

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VLIV ORIENTACE VÝZTUŽE NA PORUŠOVÁNÍ
VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ

INFLUENCE OF FILLER ORIENTATION ON DAMAGE OF FIBER
COMPOSITES

AUTOR: Samuel Ondruška

STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.

KONZULTANT PRÁCE: Ing. Vladimír Mára

PRAHA 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ondruška** Jméno: **Samuel** Osobní číslo: **437120**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv orientace výztuže na porušování vláknových kompozitů

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of filler orientation on damage of fiber composites

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je posouzení vlivu orientace výztuže na pevnostní charakteristiky dlouhovláknových kompozitů s polymerní maticí.

1. Literární rešerše v problematice kompozitních materiálů.
2. Návrh metodického přístupu k řešení problematiky.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení a zpracování naměřených dat.
5. Diskuse a závěry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. Vláknové kompozity. Praha: SNTL, 1987. ISBN 04-216-87.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] RIKARD BENTON HESLEHURST. Defects and damage in composite materials and structures. Basingstoke: Taylor & Francis, 2014. ISBN 146658047X.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Elena Čížmárová, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Vladimír Mára, ústav materiálového inženýrství FS

Datum zadání bakalářské práce: **31.10.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **14.01.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____



Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

30.10.2017

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto prácu vypracoval samostatne a to výhradne s použitím prameňov a literatúry uvedených v zozname citovaných zdrojov.

V Praze dne:

.....

Podpis

Pod'akovanie

Rád by som pod'akoval svojej vedúcej práce Ing. Elene Čižmárovej, Ph.D. za odborné vedenie a smerovanie. Osobitne chcem pod'akovať môjmu konzultantovi práce Ing. Vladimírovi Márovi za oboznámenie s problematikou a neoceniteľnú pomoc pri experimentálnej časti práce.

Anotácia

Táto bakalárska práca je zameraná na skúmanie spojitosti medzi orientáciou vlákien a porušovaním vláknových kompozitov. V literárnej časti sú popísané všeobecné vlastnosti kompozitných materiálov, výroba a základy ich porušovania. Experimentálna časť je zameraná na skúmanie poškodzovania kompozitných materiálov pomocou ťahovej a ohybovej skúšky. Okrem vyhodnotenia mechanických vlastností sú skúmané aj mikroštruktúrne zmeny materiálu.

Kľúčové slová

Vláknové kompozitné materiály, polyméry, sklené vlákna, uhlíkové vlákna, vplyv orientácie vlákien na poškodzovanie kompozitov, trojbodová ohybová skúška, ťahová skúška

Annotation

Bachelor's thesis is focused on connection between fibers' orientation and damage of fiber composite materials. In literary part are described general properties of composite materials, manufacturing and rudiments of its damage mechanism. Experimental part is focused on observation of damage mechanism of composite materials by tensile test and flexural test. Besides evaluation of mechanical properties, there are also observed changes in microstructure of material.

Keywords

Fiber reinforced composites, polymers, glass fiber, carbon fiber, influence of filler orientation on damage of fiber composites, three-point flexure test, tensile test

Obsah

Úvod.....	9
1 Kompozitné materiály	10
1.1 Lamináty	10
1.2 Porovnanie.....	11
1.3 Využitie	12
2 Vláknové kompozitné materiály.....	13
2.1 Štyri paradoxy materiálu	13
2.2 Matrica	14
2.2.1 Reaktoplasty.....	16
2.2.2 Termoplasty	17
2.2.3 Kovy.....	18
2.2.4 Keramika.....	19
2.3 Výstuž	19
2.3.1 Sklená.....	21
2.3.2 Uhlíková.....	21
2.3.3 Aramidové vlákna.....	22
2.3.4 Bórové vlákna	22
2.3.5 Ostatné	22
3 Výrobné technológie	23
3.1 Kompozity s reaktoplastickým spojivom.....	23
3.1.1 Ručné kladenie za mokra.....	23
3.1.2 Ručné kladenie prepregu	23
3.1.3 Ostatné	24
3.2 Kompozity s termoplastickým spojivom	24
4 Typické poškodenia.....	25
4.1 Ťah a tlak.....	25

4.2	Ohyb.....	26
5	Experimentálna časť.....	27
5.1	Experimentálny materiál.....	27
5.2	Príprava skúšobných telies.....	28
5.2.1	Sklolaminát.....	28
5.2.2	Uhlíkový laminát.....	29
5.2.3	Úprava skúšobných telies.....	30
5.3	Vykonané skúšky mechanických vlastností.....	31
5.4	Vyhodnotenie.....	31
5.4.1	Ťah.....	31
5.5	Porovnanie výsledkov - ťah.....	40
5.5.1	Ohyb.....	42
5.6	Porovnanie výsledkov – ohyb.....	46
6	Diskusia.....	48
7	Záver.....	50
8	Zoznam použitej literatúry.....	51
9	Zoznam použitých symbolov.....	53
10	Prílohy.....	54

Úvod

Kompozitné materiály v posledných desaťročiach zaznamenali prudký rozmach. Ešte pred využitím kompozitných materiálov v strojárskom priemysle prišla revolúcia v stavebníctve v podobe železobetónu. Vtedy sa podarilo spojiť pružnosť ocele s pevnosťou betónu a vytvoriť tak materiál, ktorý posunul konštrukčné možnosti stavieb.

V strojárskom priemysle došlo k prvému náznaku kompozitného materiálu v roku 1908 vystužením fenolickej živice drevenou múčkou. Prvé vláknové kompozity začali vznikať pred druhou svetovou vojnou a následne boli používané ako menšie súčasti lietadiel. Pre svoje dobré mechanické vlastnosti a nízku hmotnosť sa rozšírili vo vojenskom a kozmickom priemysle. V menšej miere boli nasadzované aj pri masovej výrobe v lodnom, či automobilovom priemysle. Pri automobiloch zväčša tvorili len malé časti karosérie, no v prípade vozidla Trabant bol použitý plast vystužený vlnenými alebo bavlnenými vláknami na celé panely karosérie. Postupne sa do popredia dostávali polymérne kompozity vystužené dlhými vláknami, ktoré sú schopné mechanickými vlastnosťami konkurovať zavedeným konštrukčným materiálom.

V súčasnosti sú kompozitné materiály vystužené prírodnými, alebo recyklovanými časticami používané v automobilovom priemysle. Pre nosné konštrukcie sú používané kompozitné materiály vystužené dlhými vláknami. Ich vhodnou orientáciou a skladbou v lamináte je možné prispôsobiť výsledné mechanické vlastnosti vzhľadom na namáhanie.

Cieľom práce je vykonať rešerš na tému kompozitných materiálov a zistiť súvislosť medzi orientáciou vlákien a poškodzovaním vláknových kompozitov pomocou vhodných experimentálnych prístupov. Bol vybraný sklený laminát (orientácia vrstiev $\pm 45^\circ$ a $0^\circ/90^\circ$) a uhlíkový laminát (skladba 22F a 22Z). Pre každý typ materiálu boli vykonané skúšky ťahom a ohybom pre päť skúšobných telies. Následne boli vyhodnotené a porovnané získané mechanické vlastnosti jednotlivých materiálov.

1 Kompozitné materiály

V prírode často nachádzame materiály podobné moderným kompozitom (bambusové drevo, drevo všeobecne), ktoré boli základom pre vývoj týchto moderných materiálov. Kompozitné materiály uspokojujú požiadavky od jednoduchých technických aplikácií až po extrémne aplikácie v leteectve a kozmonautike, od jednoduchých spôsobov ručného laminovania až po zložité výrobné postupy. [1]

Kompozitným materiálom môžeme nazývať každý materiál zložený z dvoch a viac komponentov, ktoré majú výrazne odlišné fyzikálne vlastnosti, pričom výsledné mechanické vlastnosti sú lepšie ako vlastnosti jednotlivých zložiek. Dôvodom rozširovania produkcie kompozitných materiálov je hneď niekoľko. V prvom rade ide o stále zvyšujúce sa požiadavky na mechanické vlastnosti materiálov a neustále znižované hmotnosti pre nižšiu spotrebu energie. Ďalším veľkým argumentom pre používanie týchto materiálov je možnosť veľkého prispôsobenia konkrétnemu produktu, či už voľbou materiálov alebo výrobnou technológiou [2].

Skladba týchto materiálov je spravidla tvorená dvoma zložkami. Základná hmota, matrica, má funkciu spojiva pre zachovanie geometrického tvaru výrobku, polohy vlákien, ochranu vlákna pred vplyvmi okolia, prenos síl na vlákna a oporu vláknám v smeroch zaťažovania iných ako rovnobežne s vláknom. Druhou zložkou je výstuž, ktorá zvyšuje pevnosť, tuhosť a prenáša hlavné zaťaženie. Výstuž môže byť vo forme konečných alebo nekonečných vlákien, prípadne vo forme disperzných častíc. Avšak v praxi sa najčastejšie stretávame s nekonečnými vláknami, ktoré sú v matrici uložené v rôznych formách za účelom čo najlepšieho rozloženia namáhania v diele [1], [3].

1.1 Lamináty

Rozšíreným variantom súčastí z kompozitov sú lamináty. Výroba prebieha postupným ukladaním výstuže (tkaniny) a nasycovaním živicom do formy. Po vytvrdnutí tak vzniká laminát s požadovanými mechanickými vlastnosťami. Tie sú závislé hlavne na orientácii vlákien a počte vrstiev s konkrétnou orientáciou. Výstuž môže byť vo forme suchej tkaniny s rôznym usporiadaním vlákien vid' (Obr. 2), prípadne vo forme prepregu, teda dopredu rovnomerne naimpregnovaná tkanina príslušnou matricou. Takýto prístup k výrobe prináša rad výhod i nevýhod. Lamináty sa stali používaným konštrukčným materiálom vďaka vysokej pevnosti a tuhosti, pričom obe vlastnosti môžeme kontrolovať voľbou orientácie vlákien vo výslednom lamináte. Dôležité je, že takéto vlastnosti je

možné dosiahnuť pri nízkej hmotnosti. Lamináty vynikajú vysokou odolnosťou voči korózii a množstvu chemikálií. Stabilné sú aj v prípade pôsobenia vysokej teploty, kedy majú napríklad oproti oceli nižší súčiniteľ teplotnej dĺžkovej rozťažnosti. Lamináty majú výbornú prispôsobivosť zložitým tvarom a technologický postup výroby je v zásade rovnaký ako pri rovinných dieloch tak aj pri zložitejších zakrivených plochách. Avšak výroba je úplne odlišná od zabehnutých technologických postupov pri bežných konštrukčných materiáloch. Preto môžu byť lamináty neúnosne drahé v porovnaní s bežnými materiálmi aj napriek ich dobrým vlastnostiam. Ďalším obmedzujúcim parametrom je nízka medza pevnosti laminátu kolmo na výstuž, preto potrebujeme poznať výsledný smer zaťažovania vyrábaného dielu, čo môže viesť k ďalšiemu zvyšovaniu nákladov. Nakoľko nositeľom pevnosti laminátu je výstuž, pri poškodení nie je možné jednoducho zaistiť vyhovujúcu opravu [1], [3].

1.2 Porovnanie

Vzhľadom na to, že moderné kompozitné materiály sa využívajú len krátko v porovnaní s konvenčnými materiálmi, častokrát sa stavajú do rôznych porovnaní. V (Tab. 1) sú ilustračne porovnané základné mechanické vlastnosti medzi kompozitnými materiálmi a ostatnými bežne používanými materiálmi [2], [4, 5, 6].

Tab. 1 – porovnanie mechanických vlastností kompozitov a bežných konštrukčných materiálov [2], [4, 5, 6]

	ρ [kg/m ³]	σ [MPa]	E [GPa]
Kompozity	1600 – 2000	200 – 4000	10 – 400
Oceľ	7800	do 1500	210
Hliník	2700	do 600	71
Titán	4500	750 - 1380	175
Mosadz	7900 - 8550	310 - 550	90 - 110
Zliatiny horčíku	1810	275	44

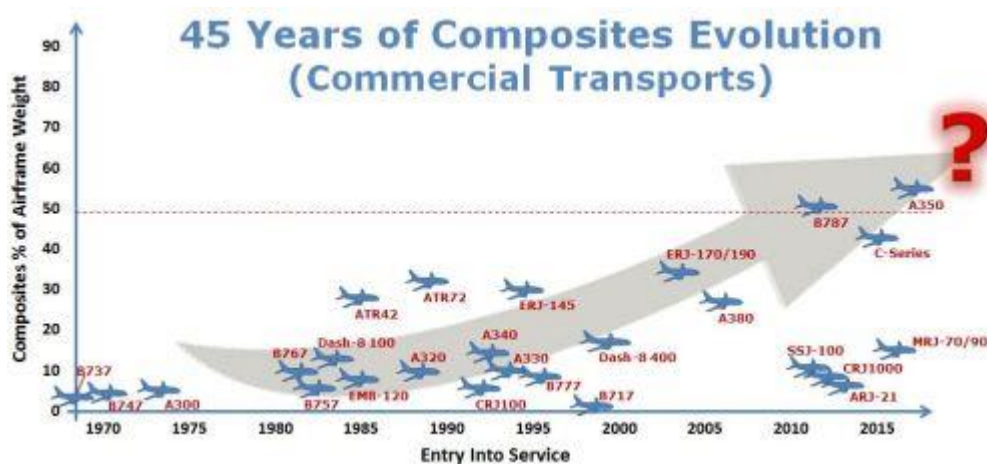
Oproti konvenčným materiálom je použitie kompozitných materiálov v extrémnych podmienkach častokrát výhodnejšie vzhľadom na ich chemickú stálosť a odolnosť voči korózii. Ich použitím je možné značne znížiť počet súčiastok, čo podstatne zníži náročnosť na montáž a zjednoduší údržbu [4].

Proti zavádzaniu kompozitov do praxe, respektíve prechodu z konvenčných materiálov, hovoria predovšetkým nedostatočné znalosti v oblasti poškodzovania a porušenia. Nepredvídateľné správanie dielov z kompozitov môže značne navýšiť náklady na vývoj. Takto vyrobené súčasti či konštrukcie majú väčšinou vysokú cenu a prípadné opravy sú náročné a v mnohých prípadoch aj neuskutočniteľné.

V neposlednom rade je náročný aj proces preškolovania pracovníkov na celkovo úplne iný prístup k výrobe a zaistenie kvality [1].

1.3 Využitie

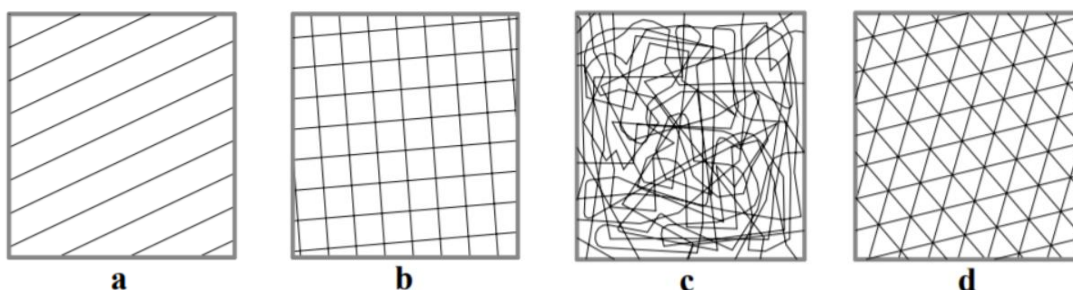
Kompozitné materiály a predovšetkým vláknové kompozitné materiály našli uplatnenie v celom spektre odvetví. Prvýkrát boli použité vo vojenskom a kozmickom priemysle. Neskôr sa začali používať v civilnom leteckom priemysle, kde sú kompozitné materiály v súčasnosti nevyhnutnosťou. Na (Obr. 1) je zobrazený vzostup využitia kompozitných materiálov v leteckom priemysle. Ďalšie, dnes už bežné odvetvia využitia sú lodný priemysel, automobilový priemysel a športový priemysel. Ich použitie je zväčša podmienené vyššou cenou, ale i lepšími úžitkovými vlastnosťami. Medzi najväčšie výhody patrí nízka hmotnosť a vysoká pevnosť. Takéto vlastnosti sú výhodné pri konštrukcii dopravných prostriedkov za cieľom zníženia ich energetickej náročnosti, na čo sa v súčasnosti kladie veľký dôraz. Pri porovnaní s konvenčnými materiálmi objavujúcimi sa napríklad v karosérii auta alebo lietadla je možné danú konštrukciu vyrábať ako jeden kus. Tento fakt spolu s vysokou tuhosťou materiálu dáva možnosť vyrábať bezpečnejšie dopravné prostriedky. Tvarová zložitosť a presnosť, ktorá vplýva na spotrebu paliva, je v prípade kompozitných materiálov ľahšie dosiahnuteľná ako v prípade konvenčných materiálov a technologických postupov [1].



Obr. 1 - Nárast využitia kompozitných materiálov v konštrukcii v leteckom priemysle [7]

2 Vláknové kompozitné materiály

Najrozšírenejšou skupinou kompozitných materiálov v konštrukciách sú vláknové kompozity. Používané vlákna môžu byť konečné alebo nekonečné. Vo väčšine aplikácií sa stretávame s nekonečnými vláknami. Svoju vedúcu pozíciu získali vďaka rôznorodým technologickým procesom výroby a relatívne jednoduchému dimenzovaniu vyrábaných súčastí. Najvyššiu pevnosť totiž dosahujú pri namáhaní rovnobežne s vláknom. Pri výrobe sa najčastejšie striedajú orientácie vlákien voči smeru zaťaženia pod uhlom 0° , 90° a $\pm 45^\circ$. Samotné vlákna sa zväčša pred použitím usporadúvajú podľa potrebnej orientácie do niekoľkých podôb. Základné spôsoby usporiadania sú zobrazené na (Obr. 2) [8].



Obr. 2 - Základné typy usporiadania vlákien v kompozitoch – a) jednosmerné usporiadanie kontinuálnych vlákien b) dvojosá orientácia – tkanina c) rohož – náhodné usporiadanie vlákien d) viacosá výstuž kontinuálnych vlákien [8]

Uvedené spôsoby usporiadania značne zjednodušujú manipuláciu s materiálom a taktiež samotnú výrobu. Tkaniny umožňujú výrobu veľmi kvalitných polotovarov, ktoré sú už rovnomerne napustené dostatočným množstvom živice, čo posúva kvalitu výsledného výrobku na vyššiu úroveň ako pri kontaktnom laminovaní.

Materiálom výstuže býva podľa konkrétnej aplikácie najčastejšie sklo, uhlík, para-aramid, hybridné vlákna, rastlinné vlákna a iné. Výber závisí od konkrétnych požiadaviek na konečný výrobok. Na bežné konštrukčné aplikácie sú používané sklenené vlákna. Na exponovanejšie a tepelne namáhané súčasti uhlíkové vlákna. V prípade potreby vysokej abrazívnej odolnosti sú najvhodnejšie para-aramidové vlákna, tieto sa často využívajú na výrobu lán [9].

2.1 Štyri paradoxy materiálu

Dôvody, prečo použiť vlákna ako konštrukčný prvok, vychádzajú zo štyroch paradoxov materiálu. Vzhľadom na to, že kompozity sa skladajú z najmenej dvoch látok s odlišnými fyzikálnymi vlastnosťami, vyplývajú z toho aj zásadne iné materiálové

vlastnosti. Preto sa musí na kompozitné materiály nahliadať inak ako na konvenčné materiály [1].

U všetkých materiálov platí, že teoretická hodnota pevnosti sa značne líši od hodnoty nameranej. V prípade plastov a skla je tento jav veľmi výrazný, zatiaľ čo pri konvenčných materiáloch ako oceľ a hliník pozorujeme rádovo menšie percentuálne rozdiely.

Teoreticky by bolo vhodné vyrábať čo najtenšie vlákna. Tento predpoklad vychádza z teórie pevnosti, ktorá hovorí o tom, že v menšom objeme je menšia pravdepodobnosť výskytu chýb materiálu a nečistôt, ktoré ovplyvňujú pevnosť vlákna [10]. V praxi sa ale najčastejšie stretávame s vláknami o priemere 5 - 20 μm . Napríklad sklenené vlákna majú bežne hrúbku 3 – 13 μm , uhlíkové sa bežne pohybujú okolo 8 μm a borové až 100 nm. Tieto priemery sú využívané pre bežné aplikácie, avšak pri nanokompozitoch sa stretávame s priermi od 80 nm do 500 nm. Pre rôzne aplikácie sa používajú teda rôzne typy vlákien [11].

Podobne ako pri zmenšovaní prierezu vlákna, tak aj pri zmenšovaní zaťažovanej dĺžky sa znižuje výskyt porúch a nečistôt. Výhodou kompozitov je, že rovnomerným uložením vlákna v matrici, sa jeho dĺžka blíži k nule. A to v prípade že výstuž je dostatočne nasiaknutá matricou. Teda kompozit neobsahuje vzduchové bubliny, ktoré by spôsobili, že zaťažovaná dĺžka by bola rôzna od nuly. Týmto spôsobom je veľmi dobre využitá pevnosť vlákien [1].

Kompozitný materiál ako celok môže prevziať napätie, ktoré by jeho slabšiu zložku porušilo. Od pevnejšej zložky kompozitu môže prevziať vyšší podiel jej teoretickej pevnosti, než ako by bola namáhaná samostatne [1].

Táto veta platí len pri zaťažovaní ťahom jednotlivých zložiek, respektíve celého kompozitu. Pri tlaku alebo ohybe nemôžu zložky kompozitu samé o sebe prevziať svoju časť zaťažovacej sily, predovšetkým, keď nie sú schopné udržať pri zaťažení geometrické usporiadanie [1].

2.2 Matrica

Matrica je spojitá zložka kompozitného materiálu, ktorá spája a chráni krehké vlákna výstuže, zabezpečuje geometrické usporiadanie, zabezpečuje bočnú oporu vlákien a distribúciu zaťaženia na vlákna. Zásadne má nižšiu pevnosť v ťahu ako vlákna, v niektorých prípadoch až o dva rády. Oproti vláknam sú naopak matrice podstatne poddajnejšie [9].

Najpoužívanejšími matricami pre uhlíkové a sklené vlákna sa stali polyesterové, vinylesterové, epoxidové a rôzne termoplasty. Na náročné aplikácie pre vojenský a vesmírny priemysel sú vhodné reaktoplasty a aromatické termoplasty. S matricou je možné pracovať len v jej kvapalnom stave. Preto je nutné riadiť začiatok tuhnutia pridaním vhodného množstva stužujúcej zložky do živice [9]. Matrice sa líšia predovšetkým teplotou spracovania a ich fyzikálnymi vlastnosťami pri teplote spracovania. Pri iných ako uhlíkových a sklených vláknach môžu byť použité aj keramické alebo kovové matrice. V nasledujúcej (Tab. 2) je uvedené porovnanie teplôt spracovania a teplôt skleného prechodu bežne používaných matric [1], [12].

Tab. 2 – Porovnanie teplôt spracovania a skleného prechodu u rôznych živíc [1]

Matrica	t_z [°C]	t_g [°C]
Nevystužená nenasýtená polyesterová živica vytvrdzovaná za studena	10 až 40	90 - 150
Nenasýtená polyesterová živica vytvrdzovaná za tepla	≈ 140	90 - 150
Nevystužená epoxidová živica vytvrdzovaná za tepla	napr. 130	75 - 135
Polypropylén	200 až 270	-10/100
Polyéter(éter)ketón	≈ 350 až 400	143

Hlavnou podmienkou pre požadovanú kvalitu kompozitu je dostatočné zmáčanie všetkých vlákien a výsledný materiál bez bublín. Preto je potrebné použiť dostatočné množstvo živice. Hoci aj v prípade dostatočného množstva živice môže dôjsť ku chybám a kazom vo výslednom kompozite. Najčastejšie sa vo výrobe riešia problémy s nízkou adhéziou na rozhraní matrica-vlákno. Tieto problémy sa riešia vhodnou apretáciou pre konkrétny typ vlákna a zvolenie správnej matrice s tužidlom. V závislosti na veľkosti vyrábanej súčasti volíme matricu s vhodnou dobou gelácie¹. Dostatočne kvalitnému nasycovaniu výstuže dochádza len pri kvapalnom stave matrice, po prechode do gélového stavu je už nepoužiteľná [1], [9].

Okrem mechanických vlastností zabezpečuje matrica aj chemickú a tepelnú stálosť. Častokrát býva práve matrica limitujúcou zložkou v konštrukcii kompozitných dielov do extrémnych podmienok, keďže je zodpovedná za celkovú súdržnosť výrobku [9].

¹ Čas, za ktorý matrica prejde z kvapalného do gélového stavu, teda sa zvýši viskozita a nie je schopná zmáčať vlákna.

2.2.1 Reaktoplasty

Materiály patriace medzi amorfné polyméry, ktoré vytvárajú trojrozmernú priestorovú sieť a po termickom vytvrdení nereagujú na teplo, nazývame reaktoplasty. Sú nerozpustné v organických rozpúšťadlách, vode a kyselinách. Po vytvrdení sa síce v teplom prostredí neroztopia, ale pri prílišnom zahriatí degradujú. Reaktoplasty sú veľmi pevné a tuhé, čo je spôsobené sieťovou štruktúrou, ktorá bráni rotácii molekúl. Zosieťovanie nastáva po určitom čase za účasti zvýšenej teploty alebo katalyzátoru. Po tomto procese je reaktoplast vytvrdený a ďalej s ním nemožno pracovať. Živice patriace do skupiny reaktoplastov: epoxidové, polyesterové, vinylesterové, izokyanátové a ďalšie [1, 2], [13].

Epoxidové živice – dlhú dobu najpoužívanjšie živice na ručné laminovanie. Oproti polyesterom sú epoxidy 3x až 4x drahšie [1], ale prinášajú aj isté výhody. Pri príprave živice sú používané rôzne aditíva – riedidlá na zníženie viskozity, činidlá na zvýšenie flexibility epoxidu a v neposlednom rade katalyzátory urýchľujúce vytvrdzovanie [2]. Epoxidové živice sa po vytvrdení zmršťujú len veľmi málo, okolo 2%. To prináša nespornú výhodu vo vzniku len veľmi nízkych vnútorných napätí, a preto sú vhodné pre aplikáciu aj pri väčších súčastiach. Majú veľmi dobrú zmäčavosť sklenených vlákien v porovnaní s polyesterovými živicami [4]. Predtým, ako je v epoxidovej živici úplne vytvorená sieťová štruktúra, nachádza sa v medzifáze. Tento stav epoxidovej živice je využívaný pre výrobu polotovarov, nazývaných prepreg. Ide o tkaninu napustenú živicom, ktorej zostáva možnosť v závislosti na pridaných činidlách s polotovarom ďalej pracovať [2].

Polyesterové živice – nenasýtené polyesterové živice obsahujú dvojité väzby medzi atómami uhlíku [1]. Pridávaním rôznych aditív sa dajú ovplyvniť vlastnosti polyesterovej živice. Pridaním kyseliny ortoftalovej sa zlepšujú spracovateľské vlastnosti a zvyšuje sa chemická odolnosť, kyselina tetrahydroftalová zvyšuje húževnatosť a tepelnú odolnosť, kyseliny izoftalová a tereftalová pomáhajú odolnosti voči hydrolyze. Rôzne prísady nielen vylepšujú isté vlastnosti, ale sú používané aj ako objemové plnivá, teda zlacňujúci materiál. Plnivá ako krieda, kaolín a hydroxid hlinitý okrem iného zvyšujú aj viskozitu, čo ovplyvňuje spracovateľnosť živice [1]. Polyesterové živice majú tak ako aj ostatné reaktoplasty dostatočnú odolnosť voči vode a chemikáliám, zvetrávaniu, starnutiu a sú veľmi lacné. Zmrštenie po vytvrdení dosahuje hodnoty medzi 4% a 8% [2]. Takéto zmrštenie je nežiadúce a je spôsobené nerovnomerným prechodom do gélového

stavu. Z tohto dôvodu vznikajú problémy s tvarovou stálosťou. Pridávaním plnív a aditív je možné znížiť zmrštenie na 0,15 až 0,3%. Ako plnivo sú použité častice termoplastu, ktoré pôsobením tepla vytvárajú dutiny a tým vyrovnávajú zmrštenie [1].

Fenolické živice – sú vyrábané kondenzáciou fenolov a 30 až 50% vodných roztokov aldehydov. Existuje množstvo variantov fenolických živíc a líšia sa podľa rôznych druhov fenolických surovín a rôznych molárnych pomerov fenol/formaldehyd. Pevné fenolické živice sa musia vytvrdzovať pridaním tvrdidiel a za zvýšenej teploty, bez tvrdidla majú termoplastické vlastnosti. Vytvrdzovanie prebieha v dvojstupňovej exotermickej reakcii. Uplatňujú sa ako spojivo pre izolačné materiály, vodovzdorné drevárske výrobky a brúsne nástroje a kotúče. Vyznačujú sa výbornou chemickou a tepelnou odolnosťou. V bežných vystužených kompozitoch sa používajú zriedka, pretože pre veľkoplošné diely sú príliš krehké a pri vytvrdzovaní vznikajú prchavé látky [1].

Vinylesterové živice – majú vysokú húževnatosť, sú veľmi dobre odolné proti alkalickým prostrediam, avšak majú nižšiu tvarovú stálosť za tepla. Oproti fenolickým živiciam sú reaktívnejšie, odolnejšie voči teplotám, ale relatívne krehké. V porovnaní s epoxidovými živicami majú nižšiu viskozitu a vytvrdzovanie je dobre regulovateľné. Sú vhodné teda na použitie v prostrediach s vysokým koróznym namáhaním a v niektorých aplikáciách úplne vytlačili polyesterové živice. Používajú sa na veľkorozmerné potrubia pre odvod plynu, chladiace veže, stavbu lodí, či pri výrobe rotorových listov [1].

2.2.2 Termoplasty

Termoplasty sa od reaktoplastov líšia radom rozdielov. Termoplasty sú za normálnych teplôt tuhé látky a až po zahriatí prevažne nad 200°C sú tekuté. Taktiež sú podstatne náchylnejšie na kazy ako reaktoplasty. Toto je spôsobené veľkými rozdielmi v kryštalizácii. Špecifickou vlastnosťou oproti reaktoplastom je, že termoplasty je možné po zahriatí znova tvarovať [1]. S možnosťou opätovného spracovania ale prichádza riziko zhoršených vlastností, predovšetkým zhoršením odolnosti voči nárazu, čo je veľmi nevýhodné pre letecký priemysel, v ktorom sa odolnosť voči nárazom vyžaduje.

Oproti reaktoplastom, lineárne reťazce molekúl dodávajú termoplastom vyššie hodnoty medze pevnosti, a to medzi 30% až 100%. Tento široký interval je závislý na odchýlkach množstva kryštalinity. Vo všeobecnosti majú termoplasty vyššiu viskozitu

ako reaktoplasty, ale je možné ju kontrolovať úpravou teploty pri výrobe. Treba byť však opatrný, pretože hrozí degradácia matrice.

Veľkou výhodou pre termoplasty je ich recyklácia. Sú tak výrazne priaznivejšie pre životné prostredie ako reaktoplasty. Ich degradácia môže nastať buď za pôsobenia vysokých teplôt, UV žiarenia alebo absorpciou tekutiny. Absorpcia tekutiny v prostredí spôsobuje navreliny. Z toho vyplýva, že termoplasty sú náchylnejšie na vplyvy okolitého prostredia ako reaktoplasty [2].

PEEK – ide o často využívanú termoplastovú maticu predovšetkým v aloplastike. Vyniká svojou odolnosťou voči únave a creepu, pri dlhodobom vystavení vlhkému prostrediu nenastáva degradácia a neškodí mu ani vystavenie teplotám až do 260°C , krátkodobo aj do 300°C. Teplota topenia polyéter(éter)ketónu je až 343 °C. Ide o termoplast s kryštalickou štruktúrou [2], [14].

PEEK vykazuje vysokú húževnatosť ako pri lomovej skúške tak aj pri rázovej skúške s padajúcim telesom. Výborné vlastnosti dosiahol aj pri únavových skúškach s počtom cyklov 10^6 , čo ho predurčuje na použitie aj pre náhrady v ľudskej kostre. Materiál vykazuje vysokú odolnosť voči väčšine bežných rozpúšťadiel okrem 98% roztoku kyseliny sírovej [14].

PAEK – ide o nástupcu materiálu PEEK. Oproti predchodcovi sa dosiahla vyššia tuhosť v oblasti od 150 °C do 190°C, zvýšila sa chemická odolnosť, pevnosť a celková tuhosť pri znížení ceny [15].

2.2.3 Kovy

Najrozšírenejšími kompozitmi s kovovou maticou sú kompozity vystužené časticami alebo krátkymi vláknami, pretože sú cenovo dostupné a majú relatívne izotropné vlastnosti v porovnaní s vláknovými kompozitmi. Najčastejšie sú vystužované keramickými časticami ako SiC alebo TiB₂.

Ako matrica sa používa množstvo kovov. Najčastejšie sú to hliníkové, titánové, horčíkové a medené zliatiny, prípadne zliatiny kovov. Hliníkové zliatiny našli najlepšie využitie v leteckom a kozmickom priemysle, pre ktoré boli aj primárne vyvíjané. Vynikajú nízkou hustotou, húževnatosťou a odolnosťou voči korózii. Príkladom môže byť veľmi dôležitá zliatina Al-Cu-Mg a Al-Zn-Mg-Cu. Zliatiny titánu sa pre svoj výborný pomer pevnosti a hmotnosti, podobne ako zliatiny hliníku, nachádzajú v kozmickom

a leteckom priemysle. S bodom tavenia pri teplote 1672°C sú vhodné na aplikáciu v prúdových motoroch. Aj pri vysokej teplote si totiž zachovávajú pevnosť.

Matrice z ostatných kovov sú využívané menej a väčšinou sú ťažšie opracovateľné. Napríklad kompozity s matricou z horčíkových zliatin sa pre svoju nízku hmotnosť používajú v letectve ako kryty rôznych mechanizmov [2].

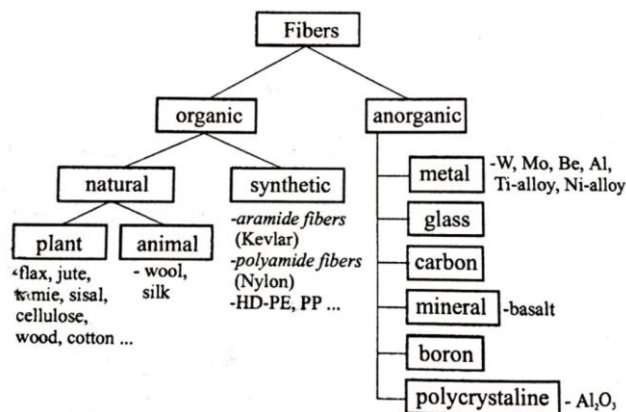
2.2.4 Keramika

Keramické materiály majú vysokú pevnosť, tuhosť, nízku hustotu, odolnosť pri vysokých teplotách a chemických látkach. Zásadný problém pri týchto materiáloch však nastáva pri húževnatosti, ktorá prakticky pri keramických materiáloch neexistuje. Sú veľmi náchylné na teplotné výkyvy a ľahko sa poškodia pri výrobe alebo montáži.

Oproti ostatným kompozitom sú kompozity s keramickou matricou v niektorých základných ohľadoch iné. Najzásadnejší rozdiel je v rozdelení namáhania v súčasti. Pri ostatných kompozitoch, hlavné namáhanie nesie výstuž. Pri keramických kompozitoch je toto namáhanie rozložené rovnomernejšie medzi matricu a výstuž [2].

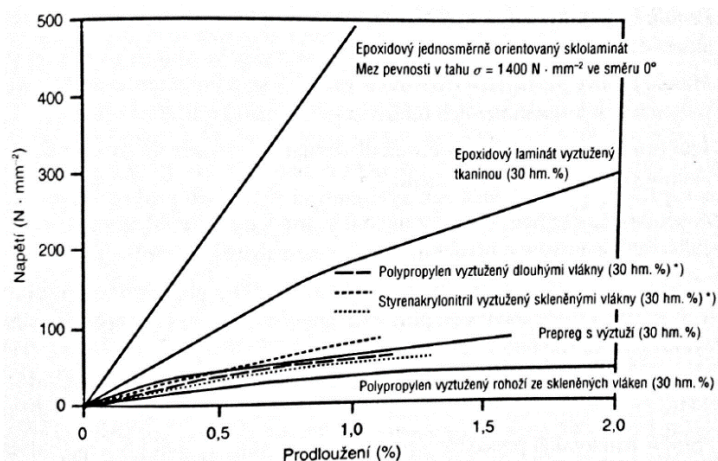
2.3 Výstuž

Výstuž je tuhú zložkou kompozitných materiálov, ktorá prenáša v súčasti hlavné napätie. Základným polotovarom je častica, konečné alebo nekonečné vlákno z materiálu príslušnej výstuže. Pri výrobe laminátov, ktoré sú aj najčastejšou formou vyrábaných dielov sú používané nekonečné vlákna spracované do niekoľkých podôb, vid' (Obr. 2). Materiály výstuže je možné deliť do niekoľkých skupín. Schematické rozdelenie je uvedené na (Obr. 3).



Obr. 3 - rozdelenie materiálov výstuží [4]

Samotné vlákno nedokáže prenášať iné zaťaženie ako rovnobežné. Pre využitie mechanických vlastností vlákien sa preto ukladajú do rôznych matric, kde sa podľa predpokladaného pôsobenia zaťaženia ukladajú v rôznych základných smeroch 0° , 90° a $\pm 45^\circ$. Graf závislosti napätia na predĺžení sklenených laminátov s rôznou formou usporiadania výstuže a rôznou matricou zobrazuje (Obr. 4) [1].



Obr. 4 - Graf závislosti napätia na predĺžení rôznych vláknových kompozitov [1]

Dôvod, prečo sú používané tenké vlákna namiesto robustnejších polotovarov je ten, že pravdepodobnosť výskytu fatálnych kazov v objeme materiálu je značne nižšia. Preto majú napríklad tenké sklenené vlákna 20krát vyššiu pevnosť ako tyče z toho istého materiálu. Vybrané mechanické vlastnosti niektorých používaných výstuží sú v (Tab. 3) [4].

Tab. 3 - Mechanické vlastnosti používaných výstuží [4]

vlákno	ρ [g/cm ³]	E [GPa]	σ [MPa]	ε [%]
<u>anorganické:</u>				
azbest	2,56	160	3100	1,9
sklo	2,54	70-85	2200-3500	2,5
borová vl.	2,65	420	3500	0,8
SiC	2,6	250	2200	0,9
uhlík	1,86	300-800	2700	0,7
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	3,2-3,9	300-414	1800-2000	0,3-0,8
<u>organické:</u>				
Kevlar 49	1,45	130	2900	2,5
Kevlar 29	1,45	60	2700	5,0
Kevlar 129	1,44	120	3000	3,0
Kevlar 149	1,45	190	2600	2,5
PE Spectra	0,97	172	3000	1,7
PBT	1,50	250	2400	1,5
Len	1,30	180	2600	3,1

2.3.1 Sklená

Vzhľadom k priaznivej cene a veľmi dobrým mechanickým vlastnostiam sú dnes sklené vlákna najpoužívanejšou výstužou. Sú úplne nehorľavé. Sklené vlákno má pevnosť v ťahu 2200 – 3500 MPa. Oproti modernejším vláknam sa však vyznačujú nižším modulom pružnosti, len 70 – 85 GPa a sklonom k lámavosti, čo je problém pri manipulácii a nemožnosť aplikácie ako balistickej ochrany [4].

Vylepšenie v niektorých ohľadoch priniesli sklené vlákna so silikátovým základom, keď sa síce pevnosť v ťahu znížila na 1800 – 2000 MPa, no modul pružnosti v ťahu stúpol na 300 – 414 GPa. Z technologických dôvodov sa hrúbka vlákien bežne pohybuje od 7 do 15 μm . Tieto vlákna sa vyrábajú ťahaním taveniny a pred samotným navinutím na cievku do rovingu je aplikovaná povrchová úprava. Kontakt medzi neošetrenými vláknami by spôsobil veľkú abráziu, čo by viedlo k poklesu pevnosti. Hneď po vytvrdnutí vlákna je aplikovaná lubrikačná látka, ktorá dovoľuje spracovať vlákna ako do rovingu, tak následne do tkaniny. Túto vrstvu je potom nutné odstrániť, aby sa dosiahla čo najlepšia adhézia vlákna a matrice. Tkaniny sa potom ešte ošetrujú väzobnými prostriedkami, ktoré majú dobrú afinitu ku skleným vláknam aj k polymérnej matrici [4], [9].

2.3.2 Uhlíková

Uhlíkové vlákna sa vyznačujú najširším spektrom mechanických vlastností pri nízkej hustote, preto sa hodia na aplikácie, kde je požadovaná vysoká pevnosť a tuhosť pri nízkej hmotnosti. Oproti skleneným vláknam sú však podstatne drahšie, čo ich záber využiteľnosti trochu zužuje. Pevnosť v ťahu sa pohybuje medzi 1500 – 3000 MPa a modul pružnosti v ťahu je 150 – 300 GPa. Zvláštnosťou uhlíkových vlákien je záporný koeficient dĺžkovej teplotnej rozťažnosti, teda pri zahriatí sa vlákno skracuje. Ďalšou špecifickou vlastnosťou je vytváranie galvanického článku pri styku s menej ušľachtilými kovmi a vznik korózie. Preto je pri konštrukcii nutné oddeliť tieto dve zložky nevodivým materiálom alebo aplikovaním povrchovej úpravy.

Podobne ako na sklené vlákna, tak aj na uhlíkové je nutné aplikovať povrchovú úpravu. Najčastejšie sa povrch ošetruje polymérnymi povlakmi na báze epoxidov alebo polyamidov. Účelom je ochrana vlákien proti abrázii, zabezpečenie lepšej absorpcii matrice do vlákna, prípadne odstránenie látok, ktoré zostali na povrchu od výroby. Napriek vysokej cene a spomínaným špecifickým vlastnostiam však postúpili

z dopravných lietadiel na ultraľahké a okrem super športových áut nachádzajú uplatnenie aj v pohonoch bežných automobilov [9].

2.3.3 Aramidové vlákna

Tiež známe pod jedným z obchodných označení - Kevlar. Sú najľahšie vystužujúce vlákna a sú schopné plastickej deformácie kolmo na os vlákna. Vyznačujú sa vysokou abrazívnou odolnosťou. Dosahujú pevnosť v ťahu medzi 2500 – 3500 MPa a modul pružnosti 70 – 170 GPa. Hodnoty mechanických vlastností sa líšia v závislosti na výrobnnej technológii. Sú vhodné na výrobu prostriedkov balistickej ochrany a výrobu ochranných odevov. Častokrát sa objavujú napríklad spolu s uhlíkovými vláknami v hybridných tkaninách a je možné ich spracovávať so všetkými bežnými reaktoplastmi a termoplastmi. Podobne ako uhlíkové vlákna, majú aj aramidové záporný súčiniteľ teplotnej rozťažnosti v smere osi vlákien [9].

2.3.4 Bórové vlákna

Vyrábajú sa technológiou CVD. Na wolfrámovom vlákne sa vytvára elementárny bór zo zmesi plynov vodíka a chloridu boritého. Teda bórové vlákno má wolfrámové jadro a na povrchu je bór. Sú náchylné na oxidáciu za zvýšených teplôt a reakcie s roztaveným hliníkom, preto sa povlakuje SiC alebo B₄C. Týmito povlakmi sa okrem ochrany docieli aj vyššia zmáčavosť s matricou. Vyznačujú sa vysokou pevnosťou - až 4000 MPa a malou tepelnou rozťažnosťou. Oproti skleným či uhlíkovým vláknám dosahujú väčšiu hrúbku, 100 μm. Najčastejšie sú používané s hliníkovou matricou. Bórové vlákno sa nemôže ohýbať a nedá sa tkať. Preto sú používané na plošné diely, pri ktorých sa vyžaduje vysoká tuhosť. Prvýkrát boli použité na výrobu raketoplánov. Pre reakcie s hliníkom sa však nahrádzajú modernejšími vláknami [9], [16, 17, 18].

2.3.5 Ostatné

Menej významné sú prírodné rastlinné vlákna napríklad z konope. Používajú sa na výstuž dielov automobilov, predovšetkým v interiéroch. Výhodou použitia týchto vlákien je ich cena, nízka náročnosť na opracovanie a v neposlednom rade jednoduchšia recyklovateľnosť oproti ostatným kompozitom [9].

3 Výrobné technológie

Kompozitné materiály sa oproti konvenčným vyznačujú veľkým rozptylom spôsobov spracovania a výroby, respektíve na strojné vybavenie dielne. Parameter, ktorý rozdeľuje spracovanie a výrobu, je materiál matrice [1].

3.1 Kompozity s reaktoplastickým spojivom

Veľmi rozšírené, predovšetkým na výrobu tvarovo zložitejších dielov. Ich výhodou je dlhá doba spracovania pred geláciou. V prípade polyesterových živíc platí, že čím viac iniciátoru pridáme, tým rýchlejšie sa matrica vytvrdí. Dobu vytvrdenia je možné ovplyvniť aj teplotou. Pri epoxidových živiciach je nutné dodržiavať veľmi presný pomer medzi živicom a tvrdidlom. V prípade nedodržania tohto pomeru nastáva zhoršenie výsledných mechanických vlastností [9], [1].

3.1.1 Ručné kladenie za mokra

Pri ručnom kladení do otvorenej formy je možné vyrábať súčasti vo veľkom rozptyle veľkostí. Maximálna veľkosť súčasti závisí predovšetkým na dobe spracovateľnosti matrice, teda na dobe, počas ktorej je živica tekutá a je schopná dostatočne zmáčať vlákna výstuže. Táto technológia je nenáročná na strojné vybavenie a na sytenie výstuže matricou sa používajú v závislosti na veľkosti a geometrickej zložitosti valčeky, štetce alebo stierky. Ručná laminácia je možná buď do pozitívnej alebo negatívnej formy, v závislosti na požiadavkách na kvalitu povrchu súčasti a jej celkovú cenu. Po tejto technológii zostáva však vo výrobku pomerne veľa živice a tak je ťažký. Na zníženie hmotnosti sa používa technológia vákuového lisovania, pomocou ktorej spolu s prídavnými materiálmi je možné znížiť podiel živice vo výrobku. Avšak zvyšuje sa cena a náročnosť na strojné vybavenie [1], [4], [9].

3.1.2 Ručné kladenie prepregu

Moderný polotovár využívaný na ručné laminovanie, ktorý je už vopred rovnomerne nasýtený živicom. To zaručuje výborné zmáčanie vlákien a rozloženie matrice vo výrobku. Používa sa na najnáročnejšie aplikácie v leteectve kvôli svojej cene, množstvu vyprodukovaného odpadu a technologickej náročnosti vytvrdzovania. Okrem vákuového lisovania sa pridáva vytvrdzovanie v autokláve pri vysokej teplote (120° - 200°C) a tlaku.

Táto metóda sa využíva pri všetkých technologických postupoch, avšak len pre najnáročnejšie aplikácie. Keďže prepreg ako polotovar je drahý a využíva sa na náročné aplikácie, autokláv sa najčastejšie nasadzuje v spojení s ním [9].

3.1.3 Ostatné

Existujú rôzne iné, predovšetkým automatizované metódy výroby. Vhodné je spomenúť ATL (Automated Tape Laying), automatické kladenie prepregu. Je to veľmi rýchla technológia s odstránením pochybenia človeka. Bola použitá pri výrobe krídla Boeingu. Často používaná technológia je navíjanie pásov vlákien, tzv. Filament Winding, pre výrobu kompozitných trubiek na rôzne použitie. Pokročilejšou automatizáciu môžeme navíjať aj zložitejšie duté útvary [9].

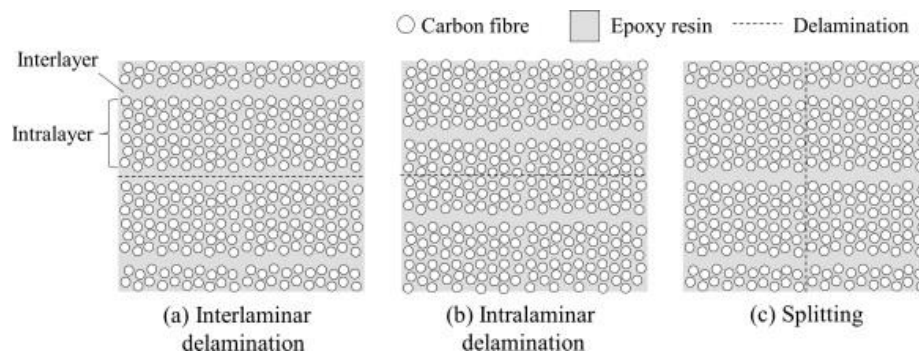
3.2 Kompozity s termoplastickým spojivom

Výroba súčastí s termoplastickou matricou je menej rozšírená a zatiaľ je z veľkej časti v štádiu vývoja. Je to pomerne drahá a zložitá technológia. Jednou z možností je pretlačovanie alebo vtlačovanie vystužujúcich vlákien do natavenej termoplastickej fólie. Avšak priestorová tvarovateľnosť je značne obmedzená. Lepšia priestorová tvarovateľnosť sa dosahuje použitím hybridných tkanín, kde je určitá časť výstuže tvorená termoplastickými vláknami [1].

4 Typické poškodenia

Mechanizmus poškodzovania kompozitných materiálov je diametrálne odlišný od mechanizmu poškodzovania kovov, prípadne ostatných konvenčných konštrukčných materiálov. Lom vo vláknových kompozitoch sa oproti bežným materiálom šíri pomalšie, keďže v rozvoji poškodenia bránia vlákna. Vznik poškodení je závislý na orientácii vlákien, vytvrdení matrice, rozložení plniva alebo vlákien a na podiele výstuže. Platí to ako pri laminátoch s jednosmerne orientovanou výstužou, tak pri laminátoch s vrstvami, ktorých orientácia sa mení zvyčajne po 45° alebo 90°. Známe sú tri základné mechanizmy šírenia lomu vláknového kompozitu, zobrazené na (Obr. 5) [19].

- a) intralaminárny
- b) interlaminárny
- c) translaminárny



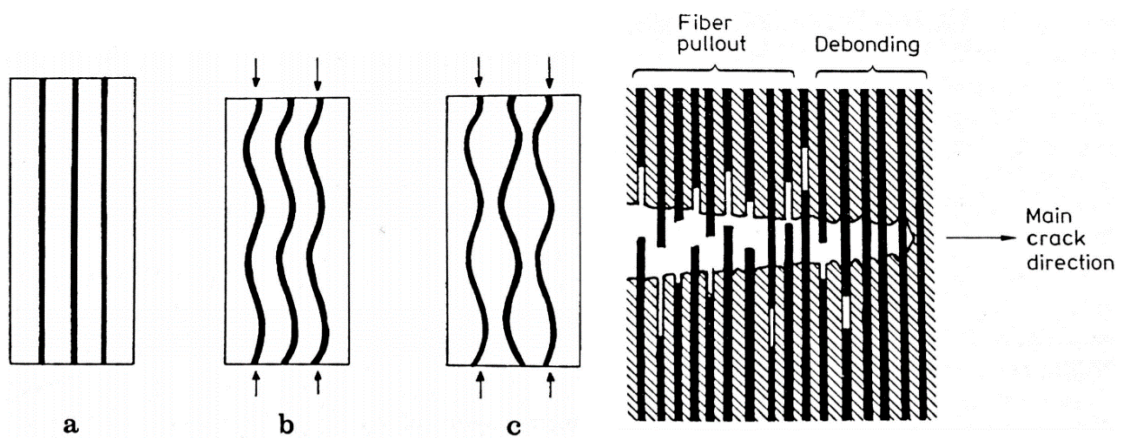
Obr. 5 – základné mechanizmy poškodzovania vláknových kompozitov [19]

4.1 Ťah a tlak

Vrstvy s vláknami orientovanými rovnobežne so smerom zaťažovania prenášajú väčší podiel zaťaženia ako vlákna v inej vrstve, kde sú orientované pod uhlom 45° alebo 90° k zaťaženiu. V týchto vrstvách tak vznikajú prvé poruchy. To platí v prípade ťahovej sily. Pri zaťažení tlakom matrica podopiera vlákna a vzhľadom na charakteristiky matrice a výstuže dochádza k vzperu (Obr. 6) [1, 2].

V počiatkoch lomu pri $\varepsilon_{mP} < \varepsilon_{fP}$ sa ako prvé objavujú trhliny v matrici. V prípade, kedy $\varepsilon_{mP} > \varepsilon_{fP}$, nastáva ako prvý lom vlákien, potom nasleduje porušenie matrice. Následne sa začnú vlákna uvoľňovať z matrice a podľa koncentrácie väd vo vlákne sa začnú lámať. Pri tomto procese dochádza k vyťahovaniu vlákien z matrice. Tento proces

postupne pokračuje po celej dĺžke lomu. Schematické šírenie lomu je zobrazené na (Obr. 7) [2].

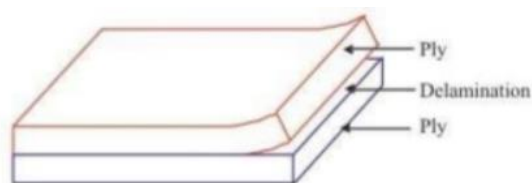


Obr. 6 - Správanie vlákien bez záťaže/so záťažou [2]

Obr. 7 - Priebeh lomu vláknovým kompozitom [2]

4.2 Ohyb

Pri ohybe vplyvom pôsobenia ohybového momentu a šmykového napätia často dochádza k delaminácii, teda k rozdeleniu na rozhraní matrica-výstuž. Vtedy sa lom šíri pozdĺž vlákien a väčšinou nedochádza k ich poškodeniu. Pri uhlíkových kompozitoch s epoxidovou matricou je možné po takomto lome pozorovať čisté vlákna, teda úplné oddelenie oboch rozhraní. Lom pri ohybe prebieha však podobne ako pri ťahu, no bežne pri skúškach nedochádza k úplnému rozdeleniu vzorky, teda dôjde k porušeniu matrice a vlákna nebránia v ďalšom ohýbaní, keďže stratili bočnú oporu. Delaminácia uhlíkového laminátu je zobrazená na (Obr. 8) [2].



Obr. 8 - Delaminácia uhlíkového laminátu [9]

Táto skúška väčšinou zahŕňa ťahové, tlakové a šmykové napätie. Tieto tri zložky pôsobia súčasne, preto hodnoty získané z meraní nemožno pokladať za reprezentatívne hodnoty s premetnutím do praxe. No vďaka takémuto komplexnému zaťažovaniu získame informácie o kvalite vyrobeného materiálu [20].

5 Experimentálna časť

5.1 Experimentálny materiál

Vybrané materiály skúšobných telies použité pri experimente sú bežnou kombináciou matrica-výstuž v strojárskkej praxi. Na porovnanie je k dispozícii dostupnejšia forma výstuže v podobe sklenej tkaniny a uhlíkový prepreg s jednosmerne uloženými vláknami, ktorý je rovnomerne napustený živicom. Použité materiály výstuže sú uvedené v (Tab. 4).

Tab. 4 - Špecifikácia použitých materiálov výstuže

Výstuž	Obchodný názov	Označenie	Plošná hustota [g/m ²]
Sklo - tkanina	US Style	7781	300
Uhlík - jednosmerné vlákna	UD prepreg Hexcel	AS4/8552 RC34 AW194	190

Ako matrica pre sklolaminát bola použitá epoxidová živica Araldite LY5052, tužidlo nie je známe. Matrica v uhlíkovom lamináte nie je známa, keďže ide o polotovar typu prepreg.

Sklený laminát bol vyrobený vákuovou infúziou. Oproti tomu uhlíkový laminát bol vyrobený technológiou ručného kladenia prepregu, následne bol vákuovo lisovaný a vytvrdený v autokláve. Oba materiály boli teda vyrobené vyspelejšími technológiami, pri ktorých sa môže vylúčiť ľudský faktor, ktorý je prítomný napríklad pri ručnom laminovaní. Pri týchto technológiách by nemalo dochádzať k rozdielnemu presýteniu výstuže matricou v rôznych miestach laminátovej dosky.

5.2 Príprava skúšobných telies

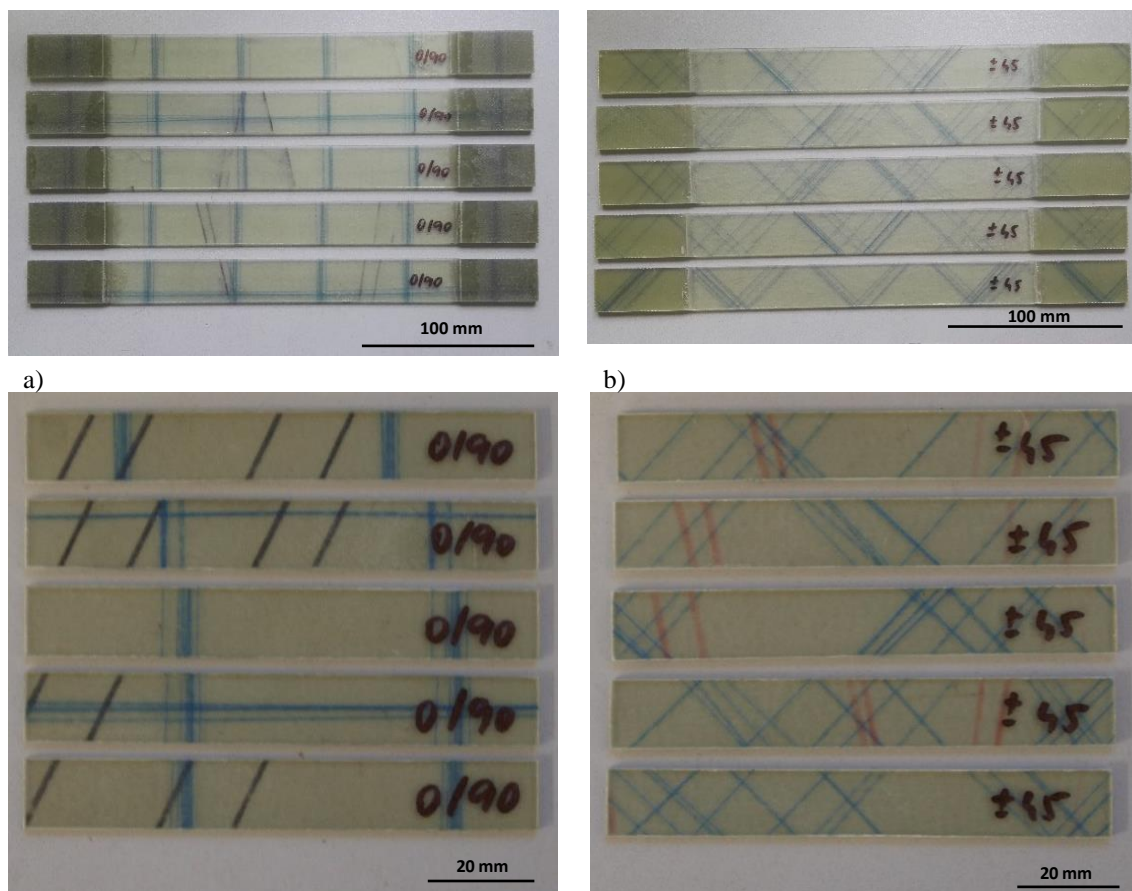
5.2.1 Sklolaminát

Skúšobné telesá na experiment boli vyrobené z materiálu uvedeného v (Tab. 4) vákuovou infúziou. Telesá boli vyrezané a upravené podľa normy pre skúšku ťahom ASTM D 3039 a pre skúšku ohybom ASTM D 7264. Skúšobné telesá boli premerané a zistené rozmery zaznamenané. Bližšie špecifikácie skúšobných telies sú uvedené v (Tab. 5).

Tab. 5 - Špecifikácie skúšobných telies zo sklolaminátu

Skúška	Výstuž	Orientácia vlákien	Počet vrstiev	Rozmery (l(l ₀) x w x h) [mm]
Ťah	Sklo	0°/90°	8	338(252) x 25 x 2
		±45°	8	347,5(242,5) x 25 x 2
Ohyb	Sklo	0°/90°	8	96 x 13 x 2
		±45°	8	96 x 13 x 2

Skúšobné telesá pred vykonaním skúšok mechanických vlastností sú zobrazené na (Obr. 9).



Obr. 9 - Skúšobné telesá zo sklolaminátu - a) Ťahové telesá 0°/90° b) Ťahové telesá ±45° c) Ohybové telesá 0°/90° d) Ohybové telesá ±45°

5.2.2 Uhlíkový laminát

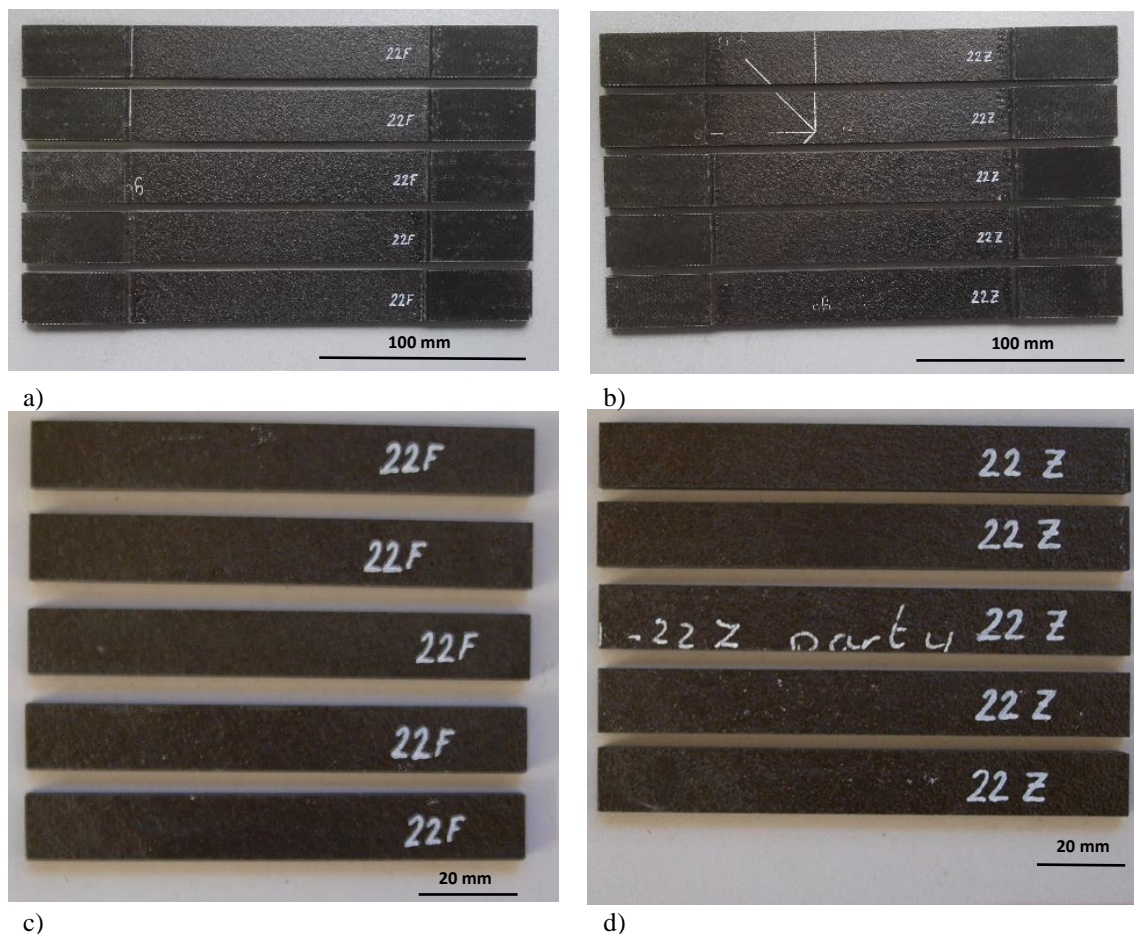
Skúšobné telesá na experiment boli vyrobené z materiálu uvedeného v (Tab. 4) technológiou ručného kladenia prepregu, vákuového lisovania a následného vytvrdenia v autokláve. Skúšobné telesá boli vyrezané a upravené podľa normy pre skúšku ťahom ASTM D 3039 a pre skúšku ohybom ASTM D 7264. Bližšie špecifikácie skúšobných telies sú uvedené v (Tab. 6).

Tab. 6 - špecifikácie skúšobných telies z uhlíkového laminátu

Skúška	Výstuž	Orientácia vlákien	Počet vrstiev	Rozmery (l(l ₀) x w x h) [mm]
Ťah	Uhlík	22F*	22	295(195) x 25 x 4,1
		22Z**	22	295(195) x 25 x 4,1
Ohyb	Uhlík	22F*	22	98 x 13 x 4,1
		22Z**	22	98 x 13 x 4,1

*22F - [45,-45,0,45,45,-45,-45,90,45,0,-45]S

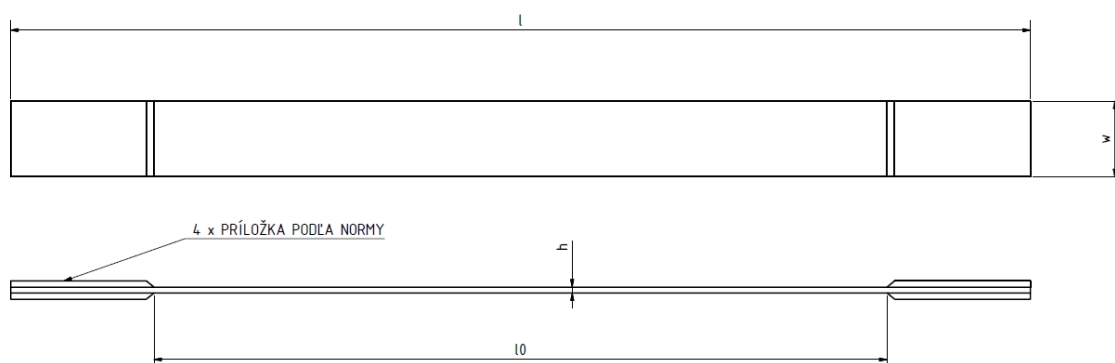
**22Z - [45,0,-45,0,45,-45,90,45,90,-45,0]S



Obr. 10 - Skúšobné telesá z uhlíkového laminátu - a) Ťahové telesá 22F b) Ťahové telesá 22Z c) Ohybové telesá 22F d) Ohybové telesá 22Z

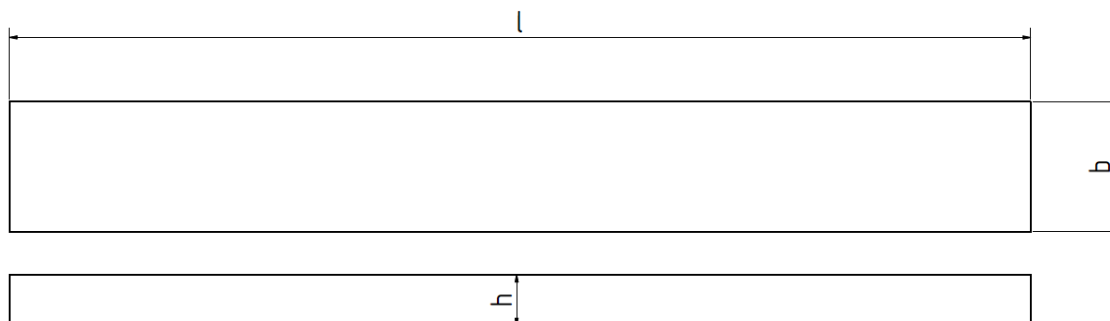
5.2.3 Úprava skúšobných telies

Skúšobné telesá pre ťahovú skúšku boli po vyrezaní z vyrobenej laminátovej dosky vybavené príložkami z rovnakého materiálu pre lepšie uchytenie v čeľustiach bez ovplyvnenia tlakovým zaťažením od nich. Príložky sú vyrobené so skosením pre zmiernenie koncentrácií napätí. Materiál na výrobu príložiek je odporúčaný totožný s materiálom použitým na výrobu samotných ťahových skúšobných telies. Skúšobné telesá boli vyrobené podľa normy ASTM D 3039/D 3039M. Výkres ťahového telesa s orientačnými rozmermi je zobrazený na (Obr. 11) [1], [21].



Obr. 11 - Výkres ťahového telesa s orientačnými rozmermi

Skúšobné telesá pre skúšku ohybom boli vyrezané z laminátovej dosky podľa normy ASTM D 5687/D 5687M. Dĺžka skúšobného telesa sa určuje z pomeru $L:h$ telesa. Odporúčaný pomer $L:h$ je 32:1. Pomer pre telesá vystužené sklenenými vláknami bol 40:1 a pre telesá vystužené uhlíkovými vláknami 20:1. Oba pomery sú v norme odporúčané. Celková dĺžka telesa je potom o 20% väčšia ako rozpätie. Výkres ohybového telesa s orientačnými rozmermi je uvedený na (Obr. 12).



Obr. 12 - Výkres ohybového telesa s orientačnými rozmermi

5.3 Vykonané skúšky mechanických vlastností

Ťahová skúška bola vykonaná na skúšobnom zariadení INSTRON 5582 zobrazenom na (Obr. 13). Pred zahájením samotného merania boli telesá premerané a zaznamenané hodnoty boli zapísané do riadiaceho programu skúšobného zariadenia.

Skúška ohybom bola vykonaná na skúšobnom zariadení PLASTICS BENDING TESTER zobrazenom na (Obr. 14).

Všetky skúšobné telesá boli vyrobené v predpísaných rozmerových toleranciách.



Obr. 13 - INSTRON 5582



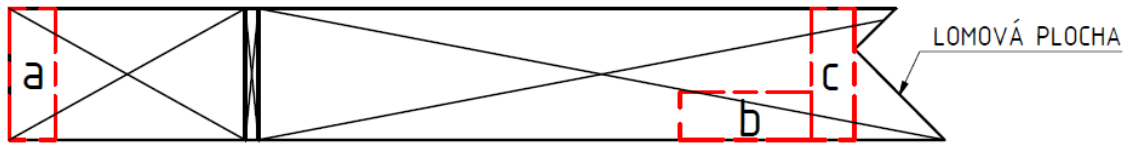
Obr. 14 - PLASTICS BENDING TESTER (2,5 kN)

5.4 Vyhodnotenie

5.4.1 Ťah

Po správnom upnutí telesa do pneumatických čeľustí bolo zahájené meranie s rýchlosťou deformácie určenej podľa normy ASTM D 3039/D 3039M. Podmienky merania pre jednotlivé skúšobné telesá a výsledné hodnoty spolu s kódom porušenia sú uvedené v (Tab. 7).

Skúšobné telesá boli po pretrhnutí odfotené na stereomikroskope NIKON SMZ 1500 a potom pripravené na pozorovanie pomocou svetelného mikroskopu CARL ZEISS NEOPHOT 32. Orientácie a pozície rezu boli vyberané podľa (Obr. 15).



Obr. 15 – Vyznačené skúmané prvky zo skúšobného telesa: a) základný materiál b) ovplyvnený materiál c) lomová plocha

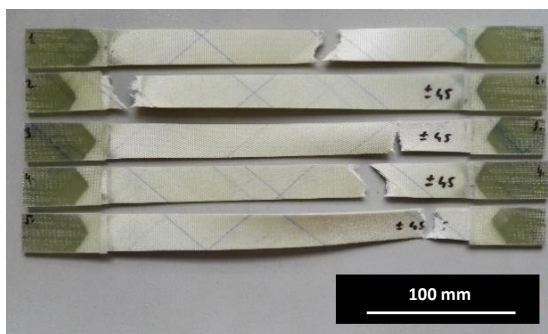
Tab. 7- Podmienky a výsledné hodnoty merania

Materiál	Orientácia	Č. sk. telesa	z [mm/min]	P_{max} [kN]	σ_{pt} [MPa]	Kód porušenia ²
Sklo	$\pm 45^\circ$	1	2	7,9	158	AGM
		2	5	7,6	151	AGV
		3	5	8,3	166	LGM
		4	5	7,9	158	AGM
		5	5	7,9	160	LGM
	$0^\circ/90^\circ$	1	2	16,6	319	LAT
		2	2	19,2	371	LGM
		3	2	21,4	417	LVV
		4	2	20,3	392	LVV
		5	2	20,2	392	LVV
Uhlík	22F	1	2	56,3	549	M(AD)GB
		2	2	58,5	571	M(AD)GM
		3	2	56,6	552	M(AD)GM
		4	2	57,4	560	M(AD)MM
		5	2	56,2	548	M(AD)GB
	22Z	1	2	76,7	748	M(AD)GM
		2	2	73,1	713	M(AD)GM
		3	2	71,6	699	M(AD)GM
		4	2	74,9	731	M(AD)MV
		5	2	69,6	679	M(AD)GM

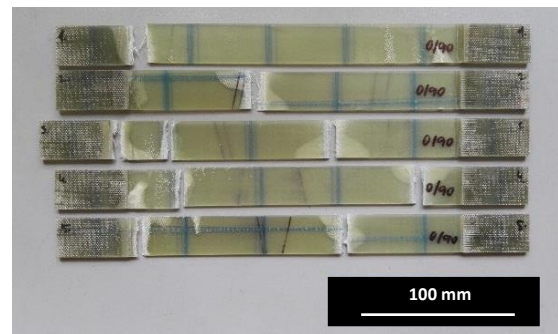
Norma hovorí, že rýchlosť zaťažovania sa má štandardne voliť $z = 2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a zároveň má dôjsť k porušeniu medzi 1 min až 10 min, čo bolo pri väčšine skúšobných telies splnené. V prípade telesa č. 1 z orientácie $\pm 45^\circ$ nebola podmienka času porušenia splnená. Teda pre skúšobné telesá orientácie $\pm 45^\circ$ č. 2 – 5 bolo nutné túto rýchlosť zvýšiť na $z = 5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

² Tabuľka s významom jednotlivých znakov je uvedená v prílohe.

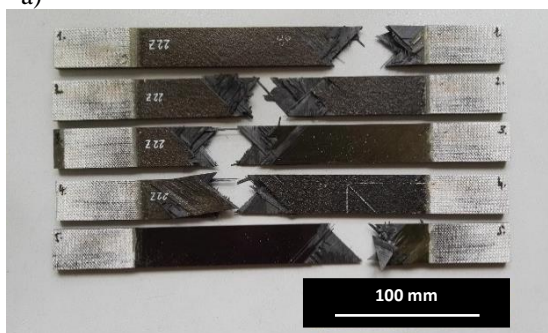
Skúšobné telesá po vykonaní skúšky sú zobrazené na (Obr. 16). Vplyv orientácie vlákien na charakter poškodenia je viditeľný hlavne na skúšobných telesách vystužených sklenenými vláknami so skladbou $0^{\circ}/90^{\circ}$ a $\pm 45^{\circ}$. Na skúšobných telesách s orientáciou $\pm 45^{\circ}$ je plastická deformácia vysoká, keďže zaťaženie sa rozložilo do osi vlákna aj do matrice. Oproti tomu, sklolaminát s orientáciou $0^{\circ}/90^{\circ}$ nemá žiadne výrazné oblasti plastickej deformácie. Je to spôsobené tým, že aplikované ťahové zaťaženie pôsobí priamo v ose vlákna.



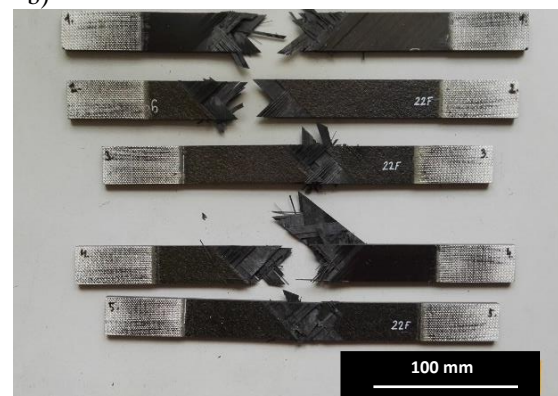
a)



b)



c)

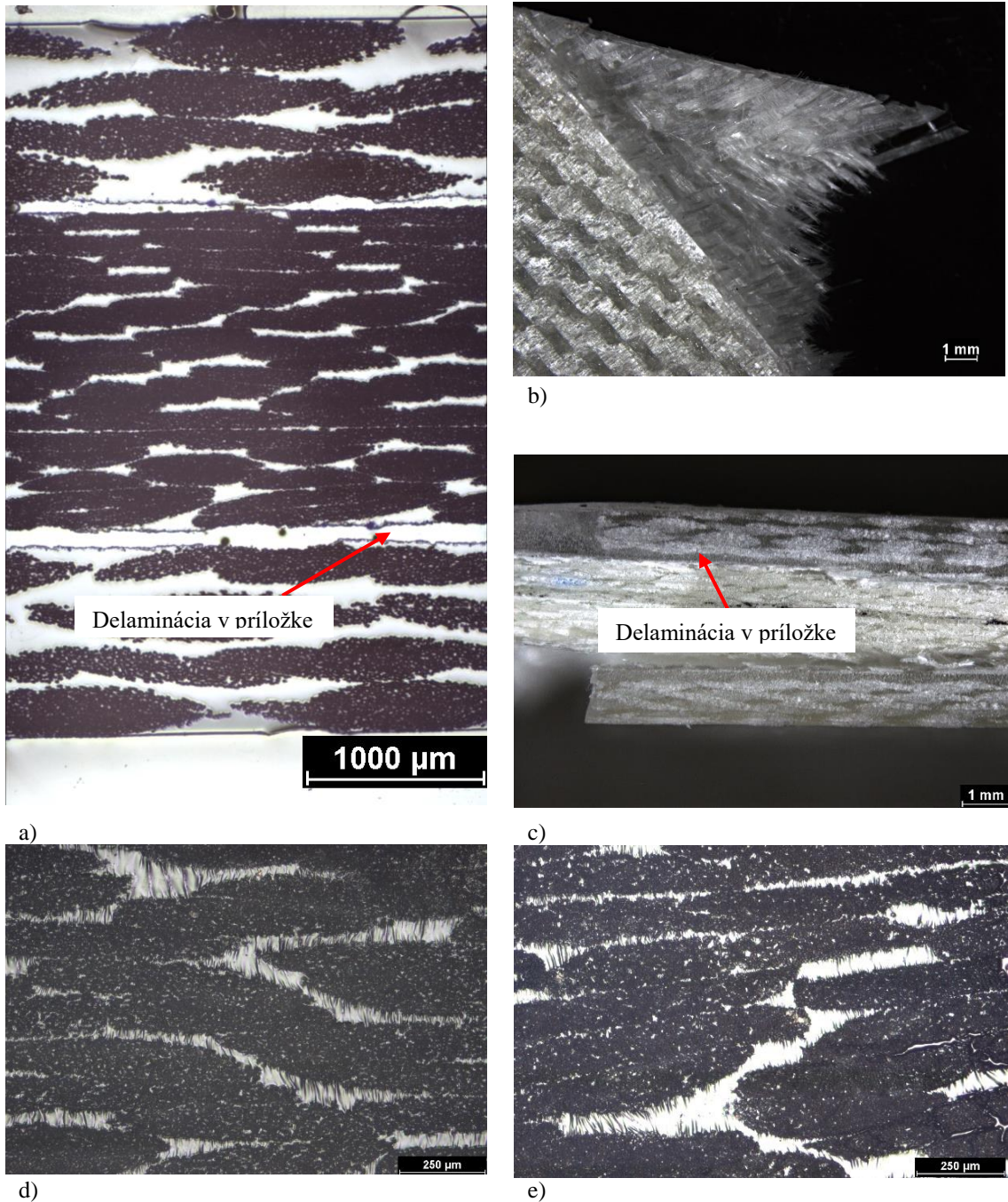


d)

Obr. 16 - Skúšobné telesá po pretrhnutí – orientácie a) $\pm 45^{\circ}$ b) $0^{\circ}/90^{\circ}$ c) 22Z d) 22F

Sklený laminát $\pm 45^\circ$:

Rez základným materiálom skleného laminátu s orientáciou $\pm 45^\circ$ je zobrazený na (Obr. 17 – a)). K plastickej deformácii dochádzalo v celom objeme telies a bolo možné pozorovať tvorenie „krčku“ podobne ako pri bežných húževnatých materiáloch. Tento jav je spôsobený zvolenou orientáciou vlákien, pri ktorej vo svojej základnej polohe neboli schopné prenášať maximálne zaťaženie.

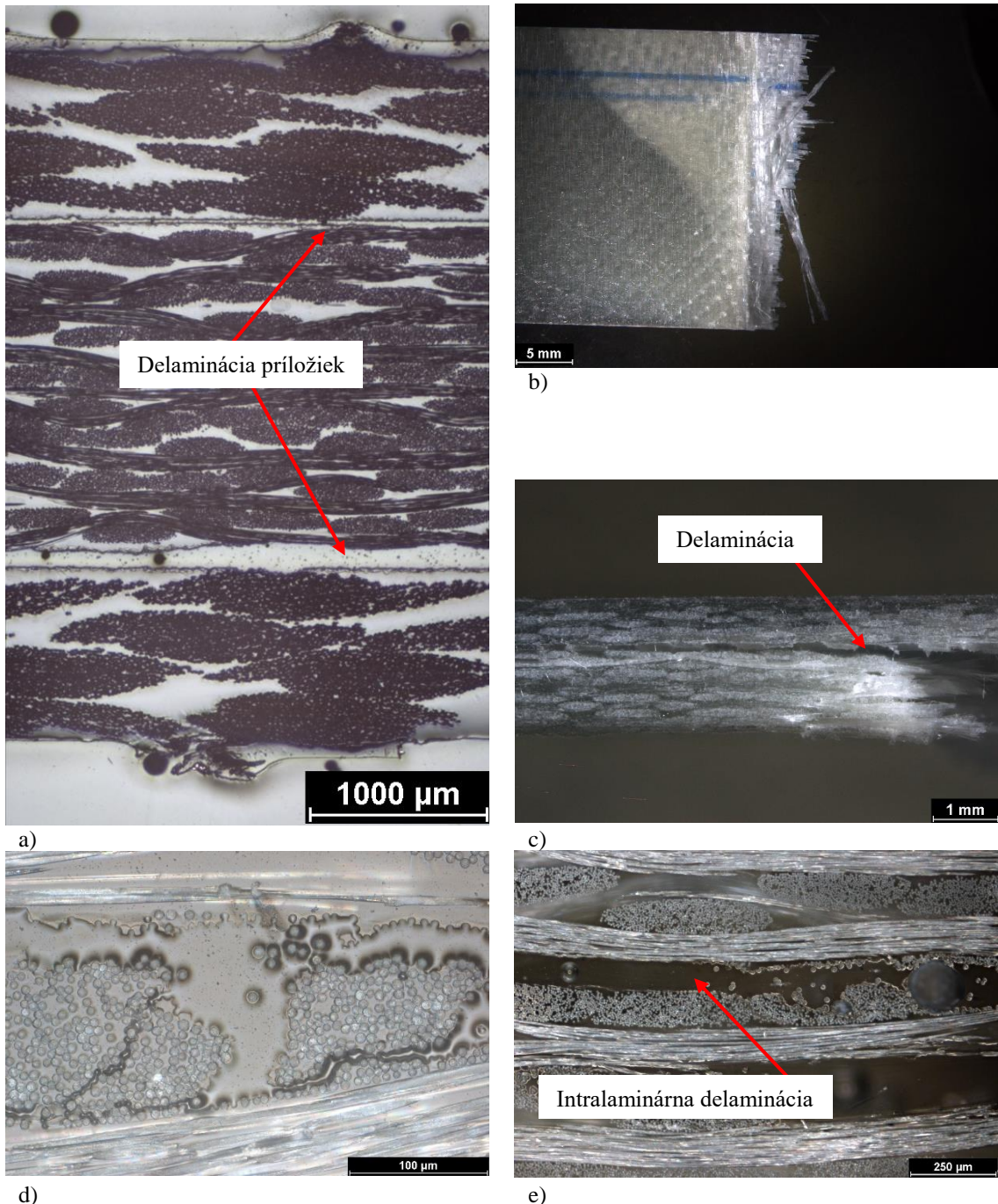


Obr. 17 – Snímky z stereomikroskopu a svetelného mikroskopu – a) Rez a – viditeľná delaminácia príložiek b) Detail lomovej plochy (zväčšenie 0,5x2) c) Delaminácia príložiek (zväčšenie 0,5x3) d) Rez b (zväčšenie 6,3x8) e) Rez c (zväčšenie 6,3x8)

Lom prebiehal typicky pre zvolenú orientáciu. Po dosiahnutí maximálnej plastickej deformácie došlo k trhlinám v matrici a následne k trhaniu samotných vlákien. Okraj lomovej plochy má súhlasný smer so zvolenou orientáciou. U všetkých skúšobných telies došlo k rozdeleniu vrstiev šmykom, zobrazené na (Obr. 17 – b)). K delaminácii dochádza predovšetkým na rozhraní príložiek a skúšobného telesa, spôsobenou plastickej deformáciou telesa, zobrazené na (Obr. 16 a) a Obr. 17 c)). Vplyvom orientácie vlákien nevznikali v skúšobnom telese viditeľné praskliny a delaminácie, čo vidieť na (Obr. 17 – d), e)). Vzorky pre svetelný mikroskop bolo potrebné naleptať pre zvýšenie kontrastu medzi výstužou a matricou. Ako leptadlo bol použitý 90% roztok kyseliny fluorovodíkovej.

Sklený laminát 0°/90°:

Rez základným materiálom skleného laminátu s orientáciou 0°/90° je zobrazený na (Obr. 18 – a)). V prípade orientácie 0°/90° bola plastická deformácia výrazne nižšia ako pri orientácii ±45°. V každej vrste sú totiž vlákna v smere zaťažujúcej sily, ktoré bránia v plastickej deformácii matrice.

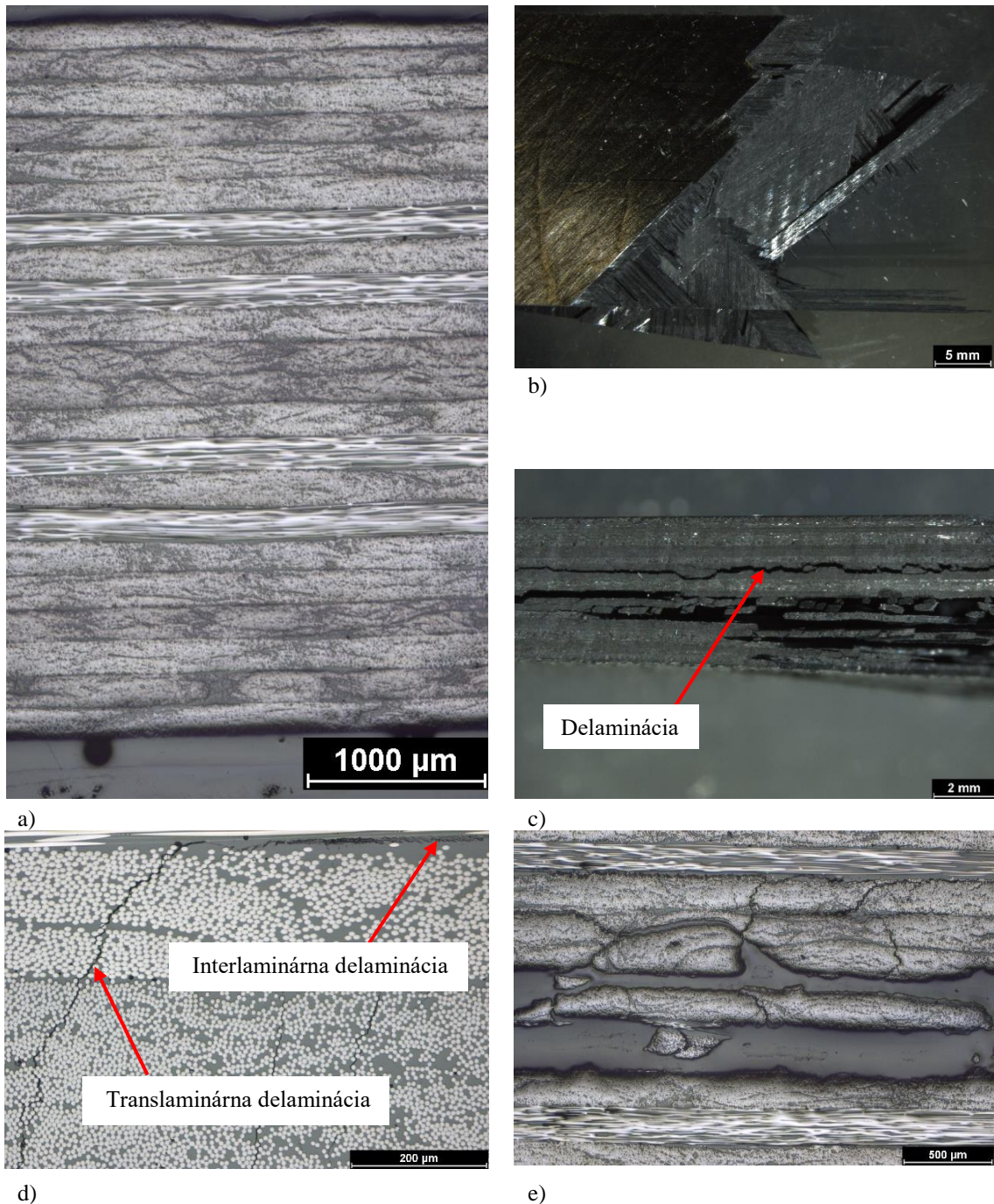


Obr. 18 - Snímky zo stereomikroskopu a svetelného mikroskopu – a) Rez a – viditeľná delaminácia príložiek b) Detail lomovej plochy (zväčšenie 0,5x0,75) c) Delaminácia v okolí lomu (zväčšenie 0,5x4) d) Rez c – delaminácia (zväčšenie 25x8) e) Rez c – delaminácia (zväčšenie 6,3x8)

Lom skúšobných telies prebiehal rozrušením matrice a následne roztrhnutím vlákien rovnobežných so zaťažujúcou silou. Pri vláknach kolmo k zaťaženiu došlo len

k rozdeleniu na rozhraní matrica – vlákno. Na (Obr. 18 – b) a c)) je možné pozorovať delamináciu menšieho rozsahu, ktorá vznikla v okolí každého lomu. Delamináciu v okolí rezu je možné pozorovať aj na (Obr. 18 – d) a e)). Pre zvýšenie kontrastu medzi výstužou a matricou bolo potrebné naleptať vzorky pre pozorovanie na svetelnom mikroskope. Ako leptadlo bol použitý 90% roztok kyseliny fluorovodíkovej.

Uhlíkový laminát 22Z:

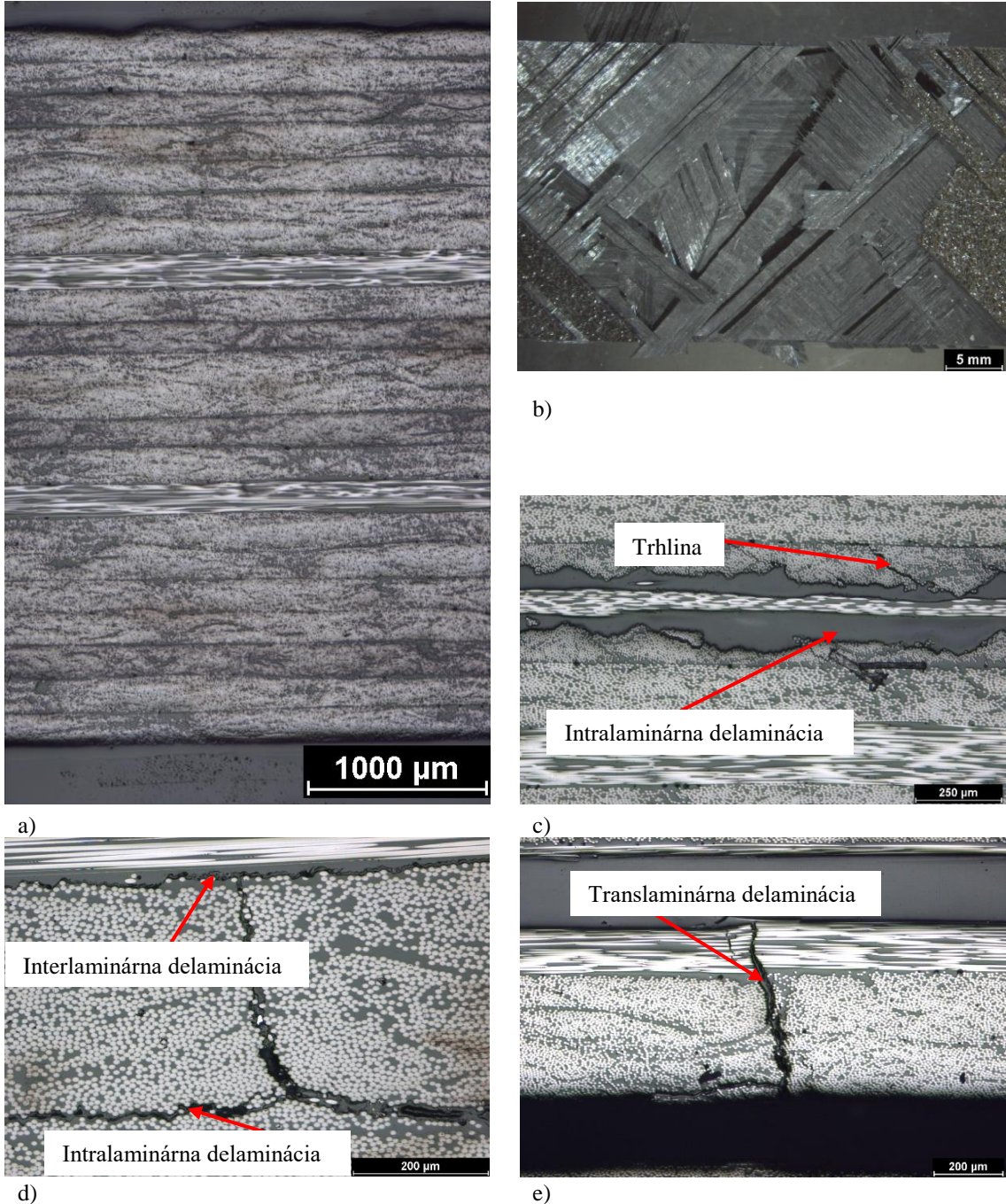


Obr. 19 - Snímky zo stereomikroskopu a svetelného mikroskopu – a) Rez a – snímka základného materiálu b) Detail lomovej plochy (zväčšenie 0,5x0,75) c) Delaminácia v okolí lomu (zväčšenie 0,5x2) d) Rez c – translaminárne trhliny vo vrstvách s orientáciou 0° a 45° (zväčšenie 12,5x8) e) Rez c – delaminácia a rozpad časti vrstvy (zväčšenie 3,2x8)

Rez základným materiálom uhlíkového laminátu so skladbou 22Z je zobrazený na (Obr. 19 – a)). Pri porušovaní uhlíkového laminátu sa prejavili vyššie hodnoty mechanických vlastností, vyšší počet a skladba vrstiev. Vplyvom veľkého rozdielu medzi mechanickými vlastnosťami matrice a vlákien vznikajú rozsiahle delaminácie. Na (Obr. 19 – c), e)) sú viditeľné delaminácie. Vznikajú predovšetkým v okolí vrstiev orientovaných pod uhlom $\pm 45^\circ$. Objavujú sa translaminárne delaminácie prechádzajúce do interlaminárnych, takéto porušenie je zobrazené na (Obr. 19 – d)). Najvyššia koncentrácia porušení sa nachádza v okolí lomu a takmer výhradne vo vrstvách orientovaných pod uhlom 0° a $\pm 45^\circ$. Na (Obr. 19 – e)) je zobrazená delaminácia s rozpadnutou vrstvou 0° a v okolí vrstvy 0° a 45° s početnými trhlinami. Na (Obr. 19 – b)) je vidieť, že vrstvy s orientáciou $\pm 45^\circ$ sú interlaminárne oddelené od susednej vrstvy a tvar lomu je podobný so vzorkou s orientáciou $\pm 45^\circ$. Mimo lomovej plochy boli trhliny a delaminácie takmer nepozorovateľné.

Uhlíkový laminát 22F

Rez základným materiálom uhlíkového laminátu 22F je zobrazený na (Obr. 20 – a)). V porovnaní so skúšobnými telesami s orientáciou 22Z má materiál s orientáciou 22F nižšiu pevnosť a modul pružnosti.



Obr. 20 - Snímky zo stereomikroskopu a svetelného mikroskopu – a) Rez a – snímka základného materiálu b) Detail lomovej plochy (zväčšenie 0,5x2) c) Delaminácia s prešmyknutou časťou vrstvy (zväčšenie 3,2x8) d) Rez c – e) Rez c – trhlina cez dve delaminované vrstvy

Delaminácie vznikajú väčšinou za účasti vrstvy $\pm 45^\circ$, vplyvom rozdielnych mechanických vlastností. Na (Obr. 20 – c)) je viditeľná delaminácia, pri ktorej pravdepodobne došlo vplyvom šmyku k pootočeniu a oddeleniu strednej časti vrstvy.

Ako ukazuje (Obr. 16 – d)) nie všetky telesá boli pretrhnuté úplne. Je to spôsobené väčším množstvom vrstiev s orientáciou $\pm 45^\circ$ v lamináte. Tieto vrstvy sa porušujú predovšetkým na rozhraní vlákno – matrica, pričom vrstvy obsahujúce vlákna rovnobežné so smerom zaťažovania sa vplyvom veľkého napätia rozpadnú.

V okolí delaminácií dochádzalo k výraznej tvorbe trhlín a zväčša mali translaminárny charakter. Trhliny sa tvorili vo vrstvách orientovaných 90° alebo $\pm 45^\circ$ vzhľadom k ploche rezu. Priamo na lomovej ploche, teda v reze c, dochádzalo k trhlinám aj vo vrstve 0° vzhľadom k ploche rezu, čo ukazuje (Obr. 20 – e)).

5.5 Porovnanie výsledkov - ťah

Výsledné hodnoty pre skúšobné telesá vystužené sklenými vláknami sú zobrazené v (Tab. 8). Hodnoty mechanických vlastností boli vypočítané podľa vzťahov daných normou ASTM D 3039/D 3039M.

Výpočet ťahového napätia:

$$\sigma_{pt} = \frac{P_{max}}{tw} \quad (1)$$

Výpočet pomerného predĺženia:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Výpočet modulu pružnosti:

$$E_{pt} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (3)$$

Výpočet priemernej hodnoty:

$$\bar{x} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)}{n} \quad (4)$$

Výpočet smerodajnej odchýlky

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}} \quad (5)$$

Skúšobné telesá s orientáciou $0^\circ/90^\circ$ zlyhali pri takmer 2,5-násobnom napätí v porovnaní s telesami s orientáciou $\pm 45^\circ$. Modul pružnosti sa tiež zvýšil. Dá sa teda konštatovať, že v prípade použitia orientácie vlákien $0^\circ/90^\circ$ dochádza k lepšiemu využitiu pevnosti vlákien a v smere vlákien je laminát tuhý, s predĺžením 3%. Avšak lom nastáva

okamžite, bez varovania. V prípade orientácie $\pm 45^\circ$ mal priebeh zaťažovania výraznú medzu klzu, po ktorej nasledovala plastická deformácia a lom.

Tab. 8 – Spracovanie výsledkov skúšky ťahom telies vystužených sklenými vláknami

Sklený laminát $\pm 45^\circ$			Sklený laminát $0^\circ/90^\circ$		
σ_{pt} [MPa]	E_{pt} [GPa]	ε [-]	σ_{pt} [MPa]	E_{pt} [GPa]	ε [-]
158 \pm 5	10,6 \pm 0,3	0,17 \pm 0,03	394 \pm 36	13,3 \pm 0,3	0,03 \pm 0,002

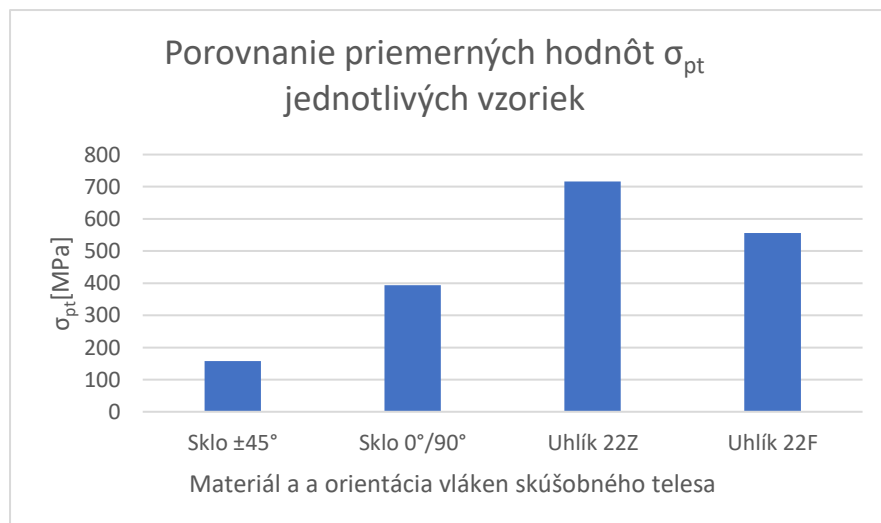
Výsledné hodnoty pre skúšobné telesá vystužené uhlíkovými vláknami sú zobrazené v (Tab. 9). Skúšobné telesá so skladbou vrstiev 22F, teda s vyšším obsahom vrstiev s orientáciou $+45^\circ/-45^\circ$ boli porušené pri nižšom napätí ako skúšobné telesá so skladbou vrstiev 22Z. Vplyvom zložitejších skladieb v porovnaní so skúšobnými telesami vystuženými sklenými vláknami nie sú rozdiely v mechanických vlastnostiach natoľko rozdielne. Priebeh zaťažovania bol podobne ako pri skúšobných telesách s orientáciou vlákien $0^\circ/90^\circ$ bez medze klzu.

Tab. 9 – Spracovanie výsledkov skúšky ťahom telies vystužených uhlíkovými vláknami

Uhlíkový laminát 22Z			Uhlíkový laminát 22F		
σ_{pt} [MPa]	E_{pt} [GPa]	ε [-]	σ_{pt} [MPa]	E_{pt} [GPa]	ε [-]
716 \pm 29	18,3 \pm 0,2	0,039 \pm 0,0013	556 \pm 10	15,2 \pm 0,2	0,037 \pm 0,001

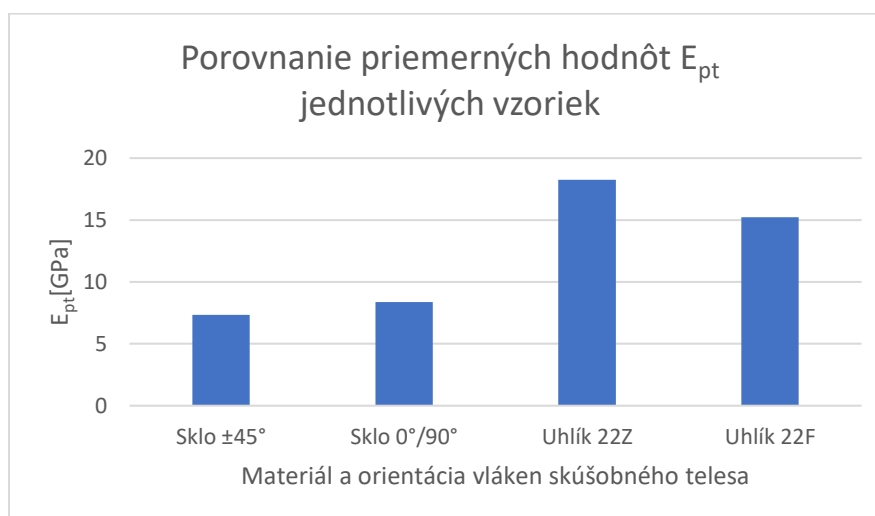
Priebehy zaťažovania jednotlivých skúšobných telies sú uvedené v prílohe.

Priame porovnanie medzi telesami vystuženými sklenými vláknami a telesami vystuženými uhlíkovými vláknami nie je možné, keďže skladba laminátov je odlišná. No potvrdili sa vyššie mechanické vlastnosti uhlíkových vlákien a vplyv vrstiev s orientáciou $\pm 45^\circ$ na zníženie pevnosti pri danom zaťažení. Porovnanie priemerných hodnôt napätí jednotlivito pre skúmané materiály pri ťahovej skúške je zobrazené na (Obr. 21).



Obr. 21 – Porovnanie priemerných hodnôt maximálnych napätí

Porovnanie modulov pružnosti jednotlivu pre skúmané materiály je zobrazené na (Obr. 22).



Obr. 22 – Porovnanie priemerných hodnôt modulov pružnosti

5.5.1 Ohyb

Na vykonanie ohybovej skúšky bolo použité zariadenie PLASTICS BENDING TESTER (2,5 kN). Po správnom nastavení rozpätia podpier a upnutí skúšobného telesa bolo zahájené meranie s rýchlosťou deformácie určenou podľa normy ASTM D 7264/D 7264M. Podmienky merania pre jednotlivé skúšobne telesá a výsledné hodnoty spolu s kódom porušenia sú uvedené v (Tab. 10).

Tab. 10 – Podmienky a výsledné hodnoty merania

Materiál	Orientácia	Č. sk. telesa	z [mm/min]	L[mm]	P_{max} [kN]	σ_b [MPa]	Kód porušenia ³
Sklo	$\pm 45^\circ$	1 - 5	1	80	-	-	-
		1	1	80	-	-	CAB
	$0^\circ/90^\circ$	2	1	80	250	289	CAB
		3	1	80	250	289	CAB
		4	1	80	250	289	CAB
		5	1	80	260	300	CAB
Uhlík	22F	1	1	82	-	-	CAV
		2	1	82	1700	3827	BAV
		3	1	82	1710	3850	CAV
		4	1	82	1760	3963	BAV
		5	1	82	1700	1827	CAB
	22Z	1 - 5	1	82	-	-	-

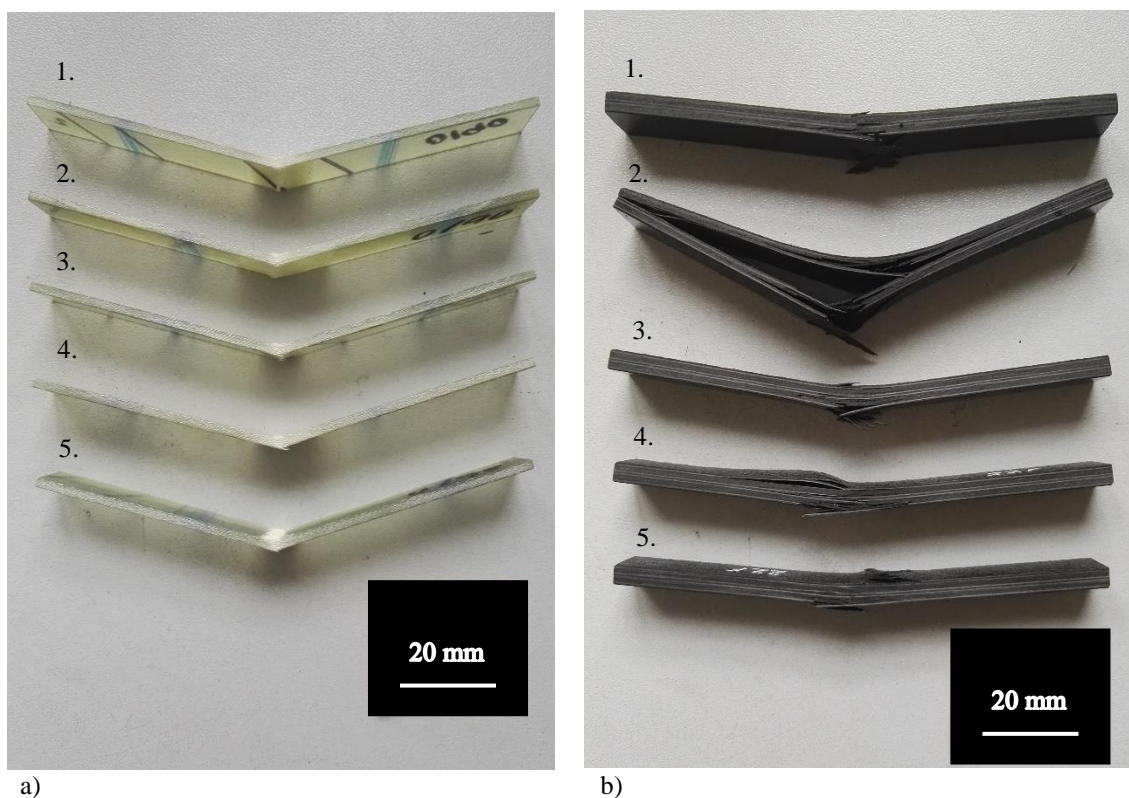
Norma vyžaduje zaznamenanie prvého porušenia prostredníctvom prvého znaku v kóde porušenia. Nakoľko však použité meracie zariadenie vykonalo skúšku do úplného

³ Tabuľka s významom jednotlivých znakov je uvedená v prílohe.

porušenia, nebolo možné túto časť kódu správne zaznamenať. Preto vzhľadom na to, že pevnosť v tlaku pri sklených i uhlíkových vláknach je nižšia ako pevnosť v ťahu, bude prvý znak reprezentovať tlakové porušenie.

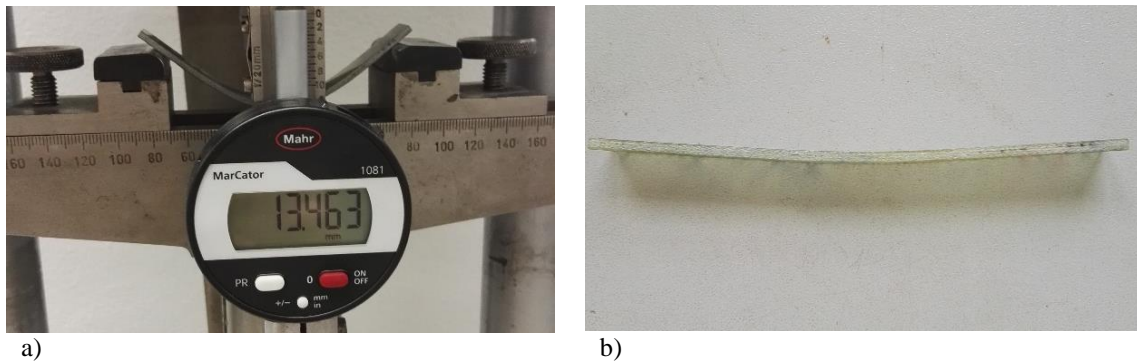
Prvé merania boli vykonávané na meracom stroji s malým rozsahom (0,5 kN), čo nebolo dostatočné a k porušeniu došlo len pri sklenom lamináte s orientáciou $0^\circ/90^\circ$. Po zvýšení maximálnej záťaže na 2,5 kN bola táto nameraná hodnota vyhodnotená ako neplatná. Pri maximálnom rozsahu 2,5 kN sa podarilo porušiť aj telesá z uhlíkového laminátu s orientáciou vlákien 22F. Skúšobné telesá s orientáciou $\pm 45^\circ$ sa vyznačovali veľkým priehybom a nebolo možné dosiahnuť porušenie. Hodnota priehybu sa dostala za rozsah skúšobného stroja a z toho dôvodu bolo meranie ukončené. V prípade orientácie 22Z zas boli skúšobné telesá príliš pevné, teda nebolo možné dosiahnuť porušenie.

Ostatné skúšobné telesá boli po porušení odfotené na stereomikroskope. Skúšobné telesá po vykonaní skúšky sú zobrazené na (Obr. 23).



Obr. 23 – Ohybové telesá po vykonaní skúšky – a) Telesá vystužené sklenými vláknami s orientáciou vlákien $0^\circ/90^\circ$ b) Telesá vystužené uhlíkovými vláknami s orientáciou 22F

Sklený laminát $\pm 45^\circ$:

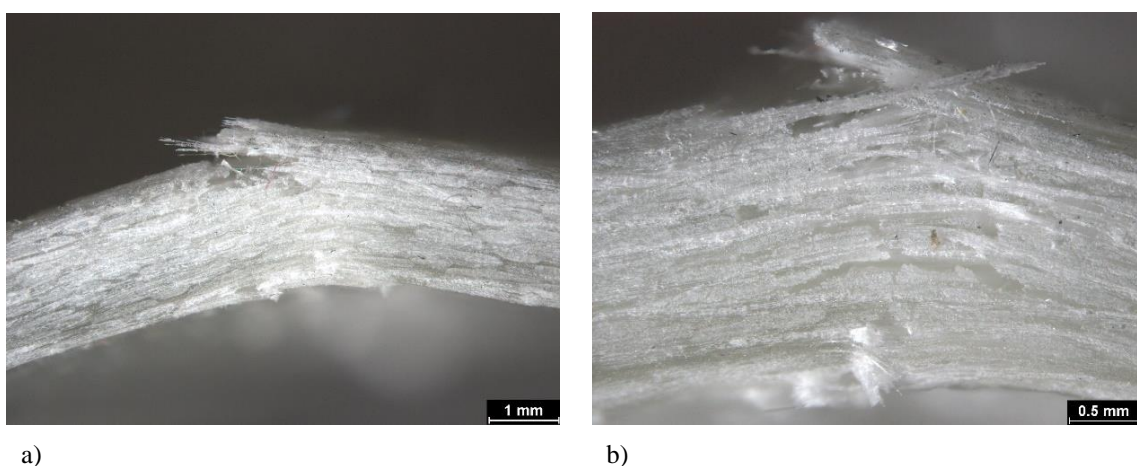


Obr. 24 - a) Maximálny priehyb pri skúške b) Plastická deformácia vzorky

Vplyvom orientácie vlákien $\pm 45^\circ$ sa pri zaťažovaní vzorky zväčšoval priehyb pri konštantnej sile až kým sa jeho hodnota nedostala za rozsah výchylkomeru, merajúceho priehyb. Po odľahčení zostala vzorka prehnutá, vid' (Obr. 24 – b)). Išlo pravdepodobne o plastickú deformáciu matrice. Telesá s touto orientáciou vlákien sú veľmi pružné. Maximálny merateľný priehyb vzorky je zobrazený na (Obr. 24 – a)).

Sklený laminát $0^\circ/90^\circ$:

Pri týchto skúšobných telesách došlo vplyvom orientácie vlákien rovnobežne s dĺžkou telesa k rýchlemu porušeniu. Akonáhle sa dosiahlo maximálneho napätia, nastalo porušenie bez viditeľných delaminácií v okolí lomu. Porušená vzorka je zobrazená na (Obr. 25 – a) a b)).



Obr. 25 - Snímky lomu - a) Zväčšenie 1x2 b) Zväčšenie 1x4

Uhlíkový laminát 22Z:

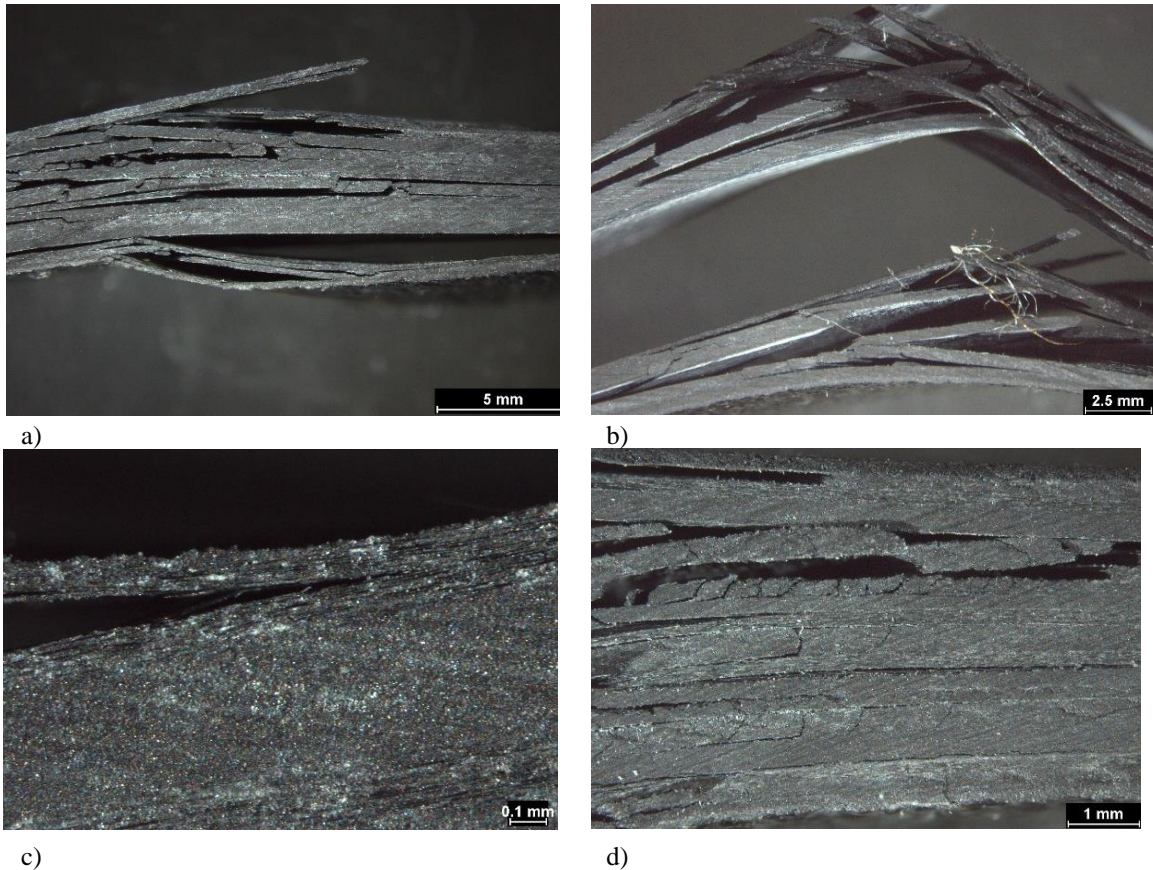
Vplyvom vysokého obsahu vrstiev orientácie 0° je skúšobné teleso tuhé a k ohybu dochádza minimálne. Skúšobné zariadenie nie je schopné vyvinúť dostatočne veľkú silu na prelomenie danej vzorky. Meranie bolo ukončené pri zobrazenej sile 2,1 kN, kedy sa už stroj dostával na svoj limit. Priehyb je vidieť na (Obr. 26).



Obr. 26 - Maximálny priehyb pri sile 2,1 kN

Uhlíkový laminát 22F:

Materiál s vyšším obsahom vlákien orientovaných pod uhlom $\pm 45^\circ$ zlyhal až po zvýšení maximálneho možného zaťaženia. Obsahuje väčší podiel vlákien orientovaných pod uhlom $\pm 45^\circ$, čo dovoľuje dosiahnuť väčší priehyb a vyššie napätie na vrstvy orientované pod uhlom 0° . Takto orientované vlákna sa ľahšie pretrhnú a môže dôjsť k porušeniu telesa. Na (Obr. 27) je možné vidieť rozsiahle delaminácie.



Obr. 27 – a) Zväčšenie 1x0,75 b) Zväčšenie 1x0,75 c) Zväčšenie 1x10 d) Zväčšenie 1x2

5.6 Porovnanie výsledkov – ohyb

Výsledné hodnoty pre skúšku ohybom sú zobrazené v (Tab. 11). Hodnoty mechanických vlastností boli vypočítané podľa vzťahov daných normou ASTM D 7264/D 7264M:

Výpočet ohybového napätia:

$$\sigma_b = \frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad (6)$$

Výpočet relatívneho predĺženia:

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (7)$$

Výpočet modulu pružnosti:

$$E_b = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (8)$$

Výpočet priemernej hodnoty:

$$\bar{x} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)}{n} \quad (9)$$

Výpočet smerodajnej odchýlky

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}} \quad (10)$$

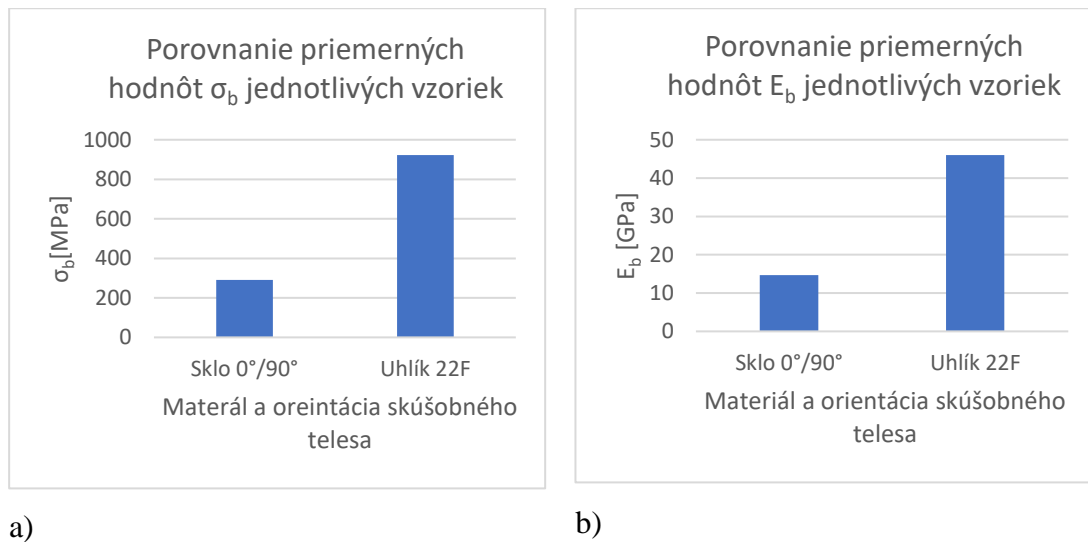
Merania, ktoré prebehli v celom rozsahu potvrdzujú vyššiu pevnosť uhlíkových vlákien. Skúšobné telesá vystužené sklenenými vláknami bolo možné porušiť pre ich vyššiu tuhosť v porovnaní so skúšobnými telesami s orientáciou vlákien $\pm 45^\circ$. V prípade uhlíkového laminátu skladby 22F boli dôvodom porušenia nižšie výsledné mechanické vlastnosti vplyvom vrstiev s vláknami orientovanými pod uhlom $\pm 45^\circ$. V prípade skladby 22Z skúška neprebehla v celom rozsahu z dôvodu vyšších hodnôt mechanických vlastností materiálu, respektíve nedostatočným rozsahom zaťažujúcej sily skúšobného stroja.

Tab. 11 – Spracovanie výsledkov skúšky ohybom

Sklený laminát 0°/90°			Uhlíkový laminát 22F		
σ_b [MPa]	E_b [GPa]	ε [-]	σ_b [MPa]	E_b [GPa]	ε [-]
291±6	14,7±3	0,024±0,002	923±50	46±1,3	0,023±0,003

Porovnanie priemerných hodnôt napätí a modulov pružnosti jednotlivých materiálov je zobrazené na (Obr. 28). V tomto prípade, kedy nevieme porovnávať rôzne orientácie výstuže rovnakého materiálu, je možné len konštatovať už známy rozdiel

mechanických vlastností skúmaných materiálov. No ako naznačovali merania orientácií $\pm 45^\circ$ a 22Z, rozdiel v mechanických vlastnostiach by bol podobný ako pri ťahovej skúške. Teda skúšobné telesá s orientáciou $\pm 45^\circ$ by mali najnižšie hodnoty mechanických vlastností a skúšobné telesá so skladbou 22Z najvyššie.



Obr. 28 – a) Porovnanie priemerných hodnôt σ_b b) Porovnanie priemerných hodnôt E_b

Priebehy zaťažovania jednotlivých telies sú uvedené v prílohe.

6 Diskusia

Cieľom bakalárskej práce bolo navrhnúť metodický prístup k riešeniu problematiky vplyvu orientácie vlákien na poškodzovanie vláknových kompozitov, vykonanie takéhoto experimentu a následné vyhodnotenie a spracovanie dát.

V prvej časti bakalárskej práce boli prostredníctvom rešerše popísané základné princípy a rozdiely kompozitných materiálov oproti konvenčným materiálom.

Druhá časť je venovaná samotnému experimentu, vyhodnoteniu získaných dát a zhodnoteniu zisteného poškodzovania.

Telesá vystužené sklenými vláknami s orientáciou $0^\circ/90^\circ$ sa pri ťahovej skúške ukázali ako veľmi tuhé. Vzhľadom na orientáciu vlákien bolo predĺženie telesa nízke (3%) a vysoké využitie pevnosti vlákien súhlasí s hodnotami mechanických vlastností uvedených v dostupnej literatúre [1] ($\sigma_{pt} = 394 \text{ MPa}$ a $E_{pt} = 13,3 \text{ GPa}$). Pri odobratých vzorkách neboli pozorované trhliny v materiáli mimo okraja lomovej plochy. Tvorba delaminácií prevažuje v strednej časti priečneho rezu telesami. Prevažujú intralaminárne delaminácie. Miesto porušenia nebolo možné pri tejto orientácii vlákien vopred určiť a navyše bolo vo všetkých prípadoch pozorované viacnásobné porušenie.

Materiál s orientáciou vlákien $\pm 45^\circ$ vykazuje výraznú plastickú deformáciu a nižšiu pevnosť v ťahu ($\sigma_{pt} = 158 \text{ MPa}$ a $E_{pt} = 10,6 \text{ GPa}$). Predĺženie telies bolo 17%. Žiadne vlákna nie sú orientované rovnobežne so zaťažujúcou silou, preto nastáva plastická deformácia matrice a až následne dochádza k pretrhnutiu telesa. Delaminácie sa v tomto materiáli neobjavujú. Umiestnenie porušenia bolo pri každom telese rozdielne.

Pri porovnaní skladiel uhlíkových laminátov boli zaznamenané výraznejšie rozdiely len v mechanických vlastnostiach. Charakter porušovania nebol natoľko rozdielny ako pri telesách vystužených sklenými vláknami.

Pri skladbe 22Z boli zistené hodnoty ($\sigma_{pt} = 716 \text{ MPa}$ a $E_{pt} = 18,3 \text{ GPa}$). Lom nastal náhle, bez medze klzu. Pravdepodobne vplyvom nižšieho podielu vlákien orientovaných pod uhlom $\pm 45^\circ$ má tento materiál najvyššie hodnoty mechanických vlastností zo všetkých skúmaných materiálov. Tvorba delaminácií prebieha najmä v okolí lomovej plochy a v reze C sú pozorované len nepatrné trhliny.

Telesá so skladbou 22F boli porušené pri nižších hodnotách mechanických vlastností ako pri skladbe 22Z ($\sigma_{pt} = 556 \text{ MPa}$ a $E_{pt} = 15,2 \text{ GPa}$). Tento rozdiel je spôsobený pravdepodobne vyšším obsahom vlákien orientovaných pod uhlom $\pm 45^\circ$. Tvorba

delaminácií prebiehala výraznejšie ako pri skladbe 22Z. Delaminácie a trhliny sa okrem lomovej plochy objavili aj v reze C.

Skúška ohybom potvrdila skutočnosti zistené pri ťahovej skúške. Telesá vystužené sklenenými vláknami orientácie $\pm 45^\circ$ porušené neboli, keďže vplyvom rozkladu napätia medzi vlákna a matricu dochádzalo k veľkým priehybom už pri nízkom zaťažení. Po odľahčení z maximálneho priehybu zostalo teleso plasticky deformované, no bez akýchkoľvek viditeľných defektov v matrici.

Skúšobné telesá s orientáciou sklenených vlákien $0^\circ/90^\circ$ boli porušené vzhľadom na vyššiu tuhosť pri menšom priehybe a vyššom napätí ($\sigma_b = 291 \text{ MPa}$ a $E_b = 14,7 \text{ GPa}$). Prvé porušenie skúšobných telies nebolo možné pozorovať. Keďže pevnosť sklenených vlákien v ťahu je vyššia ako pevnosť v tlaku, predpokladalo sa, že prvé porušenie vzniklo na vrchnej strane skúšobného telesa, kde je namáhané v tlaku [1].

Skúšobné telesá vystužené uhlíkovými vláknami so skladbou 22Z (nižší podiel vrstiev uložených s orientáciou $\pm 45^\circ$) pri skúške ohybom porušené neboli, keďže merací prístroj neposkytoval dostatočne vysokú hodnotu maximálnej záťaže pre porušenie.

Skúšobné telesá so skladbou vrstiev 22F vplyvom väčšieho podielu vrstiev s orientáciou vlákien $\pm 45^\circ$ porušenie už bolo možné dosiahnuť ($\sigma_b = 923 \text{ MPa}$ a $E_b = 40 \text{ GPa}$). V tomto prípade boli po porušení telesa viditeľné delaminácie na celej dĺžke skúšobného telesa (Obr. 27).

Z oboch skúšok mechanických vlastností vyplýva, že sklenené lamináty a ich rozdielne orientácie majú zásadný vplyv na ich porušovanie. Samotná orientácia vlákien $\pm 45^\circ$ spôsobuje výrazné plastické deformácie, no žiadne viditeľné delaminácie a trhliny. Pri orientácii vlákien $0^\circ/90^\circ$ vidieť vznik malých delaminovaných oblastí (Obr. 18 – b)). V prípade uhlíkových laminátov tieto vlastnosti nie sú tak odlišné. Dostupné skladby - 22F a 22Z - sa nelíšia natoľko, ako je to v prípade testovaných sklolaminátov. Porušovanie sa ukázalo ako veľmi podobné, relatívne predĺženie je prakticky rovnaké a pevnosť je o 25% vyššia v prospech skladby 22Z. Avšak z pozorovaní vyplýva, že vrstvy orientované pod uhlom $0^\circ/90^\circ$ spolu so zvyšujúcim sa obsahom vrstiev orientovaných pod uhlom $\pm 45^\circ$ majú vplyv na tvorbu rozsiahlejších delaminácií a teda na zníženie hodnôt mechanických vlastností. Z povahy skúšok mechanických vlastností a nameraných hodnôt sa javí výhodnejšie použitie orientácie $0^\circ/90^\circ$ v prípade sklolaminátov a skladby 22Z v prípade uhlíkových laminátov.

7 Záver

V závislosti na dostupných skúšobných telesách bol navrhnutý metodický prístup k získaniu požadovaných informácií k téme vplyvu orientácie vlákien na porušovanie vláknových kompozitov.

Podľa noriem ASTM D 3039/D 3039M a ASTM D 7264/D 7264M boli vykonané experimenty a vyhodnotené základné mechanické vlastnosti.

Bolo zistené, že vyšší podiel vrstiev s vláknami orientovanými pod uhlom $\pm 45^\circ$ má vplyv na zníženie pevnosti pri všetkých testovaných materiáloch a skúškach a zväčšenie predĺženia pri sklenených laminátoch.

Plastické zmeny matrice v celom objeme skúšobného telesa boli najvyššie pri ťahovej skúške skleneného laminátu s orientáciou $\pm 45^\circ$.

Vznik delaminácií pri ťahovej skúške bol pozorovaný na rozhraní vrstiev orientovaných pod uhlom $\pm 45^\circ$ a vznik trhlín bol pozorovaný vo vyššej miere vo vrstvách s orientáciou $0^\circ/90^\circ$.

Pri ohybovej skúške nebolo možné vykonať meranie do porušenia pri orientácii $\pm 45^\circ$ vplyvom veľkého priehybu skúšobných telies a pri skladbe 22Z vplyvom vysokej pevnosti materiálu.

Prvé porušenie telies s orientáciou $0^\circ/90^\circ$ pri ohybovej skúške bolo spôsobené pravdepodobne tlakovou zložkou namáhania na hornej strane telesa. Telesá so skladbou 22F sa výrazne delaminovali po celej hrúbke. K úplnému rozdeleniu skúšobných telies pri ohybe nedošlo na žiadnom telese.

8 Zoznam použitej literatúry

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] CHAWLA, Krishan. *Composite materials: science and engineering*. 2nd ed. New York: Springer, 1998. Materials research and engineering (Unnumbered). ISBN 03-879-8409-7.
- [3] *Konštrukčné materiály - 11. prednáška: Kompozity I* [online]. Žilina, 2010 [cit. 2017-10-14]. Dostupné z: http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/10/K-11.pred_.pdf
- [4] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [5] Vlastnosti Mosadz. *MatNet* [online]. Bratislava: Ústav materiálov a mechaniky strojov SAV, 2006 [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/data/files/738.pdf>
- [6] BENEŠ, Libor. Slitiny horčíku. In: *Materiály pro letadlovou techniku* [online]. Praha, b.r. [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/Slitiny_Mg.pdf
- [7] SAMPE Europe highlights: Composites face challenges in next commercial airframes. In: *CompositesWorld* [online]. Cincinnati: Gardner Business Media, 2014 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/blog/post/sampe-europe-highlights-composites-face-challenges-in-next-commercial-airframes>
- [8] *Vláknové kompozitní materiály, jejich vlastnosti a výroba* [online]. Praha, 2007 [cit. 2017-10-18]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/seminar/2_seminar/1_materialy_technologie.pdf
- [9] Kompozity. *Kompozity* [online]. 2016 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <http://kompozity.webnode.cz/>
- [10] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost II*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2375-3.

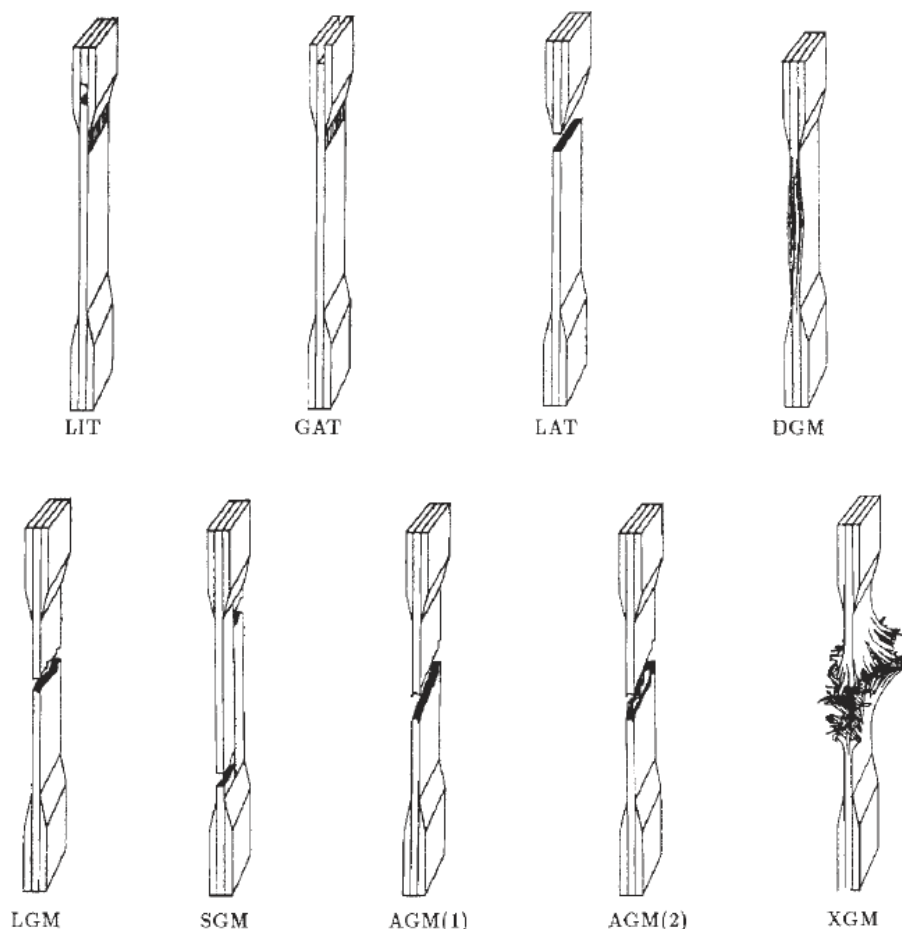
- [11] *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing: Processing, structure, and properties of carbon fibers* [online]. 2016, **2016**(91) [cit. 2017-10-22].
- [12] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymer* [online]. Svitavy: Code Creator, 2015 [cit. 2017-11-20]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [13] *Polymer*. In: *Publi* [online]. b.r. [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [14] PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. *Biomaterials*. 2007, **28**, 4845-4869.
- [15] *Customized High-Performance Polyketones* [online]. Bruxelles: Solvay, b.r. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.solvayultrapolymers.com/en/products/avaspire-paek/index.html>
- [16] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.
- [17] 6. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY. In: *Ústav materiálového inženýrství* [online]. Praha: ČVUT, 2014 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [18] VRBKA, Jan. Mechanika kompozitů. In: *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Brno, 2008 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [19] *Novel test method for accurate characterization of intralaminar fracture toughness in CFRP laminates*. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2014, (65), 89-98 [cit. 2017-12-17]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813005969>
- [20] *Novel biomaterials in regenerative medicine. Ausgabe 1. Jindřichův Hradec*: Jan Medek, Epika, 2016, s. 199-212. ISBN 978-80-88113-69-0.
- [21] *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2000.
- [22] *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2007.

9 Zoznam použitých symbolov

22F	skladba	[45,-45,0,45,45,-45,-45,90,45,0,-45]S
22Z	skladba	[45,0,-45,0,45,-45,90,45,90,-45,0]S
b	[mm]	šírka ohybového telesa
CVD		Chemical Vapour Deposition
E	[GPa]	modul pružnosti
E _b	[GPa]	modul pružnosti v ohybe
E _{pt}	[GPa]	modul pružnosti v ťahu
L	[mm]	rozpätie podpier
l	[mm]	celková dĺžka ťahového telesa
l ₀	[mm]	dĺžka ťahového telesa medzi príložkami
Δl	[mm]	predĺženie
PAEK		polyaryl(éter)ketón
PEEK		polyéter(éter)ketón
h	[mm]	hrúbka ťahového/ohybového telesa
P _{max}	[kN]	sila pri medzi pevnosti
t _s	[°C]	teplota spracovania
t _g	[°C]	teplota skleneného prechodu
w	[mm]	šírka ťahového telesa
z	[mm.min ⁻¹]	rýchlosť zaťažovania
Δε	[-]	rozdiel v pomernom predĺžení medzi dvoma bodmi na krivke priebehu zaťažovania
Δσ	[MPa]	rozdiel v napätí medzi dvoma bodmi na krivke priebehu zaťažovania
δ	[mm]	priehyb v strede telesa pod zaťažujúcim valčekom
ε	[-]	pomerné predĺženie
ε _{fP}	[-]	pomerné predĺženie výstuže
ε _{mP}	[-]	pomerné predĺženie matrice
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
σ	[MPa]	napätie
σ _b	[MPa]	pevnosť v ohybe
σ _{pt}	[MPa]	pevnosť v ťahu

10 Prílohy

Kódy porušenia skúšobných telies - ťahová skúška [21]

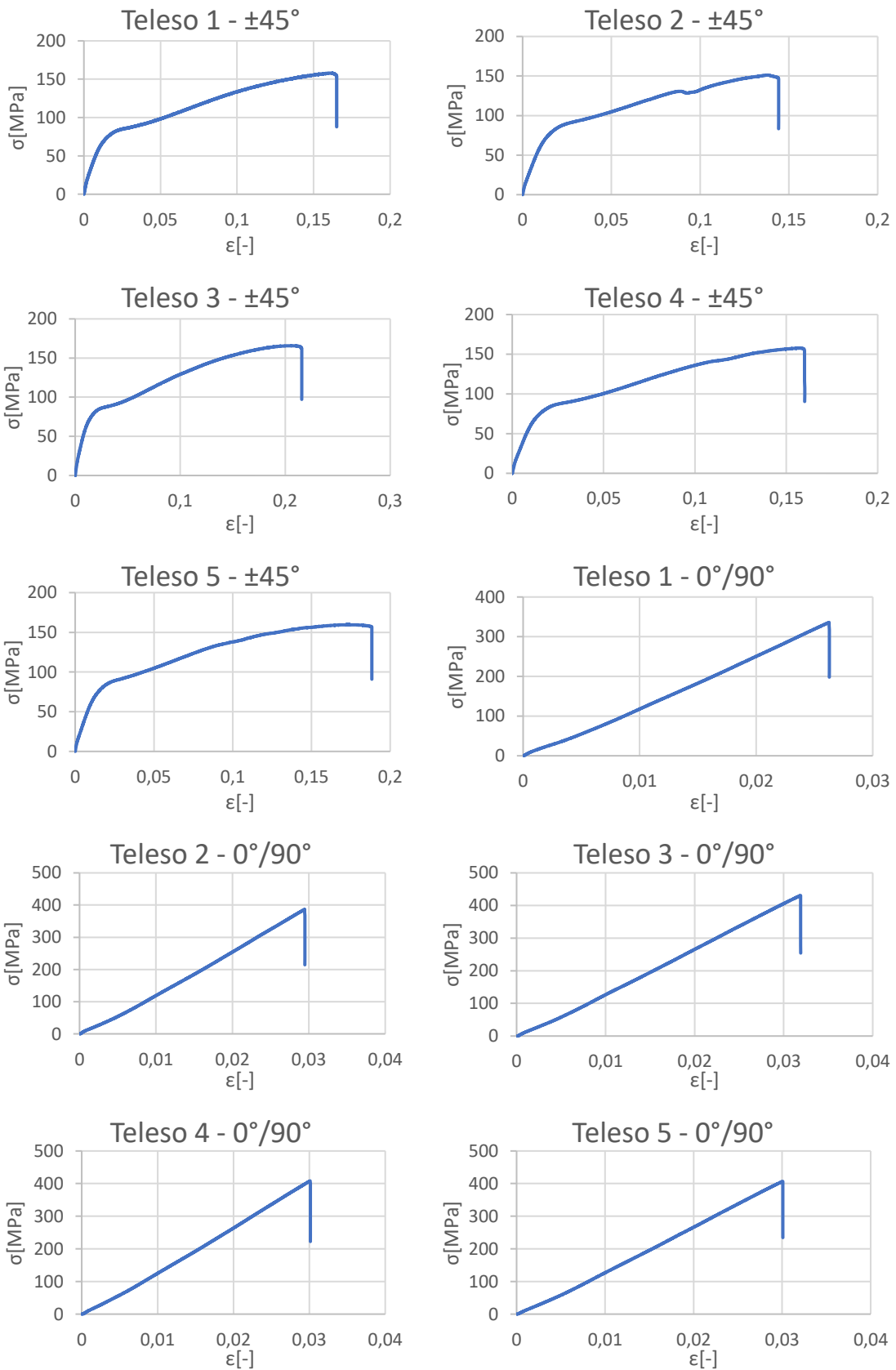


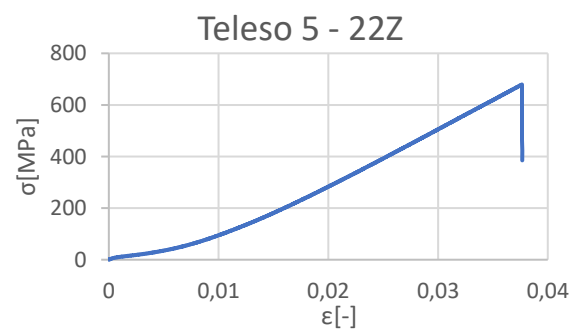
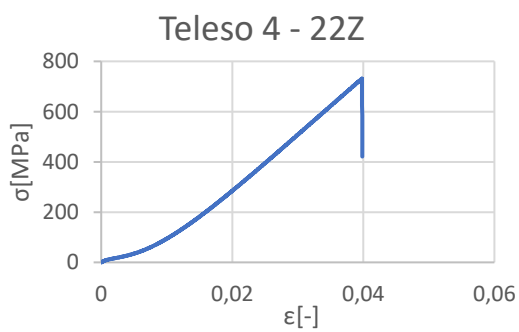
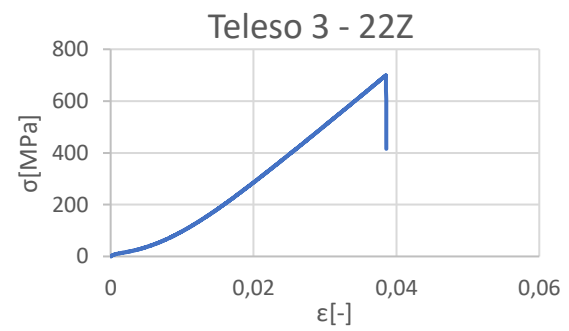
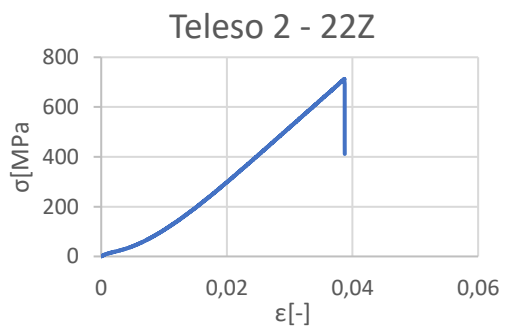
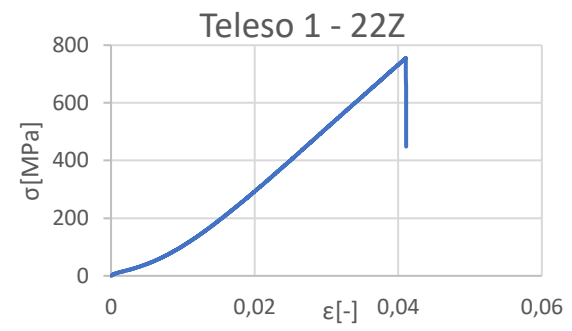
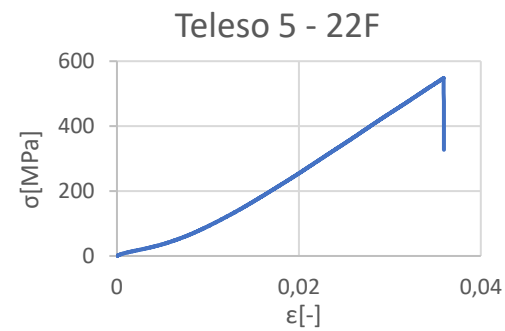
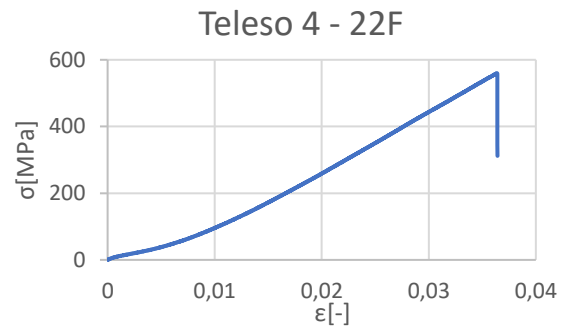
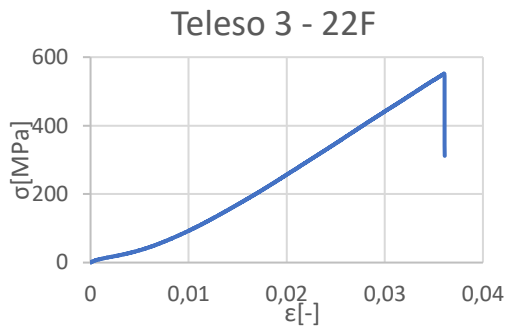
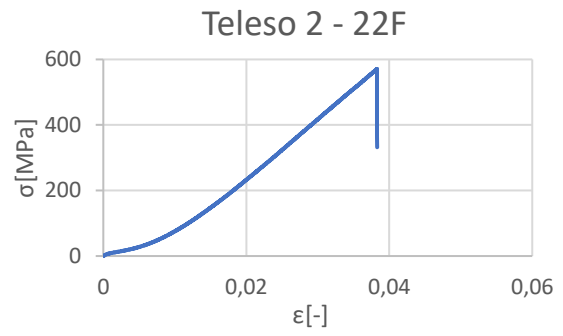
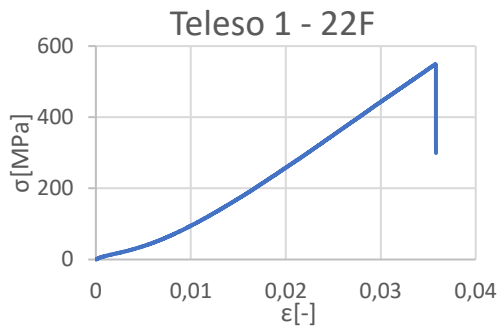
Prvý znak		Druhý znak		Tretí znak	
Typ poruchy	Kód	Oblasť poruchy	Kód	Umiestnenie poruchy	Kód
Pod uhlom	A	Vútri príložky	I	Dolná časť	B
Delam. na okraji	D	Na okraji príložky	A	Horná časť	T
Zlyhanie príložky	G	<1w od príložky	W	Vľavo	L
Kolmo na záťaž	L	V skúš. oblasti	G	Vpravo	R
Viacnásobný	M(x,y,z)	Viacere oblasti	M	Uprostred	M
Pozdĺžne rozdelenie	S	Rôzne	V	Rôzne	V
Explozívny	X	Neznáme	U	Neznáme	U
Iný	O				

Kódy porušenia skúšobných telies - ohybová skúška [22]

Prvý znak		Druhý znak		Tretí znak	
Typ poruchy	Kód	Oblasť poruchy	Kód	Umiestnenie poruchy	Kód
Ťah	T	Na zaťažujúcom valčeku	A	Horná časť	T
Tlak	C	Medzi zaťažujúcimi valčkami	B	Dolná časť	B
Vydutie	B	Na podperách	S	Vľavo	L
Interlaminárny šmyk	S	Medzi podperou a zaťažujúcim valčekom	L	Vpravo	R
Viacnásobný	M(x,y,z)	Neznáma	U	Uprostred	M
Iný	O			Rôzne	V
				Neznáme	U

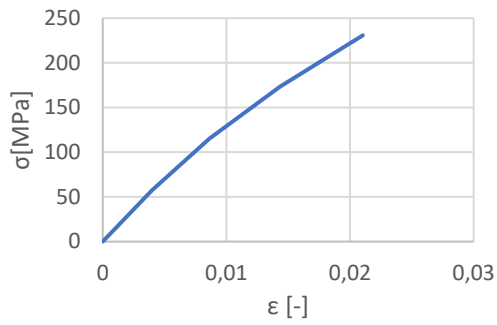
Grafické spracovanie priebehu ťahovej skúšky



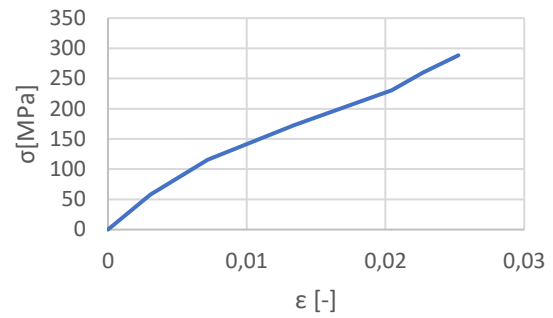


Grafické spracovanie priebehu ohybovej skúšky

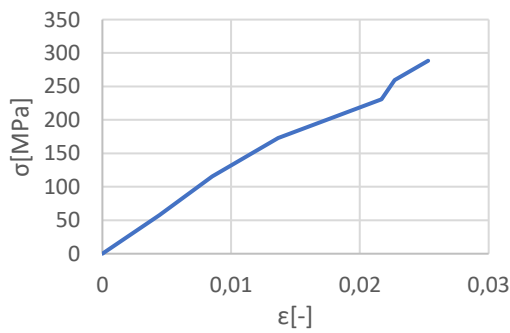
Teleso 2 - 0°/90°



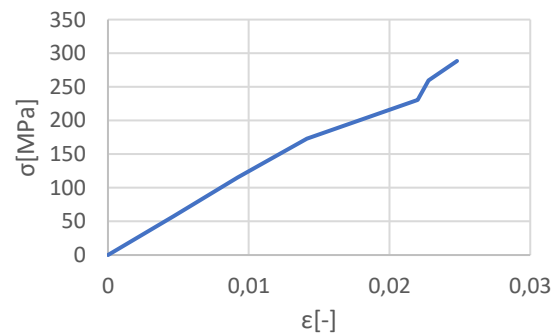
Teleso 3 - 0°/90°



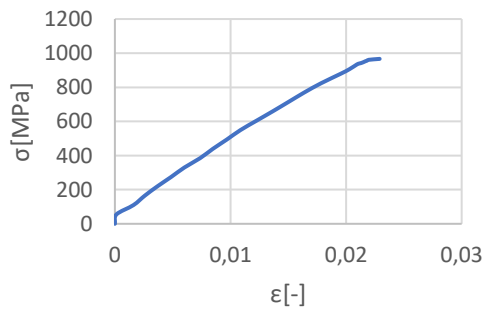
Teleso 4 - 0°/90°



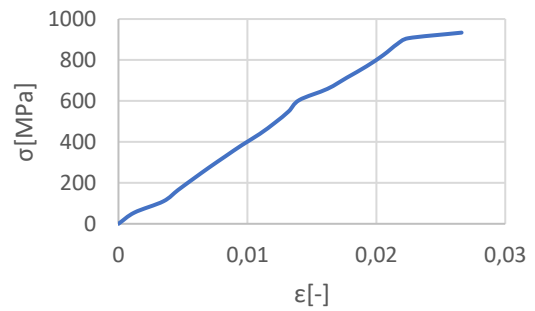
Teleso 5 - 0°/90°



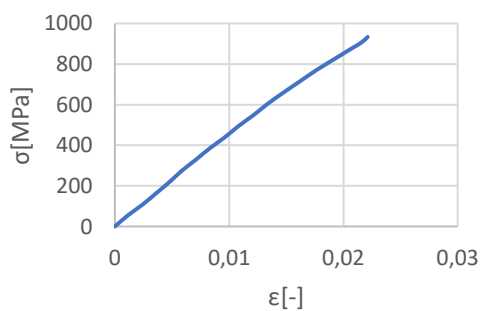
Teleso 2 - 22F



Teleso 3 - 22F



Teleso 4 - 22F



Teleso 5 - 22F

