

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv matrice na porušování vláknových kompozitů
Influence of matrix on damage of fiber composites

AUTOR: Dan Teuchner
STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.

PRAHA 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Teuchner** Jméno: **Dan** Osobní číslo: **457281**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv matrice na porušování vláknových kompozitů

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of matrix on damage of fiber composites

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je posouzení vlivu matrice na pevnostní charakteristiky dlouhoválnových kompozitů.

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] Gottfried W. Ehrenstein. Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia, 2006.
- [3] Bohumil Meissner, Václav Zilvar. Fyzika polymerů. Struktura a vlastnosti polymerních materiálů. Praha: SNTL, 1988.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


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

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

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Elena Čizmarová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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.

18.4.2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne:

Podpis:

Abstrakt

Hlavním tématem této bakalářské práce je zkoumání vlivu matrice na porušování vláknových kompozitních materiálů. Teoretická část práce se zabývá základním popisem a rozdělením kompozitních materiálů a jejich mechanismem porušování. Experimentální část se skládá z vykonání mechanických zkoušek na zkušebních tělesech s polymerní matricí a následné vyhodnocení mechanických vlastností. Ve finální části se práce věnuje zkoumání a vyhodnocení mikrostruktury pomocí mikroskopických analýz.

Klíčové slova

Kompozitní materiály, uhlíková vlákna, mechanismy porušování kompozitů, reaktoplasty, epoxidová pryskyřice, polyesterová pryskyřice, zkouška tahem, zkouška ohybem

Abstract

The main theme of this bachelor thesis is the investigation of matrix effects on damage of fiber composite materials. The theoretical part deals with the basic description and the division of the composite materials and their damage mechanism. Experimental part is focused on mechanical tests for specimens with a polymer matrix and then to evaluate the mechanical properties. The final part is about the examination of the microstructure.

Keywords

Composite materials, carbon fibers, composite damaging mechanisms, reactive plastics, epoxy resin, polyester resin, tensile test, bending test

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád vyjádřil poděkování mé vedoucí bakalářské práce Ing. Eleně Čižmarové, Ph.D., za cenné připomínky, rady a doporučení při vypracování této práce.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	8
Úvod.....	10
Teoretická část	11
1. Kompozitní materiály	11
1.1. Rozdělení kompozitů	11
1.2 Porovnání s jinými materiály	12
1.3 Aplikace kompozitních materiálů	13
2. Matrice	13
2.1 Kompozity s kovovou maticí (MMC)	14
2.2 Kompozity s polymerní maticí (PMC)	14
2.3 Kompozity s keramickou maticí (CeMC).....	16
2.4 Kompozity s uhlíkovou maticí (CaMC)	16
3. Výztuž	16
3.1 Skleněná vlákna	17
3.2 Uhlíková vlákna	17
3.3 Aramidová vlákna	18
3.4 Přírodní vlákna	18
4. Technologie výroby kompozitních materiálů	19
5. Způsoby zatěžování kompozitních materiálů	21
5.1 Tah.....	21
5.2 Tlak	22
5.3 Ohyb.....	22
5.4 Smyk	22
6. Porušování kompozitních materiálů	23
6.1 Základní typy porušení.....	23
Experimentální část.....	25
7. Použitý materiál	25
8. Výroba vzorků	25
9. Zkouška tahem.....	28
9.1 Výpočty a výsledky zkoušky tahem.....	28
10. Zkouška ohybem	33
10.1 Výpočty a výsledky zkoušky ohybem.....	33
11. Mikroskopická analýza	37
12. Diskuze.....	41
13. Závěr	43
Literatura a zdroje	44

Seznam obrázků	46
Seznam grafů	47
Seznam tabulek	48
Přílohy	49

Seznam zkratek a symbolů

10F		Orientace vláken 0/0/0/90/90/90/0/0/0/90
10G		Orientace vláken 90/90/90/90/90/0/0/0/0/0
b	[mm]	šířka zkušebních těles
CaMC		Carbon Matrix Composite
CeMC		Ceramic Matrix Composite
Creep		tečení
E	[GPa]	modul pružnosti
E_f	[GPa]	modul pružnosti v ohybu
E_p	[GPa]	modul pružnosti v tahu
h	[mm]	tloušťka zkušebních těles
l	[mm]	celková délka tahového tělesa
L₀	[mm]	délka tahového tělesa mezi příložkami
l_v	[mm]	vzdálenost podpěr
MMC		Metal Matrix Composite
Mo		Molibden
n		označení tělesa
Nb		Niob
PAN		Pyrolýza polyakrylonitrilových vláken
P_{max}	[kN]	síla na mezi pevnosti
PMC		Polymer Matrix Composite
RTM		Reakční vstřikování
Ta		Tantal
VARTM		Vakuo-injektační technologie
W		Wolfram
z	[mm.min ⁻¹]	rychlost zatěžování
δ	[mm]	průhyb ve středě tělesa pod zatěžujícím válečkem
Δl	[mm]	prodloužení
Δε	[-]	rozdíl v poměrném prodloužení mezi dvěma body na křivce průběhu zatěžování
Δσ	[MPa]	rozdíl v napětí mezi dvěma body na křivce průběhu zatěžování

ε	[-]	poměrné prodloužení
ρ	[$kg \cdot m^{-3}$]	hustota
σ	[MPa]	napětí
σ_b	[MPa]	pevnost v ohybu
σ_{pt}	[MPa]	pevnost v tahu

Úvod

Řešení problematiky volby nevhodnějšího materiálu sahá do doby, kdy lidstvo začínalo experimentovat a vyrábět předměty, zbraně nebo své domovy. Volba materiálu závisela především na mechanických vlastnostech potřebných k danému úkonu. K získání lepšího materiálu nevedla výroba, nýbrž pouhé pátrání mezi materiály, které již v daném období existovaly. Moderní svět techniky a neustálé zdokonalování technologických procesů umožňuje výrobu nových materiálů díky zkušeným expertům, jejichž základem je znalost primárních mechanismů působících v pevných materiálech. [1, 2]

Kompozity se označují materiály, které jsou složeny ze dvou a více složek, které se výrazně liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Náhrada tradiční oceli kompozitním materiálem vede k velkému snížení hmotnosti. Důvodem je nízká hmotnost vlastního kompozitu, specifické vlastnosti jednotlivých složek a schopnost udělat kompozitní materiál přímo pro daný účel. Kombinace materiálu umožňuje naplánovat kompozitní strukturu, která přináší mnoho výhod oproti běžným materiálům, např. výborné elektrické vlastnosti a odolnost proti chemikáliím. [1, 2]

Bakalářská práce se v teoretické části zabývá popisem základních prvků kompozitního materiálu, jejich rozdělením, specifickými vlastnostmi v porovnání s tradičními materiály, principy výrobních technologií a definicemi hlavních typů porušování.

Cílem bakalářské práce je vykonání mechanických zkoušek, určení a vyhodnocení mechanických vlastností, vykonání fraktografické analýzy na zkušebních vzorcích, rozpoznání porušení a analýza vlivu matrice na poškozování kompozitního materiálu, stanovení vlivu skladby vláken materiálu vůči mechanickému namáhání, zhodnocení vlastností dostupných zkušebních materiálů.

Teoretická část

1. Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází). Spojením těchto složek vznikne zcela nový materiál s unikátními vlastnostmi, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou samostatně, ani prostou sumací. Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. [1, 3]

Abychom vícefázový materiál mohli zařadit mezi kompozity, musí splňovat následující podmínky:

- podíl výztuže musí být větší než 5 %,
- vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice,
- kompozit musí být připraven mísením složek. [1, 3]

Tuhost a pevnost kompozitního materiálu závisí především na vyztužujících vlastnostech. Materiál vláken, jejich délka, tloušťka a orientace v součásti výrazně ovlivňují výsledné vlastnosti kompozitů. Jelikož vlákna a matrice mají výrazně odlišné mechanické vlastnosti, dochází na rozhraní mezi fázemi k lokálním složitým stavům napjatosti. [1, 3]

1.1. Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály je možné rozdělit podle více kritérií. Základní rozdělení jsou: podle materiálu matrice, podle materiálu výztuže a podle geometrie výztuže.

Podle materiálu matrice:

- kompozity s kovovou maticí,
- kompozity s polymerní maticí,
- kompozity s keramickou maticí,
- kompozity s uhlíkovou maticí,
- kompozity se skleněnou a sklokeramickou maticí.

Podle materiálu výztuže:

- kompozity s kovovou výztuží,
- kompozity s skleněnou výztuží,
- kompozity s keramickou výztuží,
- kompozity s polymerní výztuží,
- kompozity s uhlíkovou výztuží,
- whiskery.

Podle geometrie výztuže:

- vláknové kompozity (s krátkými a dlouhými vlákny),
- částicové kompozity. [3]



Obr. 1 Dělení kompozitních materiálů podle tvaru a uspořádání výztuže [4].

1.2 Porovnání kompozitů s jinými materiály

V tab. 1 můžeme vidět porovnání základních mechanických vlastností kompozitů s jinými materiály. [5]

Tab. 1 Porovnání základních mechanických vlastností kompozitů s dalšími materiály [5, 6]

	ρ [kg/m ³]	σ [MPa]	E [GPa]
Kompozity	1600-2000	200-4000	10-400
Ocel	7800	do 1500	210
Hliník	2700	do 600	71

Výhoda kompozitních materiálů oproti ostatním materiálům je jejich častější využití v extrémních podmínkách. Hlavními důvody jsou chemická stálost a odolnost vůči korozi. Snížená náročnost na montáž díky menšímu počtu součástí na jeden díl je také kladnou vlastností. [5]

Nevýhody těchto „novodobých“ materiálů jdou nedostatečné znalosti při poškozování. Cena těchto součástí či konstrukcí je velmi vysoká a toto nepředvídatelné chování může značně navýšit náklady na vývoj. I proto se stávají některé případné opravy

neuskutečnitelné. Nákladný je i proces zaškolování pracovníků k zajištění požadované kvality. [5, 6]

1.3 Aplikace kompozitních materiálů

Jednoznačně největší výhodou je snížení hmotnosti dílu, konstrukcí a konečných výrobků. Vyšší cena, než u obvyklých materiálů, je typickou charakteristikou. Z ekonomického hlediska je pro konstruktéra zásadní otázka, jestli je výhodné nahrazení tradičního materiálu kompozitním materiálem. O největší pokrok při využití kompozitních materiálů se zasloužil letecký a kosmický průmysl. Nemůžeme opomenout odvětví jako: automobilový, lodní, stavební průmysl. Čím dál větší popularitu ve spojení s kompozitními materiály vykazuje také sportovní odvětví. [1]

Letectví

Významným hlediskem při vývoji leteckých konstrukcí je dosažení co nejnižší hmotnosti a výrobní pracnosti při současném zvyšování jejich spolehlivosti. Využitím anizotropie epoxidových pryskyřic vyztužených uhlíkovými vlákny, a tím výhodného poměru mezi jejich hmotností a mechanickými vlastnostmi, je možno uspořit přibližně 20 % hmotnosti při zlepšené funkčnosti. Výrobní náklady srovnatelných kovových konstrukcí zůstávají ovšem zatím stále nižší. [1]

Automobilový průmysl

Vláknové kompozity se v automobilovém průmyslu používají především na součásti karoserie a podvozku. U vnějších částí karoserie, jako například u kapoty či vnější části dveří, se klade důraz na vyšší tuhost a odolnost vůči rázům kompozitu, jelikož jsou tyto části namáhány například odletujícími kamínky od vozovky. Pokud dojde k porušení integrity kompozitové součásti, je tato vada neopravitelná. [1]

2. Matrice

Úlohou matrice je vzájemně spojovat vyztuzující fázi a přenášet do ní zatížení. Matrice také chrání výztuž před vlivy okolí, udržuje výztuž v požadovaném směru vůči namáhání, přenáší vnější napětí na výztuž, odděluje vzájemně jednotlivé částice výztuže od sebe a zabraňuje tak spojitému šíření trhliny, a chrání výztuž před účinky vnějšího prostředí. [3, 7]

Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách výztuže a její poměrné prodloužení při přetržení by mělo být větší než mezní prodloužení výztuže. Požadavek splňují pouze kovové a polymerní matrice. Keramické, skelné, sklokeramické a uhlíkové matrice mají mezní prodloužení při lomu menší než vlákna. [3, 7]

2.1 Kompozity s kovovou maticí (MMC)

Oproti kovům disponují kompozity s kovovou maticí vyšší pevností a tuhostí. Při vysokých teplotách mají MMC, v porovnání s kovy, výhodnější vlastnosti jako: nižší teplotní roztažnost, vyšší ořezuvzdornost. Nevýhodou je podstatně vyšší cena než u kompozitů s polymerní maticí. Nejčastěji je tento typ materiálu využíván v leteckém průmyslu. [1, 3, 7]

2.2 Kompozity s polymerní maticí (PMC)

Velká měrná pevnost a měrný modul pružnosti patří mezi hlavní přednosti PMC. Další výhody: dielektrické vlastnosti a elektrická nevodivost (pouze kompozity se skleněnými, křemennými nebo polymerními vlákny), dobrá propustnost pro rentgenové záření (kompozity s uhlíkovými vlákny). Polymerní matrice mají hlavní výhodu v tom, že disponují nízkou hustotou, a proto je jednou z hlavních oblastí jejich využití konstrukce letadel a automobilový průmysl. [1, 2, 5]

Kompozitní materiály s polymerní maticí můžeme rozdělit podle druhu použitého polymerního materiálu na kompozity s termoplastickou maticí (polyamidy, polypropylén, polyetylén) a kompozity s reaktoplastickou maticí (fenolické živice, epoxidové živice, polyesterové živice). [1, 2]

Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou tavitelné a tvarovatelné jen určitou dobu po zahřátí. Další zahřívání vede k chemické změně, při které se původní molekuly zesítují a od tohoto okamžiku se stávají netavitelnými a nerozpustnými. Chemická reakce, která způsobuje vznik zesíťované struktury, se nazývá vytvrzování. Vytvrzený materiál není možné znovu tvarovat, svařovat ani převést do taveniny, je to nevratný proces. Reaktoplast je amorfním polymerem. Výrobky z reaktoplastů se vyznačují vlastnostmi jako: vysokou chemickou a tepelnou odolností, tvrdostí a tuhostí. Mechanické vlastnosti laminačních reaktoplastových pryskyřic jsou v tab. 2. [8, 9]

Tab. 2 Orientační mechanické vlastnosti reaktoplastových pryskyřic [25]

Matrice	Epoxidová pryskyřice	Polyesterová pryskyřice
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,0 - 1,15	1,19 - 1,23
Pevnost v tahu [MPa]	55 - 80	45 - 80
Modul pružnosti v tahu [GPa]	3,0 – 3-6	3,8 – 4,2

a) epoxidová pryskyřice

Vyznačuje se výbornými chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Především se jedná o dobrou chemickou odolnost, dobrou tepelnou odolnost a odolnost vůči vlhkosti. Kladnou vlastností je rychlé a snadné vytvrzení při jakékoli teplotě v rozmezí od 5 °C do 150 °C v závislosti na výběru urychlovače tuhnutí. Nejčastěji se využívají jako matrice kompozitů, v elektronice se používají jako izolanty. [8, 10]

b) polyesterová pryskyřice

Má dobrou chemickou odolnost a krátkou dobu vytvrzování. Disponují výbornými elektrickými vlastnostmi a taktéž odolností proti ultrafialovému záření. Její lepší cenová dostupnost je taktéž výhodou. Velké smrštění při vytvrzování je nevýhoda nemodifikovaných polyesterových pryskyřic (7 až 8 %). Nejčastější využití polyesterové pryskyřice najdeme v Lod'arském průmyslu. [8, 10]

Termoplasty

Hlavním rozdílem oproti reaktoplastům je, že termoplasty je možné po zahřátí znova tvarovat. Termoplastické materiály jsou za normálních teplot tuhé látky a až po zahřátí převážně nad 200 °C se stávají tekutými. [1].

Dalším rozdílem je, že termoplasty mají vyšší viskozitu než reaktoplasty, ale je možné ji kontrolovat úpravou teploty při výrobě. Recyklace termoplastů je jejich velkou výhodou. Pro životní prostředí jsou mnohem příznivější. Za působení vysokých teplot, UV záření nebo absorpcí tekutiny může nastat jejich degradace. Absorpce tekutiny v prostředí způsobuje vyvěřeliny, což znamená, že termoplasty jsou náchylnější na vlivy okolního prostředí jako reaktoplasty. Nejčastěji používanými termoplasty v maticích kompozitů jsou polypropylen a polyamid. [1]

2.3 Kompozity s keramickou maticí (CeMC)

Matrice keramických kompozitů může být ze skla, sklokeramiky a konstrukční keramiky. Matrice jsou křehké, silně vrubově citlivé a mají malé poměrné prodloužení při přetržení (většinou menší než vlákna). Tuhá a křehká matrice ($E = 400 \text{ GPa}$) špatně přenáší zatížení do vláken. Kovová vlákna (W, Ta, Nb nebo Mo) zvětšují lomovou energii kompozitů s keramickou maticí. Maximální objemový podíl vláken je 50 %, při větším obsahu vláken je matrice pórovitá. U těchto matic se využívá jejich tepelné a chemické odolnosti. Keramická matrice je vyztužená krátkými vlákny nebo monokrystaly z karbidu křemíku nebo nitridu bóru. [2, 4]

2.4 Kompozity s uhlíkovou maticí (CaMC)

Matrici tvoří uhlík v různém stavu strukturní uspořádanosti. Sekundární vyztužující fázi jsou uhlíková vlákna. [2, 4]

3. Výztuž

Kompozit může být vyztužen buď vlákny, nebo částicemi. Vlákna mají své délkové rozměry několikanásobně vyšší než částice. Z toho plyne, že vlákna jsou především užívána tam, kde je potřeba přenést nějaké mechanické zatížení. Částice mohou mít tvar koule, krychle, kvádru, popřípadě jiného polygonu. Také se v jisté míře podílejí na přenášení zatížení, nikoliv však v takovém měřítku, jako vlákna. Částice najdou využití tam, kde je potřeba například upravit elektrickou, či tepelnou vodivost, zvýšit odolnost proti opotřebení, snížit, či zvýšit koeficient tření apod. [6, 11]

Pevnost vláken roste se zmenšujícím se průřezem, protože přirozené defekty struktury jsou u vláken malých průměrů minimální. Pevnost vlákna závisí také na jeho délce. Části vzniklé porušením vlákna při tahovém namáhání mají větší pevnost než vlákno původní, protože k prvnímu lomu došlo z největšího defektu vlákna. Většina vyráběných vláken má kruhový průřez o průměru od 5 do 20 μm . Z technologických důvodů se nepoužívají menší průměry vláken, jelikož se při výrobě obtížně prosycují maticemi. [11]

Vláken vyráběných pro kompozity je hned několik, ku příkladu skleněná, uhlíková, polymerní, keramická, ale také například kovová. Využit se také můžou i přírodní materiály jako například bavlna, celuloza. [11] V tab. 3 jsou uvedeny vlastnosti vybraných vláken.

Tab. 3 Vlastnosti vybraných druhů vláken [2]

Vlákno	Uhlíkové	Skleněné	Ocelové
Průměr [μm]	7-10	12-20	13
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,6	2,5	7,87
Pevnost v tahu [GPa]	2,5 – 3,5	3,5	4,2
Modul pružnosti [GPa]	250-300	70-85	210
Teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]	3650	700	1400

3.1 Skleněná vlákna

Skleněným vláknům se snižuje pevnost, pokud jsou vystaveny zvyšující se vlhkosti. Mají nízkou odolnost vůči otěru. Mezi dobré vlastnosti patří nízká elektrická vodivost, jsou levná a dobře zpracovatelná. Skleněná vlákna jsou amorfní, protože roztavená směs oxidů má velmi malou krystalizační rychlost. Tato vlákna se vyrábí tažením z taveniny připravené v pecích. Vlákno je následně ochlazováno a opatřeno ochrannou vrstvou, která brání vlákno před oxidací a rovněž zvyšuje adhezi a smáčivost organickými matricemi. Skelné vlákno se používá ve dvou základních modifikacích, a to typu S, které se vyznačuje vysokou pevností a je určena pro dynamicky namáhané kompozity. Pak jsou vlákna typu E, které jsou zase vysoce tuhé. [1, 7, 11, 12]

3.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna mají vysokou pevnost, malou objemovou hmotnost, vysokou chemickou odolnost, ale například i neměnnost vlastností až do teplot $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (pro srovnání většina ostatních vláken své vlastnosti ztrácí již při $800\text{ }^{\circ}\text{C}$). V porovnání s jinými vlákny mají výrazně menší modul pružnosti v kolmém směru k ose vlákna a také mají menší tažnost než například vlákna skelná. [1,2]

Uhlíková vlákna jsou velmi drahá, ale nabízejí nejlepší mechanické vlastnosti v porovnání s ostatními vlákny používanými jako kompozitní výztuž. Z hlediska mechanických vlastností bývají často uhlíková vlákna rozdělována do čtyř základních kategorií:

- vlákna s vysokou pevností,
- vlákna se středním modulem,
- vlákna s vysokým modulem,
- vlákna s ultravysokým modulem. [13]

Vlastnosti základních typů uhlíkových vláken jsou znázorněny v tab. 4.

Tab. 4 Vlastnosti základních typů uhlíkových vláken [13]

Charakteristika	Vlákna s vysokou pevností	Vlákna se středním modulem	Vlákna s vysokým modulem	Vlákna s ultravysokým modulem
Hustota [g/cm ³]	1,8	1,8	1,9	2,0
Youngův modul [GPa]	230	290	370	600
Mez pevnosti v tahu [GPa]	3,5	5,5	2,2	3,4
Poměrné prodloužení, tah [%]	1,5	1,9	0,7	0,8

3.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou známa pod obchodním názvem Kevlar. Tento typ materiálu je možné rozdělit na několik druhů lišících se chemickou strukturou a mechanickými vlastnostmi. Nejznámějšími představiteli aramidových vláken jsou Kevlar 29 resp. Kevlar 49 pro letecké aplikace. Mezi další typy se řadí například Kevlar 119, který vykazuje vysokou tažnost a odolnost proti únavě. Dále například Kevlar 29, který má dobré tlumivé schopnosti nezávisle na použité matici nebo orientaci vláken, což se využije především k balistickým účelům na konstrukci neprůstřelných helem, či vest. [2, 11, 12]

3.4 Přírodní vlákna

Pro vyztužování plastů jsou ze všech přírodních vláken vhodná pouze vlákna rostlinná, která mají jako základ celulózu. Mezi ně patří len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna. Jejich výhodou je odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách. Pozoruhodné jsou i pevnosti v tahu. Vzhledem k nízké měrné hmotnosti jsou tato přírodní rostlinná vlákna zajímavou surovinou pro lehké konstrukce. [1]

Jako přednosti lze uvést nízkou hustotu, malou abrazivitu při mechanickém opracování a výhodnou likvidaci spalováním. Za nevýhody se považuje citlivost na působení vlhkosti a nákladná předběžná úprava pro zlepšení vazby s maticí. [1]

4. Technologie výroby kompozitních materiálů

Existuje široké spektrum výroby kompozitních materiálů. Nejrozšířenější metody jsou:

a) ruční kladení

Výztuž i pryskyřice se nanáší ručně. Je to jedna z nejstarších výrobních metod na výrobu kompozitních materiálů. Snadná a ekonomicky nenáročná výroba, kde člověk neomezuje tvar ani velikost. Výrobní postup začíná povrchovou úpravou formy separačním činidlem, nanesením pryskyřice a následně výztuže. Poté další vrstva pryskyřice, která je válečkem vtlačena do výztuže a přitom vytlačeny vzduchové bubliny a nakonec vytvrzování. [2]

b) metoda vakuového prosvycování

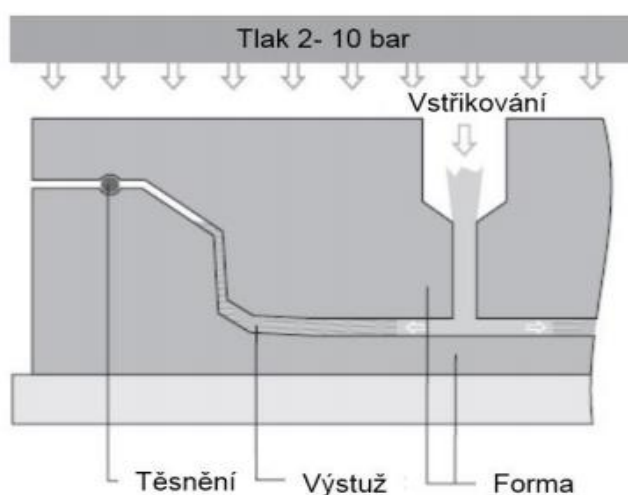
Metoda vakuového prosvycování je vylepšenou metodou ručního kladení. Na povrch je ve finální fázi vytvrzení položen tenký film, jehož úkolem je nepropouštět vzduch. Forma je chráněna a díky filmu dojde k vytlačení přebytečných bublin. Největší výhodou je zhotovení výrobku bez bublin. Jakost závisí na zkušenostech pracovníků. Používá se především při výrobních, kde se klade obrovský důraz na kvalitu, např. letectví nebo speciální závodní součásti. [2]

c) vytvrzování v autoklávu

Proces spočívá ve vytvrzování v uzavřeném přípravku za působení tepla a tlaku. Mezi výhody patří skutečnost, že lze při jednom kroku vytvrdit více výrobků. Mezi negativa se řadí složitost procesu, ekonomická náročnost, rozměry výrobku jsou omezeny rozměry autoklávu, vysoká pořizovací cena forem a nadměrné množství odpadu. Vytvrzování v autoklávu je typické pro letecký průmysl. [5]

d) reakční vstřikování (RTM)

RTM se využívá na kompozitech s pryskyřičnou maticí o různém uspořádání směrů vláken. V první fázi této metody se vyrobí vláknový předlisek. V druhé fázi se vstříkne pryskyřice do předlisku, který je umístěný ve formě. Tato technologie se používá jak v kusové, tak i v sériové výrobě. Touto výrobní metodou se vyrábí například: křídla letadel, kostry karoserií, ochranné přilby, lodní šrouby. [10] Znázornění této technologie můžeme vidět na obr. 2.



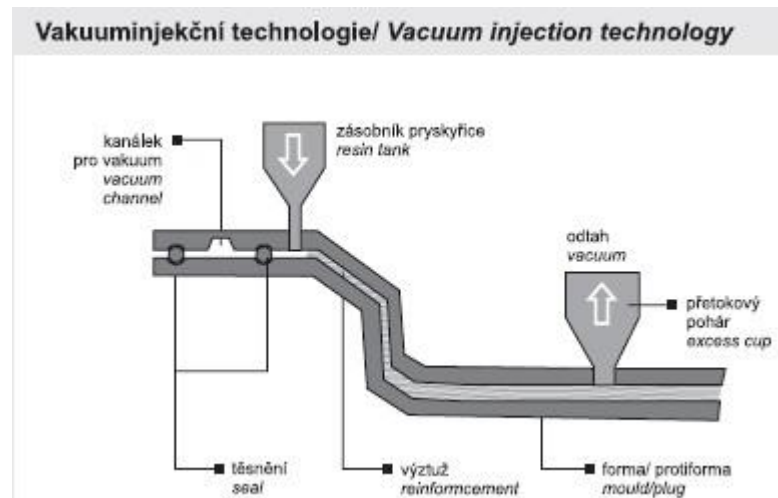
Obr. 2 Schématické znázornění vysokotlakého RTM [10]

e) vakuo-injekční technologie (VARTM)

Tato technologie je vylepšená forma metody RTM, kdy prosycení výstuže pomáhá vakuum. Základem je forma, která je předpřipravena výstuží a následně pryskyřice zatéká do jedno/dvoudílné formy. Tlak směřuje tok pryskyřice do formy. Při tomto procesu se užívá nízký tlak (0,4-1 bar), což umožňuje konstruovat formy méně robustní a to vede k výrobě větších dílů. Existují dva rozdílné typy konstrukce této technologie. První typ je založen na principu vstřikování do středu formy, kde vakuum je aplikováno po obvodu formy. V druhém případě funguje přívod pojiva pomocí obvodového kanálku a vakuum je situováno ve středu formy. [5, 14]

Největší výhodou této metody je vysoká kvalita finálního výrobku. Další výhodou je schopnost výroby velkoplošných výrobků a dosažení vysoké pevnosti. Tyto zřejmé

přednosti mírní fakt, že tato metoda je velmi složitá a ekonomicky náročná. [5, 14]
Schéma této technologie je zobrazené na obr. 3.



Obr. 3 Schéma technologie VARTM [10]

5. Způsoby zatěžování kompozitních materiálů

Všechny kompozitní materiály musí odolávat čtyřem základním druhům namáhání: tah, tlak, střih a ohyb. Tyto druhy zatěžování musí konstruktéři respektovat při navrhnutí technologického plánu. Součástí vývoje je testování materiálů na zkušebních zařízeních. Při hodnocení kompozitního materiálu vykazuje každý druh namáhání své typické atributy. [15]

5.1 Tah

Hlavní roli při tahovém namáhání kompozitu hraje tuhost a síla vyztužujících vláken. [15]



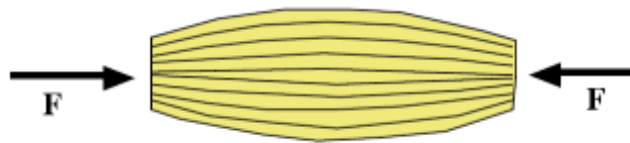
Obr. 4 Materiál namáhaný tahovým napětím [15]

Tahová síla se vyznačuje tím, že největší vliv má orientace vláken vrstev. Rovnoběžně orientovaná vlákna se směrem zatížení přenášejí větší podíl zatížení než vlákna, která jsou orientovaná pod úhlem 45° nebo 90° k zatížení. Pokud jsou používány vzorky orientací vláken 0°, síla vláken představuje sílu celého kompozitu, zatímco pokud testujeme vzorky s orientací vláken 90°, výsledek testování je ovlivněn silou matrice, silou na rozhraní vlákno-matrice, stejně jako vnitřním napětím a póry. [1,16]

Při zkoušce tahem u kompozitu s vlákny orientovanými 0° vzorek vždy vykazuje křehký lom. Křehký lom vykazuje hladkou strukturu anebo jehlicovitou strukturu, které závisí na makroskopickém vzhledu. Lom je dále závislý na kvalitě spojení vlákna a matrice a houževnatosti matrice. Svou roli hraje také lokální koncentrace napětí způsobena interakcí vláknovými a matricovými heterogenitami [1,16]

5.2 Tlak

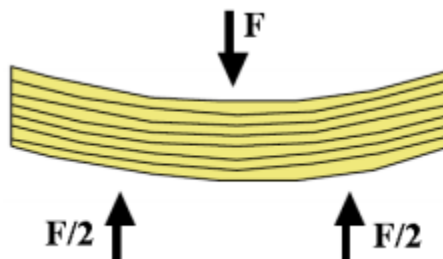
Při vykonávání tlakové síly jsou nejpodstatnější adhezivní a vyztužující vlastnosti pryskyřice. Pryskyřice zajišťuje soudržnost vláken a brání porušení. Reakce materiálu na tlakové namáhání je zobrazena na obr. 5. [10]



Obr. 5 Materiál namáhaný tlakovou silou [10]

5.3 Ohyb

Tento proces je tvořen tahovým, tlakovým a smykovým namáháním dohromady. Na obr. 6 je znázorněno zatížení kompozitu, kde horní část je namáhána tlakem, přičemž spodní část namáhána tahem. V centrální části působí smykové napětí. [10]



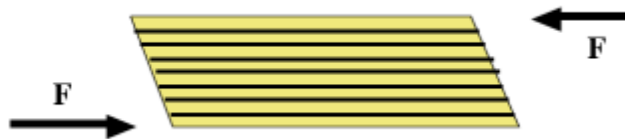
Obr. 6 Materiál namáhaný ohybovým napětím [10]

Lom při ohybu probíhá podobně jako při tahu, většinou ale při zkouškách nedochází k úplnému rozdělení vzorku. Matrice se poruší a vlákna nebrání v dalším ohýbání. Toto komplexní zatížení nám poskytuje údaje o kvalitě vyrobeného materiálu. Díky rozmanitosti se výsledky těžko interpretují do praxe.[1,16]

5.4 Smyk

Smykové namáhání je založeno na principu vzájemného klouzání sousedních vrstev. Pokud je kompozit využíván k tomu, aby efektivně odolával smykovému napětí,

musí daná pryskyřice vykazovat dobré mechanické vlastnosti a navíc vysokou adhezi k vyztužujícím vláknům. Těleso namáhané smykovou silou je zobrazené na obr. 7. [15]



Obr. 7 Materiál namáhaný smykovým napětím [10]

6. Porušování kompozitních materiálů

V poslední době se stává proces poškození u vláknového polymerního kompozitu častým cílem výzkumu. Sledování samotného průběhu poškození může rozhodujícím způsobem měnit mechanismus zavedení a přenosu sil, a tím i podmínky pro náhlý kolaps. Je tudíž potřeba sledovat chování materiálu během provozu a při procesu poškození. Největší problém při určování iniciace poškození je kombinace materiálových složek, které spolu navzájem tvoří rozhraní.

Systém porušení kompozitních materiálů má značně jiný průběh než u materiálů kovových. Oproti tradičním materiálům vlákna kompozitního materiálu plní funkci snížení rychlosti šíření lomu. Příčiny vzniku poškození souvisí s faktory jako: orientace vláken, vytvrzení matrice, rozložení plniva a také podíl výztuže. [1, 17, 18]

6.1 Základní typy porušení

Porušení vláknového kompozitu můžeme nejdříve rozdělit dle toho, pokud se jedná o porušení vláken nebo matrice. Na základě toho se definují vláknové porušení a mezivláknové porušení. Podle polohy poškození ve vrstvách laminátu lze vymezit tři základní mechanismy porušení: translaminární, intralaminární a mezilaminární (interlaminární, delaminace). [3, 19, 20] Tyto mechanismy a jejich projevy jsou popsány v tab.5.

Tab. 5 Mechanismy porušení vláknového kompozitu [1,19]

	Základní mechanismy lomu	Specifické projevy
Vláknový	translaminární	Přetržení vlákna, vytažení vlákna, zborcení vlákna ve vzpěru, lom vlákna v ohybu
Mezivláknový	intralaminární	Tvárný nebo štěpný lom matrice, porušení rozhraní vlákna a matrice, oddělení vláken svazku
	interlaminární	

Vláknový translaminární mechanismus

Tento mechanismus vykazuje porušení vláken vrstvy. Nejčastějšími jevy spojenými s tímto mechanismem jsou: přetrhnutí vlákna, zborcení vlákna ve vzpěru, rozštěpení vlákna podél jeho osy, nebo lom vlákna při ohybu. Způsob zatěžování ovlivňuje porušení. Obvykle je tento proces spjatý s mezivláknovým lomem. [18, 21]

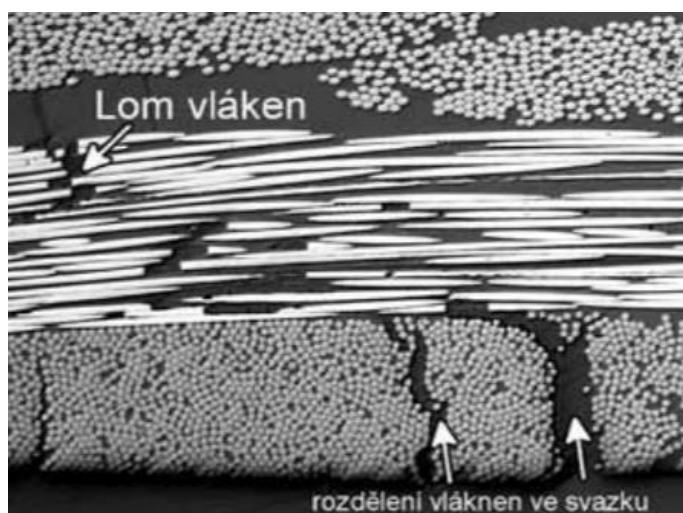
Mezivláknový intralaminární mechanismus

Intralaminární mezivláknové porušení se liší tím, že poškozena je jen matrice nebo rozhraní mezi vláknem a matricí. Musíme brát v potaz, že při sledování tohoto mechanismu nemusí být poruchy vidět, jelikož dochází k oddělení vláken ve svazku a laminátová vrstva se jeví neporušená. Nejčastější bývají trhliny kolmé ke směru zatížení. [18, 21]

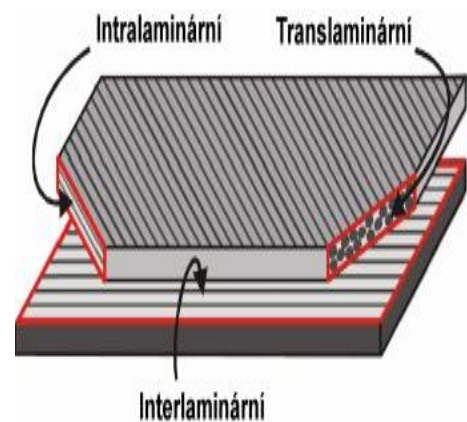
Mezivláknový interlaminární mechanismus(delaminace)

Označuje se také jako delaminace. Tento mechanismus porušení vzniká uprostřed dvou sousedících vrstev, přičemž nezasahuje do svazků vláken ve vrstvě. Rychlejší šíření trhliny a větší rozsah je způsoben tím, že trhlina není na rozhraní vrstev bržděna tak jako je tomu ve vrstvě.

Hlavními příčinami bývá existence vad v laminátu vzniklých při výrobě. Delaminace roste buď únavovým zatížením, nebo postupným navyšováním statického zatížení. Toto poškození se považuje jako jedno z nejvíce kritických. Ve skutečnosti je to hlavní otázka potřebná pro evoluci laminovaných kompozitů kvůli trvanlivosti a toleranci poškození. Schematicky jsou mechanismy znázorněny na obr. 9. [18, 21]



Obr. 8 Snímek lomu vláken (translaminární porušení) v oblasti působení tahového zatížení a příčných mikrotrhlin [21]



Obr. 9 Mechanismy porušení vláknových kompozitů definované podle místa porušení [21]

Experimentální část

7. Použitý materiál

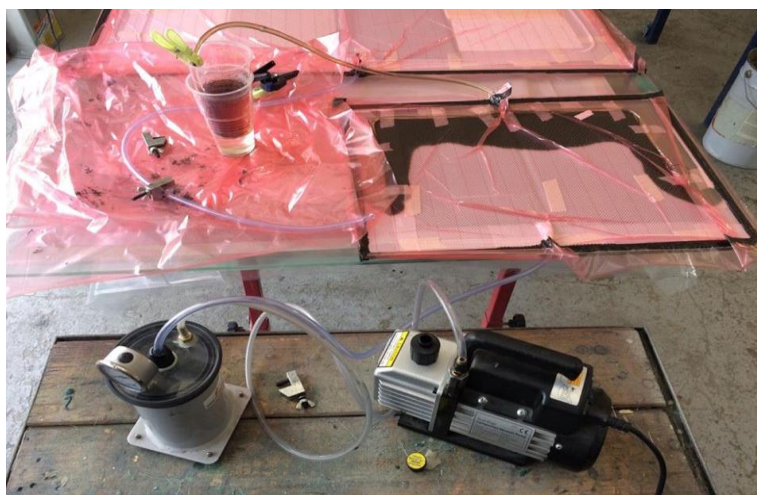
Pro všechny zkušební tělesa byla užitá uhlíková vlákna s plošnou hustotou 200 g/m^2 . Složení zkušebních vzorků se liší v matrici a skladbě vláken. Použitou matricí byla epoxidová pryskyřice nebo polyesterová pryskyřice. Počet vrstev a orientace vláken tahových a ohybových zkušebních těles jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6 Materiály matrice a výztuže, počet vrstev a orientace vláken

Sada	Výztuž	Matrice	Počet vrstev	Orientace vláken [°] a označení
1	Uhlík	Polyesterová	10	0/0/0/90/90/90/0/0/0/90 (10F)
2	Uhlík	Polyesterová	10	90/90/90/90/90/0/0/0/0/0 (10G)
3	Uhlík	Epoxidová	10	0/0/0/90/90/90/0/0/0/90 (10F)
4	Uhlík	Epoxidová	10	90/90/90/90/90/0/0/0/0/0 (10G)

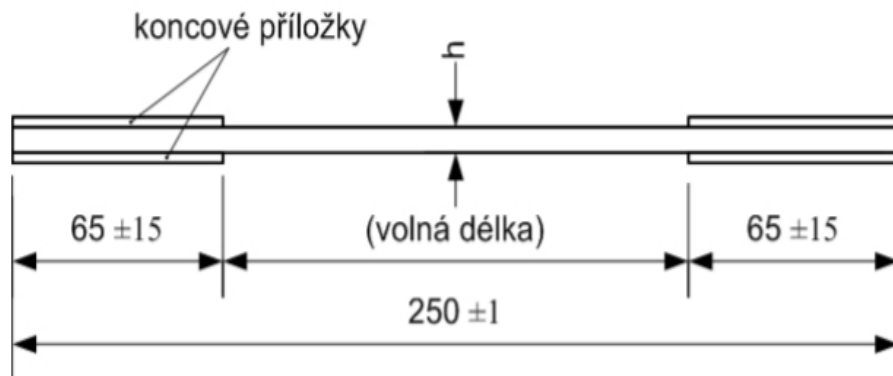
8. Výroba vzorků

Při výrobě zkušebních vzorků byla použita metoda vakuo-injekční technologie (VARTM). Pryskyřice byla směřována do formy při tlaku 0,7 Bar. Čas vytvrzování byl stanoven na 5 dní při teplotě 30°C . Na obr. 10 je zachycena výroba kompozitních desek metodou VARTM.



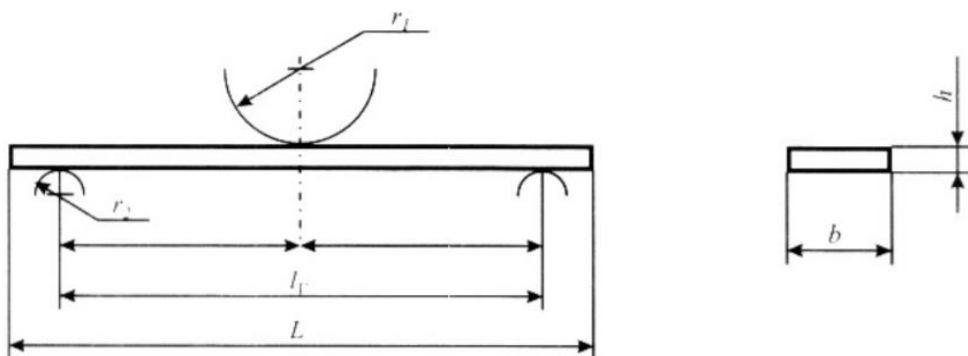
Obr. 10 Výroba kompozitního materiálu metodou VARTM

Pro tahovou zkoušku kompozitů se parametry a úprava zkušebních těles volila podle normy ČSN EN 2561 (přip. ASTM D 3039). Vzorky pro tahovou zkoušku byly opatřeny hliníkovými příložkami, které slouží pro lepší uchycení v čelistech. Materiál s příložkou byl slepen lepidlem Loctite 9466. Důležité je, aby lepidla měla vysokou smykovou pevnost. Na obr. 11 je zkušební těleso s rozměry pro tahovou zkoušku.



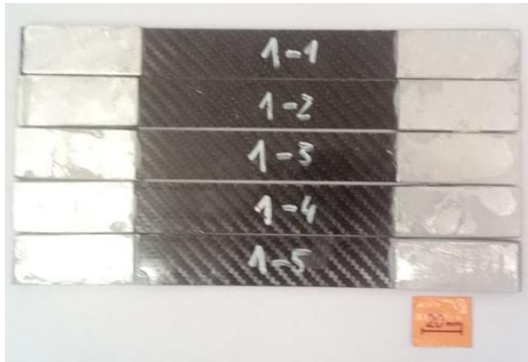
Obr. 11 Zkušební těleso pro tahovou zkoušku [24]

Pro ohybovou zkoušku se parametry volily podle normy ČSN EN 2562 (přip. ASTM D 7264). Na obr. 12 je znázorněné umístění tělesa během zkoušky ohybem.



Obr. 12 Umístění tělesa při zkoušce ohybem [24]

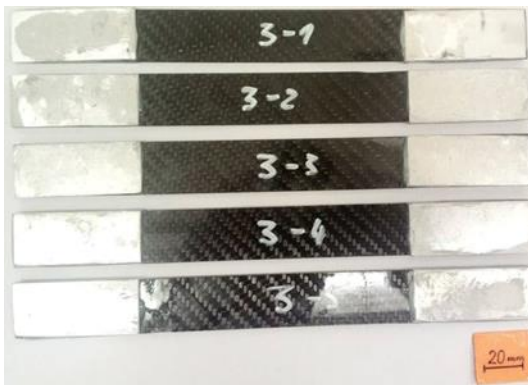
Každá sada se liší materiálem maticí nebo orientací vláken. Sada se skládala z pěti kusů zkušebních vzorků. Rozměry všech zkušebních těles jsou uvedeny v příloze (tab. 15 a 16). Na obr. 13 jsou zkušební tělesa pro tahovou zkoušku a na obr. 14 jsou tělesa pro ohybovou zkoušku.



a)



b)



c)



d)

Obr. 13 Tahová tělesa před vykonáním zkoušky

a) Vzorky s polyesterovou maticí, orientace vláken 10F, b) Vzorky s polyesterovou maticí, orientace vláken 10G, c) Vzorky s epoxidovou maticí, orientace vláken 10F, d) Vzorky s epoxidovou maticí, orientace vláken 10G



a)



b)



c)



d)

Obr. 14 Ohybová tělesa před vykonáním zkoušky

a) Vzorky s polyesterovou maticí, orientace vláken 10F, b) Vzorky s polyesterovou maticí, orientace vláken 10G, c) Vzorky s epoxidovou maticí, orientace vláken 10F, d) Vzorky s epoxidovou maticí, orientace vláken 10G

9. Zkouška tahem

Zkouška byla provedena na univerzálním zkušebním stroji INSTRON 5582, který je zobrazený na obr. 15. Doporučená rychlost zatěžování je 0,5 mm/min, ale zároveň zkouška nemá trvat déle než 10 minut, proto byla rychlost zatěžování zvolena na 1 mm/min. Zkouška probíhala při teplotě 20°C. Úkolem je zjistit pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu.

Podle normy ASTM D 3039 lze rozpoznat přípustné a nepřípustné typy porušení. Každý zkušební vzorek by měl být definován identifikačním kódem porušení. V příloze (tab.17) je popsán význam znaků.



Obr. 15 INSTRON 5582



Obr. 16 Čelisti trhacího zařízení svírající zkušební vzorek

9.1 Výpočty a výsledky zkoušky tahem

Tahové napětí
$$\sigma_{pt} = \frac{P_{max}}{bh} \quad (1)$$

kde: P_{max} – síla na mezi pevnosti [kN], b – šířka zkušebního tělesa [mm], h – tloušťka zkušebního tělesa [mm]

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

kde: Δl – prodloužení zkušebního tělesa [mm], l_0 – délka zkušebního tělesa mezi příložkami [mm]

Modul pružnosti v tahu
$$E_{pt} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (3)$$

kde: $\Delta \sigma$ - rozdíl v napětí mezi dvěma body na křivce průběhu zatěžování [MPa]

$\Delta \varepsilon$ - rozdíl v poměrném prodloužení mezi dvěma body na křivce průběhu zatěžování [-]

Podmínky a výsledné hodnoty pro zkušební tělesa s polyesterovou maticí a orientací vláken 10F jsou v tab. 7.

Tab. 7 Výsledky ze zkoušky tahem sady 1 (Uhlík/Polyester 10F)

Uhlík/Polyester s orientací vláken 10F						
n	Z [mm/min]	P_{max} [kN]	σ_{Pt} [MPa]	ϵ [-]	E_{Pt} [GPa]	Kód porušení
1-1	1	38,2	765,2	0,047	16,2	XGM
1-2	1	38,6	773,6	0,051	15,1	XGL
1-3	1	38,1	761	0,046	16,5	XGM
1-4	1	40,4	807	0,050	16,1	XGM
1-5	1	39,5	789,2	0,056	14,0	XGL
			779±31	0,050±0,008	15,6±2	

Podmínky a výsledné hodnoty pro zkušební tělesa s polyesterovou maticí a orientací vláken 10G jsou v tab. 8.

Tab. 8 Výsledky ze zkoušky tahem sady 2 (Uhlík/Polyester 10F)

Uhlík/Polyester s orientací vláken 10G						
n	Z [mm/min]	P_{max} [kN]	σ_{Pt} [MPa]	ϵ [-]	E_{Pt} [GPa]	Kód porušení
2-1	1	37,8	755,4	0,043	17,6	-
2-2	1	36	720,4	0,047	15,3	-
2-3	1	37,8	755	0,049	15,4	LAT
2-4	1	37,7	771,3	0,050	15,4	XGM
2-5	1	38	758,8	0,053	14,3	XGM
			752±27	0,048±0,004	15,7±2	

Podmínky a výsledné hodnoty pro zkušební tělesa s epoxidovou maticí a orientací vláken 10F jsou v tab. 9.

Tab. 9 Výsledky ze zkoušky tahem sady 3 (Uhlík/Epoxid 10F)

Uhlík/Epoxid s orientací vláken 10F						
n	Z [mm/min]	P_{max} [kN]	σ_{Pt} [MPa]	ϵ [-]	E_{Pt} [GPa]	Kód porušení
3-1	1	44	880,5	0,048	18,3	LVV
3-2	1	42,5	851,1	0,050	17,0	LVV
3-3	1	45,2	902,9	0,053	17,1	LVV
3-4	1	46,8	944,8	0,054	17,5	LVV
3-5	1	45,1	903,7	0,055	16,4	LVV
			897±53	0,052±0,004	17,3±1	

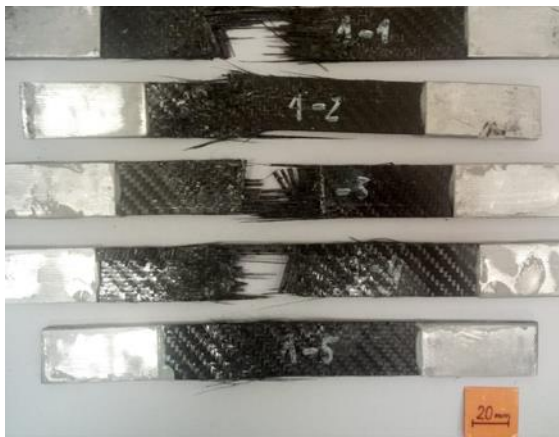
Podmínky a výsledné hodnoty pro zkušební tělesa s epoxidovou maticí a orientací vláken 10G jsou v tab. 10.

Tab. 10 Výsledky ze zkoušky tahem sady 4 (Uhlík/Epoxid 10G)

Uhlík/Epoxid s orientací vláken 10G						
n	Z [mm/min]	P_{max} [kN]	σ_{Pt} [MPa]	$\epsilon[-]$	E_{Pt} [GPa]	Kód porušení
4-1	1	45,6	920,7	0,051	18,1	LVV
4-2	1	47,3	946,5	0,051	18,6	LVV
4-3	1	46,2	925,2	0,054	17,1	M(AD)GM
4-4	1	47,8	956,6	0,055	17,4	M(AD)MV
4-5	1	47,7	955,9	0,060	16	LVV
			941±26	0,054±0,007	17,4±1,6	

Zkušební tělesa ze sady 3 se skladbou 10F a sady 4 se skladbou 10G mají vyšší hodnoty tahového napětí a modulu pružnosti než zkušební tělesa s polyesterovou maticí. Při srovnání vzorků s epoxidovou maticí vykazují tělesa ze sady 4 s orientací 10G mírně lepší mechanické vlastnosti. Zkušební vzorky ze sady 1 s polyesterovou maticí a orientací 10F mají lehce vyšší hodnoty tahového napětí v porovnání se vzorky ze sady 2 a orientací vláken 10G.

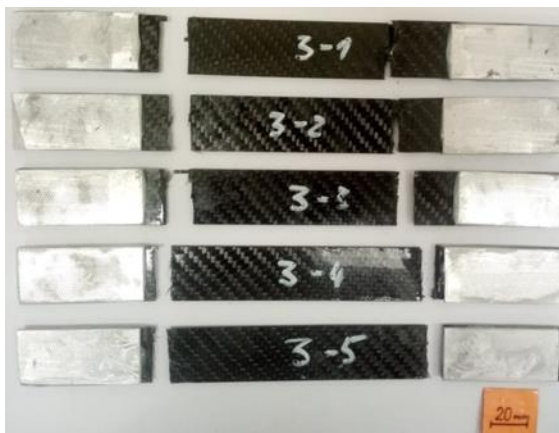
Tělesa po zkoušce tahem jsou na obr. 17. Na zkušebních vzorcích je možné pozorovat odlišné výsledky, co se týče jejich porušení. Kompozity s polyesterovou maticí reagovaly na tahové zatížení velmi dobře. Většina typů porušení se dá považovat za přípustné. Zatímco tahová zkouška pro kompozity s epoxidovou maticí poukázala na určité nedokonalosti. Na zkušebních vzorcích je vidět lom na obou stranách poblíž příložek. Jak je uvedeno v normě, tenhle druh reakce vzorku na tahové zatěžování je nepřijatelný. Jako příčina této nedokonalosti funkce kompozitního materiálu se prvotně uvažuje výrobní proces. Komplikovanost výrobního procesu vede k existenci vad ve výrobku. Při broušení mohlo dojít k zasáhnutí do vzorku a to způsobí oslabení celistvosti v daném místě. Tato chyba může být důvodem nepřijatelného trnutí na vzorku. V příloze jsou všechny tahové diagramy jednotlivých vzorků.



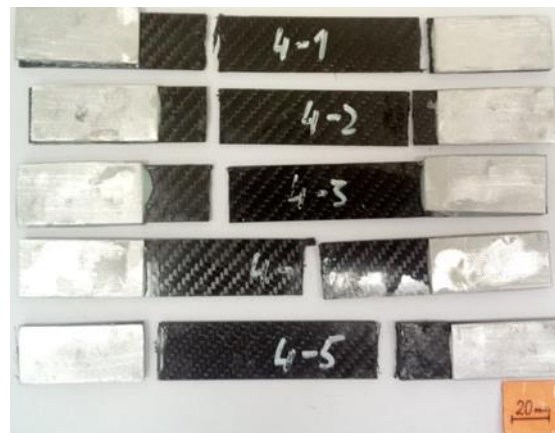
a)



b)



c)

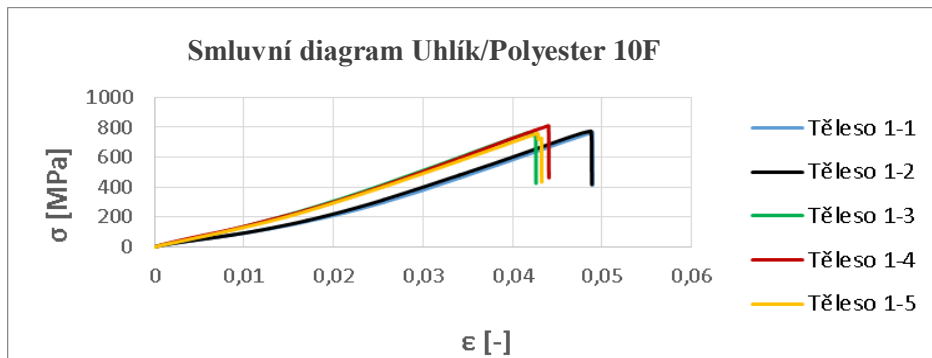


d)

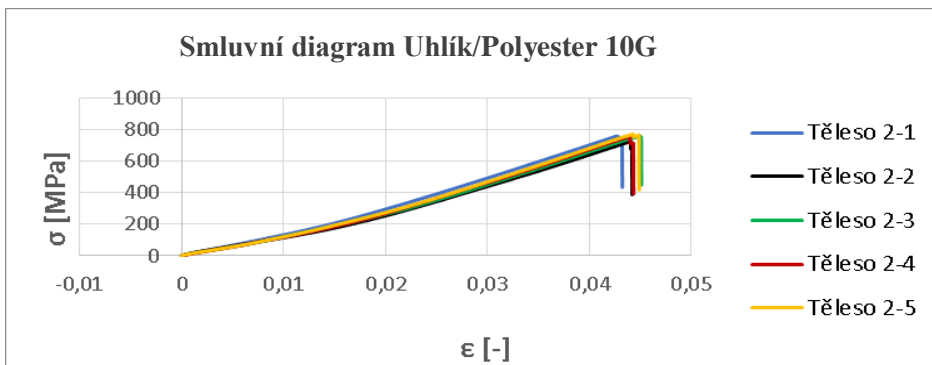
Obr. 17 Tahová tělesa po zkoušce

a) Vzorky s polyesterovou matricí, orientace vláken 10F, b) Vzorky s polyesterovou matricí, orientace vláken 10G,
c) Vzorky s epoxidovou matricí, orientace vláken 10F, d) Vzorky s epoxidovou matricí, orientace vláken 10G

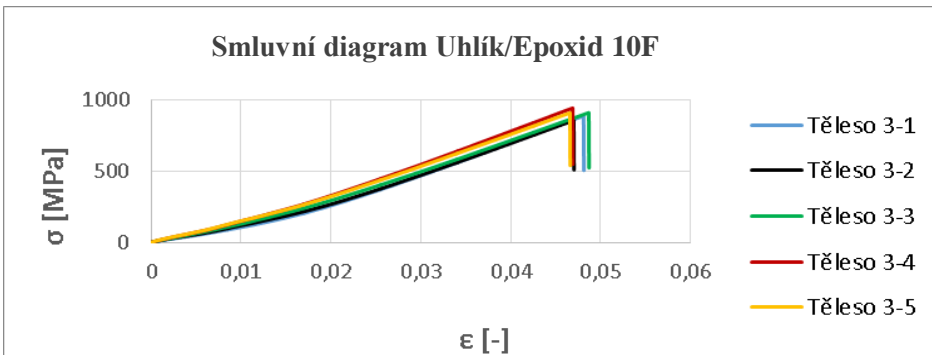
Pracovní diagramy znázorňují závislost napětí na poměrném prodloužení. Z grafu 2 a grafu 3 je patrné, že k porušení zkušebních těles docházelo v přibližně stejných hodnotách napětí a poměrného prodloužení. V grafu 1 jsou viditelné vyšší hodnoty poměrného prodloužení u těles 1-1 a 1-2.



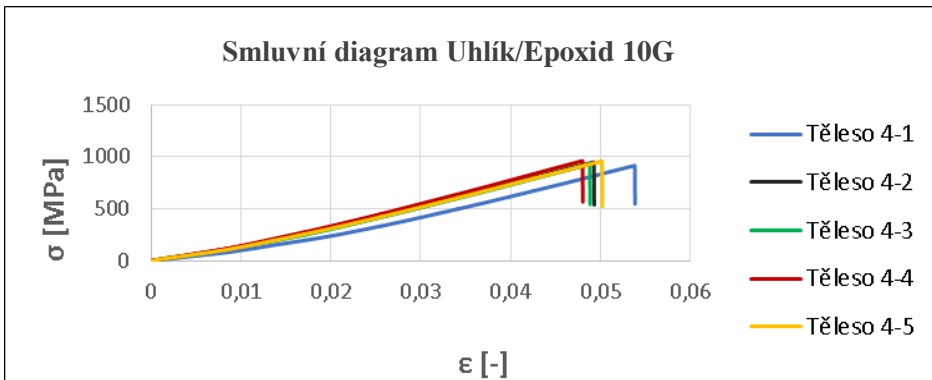
Graf 1 Smluvní diagram sady 1 - Uhlík/Polyester 10F



Graf 2 Smluvní diagram sady 2 - Uhlík/Polyester 10G



Graf 3 Smluvní diagram sady 3 - Uhlík/Epoxid 10F



Graf 4 Smluvní diagram sady 4 - Uhlík/Epoxid 10G

10. Zkouška ohybem

Zkouška ohybem byla vykonána na zkušebním stroji INSTRON 5582. Rychlost zatěžování byla zvolena na 1mm/min. Zkouška byla provedena při teplotě 20°C. Úkolem je zjistit pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu.

Podle normy ASTM D 7264 lze rozpoznat přípustné a nepřípustné typy porušení. Každému zkušebnímu vzorku se udělí identifikační kód. Význam identifikačních kódů je popsán v příloze (tab. 18).

10.1 Výpočty a výsledky zkoušky ohybem

$$\text{Ohybové napětí} \quad \sigma_b = \frac{3P_{max} L}{2bh^2} \quad (4)$$

kde: P_{max} – síla na mezi pevnosti [kN], L – celková délka ohybového tělesa [mm], b – šířka zkušebního tělesa [mm], h – tloušťka zkušebního tělesa [mm]

$$\text{Relativní prodloužení} \quad \varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (5)$$

kde: δ - průhyb ve středě tělesa pod zatěžujícím válečkem [mm], h – tloušťka zkušebního tělesa [mm], L – celková délka ohybového tělesa [mm]

$$\text{Modul pružnosti v ohybu} \quad E_b = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (6)$$

kde: $\Delta\sigma$ - rozdíl v napětí mezi dvěma body na křivce průběhu zatěžování [MPa], $\Delta\varepsilon$ - rozdíl v poměrném prodloužení mezi dvěma body na křivce průběhu zatěžování [-]

Podmínky a výsledné hodnoty pro zkušební tělesa s polyesterovou matricí a orientací vláken 10F jsou v tab. 11.

Tab. 11 Výsledné hodnoty ze zkoušky ohybem sady 1 (Uhlík/Polyester 10F)

Uhlík/Polyester s orientací vláken 10F						
n	Z [mm/min]	P_{max} [kN]	σ_b [MPa]	ε [-]	E_b [GPa]	Kód Porušení
1-A	1	73,2	225	0,0064	35,2	CAB
1-B	1	56,3	170,5	0,0057	29,9	CAB
1-C	1	76,1	255,2	0,0062	41,2	-
1-D	1	64,1	194,3	0,0059	32,9	-
			211±51	0,006±0,0004	34,8±7	

Podmínky a výsledné hodnoty pro zkušební tělesa s polyesterovou maticí a orientací vláken 10G jsou v tab. 12.

Tab. 12 Výsledné hodnoty ze zkoušky ohybem sady 2 (Uhlík/Polyester 10G)

Uhlík/Polyester s orientací vláken 10G						
n	Z [mm/min]	P_{max} [kN]	σ_b [MPa]	ϵ [-]	E_b [GPa]	Kód porušení
2-A	1	73,2	279,3	0,0048	58,2	CAB
2-B	1	80,1	271,6	0,0053	51,3	CAB
2-C	1	71,4	234,5	0,0048	48,9	-
2-D	1	37,2	126,0	0,0025	50,4	-
2-E	1	75,9	247,3	0,0052	47,6	-
			232±101	0,0045±0,0019	51,3±5	

Podmínky a výsledné hodnoty pro zkušební tělesa s Epoxidovou maticí a orientací vláken 10F jsou v tab. 13.

Tab. 13 Výsledné hodnoty ze zkoušky ohybem sady 3 (Uhlík/Epoxid 10F)

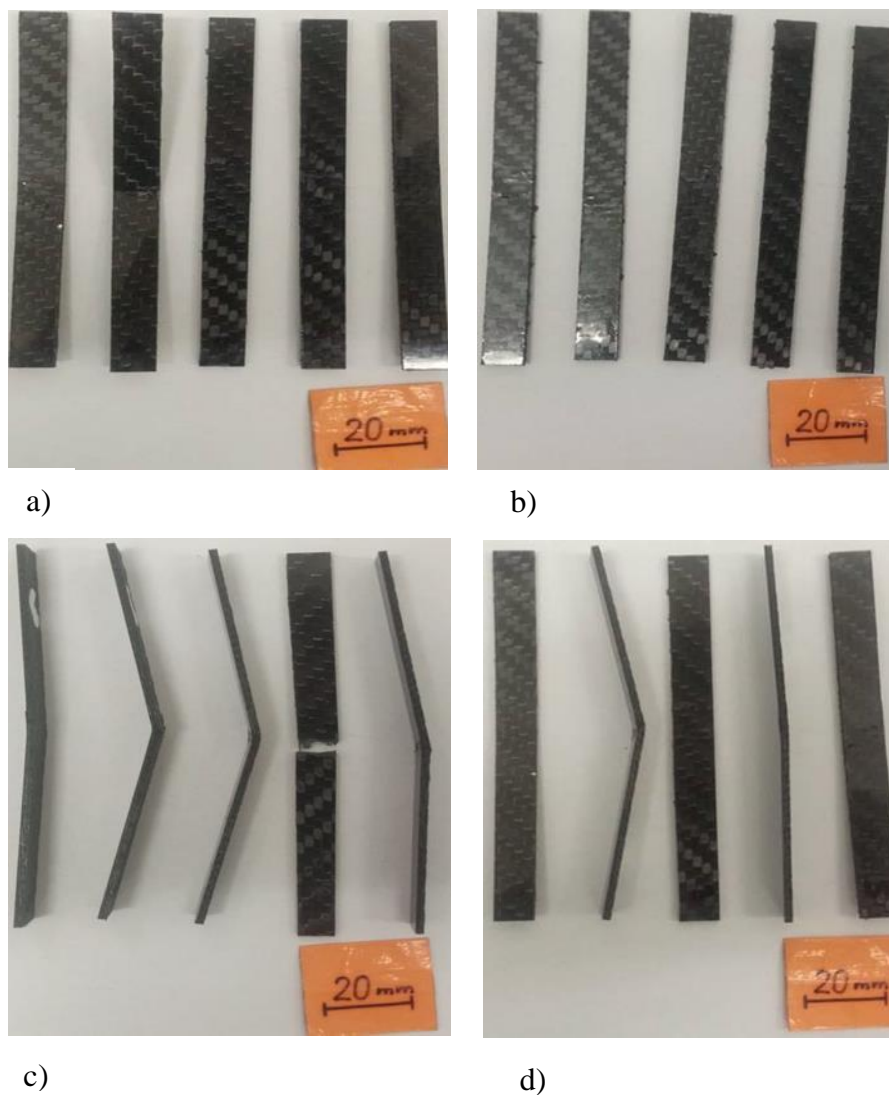
Uhlík/Epoxid s orientací vláken 10F						
n	Z [mm/min]	P_{max} [kN]	σ_b [MPa]	ϵ [-]	E_b [GPa]	Kód porušení
3-A	1	308,1	943,0	0,0210	44,9	-
3-B	1	252,5	818,3	0,0164	49,9	CAB
3-C	1	272,8	1048,5	0,0152	68,9	CAB
3-D	1	215,5	810,7	0,0119	68,1	-
3-E	1	304,9	1152,3	0,0162	71,1	CAB
			955±261	0,0161±0,0052	60,6±17	

Podmínky a výsledné hodnoty pro zkušební tělesa s Epoxidovou maticí a orientací vláken 10G jsou v tab. 14.

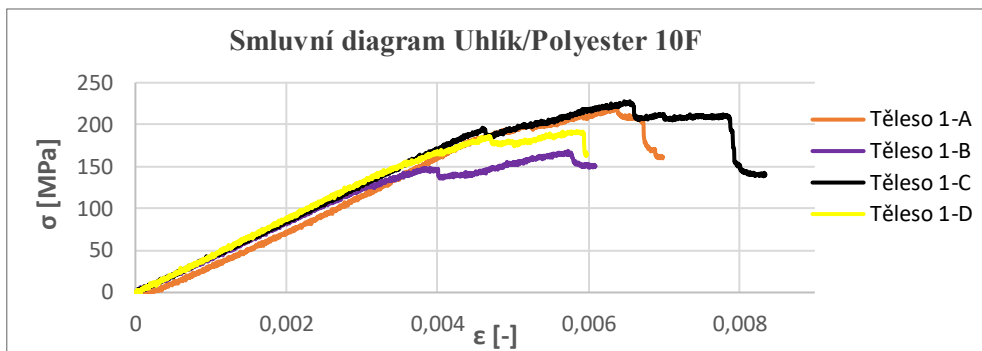
Tab. 14 Výsledné hodnoty ze zkoušky ohybem sady 4 (Uhlík/Epoxid 10G)

Uhlík/Epoxid s orientací vláken 10G						
n	Z [mm/min]	P_{max} [kN]	σ_b [MPa]	ϵ [-]	E_b [GPa]	Kód porušení
4-A	1	286,1	1224,8	0,0158	77,5	-
4-B	1	270,5	917,5	0,0168	54,6	CAB
4-C	1	280,8	1072,3	0,0154	69,7	-
4-D	1	276,7	891,9	0,0161	55,4	-
4-E	1	261,8	936,5	0,0144	65,0	-
			1009±20	0,0157±0,0015	64,5±13	

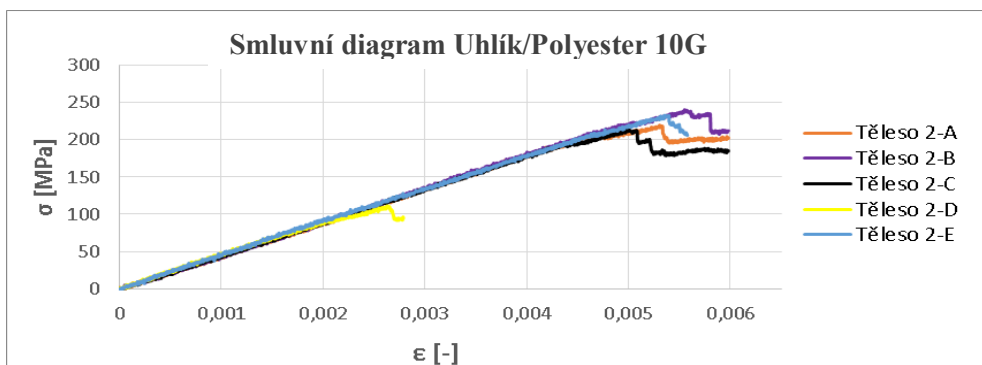
Stejně jako při zkoušce tahem, kompozity s epoxidovou matricí mají výborné mechanické vlastnosti v ohybu. Po odlehčení zůstaly některé zkušební vzorky výrazně deformované. Mez pevnosti v ohybu pro zkušební tělesa s polyesterovou matricí je až 4x nižší než u těles s epoxidovou matricí. Zkušební vzorek 3-D s epoxidovou matricí a orientací vláken 10F je přetržený. Důvodem může být zasažení do struktury materiálu při broušení. Velký rozdíl v hodnotách modulu pružnosti v ohybu u vzorků s polyesterovou matricí je způsoben rozdílnou orientací vláken. Na obr.18 jsou znázorněny zkušební tělesa po zkoušce ohybem. V příloze se nachází grafický průběh zkoušky pro každé testované zkušební těleso.



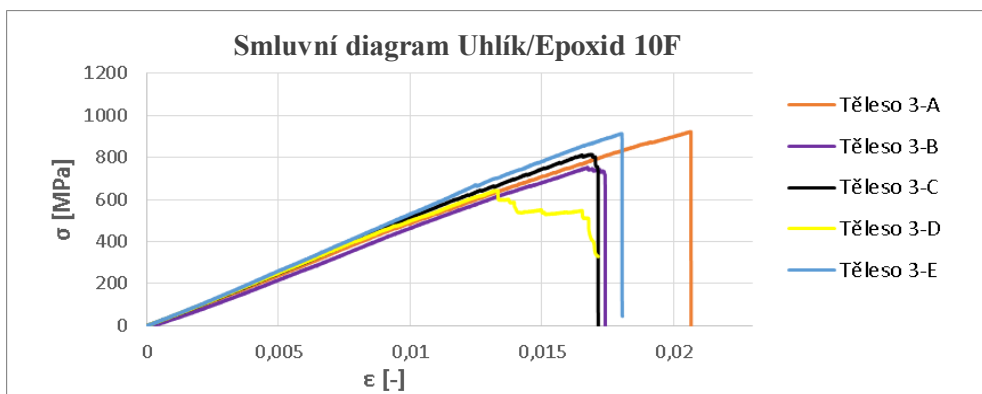
Obr. 18 Zkušební tělesa po zkoušce ohybem
a) Vzorky s polyesterovou matricí, orientace vláken 10F, b) Vzorky s polyesterovou matricí, orientace vláken 10G,
c) Vzorky s epoxidovou matricí, orientace vláken 10F, d) Vzorky s epoxidovou matricí, orientace vláken 10G



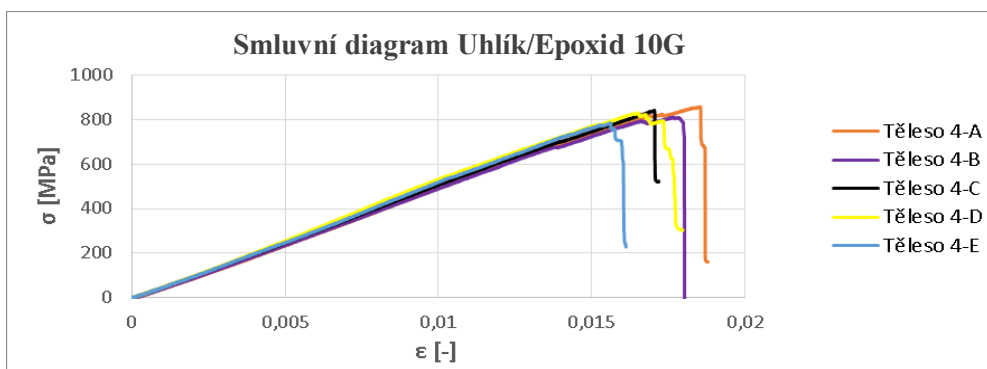
Graf 5 Smluvní diagram sady 1 - Uhlík/Polyester 10F



Graf 6 Smluvní diagram sady 2 - Uhlík/Polyester 10G



Graf 7 Smluvní diagram sady 3 - Uhlík/Epoxid 10F



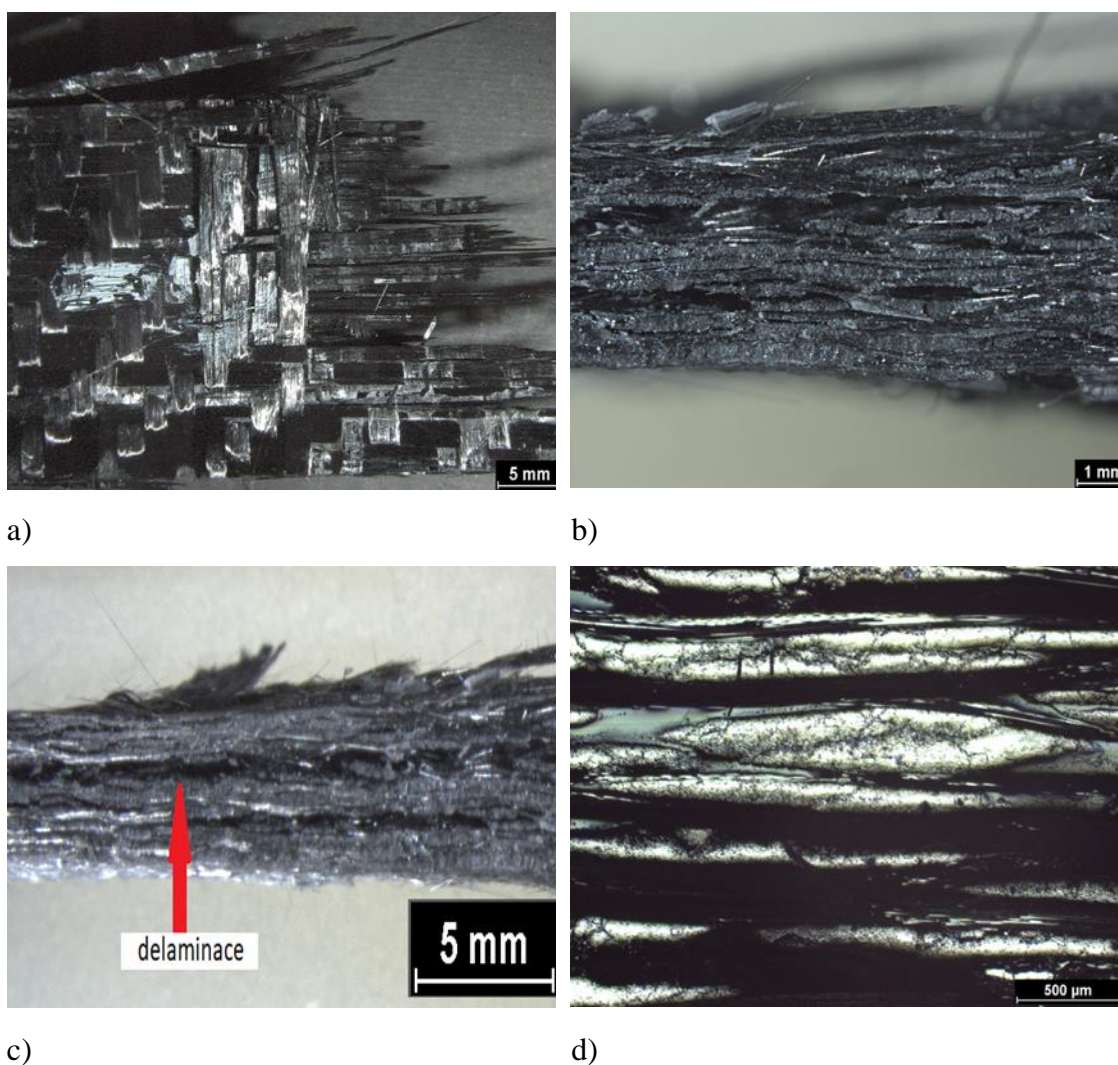
Graf 8 Smluvní diagram sady 4 - Uhlík/Epoxid 10G

11. Mikroskopická analýza

Po vykonání mechanických zkoušek byly zkušební vzorky podrobeny fraktografické analýze pomocí světelného mikroskopu a stereomikroskopu.

Uhlík/Polyester s orientací 10F sada 1

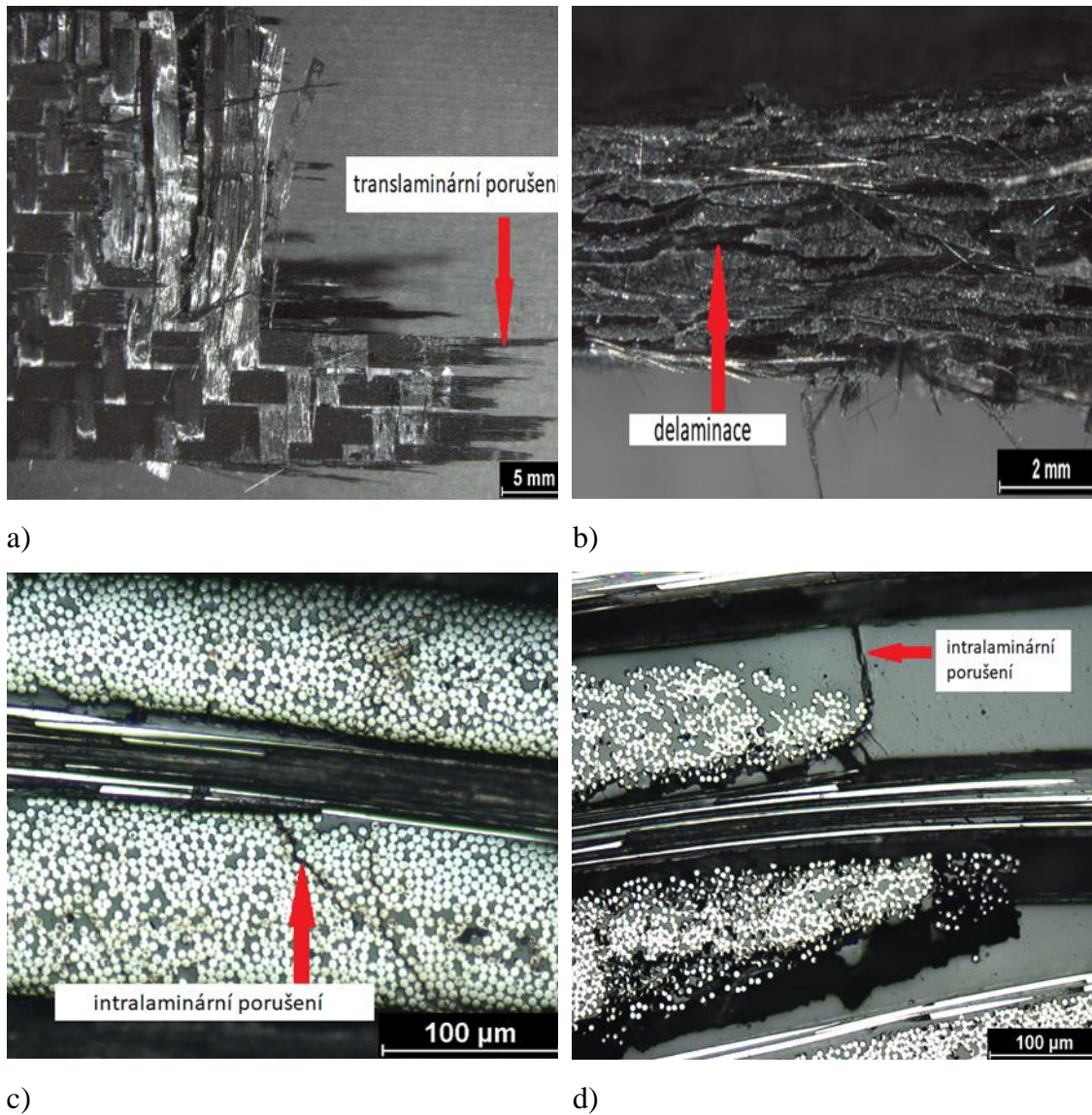
Translaminární porušení vláken působením tahového namáhání jsou viditelné na obr. 19a). Na obr. 19b) jsou delaminace (interlaminární porušení) společně s translaminárním porušením. Oddělená vlákna, neboli delaminace jsou na obr. 19c).



Obr. 19 Snímky porížené pomocí světelného mikroskopu a stereomikroskopu
a) translaminární přetržení vláken b) plastická deformace tělesa v celém objemu
c) oddělená vlákna – delaminace d) řez deformovaným materiálem

Uhlík/Polyester s orientací 10G sada 2

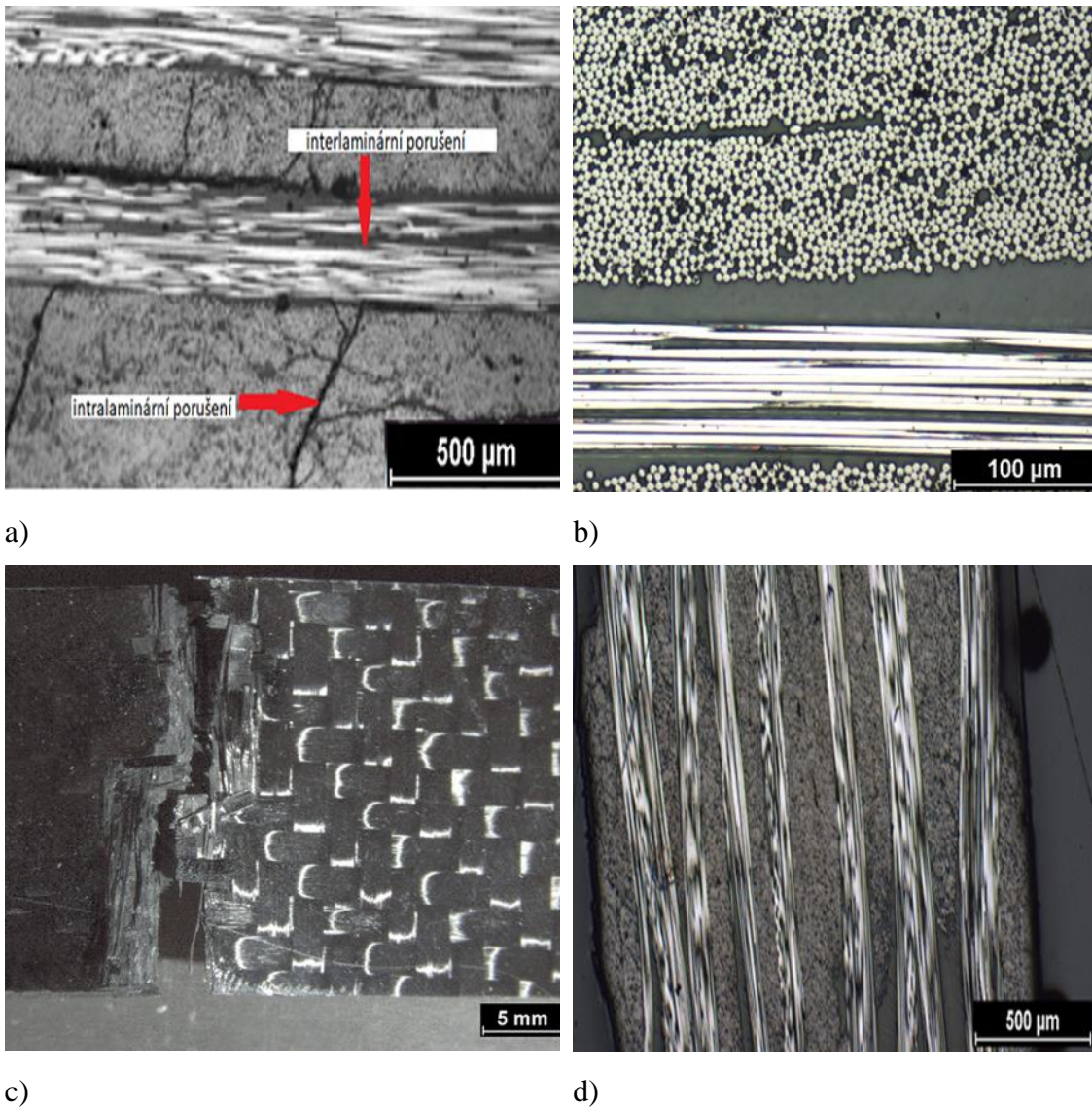
Na obr. 20a) jsou přetržená vlákna (translaminární porušení). Přetržení vláken způsobilo tahové namáhání. Na obr. 20b) je interlaminární šíření lomu (delaminace). Mezivláknové intralaminární porušení je viditelné na obr. 20c). Na posledním obrázku je patrný defekt matrice.



Obr. 15 Fotky pořízené pomocí světelného mikroskopu a stereomikroskopu
a) translaminární porušení b) interlaminární porušení (delaminace)
c) mezivláknové intralaminární porušení d) intralaminární porušení matrice

Uhlík/Epoxid s orientací 10F sada 3

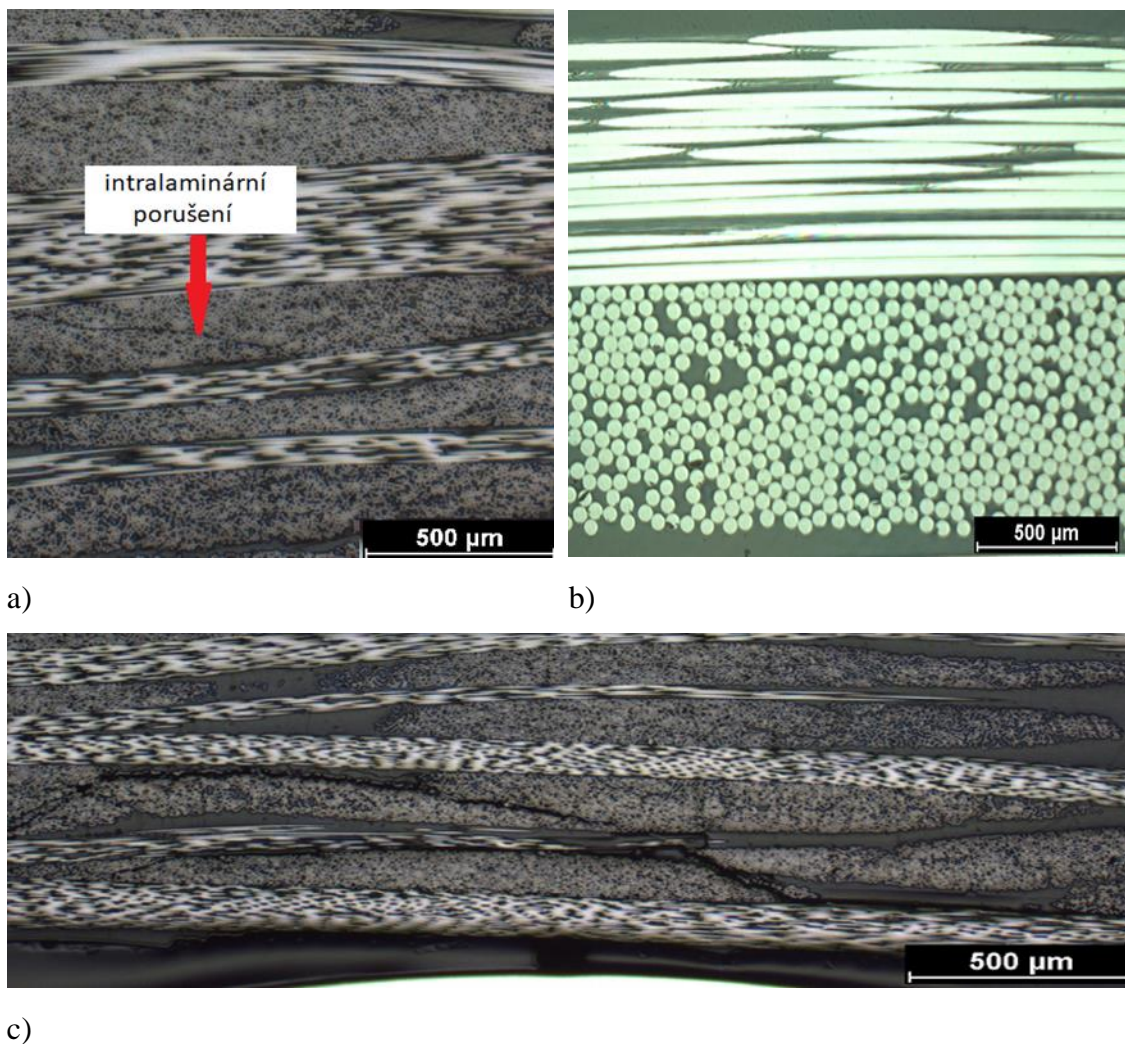
Na obr. 21a) dominují delaminace, které jsou navíc propojené s příčnými intralaminárními trhlinami. Pravidelné rozložení nepoškozených vláken s orientací 0° a 90° je na detailním obr. 21b). Na makrofotografii 21c) je nežádoucí křehký lom v oblasti poblíž příložek při tahovém zatížení. d) řez materiálem bez viditelných poškození



Obr. 21 Fotografie pořízené pomocí světelného mikroskopu a stereomikroskopu
a) delaminace propojené s příčnými intralaminárními trhlinami, b) detailní záběr na neporušenou část materiálu
c) nežádoucí lom poblíž příložek způsobený tahovým zatížením d) řez materiálem bez viditelných poškození

Uhlík/Epoxid s orientací 10G sada 4

Na obr 22a) je viditelná trhlinka mezi vlákny, která je kolmá ke směru působícího zatížení. Jedná se o intralaminární porušení. Obr. 22b) poskytuje detailní záběr na strukturu materiálu bez viditelných porušení. Na obrázku 22c) je vidět kombinace dvou typů porušení, mezivláknové intralaminární porušení vrstvy s orientací 90° přechází do vrstvy s orientací 0°, kde jsou interlaminární porušení. Tato kombinace porušení vzniká při velkých hodnotách napětí.



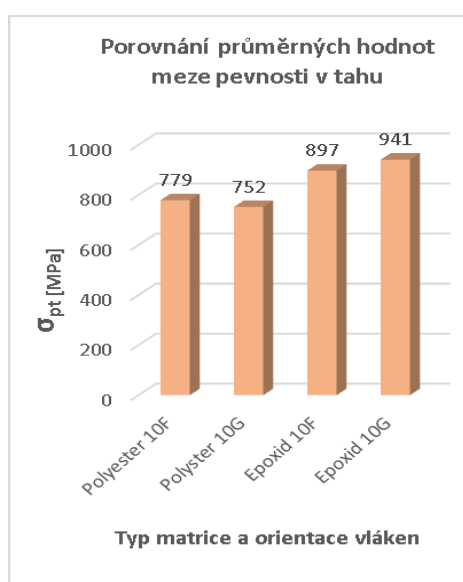
Obr. 22 Fotografie pořízené pomocí světelného mikroskopu a stereomikroskopu
a) intralaminární porušení b) detailní záběr neporušených vláken a matrice c) intralaminární porušení přecházející do interlaminárního

12. Diskuze

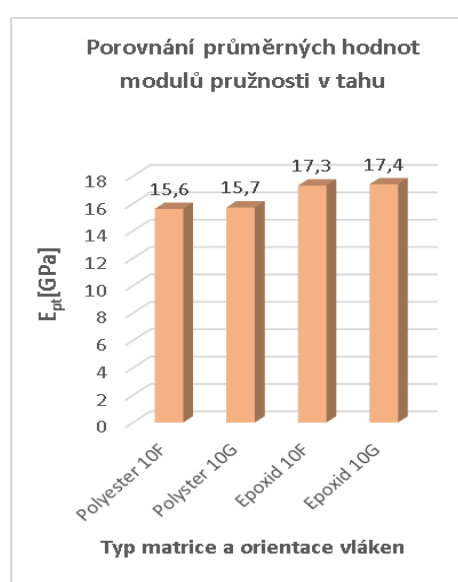
Cílem této bakalářské práce bylo posouzení vlivu matrice na pevnostní charakteristiky kompozitního materiálu. Základem bylo provedení mechanických zkoušek a následné vyhodnocení stavu zkušebních vzorků pomocí základů fraktografie.

Zkouška tahem kompozitů s uhlíkovými vlákny, plněných polyesterovou pryskyřicí, poukázala na velmi dobré mechanické vlastnosti. Zkušební vzorky ze sady 1 s orientací vláken 10F ($\sigma_{pt} = 779$ MPa, $E_{pt} = 15,6$ GPa) a vzorky ze sady 2 s orientací 10G ($\sigma_{pt} = 752$ MPa, $E_{pt} = 15,7$ GPa). Přetržení devíti z desíti zkušebních těles proběhlo na správných místech, tedy uprostřed zkušebního tělesa. Vynikající mechanické vlastnosti prokázali výsledky zkušebních těles s epoxidovou matricí. Zkušební tělesa ze sady 3 s orientací 10F ($\sigma_{pt} = 897$ MPa, $E_{pt} = 17,3$ GPa) a vzorky ze sady 4 s orientací 10G ($\sigma_{pt} = 941$ MPa, $E_{pt} = 17,4$ GPa).

Naopak neúspěšně se tyto zkušební vzorky projeví z hlediska umístění přetržení. Většina vzorků měla přetržení velmi blízko příložek, což demonstruje špatné rozložení sil v materiálu. Tyto nepřijatelné typy porušení vznikly pravděpodobně chybou ve výrobě např. při broušení, kdy mohlo dojít k narušení celistvosti materiálu. V grafu 9 a grafu 10 je znázorněno porovnání mechanických vlastností všech zkušebních sad, přičemž nejvyšší hodnoty mechanických vlastností má sada č.4 a nejnižší sada č.2 společně se sadou č.1.



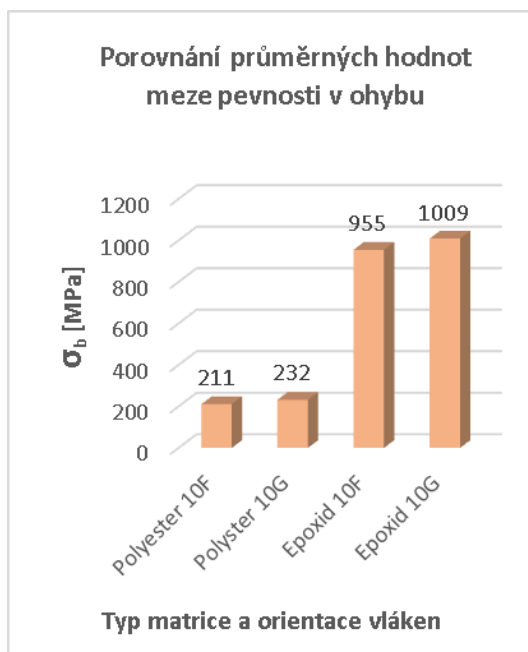
Graf 9 Porovnání průměrných hodnot meze pevnosti v tahu čtyř zkušebních sad



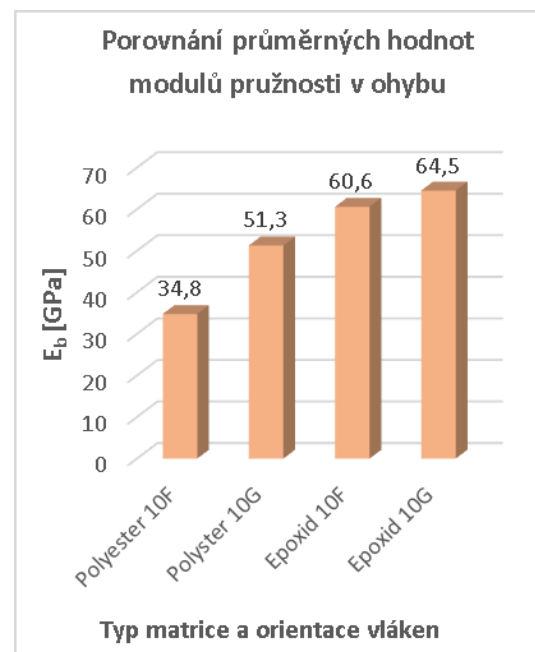
Graf 10 Porovnání průměrných hodnot modulů pružnosti v tahu čtyř zkušebních sad

Zkouška ohybem prokázala daleko větší rozdíly ve výsledcích. Kompozitní materiál reaguje rozmanitě na kombinaci tahové, tlakové síly. Zkušební tělesa ze sady 1 s orientací 10F byly porušené při nižších hodnotách průhybu a napětí ($\sigma_b = 211$ MPa, $E_b = 34,8$ GPa). Po odlehčení z maximálního průhybu zůstalo těleso mírně plasticky deformované, ale bez jakýchkoliv viditelných porušení v matrici. Vzorky ze sady 2 se skladbou 10G mají obdobné mechanické vlastnosti ($\sigma_b = 232$ MPa, $E_b = 51,3$ GPa). Větší hodnota modulu pružnosti v ohybu je způsobena vlivem pravidelnějšího uspořádání orientací vláken 10G. Po odlehčení nejsou viditelné výrazné plastické deformace. Zkušební tělesa ze sady 3 s epoxidovou matricí a orientací vláken 10F se porušila při vysokých hodnotách napětí ($\sigma_b = 955$ MPa, $E_b = 60,6$ GPa). Po odlehčení zůstaly tělesa výrazně plasticky deformované. Zkušební tělesa ze sady 4 s orientací 10G stejně jako při tahové zkoušce disponují nejlepšími mechanickými vlastnostmi ($\sigma_b = 1009$ MPa, $E_b = 64,5$ GPa).

V grafu 11 je znázorněné porovnání průměrných hodnot meze pevnosti v ohybu. Zkušební tělesa s polyesterovou matricí mají více než 4x nižší hodnoty než tělesa s epoxidovou matricí. V grafu 12 je porovnání průměrných hodnot modulů pružnosti v ohybu všech zkušebních sad. Z grafu plyne, že pro zkušební tělesa ze sady 4 je potřebné 2-krát větší napětí na vyvolání deformací, než je tomu u zkušebních těles ze sady 1.



Graf 11 Porovnání průměrných hodnot meze pevnosti v ohybu čtyř zkušebních sad



Graf 12 Porovnání průměrných hodnot modulů pružnosti v ohybu čtyř zkušebních sad

13. Závěr

Cílem této práce je posouzení vlivu matrice na pevnostní charakteristiky dlouhovláknových kompozitů.

Tahovou zkouškou byly zjištěny pro každou sadu hodnoty meze pevnosti v tahu (σ_{Pt}) a modulu pružnosti v tahu (E_{Pt}). Pro sadu 1 materiál uhlík/polyester s orientací 10F: $\sigma_{Pt} = 779$ MPa, $E_{Pt} = 15,6$ GPa. Sada 2 materiál uhlík/polyester s orientací 10G: $\sigma_{Pt} = 752$ MPa, $E_{Pt} = 15,7$ GPa. Sada 3 materiál uhlík/epoxid s orientací 10F: $\sigma_{Pt} = 897$ MPa, $E_{Pt} = 17,3$ GPa. Sada 4 materiál uhlík/epoxid s orientací 10G: $\sigma_{Pt} = 941$ MPa, $E_{Pt} = 17,4$ GPa.

Z výsledků zkoušky tahem vyplývá, že zkušební vzorky s epoxidovou matricí mají vyšší hodnoty pevnostních charakteristik než materiály s polyesterovou matricí. Jako nejpevnější a nejtužší byly vzorky ze sady 4 materiál uhlík/epoxid s uložením 10G. Nejnižší hodnoty mechanických vlastností vykazují zkušební tělesa ze sady 2 materiál uhlík/polyester s orientací vláken 10G.

Zkouškou ohybem byly určeny pro každou sadu hodnoty meze pevnosti v ohybu (σ_b) a modulu pružnosti v ohybu (E_b). Sada 1 materiál uhlík/polyester s orientací 10F: $\sigma_b = 211$ MPa, $E_b = 34,8$ GPa. Sada 2 materiál uhlík/polyester s orientací 10G: $\sigma_b = 232$ MPa, $E_b = 51,3$ GPa. Sada 3 materiál uhlík/epoxid s orientací 10F: $\sigma_b = 955$ MPa, $E_b = 60,6$ GPa. Sada 4 materiál uhlík/epoxid s orientací 10G: $\sigma_b = 1009$ MPa, $E_b = 64,5$ GPa.

Z výsledků zkoušky ohybem je patrné, že nejvyšší hodnoty pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu mají zkušební vzorky sada 4 materiál uhlík/epoxid s uložením 10G. Hodnoty pevnosti v ohybu pro zkušební vzorky s polyesterovou matricí jsou přibližně 4-krát nižší, než u vzorků s matricí epoxidovou. Při nejnižších hodnotách napětí byly porušené vzorky sady 1 uhlík/polyester s orientací vláken 10F.

Pomocí mikroskopické analýzy bylo zjištěno, že zkušební tělesa sada 2 uhlík/polyester s uložením 10G měla větší počet intralaminárních porušení než vzorky sada 1 uhlík/polyester s orientací 10F. Na zkušebních tělesech s epoxidovou matricí jsou viditelná intralaminární porušení přecházející do interlaminárního porušení z důvodu vysokých hodnot napětí.

Literatura a zdroje

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 9788086960296.
- [2] BAREŠ, R. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [3] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, c2002 ISBN 80-7204-248-3.
- [4] Kratochvíl, B.; Švorčík, V.; Vojtěch, D.. *Úvod do studia materiálů*. Praha: VSCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4
- [5] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [6] LAŠ, V. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 9788070436899.
- [7] JANOVEC, J. Cejp J. a Steidl J. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 9788001041673.
- [8] BĚHÁLEK, L. *Polymery*. Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz; 2016 [online]. [cit. 15.12.2017] Dostupné: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [9] LENFELD, P. *Technologie II: Zpracování plastů*. [online].[cit. 15.12.2017]. Dostupné: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [10] Havel composites. *Pryskyřice a gelcoaty*. [cit. 2018.02.21] Dostupné: <http://www.havel-composites.com>
- [11] VRBKA, J. *Mechanika kompozitů*. In: Vysoké učení technické v Brně [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008 [cit. 2018.06.03]. Dostupné: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [12] MRÁZ, P. a Talácko J. *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 8001035409.
- [13] PARK, S. Carbon fibers. Dordrecht: Springer, 2015. *Springer series in materials science*. ISBN 978-94-017-9477-0.
- [14] *Polymer Composites* [Online]. [cit. 2018-07-01]. Dostupné: <http://polymer-composites.cz>
- [15] Gurit.com [online]. 2011 [cit. 2018-05-23]. *Guide to composites*. Dostupné: <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>.

- [16] CHAWLA, K. *Composite materials: science and engineering*. 2nd ed. New York: Springer, 1998. Materials research and engineering (Unnumbered). ISBN 03-879-8409-7.
- [17] Agarwal, B.D., Broutman, L. J.: *Vláknové kompozity*. SNTL Praha, 1987
- [18] *Mechanismy porušování* [Online]. [cit.2018-07-1]. Dostupné: <http://www.csm-kompozity.wz.cz/Kadlec.pdf>
- [19] *Composites*. [online]. [cit. 2.4.2018]
Dostupné:<http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/industrial-solution-analyse-delamination>
- [20] *Kompozity*. [online]. [cit. 1.4.2018] Dostupné: <https://kompozity.webnode.cz/>
- [21] *Fraktografie vláknových kompozitů na bázi epoxid/uhlík pro letecké aplikace* [Online]. [cit.2018-07-25]. Dostupné: <https://www.vzlu.cz/cs/transfer-17-2012-s694.pdf>
- [22] *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2000.
- [23] *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2007.
- [24] *Zkušební metody kompozitních materiálů* [Online]. [cit.2018-07-27]. Dostupné: <https://core.ac.uk/download/pdf/30290378.pdf>
- [25] *Konstrukční plasty v letectví* [Online]. [cit.2018-08-09]. Dostupné: <https://slideplayer.cz/slide/3084915/>
- [26] *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2000.
- [27] *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2007.

Seznam obrázků

Obr. 1 Dělení kompozitních materiálů podle tvaru a uspořádání výztuže [4].	12
Obr. 2 Schématické znázornění vysokotlakého RTM [10]	20
Obr. 3 Schéma technologie VARTM [10]	21
Obr. 4 Materiál namáhaný tahovým napětím [15]	21
Obr. 5 Materiál namáhaný tlakovou silou [10]	22
Obr. 6 Materiál namáhaný ohybovým napětím [10]	22
Obr. 7 Materiál namáhaný smykovým napětím [10]	23
Obr. 8 Snímek lomu vláken (translaminární porušení) v oblasti působení tahového zatížení a příčných mikrotrhlin [21]	24
Obr. 9 Mechanismy porušení vláknových kompozitů definované podle místa porušení [21].	24
Obr. 10 Výroba kompozitního materiálu metodou VARTM.	25
Obr. 11 Zkušební těleso pro tahovou zkoušku [24]	26
Obr. 12 Umístění tělesa při zkoušce ohybem [24]	26
Obr. 13 Tahová tělesa před vykonáním zkoušky	27
Obr. 14 Ohybová tělesa před vykonáním zkoušky	27
Obr. 15 INSTRON 5582	28
Obr. 16 Čelisti trhacího zařízení svírající zkušební vzorek	28
Obr. 17 Tahová tělesa po vykonání zkoušky	31
Obr. 18 Zkušební tělesa po vykonání zkoušky ohybem	35
Obr. 19 Snímky pořízené pomocí světelného mikroskopu a stereomikroskopu	37
Obr. 20 Fotky pořízené pomocí světelného mikroskopu a stereomikroskopu.	38
Obr. 21 Fotografie pořízené pomocí světelného mikroskopu a stereomikroskopu	39
Obr. 22 Fotografie pořízené pomocí světelného mikroskopu a stereomikroskopu	40
Obr. 23 Přípustné a nepřípustné typy porušení při tahové zkoušce.	50

Seznam grafů

Graf 1 Smluvní diagram sady 1 - Uhlík/Polyester 10F.....	32
Graf 2 Smluvní diagram sady 2 - Uhlík/Polyester 10G.....	32
Graf 3 Smluvní diagram sady 3 - Uhlík/Epoxid 10F.....	32
Graf 4 Smluvní diagram sady 4 - Uhlík/Epoxid 10G.....	32
Graf 5 Smluvní diagram sady 1 - Uhlík/Polyester 10F.....	36
Graf 6 Smluvní diagram sady 2 - Uhlík/Polyester 10G.....	36
Graf 7 Smluvní diagram sady 3 - Uhlík/Epoxid 10F.....	36
Graf 8 Smluvní diagram sady 4 - Uhlík/Epoxid 10G.....	36
Graf 9 Porovnání průměrných hodnot meze pevnosti v tahu čtyř zkušebních sad.....	41
Graf 10 Porovnání průměrných hodnot modulů pružnosti v tahu čtyř zkušebních sad..	41
Graf 11 Porovnání průměrných hodnot meze pevnosti v ohybu čtyř zkušebních sad....	42
Graf 12 Porovnání průměrných hodnot modulů pružnosti v ohybu čtyř zkušebních sad	42
Graf 13 Diagram ze zkoušky tahem sada 1.....	51
Graf 14 Diagram ze zkoušky tahem sada 2.....	52
Graf 15 Diagram ze zkoušky tahem sada 3.....	53
Graf 16 Diagram ze zkoušky tahem sada 4.....	54
Graf 17 Diagram ze zkoušky ohybem sada 1.....	55
Graf 18 Diagram ze zkoušky ohybem sada 2.....	56
Graf 19 Diagram ze zkoušky ohybem sada 3.....	57
Graf 20 Diagram ze zkoušky ohybem sada 4.....	58

Seznam tabulek

Tab. 1 Porovnání základních mechanických vlastností kompozitů s dalšími materiály [5, 6]	12
Tab. 2 Orientační mechanické vlastnosti reaktoplastových pryskyřic [25]	15
Tab. 3 Vlastnosti vybraných druhů vláken [2].....	17
Tab. 4 Vlastnosti základních typů uhlíkových vláken [13]	18
Tab. 5 Mechanismy porušení vláknového kompozitu [1,19]	23
Tab. 6 Materiály matrice a výztuže, počet vrstev a orientace vláken	25
Tab. 7 Výsledky ze zkoušky tahem sady 1(Uhlík/Polyester 10F)	29
Tab. 8 Výsledky ze zkoušky tahem sady 2 (Uhlík/Polyester 10F)	29
Tab. 9 Výsledky ze zkoušky tahem sady 3 (Uhlík/Epoxid 10F)	29
Tab. 10 Výsledky ze zkoušky tahem sady 4 (Uhlík/Epoxid 10G).....	30
Tab. 11 Výsledné hodnoty ze zkoušky ohybem sady 1 (Uhlík/Polyester 10F)	33
Tab. 12 Výsledné hodnoty ze zkoušky ohybem sady 2 (Uhlík/Polyester 10G)	34
Tab. 13 Výsledné hodnoty ze zkoušky ohybem sady 3 (Uhlík/Epoxid 10F)	34
Tab. 14 Výsledné hodnoty ze zkoušky ohybem sady 4 (Uhlík/Epoxid 10G).....	34
Tab. 15 Rozměry tahových zkušebních těles.....	49
Tab. 16 Rozměry ohybových zkušebních vzorků	49
Tab. 17 Identifikační kódy porušení tahových těles	50
Tab. 18 Identifikační kódy porušení ohybových těles	50

Přílohy

a) Rozměry zkušebních těles

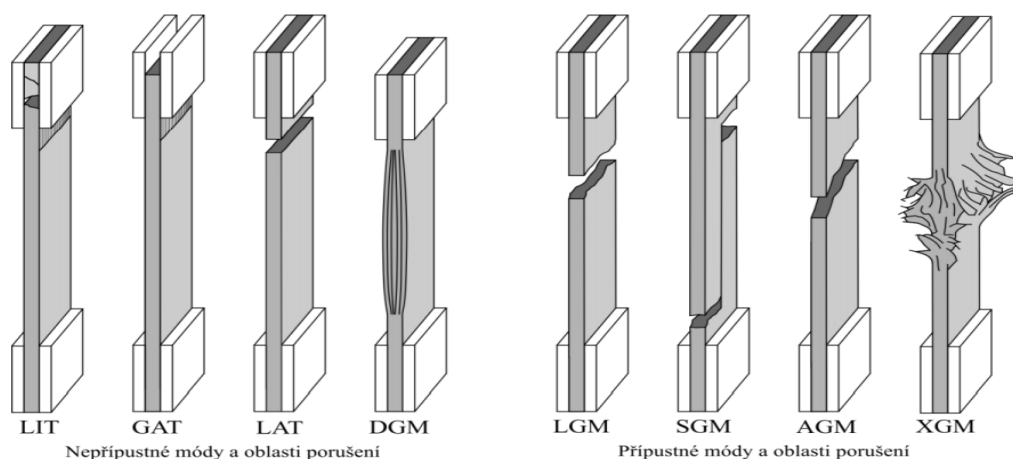
Tab. 11 Rozměry zkušebních těles pro zkoušku tahem

Rozměry tahových zkušebních vzorků				Rozměry tahových zkušebních vzorků			
n	h[mm]	b[mm]	L ₀ [mm]	n	h[mm]	b[mm]	L ₀ [mm]
1-1	2	25	130	3-1	2	25	130
1-2	2	24,95	130	3-2	2	24,95	130
1-3	2	25	130	3-3	2	25	130
1-4	2	25	130	3-4	1,98	25	130
1-5	2	25	130	3-5	2	24,95	130
2-1	2	25	130	4-1	1,98	25	130
2-2	2	25	130	4-2	2	24,95	130
2-3	2	25	130	4-3	2	25	130
2-4	1,95	25	130	4-4	2	25	130
2-5	2	25	130	4-5	2	24,95	130

Tab. 12 Rozměry ohybových zkušebních vzorků

Rozměry ohybových zkušebních vzorků				Rozměry ohybových zkušebních vzorků			
n	h[mm]	b[mm]	L [mm]	n	h[mm]	b[mm]	L [mm]
1-A	2	9,81	80	3-A	2	9,80	80
1-B	2	9,90	80	3-B	1,95	9,71	80
1-C	2	9,92	80	3-C	1,84	9,84	80
1-D	2	9,98	80	3-D	1,80	9,80	80
1-E	2	9,93	80	3-E	1,82	9,80	80
2-A	1,82	9,72	80	4-A	1,92	9,70	80
2-B	1,90	9,80	80	4-B	1,90	9,86	80
2-C	1,95	9,67	80	4-C	1,80	9,70	80
2-D	1,93	9,82	80	4-D	1,95	9,82	80
2-E	2	9,90	80	4-E	1,88	9,82	80

b) Hodnocení typu porušení



Obr. 23 Připustné a nepřipustné typy porušení při tahové zkoušce [26]

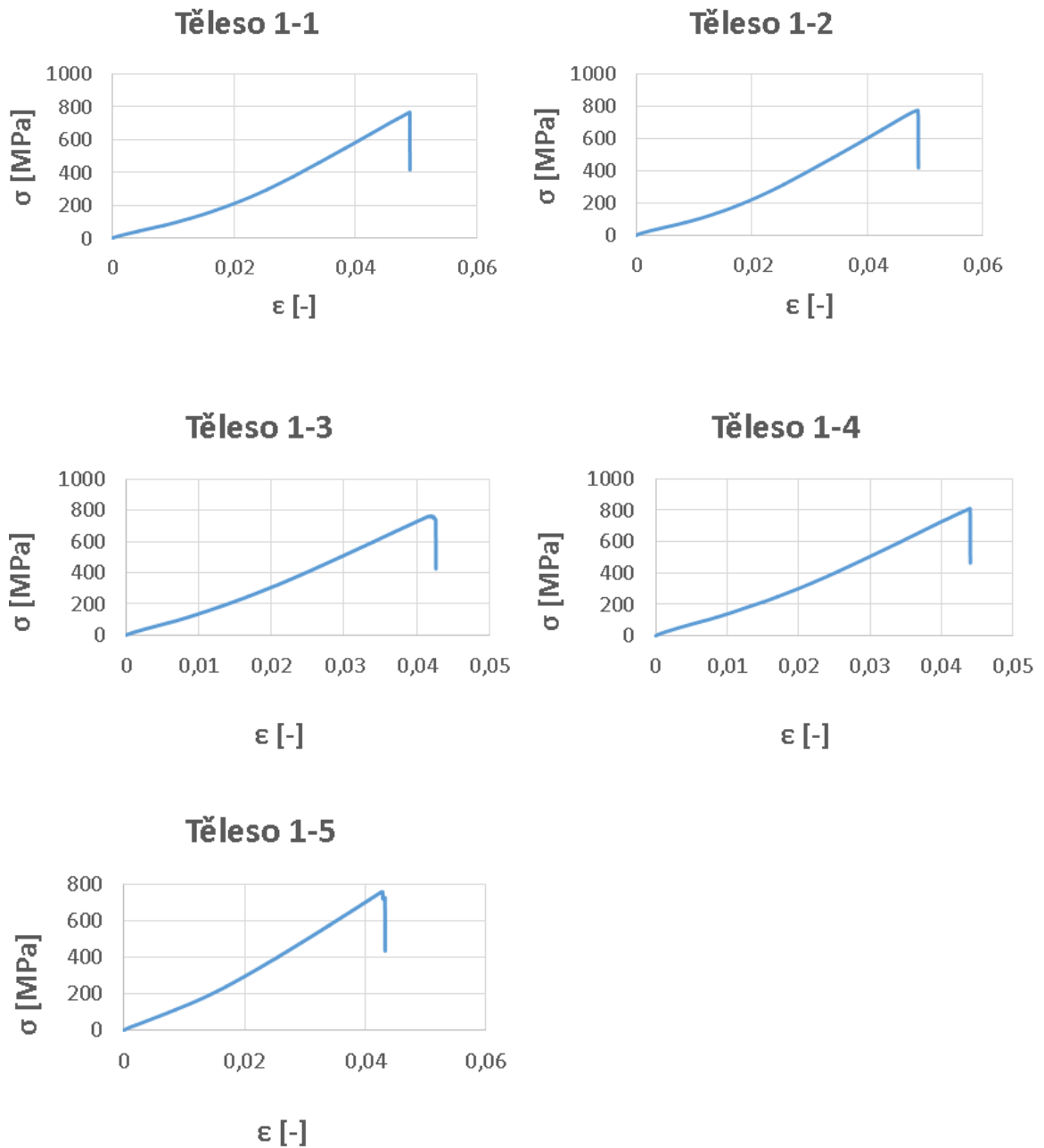
Tab. 13 Identifikační kódy porušení tahových těles [26]

První znak		Druhý znak		Třetí znak	
Mód porušení	Kód	Oblast porušení	Kód	Místo porušení	Kód
šikmý	A	mezi příložkami	I	dole	B
delaminace	D	u příložek	A	nahoře	T
čelisti, příložky	G	< 1x šířka od čelisti	W	vlevo	L
boční	L	střed měřené oblasti	G	vpravo	R
mnohonásobný mód	M(x,y,z)	vícenásobná	M	střed	M
podélné štěpení	S	různé	V	různé	V
výbušný	X	neznámé	U	neznámé	U
ostatní	O				

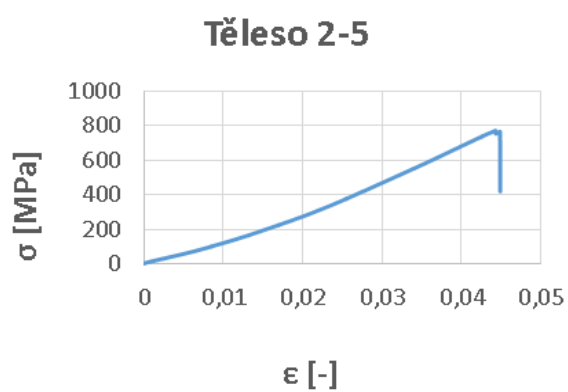
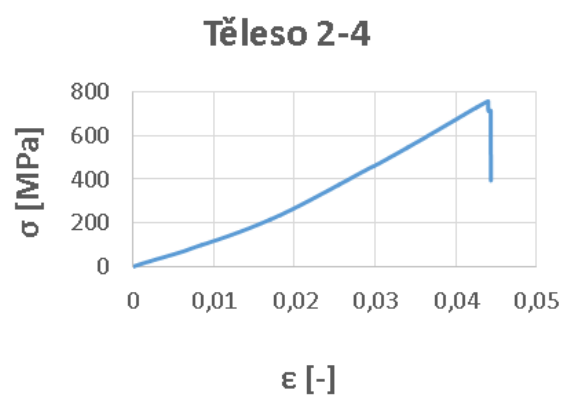
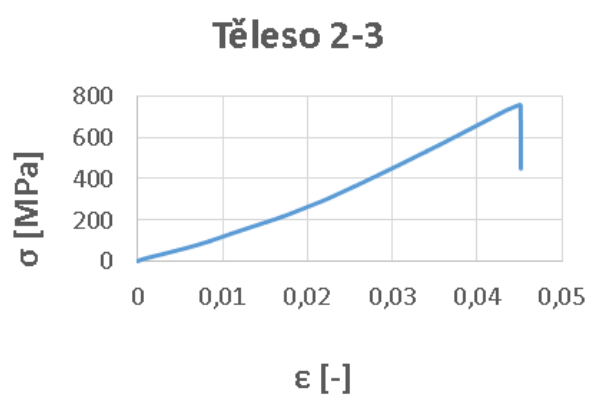
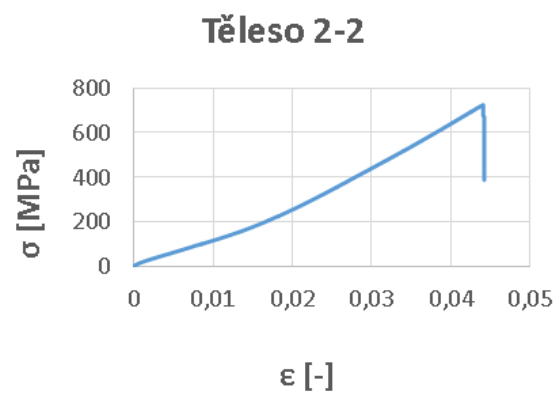
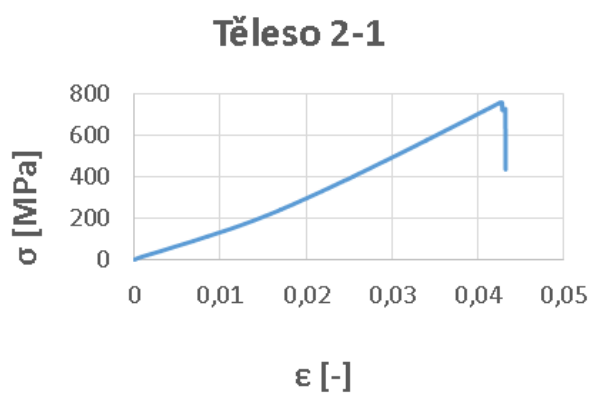
Tab. 14 Identifikační kódy porušení ohybových těles [27]

První znak		Druhý znak		Třetí znak	
Typ poruchy	Kód	Oblast poruchy	Kód	Umístění poruchy	Kód
Tah	T	Na zatěžujícím válečku	A	Horní část	T
Tlak	C	Mezi zatěžujícími válečky	B	Dolní část	B
Vyboulení	B	Na podpěrách	S	Vlevo	L
Interlaminární smyk	S	Mezi podpěrou a zatěžujícím válečkem	L	Vpravo	R
Vícenásobný	M(x,y,z)	Neznáma	U	Uprostřed	M
Jiné	O			Různé	V
				Neznámé	U

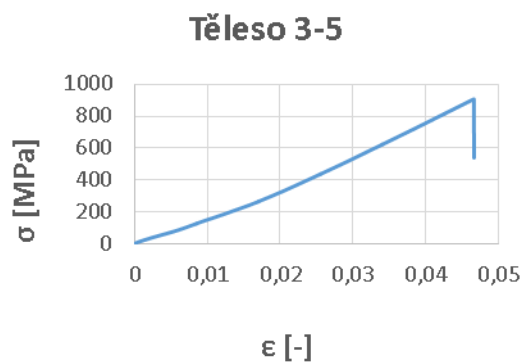
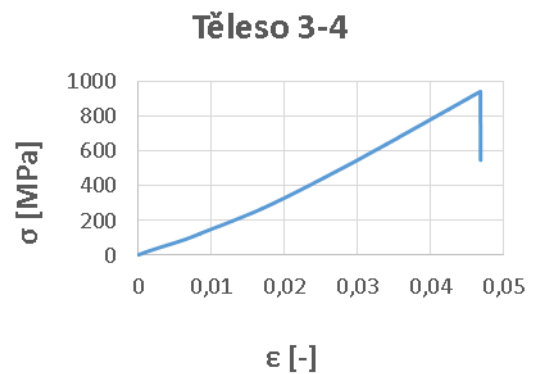
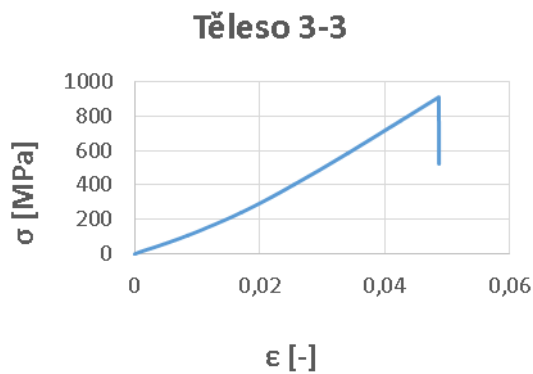
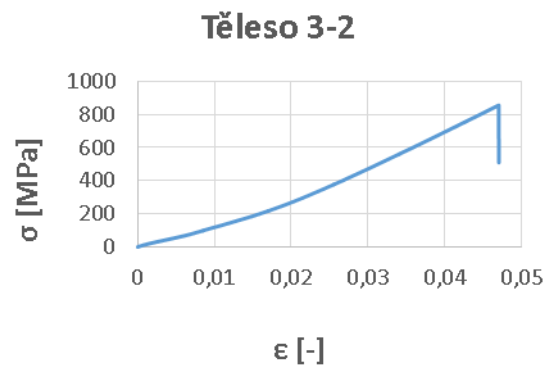
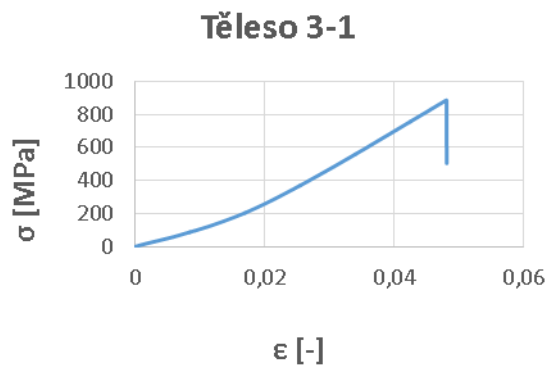
c) Tahové diagramy jednotlivých zkušebních těles



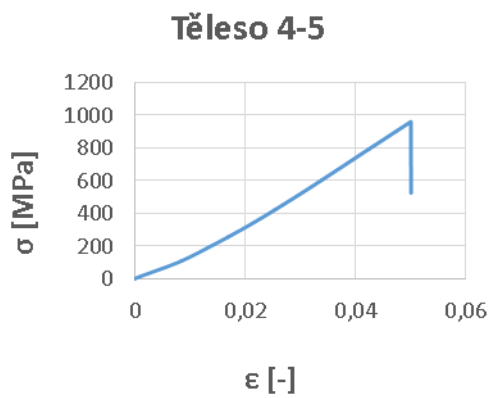
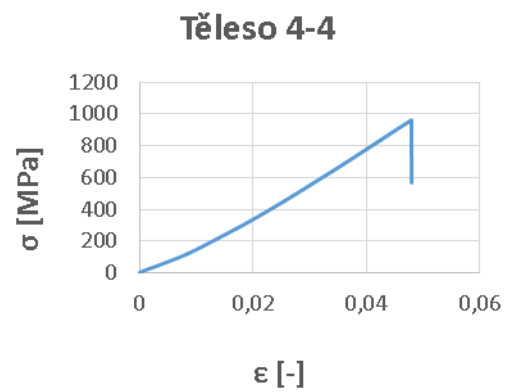
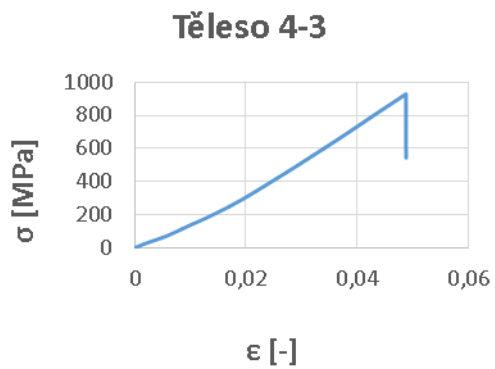
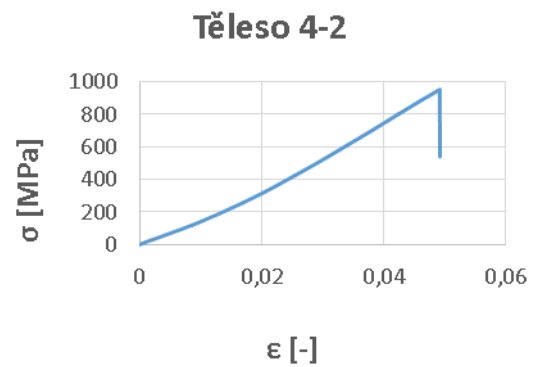
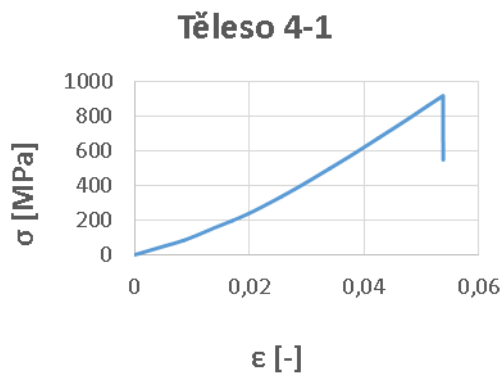
Graf 13 Diagram ze zkoušky tahem sada 1



Graf 14 Diagram ze zkoušky tahem sada 2

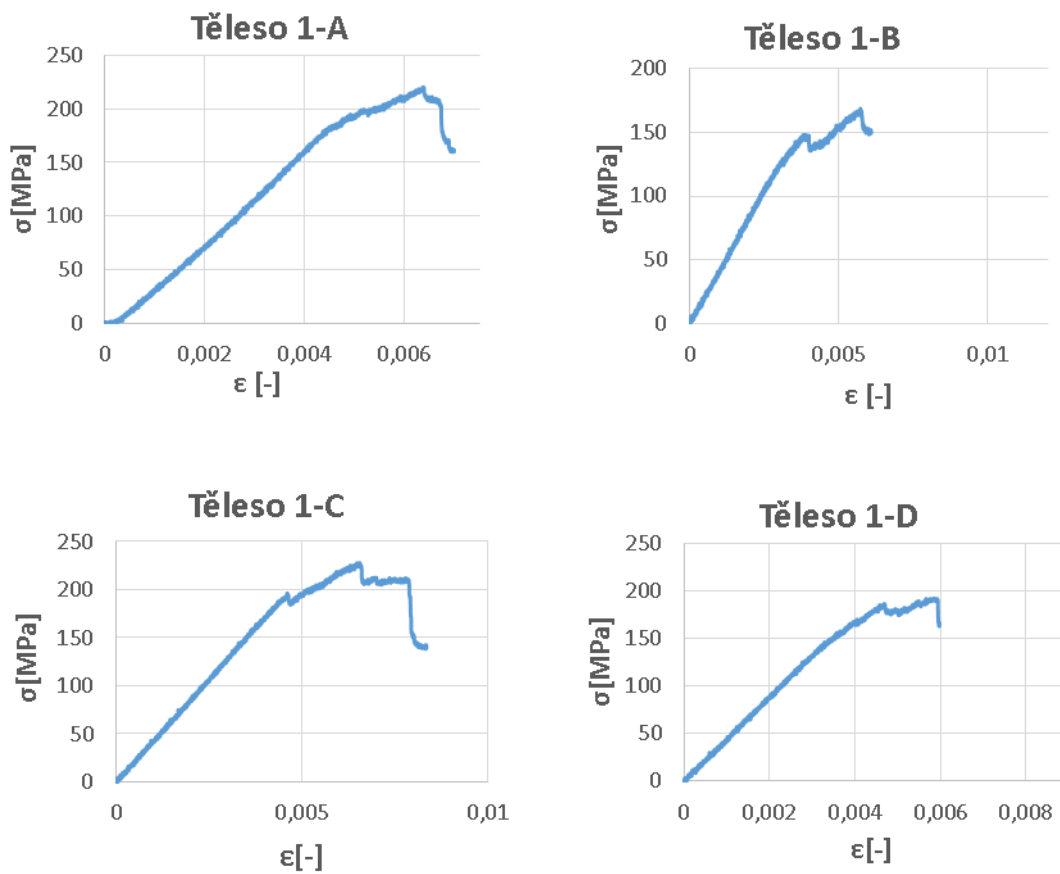


Graf 15 Diagram ze zkoušky tahem sada 3

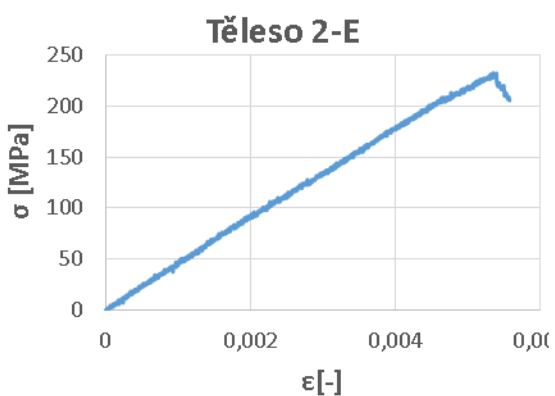
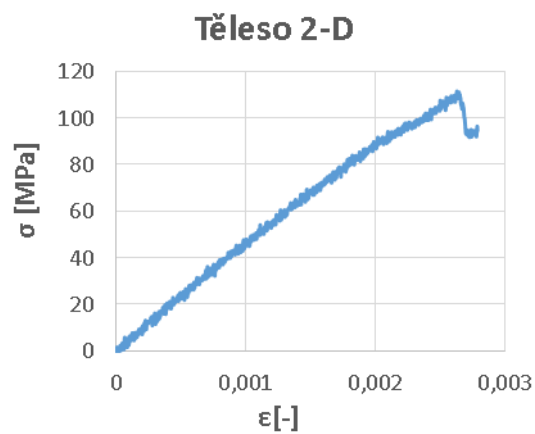
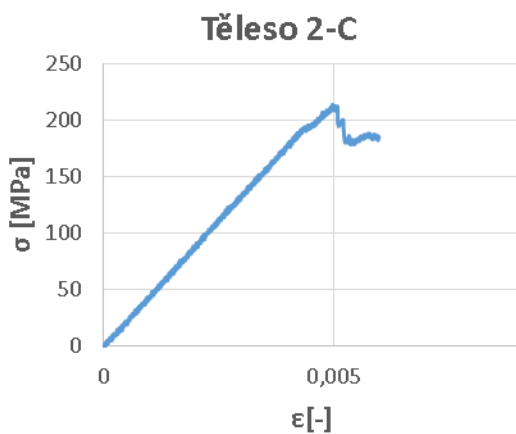
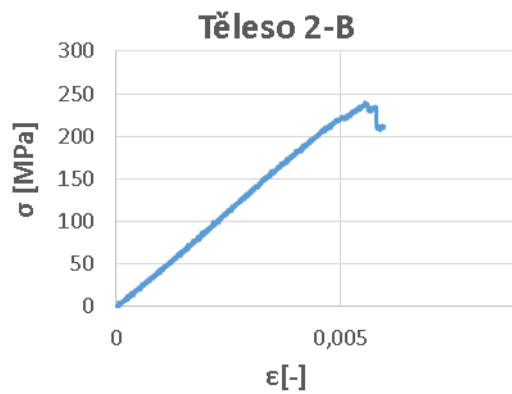
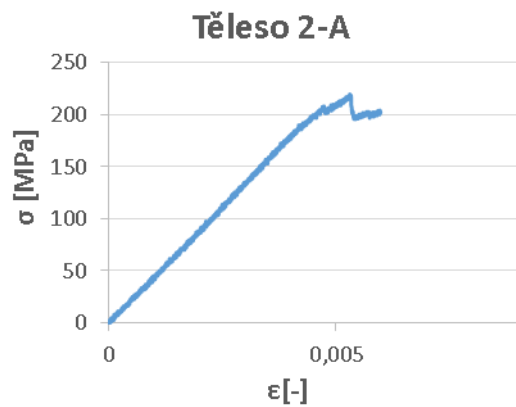


Graf 16 Diagram ze zkoušky tahem sada 4

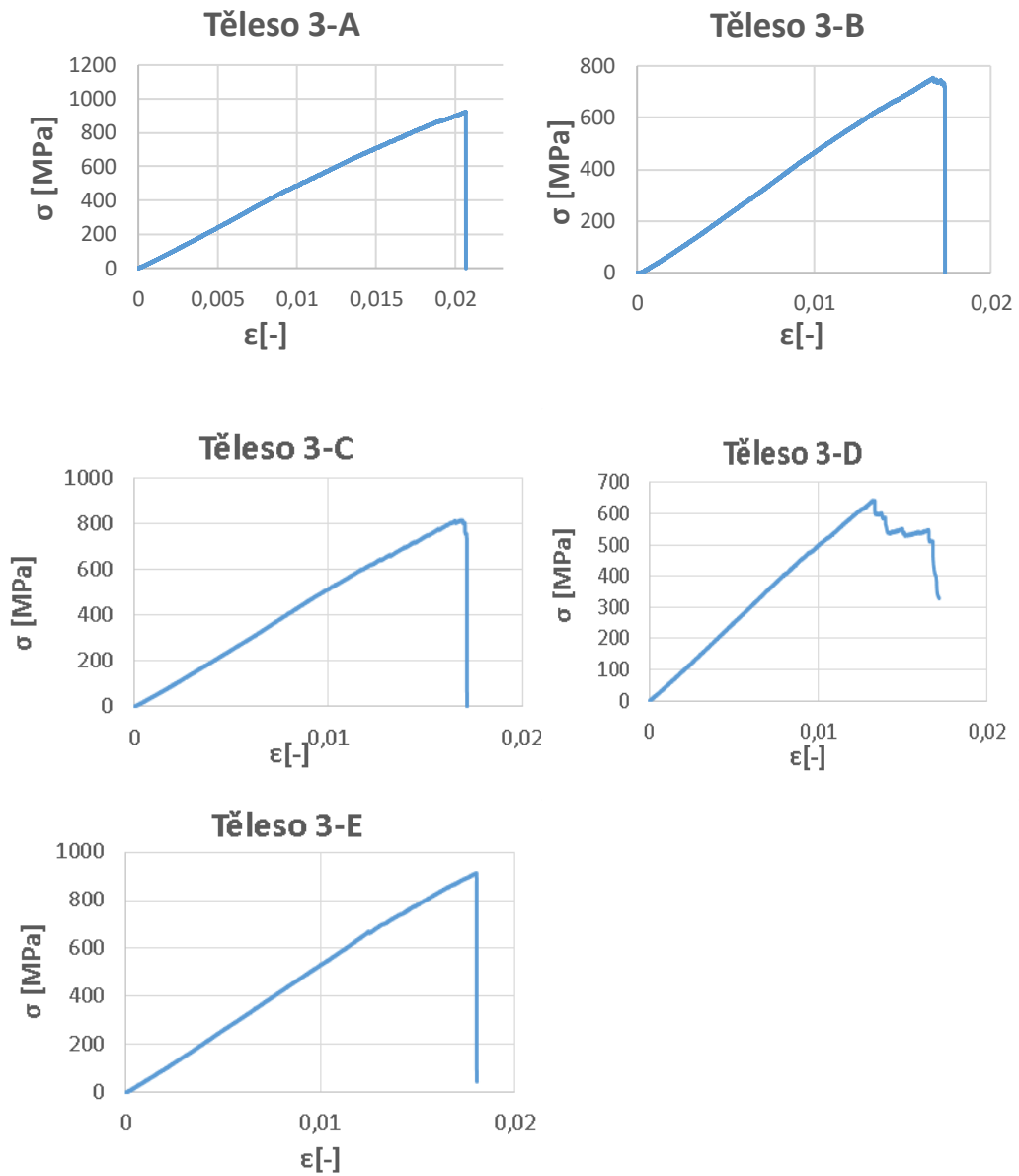
d) Diagramy ze zkoušky ohybem jednotlivých zkušebních těles



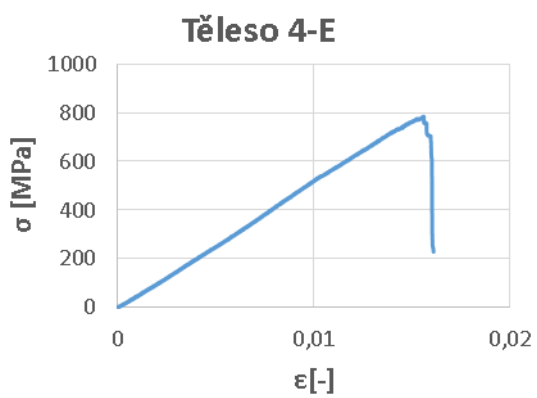
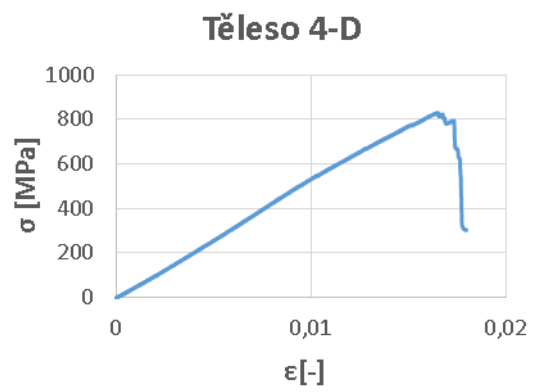
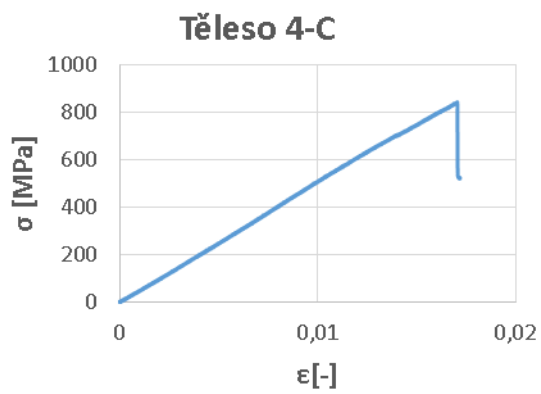
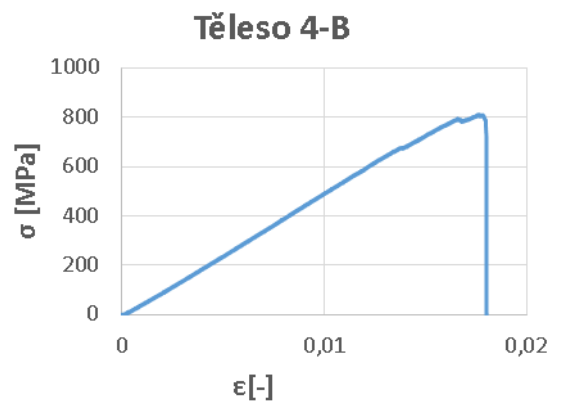
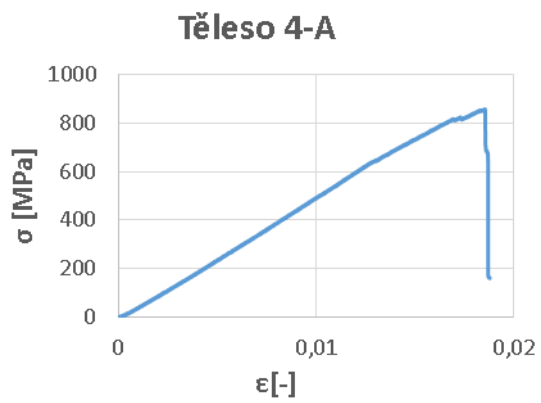
Graf 17 Diagram ze zkoušky ohybem sada 1



Graf 18 Diagram ze zkoušky ohybem sada 2



Graf 19 Diagram ze zkoušky ohybem sada 3



Graf 20 Diagram ze zkoušky ohybem sada 4