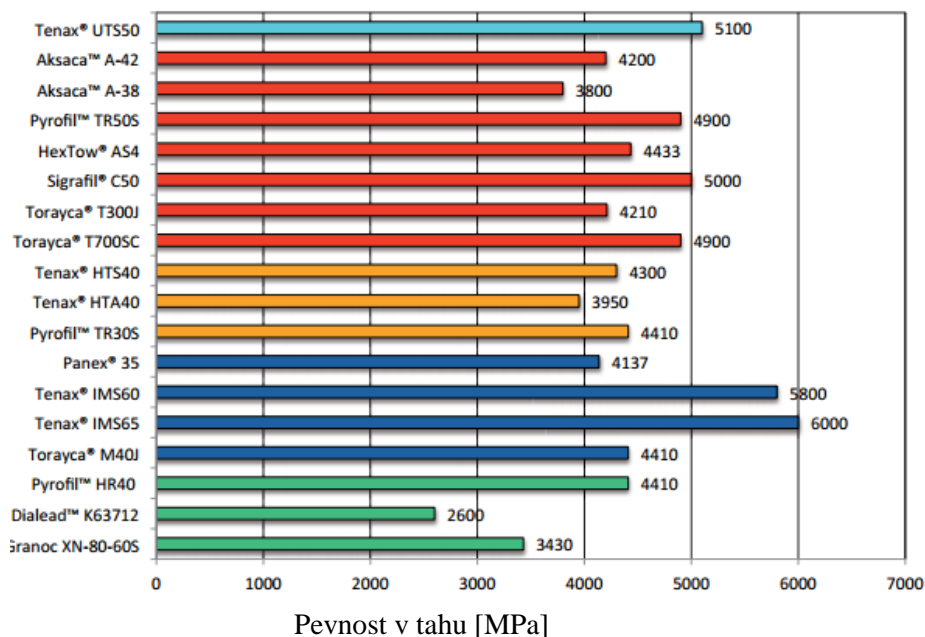
zvětšení jeho tahové pevnosti, které je vysvětlováno zahojením povrchových defektů vytvářeným povlakem.

Na očištěný povrch se mechanicky, fyzikálně i chemicky lépe vážou funkční skupiny povlaků nanášených za mokra. Používají se například oligomery na bázi epoxidů nebo polyimidy, rozpuštěné v organických rozpouštědlech. Existují také blokové kopolymery, které v hotovém povlaku vytvoří na vnější straně (od vlákna) vrstvu s přirozenou afinitou k polymerní matici.

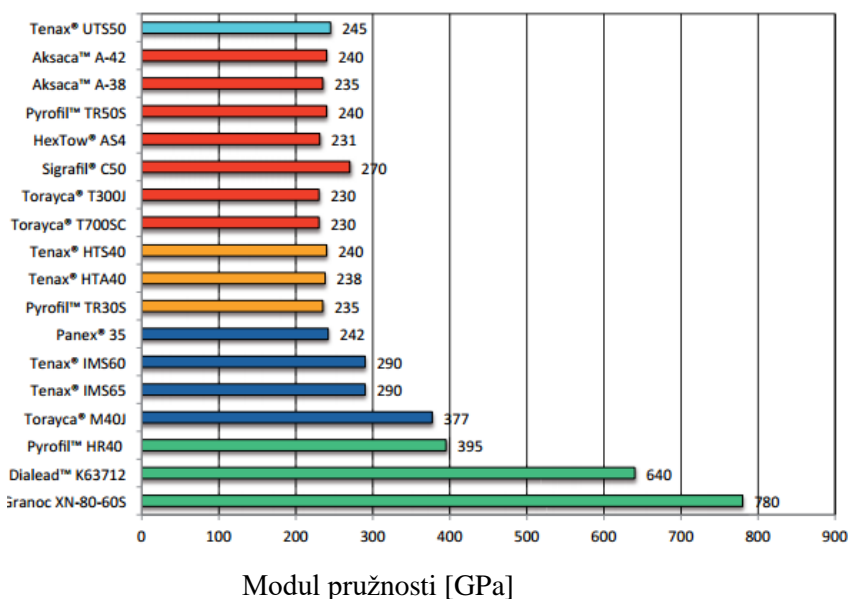
Kompozity vyrobené z očištěných a upravených uhlíkových vláken mají velkou smykovou pevnost rozhraní vláken a matrice i velkou mezilaminární (interlaminární) smykovou pevnost. Použije-li se navíc mezifáze v podobě tvárného polymerního povlaku, zlepšuje se odolnost kompozitu proti vzniku podélných trhlin v rozhraní vlákno/matrice, které se jinak objevují při mechanickém namáhání kompozitu bez této mezivrstvy. Lubrikační látky, jako polyvinylalkohol nebo silikonový olej, silně zhoršují, až znemožňují vazbu vláken a matrice, ale na druhé straně zvyšují schopnost kompozitního dílu pohltit energii, např. při namáhání rázem. Vlákná se totiž při lomu snadno vytahují z matrice a nedochází k jejich porušení v rovině šířící se lomové trhliny. Proces vytahování vláken však spotřebovává více energie než energie spotřebovaná na tvorbu lomových povrchů vláken. Pro zvětšení houževnatosti při zachování dobré soudržnosti vláken a matrice je výhodné opatřit vlákna např. přílnavým povlakem kaučuku, který způsobí, že vytahování vláken je doprovázeno větším třením. Pro dobrou únavovou odolnost a vysokou statickou pevnost kompozitu jsou však samozřejmě jakékoliv nevratné procesy, odehrávající se v mezifázovém rozhraní vlákno/matrice, nepřijatelné. [2, 39, 52]

#### **2.4.3.3 Vlastnosti uhlíkových vláken**

Z následujícího přehledu vlastností uhlíkových vláken jsou zřejmé výhody použití těchto vláken v kompozitních materiálech, které jsou používány pro nejrůznější aplikace. Na obrázcích 2.4.4 a 2.4.5 je přehled a srovnání nejběžněji používaných uhlíkových vláken.



Obr. 2.4.4 - Srovnání nejběžněji používaných uhlíkových vláken podle dosažené pevnosti v tahu [55].



Obr. 2.4.5 - Srovnání nejběžněji používaných uhlíkových vláken podle dosaženého modulu pružnosti [55].

### Anizotropie vlastností

- Mechanické - Modul pružnosti v tahu ve směru osy vláken se pohybuje řádově ve stovkách GPa, modul ve směru kolmém v desítkách GPa. Pevnost v tahu také výrazně menší ve směru kolmém k ose vlákna než-li podélném.
- Elektrické - Anizotropie elektrického odporu.
- Tepelné - Teplotní roztažnost ve směru osy vlákna má zápornou hodnotu, ve směru kolmém kladnou hodnotu.

- Tepelná vodivost v podélném směru je největší u vysokomodulových vláken z mezofázových smol.

### **Hustota**

- Uhlíková vlákna mají hustotu asi 5x nižší než ocel pohybující se v rozmezí 1600 – 2200 kg/m<sup>3</sup>.

### **Průměr vláken**

- Vlákna z PAN mají průměr okolo 4 – 8 μm, zatímco vlákna na bázi smol ≥ 10 μm.

### **Další vlastnosti**

- Křehkost – Malá odolnost proti ohybu. Menší prodloužení při přetržení v porovnání se skleněnými vlákny.
- Odolnost proti únavě, opotřebení a tření. Teplotní rozměrová stabilita.
- Ochrana před elektromagnetickými vlnami (elektromagnetické stínění).
- Dobrá chemická stálost a vynikající odolnost kyselinám, alkáliím, solím a různým typům rozpouštědel.

Z hlediska konstrukčních aplikací jsou nejdůležitějšími vlastnostmi uhlíkových vláken již zmíněny vysoký modul a pevnost. Modul pružnosti v tahu závisí na dokonalosti a velikosti mikroskopických krystalů a úhlu odchýlení jejich aromatických rovin od osy vlákna. Zatímco pevnost materiálu je určována množstvím defektů mikrostruktury. Výrobou je možné získat celou řadu vláken od vysoce pevných s nízkým modulem pružnosti až po vlákna s extrémně vysokým modulem pružnosti.

- Vlákna typu HS (vysoce pevná) mají pevnost 4 - 7 GPa, tažnost 1,7 - 2,4 % a modul pružnosti 235-300 GPa.
- Vlákna typu IM (středněmodulová) mají pevnost 3 - 4 GPa, tažnost 1,3 - 1,6 % a modul pružnosti 230 - 300 GPa.
- Vlákna typu HM (vysokomodulová) mají pevnost 1,9 - 3,6 GPa, tažnost 0,4 - 0,7 % a modul pružnosti 350 - 540 GPa.
- Vlákna typu SHM (s extrémně vysokým modulem pružnosti) mají modul pružnosti nad 500 GPa. [60]

Rozdělení do těchto kategorií je jen přibližné. Jednotlivé kategorie se překrývají a dochází také k odlišným značením a rozdělením u jednotlivých dodavatelů, vlivem rozmanitosti vlastností těchto vláken [38].

### **2.4.4 Čedičová vlákna**

Čedič, známý také jako bazalt, je vulkanická hornina, která je součástí zemského povrchu. Čedičová vlákna jsou zobrazena na obr. 2.4.6. Čediče obvykle dělíme na dvě skupiny:

- Tholeitické bazalty obsahují bazické živce, augit chudý na vápník, hypersten, sklo a někdy i volný SiO<sub>2</sub>, neobsahující olivín. Tvoří rozsáhlé výlevy na kontinentech a dnech současných oceánů.
- Alkalické bazalty obsahují více olivínu, s labradoritem, augitem (chudý vápníkem, s příměsí Ti), často s malým množstvím foidů a melitinem. [40]



Obr. 2.4.6 – Čedičový roving.

#### 2.4.4.1 Výroba čedičových vláken

První pokusy se zvláknováním čediče se konaly na začátku 20. století, k rozvoji výroby došlo teprve po 2. světové válce. Výrobní technologie se zakládá na tavném zvláknování při teplotě 1500-1700°C. Při dostatečně rychlém zchlazení vzniká sklovitá hmota, při pomalejším chlazení se tvoří krystaly ze směsi minerálů. Pro některé účely se vláknina dluží při teplotě cca 1300°C. Výrobní linka produkuje (v závislosti na jemnosti vlákna) cca 15-35 kg/h. Důležití výrobci čedičových textilií jsou v současné době např. v Rusku, na Ukrajině a v Číně. Celosvětová roční produkce se v roce 2008 odhadovala na 3000-5000 tun. Od roku 2009 měla v Číně produkovat nová výrobní linka s roční kapacitou 2000 tun filamentů o jemnosti 5,7 μm. [40]

#### 2.4.4.2 Vlastnosti čedičových vláken

- Velký tepelný rozsah použitelnosti,
- nehořlavost,
- dobrá chemická odolnost,
- nízká tepelná vodivost,
- dobrá zvuková pohltivost,
- vysoký elektrický odpor,
- dobrá odolnost proti UV záření.

Jde o vlákna s vlastnostmi podobnými skleněným vláknům typu S. Výhodou je jejich cena, která činí asi 60 % skleněných vláken a dobrá chemická odolnost. Výroba je analogická výrobě skleněných vláken, teplota tavení je 1400°C. Křehkost čedičových vláken je spojena s pevností v tahu. Horninová vlákna jsou křehká a lámavá právě kvůli jejich nízké odolnosti v ohybu. Ke zjištění odolnosti se používá několik metod, nejpoužívanější je však stanovení pevnosti ve smyčce. U této metody se pro popis

křehkosti používá poměr, který vyjadřuje podíl průměru smyčky a průměru vlákna. [2, 40]

#### **2.4.4.3 Využití čedičových vláken**

S využitím čedičových nekonečných vláken a čedičových textilií z nich zhotovených je možno počítat ve všech oblastech, kde se běžně dosud používají skleněná a používala azbestová vlákna. Vzhledem k tomu, že čedičová vlákna předčí svými fyzikálními, mechanickými a chemickými vlastnostmi vlákna skleněná i azbestová, je to základní předpoklad k jejich masivnímu rozšíření v technické praxi. Dalšími přednostmi jsou nezanedbatelné ekologické a zdravotní výhody oproti např. skleněným vláknům. Především menší zátěž pro životní prostředí při výrobě a likvidaci a menší zdravotní riziko při zpracování a používání. [40]

#### **2.4.5 Srovnání použitých vyztužujících vláken**

Je potřeba zmínit, že vlastnosti těchto nejdůležitějších vyztužujících vláken se liší nejen navzájem, ale také značně závisí na vlastnostech použité matrice, ve které jsou vlákna zahrnuta. Při výběru vhodného vyztužujícího vlákna hraje důležitou roli kromě jeho vlastností také jeho cena. Ta se obecně liší podle suroviny, zpracování a typu vlákna. Skleněná vlákna se vyrábějí z levných a snadno dostupných surovin spřádáním z taveniny, což odpovídá jejich nízké ceně. Pro výrobu uhlíkových vláken je nutné použít drahé, kvalitní a předem upravené příze, což spolu s pomalou výrobní rychlostí a vysokou energetickou náročností dává nejvyšší konečné náklady. [11]



## 2.5 MATRICE

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, který tvoří základní stavební prvek výsledného kompozitu. Hlavním úkolem matrice je přenos namáhání na jednotlivá vlákna, ochrana vláken před vlivy okolí, zajištění jejich geometrické polohy a tvarové stálosti výrobku. Přehled matric je zobrazen v tabulce 2.5.1. [11, 25]

Tab. 2.5.1 - Přehled matric a jejich vlastností [55].

Druh pryskařice	epoxidové	polyesterové	fenolové	polyamidové
Modul pružnosti [MPa]	4 500	4 000	3 000	4 000-19 000
Poissonův poměr	0,4	0	0	0
Modul pružnosti ve smyku [MPa]	1 600	1 400	1 100	1 100
Penost v tahu [MPa]	130	80	70	70
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	1 200	1 200	1 300	1 400
Maximální teplota [°C]	90-200	60-100	120-200	250-300

### 2.5.1 Matrice polymerního kompozitu

Kompozity s polymerní matricí jsou nejvíce rozšířenou skupinou kompozitů. Základním materiálem matric jsou polyamid, polypropylen, epoxidové, polyesterové, formaldehydové a melaninové pryskyřice. Výztuže pak tvoří zejména skleněná, v menší míře uhlíková a aramidová vlákna. U automobilů je nejčastější využití takovýchto kompozitů na obvodové konstrukci (karoserie) a v interiéru. Polymerní kompozity se dále dělí na kompozity s termoplastickou a termosetovou matricí. [11]

#### A) Termoplastická matrice

Termoplastická matrice je v automobilovém průmyslu méně využívána z důvodu vyšších výrobních nákladů a omezené použitelnosti. Za normální teploty je to pevná látka, ale pro další zpracování, resp. její vyztužení je nutné ji zahřát na teplotu nad 200°C, aby přešla do kapalného stavu. Výztuž je tvořena nejčastěji krátkými ( $\approx 0,2$  mm) nebo dlouhými (do 25 mm) skleněnými vlákny. Po spojení je nutné celý materiál prudce ochladit. Výhodou takovýchto kompozitů jsou jejich dobré mechanické vlastnosti, ale jejich výroba je poměrně náročná, jsou málo odolné vůči stárnutí a je u nich omezené spojení za použití lepidla. Nejčastěji používanými polymery jsou polykarbonát, polypropylen, polyamid a termoplastické polyestery. [11, 25]

#### B) Termosetová matrice

Tato matrice má mezi konstrukčními aplikacemi naprostou převahu především kvůli její nízké ceně, relativně snadné výrobě a dobrými vlastnostmi při dynamickém zatěžování. Polymery spadající pod termosety jsou epoxidové pryskyřice, fenolické pryskyřice, vinylestery a nenasycené polyestery. Významného využití dostává při spojení s uhlíkovým vláknem, kde vzniká dnes velmi populární uhlíkový kompozit. [11]

### 2.5.2 Kompozity s PUR matricí

Kompozity jsou PUR systémy, které se v kombinaci s plnivý, krátkými, dlouhými nebo nekonečnými vlákny zpracovávají na tvarované díly nebo povrchové úpravy. Polyuretan se na výtzuž nanáší rozprašováním, litím, lisování za mokra nebo jinými způsoby. Tato třída materiálů se vyznačuje především svými excelentními mechanickými vlastnostmi, jakož i vysokou rázovou houževnatostí i při extrémně nízkých teplotách. Používají se například pro ochranu proti korozi a opotřebování, vyztužení, technické zboží a tvarované díly, tepelnou a elektrickou izolaci, vysoce výkonné konstrukční díly v automobilech, nebo v užitných vozidlech. Z kompozitů z tvrdé integrální pěny lze vyrábět nejrůznější díly pro automobilový průmysl. Např. přístrojové desky, zadní spoilery lakované v barvě vozu nebo skořepiny autosedaček. [41]

#### Tvrdé polyuretanové pryskařice

Novým trendem je použití tvrdých polyuretanových pryskyřic pro kompozitní díly, vyráběné kontinuálními procesy, tj. pro pultruzi a navíjení. Polyurethany, které se vyrábějí reakcí isokyanátu a polyolu. Jejich hlavní výhodou je větší rázová houževnatost a větší odolnost proti únavě. Mají dobrou adhezi k vláknům a jsou poměrně levné. Při vytvrzování neuvolňují organické plynné produkty. Až donedávna však nebyly PU pryskyřice považovány za vhodné pro kompozity vzhledem k velmi rychlé vytvrzovací reakci (řádově minuty) a tendenci vytvářet pěnu s vnitřními dutinami. Formulací dvousložkových polyurethanů na bázi isokyanurátu a polyolu se situace změnila.

Pryskyřice je kompatibilní s uhlíkovými vlákny. Pěny polyisokyanurátových pryskyřic jsou tuhé a dodávají se pro tepelnou izolaci. Životnost namíchané směsi (doba tekutosti) bývá asi 20 minut. Pryskyřice jsou kompatibilní se stávající povrchovou úpravou skleněných vláken. Rychlejší vytvrzovací proces polyisokyanurátových pryskyřic dovoluje zvýšit rychlost výroby. Je zvětšena tahová podélná i příčná pevnost kompozitu a mezilaminární smyková pevnost je až o 62 % větší než u běžných PU pryskyřic. [2]

## 2.6 TESTOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITŮ

Výsledky mechanických zkoušek vyjadřují, jak se bude materiál chovat za působení vnějšího namáhání. Pro určování mechanických vlastností jsou zavedeny konvenční zkoušky, které se dělí podle časového průběhu působící síly. Podle povahy působící síly je rozlišujeme na statické a dynamické. Pomocí zkoušek statických se určuje chování materiálů při působení konstantních nebo pomalu spojitě se měnících sil. Dynamické zkoušky se rozlišují na zkoušky rázové, při kterých roste síla z nulové hodnoty na maximální ve velmi krátkém čase, nebo únavové, které modelují reálný stav působení proměnlivého namáhání. [13]

Mezi nejčastěji využívané metody zkoušení kompozitů patří:

- 3PB – Zkouška třítělovým ohybem (ČSN EN ISO 14125),
- Charpy test – zkouška rázové houževnatosti (ČSN EN ISO 179-1),
- Měření pevnosti a tažnosti na dynamometru (ČSN EN ISO 527-1).

### 2.6.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem je nejobvyklejší mechanická zkouška. Provádí se na trhacím stroji jednosměrným tahem. Používá se k určení modulu, meze pevnosti, meze kluzu (nejmenší napětí, při němž dochází k podstatné deformaci), tažnosti, případně kontrakce. V případě kompozitních materiálů je obvykle prováděna na plochých vzorcích. [13]

*Zadané parametry:*

rozměry vzorku: šířka 20 mm,

průměrná tloušťka 1,6 mm,

upínací délka: 100 mm,

rychlost posuvu: 2 mm/min,

ukončení zkoušky: 90 %  $F_{max}$ .

*Postup zkoušky*

Zkouška může být provedena pomocí trhacího přístroje TIRA TEST 2300. Tento přístroj je možné upravit pro různé druhy zkoušení pomocí vyměnitelných čelistí. V případě velmi pevných kompozitů se jeví jako nejvhodnější manuálně dotahované trhací čelisti (obr. 2.6.1). Uživatelsky pohodlnější pneumatické čelisti nejsou schopné vyvinout dostatečný tlak a vzorky během zkoušení mohou prokluzovat.

Vzorek se nejprve upne do čelistí, upínací délka činí 100 mm, a následně je namáhán tahem rychlostí 2 mm/min až do doby, než dojde k poklesu maximální naměřené síly o 90 %. Testovací přístroj je připojen k počítači s nainstalovaným softwarem, který celý průběh zkoušky zaznamenává a vyhodnocuje její výsledky. Z naměřených výsledků bylo dále dopočítáno napětí při přetrhu, tedy se maximální síla vydělila plochou kompozitu (průřezem) nebo při testování vláken plochou vláken.

*Naměřené veličiny:*

modul pružnosti dle EN 1002 E [MPa],

maximální dosažená síla  $F_{\max}$  [N],

tažnost při maximální dosažené síle  $A_{\max}$  [%].



Obr. 2.6.1 - Manuálně dotahované čelisti.

### **2.6.2 Statická ohybová zkouška**

Výsledkem zkoušky je určení pevnosti v ohybu. Běžně se provádí tříbodovým nebo čtyřbodovým ohybem. Při tříbodové zkoušce se plochý vzorek podepře na dvou koncích a zatíží středovým břemenem. To vyvolá ohybový moment v nosníku, který se mění lineárně od nuly u podpor k maximální hodnotě uprostřed.

Zkouška ohybem přináší informace o chování kompozitního materiálu, který je tímto způsobem namáhán, například nosníky nebo konstrukce, které se prohýbají vlastní vahou. Také umožňuje stanovit Youngův modul pružnosti u materiálů, u kterých ho nelze dostatečně přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek. [8]

*Zadané parametry:*

rozměry vzorku: šířka 10 mm, průměrná tloušťka 1,3 mm,

rozpětí podpěr L: 64 mm,

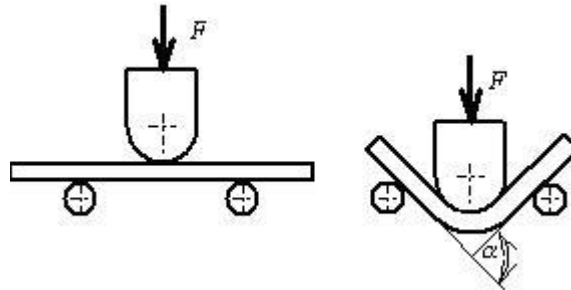
průhyb X (posun při síle  $F_x$ ): 2 mm,

rychlost posuvu: 2 mm/min.

*Postup zkoušky*

Zkouška tříbodovým ohybem je prováděna většinou na totožném přístroji jako zkouška tahem, avšak s použitím odpovídajících čelistí (obr. 2.6.2). Stejně jako u předchozí zkoušky je tato zaznamenávána a vyhodnocována v reálném čase softwarem instalovaným v připojeném počítači. Před jejím započítáním je nutno zadat vstupní parametry zkoušky a definovat vlastnosti materiálu, které chceme zaznamenat. Vzorky o rozměrech 80 mm x 10 mm jsou umístěny na podpěry dolní čelisti a horní čelist s trnem je nastavena do výchozí polohy tak, aby se trn dotýkal vzorku. Těleso je

následně ohýbáno konstantní rychlostí 2 mm/min, dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty, v tomto případě 2 mm. Během zkoušky se zaznamenává síla působící na vzorek a jeho průhyb. Parametry zkušebního zařízení a vzorků vhodných k testování i postup zkoušky jsou uvedeny v příslušné normě. [8]



Obr. 2.6.2 - Schéma statistické ohybové zkoušky [10].

*Naměřené veličiny:*

tažnost při maximální dosažené síle  $A_{max}$  [%],

maximální dosažená síla  $F_{max}$  [N]

ohybové napětí  $\sigma$  [MPa],

E-modul v ohybu  $E$  [Mpa].

Ohybové napětí  $\sigma$  je definováno jako napětí vnějšího povrchu vzorku uprostřed rozpětí podpěr a lze jej vypočítat ze vztahu (2.9):

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (2.9)$$

kde  $F$  [N] je zatěžující síla,  $L$  [mm] je rozpětí podpěr,  $b$  [mm] je šířka vzorku a  $h$  [mm] je tloušťka vzorku. E-modul  $E$  v ohybu se získá z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení, jeho stanovení je možné výpočtem dle vztahu (2.10):

$$E = \frac{FL^3}{4Xbh^3} \quad (2.10)$$

kde  $F$  [N] je zatěžující síla,  $L$  [mm] je rozpětí podpěr,  $X$  [mm] je průhyb vzorku,  $b$  [mm] je šířka a  $h$  [mm] je tloušťka vzorku [8].

### 2.6.3 Charpy test

Rázová zkouška ohybem metodou Charpyho je dobrým ukazatelem houževnatosti (celkové odolnosti materiálu vůči deformaci) nebo naopak křehkosti materiálů. Je to zkouška dynamická. To znamená, že síla působící na vzorek roste z nulové hodnoty na hodnotu maximální ve velmi krátkém čase. Zkouška je vhodná jako simulace nárazů různých charakterů.

*Zadané parametry:*

rozměry vzorku: šířka 10 mm, délka 80 mm,  
rychlost kladiva: cca 3,7 m/s.

*Postup zkoušky*

Při testování zkušebních vzorků v rovnoběžném směru musí být rozměrem tělesa, který je kolmý na směr rázu, tloušťka desky, ze které byl zkušební vzorek zhotoven. Délka vzorku je určena neměnnou vzdáleností podpěr na zkušebním přístroji (norma doporučuje pro tenké desky poměr rozpětí podpěr a tloušťky vzorku), šířka je zachována stejná jako u vzorků určených pro testování na jiných přístrojích [9]. Kladivo, otočné kolem osy, se zdvihne a upevní v počáteční poloze (obr. 2.6.3). V nejnižší poloze kladiva je vodorovně na podpěrách umístěn zkušební vzorek. Po uvolnění z počáteční polohy se kladivo pohybuje rychlosti cca po kruhové dráze a rovnoběžně na užší stranu narazí na zkoušený materiál. Hodnotí se, kolik práce (energie) je potřeba k porušení vzorku. U kompozitních materiálů energie potřebná na porušení vzorku závisí na materiálu matrice, druhu vláknové výztuže, jejím objemovém množství a na orientaci vláken vzhledem k působišti síly. [10, 13]

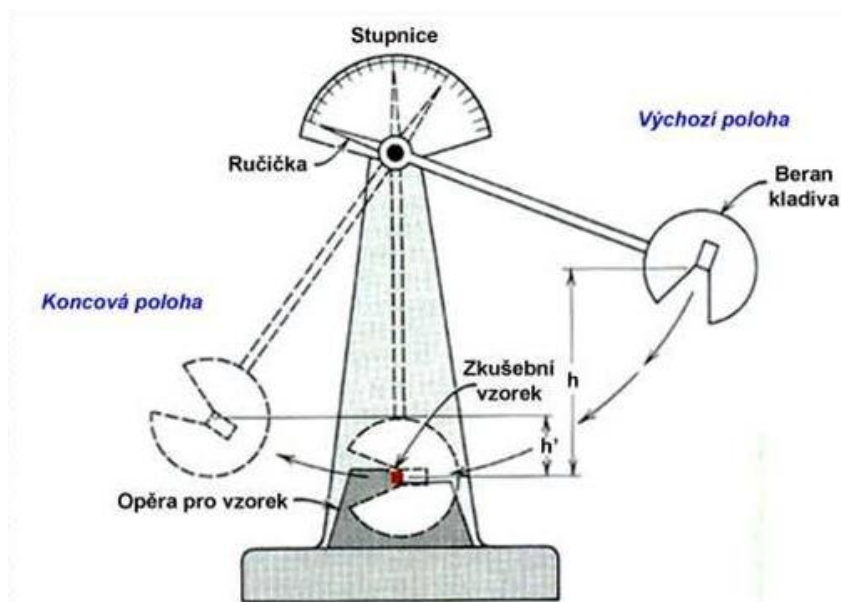
*Naměřené veličiny:*

energie  $E_c$  [J],

rázová houževnatost  $a_{cU}$  se vypočítá ze vztahu (2.11):

$$a_{cU} = \frac{E_c}{bh} \quad (2.11)$$

kde  $E_c$  [J] je energie, kterou kladivo naráží na vzorek,  $b$  [m] je šířka vzorku a  $h$  [m].



Obr. 2.6.3 - Rázové kladivo [13].

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část disertační práce se zabývá výběrem a testováním samotných vláken (výztuže-rovingů) a vývojem aparatury pro hodnocení opotřebení rovingů. Druhé části byly testovány rovinné kompozity s různým křížením výztuže a s různými druhy výztuže. Další část popisuje výrobu a zkoušení kompozitních trubek, přičemž při výrobě těchto trubek byly zohledněny výsledky z předchozích zkoušení rovinných kompozitů a vláken. V poslední části byly porovnány výsledky testování s obrázky řezu kompozitu z mikroskopu. Byl vytvořen ekonomický model srovnávání a byla vytvořena metodika hodnocení vhodné výztuže.

#### 3.1 TESTOVÁNÍ ROVINGŮ - VLÁKNA

Tato část zahrnuje popis všech použitých výztuží (rovingů) a jejich vlastností. Protože se budou rovingy při výrobě výsledného kompozitu několikrát převíjet a budou třením namáhané, bylo důležité otestovat rovingy, jak jsou odolné vůči opotřebení. Proto byla vyvinuta aparatura, která simulovala opotřebení.

##### 3.1.1 Popis použitého materiálu

Prvotně bylo důležité seznámit se s vlastnostmi rovingů (výztuže) a ověřit parametry uváděné výrobcem. Tyto parametry byly ověřeny v rámci bakalářské práce [88] a výsledky neukázaly žádné výrazné odchylky od hodnoty udávané výrobcem. Zaměřeno bylo na uhlíková (CF-carbon fibers), čedičová a skleněná (GF-glass fibers) vlákna ve formě rovingů, která se používají zejména při výrobě kompozitů. Vlákna byla vybrána na základě požadavku zadavatele (typ vlákna, výrobce, K-počet elementárních vláken v tisících, kompatibilita vůči budoucí matici) byly vytipovány a otestovány mechanické vlastnosti několika typů vláken od různých výrobců. Jedná se zejména o vlákna uhlíková od čtyř různých výrobců, vlákna skleněná a čedičová, přehled těchto vláken zobrazuje tabulka 3.1.1.

Tab. 3.1.1 - Přehled materiálů

materiál	výrobce	označení	druh	počet fibril	jemnost [tex]
uhlík	TENAX	U1a	E STS40 F13	24K	1600
		U1b	HTS	24K	1600
		U1c	E STS40 F13	48K	3200
	TORAY	U2	T700SC	24K	1600
	ZOLTEK	U3	PANEX 35	50K	3400
	SGL	U4	Sigrafil C50	24K	1600
sklo	Johns Manville	S		4K	2400
čedič	Basaltex	Č		5K	2520

U všech typů materiálu byl stanoven počet vláken ve svazku a byl změřen průměr vláken pomocí Lanametru. V této části se také ověřovaly vlastnosti již zmiňovaných vláken a to jejich jemnost, napětí při přetrhu, tažnost a pevnost. Všechny

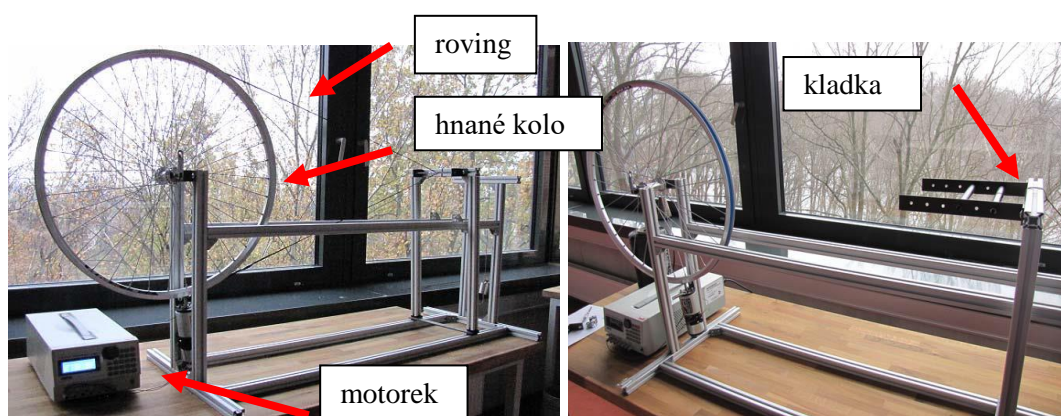
výsledky nejsou zahrnuty v práci, ale měření sloužily k ověření vlastností vláken deklarované výrobcem [80].

### 3.1.2 Popis použitého měření

#### 3.1.2.1 Cyklické opotřebení rovingů

V tomto experimentu byly zkoušeny vybrané rovingy na cyklické opotřebení. Jelikož se rovingy dodávají na cívkách o velkých rozměrech, musí se rovingy přesoukat na menší rozměr cívek, pomocí nichž budou kompozity ovinuty. Proto bylo důležité zjistit, jestli rovingy i po přesoukání na menší cívky budou mít stále stejnou pevnost. Byla vyrobena aparatura pro simulaci opotřebení rovingů a následně bylo opotřebení hodnoceno pomocí trhací zkoušky, jestli došlo k poklesu pevnosti.

Obr. 3.1.1. aparatura byla speciálně postavená pro simulaci opotřebení rovingů (dále OA), je složena z velkého, motorkem hnaného kola a kladky. Otáčky motoru jsou regulovány různými hodnotami napětí (konkrétně 5 V a 10 V; přepočteno na rychlost v jednotkách SI). Vlákna přecházejí přes otáčivou kladku, která je uložena na pouzdře tak, aby byl vliv tření co nejmenší. Rameno s kladkou je pohyblivé a zatíženo závažím o hmotnosti 50 g, aby bylo vyvozeno tahové napětí o velikosti 5 N, které je přibližně rovno napětí při navíjení.



Obr. 3.1.1 - Aparatura pro simulaci opotřebení rovingů.

#### Parametry zkoušení opotřebení:

Počet cyklů: 50 a 100,

Rychlost [ $\text{ms}^{-1}$ ]: 0,63 (5V) a 1,55 (10V),

Zatížení [N]: 5,

Průměr vodících elementů [mm]: 15,

Úhel opásání:  $38^\circ$  a  $177^\circ$ .

Vlákna byla opotřebena na k tomu určeném aparátu a poté byla testována trhací zkouškou. Aby bylo zabráněno nerovnoměrnému přetrhu vláken ve svazku, byl použit tento postup přípravy vláken:

Vlákna byla zavěšena na šňůru a zatížena závažím o hmotnosti 200 g pro rovnoměrné napnutí a natažení vláken ve svazku. Poté byla vlákna zalepena do tvrdého

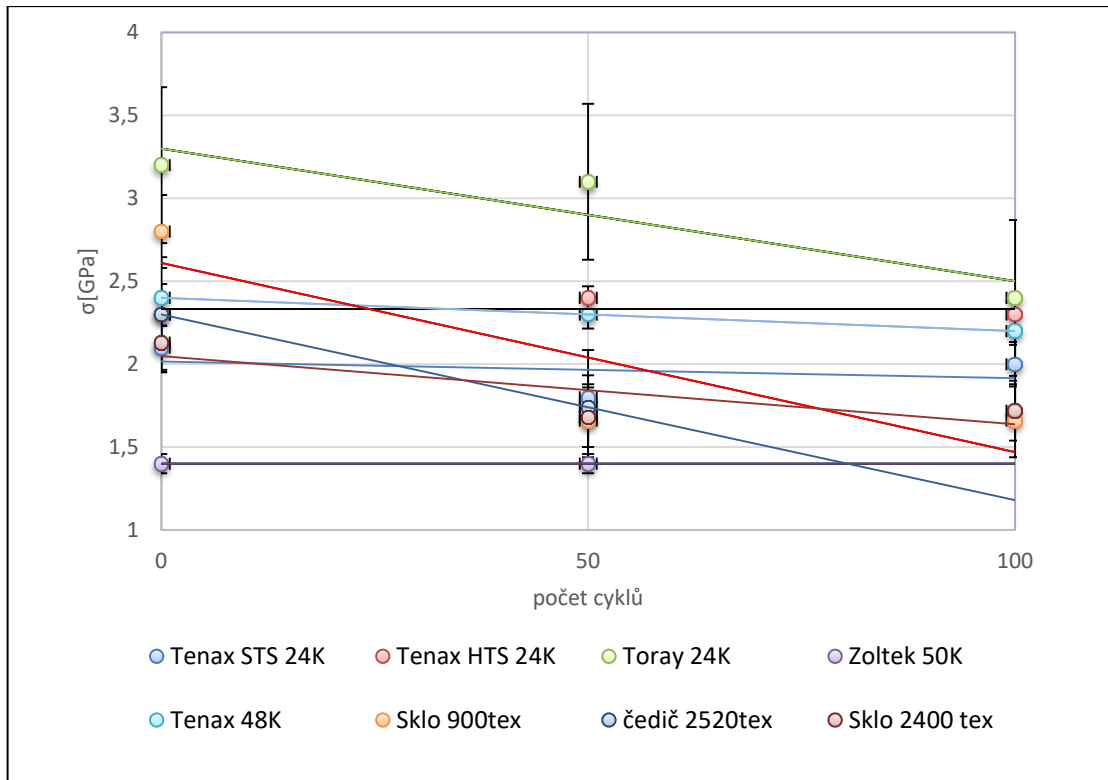


papírového rámečku. Papírový rámeček s vlákny byl upnut do čelistí a okraje rámečku přestříženy, aby neovlivňovaly zkoušku. [73]

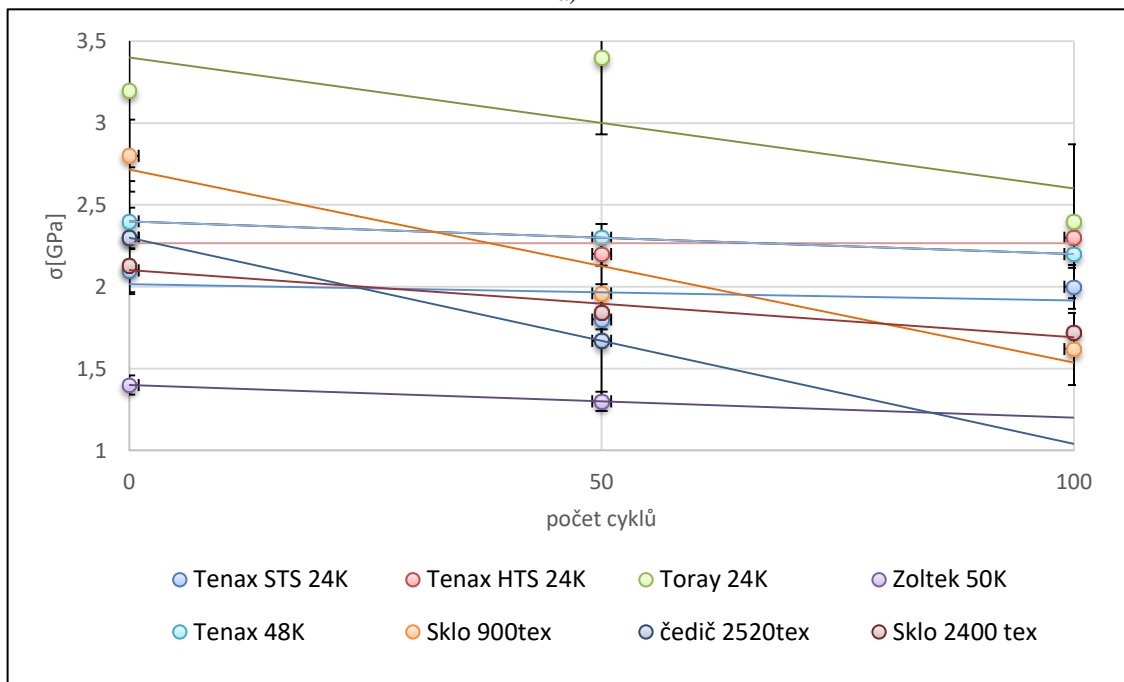
### 3.1.3 Hodnocení opotřebení

Na obrázku 3.1.2 jsou zobrazeny výsledky hodnocení opotřebení. Naměřené hodnoty ukázaly, že u vláken Tenax nedochází k opotřebení vláken, které by mělo vliv na snížení pevnosti. Pokud jde o vlákna Toray, tak je zde vidět, že vlákna v dodaném stavu mají největší pevnost, ale se zvyšováním cyklů ztrácí svojí pevnost, přesto je jejich pevnost po velkém opotřebení nejvyšší. Je to způsobeno pravděpodobně tím, že v dodaném stavu jsou vlákna díky sizingu urovnanější, než ostatní vlákna a po 100 cyklech Toray vlákna svojí urovnanost ztrácí a pravděpodobně dochází k poškození sizingu. U vláken Zoltek jsou už z výroby viditelná poškození – polámaná a odstávající vlákna. To se projevilo i při tahové zkoušce, kdy je vidět, že vlákna mají nejmenší pevnost ze všech vláken a stejně tak jako čedičová vlákna. Při zvýšení počtu cyklů na více než 50 se roving rozpadnul, proto tyto hodnoty nemohly být zaznamenány. Z obrázku 3.1.3, kde je zobrazeno opotřebení po 50 cyklech při dvou různých rychlostech, je také zřejmé, že na opotřebení rovingů neměla rychlost převíjení velký vliv.

U skleněných vláken dochází k výraznému lámání vláken hlavně při nižší rychlosti a pevnost klesá u skla 900 tex o cca 40 % u skla 2400 tex o 20 % a u čediče o 25 %. Modul pružnosti v tahu je u všech vláken přibližně stejný. I přes opotřebení splnila skleněná vlákna výrobcem deklarovanou hodnotu. Z grafu je zřejmé, že hodnoty pevnosti čedičových i skleněných vláken jsou srovnatelné s hodnotami uhlíkových vláken. Dochází zde ale k výraznému poklesu již při 50 cyklech oproti uhlíkovým vláknům, kde většina hodnot zůstávají přibližně stejné. Takže oproti uhlíkovým vláknům má na skleněná a čedičová vlákna opotřebení výrazný vliv.



a)

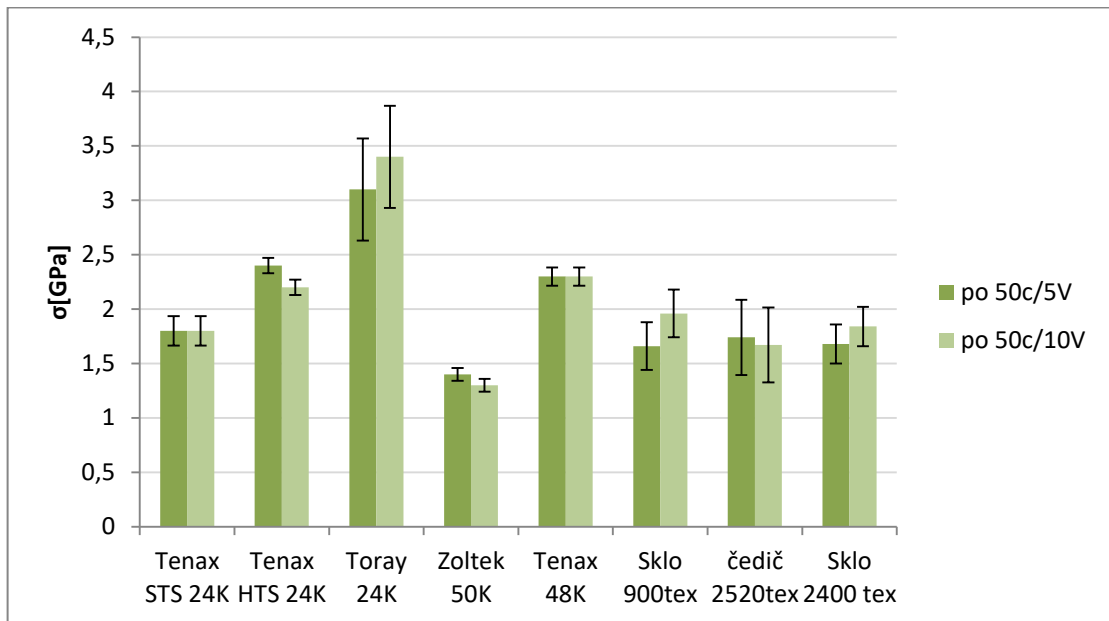


b)

Obr. 3.1.2 - Závislost napětí při přetrhu na opotřebení jednotlivých rovingů a) při rychlosti 0,63 m/s, b) při rychlosti 1,55 m/s.

Výsledky opotřebení byly proloženy přímkami, ze kterých bylo určeno: K největším opotřebením došlo u vláken Toray, skleněných a čedičových vláken. Přímký byly nejstrmější a navzájem si byly skoro rovnoběžné, ale každá začala v jiném bodě dle výchozí pevnosti. Na obrázku 3.1.3 jsou zobrazeny závislosti napětí na

opotřebení po 50 cyklech při dvou různých rychlostech. Z tohoto grafu lze říct, že rychlost namáhání nemá v tomto případě vliv na opotřebení rovingů. Po 100 cyklech nebylo možné tuto závislost uvést, protože polovina rovingů tyto cykly nevydržela.



Obr. 3.1.3 – Závislost napětí na opotřebení po 50 cyklech, při dvou různých rychlostech.

### 3.1.4 Závěr ze zkoušení rovingů

Firmy TENAX a TORAY jsou tradiční výrobci uhlíkových vláken a jejich materiály byly podrobeny testu na aparatuře s velmi dobrým výsledkem. Lze tedy říci, že pokud se jedná pouze o průchod uhlíkových vláken přes vodící elementy při ovíjení nebo splétání (technologie používané při výrobě vlákniny vyztužených kompozitů) a o tření, které je na vodících elementech vyvozené, nemělo by docházet k výraznějšímu poškození pramenců a prašnost takového prostředí by měla být řešitelná v rámci dostupných prostředků. Problém nastává u materiálu uhlíkových vláken ZOLTEK. Roving je složen z 50 000 elementárních vláken, ale ne všechna mají stejnou délku a už z výroby jsou na pramencích okem viditelná poškozená – polámaná a odstávající vlákna. Ta jsou pak při dalším namáhání dále poškozována, vzniká velké množství prachu z úlomků těchto vláken. Cyklické namáhání (50 cyklů) vedlo ke ztrátě soudržnosti rovingu, opotřebení stem cyklů nebylo možné realizovat, roving se rozpadl ještě před dokončením pokusu. Stejně tak tomu bylo i u čedičových a skleněných vláken, kdy už při 50 cyklech docházelo k rozpadu rovingu a vznikalo velké množství úlomků vláken. Při použití takového materiálu pro průmyslovou výrobu by bylo nutné velmi přísně dbát na dodržování norem týkajících se čistoty ovzduší na pracovišti a norem souvisejících.

### 3.2 TESTOVÁNÍ ROVINNÝCH KOMPOZITŮ

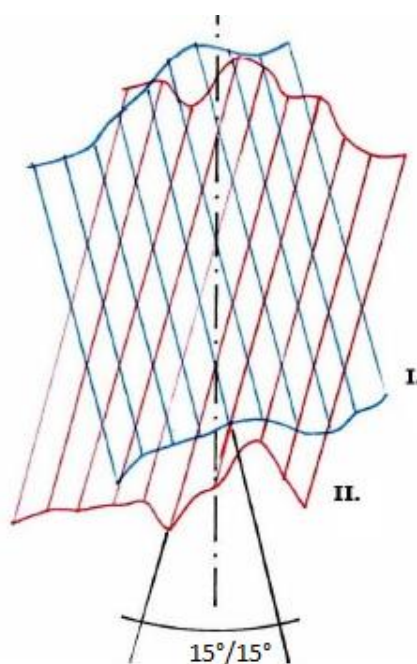
Tato část práce zahrnuje výrobu a zkoušení rovinných kompozitů. Nejdříve bylo zapotřebí zjistit, který úhel křížení vláken a počet vrstev je pro tento výzkum nejvhodnější, proto byly vyrobeny nejdříve rovinné kompozity s různými úhly křížení výztuže a s různými počty vrstev. Kompozity byly testovány na tah, ohyb a rázovou houževnatost.

#### 3.2.1 Popis použitého materiálu - Výroba kompozitů

Jako výztuž byla použita uhlíková, skleněná a čedičová vlákna ve formě rovingů od různých výrobců (viz. Tab. 3.1.1), výběr vláken byl zvolen dle zadavatele. Epoxidová matrice byla dodána firmou Huntsman Advance Materials (dle zadavatele). Dvousložková epoxidová matrice je kombinací těchto produktů: XB 3585 RESIN (plnidlo) a XB 3458 CH HARDENER (tvrdidlo). V tabulce 3.2.1 jsou zobrazeny všechny kategorie vzorků, které byly vyrobeny.

Tab.3.2.1 - Kategorie vzorků

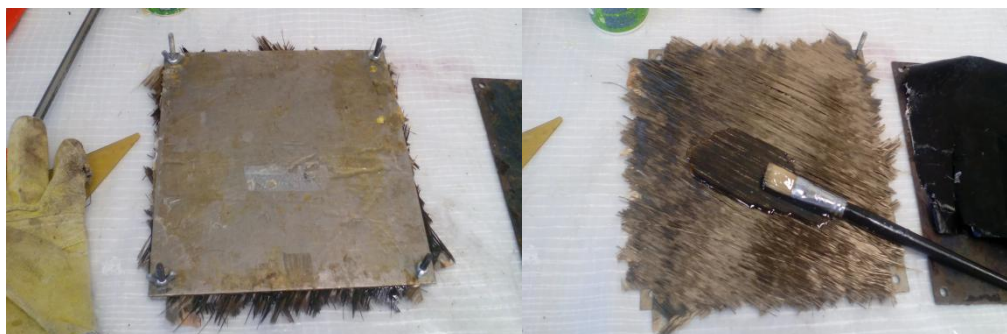
výztuž	dodavatel	označení	jemnost [tex]	křížení výztuže	vrstvy
čedič	Basaltex	Č	2520	0°, ±15°, ±30°, ±45°, ±60°	2
uhlík	Tenax STS	U1a	1600	0°, ±15°, ±30°, ±45°, ±60°, ±75°	2,4,6
	Tenax HTS	U1b	1600	0°	1
	Toray	U2	1600	0°	1
	Zoltek 50K	U3	3400	0°, 45°	2
	Tenax 48K	U1c	3200	0°	1
	SGL Sigrafil C50	U4	1600	0°, 45°	2
sklo	John Manville	S1	2400	0°, ±15°, ±30°, ±45°, ±60°	2



Obr. 3.2.1 - Příklad úhlu křížení vrstev rovingů (15° od osy).

Byly vyrobeny kompozity s různými úhly křížení výztuže a s různými počty vrstev. Obrázek 3.2.1 zobrazuje příklad úhlu křížení vrstev. Z důvodů preferencí zadavatele byla uhlíková vlákna nejdůležitější, proto bylo nejvíce variant kompozitu vyrobeno s uhlíkovou výztuží. Nejvíce pak byly vyrobeny kompozity s úhlem křížení 45°, protože se tento úhel během experimentu ukázal z hlediska výroby nejvhodnější pro konečnou výrobu kompozitu. Pro výrobu vzorku byla použita technologie ručního kladení. Na obě lisovací kovové desky, zakryté teflonovým pečícím papírem, se pod daným úhlem klade roving a pomocí oboustranné lepící pasky se zajistí proti posunu. Snahou je docílit minimálních rozestupů mezi jednotlivými rovingy tak, aby byl výsledný kompozitní materiál vyztužen rovnoměrně v celé ploše a aby byl zajištěn co největší objemový podíl vláken v kompozitu.

Na rovingy byla aplikována dvousložková matrice (obr. 3.2.2). Pro úplné a rovnoměrné prosycení materiálu se používá váleček, kterým se matrice dostatečně protlačí materiálem. Je třeba postupovat pomalu a opatrně, neboť uhlíková vlákna jsou jemná a ulpívají na válečku, může tak docházet ke „třepení“ rovingu. Matrice se aplikuje na obě kovové desky, které se poté přiklopí tak, aby vlákna byla křížem. Obě desky mají v rozích otvory, kterými se protáhnou šrouby a utáhnou maticemi. Dostatečným utážením dojde k vytlačení přebytečné matrice a vzduchových bublin. Pomocí obrazové analýzy byl zjištěn i objemový podíl vláken ve vzorcích, to bylo 25-37%.



Obr. 3.2.2 – Výroba čedičových kompozitů.

Po stlačení formy k sobě a dotažením matic ke šroubům byla spojená forma dána do pece na 80°C 10 minut a 20 minut na 100°C. Po 30 minutách se vzorek vyjme z pece a nechá vychladnout. Poslední fází je oddělení kompozitu od kovových desek. Povolí se všechny matice a vyndají šrouby. Kovové desky se od sebe oddělí a z kompozitu se sejme teflonová pečící fólie, která zabránila nežádoucímu přilnutí kompozitu k deskám. Tento proces výroby kompozitu je poměrně obtížný počínaje ručním kladením vláknové výztuže, přes její dokonalé prosycení matricí a vytvrzení kompozitu v horkovzdušné peci, až po řezání vzorků přesných rozměrů. Technologický postup musí být totožný u všech vzorků a jednotlivé operace musí být prováděny velmi pečlivě, aby se zamezilo odlišnostem mezi vzorky a vadám v jejich struktuře, které by následně mohly zkreslit výsledky testování.

Vyrobené desky kompozitního materiálu byly rozřezány na vzorky potřebných rozměrů. Vzorky byly řezány na kotoučovém řezacím stroji vždy ve směru podélném

i příčném. Kompozity byly podrobeny mechanickým zkouškám pevnosti v tahu, tříbodovém ohybu a Charpyho testu.

### **3.2.2 Popis použitého měření**

#### **3.2.2.1 Tahová zkouška – rovinné kompozity**

Byly použity jako nejvhodnější manuálně dotahované trhací čelisti. Uživatelsky pohodlnější pneumatické čelisti nebyly schopné vyvinout dostatečný tlak a vzorky během zkoušení prokluzovaly. Upínací délka činila 100 mm, a následně byl vzorek namáhán tahem rychlostí 2 mm/min až do doby, než došlo k poklesu maximální naměřené síly na 90 %. Otestováno bylo vždy 10 vzorků z každé série o rozměrech 150 mm x 20 mm. Aby nedocházelo k poškození vzorků v čelistech, byl proto každý konec vzorku zalepen do tvrdého papíru a teprve poté byl vložen do čelistí trhačky.

#### **3.2.2.2 Ohybová zkouška**

Rozpětí podpěr L bylo nastaveno na 40mm, při rychlosti posuvu 2 mm/min a průhybu X (posun při síle  $F_x$ ) 2mm. Z naměřených hodnot 3- bodého ohybu bylo spočítáno a zjištěno, který ze vzorků má největší modul pružnosti v ohybu E [MPa] a největší napětí v ohybu  $\sigma$  [MPa]. Opět bylo testováno 10 vzorků z každé série.

#### **3.2.2.3 Charpy test**

Na přístroji Charpyho kladivo bylo zjištěno, který ze vzorků má největší houževnatost  $a_{cu}$  [J/mm<sup>2</sup>], při rychlosti kladiva 3,7 [m/s]. V každé kategorii bylo provedeno 10 měření. Zkušební vzorky měly délku 80 mm a šířku 10 mm.

### **3.2.3 Výsledky měření rovinných kompozitů**

#### **3.2.3.1 Výsledky tahové zkoušky**

Nejdříve se testovaly všechny druhy výztuže kladením pod úhlem 0°. Z těchto a předchozích výsledků byl zvolen užší výběr vhodných uhlíkových vláken. Dále byly porovnány už jen 3 typy uhlíkových vláken, které byly zvoleny na základě předchozích výsledků (U1-Tenax, U3-Zoltek a U4-Sigrafil) kladených pod úhlem 45°. Úhel 45° byl zvolený jako nevhodnější pro další použití. V poslední řadě bylo vybráno nejvhodnější uhlíkové vlákno, které se testovalo pod různými úhly křížení vrstev a porovnávalo se s jinými druhy výztuží. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou shrnuty v tabulkách 3.2.2, 3.2.3: modul tažnosti E byly naměřeny na trhacím stroji; napětí  $\sigma$  bylo dopočítáno pomocí základního vzorce pro výpočet napětí s použitím naměřené maximální síly  $F_{max}$  [N] a plochy průřezu S [m].

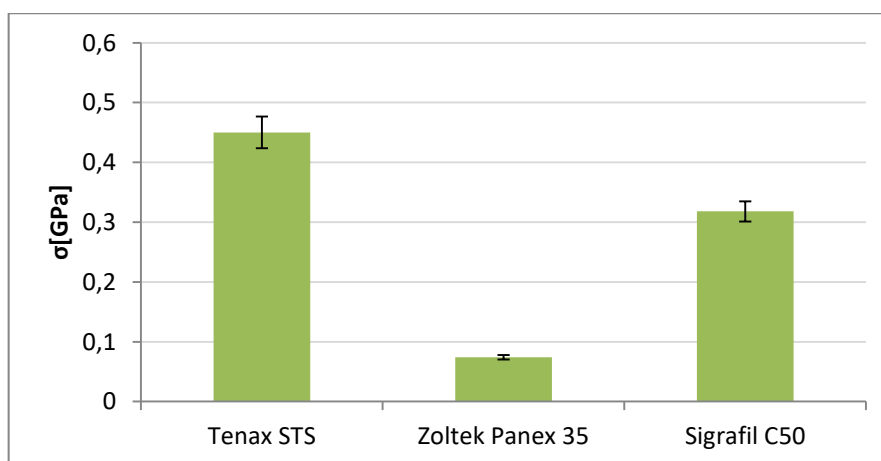
$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3.1)$$

Tab. 3.2.2 - Výsledky tahové zkoušky různých druhů výztuží, výztuž kladena pod úhlem 0° – průměrné hodnoty

Ozn.		$\sigma$ [GPa]	$\Delta 95\% \text{ IS } \sigma$ [GPa]	E [GPa]	$\Delta 95\% \text{ IS E}$ [GPa]
U1a	Tenax STS	0,54	0,034	23,5	1,34
U1b	Tenax HTS	0,61	0,071	23,2	0,71
U1c	Tenax 48K	0,98	0,047	17,17	0,58
U2	Toray	0,194	0,058	22,1	4,69
U3	Zoltek	0,55	0,084	18,55	0,84
U4	Sigrafil C50	0,5	0,022	22,5	2,2
S1	Sklo 2400tex	0,163	0,034	6,5	0,45
Č	Čedič 2520tex	0,345	0,018	3,5	0,81

Tab. 3.2.3 – Výsledky tahové zkoušky matrice bez výztuže

Matrice				
$\sigma$ [GPa]	$\Delta 95\% \text{ IS } \sigma$ [GPa]	E [GPa]	$\Delta 95\% \text{ IS E}$ [GPa]	A [%]
0,05	0,002	1,5	0,02	3,6

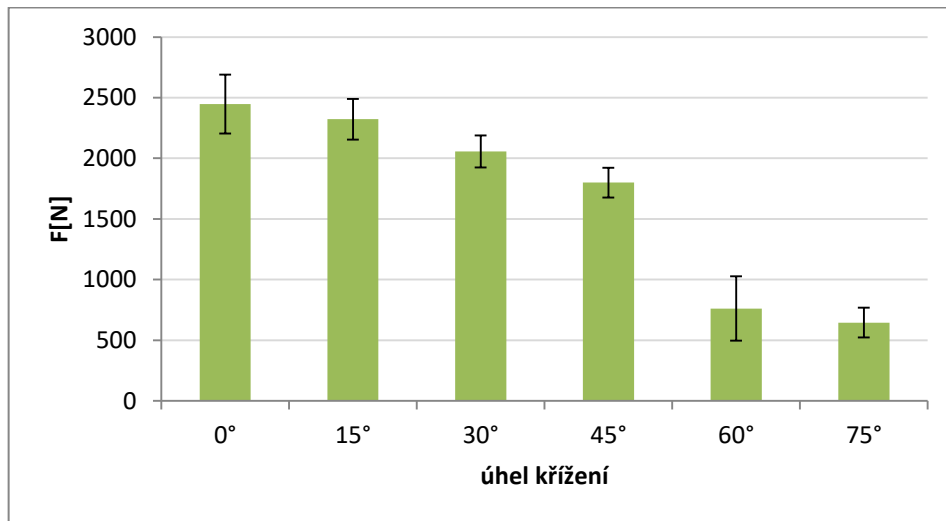


Obr. 3.2.3 – Tahové napětí při přetruhu dvouvrstvých kompozitů pouze s uhlíkovou výztuží od různých výrobců a křížením výztuže pod 45°.

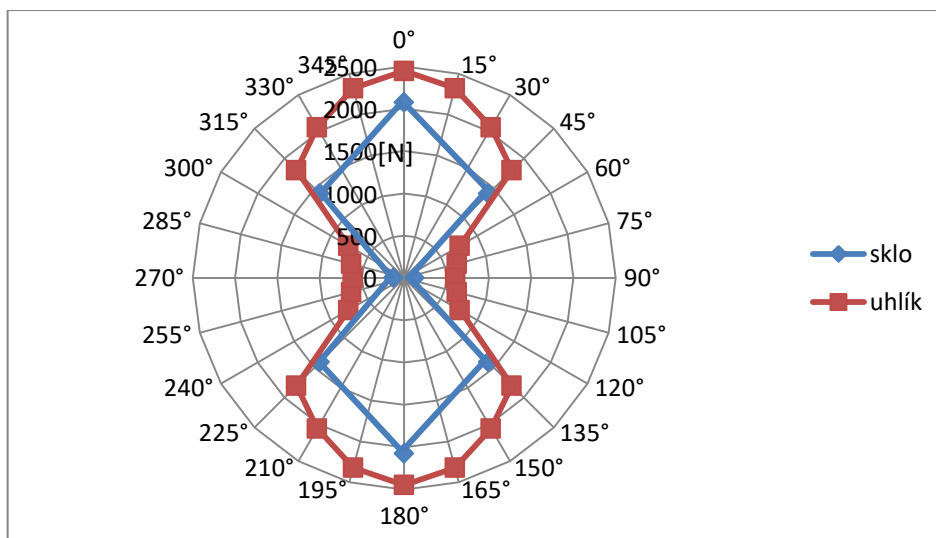
Předpokládalo se, že nejlepších výsledků tahové zkoušky dosáhnou vlákna Toray, jelikož tato vlákna patří k těm nejdražším a protože při hodnocení samotných rovingů vlákna vykazovala nejlepší mechanické vlastnosti, viz. obr. 3.1.3, naopak nejnižších hodnot pevnosti dosahovala uhlíková vlákna Zoltek. U těchto dvou vláken byl vidět výrazný rozdíl od ostatních už na první pohled. Roving Toray byl velmi uhlazený (vlákna z něj nevyčnívala) a na rozdíl od ostatních, držel svůj tvar a byl tuhý. Naopak Zoltek už v dodaném stavu byl velmi hrubý a neuhlazený (vlákna z něj vyčnívala). Po zalití do matrice vlákna Toray ztratila svojí předchozí pevnost, což je vidět v tabulce 3.2.3. Pokles mechanických vlastností u vláken Toray mohl být způsobený vlivem špatného výběru vláken. Vlákna totiž mají tzv. sizing, který by měl být kompatibilní s matricí, pokud není, dochází ke špatnému spojení vláken s matricí

a ztrátě vlastností. Dále byly vyrobeny dvouvrstvé uhlíkové kompozity s úhlem křížení vrstev 45°.

Na obrázku 3.2.3 jsou porovnávána pouze 3 kompozity s různými druhy uhlíkové výztuže. Tyto výztuže byly vybrány na základě předchozích výsledků. Dle obrázku 3.2.3 nejlepších výsledků dosáhl uhlík Tenax STS. Proto byla zvolena nejvhodnější vlákna pro další experimenty vlákna Tenax STS, rozhodovalo hlavně poměr cena/výkon. Vlákna Tenax STS byla dále použita při výrobě a zkoušení různých druhů kompozitů pod různými úhly křížení vrstev a různými počty vrstev. Pro vhodnější srovnávání různých druhů vláken se výsledná síla přepočítala na napětí, dle vzorce 3.1.



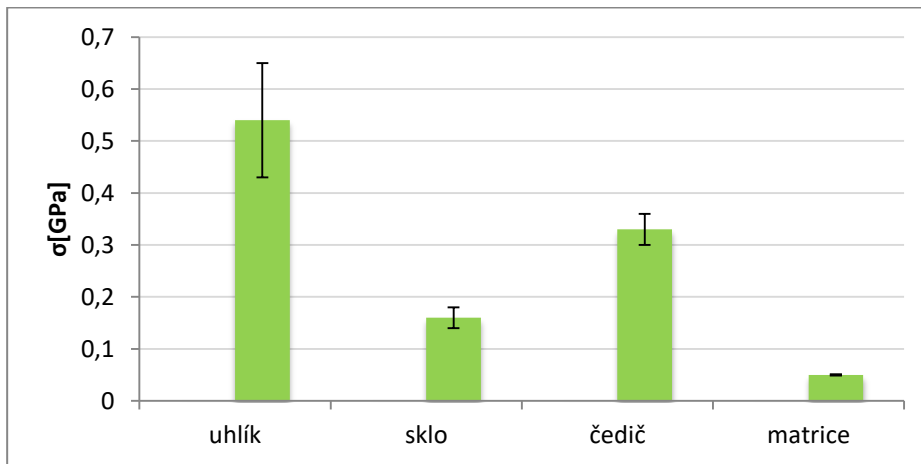
Obr. 3.2.4 – Maximální tahová pevnost dvouvrstvého uhlíkového kompozitu s výztuží Tenax s různými úhly křížení (červená čára zobrazuje průměrnou tahovou sílu samotné matrice).



Obr. 3.2.5 – Maximální tahová pevnost skleněného a uhlíkového kompozitu s různými úhly křížení.

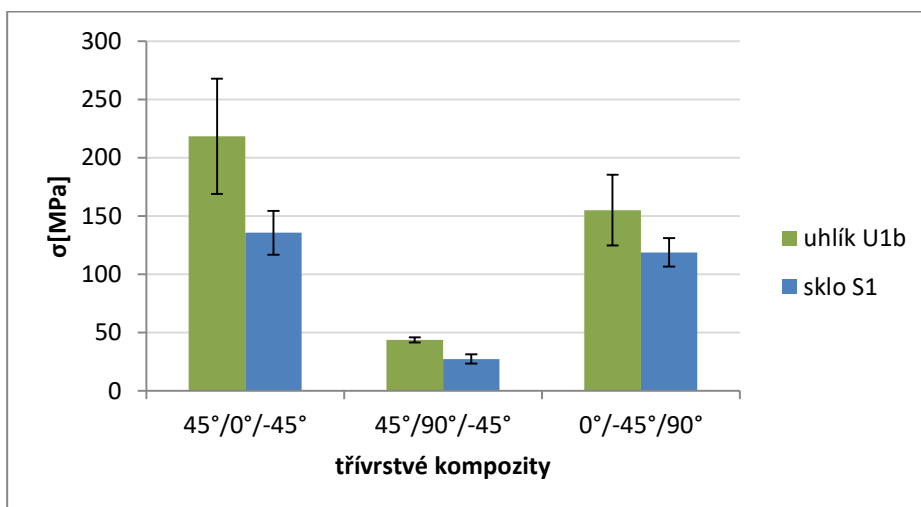


Na základě předchozích výsledků byl vybrán nejvhodnější uhlíkový roving Tenax STS (U1a), ze kterého byly dále vyrobeny různé typy kompozitů, které poté byly srovnávány s ostatními druhy kompozitů z čedičových a skleněných vláken. Obrázky 3.2.4 a 3.2.5 zobrazují, že nejvyšších hodnot v tomto měření dosáhl jednovrstvý uhlíkový kompozit, který je kladen pod  $0^\circ$  k ose kompozitu. Úhel  $0^\circ$  dosáhl nejvyšší síly při přetrhu, ale jedná se pouze o jednovrstvý kompozit na rozdíl od ostatních úhlů, které jsou dvouvrstvé. Proto v dalších hodnoceních se již úhel  $0^\circ$  nevyskytuje z důvodu porovnatelnosti výsledků. Toto měření ukázalo, že zvýšením úhlu kladení výztuže na více než  $45^\circ$ , pak se pevnost kompozitu rapidně sníží a vlákna už neplní funkci výztuže.



Obr. 3.2.6 – Tahové napětí při přetrhu jednovrstvých kompozitů s různými druhy výztuže pod úhlem  $0^\circ$ .

Další obrázek 3.2.6 zobrazuje tahové napětí jednovrstvých kompozitů s různými druhy výztuže pod úhlem  $0^\circ$ . Zde dosáhl nejvyššího tahového napětí uhlíkový kompozit.



Obr. 3.2.7 – Tahové napětí při přetrhu třívrstvých kompozitů s různými druhy křížení výztuže.

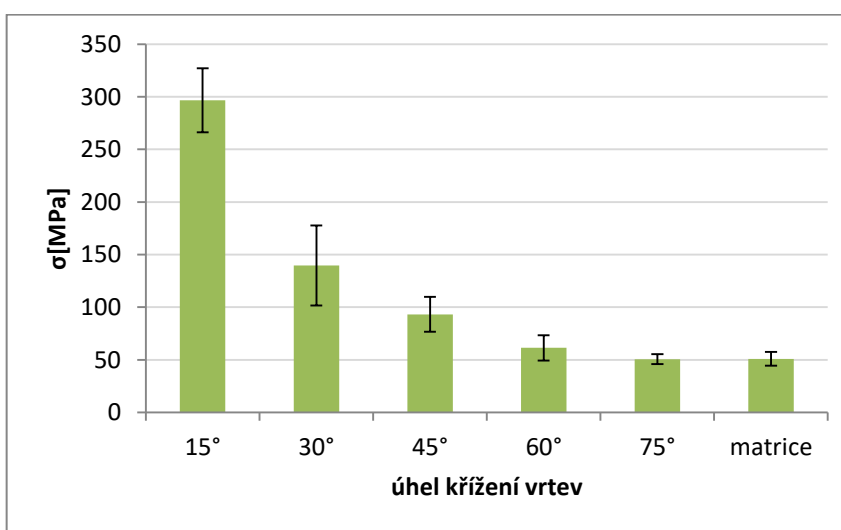
Obrázek 3.2.7 zobrazuje třívrstvé kompozity s různými druhy křížení výztuže. I v těchto případech mají největší tahové napětí uhlíkové kompozity, hlavně takové, které obsahují výztuž s 0°.

### 3.2.3.2 Výsledky statické ohybové zkoušky

Statickou ohybovou zkouškou byly testovány už jen kompozity s uhlíkovými vlákny Tenax STS – U1a, skleněnými a čedičovými vlákny. Byly vyrobeny kompozity s různými druhy křížení vrstev a počty vrstev.

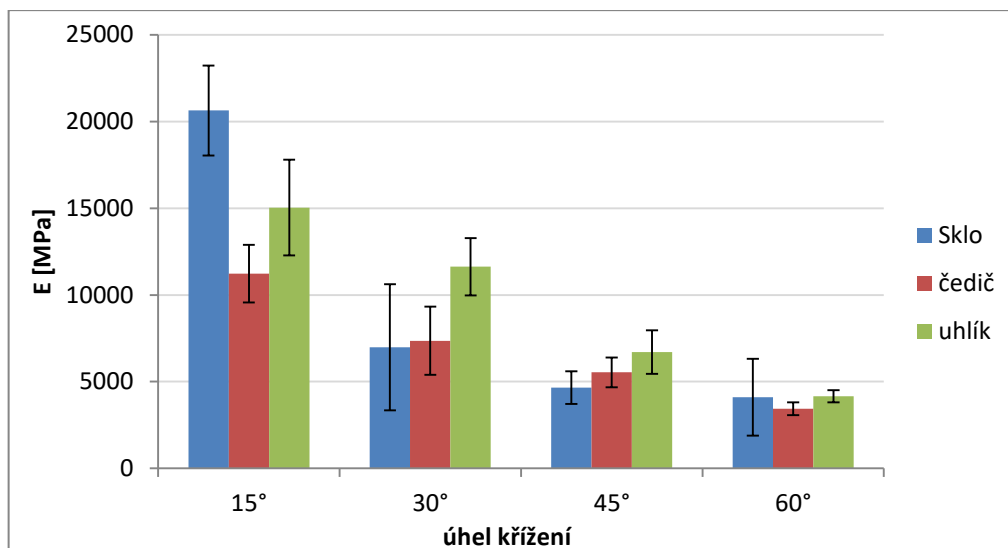
Tab. 3.2.4 - Průměrné hodnoty dvouvrstvého uhlíkového kompozitu s různými úhly křížení

	$\sigma$ [MPa]	E [GPa]	$\Delta 95\%IS \sigma$ [MPa]	$\Delta 95\%IS E$ [GPa]
15°	296,6	15,2	38,17	2,4
30°	139,62	11,67	16,56	1,5
45°	93,18	6,7	12,05	1,1
60°	61,38	4,1	4,68	0,3
75°	50,61	3,5	6,5	0,4
0°	252,6	30,80	30,4	5,3
matrice	50,87	2,1	2	0,2



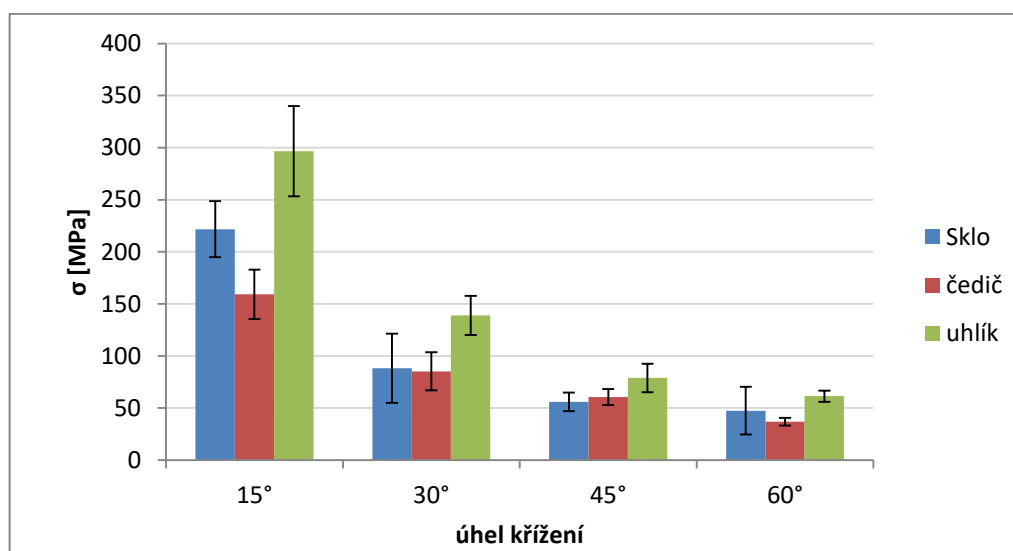
Obr. 3.2.8 – Napětí v ohybu dvouvrstvého uhlíkového kompozitu s různými úhly křížení.

Ze získaných hodnot (obr. 3.2.8 a tab. 3.2.4) bylo zjištěno, že jednoznačně nejvyšší napětí v ohybu a modul pružnosti vykazuje kompozit s úhlem křížení vrstev 15°.



Obr. 3.2.9 - Modul v ohybu dvouvrstevých kompozitů s různými druhy výztuže.

Nejvyšší modul v ohybu měl skleněný kompozit s úhlem křížení vrstev 15° (Obrázek 3.2.9). Při zvýšení úhlu křížení vrstev se u skleněného kompozitu hodnota modulu výrazně sníží.

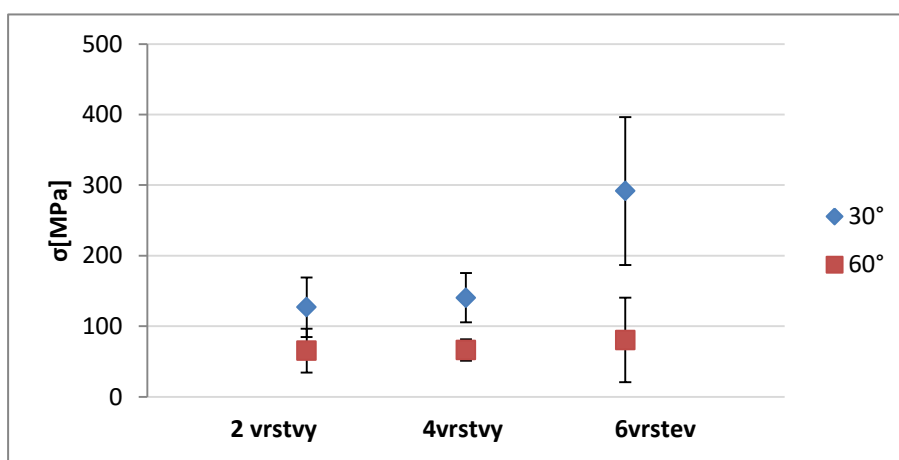


Obr. 3.2.10 – Napětí v ohybu dvouvrstevých kompozitů s různými druhy výztuže.

Při porovnání různých druhů výztuží (obr. 3.2.10) bylo zjištěno, že nejvyšší napětí v ohybu má vždy uhlíkový kompozit s jakýmkoliv úhlem křížení výztuže. Výsledky čedičového a skleněného kompozitu jsou velmi podobné. Při úhlu křížení vrstev 15° má výrazně vyšší hodnotu napětí v ohybu skleněný kompozit. Zvýšení úhlu křížení vrstev jsou napětí zcela srovnatelné.

Tab. 3.2.5 - Získané průměrné hodnoty různě vrstveného uhlíkového kompozitu (30° a 60°).

vzorky	$\sigma$ [MPa]	s[MPa] napětí	v[%] napětí	95% $\Delta$ IS napětí
U1a 30°/2vr	127,01	37,4	29,4465	42,32
U1a 60°/2vr	65,47	27,3	41,69849	30,89
U1a 30°/4vr	140,54	30,77	21,89412	34,81
U1a 60°/4vr	66,36	13,32	20,07233	15,07
U1a 30°/6vr	291,64	92,63	31,76176	104,82
U1a 60°/6vr	80,66	49,35	61,18274	59,79



Obr. 3.2.11 – Napětí v ohybu různě vrstveného uhlíkového kompozitu U1a.

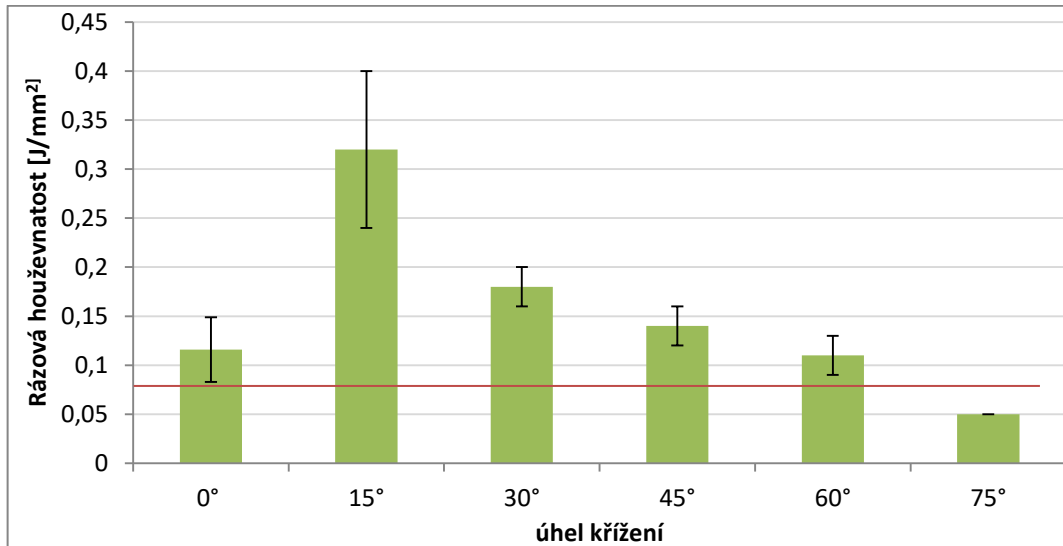
U této zkoušky byly zkoušeny různě vrstvené uhlíkové kompozity, obrázek 3.2.11 a tabulka 3.2.5. Z předchozích tabulek víme, že zmenšením úhlu křížení, zvýšíme výsledné hodnoty, a tak je tomu i v tomto případě. Kompozit s 30° křížení má větší napětí v ohybu než kompozit s 60° křížení. Pokud zvýšíme počet vrstev na dvojnásobný, pak se napětí zvýší zejména u kompozitu 30° o cca 10%. Pokud bude počet vrstev trojnásobný, pak se zvýší napětí u kompozitu 60° zvýší o cca 20 % a u kompozitu 30° pak o více než dvojnásobek.

### Závěr ohybové zkoušky

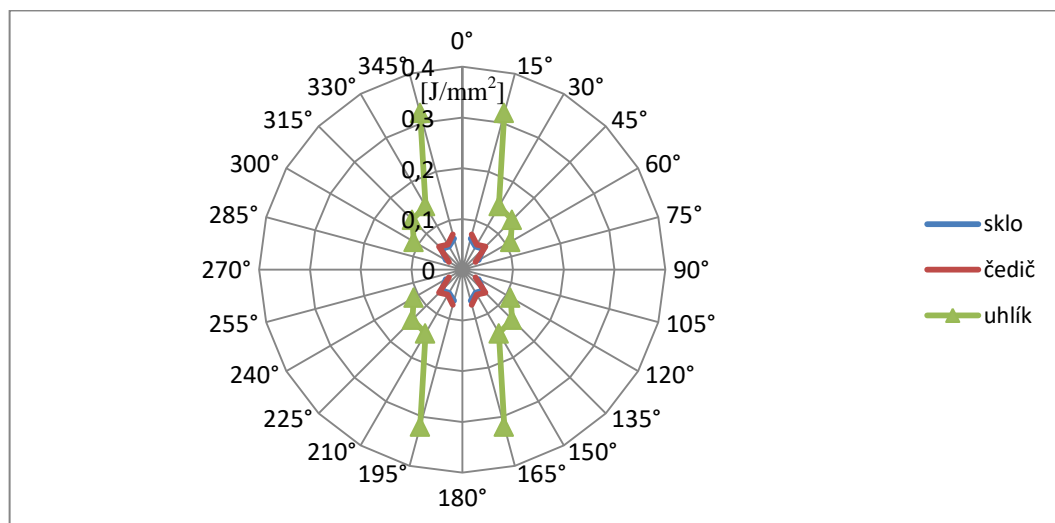
Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že tak jako u tahové zkoušky, má i v tomto případě nejvyšší napětí v ohybu uhlíkový kompozit. Naměřené hodnoty čedičového a skleněného kompozitu jsou si velmi podobné. A tak jako u tahové zkoušky, tak i u této zkoušky má nejlepší výsledky kompozit s nejnižším úhlem křížení vrstev k ose výrobku. Pokud zvýšíme počet vrstev kompozitu, pak se významně zvýší i napětí kompozitu.

### 3.2.3.3 Výsledky Charpyho testu

U této zkoušky byly tetovány také už jen kompozity s uhlíkovými vlákny Tenax STS, skleněnými a čedičovými vlákny. Byly vyrobeny kompozity s různými druhy křížení vrstev a počty vrstev.

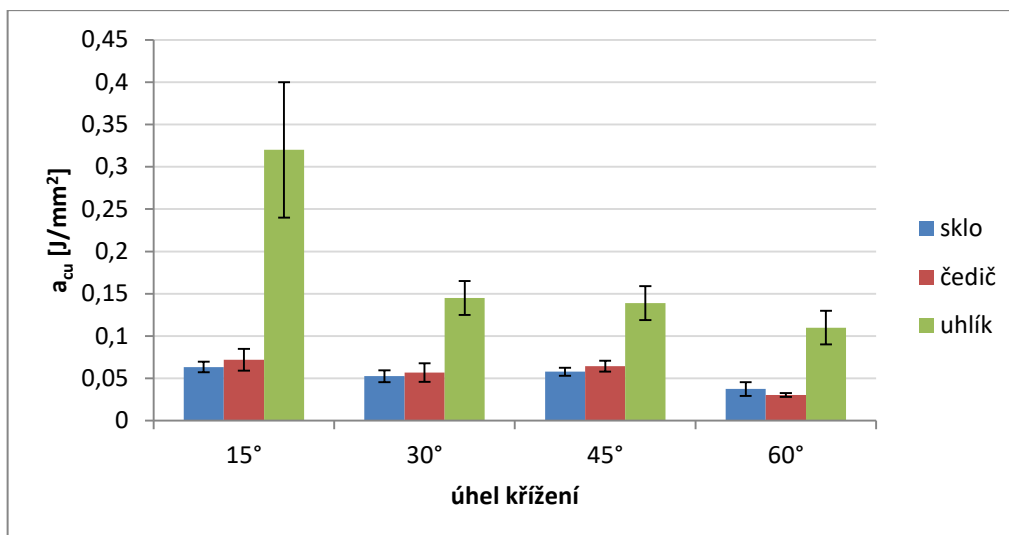


Obr. 3.2.12 - Průměrné hodnoty rázové houževnatosti dvouvrstvého uhlíkového kompozitu (červená čára zobrazuje rázovou houževnatost matrice).



Obr. 3.2.13 - Průměrné hodnoty rázové houževnatosti dvouvrstvého kompozitu s různými druhy výztuže.

Výsledky Charpyho testu na obrázku 3.2.12 a 3.2.13 potvrdily počáteční předpoklady. Nejvyšší rázovou houževnatost měl dvouvrstvý kompozitní materiál s výztuží křížící se pod nejmenším úhlem k ose výrobku. 0° představuje kompozit pouze jednovrstvý. S rostoucím úhlem křížení vrstev rázová houževnatost klesá téměř lineárně.



Obr. 3.2.14 - Průměrné hodnoty rázové houževnatosti dvouvrstvého kompozitu s různými druhy výztuže.

Tab. 3.2.6 - Získané průměrné hodnoty rázové houževnatosti různě vrstveného uhlíkového kompozitu (60° a 30°).

	60° [J/mm <sup>2</sup> ]	95% IS 60° [J/mm <sup>2</sup> ]	30° [J/mm <sup>2</sup> ]	95% IS 30° [J/mm <sup>2</sup> ]
<b>2-vrstvý</b>	0,109	0,02	0,145	0,02
<b>4-vrstvý</b>	0,091	0,019	0,18	0,035
<b>6-vrstvý</b>	0,113	0,012	0,201	0,021

### Závěr Charpyho testu

Nejvyšší rázovou houževnatost měl dvouvrstvý kompozitní materiál s uhlíkovou výztuží a šesti vrstvé uhlíkové kompozity, tabulka 3.2.6. Naopak nejnižší houževnatost má skleněný kompozitní materiál, obrázek 3.2.14. To bylo dáno tím, že skleněný kompozit byl velmi pružný a při Charpyho testu proklouzl mezi čelistmi při nárazu kladiva. Zkušební vzorky, po provedení Charpyho testu, vykazují různé typy poškození. U čedičového a uhlíkového kompozitu docházelo ve většině vzorků k úplnému přeražení vzorku. U skleněného kompozitu ve většině vzorků docházelo pouze k popraskání vzorku. Z předchozích tabulek víme, že čím menší úhel křížení, tím větší naměřené mechanické vlastnosti a tak je tomu i v tom to případě.

### 3.2.4 Závěr z testování rovinných kompozitů

Vyrobené kompozitní materiály byly podrobeny několika mechanickým zkouškám, při nichž se testovaly vlastnosti kompozitu v tahu, 3-bodém ohybu a rázová houževnatost metodou Charpy. Vyrobeny byly dvouvrstvé polymerní kompozity vyztužené paralelně uspořádanými kontinuálními vlákny s úhly křížení vrstev 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° k ose výrobku. Dále byly vyrobeny 4 a 6-ti vrstvé uhlíkové kompozity s úhly křížení 30° a 60° k ose výrobku proto, aby se zjistilo, o kolik se změní vlastnosti kompozitu přidáním více vrstev a jak velký rozdíl bude při použití vláken s jinými úhly křížení.

Největší vyztužující účinek budou mít uhlíková vlákna kladena rovnoběžně se směrem namáhání kompozitu a bude postupně se zvyšujícím se odklonem klesat. To je dáno uspořádáním uhlíku. Atomy uhlíku jsou v ideálním případě uspořádány v paralelních rovinách (tzv. bazálních) s osou vlákna a v této rovině atomy vytváří síť s hexagonálním motivem. Atomy jsou v této rovině pospojovány mezi sebou silnou kovalentní vazbou a atomy umístěné v paralelních rovinách, jsou vázány mnohem slabší Van der Waalsovou silou. Díky tomu, že je uhlík pevně vázán pouze se třemi nejbližšími atomy ležícími v téže rovině a se čtvrtým atomem, nacházejícím se v paralelní rovině je vázán slabě, dochází ke snadné štěpnosti ve směru, který je k těmto rovinám rovnoběžný. Tahová zkouška ukázala, že nejvyšších hodnot v tomto měření dosáhl uhlíkový kompozit, který je kladen po  $0^\circ$  k ose kompozitu. Pokud zvýšíme úhel kladení na více než  $45^\circ$ , pak se mechanické vlastnosti rapidně sníží a vlákna už neplní funkci vyztuže.

U statické zkoušky tříbodovým ohybem – napětí v ohybu se zvyšujícím se úhlem křížení klesá. Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že tak jako u tahové zkoušky, má i v tomto případě nejvyšší hodnoty uhlíkový kompozit. A tak jako u tahové zkoušky, tak i tady má nejlepší výsledky kompozit s nejnižším úhlem křížení vrstev k ose výrobku. Pokud zvýšíme počet vrstev na dvojnásobný, pak se napětí zvýší zejména u kompozitu  $30^\circ$  o cca 10 %. Pokud bude počet vrstev trojnásobný, pak se zvýší pevnost u kompozitu  $60^\circ$  zvýší o cca 20% a u kompozitu  $30^\circ$  pak o více než dvojnásobek.

Je možné potvrdit závislost rázové houževnatosti materiálu na úhlu křížení vrstev. Nejvyšší rázovou houževnatost vykazuje kompozitní materiál s čedičovou vyztuží. Tak jako v předchozích testech má nejvyšší rázovou houževnatost kompozitní materiál s vyztuží křížící se pod nejmenším úhlem k ose výrobku. S rostoucím úhlem křížení vrstev rázová houževnatost klesá. Zkušební vzorky po provedení Charpyho testu vykazují různé typy poškození, nebyla však zjištěna souvislost mezi úhlem křížení vrstev a typem poškozením vzorku. Z naměřených hodnot je zřejmé, že čím menší je úhel křížení, tím větší vliv to má na hodnoty rázové houževnatosti při zvyšování vrstev.

Důležité bylo kladení rovingu při výrobě těsně vedle sebe, aby v kompozitu nevznikaly mezery. Protože mezery poté způsobovaly nižší pevnost kompozitu.

Nelze však úplně porovnávat uhlíková vlákna se skleněnými a čedičovými vlákny, která jsou amorfní. Avšak nejlepšími výsledky většinou dosahovala uhlíková vlákna, pokud se snížil úhel křížení vrstev alespoň na  $45^\circ$ , pak byly výsledky všech vláken velmi srovnatelné. Při porovnání čedičových a skleněných vláken převažují vyšší hodnoty u vláken čedičových, ale pouze nepatrně, proto lze říct, že vlastnosti těchto dvou vláken jsou si velmi podobné. Nelze říct, které je celkově lepší či horší.

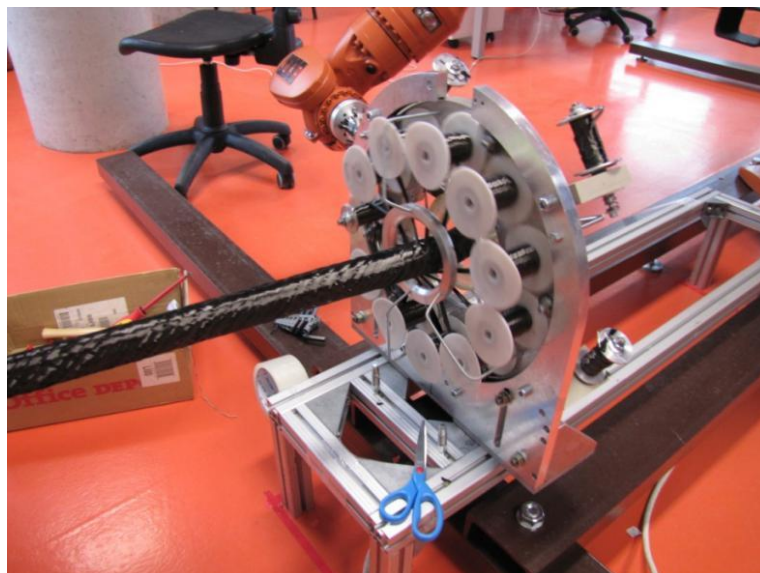
### 3.3 VÝROBA A ZKOUŠENÍ KOMPOZITNÍCH TRUBEK

Dříve než byla zahájena výroba konečných výrobků (rámů), bylo zapotřebí vyzkoušet vyvinutý ovinovací stoj, proto byly vyrobeny jádra z PUR pěny, na které se navinula vlákna. Trubky byly využity i při testování vlastností takto vyrobených kompozitních prvků. Tato kapitola popisuje výrobu, hodnocení a testování kompozitních trubek.

#### 3.3.1 Popis použitého materiálu na výrobu kompozitních trubek

Po předchozích měřeních, pro snadné navíjení vláken a pro dosažení rovnoměrného pokrytí jádra byl zvolen úhel navíjení rovingů na  $45^\circ$  a  $0^\circ$ . Počet vrstev byl zvolen s ohledem na to, aby docházelo ke snadnému zapěnění navinutých trubek, aby se trubky vešly do formy pro zapěnění. Ještě před výrobou celých kompozitních dílů byly pro první pokusy tohoto experimentu navrženy zahnuté trubky o kulatém profilu 4 cm, výsledky experimentu těchto trubek poté napomohly při výrobě celých rámů. Jako ovíjecí zařízení byl původně navržen otevřený prstenec (pro vstup uzavřeného 3D tvaru) s deseti cívkami pro kladení vláknenných rovingů na jádro pod zadaným úhlem. Prstenec byl doplněn dalšími šesti cívkami pro vedení rovingů pod úhlem  $0^\circ$ . Zařízením bylo ovinuto několik technologicky a materiálově odlišných sérií, jednotlivé série jsou zobrazeny v tabulce 3.3.1. Na základě prvních experimentů byla navržena nová hlava (původní otevřený prstenec), která se skládá ze dvou oddělitelných částí; rám je osazen celkem třemi sadami cívek po 12 kusech: dvě sady pro ovíjení pod úhlem (jedna sada je součástí oddělitelné části rámu), jedna pro vedení pod úhlem  $0^\circ$ , obrázek 3.3.1.

Proběhl vývoj na Katedře části a mechanismy strojů pneumatického úchopného zařízení neseného robotem, který bude manipulovat 3D rámem (posuv a otáčení). Současně bylo navrženo a sestaveno převíjecí zařízení na VÚTS, které má za úkol zajistit přesoukání vytipovaných rovingů na cívky ovíjecího zařízení.



Obr. 3.3.1 – První ovíjení jader.

Na přání zadavatele a po dohodě ohledně technologických parametrů ovíjení bylo ovinuto od každé série 5 kusů jader ve tvaru zahnuté hole. U kompletních sérií pak



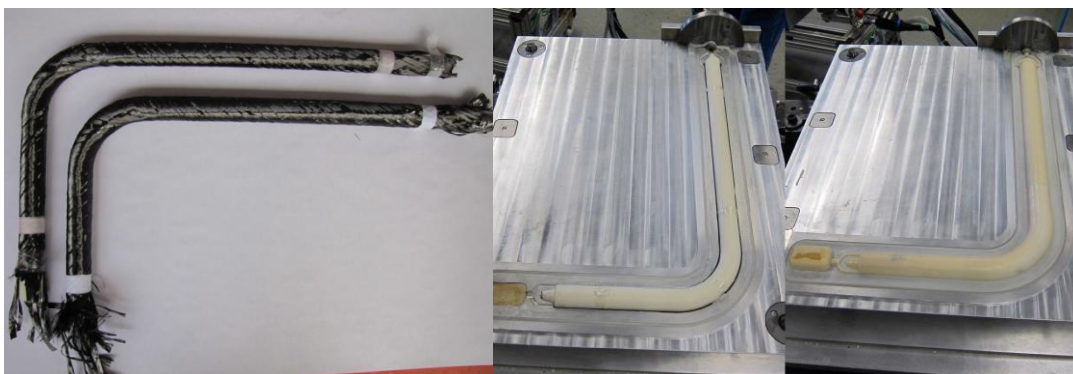
proběhlo úspěšně zapěnění PUR či epoxidovou matricí, obrázek 3.3.2 (zajištěno zadavatelem u firem BASF a HUNTSMAN).

Tab. 3.3.1 – Specifikace navinutých trubek.

série	materiál	vrstvy	podrobnosti
H	Tenax STS 24K	+45°/0°/±45°/0°/-45°	11+6
J	Tenax STS 24K	+45°/0°/±45°/0°/-45°	10+6
M	Tenax STS 24K	+45°/0°/±45°/0°/-45°	11+6
R	Zoltek 50K	+45°/0°/-45°	11+6
S	Tenax STS 48K	+45°/0°/-45°	11+6
T	Toray T700SC	+45°/0°/±45°/0°/-45°	11+6
U	Toray T700SC	+45°/0°/±45°/0°/-45°	11+6
AH	Sklo 2400tex	+45°/0°/±45°/0°/-45°	12+12
AK	Mix Sklo 2400tex + 900tex	+45°/0°/±45°/0°/-45°	12+12
AG	Mix Tenax 24K + Sklo 2400tex	+45°/0°/±45°/0°/-45°	11+6
AQ	Sigrafil C50	+45°/0°/±45°/0°/-45°	12+12
AP	Sklo – neznámý výrobce	+45°/0°/±45°/0°/-45°	12+12
AR	Sklo – neznámý výrobce	+45°/0°/±45°/0°/-45°	12+12

Vrstvy: posloupnost vrstev a nastavení pramene úhlu k hlavní ose.

Podrobnosti: 11 (10) = počet cívek pro jednu vrstvu ± 45 °; 6 a 12 = počet cívek pro vrstvu 0°.



Obr. 3.3.2 – Navinuté jádro uhlíkem a samotné jádro před a po zalití do matrice.

U série U došlo ke špatnému zapěnění matrice, proto již tato série nebyla dále zkoušena. Snímky špatného zapěnění jsou v příloze 1. Ostatní série byly postoupeny do ITC Zlín k testům mechanických vlastností. V rámci TUL bylo provedeno hodnocení vnitřní skladby a struktury výsledných kompozitů (REM) a měření rázové houževnatosti. Měření rázové houževnatosti bylo zvoleno z důvodu, aby byly lépe vidět rozdíly mezi sériemi, protože je to citlivý ukazatel. Dále pak z důvodu nárazové namáhání, které je pro výsledný kompozit důležitý.

### 3.3.2 Popis měření

#### Hodnocené veličiny:

- Charpy test z vyrobených trubek,
- objemový podíl: počet procent, která zaujímají vlákna z celkového objemu materiálu kompozitu,
- zpracovatelnost materiálu: subjektivní hodnocení změny kvality materiálu při běžné manipulaci (převíjení),
- kompatibilita matrice vůči vláknům: vyhodnocení na základě snímků z obrazové analýzy a REM,
- míra prosycení: vizuální kontrola rozhraní jádro-kompozit pomocí REM,
- mechanické vlastnosti: hodnocení na základě zkoušek mechanických vlastností provedených ITC Zlín.

#### 3.3.2.1 Charpy test vyrobených trubek

Pro experiment bylo vyrobeno 10 sérií vzorků z rovingu různých výrobců a PU matrice od dvou různých výrobců. Matrice A a B jsou matrice ve vývoji od dvou různých výrobců, které mají stejné mechanické vlastnosti a způsob výroby. Vzorky byly rozděleny podle materiálového složení do následujících sérií, viz tabulka 3.3.2. Počet vzorků v sérii je deset, pouze v sérii J a H s vadami v kompozitní struktuře (defektní matrice – vzduchové bubliny) je vzorků 5. Série P jsou vzorky čisté matrice.

Tab. 3.3.2 - Specifikace vzorků.

	Série	Výztuž	Matrice	Kvalita kompozitu
<b>P</b>	<b>P</b>	-	A	OK
<b>J</b>	<b>Te24v/B</b>	Tenax 24K/ STS40 F13	A	výrazné defekty na vzorcích
<b>J</b>	<b>Te24/B</b>	Tenax 24K/ STS40 F13	A	OK
<b>R</b>	<b>Zo50/B</b>	Zoltek 50K/ Panex 35	A	OK
<b>S</b>	<b>Te48/B</b>	Tenax 48K/ STS40 F13	A	OK
<b>T</b>	<b>To24/B</b>	Toray 24K/ T700SC	A	OK
<b>H</b>	<b>Te24v/H</b>	Tenax 24K/ STS40 F13	B	výrazné defekty na vzorcích
<b>H</b>	<b>Te24/H</b>	Tenax 24K/ STS40 F13	B	OK
<b>T</b>	<b>To24/H</b>	Toray 24K/ T700SC	B	OK
<b>AG</b>	<b>Te24+GF/B</b>	Tenax 24K + sklo 2400tex	A	OK
<b>AH</b>	<b>GF/B</b>	Sklo 2400tex	A	OK
<b>AK</b>	<b>GF+GF/B</b>	Sklo 2400tex+900tex	A	OK

#### 3.3.2.2 Objemový podíl vláken

Pro výpočet procentuálního objemového podílu vláken byl použit následující vzorec:

$$V = \left( \frac{1}{204} \cdot \frac{\text{hmotnost vláken [g]}}{\text{hustota vláken [gcm}^{-3}\text{]}} \right) \cdot 100 \quad (3.2)$$

Hmotnost vláken byla jako rozdíl hmotností holého a ovinutého jádra, hustota vláken je hodnota uváděná výrobcem a číslo 204 je kavita formy [cm<sup>3</sup>]. Tento výpočet byl navržen tak, aby byl použitelný obecně. U rovingů 24K má návin celkem 6 vrstev, u rovingů s vyšším K je počet vrstev pouze tři. Předpokládáme zhruba stejný objemový podíl vláken.

### **3.3.2.3 Zpracovatelnost uhlíkového materiálu**

Byly použity uhlíkové rovingy celkem od tří dodavatelů. Základní vlákno je uhlíkové, délková hmotnost rovingů je při daném počtu elementárních vláken (24K nebo 48/50K) stejná, materiály se liší tzv. sizingem - apretace směsí látek, která by měla zajistit budoucí afinitu matrice vůči rovingu. Sizing může ovlivnit i vzhled, omak a zmíněnou zpracovatelnost daného rovingu. Toto hodnocení je subjektivní a vychází z osobních zkušeností při pracování s tímto druhem vláken.

### **3.3.2.4 Kompatibilita matrice vůči vláknům**

Kompatibilitu matrice s vlákny má zajistit sizing - speciální směs individuálního složení (každá firma používá vlastní chráněný předpis), zajišťující při následném finálním procesu výroby kompozitu co nejlepší prosycení vlákenné vrstvy matricí a co nejlepší mechanické vlastnosti výsledku.

První pokusy byly takové, že se vzorek připravil klasickým způsobem, tedy kompozit se zalil do Dentakrylu a poté byl obrušován, dokud nebyl dostatečně hladký a čistý, dle metodiky přípravy tvrdých řezů. Poté se hodnotil pomocí mikroskopu. To se ale ukázalo jako nevhodné pro tyto účely, protože Dentakryl se zalil do celého kompozitu a uhlíková vlákna pak nebyla možné pozorovat.

Pro vyhodnocení kompatibility byly vybrány snímky REM ze všech sérií. Vzorky byly odebrány z každé série ze stejných míst trubek, aby snímky mohly být porovnány. Obrázek 3.3.3. zobrazuje vzorky před samotnou přípravou vzorků pro analýzu; na obrázku 3.3.3 - b) je na kompozitním skinu vyznačené místo, které je předmětem zkoumání. Takto připravené vzorky se pomocí brusného zařízení obrousily za mokra, dokud nebyly dostatečně hladké a čisté.

Dalším způsob zjišťování kompatibility matrice s vlákny bylo při lomu samotného kompozitu. Jádro se odstranilo a samotný kompozit byl ulomen. Z lomu pak byla pomocí REM zjišťována kompatibilita matrice s vlákny. Vzorky ulomených kompozitů jsou zobrazeny na obrázku 3.3.4.

Za vadné místo je považována trhlinka nebo vzduchová bublina ve hmotě kompozitu; trhlinky, v nichž jsou vidět holá elementární vlákna, trčící z matrice – vytržená vlákna (obr. 3.3.15 a 3.3.16). Všechny popsané vady vedou ke snížení mechanických vlastností výsledného kompozitu.



a)

b)

Obr. 3.3.3 – Příprava vzorků k analýzám, a) vzorky pro analýzu, b) vyznačené místo zkoumání.



Obr. 3.3.4 – Připravené vzorky k analýze lomu.

### 3.3.2.5 Míra prosycení vláken

Pro hodnocení byly využity snímky z REM (detaily rozhraní jádro-kompozit), které na více místech zachycují rozložení vlákně vrstvy ve hmotě kompozitu a trhliny právě na rozhraní. Pro zjištění míry prosycení vláken byly použity stejné postupy a tím pádem i stejné vzorky jako při zjišťování kompatibility. Za kladný výsledek je považován případ, kdy nevznikla trhlina, ale matrice pronikla vlákněnou vrstvou a pronikla do pórů jádra. Za záporný výsledek je považován případ, kdy vznikla trhlina, matrice pronikla vlákněnou vrstvou, ale nepronikla do pórů jádra (obr. 3.3.19). Neprosycená vlákna se nepodílejí na pevnostních charakteristikách kompozitu a tím je snižují.

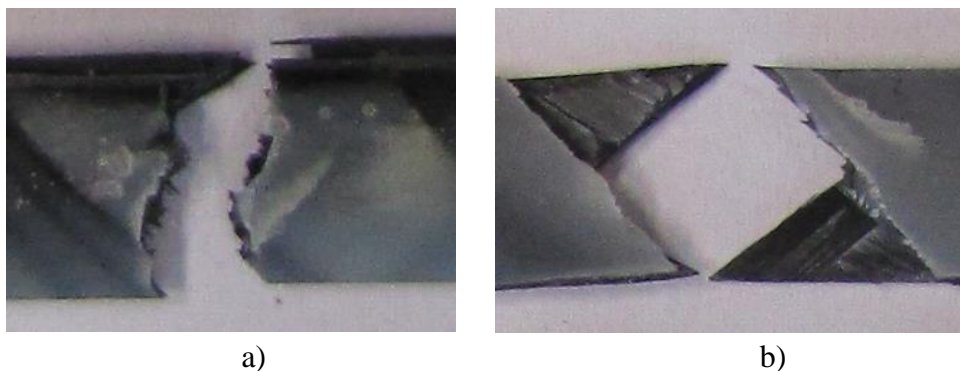
### 3.3.3 Vyhodnocení získaných dat

#### 3.3.3.1 Vyhodnocení Charpy testu segmentů trubek

Tab. 3.3.3 – Výsledky testu houževnatosti trubek.

	série	Průměrná hodnoty houževnatosti [J/mm <sup>2</sup> ]	Směr. Odchylka [J/mm <sup>2</sup> ]	Var. Koef. [%]
S	Te48/B	0,226	0,094	43,7
T	To24/B	0,31	0,11	35,04
R	Zo 50/B	0,214	0,076	35,57
J	Te24v/B	0,225	0,1	44,4
H	Te24v/H	0,2	0,07	35
P	P/B	0,085	0,035	41,47
AG	Te24/GF/B	0,3	0,09	33,89
AH	GF/B	0,3	0,092	32,8
AK	GF+GF/B	0,27	0,06	23,78
T	To24/H	0,287	0,056	19,76
J	Te24/B	0,256	0,086	32,74
H	Te24/H	0,263	0,063	24,6

Z hlediska charakteru lomu vzorku při testu Charpyho kladivem byly identifikovány dva způsoby lomu vzorku (obr. 3.3.5): první způsob, kdy je vzorek přelomen kolmo k ose vzorku a druhý způsob, kdy jsou oddělené vrstvy a lom vykazuje charakteristický vzhled. Dohromady dává počet oběma způsoby přerušovaných vzorků počet vzorků úplně přeražených.



Obr. 3.3.5 – a) Lom kolmo k ose vzorku; b) oddělení vrstev – delaminace.

Rázová houževnatost je jedním z běžně používaných kritérií hodnocení kvality kompozitního materiálu. V tomto případě byly hodnoceny vzorky z celkem čtyř typů vláken čtyř výrobců v kombinaci s polyuretanovou matricí dvou výrobců, vzorek samotné matrice a vzorky cíleně defektní (vzduchové bubliny, viditelně popraskaná místa).

Nejlepších výsledků bylo dosaženo u vzorků s vláknovou výztuží Toray v obou matricích, což svědčí především o vysoké kvalitě vláken, protože afinita použité matrice vůči vláknu není 100%. Vnitřní struktura kompozitu vykazuje po kontrole REM defekty

v podobě náhodně rozložených vzduchových bublin střední a menší velikosti. Velmi dobrého výsledku dosáhlo i vlákno Tenax 24K i v mixu se skleněným vláknem a samotné skleněné vzorky. Výsledky ukazují, že i tyto vlákenné výztuže jsou kvalitní a kompatibilita matrice vůči vláknu je lepší, než v předchozím případě. Nižších hodnot pak dosáhla uhlíková vlákna Zoltek, Tenax 48K a obě série vzorků kompozitů s vadami; výsledné hodnoty jsou přibližně stejné. Nejnižší hodnotu houževnatosti měla dle předpokladu samotná matrice.

Z hlediska charakteru lomu zkoumaných vzorků bylo dosaženo následujícího výsledku: u vzorků z vláken Zoltek a Tenax 48K převyšuje počet vzorků s oddělenými vrstvami počet vzorků přelomených kolmo k ose vzorku, což je signálem možného špatného spojení mezi vrstvami kompozitu. U ostatních materiálových kombinací je počet vzorků s oddělenými vrstvami nižší (dosahuje přibližně 20 % z počtu úplně přeražených), než počet přelomených kolmo.

Výsledná hodnota houževnatosti je s největší pravděpodobností výrazně ovlivněna kvalitou použitého rovingu. Mechanické vlastnosti závisí nejen na vlastnostech jednotlivých složek kompozitu, ale zejména na jejich vzájemném spojení. Stabilita mechanických vlastností kompozitu je dána i pevným spojením vláken s matricí, při porušení spojení dochází k jejich zhoršení. Uhlíková vlákna prochází při výrobě povrchovou úpravou. Tzv. sizing zajišťuje stabilní mechanické vlastnosti během dalšího zpracování vláken. Je velmi důležité brát zřetel na jeho typ. Nevhodný výběr sizingu může negativně ovlivnit afinitu matrice vůči vláknům a ve výsledku zhoršit konečné mechanické vlastnosti kompozitu.

### 3.3.3.2 Výsledky objemového podílu vláken

Tab. 3.3.4 – Výsledné objemové podíly jednotlivých sérií.

série	materiál	Objemový podíl vláken
H	Tenax STS 24K	30,24%
J	Tenax STS 24K	29,52%
M	Tenax STS 24K	30,52%
R	Zoltek 50K	36,3%
S	Tenax STS 48K	28,76
T	Toray T700SC	29,74%
AH	Sklo 2400tex	36,5%
AK	Mix Sklo 2400tex + 900tex	26,05%
AG	Mix Tenax 24K + Sklo 2400tex	29,6%
AQ	Sigrafil	36,16%
AP	Sklo (neznámý výrobce)	34, 54%
AR	Sklo (neznámý výrobce)	33,67%

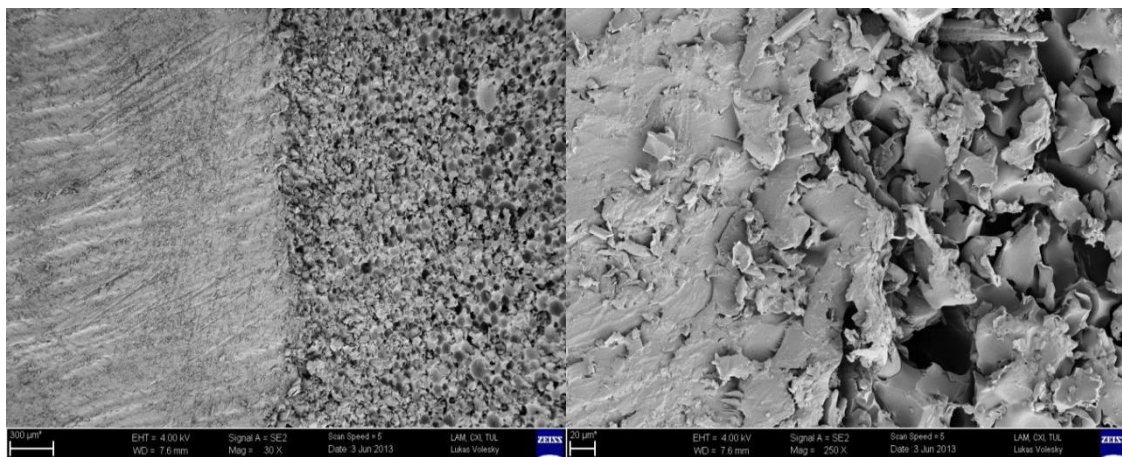
Výsledný objemový podíl se pohybuje v rozmezí od 26 do 37 procent u všech typů materiálů. Nejnižší hodnota objemového podílu je u sérií AK, následují série AG, T, J, H a nejvyšší hodnotu má série R, AQ a AH. Rozdíly jsou zanedbatelné. U rovingů 48/50K je objemový podíl následující: u série S je hodnota objemového podílu 28% a u série R je hodnota objemového podílu 35-37 %. Rozdíl v hodnotě objemového podílu je dán rozdílným počtem elementárních vláken v rovingu (rozdíl činí 2K).

### 3.3.3.3 Výsledky zpracovatelnosti uhlíkového materiálu

Z hlediska zpracovatelských vlastností se jako nejlepší ukázal roving 24K firmy TORAY - elementární vlákna jsou v rovingu rozložena rovnoměrně, rozměry rovingu (šířka a tloušťka) zůstávají konstantní a roving samotný je kompaktní i při práci s materiálem, (zde hodnotíme převíjení z originální cívky dodané výrobcem na cívku o několikanásobně menších rozměrech), při krátkodobém namáhání prakticky nedochází k porušení svazku. Jako druhý nejlepší byl vyhodnocen roving 24K firmy TENAX - při krátkodobém namáhání nedochází k porušení svazku vláken, negativem je změna rozměrů rovingu (šířka a tloušťka) - roving se shrnuje, elementární vlákna se rozdělují do menších svazků a roving následně nepokryje předpokládanou plochu. Materiál má výraznou tendenci k vytvoření falešného zákrutu. U materiálu TENAX 48K je situace obdobná. Jako poslední je hodnocen roving 50K fy ZOLTEK. Při mechanickém namáhání se roving rozpadá na dílčí svazky elementárních vláken, navíc vlákna nemají stejnou délku, což ztěžuje převíjení na cívky menších rozměrů. Roving se shrnuje a počet porušených vláken není zanedbatelný. Byly provedeny testy opotřebitelnosti těchto materiálů, výsledky jsou shrnuty v této práci.

### 3.3.3.4 Vyhodnocení kompatibility matrice vůči vláknům

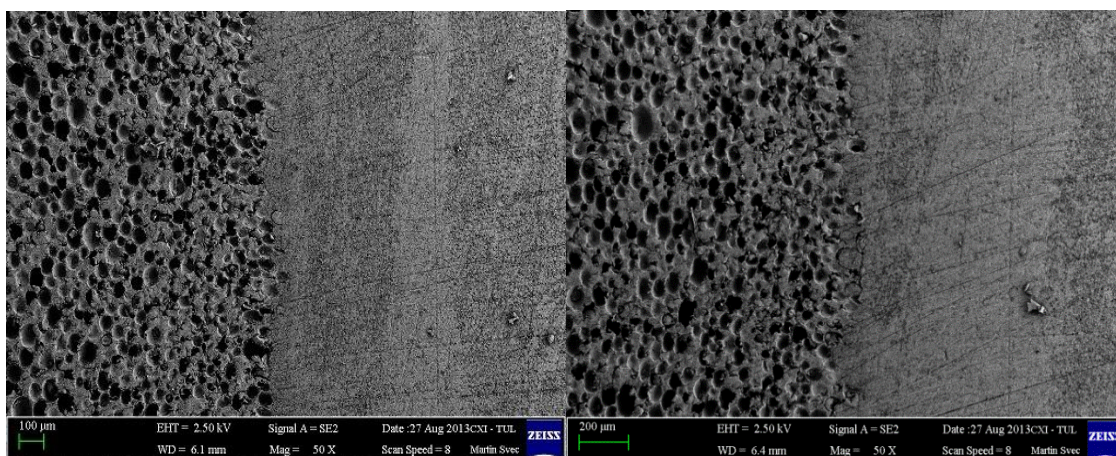
Ke každé sérii bylo zhotoveno několik vzorků (obrázků) plochy. U vybraných sérií. Snímky byly zhotoveny na katedře materiálu fakulty stojní. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny vždy dva vzorky plochy a u posledních sérií i dva vzorky lomu. Všechny zhotovené obrázky nalezneme v příloze 1.



Obr. 3.3.6 – Plošné snímky H série.

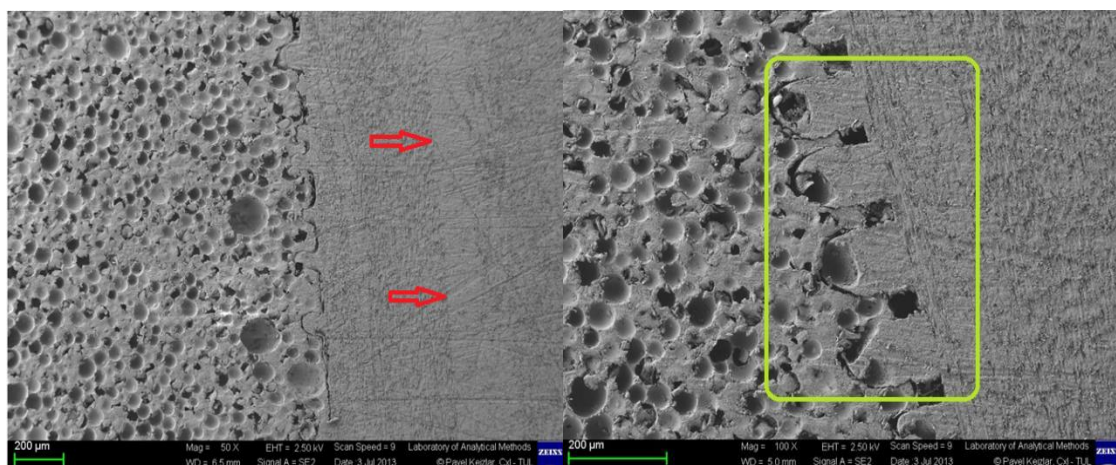
Na obrázku 3.3.6 série H je snímáno rozhraní kompozitu (vlevo) a PUR jádra (vpravo) v různých zvětšeních. Kompozit je bez bublin a vad. Je zde vidět dobrá kompatibility mezi vlákny a matricí. Kompozit se zcela prosytil až k jádru.





Obr. 3.3.7 – Plošné snímky J série.

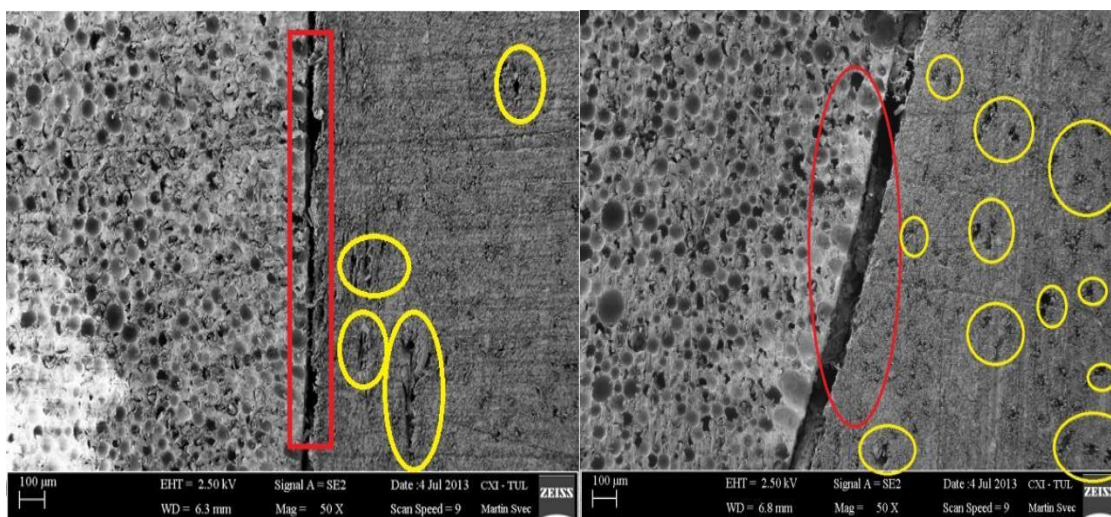
Na obrázku 3.3.7 série J je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a matricí. Snímky jsou bez bublin a vad v kompozitu. Snímáno je rozhraní kompozitu (vpravo) a PU jádra (vlevo) z různých míst kompozitu. Kompozit se zcela prosytil až k jádru.



Obr. 3.3.8 – Plošné snímky M série.

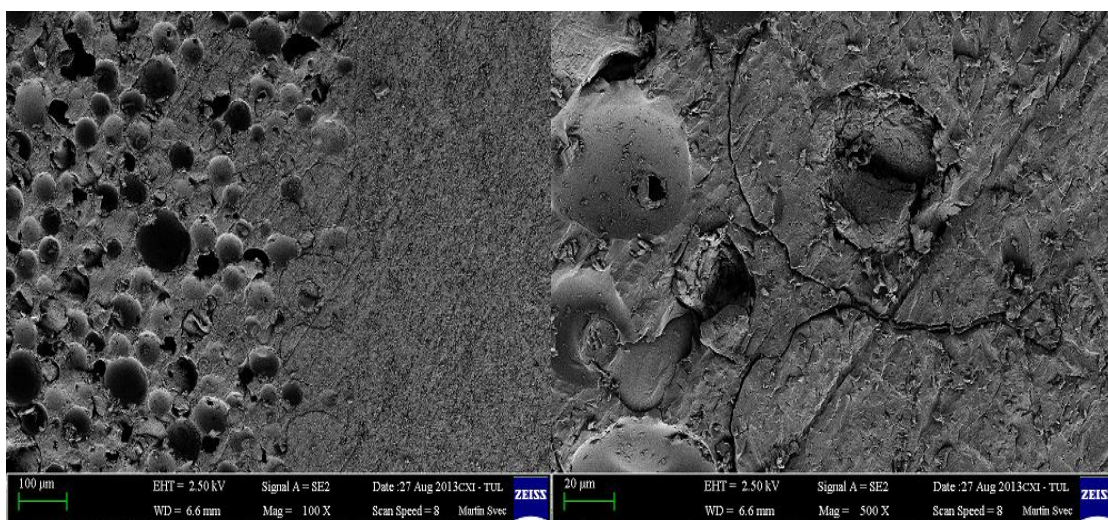
Na obrázku 3.3.8 je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a matricí. Snímky jsou bez bublin a vad v kompozitu. Snímáno bylo rozhraní kompozitu (vpravo) a PUR jádra (vlevo) při různých zvětšeních. U série M vidíme, že matrice na některých drobnějších místech neprosytila až do jádra (žlutý rámeček).





Obr. 3.3.9 – Plošné snímky S série.

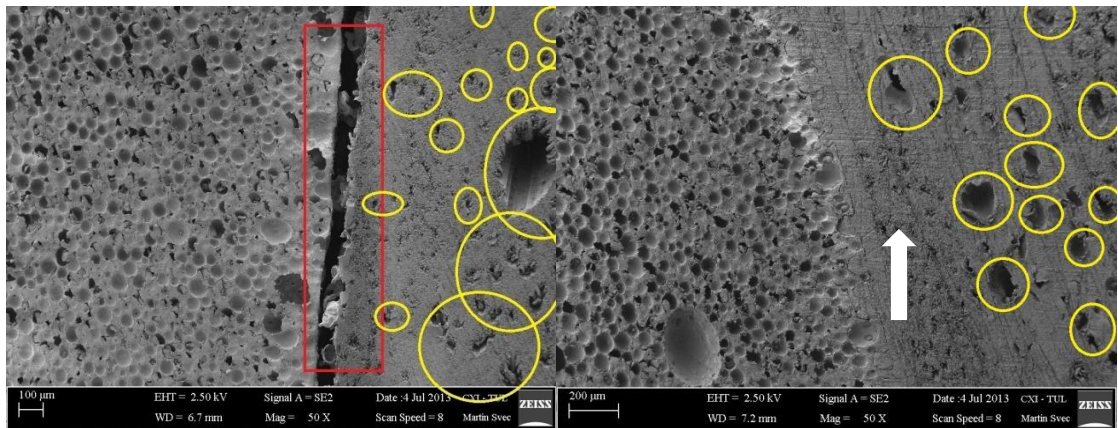
Na obrázku 3.3.9 série S jsou vidět drobné vady v kompozitu (špatné prosycení – žluté kroužky), navíc se matrice neprosytila až k jádru (označeno červeně). Snímáno bylo rozhraní kompozitu (vpravo) a PUR jádra (vlevo) při různých zvětšeních.



Obr. 3.3.10 – Plošné snímky R série.

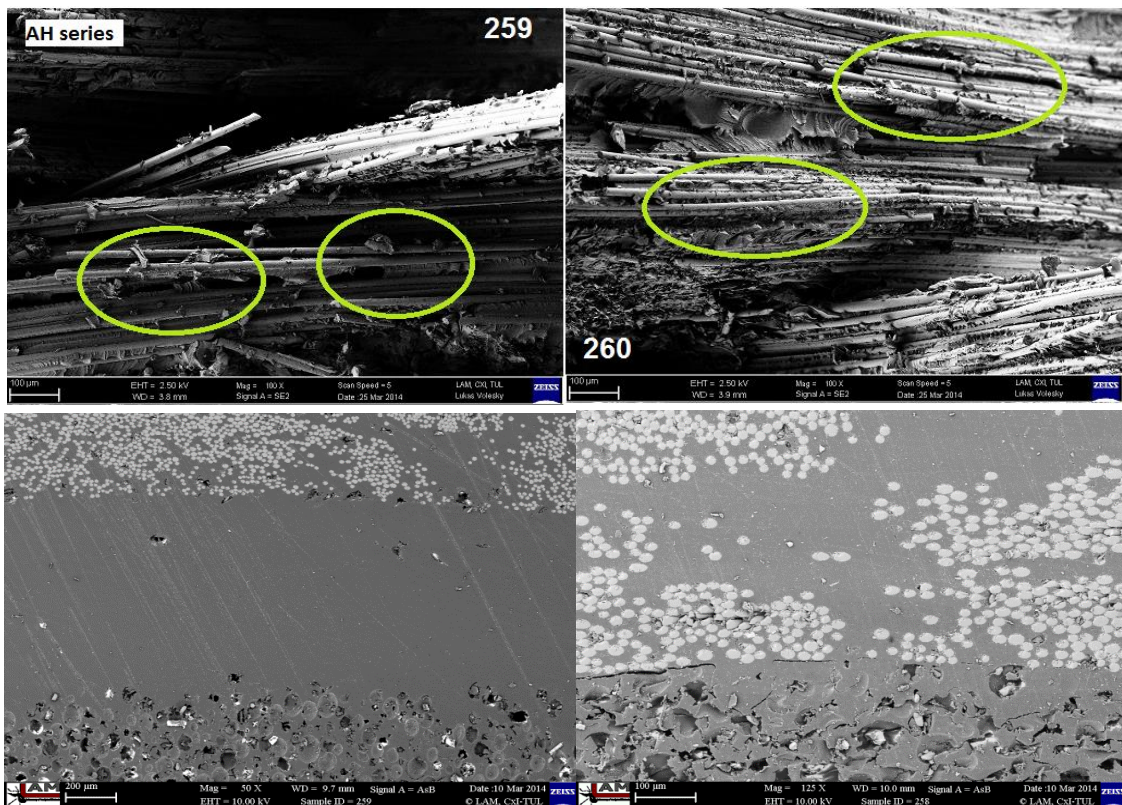
Na obrázku 3.3.10 série R je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a matricí. Snímky jsou bez bublin a vad v kompozitu. Snímáno je rozhraní kompozitu (vpravo) a PU jádra (vlevo) z různých míst kompozitu. Kompozit se zcela prosytil až k jádru.





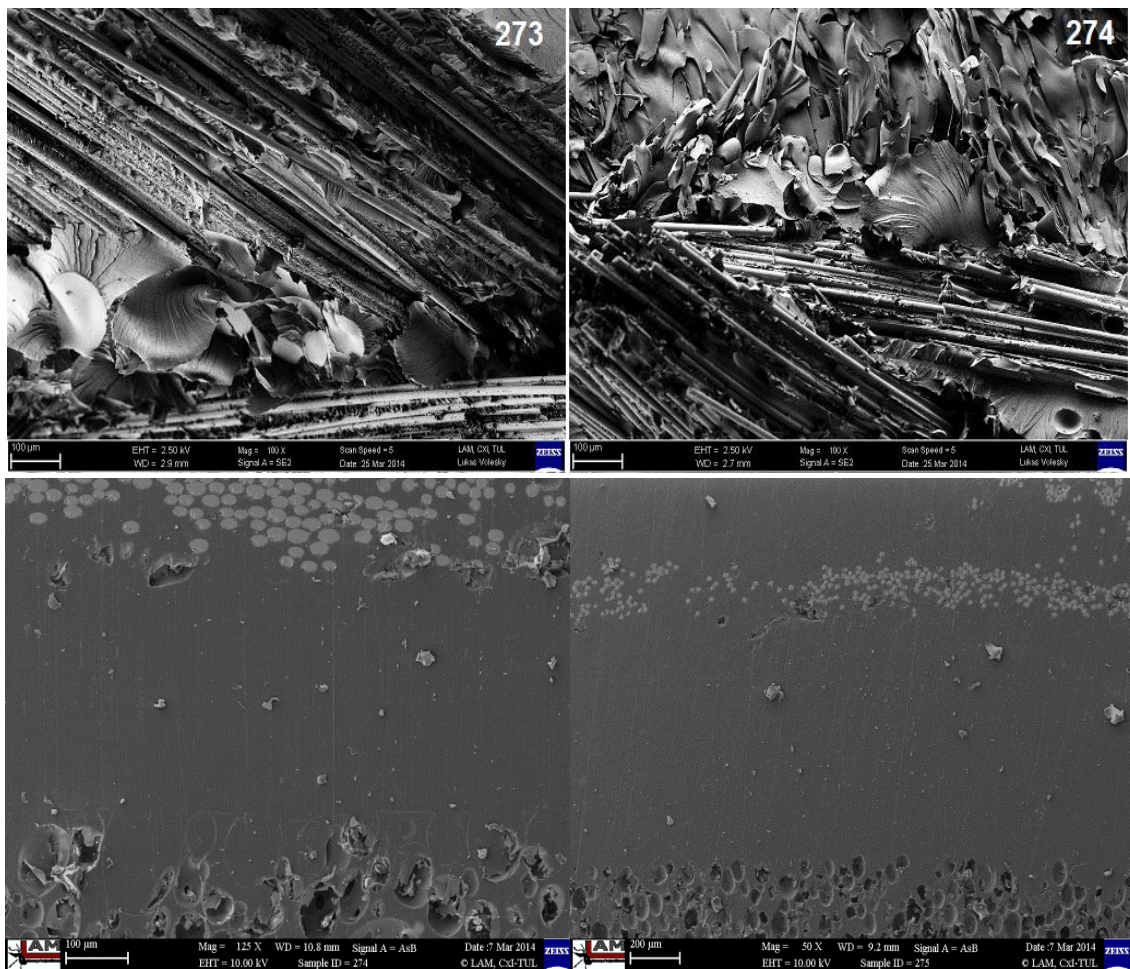
Obr. 3.3.11 – Plošné snímky T série.

Na obrázku 3.3.11 je vidět velké vady (bublíny-žluté kroužky) v kompozitu a špatné prosycení vlákné vrstvy (červená oblast). Snímáno bylo rozhraní kompozitu (vpravo) a PUR jádra (vlevo) při různých zvětšeních.



Obr. 3.3.12 – Snímky lomu a plochy AH série.

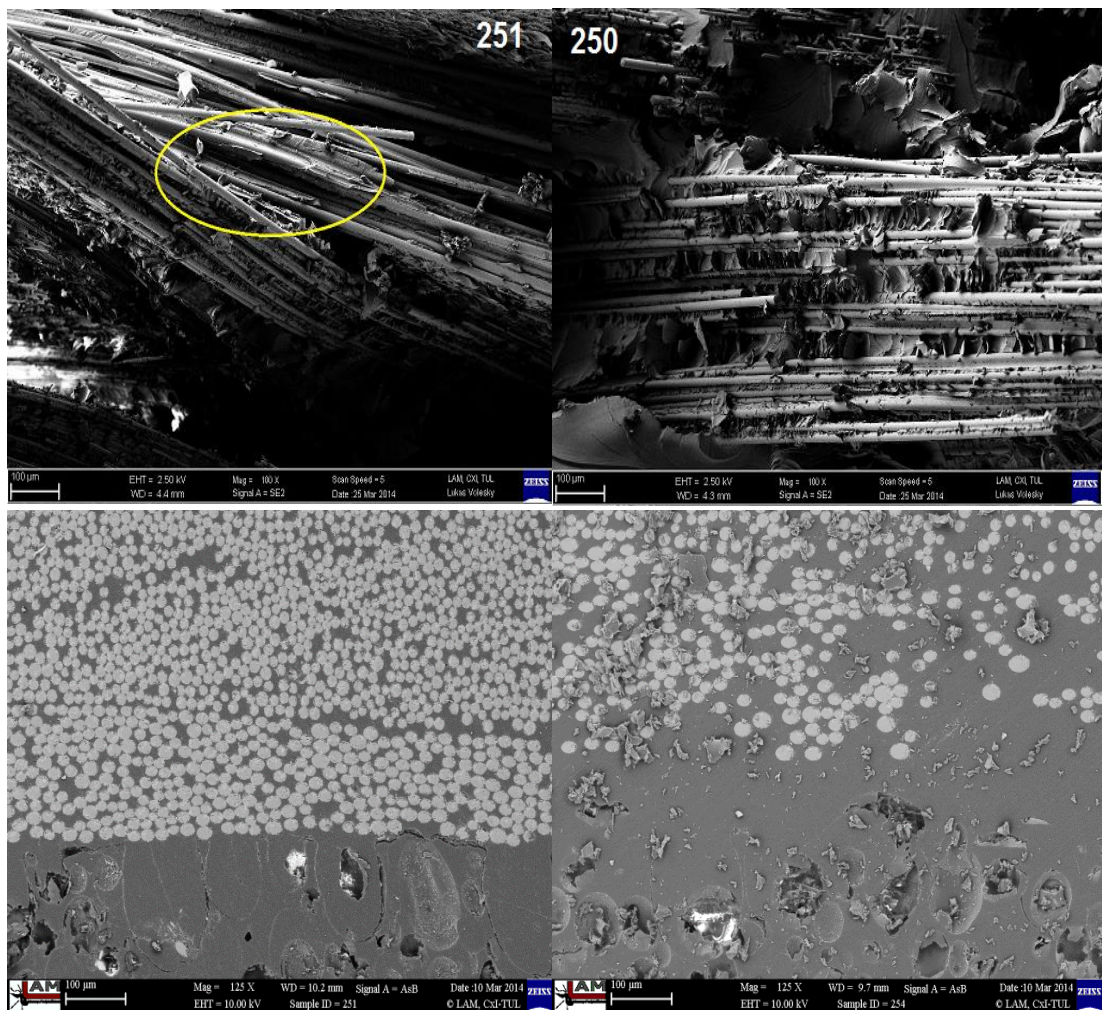
Na obrázku 3.3.12, vrchní obrázky jsou snímky lomu ze kterých je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a matricí, matrice obaluje vlákna (žluté kroužky). Spodní snímky jsou snímky plošné, kde bylo snímáno rozhraní kompozitu (nahore) a PUR jádra (dole). Snímky jsou bez větších bublin, pouze drobné vady.



Obr. 3.3.13 - Snímky lomu a plochy AK série.

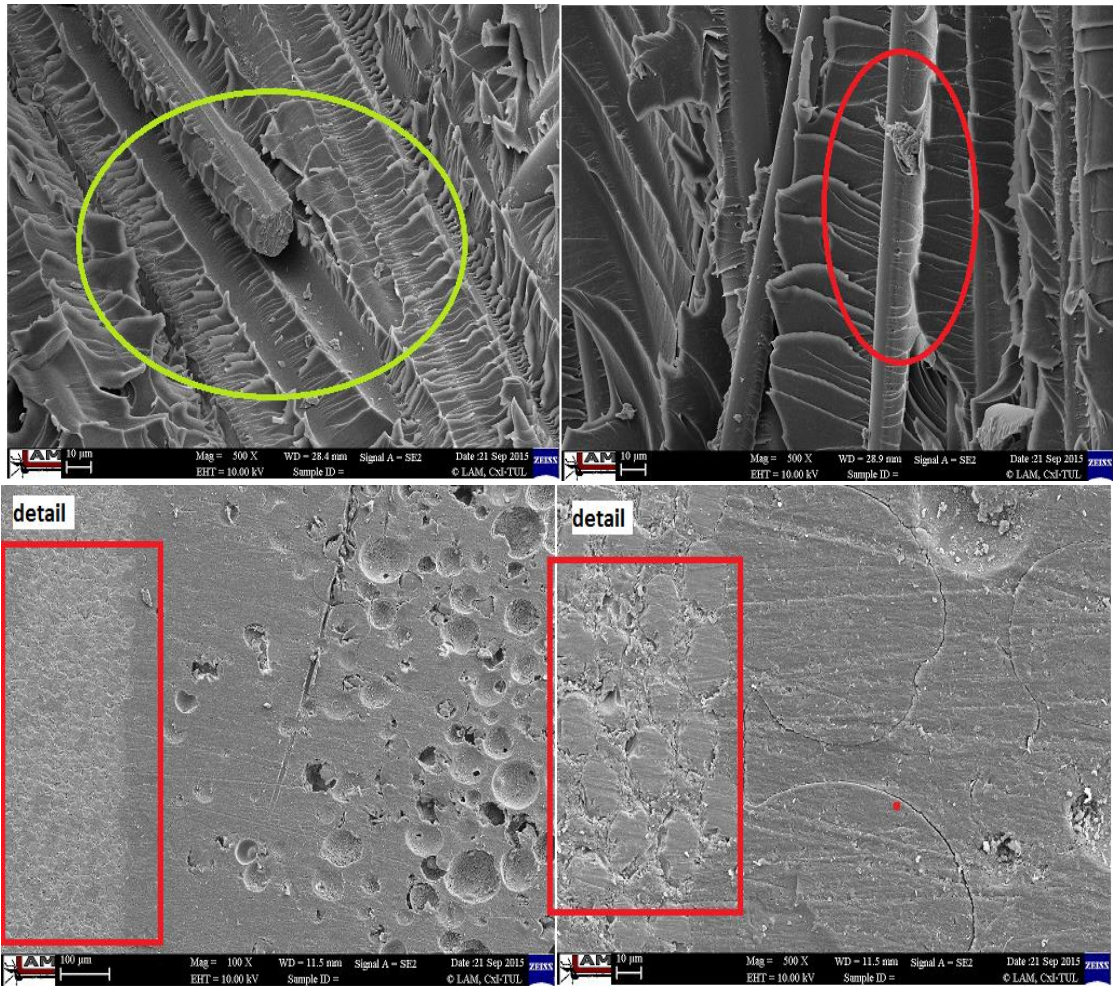
Na obrázku 3.3.13, vrchní obrázky jsou snímky lomu ze kterých je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a matricí, matrice obaluje vlákna. Spodní snímky jsou snímky plošné, kde bylo snímáno rozhraní kompozitu (nahore) a PUR jádra (dole). Snímky jsou bez větších bublin, pouze drobné vady.





Obr. 3.3.14 – Snímky lomu a plochy série AG.

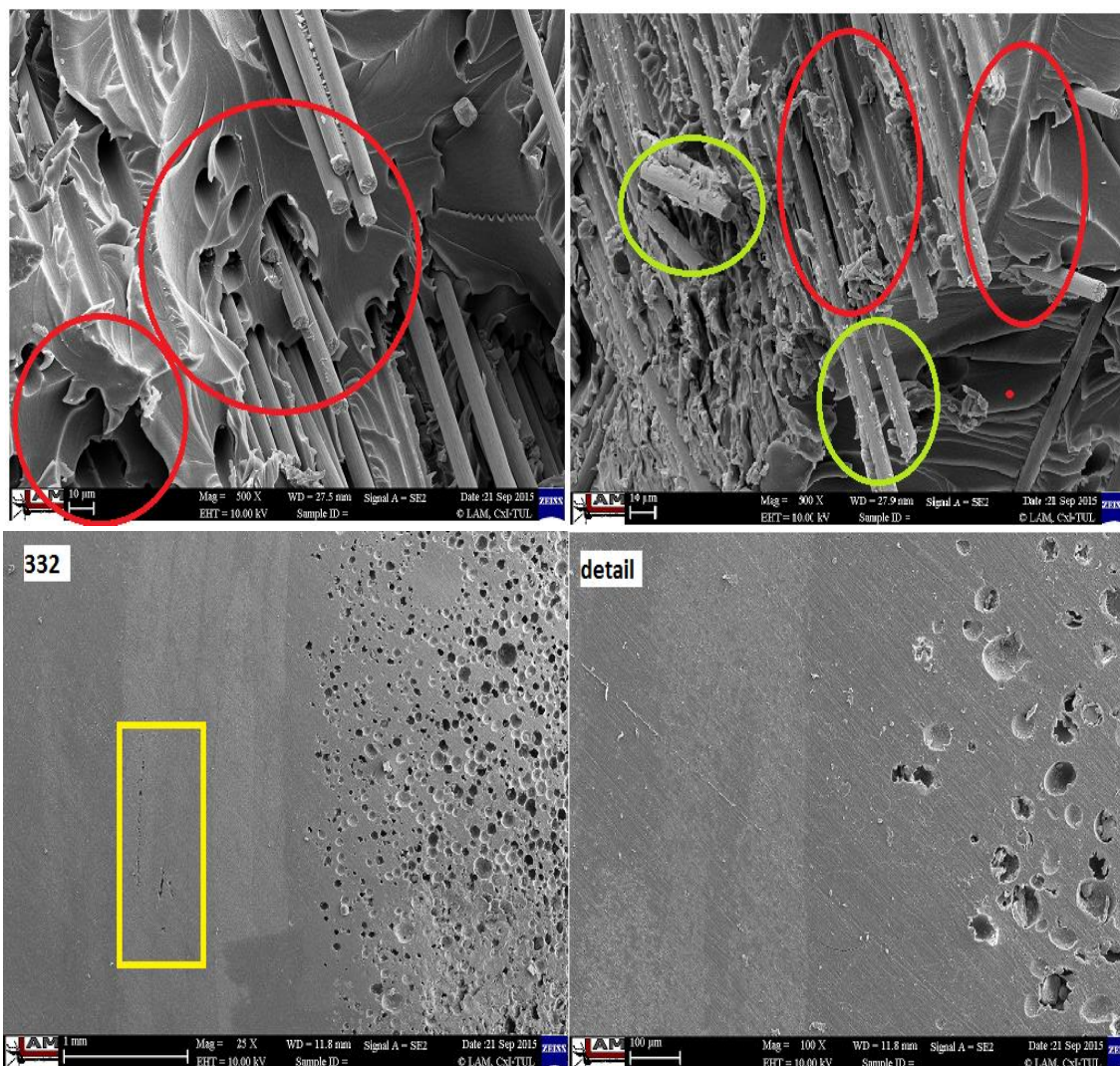
Na obrázcích 3.3.14 je vidět, že matrice vůči vláknům je afinní. Vrchní obrázky jsou snímky lomu ze kterých je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a matricí, matrice obaluje vlákna. Matrice obalila vlákna těsně až k jejich povrchu. Matrice je tak s vláknem spojena trvale. Spodní snímky jsou snímky plošné, kde bylo snímáno rozhraní kompozitu (nahore) a PUR jádra (dole). Snímky jsou bez větších bublin, pouze drobné vady.



Obr. 3.3.15 – Snímky lomu a plochy série AP.

Na obrázku 3.3.15 se vlákno vytrhlo i s částí matrice (žluté kolečko). Vrchní obrázky jsou snímky lomu ze kterých je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a matricí, matrice obaluje vlákna. Spodní snímky jsou snímky plošné, kde bylo snímáno rozhraní kompozitu (nahore) a PUR jádra (dole). Snímky jsou bez větších bublin, kompozit obsahuje drobné mikrotrhlínky. Mikrotrhlínky (v červeném rámečku) jsou projevem matrice, které obsahuje bublinky (působení chemické reakce se sizingem).

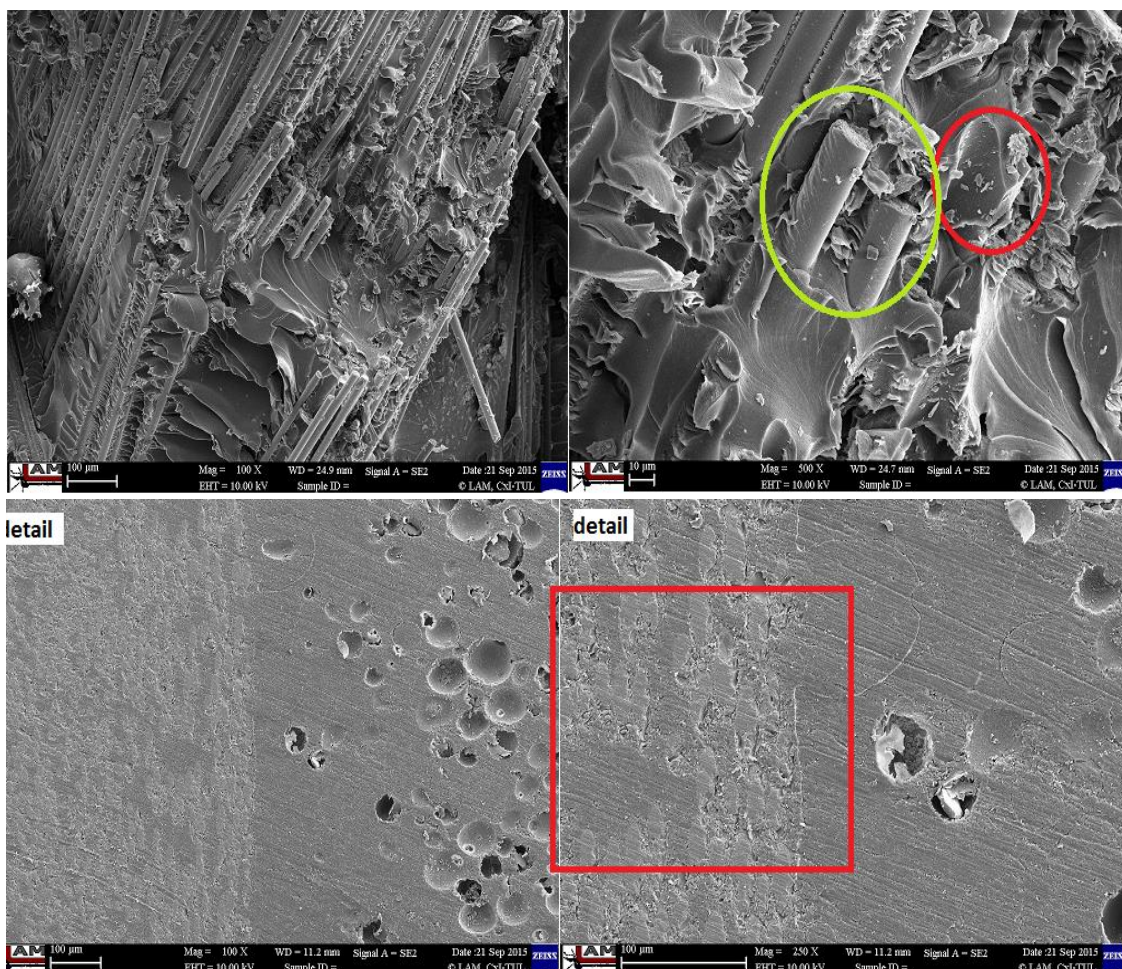




Obr. 3.3.16 – Snímky lomu a plochy AQ série.

Na obrázku 3.3.16 na vrchních snímcích lomu jsou viděna vlákna vytržená z matrice (červená kolečka). Na spodních rovinných snímcích, bylo snímáno rozhraní kompozitu (vlevo) a PUR jádra (vpravo). U dvou vzorků ze série AQ byl nalezen náznak delaminace (označeno žlutě). Rozhraní mezi vláknem a matricí je nespojitě, s velkým množstvím mikrotrhlinek.





Obr. 3.3.17 – Snímky lomu a plochy AR série.

Na obrázku 3.3.17 - vrchní obrázky jsou snímky lomu, ze kterých je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a matricí, matrice obaluje vlákna. Spodní snímky jsou snímky plošné, kde bylo snímáno rozhraní kompozitu (vlevo) a PUR jádra (vpravo). Snímky jsou bez větších bublin, kompozit obsahuje drobné mikrotrhlinky. Mikrotrhlinky (v červeném rámečku) jsou projevem matrice, které obsahuje bublinky (působení chemické reakce se sizingem).

Velmi dobrou vzájemnou kompatibilitu má kombinace PANEX 35 (ZOLTEK)/PUR (BASF), série R, obr. 3.3.10. Hmotu kompozitu je v řezu vzorku bez defektů. Velmi dobrou vzájemnou afinitu má i kombinace STS40 F13 (TENAX)/PUR (BASF), série H, M, J a série se skleněnými vlákny AK, AH a AG. U série S se už drobné defekty objevují, zde byl při výrobě použit silnější roving, nevíme však, jestli silnější roving způsobil defekty. Nejvyšší počet defektů ve hmotě kompozitu a místa s velmi špatným prosycením vlákně vrstvy vykazuje kombinace T700SC (TORAY)/PUR (BASF) – série T a U. U dvou vzorků ze série AQ byl nalezen náznak delaminace (označeno žlutě na obrázku 3.3.16). Všechny vzorky sérií AQ, AP a AR vykazují stejný jev – rozhraní mezi vláknem a matricí je nespojitě, s velkým množstvím mikrotrhlinek; tento jev může souviset s kompatibilitou matrice vůči vlákně.

Co se týče analýzy lomu, tak u série AP, AH, AG a AK je matrice vůči vláknům afinní. Matrice obalila vlákna těsně až k jejich povrchu. Matrice je tak s vláknem spojena trvale, na obrázku 3.3.15 se vlákno vytrhlo i s částí matrice. Mikrotrhlínky jsou projevem matrice, které obsahuje bublinky (působení chemické reakce se sizingem). Obrázek 3.3.14 (žlutá část) série AG ukazuje vlákno odtržené od pryskyřice, to je nejspíše způsobeno špatnou penetrací nahromaděných vláken.

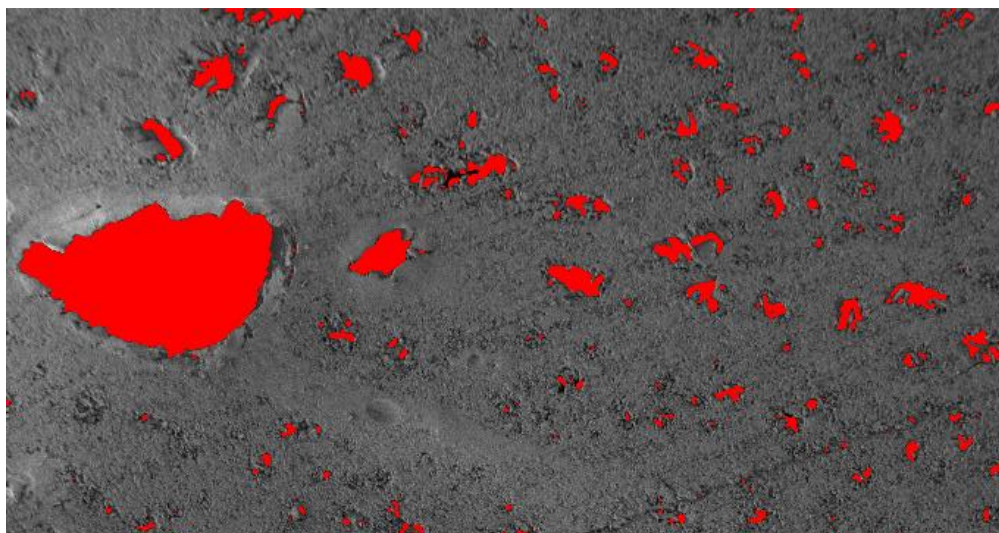
U série AR je afinita matrice vůči vláknům průměrná. Matrice vlákna smáčí, na vláknech zůstalo jen velmi malé množství matrice. Při mechanickém namáhání dochází k vylomení dlouhých vláken z matrice. Matrice však nepřilnula těsně k povrchu vláken; při mechanickém namáhání kolmo k průřezu vláken dochází k jejich přelomení, ale nedochází k jejich vytahování z matrice.

Naopak je tomu u série AQ, kde je afinita matrice vůči vláknům snižena. Matrice vlákna smáčí pouze omezeně. Při mechanickém namáhání pak dochází k oddělení jednotlivých složek kompozitu od sebe. Příčinou je s největší pravděpodobností povrchová úprava vláken, tzv. sizing. Chemické složení sizingu je neznámé, není možné určit pravděpodobnou příčinu snížení afinity.

Při zapěnění vláken matricí zřejmě dochází k reakci, jejímž vedlejším produktem je větší objem vzduchu, který je uzavřen v kompozitu a následně může způsobit zhoršení výsledných mechanických vlastností.

### **Měření vzduchových bublin v kompozitu pomocí obrazové analýzy**

Pro zjištění vlivu vzduchových bublin v kompozitu na jeho mechanické vlastnosti. K určení procenta a velikosti bublin v kompozitu byla použita obrazová analýza NIS Elements. K měření byly využity obrázky z REM, od každé série minimálně 7 obrázků. Bublínky byly změřeny automaticky (pomocí prahování) nebo manuálně, aby se zaručil co nejpřesnější výsledek. Příklad měření je zobrazen na obrázku 3.3.18



Obr.3.3.18 – Příklad měření bublin v kompozitu pomocí obrazové analýzy.



Tab. 3.3.5– Výsledky měření pomocí obrazové analýzy.

série	% bublin v kompozitu	průměrná plocha bubliny[ $\mu\text{m}^2$ ]	95% IS průměrné vel. bubliny [ $\mu\text{m}^2$ ]
H	0	0	0
M	0	0	0
J	1,86	146,35	4,74
R	0	0	0
S	4,59	90,8	3,04
T	8,11	495,75	9,04
U	6,8	15,35	4,77
AH	0,38	16,42	3,83
AK	0,81	16,05	7,04
AG	0,52	6,82	3,27

Bylo provedeno měření na uhlíkových rovinzích na EDS - Elektronovém skenovacím detektoru, pomocí něhož bylo zjištěno přesné materiálové složení rovinzů. Tabulka 3.3.6 zobrazuje procentní zastoupení jednotlivých prvků v rovinzích.

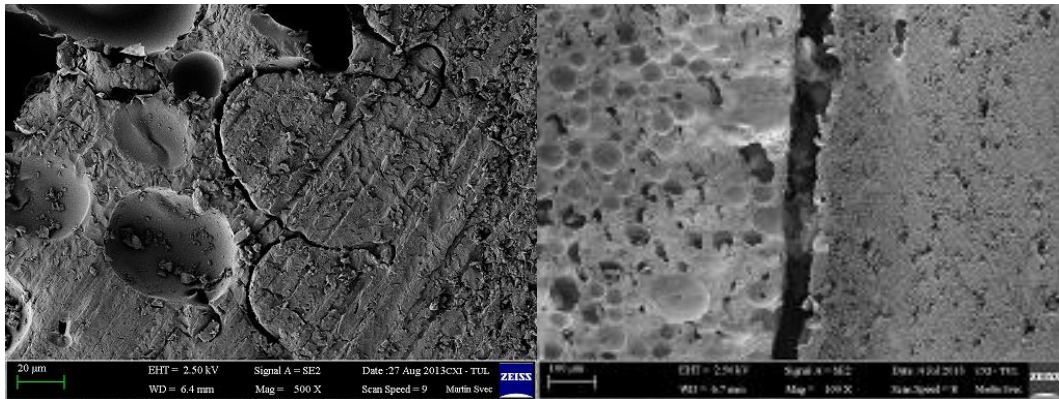
Tab. 3.3.6 – Prvkové složení uhlíkových rovinzů se sizingem.

	C [%]	O [%]	Ag [%]	Si [%]
<b>Toray</b>	96	2,5	1,5	0
<b>Tenax</b>	96,6	2,9	0,5	0
<b>Zoltek</b>	97,3	2,6	0	0,1

Významný rozdíl byl zjištěn v množství obsaženého stříbra, který má nejspíš výrazný vliv na kompatibilitu vláken s matricí.

### 3.3.3.5 Vyhodnocení míry prosycení vlákně vrstvy

Nejlepší prosycení vlákně vrstvy vykazují kombinace materiálů Panex35/PUR a STS40 F13 24K/PUR. U nich došlo k průniku matrice do pórů jádra, tedy k průniku matrice až za hranici vlákně vrstvy. U kombinace T700SC/PUR matrice do pórů jádra nepronikla, prosycení vlákně vrstvy je prozatím označeno jako vyhovující. U sérií AQ, AP a AR je prosycení vrstvy vláken v kompozitním skinu všech vzorků srovnatelné. Skiny jsou bez velkých vad a defektů, matrice zatekla skrz všechny vrstvy až k PUR jádru. Příklady dobrého a špatného prosycení jsou zobrazeny na obrázku 3.3.19. Všechny zhotovené obrázky jsou v příloze 1.



Obrázek 3.3.19 – Příklady prosycení vlevo dobré, vpravo špatné.

### 3.3.3.6 Mechanické vlastnosti trubek

Průměrné hodnoty jednotlivých modulů (byl hodnocen tah, tlak, ohyb a krut) jsou seřazeny v následující tabulce:

Tabulka 3.3.7 – Výsledky zkoušení trubek z ITC Zlín – průměrné hodnoty

série	Tahový modul E [Mpa]	95% IS	Tlakový modul [Mpa]	95% IS	Ohybový modul [Mpa]	95% IS	Krut - Smykový modul [Mpa]	95% IS
H	23004	1453	18591	912	13744	408	7142	377
J	21740	1154	20393	909	14554	605	6903	435
M	21889	1016	20487	837	14679	530	7332	115
S	22042	541	21228	1058	13841	312	7136	201
T	21906	811	22998	1187	14821	434	7304	288
R	21876	1168	21474	1358	15806	661	7290	267
P	3986	95	3981	489	2600	127	954	94
AH	12384	416	12783	1159	10104	489	4057	469
AK	11783	226	13272	786	9983	374	3296	87
AG	16166	725	15722	1644	13151	786	5329	108

Z výsledků měření tahového modulu bylo zjištěno, že nejlepších výsledků dosáhly vzorky série H, následovala série S a série T. Přestože u vzorků série S byl nejmenší objemový podíl vláken (48K, kolem 28%) a ve hmotě kompozitu se vyskytly defekty, co se týče tahového zatížení, má tato série druhý nejlepší výsledek. Vzorky série H vykazují vyšší hodnoty modulu (jedná se o stejný typ materiálu, pouze poloviční K - 24K a dvojnásobný počet vrstev). Vzorky série T jsou vyrobeny z materiálu jiného výrobce (Toray), technologicky jsou stejné, jako vzorky série H. Podle předpokladu má nejnižší hodnoty modulů série P (samotná matrice). Série AH, AK a AG mají výrazně nižší hodnoty modulů, to je dáno tím, že obsahují skleněná vlákna. Výsledky ze sérií AQ, AP a AR nebyly dodány.

Nejvyšší modul v tlaku byl naměřen u vzorků série T a následně u vzorků série R a série S. Nejvyšší hodnota modulu v ohybu byla naměřena u vzorků série R a následně u vzorků série T. Obecně lze z hlediska všech těchto mechanických zkoušek kompozitů říci, že nejvyšších výsledků dosáhly vzorky série T (vysoké

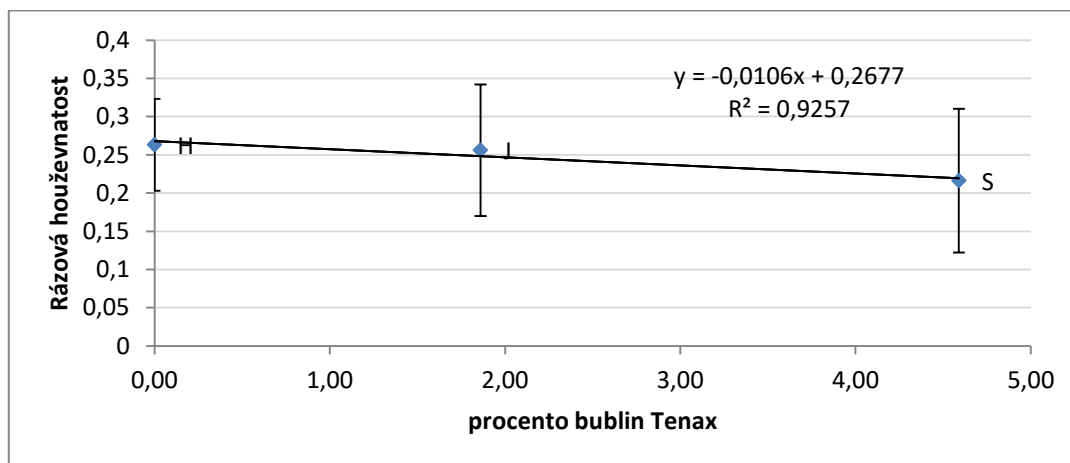
hodnoty u všech měření), následovaly vzorky série R a S. Naopak nejhůře dopadly zkoušky mechanických vlastností pro série obsahující sklo.

U vzorků série T byl předpoklad vysokých hodnot s ohledem na cenu a parametry rovingu a elementárního vlákna garantované výrobcem, přesto by asi bylo možné úpravou technologie nebo změnou matrice dosáhnout ještě vyšších výsledků. Z toho lze vyvodit, že potenciál materiálu Toray není plně využit.

### Porovnání naměřených výsledků s obrázky z mikroskopu

Při porovnání konečných mechanických měření s obrázky REM zjistíme, že série obsahující vlákna Tenax, která byla dobře prosycena, dosáhla průměrných výsledků oproti sérii obsahující vlákna Toray, která měla ve struktuře vady. Vlákna před zalitím dosahovala nejlepších výsledků, ale po zalití do matrice vykazovala buď průměrných či horších výsledků, které byly nejspíše způsobeny defekty ve struktuře. Ačkoliv se jednalo o nejdražší vlákna, výsledný kompozit nebyl bez defektů. Série obsahující vlákna Zoltek, která vykazovala před zalitím do matrice nejhorších výsledků, však po zalití do matrice vzorky byly bez defektů a také výsledky měření byly srovnatelné i lepší než ostatní série. Pokud tedy srovnáme série obsahující vlákna Toray (s defekty, nejdražší vlákna) a série s vlákny Zoltek (bez defektů, nejlevnější vlákna), tak výsledky těchto sérií jsou srovnatelné.

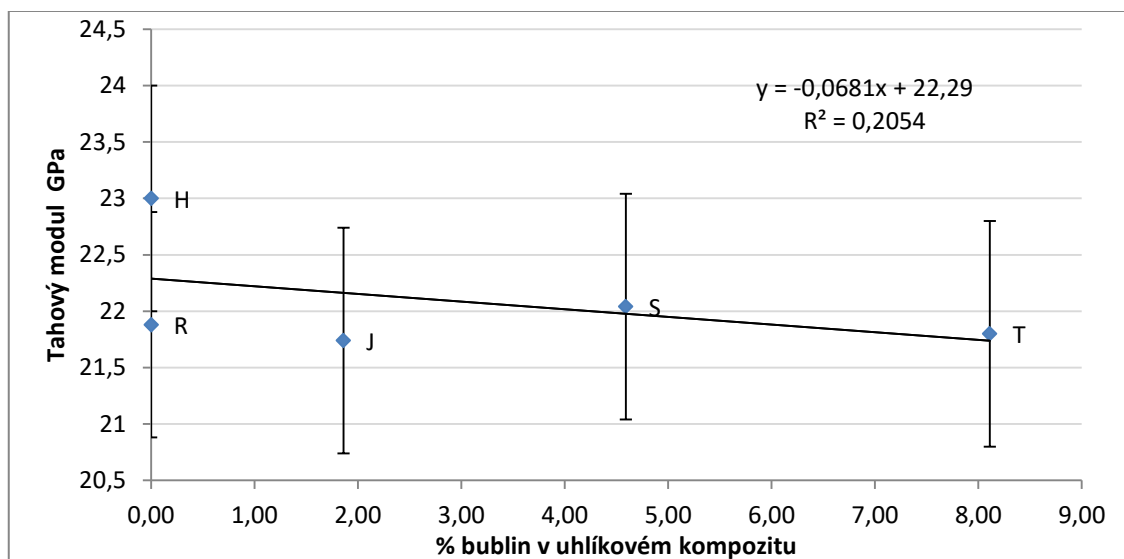
Po všech uvedených experimentech byly zvoleny nejvhodnější vlákna pro další použití a výrobu celých rámců, rozhodovalo hlavně poměr cena/výkon. Uhlíkový roving od firmy TENAX s jemností 1 600 tex a 24 000 jednotlivými fibrilami (STS 24K). Dále byla vybrána i skleněná vlákna od firmy Johns Manville s jemností 2400 tex a čedičová vlákna od firmy Basaltex s jemností 2520 tex.



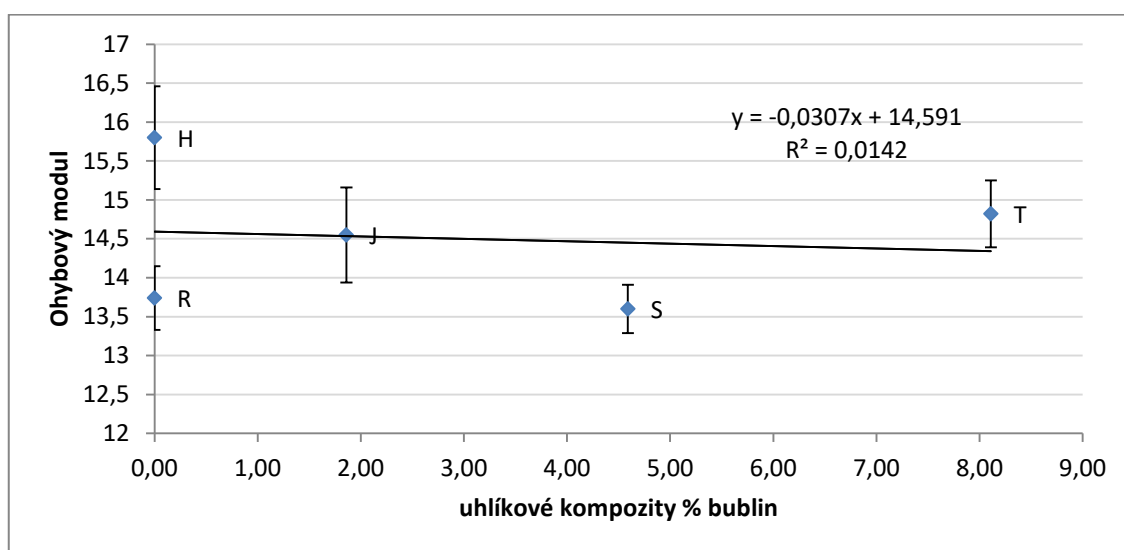
Obr. 3.3.20 - Graf závislosti velikosti rázové houževnatosti na procentu bublin v uhlíkovém kompozitu TENAX.

Při porovnání naměřených mechanických vlastností s výsledky měření bublin v kompozitu a výpočtem korelace bylo zjištěno: že velikost rázové houževnatosti (silná negativní závislost) je závislá na procentu bublin v kompozitu. Čím více bublin

kompozit obsahuje, tím menší je hodnota rázové houževnatosti (obr. 3.3.20). V případě tahového modulu se jedná o slabou negativní závislost (obr. 3.3.21).

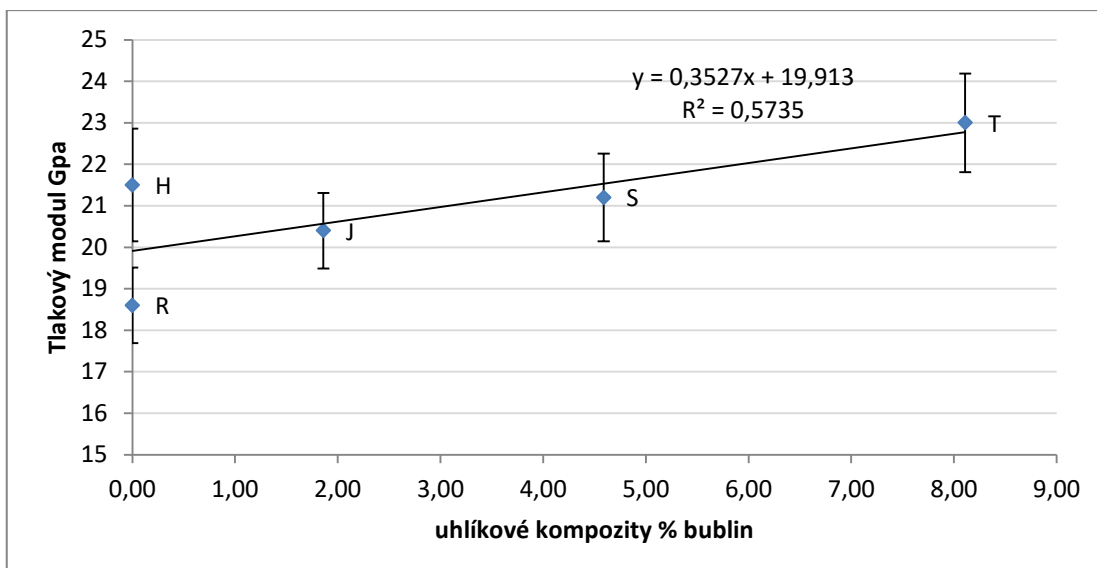


Obr. 3.3.21 - Graf závislosti tahového modulu na procentu bublin v uhlíkovém kompozitu.

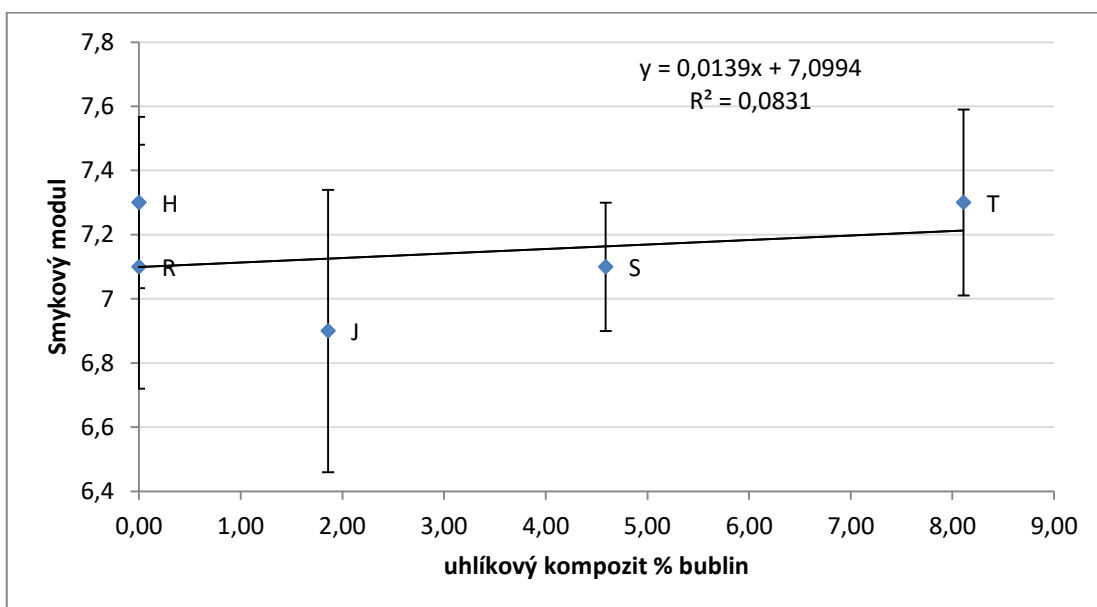


Obr. 3.3.22 - Graf závislosti ohybového modulu na % bublin v uhlíkovém kompozitu.

Dále bylo zjištěno, že smykový a ohybový modul na procento bublin v kompozitu nemá žádný vliv (obr. 3.3.24), při výpočtu korelace se jedná o nezávislá data. Závislost ohybového a tlakového modulu na procentu bublin v kompozitu je významná pouze u kompozitu ze skleněných vláken. Na kompozity z uhlíkových vláken nemají bubliny vliv na ohybový ani smykový modul (obr. 3.3.22). V případě tlakového modulu se jedná o silnou pozitivní závislost (obr. 3.3.23).



Obr. 3.3.23 - Graf závislosti tlakového modulu na % bublin v uhlíkovém kompozitu.



Obr. 3.3.24 - Graf závislosti smykového modulu na % bublin v uhlíkovém kompozitu.

V tabulce 3.3.8 je shrnutí všech získaných poznatků ze zkoušení kompozitních trubek. Nejnižší a špatné získané hodnoty jsou označeny červeně a naopak nejvyšší a nejlepší hodnoty jsou označeny zeleně. Hodnoty označeny N/A nebyly naměřeny.

Tab. 3.3.8 – Shrnutí výsledků zkušných kompozitních trubek.

série	materiál	zpracovatelnost materiálu	rázová houževnatost	% bublin v kompozitu	kompatibilita	mechanické vlastnosti			
						tah	tlak	ohyb	krut
H	Tenax 24K	vhodná	0,263	0	dobrá				
J	Tenax 24K	vhodná	0,225	1,86	dobrá				
M	Tenax 24K	vhodná	N/A	0	dobrá				
R	Zoltek 50k	špatná	0,214	0	dobrá				
S	Tenax 48K	vhodná	0,226	4,59	mírné bublinky				
T	Toray 24K	vynikající	0,31	8,11	špatná				
U	Toray 24K	vynikající	N/A	6,8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
AH	Sklo 2400tex	vhodná	0,3	0,38	dobrá				
AK	Sklo 2400tex + 900tex	vhodná	0,3	0,81	dobrá				
AG	Sklo 2400tex + Tenax 24K	vhodná	0,3	0,52	dobrá				
AQ	Sigrafil 24K	vhodná	N/A	0,6	špatná	N/A	N/A	N/A	N/A
AP	Sklo	vhodná	N/A	0,1	mikrobublinky	N/A	N/A	N/A	N/A
AR	Sklo	vhodná	N/A	0,02	mikrobublinky	N/A	N/A	N/A	N/A

hodnoty nízké je líkož obsahovaly skleněná vlákna

### 3.4 MODEL EKONOMICKÉHO SROVNÁVÁNÍ

V této kapitole byly porovnány tři druhy uhlíkového kompozitu. Požadované parametry a jejich limitní hodnoty pro použití kompozitu v určitém průmyslovém odvětví jsou chráněny patenty a představují know-how jednotlivých výrobců. Parametry zvolené v uvedeném ekonomickém modelu jsou zvoleny pouze subjektivní reflexí stejně jako jejich limitní hodnoty, které byly pro potřeby tohoto srovnání stanoveny tak, jak je uvedeno v tabulce č. 3.4.1.

Tento model srovnání může být využit pouze za podmínek, že se bude jednat o kompozity stejné struktury a především stejného technologického postupu výroby. Jednotlivé vlastnosti, které jsou pro dané průmyslové odvětví rozhodné byly zvoleny na základě konzultací s kolegy z resortu dopravy a díky praxi ve Škoda auto a.s. Tento fakt je především zapříčiněn tím, že v případě kompozitů z uhlíkových vláken, jsou všichni výrobci (vývojáři) velmi opatrní při zveřejňování technologických postupů jejich výroby. Ministerstvo dopravy, jako ústřední orgán státní správy ve věcech dopravy zabezpečuje vydávání homologací novým vozidlům. Bylo tedy čerpáno z důvěrných materiálů soukromých firem a v neposlední řadě byly výsledky konzultovány s technickými pracovníky z praxe. Z důvodu ochrany těchto zdrojů, podrobnější vysvětlení nelze dodat. Limity byly zvoleny také na základě těchto konzultací a svěřených empiriích. Samotný bodový systém, který je v této kapitole použit, je skutečně ve velmi zjednodušené formě, opět byl konzultován s kolegy z automobilového průmyslu.

Tab. 3.4.1 - Zvolené parametry a jejich limitní hodnoty.

<b>Kategorie</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<i>Váha</i>
	<i>dolní limit</i>	<i>střední hodnota</i>			<i>horní limit</i>	<i>významnosti</i>
<b>Pevnost [N]</b>	500 - 699	700 - 899	900 – 1 099	1 100 – 1 199	1 200 a více	25 %
<b>Napětí v ohybu [MPa]</b>	30,00 - 34,99	35,00 - 39,99	40,00 - 44,99	45,00 - 49,99	50 a více	15 %
<b>Tažnost [%]</b>	1,70 - 1,75	1,76 - 1,81	1,82-1,87	1,88 - 1,93	1,94 a více	10 %
<b>Modul pružnosti [MPa]</b>	1 000 - 1199	1 200 – 1 399	1 400 – 1 599	1 600 – 1 799	1 800 a více	30 %
<b>Rázová houževnatost [J/mm<sup>2</sup>]</b>	0,12 - 0,129	0,13 - 0,139	0,14 - 0,149	0,15 - 0,159	0,16 a více	20 %

Ekonomický model byl s ohledem na uvedené zvolen pouze jako lineární srovnání naměřených hodnot. Při objektivní znalosti požadovaných limitních hodnot byl tento teoretický model rozšířen, že rozhodným parametrům byla stanovena váha

významnosti. Tímto postupem lze dosáhnout preciznějšího výsledku. Tabulka 3.4.2 představuje naměřené průměrné výsledky.

Tab. 3.4.2 – Přehled výsledků měřených parametrů rovinných kompozitů.

	<b>Pevnost [N]</b>	<b>Tažnost [%]</b>	<b>Modul pružnosti [MPa]</b>	<b>Napětí v ohybu [MPa]</b>	<b>Rázová houževnatost [J/mm<sup>2</sup>]</b>
<b>Panex 35</b>	686	1,81	2103,6	40,87	0,15
<b>Sigrafil C50</b>	1273	2,77	1294	41,09	0,14
<b>Tenax STS</b>	1800	1,9	2320	93,18	0,139

Hodnotící model byl sestaven z pěti kategorií pro každý hodnocený parametr a těmto byly přiřazeny číselné hodnoty:

- hodnota 1 = velmi negativní (velmi významné nedostatky),
- hodnota 2 = negativní (významné nedostatky),
- hodnota 3 = neutrální (bez přínosů),
- hodnota 4 = pozitivní (významné přínosy),
- hodnota 5 = velmi pozitivní (velmi významné přínosy).

Podle tohoto hodnotícího modelu a stanoveného počtu hodnocených parametrů, tj. pro každý kompozit 6 parametrů včetně ceny (která byla hodnocena zvlášť jako samostatný hodnocený parametr), lze dosáhnout jako maximálního počtu 5-ti bodů a jako minimálního počtu 0 bodů, jejichž rozhraní pro výslednou (ne)vhodnost kompozitu je stanoveno viz tabulka č. 3.4.3.

Tab. 3.4.3 - Bodové rozhraní pro rozhodnutí o vhodnosti použití.

<b>Výsledné bodové hodnocení</b>	0 až 0,9	1 až 1,9	2 až 2,9	3 až 3,9	4 až 5
<b>VÝSLEDEK</b>	zcela nevhodný	nevhodný	vhodný	zcela vhodný	excelentní

Zvoleným parametrům pro automobilový průmysl byly přiřazeny jednotlivé číselné hodnoty odpovídající naměřeným hodnotám z provedených materiálových zkoušek. Dalším aspektem hodnocení byla cena. Dle marketingového průzkumu byla navržena tabulka bodového rozhraní a hodnocení ceny produktu. Cena byla u kompozitu z levnějšího vlákna hodnocena nejvyšší možnou kategorií a analogicky k tomu byla kompozitu z dražšího vlákna přiřazena hodnota nejnižší, dle tabulky 3.4.4.

Tab. 3.4.4 - Bodové rozhraní cenového rozpětí.

	<b>velmi levné</b>	<b>levné</b>	<b>neutrální</b>	<b>dražší</b>	<b>velmi drahé</b>
<b>hodnocení</b>	5	4	3	2	1
<b>Cena Kč/kg</b>	499 a méně	500 - 749	750 - 999	1000 - 1249	1250 a více



Tab. 3.4.5 - Ekonomické hodnocení naměřených hodnot zvolených parametrů.

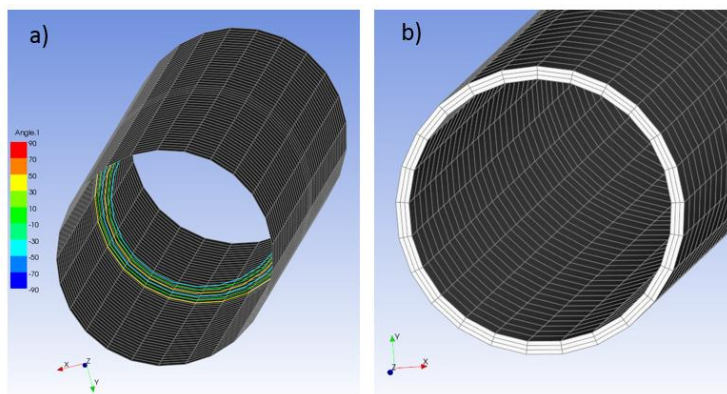
<b>Parametr</b>	<b>Panex 35</b>	<b>Tenax STS</b>	<b>Sigrafil C 50</b>
Modul pružnosti	1,5	1,5	0,6
Rázová houževnatost	0,8	0,6	0,6
Pevnost	0,25	1,25	1,25
Napětí v ohybu	0,45	0,75	0,45
Tažnost	0,2	0,5	0,5
<b>výsledek</b>	<b>3,2</b>	<b>4,6</b>	<b>3,7</b>
<b>cena</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>
<b>Celkový VÝSLEDEK</b>	<b>3,6</b>	<b>4,3</b>	<b>2,85</b>

Při použití popsaného teoretického modelu hodnocení je výsledkem, že všechny kompozitní materiály lze použít. Materiál Tenax dosáhl nejvyšších hodnot tedy 4,3 bodů, naopak materiály Sigrafil a Panex dosáhly nižších bodů, ale i tak byly materiál vyhodnoceny jako vhodné pro použití.

## 4 MODELOVÁNÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK KOMPOZITNÍCH TRUBEK

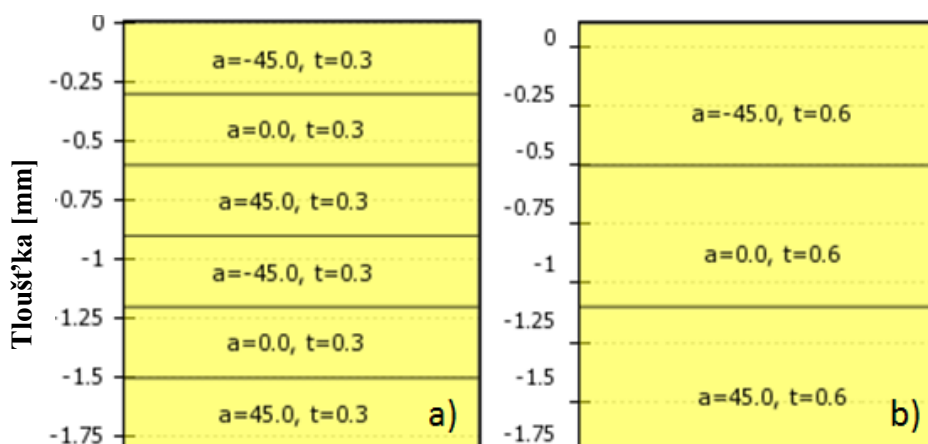
Nejúčinnější náhrada konvenčních materiálů kompozity je možná pouze s vhodnou kombinací výrobních technologií, vhodnou kombinací jednotlivých vrstev a optimálním objemovým podílem mezi vlákny a matricí, kohezními vlastnostmi jejich rozhraní, soudržnými silami a kritérii porušení. Jedná se o zdlouhavý proces testování, který je možný zkrátit pomocí využití moderních CAD technologií při navrhování kompozitních dílů. Pokročilé metody při správně sestaveném materiálovém a výpočtovém modelu mohou popsat celý proces zatěžování vrstveného dílu od jeho zahájení až po úplné selhání kompozitní struktury. Numerická analýza nám umožňuje odvodit různé napěťové energie uložené ve směrech jednotlivých složek kompozitních materiálů. Často řešenou otázkou je, jak přesná by měla být vhodná simulace: relevantnost sítě, zvolený přístup řešení, kritéria porušení apod., když zvážíme počáteční chybu způsobenou materiálovým modelem a okrajovými podmínkami. [6, 45]

Pro tento případ byly modely sestaveny dvěma způsoby. První je jako vrstvená skořepina (dále jen *shell*), (obr. 4.1 a). Tato metoda by měla být jednodušší a rychlejší pro konvergenci výpočtu řešení. Druhý vytvořený případ byl pevný model (dále jen *solid*) s oddělenými jednotlivými vrstvami s fyzicky existující tloušťkou, jak je vidět na obr. 4.1 b. Tento přístup se používá zejména z pohledu následného post-processingu - dalšího zpracování výsledků, kdy je možné přesněji studovat napětí v jednotlivých vrstvách, interlaminární napětí, delaminace apod. Vytvořená síť na dílu válcové tyče byla mapována podle jejich dvou okrajů (*mapped face meshing*), trubky o rozměru stěny 2 mm, s využitím metod tažení čtyřčlenných prvků s finálními 1275 uzly a 1250 prvky. [67-69]



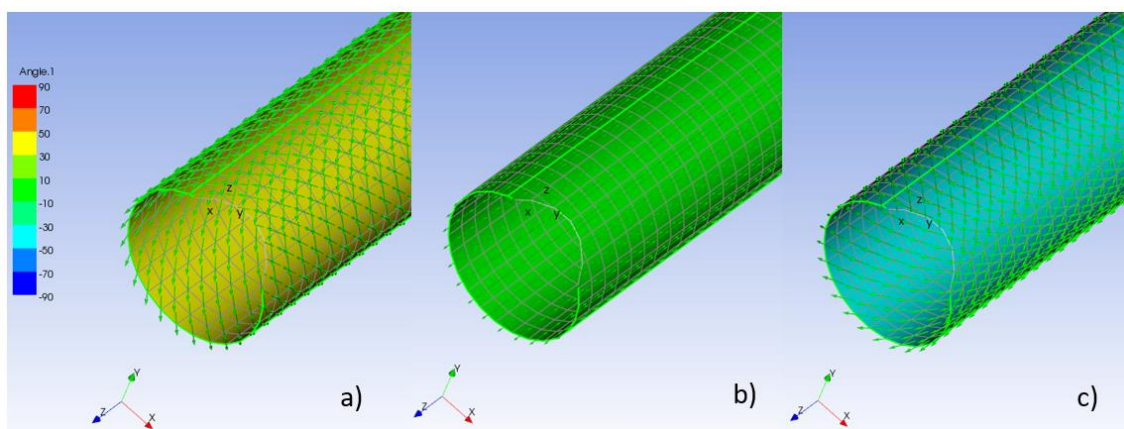
Obr.4.1 - Dva základní přístupy při tvorbě vrstvených modelů: a) Shell b) Solid.

Byly vytvořeny dva typy vrstveného modelu, jeden vytvořený ze 6 vrstev a druhý s 3 vrstvami (podle uspořádání na obr. 4.2, kde  $a$  = úhel a  $t$  = tloušťka), jako v případě experimentálně testovaných částí.



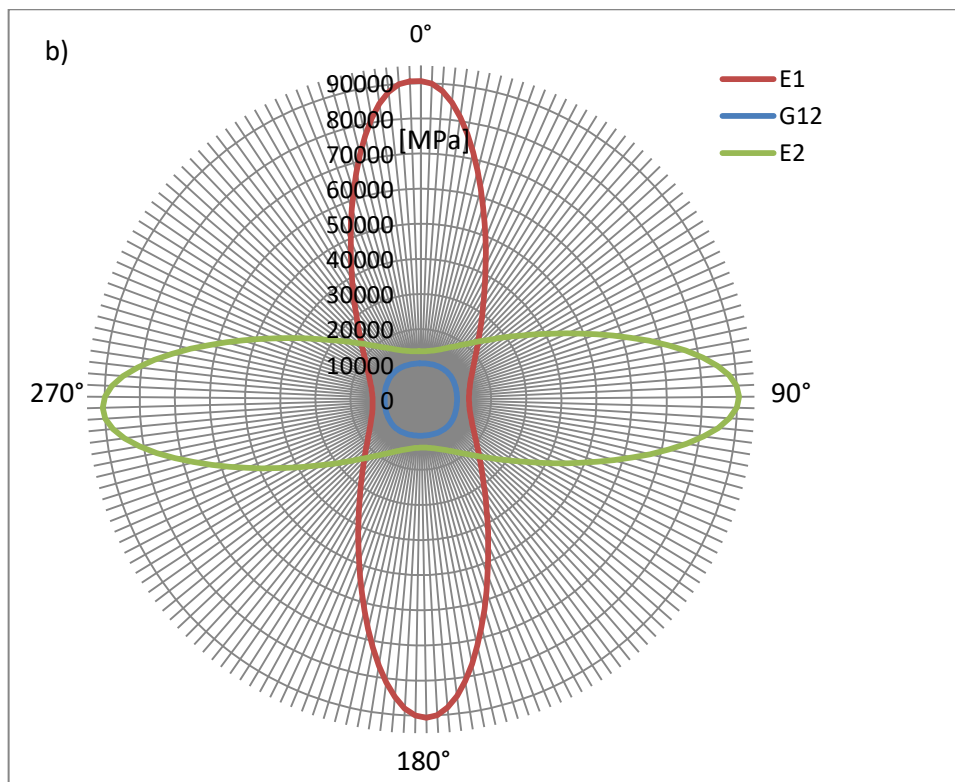
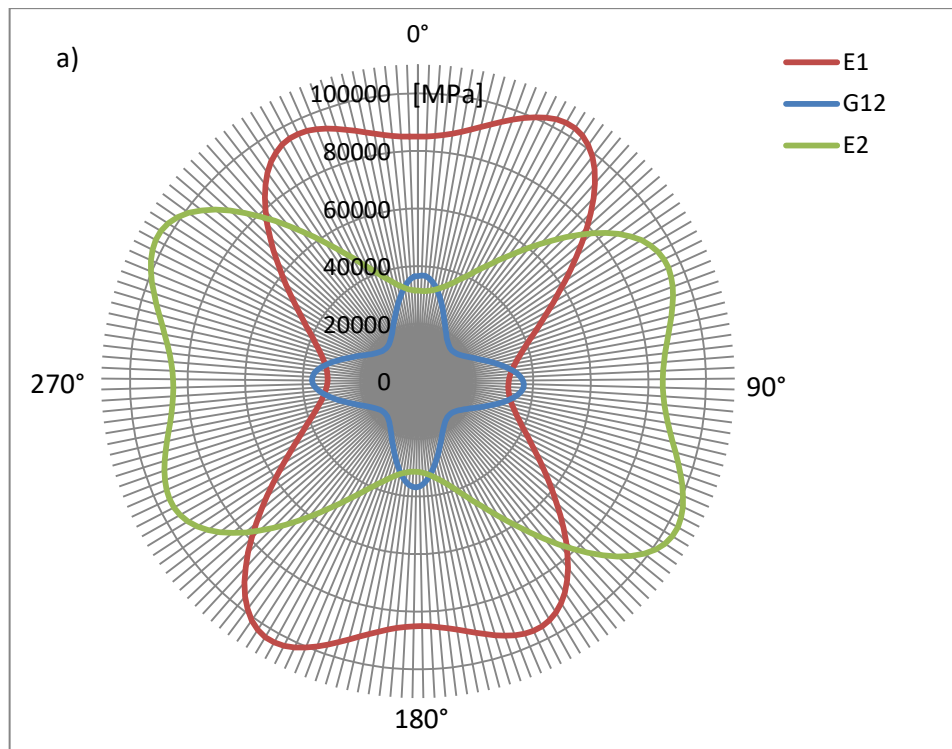
Obr. 4.2 - Uspořádání obou modelů a)  $-45^\circ/0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$ , b)  $45^\circ/0^\circ/-45^\circ$ .

U všech provedených modelů byly použity tři základní typy vinutí vláken  $45^\circ/0^\circ/-45^\circ$  (obr. 4.3). K řešení se považují všechny prvky položené na částech vedených válcovitou růžicí. Hlavní "nulový" směr je rovnoběžný s osou rotace trubky X. Úloha byla vyřešena jako statická s trubicou upnutou z obou stran. Na jedné straně s  $0^\circ$  DOF (*degreese of freedom*) a na druhém s tabulkově definovaným posunem ve směru trubky X se 4 časovými kroky řešení. Nejlepší způsob, jak stanovit vznikající napětí, bylo vypočítat sílu v upnuté části trubky a pak na základě známých hodnoty velikosti průřezu určit napětí v tahu.



Obr. 4.3 - Analýzy referenčních úhlů vláken.

Na Obr. 4.4 jsou polární grafy teoretických vlastností kompozitů, založené na skutečné geometrii a deklarovaných vlastnostech použitých materiálů. U 6 vstvého kompozitu lze říct, že jsou síly napětí v různých směrech rozloženy. Naopak je tomu u 3 vstvého kompozitu, kde jsou hodnoty modulů vyšší pouze ve směru  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .



Obr. 4.4 - Teoretické mechanické vlastnosti poraněných částí se specifikovanými vrstvami - uspořádání a) Tenax 24K - 6 vrstev b) Tenax 48K - 3 vrstvy.

První modely, které byly provedeny na základě teoreticky deklarovaných vlastností, se výrazně lišily od údajů získaných z experimentu. Mohlo to být způsobeno

zejména některými výrobními nepřesnostmi a spoustou bublin v matrici. Takže bylo nutné upravit vstupní materiálové vlastnosti. Výsledky experimentálních dat s porovnáním s teoretickým modelem a vzorem s reálnými hodnotami lze vidět na obr. 4.5 pro 6 vrstev Tenax 24K a obr. 4.6 pro tři vrstvy Tenax 48K. Nalezené hodnoty  $E_1$  pro použitý materiálový model:

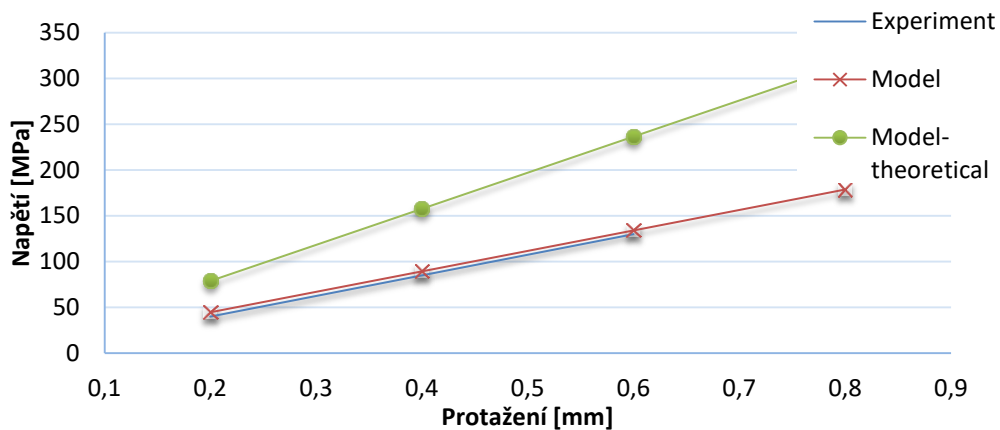
- 6vrstev shell = 120 GPa,
- 3vrstev shell = 145 GPa,
- 3vrstev solid = 120 GPa.

Z pohledu homogenizace se pro kompozit obecně předpokládá příčné isotropní chování [70]. V důsledku toho je matice tuhosti popsána sadou pěti parametrů: Young-moduli ( $E_{11}$  a  $E_{22}$ ), Poissonovými konstantami ( $\nu_{12}$  a  $\nu_{23}$ ) a smykovým modulem ( $G_{12}$ ). Při aplikaci Hookova zákona v pravoúhlém souřadném kartézském koordinačním systému dostaneme vztah (4.1) pro tzv. Tuhostní matici (matice 6x6 s konstantami C).

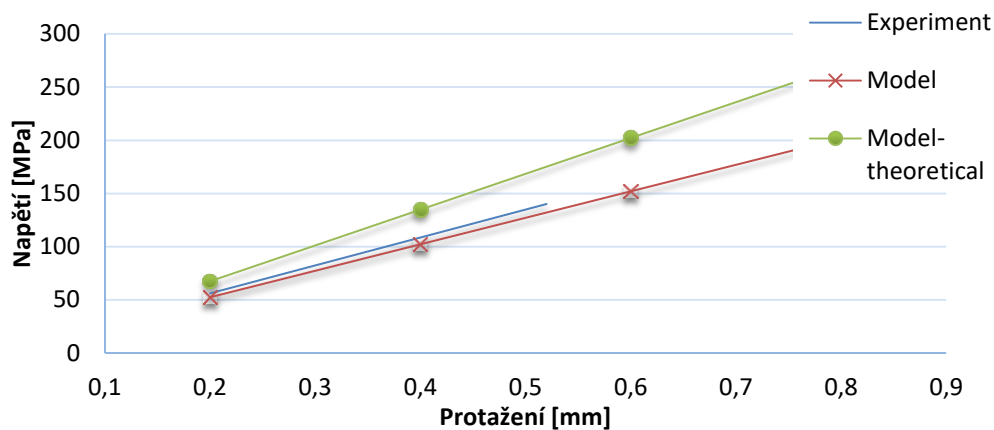
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Přepis matice tuhosti do tvaru inženýrských konstant potom bude:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{12}}{E_1} & -\frac{\mu_{13}}{E_1} & & & \\ \frac{\mu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & & & \\ \frac{\mu_{31}}{E_3} & -\frac{\mu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & & & \\ & & & \frac{1}{G_{23}} & & \\ & & & & \frac{1}{G_{31}} & \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

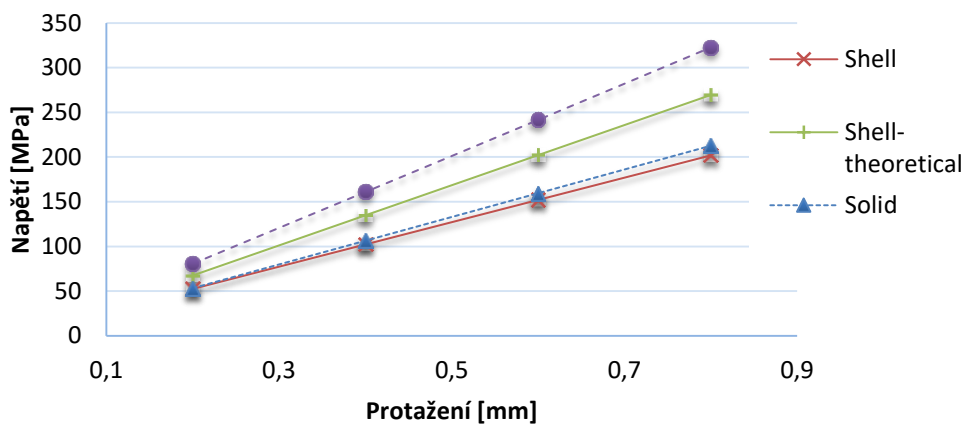


Obr. 4.5 - Výsledek pro 6 vrstev – Shell.



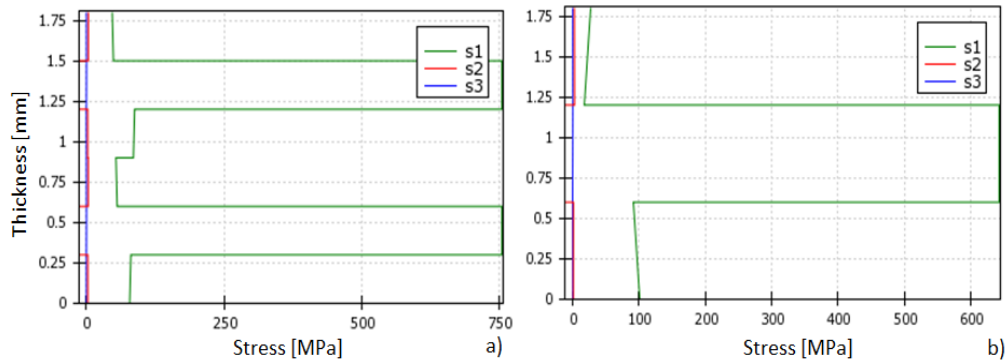
Obr. 4.6 - Výsledek pro 3 vrstvy – Shell.

Jako další možnost byly modely vytvořeny s reálnou tloušťkou - solid. Jak je zřejmé z obr. 4.7, existují měřitelné rozdíly, takže je možné říci, že dva přístupy - shell, solid nejsou stejné, i když by teoreticky měly být.



Obr. 4.7 - Srovnání vytvořených modelů Shell a Solid.

Tento jev kdy dochází k rozchodu výsledků je značný zejména s vyššími hodnotami modulu pružnosti vláken, jak je patrné z obr. 4.7. Vzhledem k tomu, že při stanovených nižších hodnotách  $E_1$  jsou výsledky pro shell a solid téměř stejné, přičemž pro vyšší teoretické hodnoty deklarované výrobcem, vykazují významný rozdíl.



Obr. 4.8 - Hodnoty vznikajícího napětí v tloušťce vzorku v 1, 2, 3 směrech modelu: a) 6 vrstev b) 3 vrstvy.

Materiálové modely byly získány experimenty a porovnány s teoretickými hodnotami, které by měly být dosaženy podle pravidla směšování jednotlivých složek. Tyto materiálové modely byly vyhodnoceny také numerickou simulací (viz. Obr. 4.5-4.7), prováděnou v ACP (Advanced Composite Processor) systému Ansys. Byly nalezeny významné rozdíly v teoretických a reálných materiálových vlastnostech kompozitních dílů.

Pokud bychom chtěli znát celý proces chování kompozitního dílu při zatížení až do jeho selhání, bylo by snadnější použít experiment. Při použití standardního modelu bude napětí v závislosti na čase (deformaci) stále rostoucí, dokud řešení neztratí konvergenci. Bez dalších funkcí sofistikovaného postprocesoru tedy není možné z modelu stanovit maximální hodnoty, při nichž dochází k porušení. To znamená, že pokud bychom chtěli znát celý proces deformace, je použití standardního nelineárního statického modelu, který používáme např. pro ocelové díly nedostatečné, neboť s ohledem na nekonečné množství kombinací materiálů a jejich skladby není možné jednoduše stanovit mez pevnosti, kluzu atd. S ohledem na post-processing je v takovém případě vhodné změnit použitý model kompozitního shellu na solid model doplněný o vlastnosti interfacé, soudržné prvky - *cohesive elements*, kritéria porušení atd., což by mohlo být dalším krokem v budoucích pracech.



## 5 ZÁVĚR

Cílem disertační práce bylo otestovat a zvolit vhodnou výztuž, která bude navíjena na PUR jádro, z kterého bude následně vyroben kompozit a nalézt vhodnou strukturu výsledného kompozitu pro daný účel použití.

V první části disertační práce je přehled současného stavu výzkumu kompozitních struktur, poznatky o kompozitech a vývojem použití kompozitu v průmyslu. Druhá část byla rozdělena do několika kapitol a zabývá se experimentální částí práce.

První kapitola experimentu je věnována testování použité výztuže, kde bylo potřeba otestovat vliv opotřebení rovingů na jejich výsledné vlastnosti, jelikož dochází při výrobě k namáhání a opotřebení při navíjení vláken. Testována byla uhlíková vlákna od třech výrobců a dále pak skleněná a čedičová vlákna. Rovingy Tenax a Toray byly podrobeny testu na aparatuře s velmi dobrým výsledkem. Nedochází k opotřebení vláken, které by mělo významný vliv na snížení pevnosti. Lze tedy říci, že pokud se jedná pouze o průchod uhlíkových vláken přes vodící elementy při ovíjení a o manipulaci s vlákny při navíjení nedochází k výraznému poškození svazku vláken. Ale u vláken Tenax dochází ke změně rozměrů rovingu - roving se shrnuje. Elementární vlákna se rozdělují do menších svazků a roving následně nepokryje předpokládanou plochu. Problém nastává u materiálu uhlíkových vláken Zoltek, kdy už z výroby jsou na pramencích okem viditelná poškozená – polámaná a odstávající vlákna. Ta jsou pak při dalším namáhání dále poškozována, vzniká velké množství prachu z úlomků těchto vláken. Cyklické namáhání (50 a 100 cyklů na aparatuře pro opotřebení) vedlo ke ztrátě soudržnosti rovingu, opotřebení 100 cyklů nebylo možné realizovat, roving se rozpadl ještě před dokončením pokusu. Stejně tak tomu bylo i u čedičových a skleněných vláken. Při použití takového materiálu pro průmyslovou výrobu, vzhledem k velkému úletu částic během zpracování, by bylo nutné velmi přísně dbát na dodržování norem týkajících se čistoty ovzduší na pracovišti a souvisejících norem.

Druhá kapitola experimentu se zabývala mechanickým testováním vyrobených rovinných kompozitů. Testovaly se vlastnosti kompozitu v tahu, 3-bodém ohybu a rázová houževnatost metodou Charpy. Vyrobeny byly 2, 4 a 6-ti vrstvé polymerní kompozity vyztužené paralelně uspořádanými kontinuálními vlákny s úhly křížení vrstev 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° k ose výrobku. Největší vyztužující účinek měla uhlíková vlákna kladena rovnoběžně se směrem namáhání kompozitu a postupně se zvyšujícím se úhlem vláken vyztužující účinek klesá (toto souvisí i s vnitřní strukturou uhlíkových vláken). Pokud zvýšíme úhel kladení na více než 45°, pak se mechanické vlastnosti rapidně sníží a vlákna už neplní funkci výztuže.

U statické zkoušky tříbodovým ohybem bylo zjištěno, že tak jako u tahové zkoušky má i v tomto případě nejvyšší hodnoty uhlíkový kompozit s nejnižším úhlem křížení vrstev k ose vzorku - napětí v ohybu se zvyšujícím se úhlem křížení klesá. Pokud zvýšíme počet vrstev na dvojnásobný, pak se napětí zvýší o cca 10 %. Pokud bude počet vrstev trojnásobný, pak se zvýší pevnost o cca 20 % - 50 %.



Nejvyšší rázovou houževnatost vykazuje kompozitní materiál s čedičovou výztuží a tak jako v předchozích testech má nejvyšší rázovou houževnatost kompozitní materiál s výztuží křížící se pod nejmenším úhlem k ose výrobku. S rostoucím úhlem křížení vrstev rázová houževnatost klesá.

Důležitým poznatkem v této kapitole bylo kladení rovingu při výrobě rovinných kompozitů těsně vedle sebe, aby v kompozitu nevznikaly mezery. Protože mezery poté způsobovaly nižší pevnost kompozitu. Nelze však úplně srovnávat uhlíková vlákna se skleněnými a čedičovými vlákny. Vlákna uhlíková mají vnitřní uspořádání do bazálních rovin rovnoběžných s osou vláken a tvořených šesterečným uspořádáním uhlíků, kdežto vlákna skleněná a čedičová jsou amorfní. Uhlíková vlákna a kompozit z nich vyrobený dosahoval nejlepších výsledků. Pokud se snížil úhel křížení vrstev všech typů kompozitů alespoň na  $45^\circ$ , pak byly výsledky všech kompozitů velmi srovnatelné. Při porovnání čedičových a skleněných vláken převažují vyšší hodnoty u vláken čedičových, ale pouze nepatrně, proto lze říct, že vlastnosti těchto dvou vláken jsou srovnatelné.

Ve třetí kapitole experimentu je testování kompozitů - 3D trubek. Ty byly testovány na mechanické vlastnosti (rázová houževnatost, tah, ohyb, tlak a smyk/kрут) a byla hodnocena kompatibilita vláken s matricí. Např. série obsahující vlákna Toray dosáhla nejlepších výsledků v tlaku a rázové houževnatosti, ale naopak nejhorší měla v tahu, což svědčí především o vysoké kvalitě vláken, protože afinita použité matrice vůči vláknu není 100%. Vnitřní struktura kompozitu vykazuje po kontrole na rastrovacím elektronovém mikroskopu defekty v podobě náhodně rozložených vzduchových bublin.

Velmi dobrých výsledků v tahu a rázové houževnatosti dosáhly série obsahující vlákna Tenax 24K, ale nejhorší byla v měření tlaku a ohybu. Kompatibilita matrice vůči vláknu je lepší, než v předchozím případě. Série obsahující vlákna Zoltek a Tenax 48K dosahovaly průměrných výsledků ve všech měřených vlastnostech. Nižších rázovou houževnatost pak měly kompozity z uhlíkových vláken Zoltek, která ale měla velmi dobrou kompatibilitu s matricí. Z výsledků měření mechanických vlastností - tahu, tlaku, ohybu a smyku, nelze jednoznačně říci, která série kompozitů je nejlepší. Příčinou špatné kompatibility vláken s matricí je s největší pravděpodobností povrchová úprava vláken, tzv. sizing. Přesné chemické složení sizingu je pro odběratele neznámé a analýza pomocí EDS ukázala pouze malé rozdíly, není tedy možné určit přesnou příčinu snížení afinity. Je velmi důležité brát zřetel na typ sizingu při výběru výztuže. Nevhodný výběr sizingu může negativně ovlivnit afinitu matrice vůči vláknům a ve výsledku zhoršit konečné mechanické vlastnosti kompozitu.

Při porovnání naměřených mechanických vlastností s výsledky měření velikosti a počtu bublin (defektů) v kompozitu, bylo zjištěno: že velikost rázové houževnatosti a tahového modulu kompozitu je závislá na procentu bublin v kompozitu. Čím více bublin kompozit obsahuje, tím menší je hodnota tahového modulu a rázové houževnatosti. Naopak na ostatní měřené vlastnosti procento bublin v kompozit nemá statisticky významný vliv. Závislost ohybového a tlakového modulu na procentu bublin

v kompozitu je významná pouze u kompozitu ze skleněných vláken. Toto platí pro plošný obsah bublin v kompozitu cca do 8,5 % a maximální plocha  $510 \mu\text{m}^2$ .

V závěru experimentu byl použit pro hodnocení kompozitu teoretický model, který zohledňuje i ekonomickou stránku výroby kompozitů. Při jeho použití je výsledkem, že všechny testované kompozitní materiály lze daný účel použít. Materiál Tenax však dosáhl nejvyšších hodnot.

Po všech uvedených experimentech byly zvoleny nejvhodnější vlákna pro další použití a výrobu celých rámců, rozhodovalo hlavně poměr cena/výkon. Uhlíkový roving od firmy TENAX (STS 24K). Dále byla vybrána také skleněná od firmy Johns Manville s jemností 2400 tex.

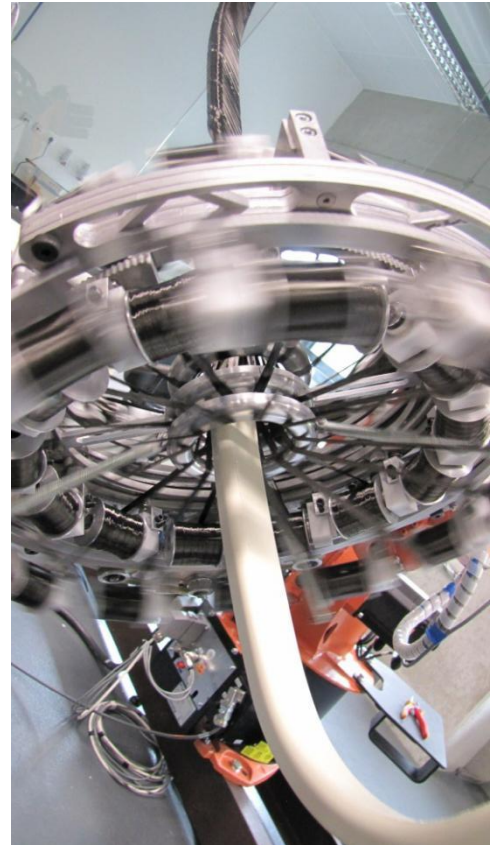
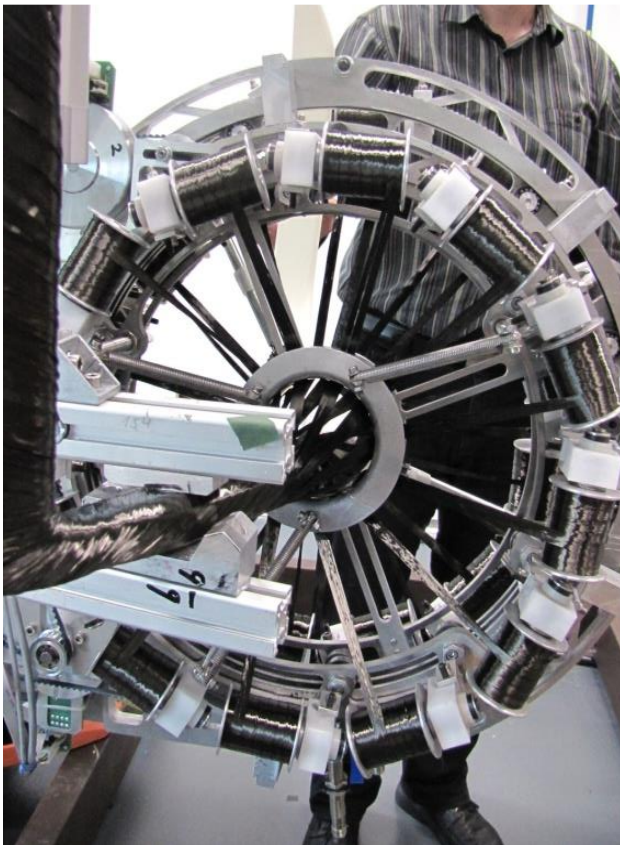
Poslední kapitolou bylo modelování a numerické simulace trubek. Materiálové hodnoty byly získány experimenty a porovnány s teoretickými hodnotami. Byly nalezeny významné rozdíly v teoretických a reálných materiálových vlastnostech kompozitních dílů. Nalezené hodnoty modulů v ose x kompozitu byly o polovinu nižší než hodnoty deklarované výrobcem, což bylo způsobeno výrobními nepřesnostmi a tedy potenciál vláken tak nemohl být naplněn. Dále bylo zjištěno, že 3-vrstvý kompozit vyrobený z rovingu 48K dosahoval vyšších hodnot modulů, především v hlavních směrech zatížení, což je vhodné pro tento typ kompozitu, kdy chceme nejlepší hodnoty pouze v určitém směru zatížení. Naopak 6-vrstvý kompozit vyrobený z rovingu 24K dosahoval nižších hodnot modulů a napětí bylo rozloženo v různých směrech, neplní tedy funkci kompozitu. Proto z těchto modelací vychází jako nejvhodnější kompozit 3-vrstvý.

Výzkumy uváděné v této práci zahrnovaly mezioborové propojení, které přispělo ke zlepšení spolupráce mezi akademickou a průmyslovou sférou. Z poznatků této práce bylo realizováno ovíjení 3D uzavřeného útvaru a ovíjení uzavřeného 3D útvaru neseného úchopným rámcem (obr. 5.1 a 5.2). Byly vyrobeny 3D rámy z uhlíkových a skleněných vláken pomocí nové hlavy (36 cívek), které dále postoupily do sériové výroby. Dále se pracuje na optimalizaci navíjení a správnému rozložení vláken nejen na těchto rámech, ale už i na jiných dílech pro automobilní či letecký průmysl.

#### **Závěrečné shrnutí:**

- U většiny uhlíkových vláken nedochází při navíjení k výraznému poškození, které by mělo významný vliv na snížení pevnosti – vlákna nevhodná lze rozeznat už z výroby pouhým omakem.
- Nejvyšší vyztužující účinek mají vlákna kladena rovnoběžně se směrem namáhání, se zvyšujícím se úhlem vláken účinek klesá, s vyšším úhlem než  $45^\circ$  prudce klesají mechanické vlastnosti kompozitu.

- Důležitý je typ sizingu při výběru výztuže, nevhodný výběr sizingu může negativně ovlivnit afinitu matrice vůči vláknům a zhoršit mechanické vlastnosti kompozitu.
- Kladení rovingů bez mezer mezi jednotlivými rovingy – mezery výrazně snižují pevnost kompozitu.
- Vyšších hodnot modulů a lepší rozložení sil napětí bude mít kompozit tvořen z méně vrstev rovingu s vyšším počtem fibril, než kompozit tvořen více vrstvy rovingů s polovičním počtem fibril.
- Využití modelování pro popis a predikci vlastností kompozitů.



Obr. 5.1 – Navíjení rámu pomocí nové hlavy



Obr. 5.2 - Navinutý uhlíkový rám v kontrolní uchycení

## Literatura

- [1] MÍŠEK, B.: *Kompozity*. 1. vyd. Brno: Technický dozorčí spolek Brno - Sekce materiálů a svařování, 2003, 81 s. ISBN 80-903-3860-7.
- [2] KOŘÍNEK, Z.: *Kompozity* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [3] MIGLIARESI, C., NICOLI, F., ROSSI, S., PEGORETTI, A.: *Novel uses of carbon composites for the fabrication of external fixators*. *Composites Science and Technology* 64 (2004) 873-883, Italy.
- [4] CHUL-JIN, M., IN-HOON, K., BAE-HYEON, Ch., JIN-HWE, K., JIN-HO, Ch.: *Buckling of filament-wound composite cylinders subjected to hydrostatic pressure for underwater vehicles applications.*, *Composite Structures* 92 (2010) 2241–2251, Republic of Korea.
- [5] PIEKARCZYK, J., PIEKARCZYK W., BLAZEWICZ S.: *Compression strength of concrete cylinders reinforced with carbon fiber laminate.*, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 2365-2369, Poland
- [6] GAY, D., HOA, S.V.: *Composite materials - design and applications*, CRC press, Taylor and Francis Group London, 2007, p.550, ISBN: 978-1-4200-4519-2.
- [7] *Praktikum ze struktury a vlastností polymerů*. [online]. [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://www.fch.vutbr.cz/home/prikryl/praktikaeto/uloha9.doc>
- [8] ČSN EN ISO 14125. *Vlakny vyztužene plastove kompozity - Stanoveni ohybových vlastnosti*. 1999.
- [9] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty - Stanoveni razove houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná razova zkouška*. 2010.
- [10] DRIML, B.: *Zakladni vlastnosti materialů a jejich zkoušení* [online]. [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: [http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky\\_mat.pdf](http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf)
- [11] EHRENSTEIN, Gottfried W.: *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [12] MARTYNKOVÁ, S. G.: *Nové technické materiály*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2010. 99 s. ISBN 978-80-7204-714-7.
- [13] *Metody testování tkaninových laminátů s polymerní matricí*. [online]. [cit. 2015-11-09]. Dostupné z: [http://technet.tul.cz/wpcontent/uploads/2013/01/KMT\\_testovani.pdf](http://technet.tul.cz/wpcontent/uploads/2013/01/KMT_testovani.pdf)
- [14] Výzkumné centrum TEXTIL II 2005-2009. [Http://vct.tul.cz/](http://vct.tul.cz/) [online]. 2005-2009 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: [http://vct.tul.cz/prac\\_fyz\\_vl8.php](http://vct.tul.cz/prac_fyz_vl8.php)
- [15] Výzkumné centrum TEXTIL II 2005-2009. [Http://vct.tul.cz/](http://vct.tul.cz/) [online]. 2005-2009 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: [http://vct.tul.cz/prac\\_fyz\\_vl4.php](http://vct.tul.cz/prac_fyz_vl4.php)
- [16] BRONCEK, J., DZIMKO, M., HADZIMA, B., TAKEICHI, Y.: *Experimental investigations of aluminium alloys 2024 –t 3 form in terms of tribocorrosion characteristics*, *Acta Metallurgica Slovaca*, 2014, Vol. 20(1), pp.97-104.
- [17] BRIAN, N. Cox, Gerry Flanagan.: *Handbook of Analytical Methods for Textile Composites*, Hampton. Virginia, NAS1-19243 1997

- [18] AGARWAL, Bhagwan D., BROUTMAN, Lawrence J.: *Vlakové kompozity*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1987, 294 s.
- [19] BODNAROVA, L.: *Kompozitní materiály ve stavebnictví*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2002, 122 s. ISBN 80-214-2266-1.
- [20] DAĐOUREK, K.: *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*, Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s., ISBN 978-80-7372-279-1.
- [21] PETRŮ, M.: *Nízkoenergetické recyklovatelné kompozitní materiály aplikovatelné v dopravním průmyslu*, Sborník konstruování – Green Engineering, 2012, str. 7-14, ISBN 978-80-7372-937-0.
- [22] PETRŮ, M., NOVÁK, O., LEPŠÍK, P.: *Mechanical properties of non-polyurethane materials for PU foam replacement in car seat*, Technológ, 2013, Vol.5, Number 3, pp. 195-200
- [23] BAREŠ, R. A. : *Kompozitní materiály*, 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [24] ŠEVČÍK, L., TŮMA, P., PETRŮ M., MARTINEC T., KOVÁŘ R. Composite reinforcement, Patent Application No. 2013-1066, 2013.
- [25] BENEŠ, L.: *Technické materiály (nejen) pro dopravní techniku*. 1. vydání. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010. 202 s. ISBN 978-80-7395-248-8.
- [26] PRAVEENGOWDA, P.: *Applications of Composites materials in the Automotive industry* [online]. Last revision on 6<sup>th</sup> February 2010 [cit. 2014-01-22]. <<http://www.scribd.com/doc/32475280/Composites-in-the-Automobile-Industry>>.
- [27] SIURU, B.: *Bio-plastics May Loom Large for the Auto Industry's Future* [online]. Greencar.com. Last revision on 16<sup>th</sup> July 2011. [cit. 2014-01-28].
- [28] GAY, D., Gambelin, J.: *Dimensionnement des Structures, une Introduction*, Hermes Science Publishing Ltd., London, 1999. p. 680, EAN13:9782746200494
- [29] GUEDES, R. M.: *Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites*, Woodhead Publishing, 2010, p.600, ISBN: 978-1-84569-656-6.
- [30] SCHULTZ, R. M.: *Energy absorption capacity of graphite-epoxy composite tubes* [online]. Scholar.lib.vt.edu. Last revision on 20<sup>th</sup> November 1998. [cit. 2014-02-10]. <<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd110498114727/unrestricted/Thesis.pdf>>.
- [31] *Přední nárazník Peugeot 306, laminát* [online]. Tuning-centrum.cz [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <<http://www.tuning-centrum.cz/product/13431-predni-naraznik-peugeot-306-laminat>>.
- [32] KOTEK, P.: *Vědci a dopravci chtějí za deset let snížit emise nákladů o 20%. Cestu už znají* [online]. Novinky.cz. Poslední revize 26.8.2012. [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <<http://www.novinky.cz/veda-skoly/209533-vedci-a-dopravci-chteji-za-deset-let-snizitemise-nakladaku-o-20-cestu-uz-znaji.html>>.
- [33] *Komponenty automobilů. Autobusů, strojů a ostatní průmyslové díly* [online]. Compositecomponents.eu. Poslední revize 18.1.2012. [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <<http://www.compositecomponents.eu/cs/komponenty-automobilu-autobusu-stroju-aostatni-prumyslove-dily>>.

- [34] ČÍPEK, V.: *Výpočtová analýza rámu formulového vozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2008. 58 s.
- [35] VRBATKA, J.: *Mechanika kompozitů*. Fakulta strojní, VUT v Brně, 2008.
- [36] *Carbon Fiber – Sandwich Composite Sheets* [online]. Robotcombat.com. Last revision on 15<sup>th</sup> October 2011. [cit. 2014-03-03].  
<<http://www.robotcombat.com/products/WCCSNDH0201116.html>>.
- [37] ČECH, V.: VUT v Brně, Ústav chemie materiálů, Technika, technologie, vydání 26/2006, Převzato z časopisu MM *Průmyslové spektrum* - 4/2006  
[www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com)
- [38] GRÉGR, J.: *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická, 2004.
- [39] GRÉGR, J.; SLAVÍK, M.; ŠILCOVÁ, M.: *Povrch uhlíkových vláken*. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 2007.
- [40] Basaltová vlákna, [www.basaltex.cz](http://www.basaltex.cz), Dostupné z: [[www.basaltex.cz/cedic/cedic.charakteristika\\_cz.htm](http://www.basaltex.cz/cedic/cedic.charakteristika_cz.htm)]
- [41] Polyuretanová matrice, Dostupné z: [http://www.pu-systems.bayermaterialscience.com/BMS/BaySystems.nsf/id/19\\_CE\\_TS\\_Material\\_Types](http://www.pu-systems.bayermaterialscience.com/BMS/BaySystems.nsf/id/19_CE_TS_Material_Types)
- [42] HAVEL COMPOSITES. Technologie výroby kompozitů [online]. 2012 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [43] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V. a VOJTĚCH, D.: *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005.
- [44] D. V. : *Kovové materiály*. Praha: VŠCHT, 2006 [cit. 2015-11-08]. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-600-1/pdf/152.pdf](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pdf/152.pdf)
- [45] LAŠ, V.: *Mechanika kompozitních materiálů* [ISBN 978-80-7043-689-9]. 2. vydání. Plzeň: TYPOS a.s. 2008.
- [46] *Technologie výroby vláknových kompozitů s polymerní maticí*. 2007. přednáška. ČVÚT, Fakulta strojní [cit. 2015-12-19]. Dostupné z: <http://www.kompozity.info/seminar/2seminar/1materialytechnologie.pdf>
- [47] ČIŽMÁROVÁ, E.: Fakulta strojní. In: *ČVÚT* [online]. 2013 [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: <http://uloz.to/xHu713EA/13p-kompozitni-materialy-jejich-vyroba-a-zpracovani-pptx>
- [48] KŘENA, J.: *Kompozity s termoplastovou maticí*. 2009. seminář. Letov letecká výroba [cit. 2015-12-19]. Dostupné z: <http://www.csm-kompozity.wz.cz/kompozity.pdf>
- [49] BIRON, M.: *Material Selection for Thermoplastic Parts: Practical and Advanced Information*. Oxford, 2016 [cit. 2016-01-03]. ISBN 978-0-7020-6284-1.
- [50] JANČÁŘ, J.: *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [51] WICHTERLE, K.: *Chemická technologie*. Technická univerzita Ostrava: Vysoká škola báňská, 2010.

- [52] HRAZDÍRA, M.: *Materiály na bázi uhlíku a jejich využití*. 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně [cit. 2015-12-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29700](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29700)
- [53] PTÁČEK, L.a kol.: *Nauka o materiálu*. II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3
- [54] Vergleich der mechanischen. *ezentumbilder* [online]. 2015 [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <http://www.ezentumbilder.de/rg/pdf/tdenVergleichsdaten%20Kohlenstofffasern%20engl.pdf>
- [55] ZEMČÍK, R.: *Mechanika kompozitů přednášky pro design*, Západočeská univerzita v Plzni. 2006.
- [56] Časopis JEC composites magazine, May 2012
- [57] Team Weendee Nicole, *BMW's Big Bet on Carbon Fiber*, Solution Jurnal, [online]. 2014 [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: [http://www.rmi.org/winter\\_2014\\_esj\\_bmws\\_big\\_bet\\_on\\_carbon\\_fiber](http://www.rmi.org/winter_2014_esj_bmws_big_bet_on_carbon_fiber)
- [58] Fiber Reinforced Polymers Characteristic and Behaviors, Dostupné z: <http://www.build-on-prince.com/fiber-reinforcedpolymers.html#sthash.3WUV0VVa.SNj7Aqa0.dpbs>
- [59] TOMKOVÁ, B.: *Přednášky z předměru Kompozity s textilní výztuží*. Fakulta textilní TUL, 2006
- [60] HOTAŘ, P.: *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. Fakulta stavební VUT v Brno, 2014.
- [61] VANIČEK, J.: *Dynamicko - mechanická analýza (DMA)*. In: [online]. [cit.2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/20060106/prednaska7.pdf>
- [62] CHUNG, Deborah D. L.: *Composite materials; functional materials for modern technologies*. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X
- [63] Optimální využití kompozitů zvyšuje úroveň výrobků na světovém trhu. Technický týdeník. 2010, 24, s. 6-6, Praha: Business Media CZ
- [64] MELOUN, M. a MILITKÝ, J.: *Kompendium statického zpracování dat*. Academia, 2002.
- [65] NECKÁŘ, B.: *Morfologie a strukturní mechanika obecných vláknenných útvarů*. Fakulta textilní TUL, 1998.
- [66] PELIKOVSKÝ, J.: *Vlastnosti kompozitních materiálů*. 2012. [cit. 2015-12-19]. Dostupné z: <http://www.altimabohemia.cz/vlastnosti-kompozitnich-materialu.html>
- [67] ZOU, Y., TONG L., STEVEN G. P.: *Vibration based model dependent damage identification and health monitoring for composite structures*. Journal of Sound and vibration, 2000, Vol. 230.
- [68] HASHIN, Z., Z and B. W. ROSEN: *The elastic moduli of fiber reinforced materials*, Journal of Applied Mechanics, Trans ASME, Vol.31, 1964, pp.223-232.
- [69] SYROVATKOVÁ, M., KULHAVÝ, P., SRB, P., PETRU, M.: *Testing of Tensile Properties of Carbon Prepreg Composite Rods with Adding of a Non*



*Composite Part*, Defect and Diffusion Forum vol 368, Trans Tech Publications, Switzerland, 2016.

- [70] ULLAH, H., HARLAND, A. R., SILBERSCHNIDT, V.: *Damage modelling in woven-fabric CFRP laminates under large-deflection bending*, Computational Materials Science, Vol. 64, 2012.

#### **Práce autora**

- [71] ERNESTOVÁ, M. *Vliv výztuže na výsledné mechanické vlastnosti kompozitů*. Workshop pro doktorandy FT a FS TUL - sborník, září 2013, s.33-38, ISSN 978-80-7372-987-5.
- [72] NOVOTNÁ, M. *The Influence of reinforcement and matrix on tensile stress of a carbon composite*. Proceedings of the 7th Aachen-Dresden, International Textile Conference [CD]. 2013. ISSN 1867-6405
- [73] ERNESTOVÁ, M. SYROVÁTKOVÁ, M. *The simulation of fiber wear on a revolving pulley*. 8th International Conference Texsci 2013[flash disk], ISBN 978-80-7372-989-9
- [74] NOVOTNÁ, M. SYROVÁTKOVÁ, M. *Měření houževnatosti uhlíkového kompozitu*. 2. ročník národní konference Green Engineering – sborník, 2013, ISBN 978-80-7494-035-4.
- [75] NOVOTNÁ, M. SYROVÁTKOVÁ, M. MARŠÁLKOVÁ, M. *Měření rázové houževnatosti kompozitu s polyuretanovou maticí*. časopis Technológ 1/2014, 2014, ISSN 1337-8996.
- [76] NOVOTNÁ, M. SYROVÁTKOVÁ, M. *Měření rázové houževnatosti kompozitu s uhlíkovými vlákny a polyuretanovou maticí*. Mezinárodní konference mechanika kompozitních materiálů a konstrukcí MK2 – sborník [Přednáška], 2014, ISBN
- [77] NOVOTNÁ, M. SYROVÁTKOVÁ, M. *Vliv výztuže na výsledné mechanické vlastnosti konstrukce kompozitu a jejich zkoušení*. Recenzovaný slovenský časopis Technológ 2/2014, ISSN 1337-8996.
- [78] NOVOTNÁ, M. *The testing of carbon wrapped tubes*. Workshop pro doktorandy FT a FS TUL - sborník, září 2014, s.33-38, ISSN 978-80-7494-100-9.
- [79] NOVOTNÁ, M. MARŠÁLKOVÁ, M, LOUDA, O. *The influence of inorganic reinforcement on the mechanical behaviour of composites*. Eighteenth international conference Mechanics of composite materials, Riga, Latvia, June 2014

- [80] NOVOTNÁ, M. *Comparison properties of the selected inorganic fibers*. Proceedings of the 8th Aachen-Dresden, International Textile Conference [CD]. [Přednáška] 2014. ISSN 1867-6405
- [81] SYROVÁTKOVÁ, M., PETRŮ, M. a NOVOTNÁ, M. Crash test of carbon composite. *Engineering Mechanics 2015; 21. International Conference*. 1. vyd. Praha: Academy of Sciences of the Czech Republic, 2015. S. 316 – 317. ISBN 970-80-86246-42-0, ISSN 1805-8248.
- [82] NOVOTNÁ, M. Dependence of mechanical properties of carbon composites on the directional orientation of the layers. *Workshop pro studenty Ph.D textilní a Fakultě strojního inženýrství TUL*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. S. 129 – 133. ISBN 978-80-7494-229-7.
- [83] NOVOTNÁ, M. Comparison properties of the selected inorganic fibers. *Chemical Fibers International*. 1. vyd., 2015. 99 – 101. ISSN 0340-3343.
- [84] SYROVÁTKOVÁ, M., NOVOTNÁ, M. a PETRŮ, M. Studie vlivu směrové orientace vyztužujících prvků uhlíkových kompozitů na mechanické vlastnosti. *Technológ*. 1. vyd. Žilinská univerzita v Žilině, 2015, roč. 7, č. 3. S. 205 – 209. ISSN 1337-8996.
- [85] NOVOTNÁ, M. Comparison properties of the selected inorganic fibers. *Chemical Fibers International*. 1. vyd. Deutscher Fachverlag GmbH, 2015, roč. 66, č. September. S. 28 – 30. ISSN 0340-3343.
- [86] NOVOTNÁ, M. Comparison properties of the selected inorganic fibers. *Melliand China*. 2. vyd., 2016. 14 – 16. ISSN 100-6867.
- [87] PETRŮ, M., SYROVÁTKOVÁ, M., NOVOTNÁ, M., Crash Test of Carbon Composite. *Applied Mechanics and Materials 2016*, s. 385-391, ISSN 385-391

#### **Bakalářské a diplomové práce se vztahem ke studované problematice**

- [88] KOVALČÍKOVÁ, M. Porovnání vlastností vybraných anorganických vláken, Bakalářská práce, Liberec 2014 - vedoucí
- [89] KOKRDOVÁ, B. Termomechanická analýza kompozitních materiálů a výztuží z uhlíkových vláken, Bakalářská práce, Liberec 2013 - konzultant
- [90] MINÁŘ, L. Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s výztuží z uhlíkových vláken, Bakalářská práce, Liberec 2013 - konzultant
- [91] HLUBUČKOVÁ, L. Uhlíková vlákna jejich zpracování a využití v České republice, Bakalářská práce, Liberec 2013 - konzultant
- [92] NETÍK, L. Vliv počtu vrstev na výsledné mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny, Diplomová práce, Liberec 2013 - konzultant
- [93] JIRKŮ, M. Vliv úhlu křížení vrstev na výsledné vlastnosti kompozitních materiálů, Diplomová práce, Liberec 2013 – konzultant
- [94] TOGNEROVÁ, M. Porovnání vlastností kompozitních materiálů s výztuží ze skleněných a čedičových vláken, Bakalářská práce, Liberec 2015 – vedoucí

- [95] HLUBUČKOVÁ, L. Porovnání vlivu použití uhlíkového vlákna SIGRAFIL C50 a PANEX 35 na výsledné vlastnosti kompozitu, Diplomová práce, Liberec 2016 – konzultant

## **Seznam tabulek**

- 2.1 – Polymery vyztužené vlákny – porovnání vlastností [58].
- 2.3.1 – Přehled technologií a polymerů pro matrice kompozitu [42].
- 2.4.1 – Přehled vláken a jejich vlastností [55].
- 2.4.2 – Přehled největších výrobců uhlíkových vláken [56].
- 2.5.1 – Přehled matric a jejich vlastností [55].
- 3.1.1 – Přehled materiálu.
- 3.2.1 – Kategorie vzorků.
- 3.2.2 - Výsledky tahové zkoušky různých druhů výztuží, výztuž kladena pod úhlem  $0^\circ$ -průměrné hodnoty.
- 3.2.3 – Výsledky tahové zkoušky matrice bez výztuže.
- 3.2.4 – Průměrné hodnoty dvouvrstvého uhlíkového kompozitu s různými úhly křížení.
- 3.2.5 – Získané průměrné hodnoty různě vrstveného uhlíkového kompozitu ( $30^\circ$  a  $60^\circ$ ).
- 3.2.6 – Získané průměrné hodnoty rázové houževnatosti různě vrstveného uhlíkového kompozitu ( $30^\circ$  a  $60^\circ$ ).
- 3.3.1 – Specifikace navinutých trubek.
- 3.3.2 – Specifikace vzorků.
- 3.3.3 – Výsledky testu houževnatosti trubek.
- 3.3.4 – Výsledné objemové podíly jednotlivých sérií.
- 3.3.5 – Výsledky měření pomocí obrazové analýzy.
- 3.3.6 – Prvkové složení uhlíkových rovingů se sizingem.
- 3.3.7 – Výsledky zkoušení trubek z ITC Zlín.
- 3.4.1 – Zvolené parametry a jejich limitní hodnoty.
- 3.4.2 – Přehled výsledků měřených parametrů rovinných kompozitů.
- 3.4.3 – Bodové rozhraní pro rozhodnutí o vhodnosti použití.
- 3.4.4 – Bodové rozhraní cenového rozpětí.
- 3.4.5 – Ekonomické hodnocení naměřených hodnot zvolených parametrů.

## **Seznam obrázků**

- 1.2.1 – První auto z kompozitu [27].
- 1.2.2 – Zastoupení konstrukčních materiálů v sériové výrobě [12].
- 2.2.1 – Fázové rozhraní vlákno – matrice [66].
- 2.2.2 – Schéma smáčení v kompozitu [20].
- 2.2.3 – Posuzování adheze při tahovém zatížení [20].
- 2.2.4 – Posuzování adheze při přestřížení [20].
- 2.2.5 – Posuzování adheze v lomu [20].
- 2.3.1 – Ruční kladení [42].
- 2.3.2 – Vysokotlaké RTM [42].
- 2.4.1 – Skleněný roving během kladení výztuže.
- 2.4.2 – Uhlíkový roving.
- 2.4.3 – Vliv teploty zpracování na změny struktury uhlíkových vláken [38].
- 2.4.4 – Srovnání nejběžnějších používaných uhlíkových vláken podle dosažené pevnosti v tahu [55].

- 2.4.5 – Srovnání nejběžněji používaných uhlíkových vláken podle dosaženého modulu pružnosti [55].
- 2.4.6 – Čedičový roving.
- 2.6.1 – Manuálně dotahované čelisti.
- 2.6.2 – Schéma statisticky ohybové zkoušky [10].
- 2.6.3 – Rázové kladivo [13].
- 3.1.1 – Aparatura pro simulaci opotřebení rovingů.
- 3.1.2 - Závislost napětí při přetrhu na opotřebení jednotlivých rovingů a) při rychlosti 0,63 m/s, b) při rychlosti 1,55 m/s.
- 3.1.3 – Závislost napětí na opotřebení po 50 cyklech, při dvou různých rychlostech.
- 3.2.1 – Příklad úhlu křížení vrstev rovingů (15° od osy).
- 3.2.2 – Výroba čedičových kompozitů.
- 3.2.3 – Tahové napětí při přetrhu dvouvrstevných kompozitů pouze s uhlíkovou výztuží od různých výrobců a křížení výztuže pod 45°.
- 3.2.4 – Maximální tahová pevnost dvouvrstvého uhlíkového kompozitu s výztuží TENAX s různými úhly křížení (červená čára zobrazuje průměrnou tahovou sílu samotné matrice).
- 3.2.5 – Maximální tahová pevnost skleněného a uhlíkového kompozitu s různými úhly křížení.
- 3.2.6 – Tahové napětí při přetrhu jednotlivých kompozitů s různými druhy výztuže pod úhlem 0°.
- 3.2.7 – Tahové napětí při přetrhu třívrstevných kompozitů s různými druhy křížení výztuže.
- 3.2.8 – Napětí v ohybu dvouvrstvého uhlíkového kompozitu s různými úhly křížení.
- 3.2.9 – Modul v ohybu dvouvrstevných kompozitů s různými druhy výztuže.
- 3.2.10 – Napětí v ohybu dvouvrstevných kompozitů s různými druhy výztuže.
- 3.2.11 – Napětí v ohybu vrstveného uhlíkového kompozitu U1a.
- 3.2.12 – Průměrné hodnoty rázové houževnatosti dvouvrstvého uhlíkového kompozitu (červená čára zobrazuje rázovou houževnatost matrice).
- 3.2.13 – Průměrné hodnoty rázové houževnatosti dvouvrstvého kompozitu s různými druhy výztuže.
- 3.2.14 – Průměrné hodnoty rázové houževnatosti dvouvrstvého kompozitu s různými druhy výztuže.
- 3.3.1 – První ovíjení jader.
- 3.3.2 – Navinuté jádro uhlíkem a samotné jádro před a po zalití do matrice.
- 3.3.3 - Příprava vzorků k analýzám, a) vzorky pro analýzu, b) vyznačené místo zkoumání.
- 3.3.4 – Připravené vzorky k analýze lomu.
- 3.3.5 – a) Lom kolmo k ose vzorku; b) oddělení vrstev – delaminace.
- 3.3.6 – Plošné snímky H série.
- 3.3.7 – Plošné snímky J série.
- 3.3.8 – Plošné snímky M série.
- 3.3.9 – Plošné snímky S série.
- 3.3.10 – Plošné snímky R série.

- 3.3.11 – Plošné snímky T série.
- 3.3.12 – Snímky lomu a plochy AH série.
- 3.3.13 – Snímky lomu a plochy AK série.
- 3.3.14 – Snímky lomu a plochy AG série.
- 3.3.15 – Snímky lomu a plochy AP série.
- 3.3.16 – Snímky lomu a plochy AQ série.
- 3.3.17 – Snímky lomu a plochy AR série.
- 3.3.18 – Příklad měření bublin v kompozitu pomocí obrazové analýzy.
- 3.3.19 – Příklady prosycení vlevo dobré, vpravo špatné.
- 3.3.20 – Graf závislosti velikosti rázové houževnatosti na procentu bublin v uhlíkovém kompozitu TENAX.
- 3.3.21 – Graf závislosti ohybového modulu na % bublin v uhlíkovém kompozitu.
- 3.3.22 – Graf závislosti tlakového modulu na % bublin v uhlíkovém kompozitu.
- 3.3.23. – Graf závislosti smykového modulu na % bublin v uhlíkovém kompozitu.
- 3.3.24 – Graf závislosti tahového modulu na procentu bublin v uhlíkovém kompozitu.
- 4.1 – Dva základní přístupy při tvorbě vrstvených modelů a) Shell, b) Solid.
- 4.2 – Uspořádání obou modelů a)-45°/0°/45°/-45°/0°/45°, b)-45°/0°/45°.
- 4.3 – Analýzy referenčních úhlů vláken.
- 4.4 – Teoretické mechanické vlastnosti částí se specifikovanými vrstvami uspořádání a) Tenax 24K – 6 vrstev, b) Tenax 48K – 3 vrstvy.
- 4.5 – Výsledek pro 6 vrstev – Shell.
- 4.6 – Výsledek pro 3 vrstvy – Shell.
- 4.7 – Srovnání vytvořených modelů Shell a Solid.
- 4.8 – Hodnoty vznikajícího napětí v tloušťce vzorku v 1,2,3 směrech modelu a) 6 vrstev, b) 3vrstvy.