



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní



VLIV ANORGANICKÉ VÝZTUŽE NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITU

Ing. Martina Novotná

AUTOREFERÁT 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: doc. Ing. Michal Petruš, Ph.D.

Složení komise pro obhajobu disertační práce

Předseda:

Místopředseda:

Členové: (oponent)

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

1 Úvod	5
2 Předmět a cíle disertační práce	6
3 Přehled současného stavu problematiky	7
3.1 Využití kompozitů	8
4 Testování mechanických vlastností kompozitů	10
4.1 Zkouška tahem	10
4.2 Statická ohybová zkouška	11
4.3 Charpy test	12
5 Přehled dosažených výsledků	14
5.1 TESTOVÁNÍ ROVINGŮ - VLÁKNA	14
5.1.1 Popis použitého materiálu	14
5.1.2 Popis použitého měření	14
5.2 TESTOVÁNÍ ROVINNÝCH KOMPOZITŮ	17
5.2.1 Popis použitého materiálu - Výroba kompozitů	17
5.2.2 Výsledky měření rovinných kompozitů	18
5.2.3 Závěr z testování rovinných kompozitů	23
5.3 VÝROBA A ZKOUŠENÍ KOMPOZITNÍCH TRUBEK	23
5.3.1 Popis použitého materiálu na výrobu kompozitních trubek	23
5.4 MODEL EKONOMICKÉHO SROVNÁVÁNÍ	37
5.5 MODELOVÁNÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK KOMPOZITNÍCH TRUBEK	38
6 Zhodnocení výsledků a nových poznatků	41
7 Seznam použité literatury	44
8 Práce autora se vztahem ke studované problematice	46
8.1 Publikace v odborných časopisech	46
8.2 Příspěvek ve sborníku z konference	46
Vyjádření školitele doktoranda	52
Oponentské posudky disertační práce	53

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.

2 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. Vyrobit rovinné kompozity a zjistit optimální strukturu výztuže. Dále vyrobit 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.

3 Přehled současného stavu problematiky

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.

Např. MIGLIARESI [1] 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 [2], 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 nejprogresivněji se rozvíjejících konstrukčních materiálů. Vstupní materiály (vlákna, rovingy, tkaniny, pleteniny a ostatní polotovary) lze programově vrstvit a skládat a výsledné vlastnosti optimalizovat. Např. PIEKARCZYK [3], 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 vlastností 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 vláken 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. 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. [4, 9, 10]

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. [17-20]

3.1 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. [12]

Sériová vozidla představují širokospektré využití kompozitních materiálů. 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. 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. [13-16]

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 [13]. Specialitou

v oblasti polymerních kompozitů u sériových vozidel bylo v roce 1955 v Německu použito 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. [8]

Podle současných prognóz automobilních společností by mělo použití kompozitů na sériových vozidlech exponenciálně narůstat každý rok. Nemalý 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. [12]

4 Testování mechanických vlastností kompozitů

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. [7]

Mezi nejčastěji využívané metody zkoušení kompozitů patří:

- 3PB – Zkouška tříbodým 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).

4.1 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. [7]

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. 4.1). 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. 4.1 - Manuálně dotahované čelisti.

4.2 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. [5]

Zadané parametry:

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

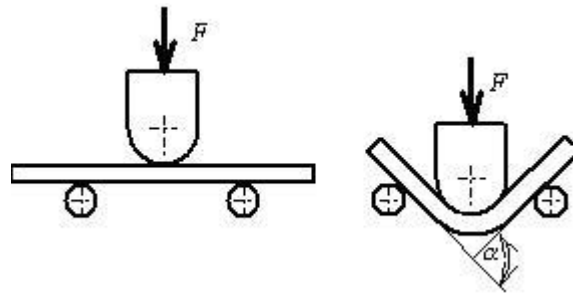
rozpětí podpěr L: 64 mm,

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. 4.2). Stejně jako u předchozí zkoušky je tato zaznamenávána a vyhodnocována v reálném čase softwarem instalovaným v připojeném počítači. Před jejím započítím 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. [5]



Obr. 4.2 - Schéma statistické ohybové zkoušky [7].

Naměřené veličiny:

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

maximální dosažená síla F_{max} [N]

ohybové napětí σ [MPa],

E-modul v ohybu E [Mpa].

Ohybové napětí σ je definováno jako napětí vnějšího povrchu vzorku uprostřed rozpětí podpěr a lze jej vypočítat ze vztahu (1):

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

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):

$$E = \frac{FL^3}{4Xbh^3} \quad (2)$$

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 [5].

4.3 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 zkušební 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. 4.3). V nejnižší poloze kladiva je vodorovně na podpěrách umístěn zkušební vzorek. Po uvolnění z počáteční polohy se kladivo pohybuje rychlostí 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. [6, 7]

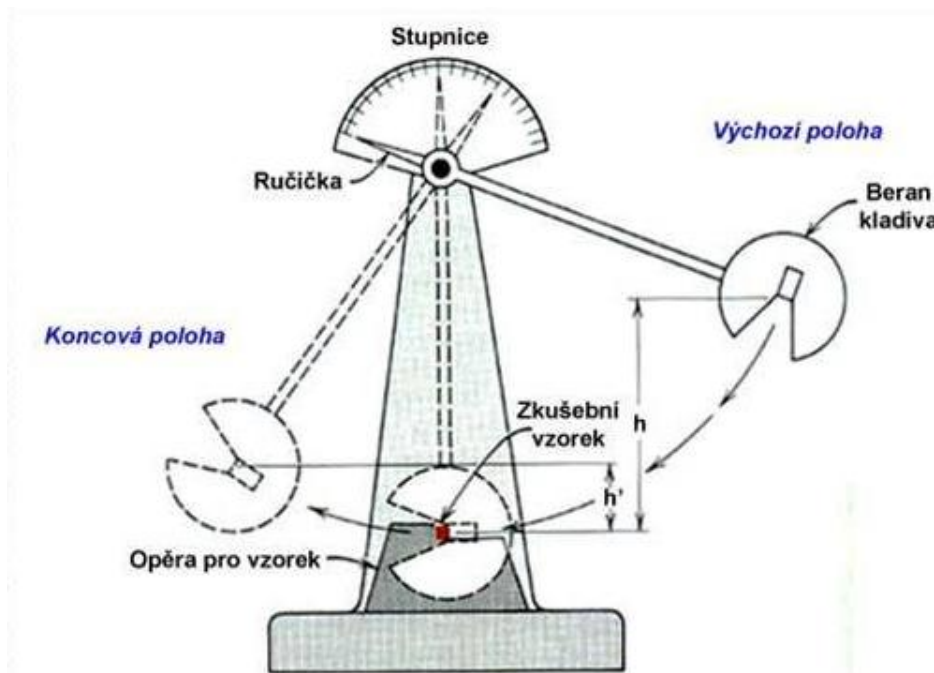
Naměřené veličiny:

energie E_c [J],

rázová houževnatost a_{cU} se vypočítá ze vztahu (3):

$$A_{cU} = \frac{E_c}{bh} \quad (3)$$

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



Obr. 4.3 - Rázové kladivo [7].

5 Přehled dosažených výsledků

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.

5.1 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.

5.1.1 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 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 5.1.1.

Tab. 5.1.1 - 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

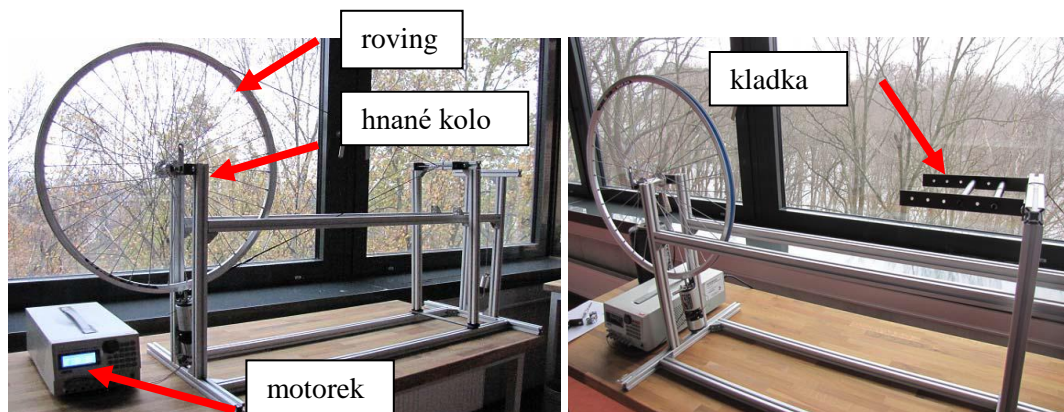
5.1.2 Popis použitého měření

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. 5.1.1. 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 zatížené závažím o hmotnosti 50 g, aby bylo vyvozeno tahové napětí o velikosti 5 N, které je přibližně rovno napětí při navíjení.



Obr. 5.1.1 - Aparatura pro simulaci opotřebení rovingů.

Parametry zkoušení opotřebení:

Počet cyklů: 50 a 100,
 Rychlost [ms^{-1}]: 0,63 (5V) a 1,55 (10V),
 Zatížení [N]: 5,
 Průměr vodičích elementů [mm]: 15,
 Úhel opásání: 38° a 177° .

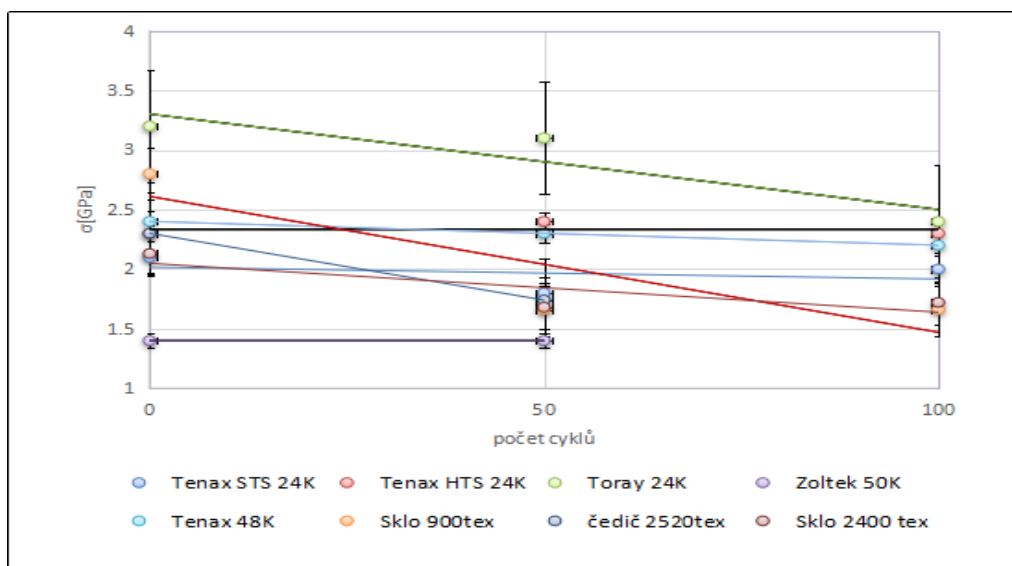
Vlákna byla opotřebena na k tomu určeném aparátu a poté byla testována trhací zkouškou. Aby bylo zabráněno nerovnoměrnému přetrhu vláken ve svazku, byl použit tento postup přípravy vláken: Vlákna byla zavěšena na šňůru a zatížena závažím o hmotnosti 200 g pro rovnoměrné napnutí a natažení vláken ve svazku. Poté byla vlákna zalepena do tvrdého papírového rámečku. Papírový rámeček s vlákny byl upnut do čelistí a okraje rámečku přestříženy, aby neovlivňovaly zkoušku.

Hodnocení opotřebení

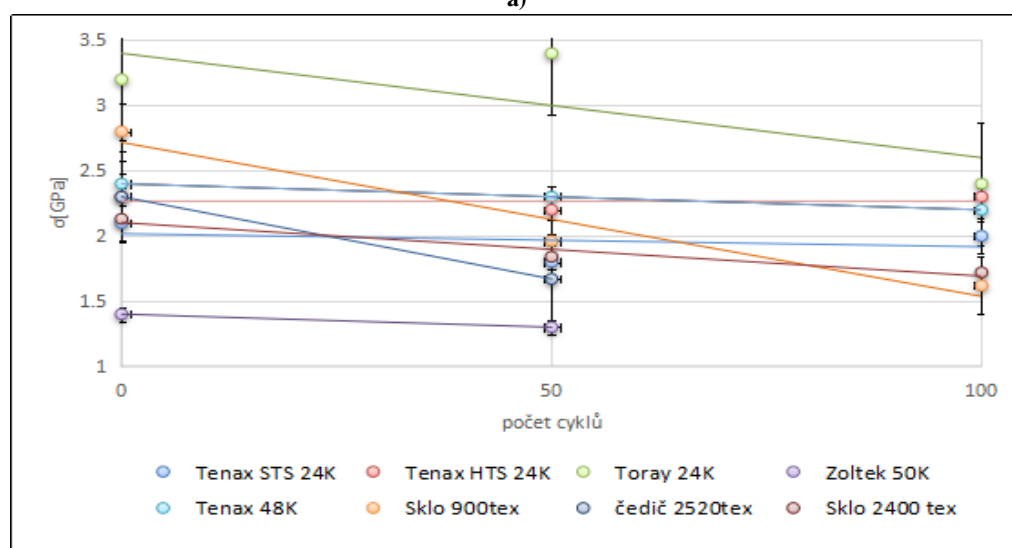
Na obrázku 5.1.2 jsou zobrazeny výsledky hodnocení opotřebení. Naměřené hodnoty ukázaly, že u vláken Tenax nedochází k opotřebení vláken, které by mělo vliv na snížení pevnosti. Pokud jde o vlákna Toray, tak je zde vidět, že vlákna v dodaném stavu mají největší pevnost, ale se zvyšováním cyklů ztrácí 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 převijení 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. 5.1.2 - Závislost napětí při přetrhu na opotřebení jednotlivých rovingů a) při rychlosti 0,63 m/s, b) při rychlosti 1,55 m/s.

5.2 TESTOVÁNÍ ROVINNÝCH KOMPOZITŮ

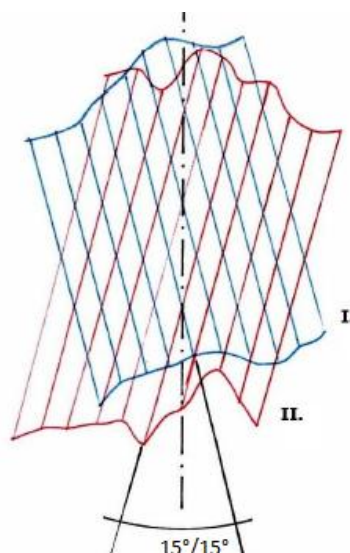
Tato část práce zahrnuje výrobu a zkoušení rovinných kompozitů. Nejdříve bylo zapotřebí zjistit, který úhel křížení vláken a počet vrstev je pro tento výzkum nejvhodnější, proto byly vyrobeny nejdříve rovinné kompozity s různými úhly křížení výztuže a s různými počty vrstev. Kompozity byly testovány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

5.2.1 Popis použitého materiálu - Výroba kompozitů

Jako výztuž byla použita uhlíková, skleněná a čedičová vlákna ve formě rovingů od různých výrobců (viz. Tab. 5.1.1), 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 5.2.1 jsou zobrazeny všechny kategorie vzorků, které byly vyrobeny.

Tab.5.2.1 - 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. 5.2.1 - Příklad úhlu křížení vrstev rovingů (15° od osy).

Byly vyrobeny kompozity s různými úhly křížení výztuže a s různými počty vrstev. Obrázek 5.2.1 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 lepicí 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. 5.2.2). 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 „třepeň“ 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 utažením dojde k vytlačení přebytečné matrice a vzduchových bublin.



Obr. 5.2.2 – 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.

5.2.2 Výsledky měření rovinných kompozitů

5.2.2.1 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 zvolen 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 5.2.2, 5.2.3.

Tab. 5.2.2 - Výsledky tahové zkoušky různých druhů výztuží, výztuž kladena pod úhlem 0° – průměrné hodnoty

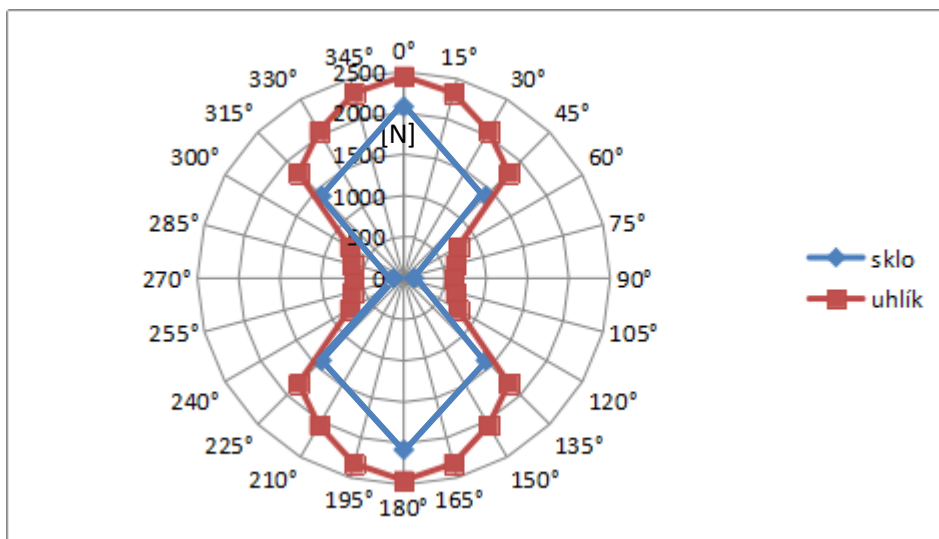
Ozn.		σ [GPa]	$\Delta 95\% \text{ IS } \sigma$ [GPa]	E [GPa]	$\Delta 95\% \text{ IS E}$ [GPa]
U1a	Tenax STS	0,54	0,034	23,5	1,34
U1b	Tenax HTS	0,61	0,071	23,2	0,71
U1c	Tenax 48K	0,98	0,047	17,17	0,58
U2	Toray	0,194	0,058	22,1	4,69
U3	Zoltek	0,55	0,084	18,55	0,84
U4	Sigrafil C50	0,5	0,022	22,5	2,2
S1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

Tab. 5.2.3 – Výsledky tahové zkoušky matrice bez výztuže

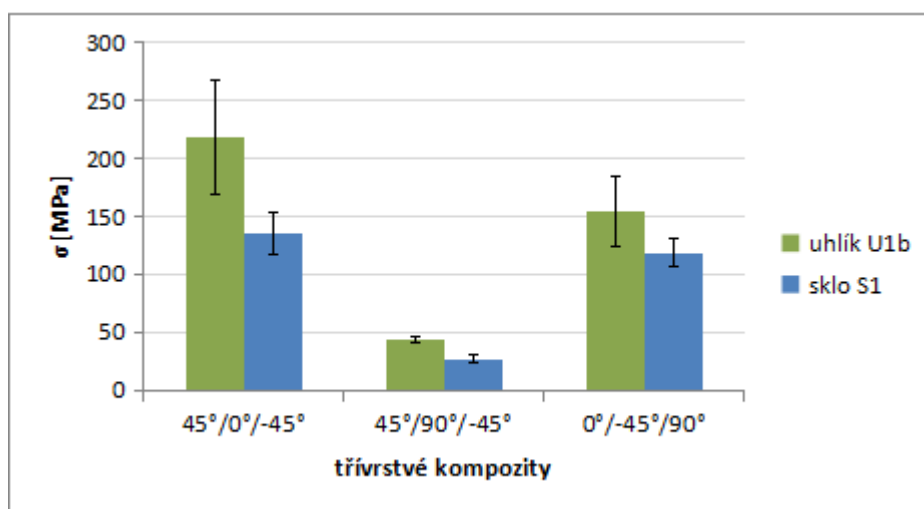
Matrice				
σ [GPa]	$\Delta 95\% \text{ IS } \sigma$ [GPa]	E [GPa]	$\Delta 95\% \text{ IS E}$ [GPa]	A[%]
0,05	0,002	1,5	0,02	3,6

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, 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 5.2.3. 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 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. Obrázek 5.2.3 zobrazuje, že nejvyšších hodnot v tomto měření dosáhl jednovrstvý uhlíkový kompozit, který je kladen pod 0° k ose kompozitu. Úhel 0° 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° nevyskytuje z důvodu porovnatelnosti výsledků. Toto měření ukázalo, že zvýšením úhlu kladení výztuže na více než 45°, pak se pevnost kompozitu rapidně sníží a vlákna už neplní funkci výztuže.



Obr. 5.2.3 – Maximální tahová pevnost skleněného a uhlíkového kompozitu s různými úhly křížení.

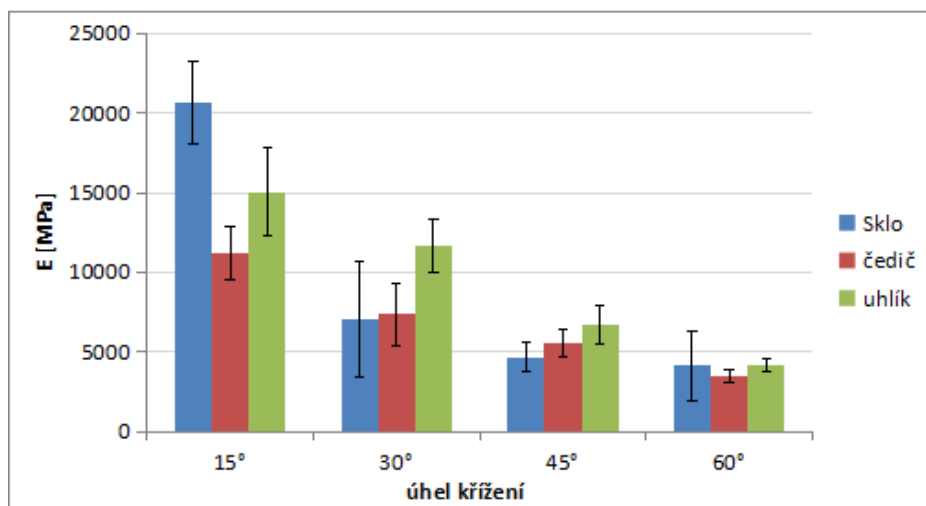


Obr. 5.2.4 – Tahové napětí při přetrhu třívrstevných kompozitů s různými druhy křížení výztuže.

Obrázek 5.2.4 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°.

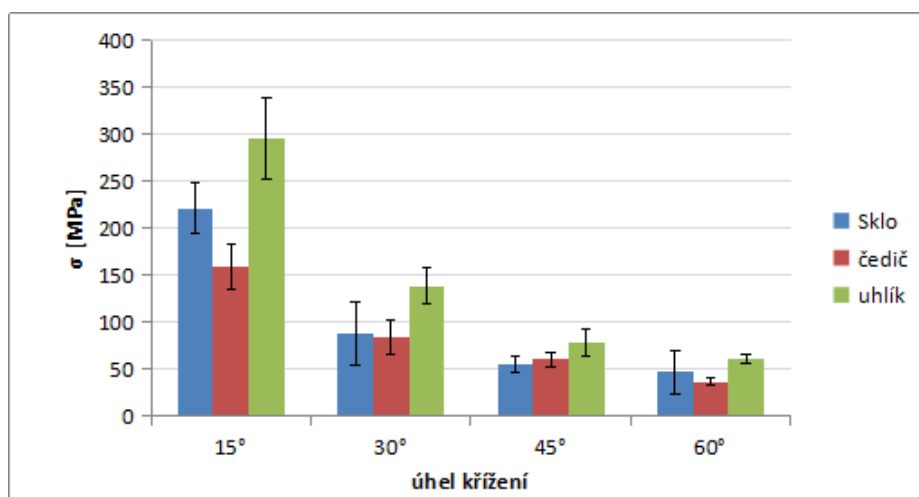
5.2.2.2 Výsledky statické ohybové zkoušky

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.



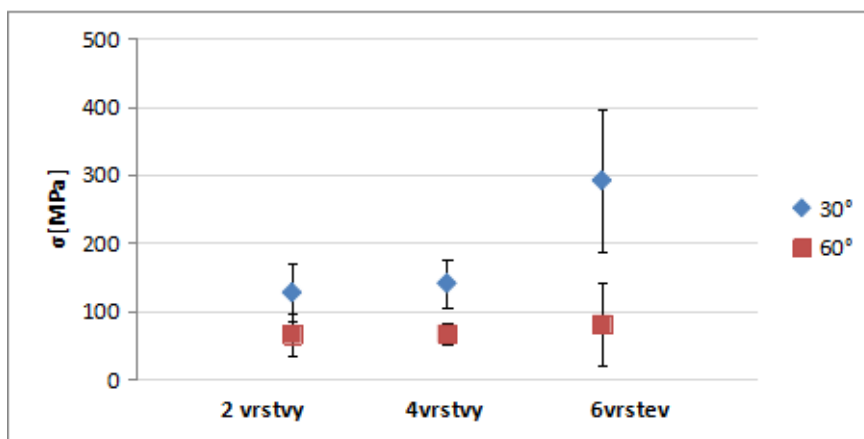
Obr. 5.2.5 - Modul v ohybu dvouvrstevých kompozitů s různými druhy výztuže.

Ze získaných hodnot bylo zjištěno, že jednoznačně nejvyšší napětí v ohybu a modul pružnosti vykazuje kompozit s úhlem křížení vrstev 15°. Nejvyšší modul v ohybu měl skleněný kompozit s úhlem křížení vrstev 15° (Obrázek 5.2.5). Při zvýšení úhlu křížení vrstev se u skleněného kompozitu hodnota modulu výrazně sníží.



Obr. 5.2.6 – Napětí v ohybu dvouvrstevých kompozitů s různými druhy výztuže.

Při porovnání různých druhů výztuží (obr. 5.2.6) 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.

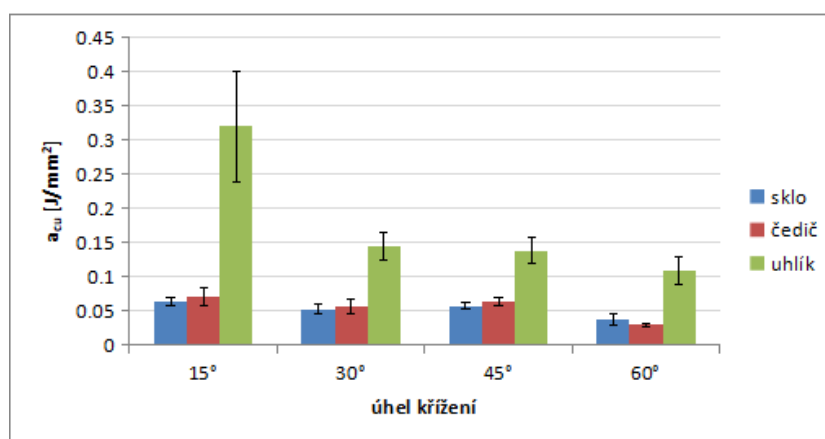


Obr. 5.2.7 – Napětí v ohybu různě vrstveného uhlíkového kompozitu U1a.

U této zkoušky byly zkoušeny různě vrstvené uhlíkové kompozity, obrázek 5.2.7. 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.

5.2.2.3 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. 5.2.8 - Průměrné hodnoty rázové houževnatosti dvouvrstvého kompozitu s různými druhy výztuže.

Nejvyšší rázovou houževnatost měl dvouvrstvý kompozitní materiál s výztuží křížící se pod nejmenším úhlem k ose výrobku a šesti vrstvé uhlíkové kompozity, tabulka 5.2.4. S rostoucím úhlem křížení vrstev rázová houževnatost klesá téměř lineárně. Naopak nejnižší houževnatost má skleněný kompozitní materiál, obrázek 5.2.8. To bylo dáno tím, že skleněný kompozit byl velmi pružný a při Charpyho testu proklouzl mezi čelistmi při nárazu kladiva.

Tab. 5.2.4 - Získané průměrné hodnoty rázové houževnatosti různě vrstveného uhlíkového kompozitu (60° a 30°).

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

5.2.3 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. 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.

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 nejlepších výsledků většinou dosahovala uhlíková vlákna, pokud se snížil úhel křížení vrstev alespoň na 45°, 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.

5.3 VÝROBA A ZKOUŠENÍ KOMPOZITNÍCH TRUBEK

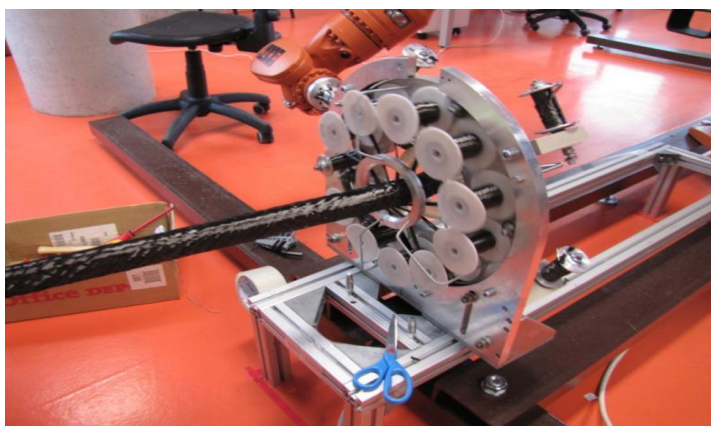
Dříve než byla zahájena výroba konečných výrobků (rámů), bylo zapotřebí vyzkoušet vyvinutý ovinovací stoj, proto byly vyrobeny jádra z PUR pěny, na které se navinula vlákna. Trubky byly využity i při testování vlastností takto vyrobených kompozitních prvků. Tato kapitola popisuje výrobu, hodnocení a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

5.3.1 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° a 0°. Počet vrstev byl zvolen s ohledem na to,

aby docházelo ke snadnému zapnění navinutých trubek, aby se trubky vešly do formy pro zapnění. 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 rámců. Jako ovíjecí zařízení byl původně navržen otevřený prstenec (pro vstup uzavřeného 3D tvaru) s deseti cívkami pro kladení vlákněných rovingů na jádro pod zadaným úhlem. Prstenec byl doplněn dalšími šesti cívkami pro vedení rovingů pod úhlem 0°. Zařízením bylo ovinuto několik technologicky a materiálově odlišných sérií, jednotlivé série jsou zobrazeny v tabulce 5.3.1. 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°, obrázek 5.3.1.

Proběhl vývoj na Katedře části a mechanismy strojů pneumatického úchopného zařízení neseného robotem, který bude manipulovat 3D rámcem. Současně bylo navrženo a sestaveno převíjecí zařízení na VÚTS, které má za úkol zajistit přesoukání vytipovaných rovingů na cívky ovíjecího zařízení. 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 zapnění maticí - obrázek 5.3.2. [11]



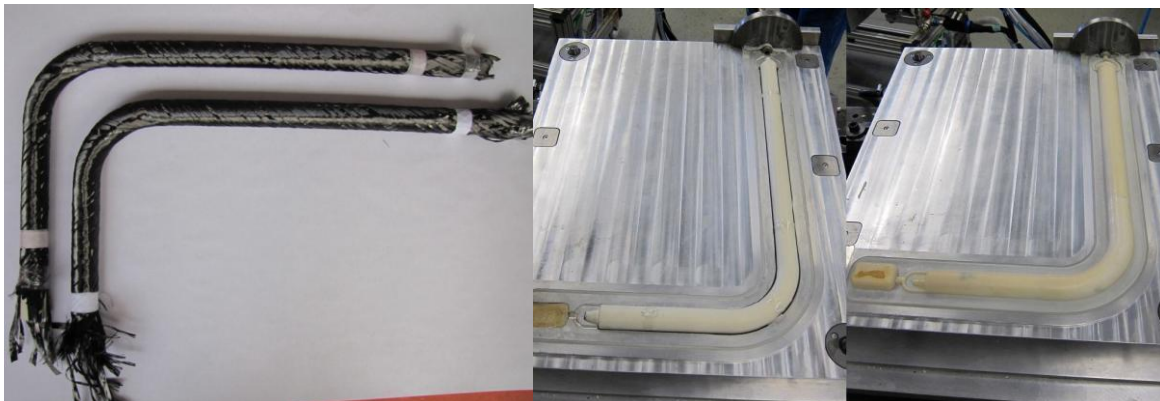
Obr. 5.3.1 – První ovíjení jader.

Tab. 5.3.1 – 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 pramence úhlu k hlavní ose.

Podrobnosti: 11 (10) = počet cívek pro jednu vrstvu $\pm 45^\circ$; 6 a 12 = počet cívek pro vrstvu 0° .



Obr. 5.3.2 – Navinuté jádro uhlíkem a samotné jádro před a po zalití do matrice.

U série U došlo ke špatnému zapnění matrice, proto již tato série nebyla dále zkoušena. 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.

5.3.2 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.

5.3.2.1 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 5.3.2. 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. 5.3.2 - Specifikace vzorků.

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

Tab. 5.3.3 – Výsledky testu houževnatosti trubek.

	série	Průměrná hodnoty houževnatosti [J/mm ²]	Směr. Odchylka [J/mm ²]	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

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo u vzorků s vláknovou výztuží Toray v obou maticích, což svědčí především o vysoké kvalitě vláken, protože afinita použité matrice vůči vlákně 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 vlákně 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.

5.3.2.2 Objemový podíl vláken

Pro výpočet procentuálního objemového podílu vláken byl použit následující vzorec:

$$V = \left(\frac{1}{204} \frac{\text{hmotnost vláken [g]}}{\text{hustota vláken [g cm}^{-3}\text{]}} \right) 100 \quad (4)$$

Hmotnost vláken byla jako rozdíl hmotností holého a ovinutého jádra, hustota vláken je hodnota uváděná výrobcem a číslo 204 je kavita formy [cm³]. 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.

Tab. 5.3.4 – 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 % 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.

5.3.2.3 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.

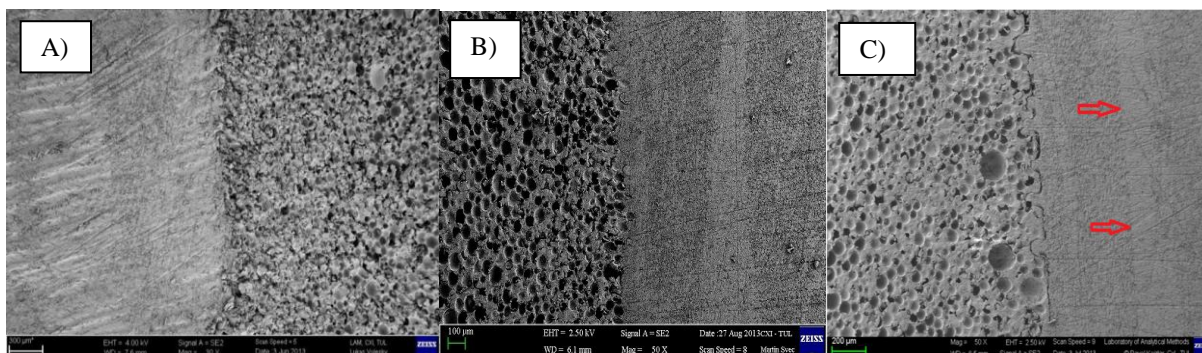
Z hlediska zpracovatelských vlastností se jako nejlepší ukázal roving 24K firmy TORAY - elementární vlákna jsou v rovingu rozložena rovnoměrně, rozměry rovingu zůstávají konstantní a roving samotný je kompaktní i při práci s materiálem, (zde hodnotíme převíjení z originální cívky dodané výrobcem na cívku 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.

5.3.2.4 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 maticí 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 obroušován, 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.

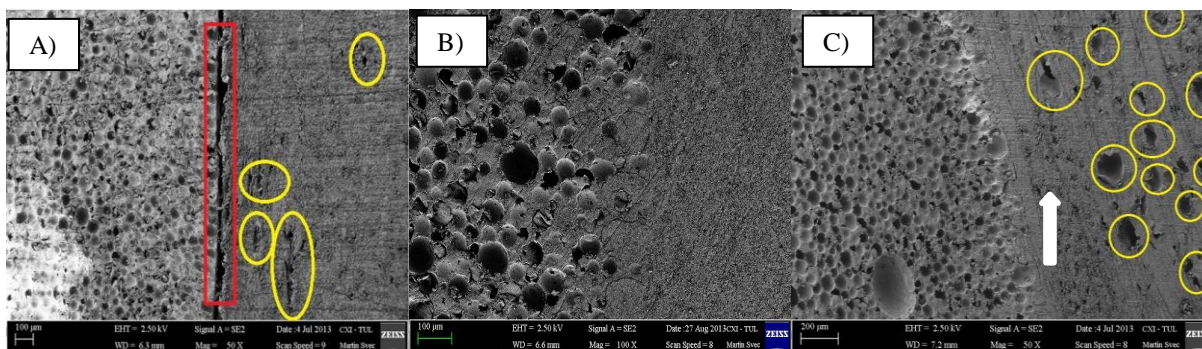
Pro vyhodnocení kompatibility proto byly vybrány snímky REM ze všech sérií. Vzorky byly odebrány z každé série ze stejných míst trubek, aby snímky mohly být porovnány. Tyto připravené vzorky se pomocí brusného zařízení obrousily za mokra, dokud nebyly dostatečně hladké a čisté. Dalším způsob zjišťování 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.

Za vadné místo je považována trhлина nebo vzduchová bublina ve hmotě kompozitu; trhliny, v nichž jsou vidět holá elementární vlákna, trčící z matrice – vytržená vlákna (obr. 5.3.10). Všechny popsané vady vedou ke snížení mechanických vlastností výsledného kompozitu. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny vzorky plochy a u posledních sérií i vzorky lomu.



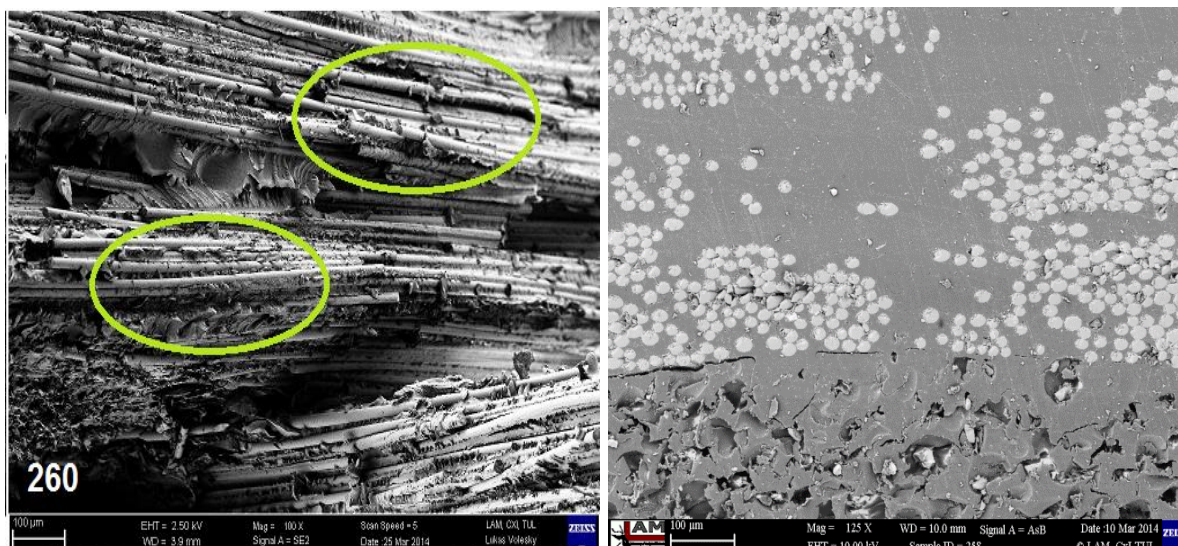
Obr. 5.3.4 – Plošné snímky sérií a) H, b) J a c) M.

Na obrázku 5.3.4 a) série H je snímáno rozhraní kompozitu (vlevo) a PUR jádra (vpravo) v různých zvětšeních. Kompozit je bez bublin a vad. Je zde vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a maticí. Kompozit se zcela prosytil až k jádru. Na obrázku 5.3.4 b) série J je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a maticí. 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. Na obrázku 5.3.4 c) je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a maticí. 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).



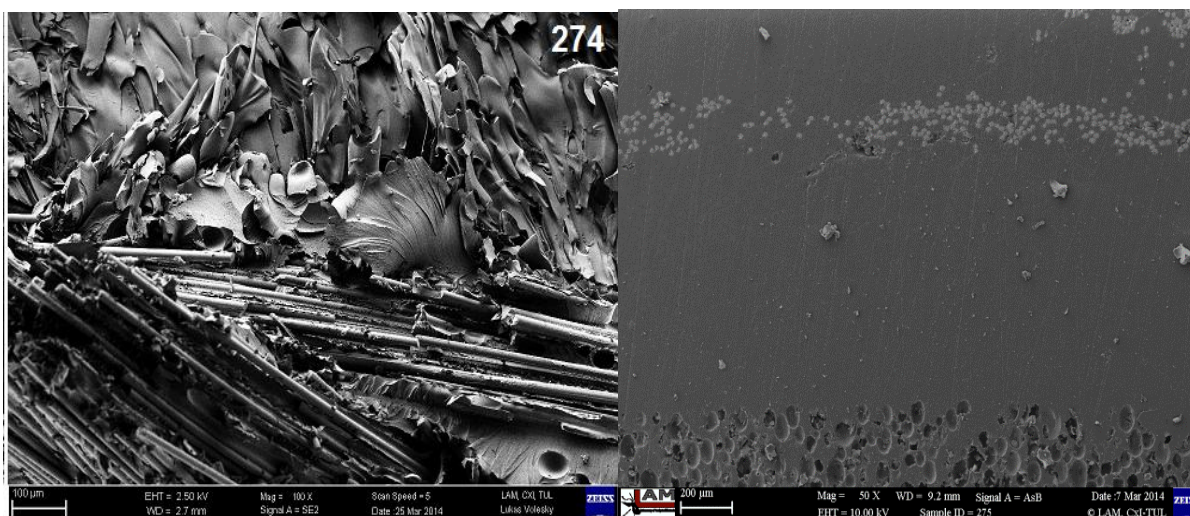
Obr. 5.3.5 – Plošné snímky sérií a) S, b) R a c) T

Na obrázku 5.3.5 a) 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. Na obrázku 5.3.5 b) série R je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a maticí. 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. Na obrázku 5.3.5 c) je vidět velké vady (bubliny-žluté kroužky) v kompozitu a špatné prosycení vlákenné vrstvy (červená oblast). Snímáno bylo rozhraní kompozitu (vpravo) a PUR jádra (vlevo) při různých zvětšeních.



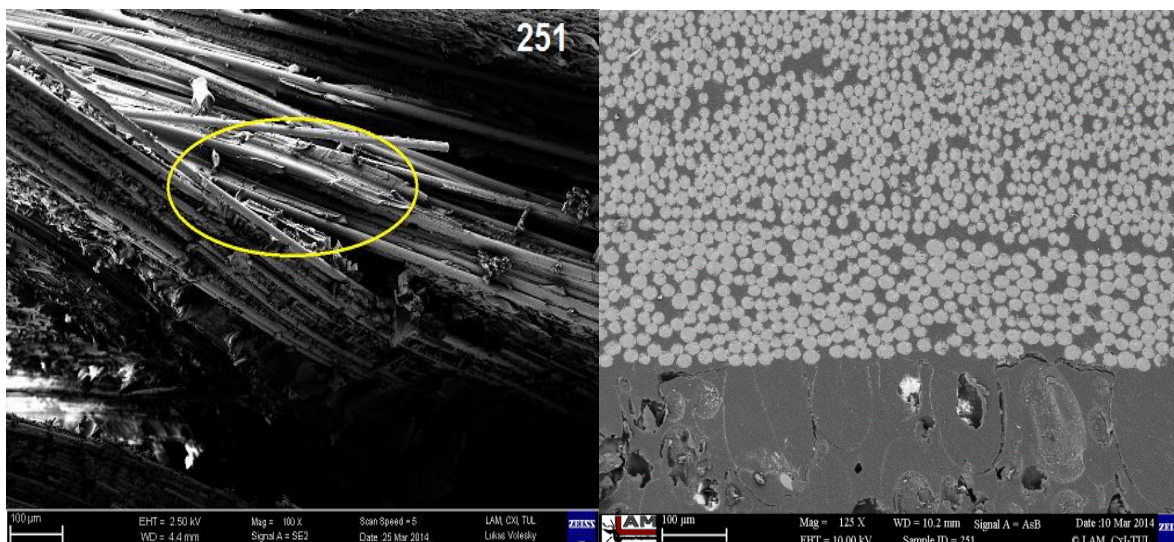
Obr. 5.3.6 – Snímky lomu a plochy AH série.

Na obrázku 5.3.6 jsou snímky lomu ze kterých je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a maticí, matrice obaluje vlákna (žluté kroužky). Vpravo snímky plochy, kde bylo snímáno rozhraní kompozitu (nahore) a PUR jádra (dole). Snímky jsou bez větších bublin, pouze drobné vady.



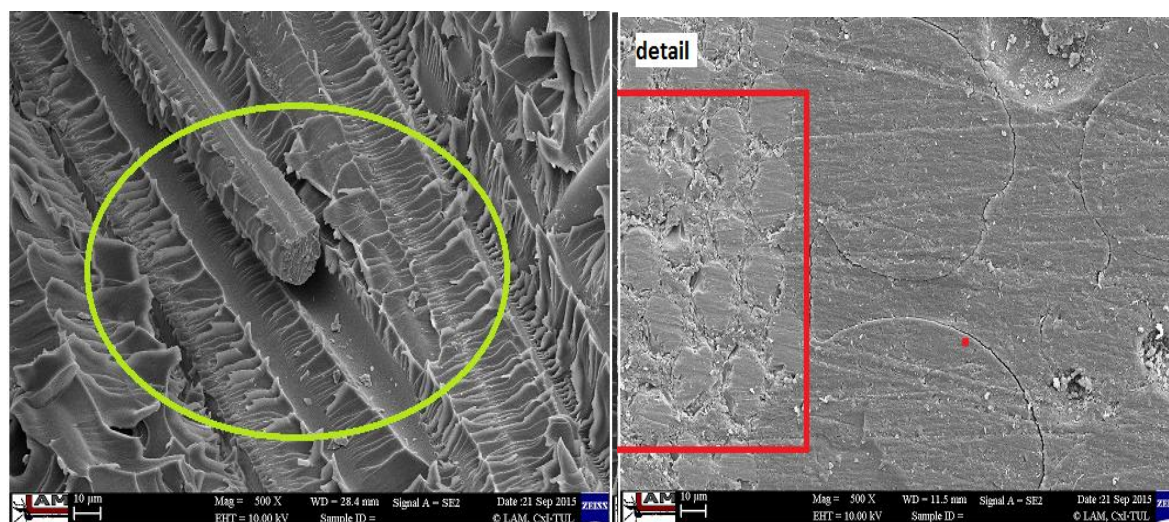
Obr. 5.3.7 - Snímky lomu a plochy AK série.

Na obrázku 5.3.7, vlevo jsou snímky lomu ze kterých je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a maticí, matrice obaluje vlákna. Vpravo jsou snímky plošné, kde bylo snímáno rozhraní kompozitu (nahore) a PUR jádra (dole). Snímky jsou bez větších bublin, pouze drobné vady.



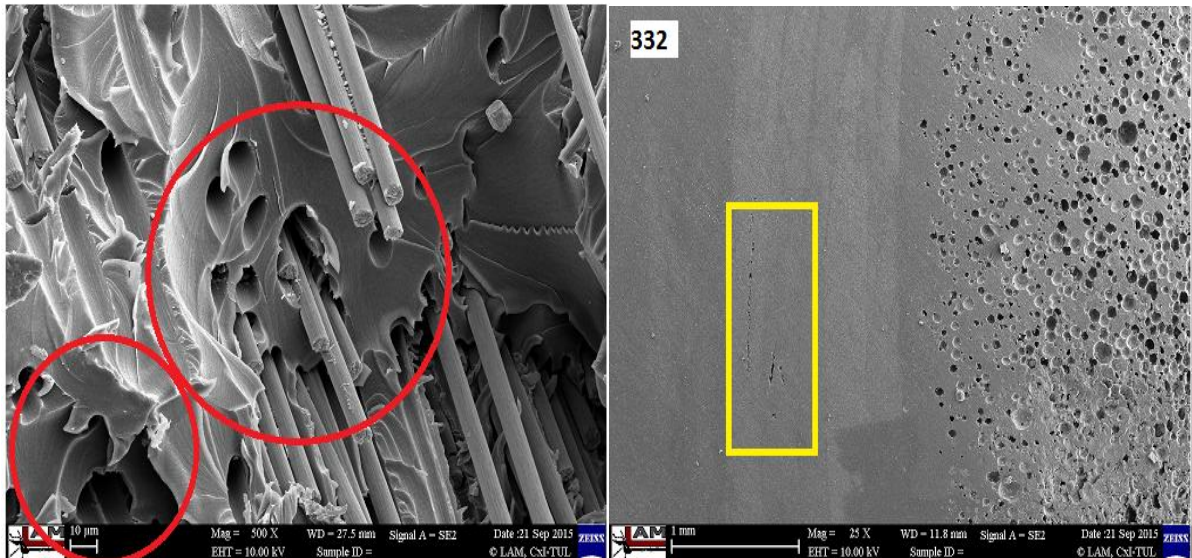
Obr. 5.3.8 – Snímky lomu a plochy série AG.

Na obrázcích 5.3.8 je vidět, že matrice vůči vláknům je afinní. Ze snímku lomu 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. Vpravo jsou snímky plošné, kde bylo snímáno rozhraní kompozitu (nahore) a PUR jádra (dole). Snímky jsou bez větších bublin, pouze drobné vady.



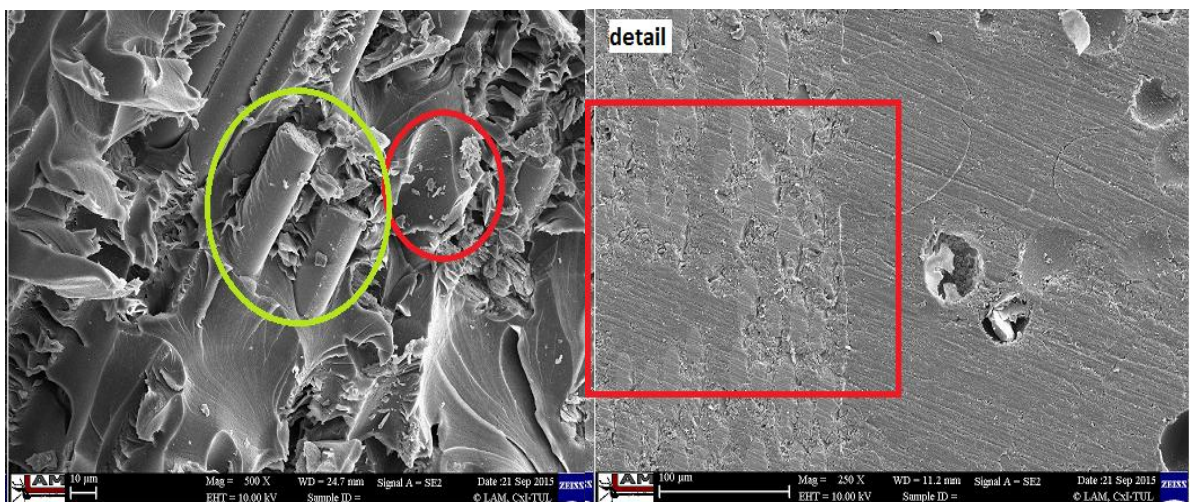
Obr. 5.3.9 – Snímky lomu a plochy série AP.

Na obrázku 5.3.9 se vlákno vytrhlo i s částí matrice (žluté kolečko). Obrázek vlevo je snímek lomu ze kterého je vidět dobrá kompatibilita mezi vlákny a matricí, matrice obaluje vlákna. Vpravo snímek plochy, 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. 5.3.10 – Snímky lomu a plochy AQ série.

Na obrázku 5.3.10 - na snímcích lomu jsou viděna vlákna vytržená z matrice (červená kolečka). Na 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 nespojité, s velkým množstvím mikrotrhlinek. 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.



Obr. 5.3.11 – Snímky lomu a plochy AR série.

Na obrázku 5.3.11 - snímky lomu, ze kterých je vidět dobrá kompatibilita mezi vláknem a matricí, matrice obaluje vlákna. 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

bublínky (působení chemické reakce se sizingem). 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 vylovení 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.

Velmi dobrou vzájemnou kompatibilitu má kombinace ZOLTEK/PUR, série R. Hmotu kompozitu je v řezu vzorku bez defektů. Velmi dobrou vzájemnou afinitu má i kombinace TENAX 24K/PUR, 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 TORAY/PUR – série T a U. U dvou vzorků ze série AQ byl nalezen náznak delaminace (označeno žlutě na obrázku 5.3.10). Všechny vzorky sérií AQ, AP a AR vykazují stejný jev – rozhraní mezi vláknem a matricí je nespojité, s velkým množstvím mikrotrhlinek; tento jev může souviset s kompatibilitou matrice vůči vláknům. Mikrotrhlínky jsou projevem matrice, které obsahuje bublínky (působení chemické reakce se sizingem). Obrázek 5.3.8 (žlutá část) série AG ukazuje vlákno odtržené od pryskyřice, to je nejspíše způsobeno špatnou penetrací nahromaděných vláken.

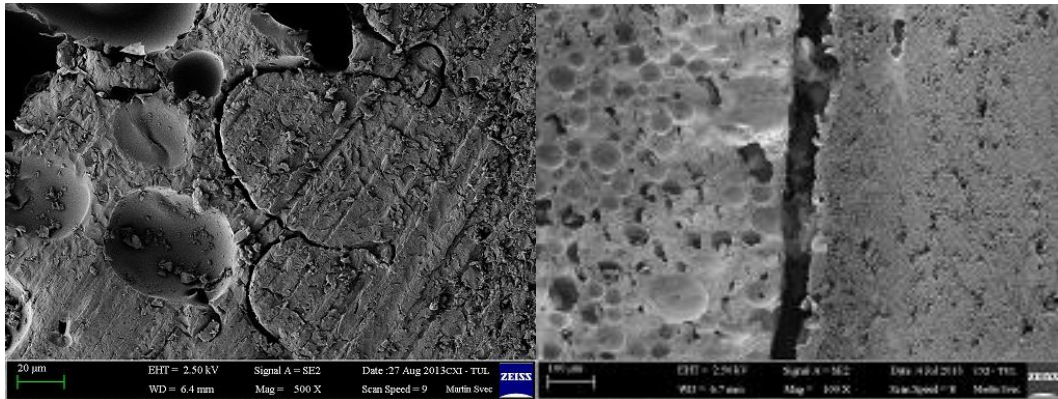
Měření vzduchových bublin v kompozitu pomocí obrazové analýzy

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 několik obrázků. Bublínky byly změřeny automaticky (pomocí prahování) nebo manuálně, aby se zaručil co nejpřesnější výsledek. Výsledky tohoto měření jsou shrnuty v Tab. 5.3.6 – Shrnutí výsledků zkoušených kompozitních trubek.

5.3.2.5 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 vlákně vrstvou a pronikla do pórů jádra. Za záporný výsledek je považován případ, kdy vznikla trhlina, matrice pronikla vlákně vrstvou, ale nepronikla do pórů jádra. Neprosycená vlákna se nepodílejí na pevnostních charakteristikách kompozitu a tím je snižují.

Nejlepší prosycení vlákně vrstvy vykazuje 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 5.3.12.



Obrázek 5.3.12 – Příklady prosycení vlevo dobré, vpravo špatné.

5.2.3.6 Mechanické vlastnosti trubek

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

Tabulka 5.3.5 – 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). 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.

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. V případě tahového modulu se jedná o slabou negativní závislost.

Dále bylo zjištěno, že smykový a ohybový modul na procento bublin v kompozitu nemá žádný vliv, 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. V případě tlakového modulu se jedná o silnou pozitivní závislost.

V tabulce 5.3.6 je shrnutí všech získaných poznatků ze zkoušení kompozitních trubek. Nejnížší a špatné získané hodnoty jsou označeny červeně a naopak nejvyšší a nejlepší hodnoty jsou označeny zeleně. Hodnoty označeny N/A nebyly naměřeny.

Tab. 5.3.6 – Shrnutí výsledků zkoušených 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				
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

5.4 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. 5.4.1.

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. 5.4.1 - Zvolené parametry a jejich limitní hodnoty.

Kategorie	1	2	3	4	5	Váha
	<i>dolní limit</i>	<i>střední hodnota</i>			<i>horní limit</i>	<i>významnosti</i>
Pevnost [N]	500 - 699	700 - 899	900 – 1 099	1 100 – 1 199	1 200 a více	25 %
Napětí v ohybu [MPa]	30,00 - 34,99	35,00 - 39,99	40,00 - 44,99	45,00 - 49,99	50 a více	15 %
Tažnost [%]	1,70 - 1,75	1,76 - 1,81	1,82-1,87	1,88 - 1,93	1,94 a více	10 %
Modul pružnosti [MPa]	1 000 - 1199	1 200 – 1 399	1 400 – 1 599	1 600 – 1 799	1 800 a více	30 %
Rázová houževnatost [J/mm²]	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 5.4.2 představuje naměřené průměrné výsledky.

Tab. 5.4.2 – Přehled výsledků měřených parametrů rovinných kompozitů.

	Pevnost [N]	Tažnost [%]	Modul pružnosti [MPa]	Napětí v ohybu [MPa]	Rázová houževnatost [J/mm²]
Panex 35	686	1,81	2103,6	40,87	0,15
Sigrafil C50	1273	2,77	1294	41,09	0,14
Tenax STS	1800	1,9	2320	93,18	0,139

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.

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.

Tab. 5.4.5 - Ekonomické hodnocení naměřených hodnot zvolených parametrů.

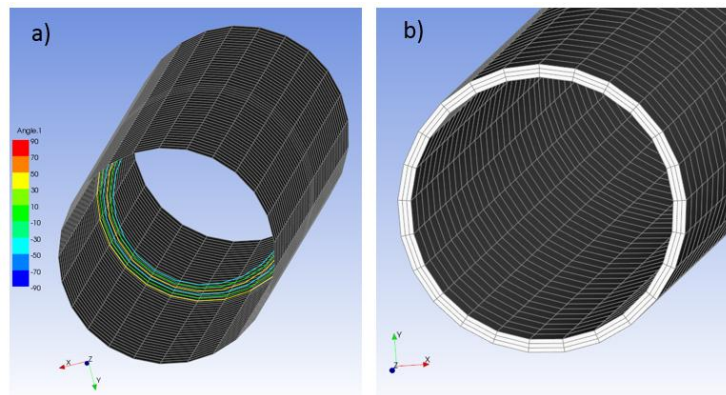
Parametr	Panex 35	Tenax STS	Sigrafil C 50
Modul pružnosti	1,5	1,5	0,6
Rázová houževnatost	0,8	0,6	0,6
Pevnost	0,25	1,25	1,25
Napětí v ohybu	0,45	0,75	0,45
Tažnost	0,2	0,5	0,5
výsledek	3,2	4,6	3,7
cena	4	4	2
Celkový VÝSLEDEK	3,6	4,3	2,85

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.

5.5 MODELOVÁNÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK KOMPOZITNÍCH TRUBEK

Pro tento případ byly modely sestaveny dvěma způsoby. První je jako vrstvená skořepina (dále jen *shell*), (obr. 5.5.1 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. 5.5.1 b. Tento přístup se používá zejména z pohledu následného post-processingu - dalšího zpracování výsledků, kdy je možné přesněji studovat napětí v jednotlivých vrstvách, interlaminární

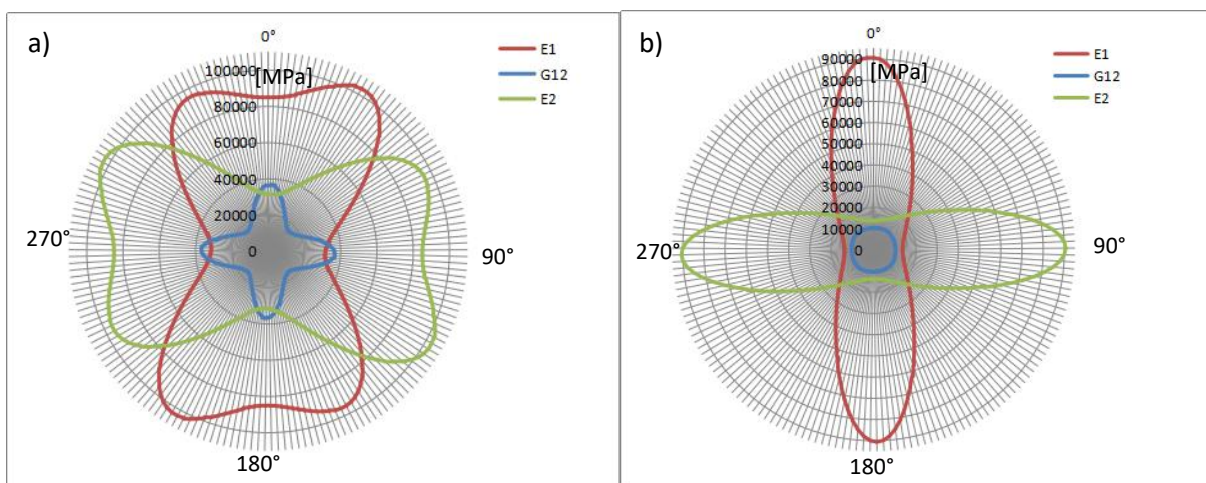
napětí, delaminace apod. Vytvořená síť na dílu válcové tyče byla mapována podle jejich dvou okrajů (*mapped face meshing*), trubky o rozměru stěny 2 mm, s využitím metod tažení čtyřčlenných prvků s finálními 1275 uzly a 1250 prvky. [21-23]



Obr.5.5.1 - 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, jako v případě experimentálně testovaných částí. U všech provedených modelů byly použity tři základní typy vinutí vláken $45^\circ/0^\circ/-45^\circ$. 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° 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 známé hodnoty velikosti průřezu určit napětí v tahu.

Na Obr. 5.5.2 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° a 90° .

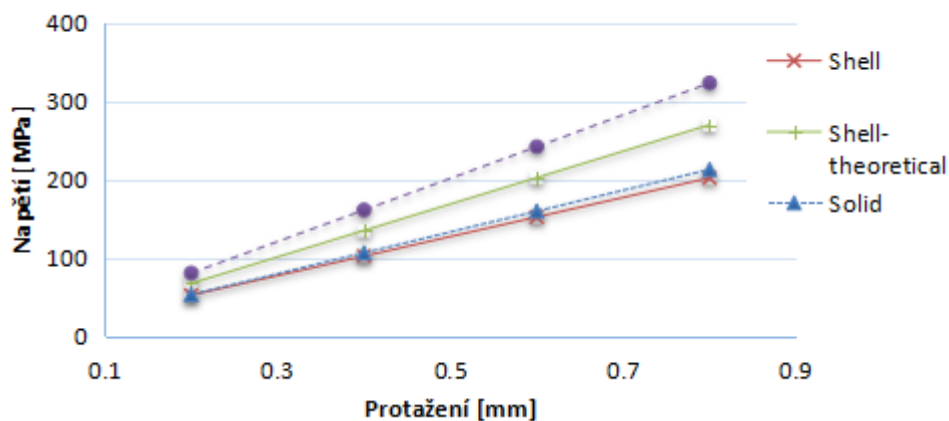


Obr. 5.5.2 - Teoretické mechanické vlastnosti poraněných částí se specifikovanými vrstvami - uspořádání a) Tenax 24K - 6 vrstev b) Tenax 48K - 3 vrstvy.

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. 5.5.3 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.

Jako další možnost byly modely vytvořeny s reálnou tloušťkou - solid. Jak je zřejmé z obr. 5.5.3, existují měřitelné rozdíly, takže je možné říci, že dva přístupy - shell, solid nejsou stejné, i když by teoreticky měly být.



Obr. 5.5.3 - Srovnání vytvořených modelů Shell a Solid pro 3 vrstvy.

Tento jev kdy dochází k rozchodu výsledků je značný zejména s vyššími hodnotami modulu pružnosti vláken. 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.

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, 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.

6 Zhodnocení výsledků a nových poznatků

Cílem 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. Roviny 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 vodičí 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°, 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. Nižší 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 ověření 3D uzavřeného útvaru a ověření 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° 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.
- Klazení 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.

7 Seznam použité literatury

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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
- [4] 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.
- [5] ČSN EN ISO 14125. Vlakny vyztužene plastove kompozity - Stanoveni ohybových vlastnosti. 1999.
- [6] ČSN EN ISO 179-1. Plasty - Stanoveni razove houževnatosti metodou Charpy - Část 1:Neinstrumentovana razova zkouška. 2010.
- [7] DRIML, B.: *Zakladni vlastnosti materialů a jejich zkoušení* [online]. [cit. 2015-01-12]. Dostupne z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf
- [8] MARTYNKOVÁ, S. G.: *Nové technické materiály*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2010. 99 s. ISBN 978-80-7204-714-7.
- [9] 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.
- [10] BRIAN, N. Cox, Gerry Flanagan.: *Handbook of Analytical Methods for Textile Composites*, Hampton. Virginia, NAS1-19243 1997
- [11] ŠEVČÍK, L., TŮMA, P.,PETRŮ M., MARTINEC T., KOVÁŘ R. Composite reinforcement, Patent Application No. 2013-1066, 2013.
- [12] PRAVEEN GOWDA, P.: *Applications of Composites materials in the Automotive industry* [online]. Last revision on 6th February 2010 [cit. 2014-01-22]. <http://www.scribd.com/doc/32475280/Composites-in-the-Automobile-Industry>.
- [13] SIURU, B.:*Bio-plastics May Loom Larg efor the Auto Industry's Future* [online]. Greencar.com. Last revision on 16th July 2011. [cit. 2014-01-28].
- [14] GAY, D., Gambelin, J.: *Dimensionnement des Structures, une Introduction*, Hermes Science Publishing Ltd., London, 1999. p. 680, EAN13:9782746200494
- [15] GUEDES, R. M.: *Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites*, Woodhead Publishing, 2010, p.600, ISBN: 978-1-84569-656-6.
- [16] GRÉGR, J.; SLAVÍK, M.; ŠILCOVÁ, M.: *Povrch uhlíkových vláken*. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 2007.
- [17] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V. a VOJTĚCH, D.: *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005.

- [18] BIRON, M.: *Material Selection for Thermoplastic Parts: Practical and Advanced Information*. Oxford, 2016 [cit. 2016-01-03]. ISBN 978-0-7020-6284-1.
- [19] JANČÁŘ, J.: *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [20] CHUNG, Deborah D. L.: *Composite materials; functional materials for modern technologies*. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.

8 Práce autora se vztahem ke studované problematice

8.1 Publikace v odborných časopisech

NOVOTNÁ, M. Comparison properties of the selected inorganic fibers. *Melliand China*. 2. vyd., 2016. 14 – 16. ISSN 100-6867.

PETRŮ, M., SYROVÁTKOVÁ, M., NOVOTNÁ, M., Crash Test of Carbon Composite. *Applied Mechanics and Materials* 2016, s. 385-391, ISSN 385-391

NOVOTNÁ, M. Comparison properties of the selected inorganic fibers. *Chemical Fibers International*. 1. vyd., 2015. 99 – 101. ISSN 0340-3343.

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.

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.

NOVOTNÁ, M. SYROVÁTKOVÁ, M. MARŠÁLKOVÁ, M. *Měření rázové houževnatosti kompozitu s polyuretanovou maticí*. časopis *Technológ* 1/2014, 2014, ISSN 1337-8996.

NOVOTNÁ, M. SYROVÁTKOVÁ, M. Vliv výztuže na výsledné mechanické vlastnosti konstrukce kompozitu a jejich zkoušení. Recenzovaný slovenský časopis *Technológ* 2/2014, ISSN 1337-8996.

8.2 Příspěvek ve sborníku z konference

NOVOTNÁ, M. Dependence of mechanical properties of carbon composites on the directional orientation of the layers. *Workshop pro studenty Ph.D textilní a Fakultě strojího inženýrství TUL*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. S. 129 – 133. ISBN 978-80-7494-229-7.

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.

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

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

NOVOTNÁ, M. SYROVÁTKOVÁ, M. *Měření houževnatosti uhlíkového kompozitu*. 2. ročník národní konference Green Engineering – sborník, 2013, ISBN 978-80-7494-035-4.

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.

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

NOVOTNÁ, M. *Comparison properties of the selected inorganic fibers*. Proceedings of the 8th Aachen-Dresden, International Textile Conference [CD]. [Přednáška] 2014. ISSN 1867-6405

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.

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 978-80-261-0355-4

Curriculum Vitae

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Martina Novotná
Adresa: Josefa Hory 23, Jablonec nad Nisou, 46604
Datum narození: 17.1.1987
Email: martina.ernest.novotna@tul.cz

Dosažené vzdělání:

4/2012 - dosud: TU Liberec (Fakulta textilní, obor: Textilní technika a materiálové inženýrství, titul Ph.D.)
10/2011 - 12/2011: Studium anglického jazyka na M.L.S. College v Bouenemouthu v Anglii
2006 - 2011: TU Liberec (Fakulta textilní, obor: Textilní materiálové inženýrství, 5-ti leté magisterské studium, titul Ing.)
2002 - 2006: Gymnázium, Kadaň

Pracovní zkušenosti:

2014 - dosud: Laborant - technik, TU Liberec, Katedra materiálového inženýrství
2015 - 2017: Rodičovská dovolená
2013 - 2014: Laborant - technik v rámci projektu, Centrum pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace - TU Liberec
2008 - 2012: Laborant - technik, Škoda Auto a.s. , Laboratoř a měrové středisko nakupovaných dílů - zkoušení automobilových dílů a zkoušky sluneční simulace

Jazyk:

Anglický: Středně pokročilý
Německý: Základní vědomosti

Stručná charakteristika dosavadní odborné, výzkumné a vědecké činnosti

Doktorské studium

Studium	Studium v prezenční formě doktorského studijního programu Textilní inženýrství, v oboru Textilní technika na Fakultě textilní Technické univerzity v Liberci.
Seznam zkoušek	Mechanická statistika a analýza dat, 22.3.2013. Mechanika vlákenných útvarů, 29.8.2013. Experimentální technika oboru, 7.10.2013 Strukturní teorie vlákenných soustav, 9.1.2014. Specializace v oboru, 20.5.2014.
SDZ	Státní doktorská zkouška vykonána dne 2.3.2015 s celkovým hodnocením prospěl(a).

Pedagogická činnost

Výuka	Textilní vlákna a materiály, (2012-2014) Zkoušení textilií, (2013-2017)
Vedení a konzultace DP a BP	KOVALČÍKOVÁ, M. Porovnání vlastností vybraných anorganických vláken, Bakalářská práce, 2014 -vedoucí TOGNEROVÁ, M. Porovnání vlastností kompozitních materiálů výztuží ze skleněných a čedičových vláken, BP, 2015 - vedoucí KOKRDOVÁ, B. Termomechanická analýza kompozitních materiálů a výztuží z uhlíkových vláken, BP, 2013 - konzultant MINÁŘ, L. Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s výztuží z uhlíkových vláken, BP, 2013 - konzultant HLUBUČKOVÁ, L. Uhlíková vlákna jejich zpracování a využití v České republice, BP, 2013 - konzultant NETÍK, L. Vliv počtu vrstev na výsledné mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny, DP, 2013 - konzultant JIRKŮ, M. Vliv úhlu křížení vrstev na výsledné vlastnosti kompozitních materiálů, DP, 2013 – konzultant

HLUBUČKOVÁ, L. Porovnání vlivu použití uhlíkového vlákna SIGRAFIL C50 a PANEX 35 na výsledné vlastnosti kompozitu, DP, 2016 – konzultant

Výzkumné projekty Účast na projektu s firmou Magna Bohemia s.r.o., Vývoj ovinovacího stoje pro výrobu kompozitního dílu pro automobilový průmysl, 2012-2014

Řešitelka projektu SGS 2013 – (Výroba a testování kompozitů s anorganickou výztuží).

Řešitelka projektu SGS 2014 – (Testování kompozitů s anorganickou výztuží pomocí extenzometru).

Práce v rámci aktivit projektu: Rozvoj řešitelských týmů projektů VaV na Technické univerzitě v Liberci – Návrh a optimalizace vlastností tvarových dílů z nových materiálů, 2012-2014.

Ostatní projekty Řešitelka projektu FRVŠ 2013 – G1 Tvůrčí práce studentů zaměřená na technické obory (Inovace Inovace studijních pomůcek v oblasti vysocefunkčních textilií)

Účast na projektu ESFS OPVK EduTech 2014 - (Vzdělávání pro efektivní transfer technolo – Dětská univerzita

Zápis o vykonání státní doktorské zkoušky

Vložit kopii zápisu o vykonání státní závěrečné zkoušky.

Vyjádření školitele doktoranda

Vložit kopii vyjádření školitele.

Oponentské posudky disertační práce

Vložit kopii posudků obou oponentů.