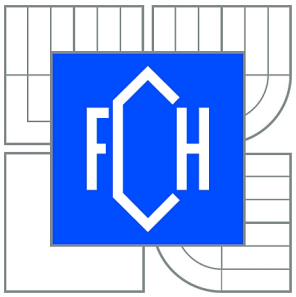
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

MECHANICKÁ ODEZVA DLOUHÝMI VLÁKNY VYZTUŽENÉHO POLYMERNÍHO KOMPOZITU

MECHANICAL RESPONSE OF LONG-FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. NINA ŠKRINIAROVÁ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. RNDr. VLADIMÍR ČECH, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání diplomové práce

Číslo diplomové práce:	**FCH-DIP0780/2013**	Akademický rok: **2013/2014**
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	**Bc. Nina Škriniarová**	
Studijní program:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (N2820)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808T016)	
Vedoucí práce	**prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D.**	
Konzultanti:		

Název diplomové práce:

Mechanická odezva dlouhými vlákny vyztuženého polymerního kompozitu

Zadání diplomové práce:

-Literární rešerše z vlákny vyztužených polymerních kompozitů, jejich smykových a ohybových zkoušek
-Praktické zvládnutí technologie přípravy kompozitních vzorků
-Smykové a ohybové testy kompozitů s povrchově neupravenými a průmyslově upravenými vlákny
-Vyhodnocení reprodukovatelnosti výsledků a posouzení vlivu povrchových úprav vláken na mechanickou odezvu

Termín odevzdání diplomové práce: 9.5.2014

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu diplomové práce. Toto zadání je přílohou diplomové práce.

Bc. Nina Škriniarová Student(ka)	prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D. Vedoucí práce	prof. RNDr. Josef Jančář, CSc. Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2014

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na sledování mechanické odezvy dlouhými vlákny vyztuženého polymerního kompozitu. Součástí této práce byla příprava testovacích tělísek polymerního kompozitu, jehož matrice byla vyztužena komerčně upravenými skleněnými vlákny a pro porovnání byla připravena i tělíska z povrchově neupravených skleněných vláken. Kromě přípravy tělísek obsahujících dlouhá skleněná vlákna byla připravena i tělíska obsahující dlouhá uhlíková vlákna. Pro sledování mechanické odezvy připravených kompozitních tělísek byla použita smyková a ohybová zkouška. Mechanická odezva připravených tělísek byla vyhodnocena pomocí univerzálního testovacího přístroje ZWICK Z010 a data byla zpracována a vyhodnocena v programu OriginPro 8. Díky vyhodnocení mechanické odezvy připravených testovacích tělísek byla posouzena adheze na rozhraní vlákno-matrice. Posouzením této mechanické odezvy respektive adheze lze posoudit i efektivitu komerční povrchové úpravy vláken a standardizovat měření pro porovnání dalších možností povrchových úprav.

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on monitoring of mechanical response of long-fiber reinforced polymer composite. Main part of this thesis was preparation of long-fiber reinforced composite specimens, on which matrix was reinforced by commercially sized glass fibers. For comparison of properties were prepared specimens reinforced by unsized glass fibers. Apart from preparing specimens reinforced by long glass fibers were prepared specimens contains long carbon fibers. For evaluation of mechanical response of the prepared composite specimen were used flexural test and short beam shear test. Mechanical response was evaluated with universal testing machine ZWICK Z010 and data were processed in OriginPro 8 program. Thanks to evaluation of the mechanical response of the prepared specimens was assessed adhesion to fiber-matrix interface. By examining the mechanical response or adhesion can be assessed efficiency of commercial fiber surface treatment and so standardize measurement to compare other options of surface treatments.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polymerní kompozit, dlouhá vlákna, skleněná vlákna, uhlíková vlákna, mezifáze, adheze

KEY WORDS

Polymer composite, long fibers, glass fibers, carbon fibers, interface, adhesion

ŠKRINIAROVÁ, N. *Mechanická odezva dlouhými vlákny vyztuženého polymerního kompozitu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2014. 67 s. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně, a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího práce a děkana FCH VUT.

……
podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala především vedoucímu své diplomové práce Prof. RNDr. Vladimíru Čechovi Ph.D. za předávání cenných zkušeností a odborné vedení v průběhu celého studia. Za odbornou pomoc při testování a přípravě kompozitních vzorků bych ráda poděkovala také Ing. Antonínu Knobovi. Práce byla podpořena projektem TA01010796.

OBSAH

1. Úvod ... 6
2. TEORETICKÁ ČÁST ... 7
2.1 Kompozitní materiály ... 7
2.2 Polymerní kompozitní materiály ... 8
2.3 Vláknové výztuže ... 9
2.3.1 Skleněná vlákna ... 9
2.3.2 Uhlíková vlákna ... 15
2.4 Matrice ... 17
2.5 Mezifáze ... 18
2.6 Testy mechanických vlastností kompozitů ... 20
2.6.1 Pull out test ... 21
2.6.2 Fragmentační test ... 22
2.6.3 Smykový test (short-beam shear) ... 22
2.6.4 Ohybový test ... 22
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST ... 24
3.1 Materiály ... 24
3.2 Příprava kompozitních materiálů ... 26
3.2.1 Příprava zkušebních těles pro smykovou zkoušku ... 28
3.2.2 Příprava zkušebních těles pro ohybovou zkoušku ... 29
3.3 Mechanické zkoušky ... 30
3.3.1 Univerzální testovací přístroj ZWICK Z010 ... 30
3.3.2 Smyková zkouška ... 31
3.3.3 Ohybová zkouška ... 33
4. VÝSLEDKY A DISKUZE ... 36
4.1 Smyková zkouška ... 36
4.1.1 Skleněná vlákna ... 36
4.1.2 Uhlíková vlákna ... 45
4.1.3 Odstraňování průmyslové povrchové úpravy uhlíkových vláken ... 49
4.1.4 Shrnutí výsledků smykového testu pro všechny použité typy výztuží ... 49
4.2 Ohybová zkouška ... 50
4.2.1 Skleněná vlákna ... 51
4.2.2 Uhlíková vlákna ... 59
4.2.3 Shrnutí výsledků ohybového testu pro všechny použité typy výztuží ... 63
5. ZÁVĚR ... 64
6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ ... 65
7. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ ... 67

1. ÚVOD

Kompozity dnes tvoří velkou, rychle se rozvíjející skupinu materiálu. Jejich užití je široké a v mnoha aplikacích nahrazují konvenční materiály, jako jsou kov, dřevo a keramické materiály. Kompozity nahrazují konvenční materiály zejména díky svým lepším užitným vlastnostem, jako jsou vysoká chemická odolnost, vysoká mechanická odolnost, lepší zpracovatelnost a nezřídka kdy hlavně díky menší výrobní ceně. Použití kompozitních materiálů je rozšířeno v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, při výrobě hudebních nástrojů a v mnoha dalších odvětvích. Například u dražších aut už je dnes standardem podvozek z kompozitního materiálu. Tyto materiály se dostávají do každodenního života a většina populace už o materiálovém pokroku ani nepřemýšlí a bere jej za samozřejmost. Většinový názor populace se řídí cenou výrobku a jeho životností. Zvyšující se nároky na kompozitní materiály v mnoha odvětvích průmyslu s sebou musí nutně nést i potřebu dalšího rozvoje těchto materiálů a také odkrytí jejich dalších užitných vlastností.

Tato diplomová práce se zabývá polymerními kompozitními materiály vyztuženými dlouhými vlákny. Mechanická odezva připravených zkušebních těles bude posouzena pomocí smykových a ohybových testů. Tento konkrétní materiál má využití zejména ve výrobním procesu pultruze. Díky dnes už běžně dostupným skleněným vláknům, která patří k průmyslově nejvyužívanějším, a také levnějším typům materiálu se výrobní náklady takovýchto pultrudovaných dílů či výrobků snižují. Druhým důležitým parametrem technického vývoje materiálů je i zvyšování užitných vlastností respektive mechanické odolnosti. Tento parametr lze u polymerních kompozitních materiálů ovlivňovat pomocí rozhraní matrice-vlákno materiálu. Čím lepší je na tomto rozhraní adheze, tím je lepší v tomto materiálu vyztužující efekt. V dnešní době se povrch skleněných vláken komerčně upravuje, aby se zajistila co nejlepší adheze. Je cílem dalšího rozvoje nalézt co nejvhodnější povrchovou úpravu těchto vláken, kdy bude vysoká adheze na rozhraní vlákno-matrice a mechanické vlastnosti povrchově upravených skleněných vláken se přiblíží hodnotám dražších vláknových výztuží s lepšími mechanickými vlastnostmi.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Kompozitní materiály

Kompozit je materiál, který kombinuje dvě a více komponent s výrazně se lišícími fyzikálními vlastnostmi. Kompozit je tvořen jednou nebo více nespojitými fázemi, ponořenými ve fázi spojité. Nespojitá fáze je obvykle tužší a pevnější než spojitá fáze a nazývá se výztuž. Spojitou fázi nazýváme matrice. Rozlišujeme několik typů odlišných kompozitních materiálů. Základní dělení kompozitů je podle druhu matrice. Rozlišujeme tedy polymerní kompozity, kovové kompozitní materiály a keramické kompozitní materiály. Mnoho kompozitů využívaných v průmyslu má polymerní matrici. Tato matrice může být termoplastická nebo termosetická. Tyto polymerní matrice jsou často vyztuženy keramickými případně skleněnými či uhlíkovými vlákny.

Polymerní kompozitní materiály běžně vykazují anizotropní chování, které je způsobeno odlišnými vlastnostmi matrice a výztuže. Zatímco polymerní matrice je složka, která je houževnatější, výztuž vykazuje větší pevnost. Další skupinou kompozitních materiálů jsou kompozity obsahující částice či krátká vlákna v kovové matrici. Příkladem tohoto kompozitního materiálu jsou například kompozity s hliníkovou matricí vyztužené krátkými keramickými vlákny. Poslední skupinou kompozitů jsou ty s keramickou matricí. Příklady struktur tří základních skupin kompozitních materiálů nalezneme na obrázku 2.1 [1].

Obrázek 2.1: Schematická reprezentace polymerního, kovového a keramického kompozitního materiálu [1]

2.2 Polymerní kompozitní materiály

Polymerní kompozity jsou tedy heterogenní systémy skládající se z matrice termoplastické nebo termosetické a mohou být vyztuženy krátkými nebo dlouhými vlákny či plněny částicovým plnivem. Jednotlivé fáze se stýkají na mezifázovém rozhraní.

Polymerní kompozitní materiály tvoří běžnou a důležitou třídu inženýrských materiálů a využívají se v široké škále aplikací. Výběr složení a struktury kompozitu pro konkrétní aplikaci není jednoduchá záležitost. Základem porozumění mechanickému chování kompozitního materiálu je koncept přenosu zatížení mezi matricí a výztuží [1].

Vnější zatížení musí být rovno sumě průměrných zatížení, které nesou všechny složky (matrice a vlákna). To vede k podmínce [1]:

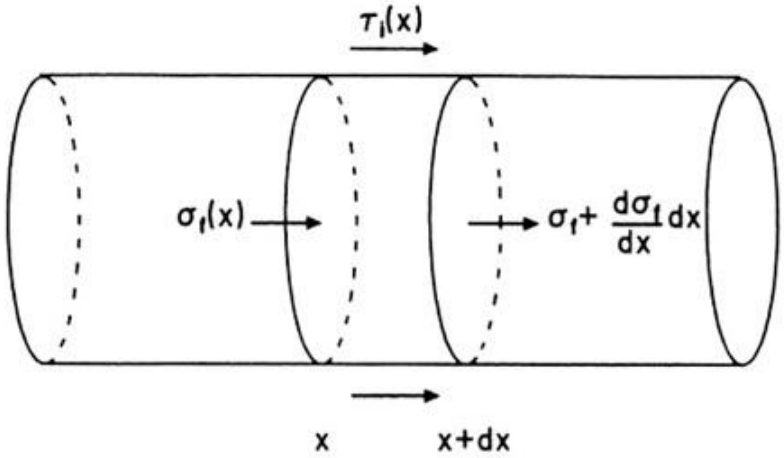
$$f\bar{\sigma}_m + (1-f)\bar{\sigma}_f = \sigma_\Lambda \qquad (1)$$

upravující napětí matrice a vláken $(\bar{\sigma}_m, \bar{\sigma}_f)$ v kompozitu při použití vnějšího napětí $\bar{\sigma}_\Lambda$, obsahující objemový podíl výztuže *f*.

U jednoduchých dvousložkových kompozitů, na které je aplikováno napětí, budou určitý podíl napětí nést vyztužující vlákna a zbylé napětí bude přenášeno na matrici. Za předpokladu, že odezva kompozitu bude mít elastický charakter, tento podíl přenášeného napětí bude záviset na aplikovaném napětí, což představuje důležitou charakteristiku materiálu. Záleží na objemovém podílu, tvaru a orientaci výztuže a na elastických vlastnostech jak matrice, tak výztuže.

Výztuž může být považována za efektivní, jestliže nese relativně vyšší podíl vnějšího aplikovaného napětí. Ve srovnání s matricí má tedy výztuž mnohem vyšší pevnost a modul pružnosti, zatímco matrice vykazuje vysokou houževnatost a dodává potřebný užitný tvar kompozitnímu materiálu. Uvažujme jedno krátké vlákno o průměru *d* bez matrice. Jestliže je aplikováno homogenní napětí na matrici rovnoběžné s osou vlákna, zatížení je pak přenášeno na vlákna pomocí mezifázového smykového napětí, obrázek 2.2. Smykové napětí se projevuje ve směru osy vlákna, a v důsledku toho se axiální napětí uvnitř vlákna liší. V případě malých deformací způsobených tahem ve směru osy vlákna (osy *x*) je napětí ve vlákně *x*, σ_f (*x*) a mezifázové smykové napětí působící na povrch vlákna τ_i (*x*) spojeno s řešením rovnice bilance sil, která má tento tvar [2]:

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{4}{d} \cdot \tau_i \qquad (2)$$



Obrázek 2.2: Znázornění napětí aplikovaného na kompozit, kdy je napětí přenášeno na vlákna přes mezifázové smykové napětí [2]

Kompozitní materiály obsahující výztuž lze rozdělit na krátkovláknové a dlouhovláknové kompozitní materiály. Vlastnosti krátkovláknových kompozitů velmi závisí na objemovém podílu vláken, orientaci vláken a na jejich distribuci. U kompozitních materiálů vyztužených vlákny je často používána veličina nazvaná aspektní poměr ξ, což je podíl délky a průměru vlákna. U krátkovláknových kompozitních materiálů je tento aspektní poměr menší než 100. U kompozitních materiálů, jak již bylo zmíněno, není napětí zaváděno přímo do matrice, ale přenášeno do vláken a to jak prostřednictvím konců vláken, tak také válcovým povrchem vlákna v okolí jeho konců. Proto nemohou být účinky konců vláken zanedbány. Z toho vyplývá, že vlastnosti krátkovláknového kompozitu jsou funkcí délky vlákna. Pevnost vláken tedy roste se zmenšujícím se průřezem, protože přirozený počet defektů se také zmenšuje [3].

Naproti tomu dlouhovláknové kompozity mají aspektní poměr $\xi > 100$ a vyznačují se především vysokou adhezí na rozhraní vlákno – matrice. Nositelem pevnosti jsou u dlouhovláknových kompozitů vyztužující vlákna a matrice je naopak houževnatou složkou kompozitního materiálu. Vyztužující vlákna mají o jeden až dva řády vyšší pevnost než je tomu u matrice, protože vlákna se při vnějším namáhání deformují méně než polymer [4, 5].

2.3 Vláknové výztuže

Pro kompozitní materiály se jako výztuže používají převážně anorganické materiály, jako jsou skleněná ale i uhlíková vlákna. Anorganické materiály samozřejmě netvoří jedinou skupinu vláknových výztuží. Používají se i organické výztuže jako jsou například aramidová vlákna (nejznámější pod obchodním názvem Kevlar®) nebo vlákna polyethylnová. Důležitým parametrem pro využití vláknových výztuží je také jejich povrchová úprava. Povrchové úpravy či jejich metody jsou rozhodující pro výsledné vylepšení materiálových vlastností, ale nejvíce odolnosti. Pro jednotlivé druhy matric jsou tyto úpravy odlišné [6].

Kompozitní materiály vyztužené vlákny představují radikální přístup k navrhování strukturních materiálů, ve srovnání s tradičními materiály jako jsou kovy a keramické materiály. Ačkoli živý svět, tedy jeho obě struktury – rostlinná i živočišná jsou založeny na materiálech obsahujících vyztuženou matrici flexibilními vlákny, byl vývoj tohoto odvětví odstartován, až když se kolem roku 1930 začaly vyrábět organické pryskyřice a v tom samém desetiletí i syntetická vlákna. Další velký rozvoj nastal až v 2. polovině 20. století. [7].

Komerční vlákna jsou vždy vyráběna ve svazcích čítajících několik stovek vláken až po několik tisíců vláken ve svazku. Tedy vlákny vyztužený polymer obsahuje svazky paralelních vláken, to znamená, že vlastnosti těchto vyztužených kompozitů jsou v podstatě anizotropní jak na mikroskopické úrovni, tak na makroskopické úrovni [8].

2.3.1 Skleněná vlákna

Féničtí a egyptští řemeslníci byli prvními, kteří tažením hrubých vláken z roztaveného skla vyrobili první skleněná vlákna, která byla později navíjena na vřetena. Tyto vlákna byla poté používána pro přikrášlení skleněných nádob nebo byla smíchána s v přírodě se vyskytujícími se pryskyřicemi pro výrobu užitných, dekorativních či uměleckých předmětů. Dnes však nelze porovnávat kvalitu tehdejších a dnešních skleněných vláken. Dnes na trhu skleněná vlákna dominují z důvodu jejich univerzálnosti, proto také tvoří podstatnou komponentu mnoha materiálů užívaných v každodenním životě [9].

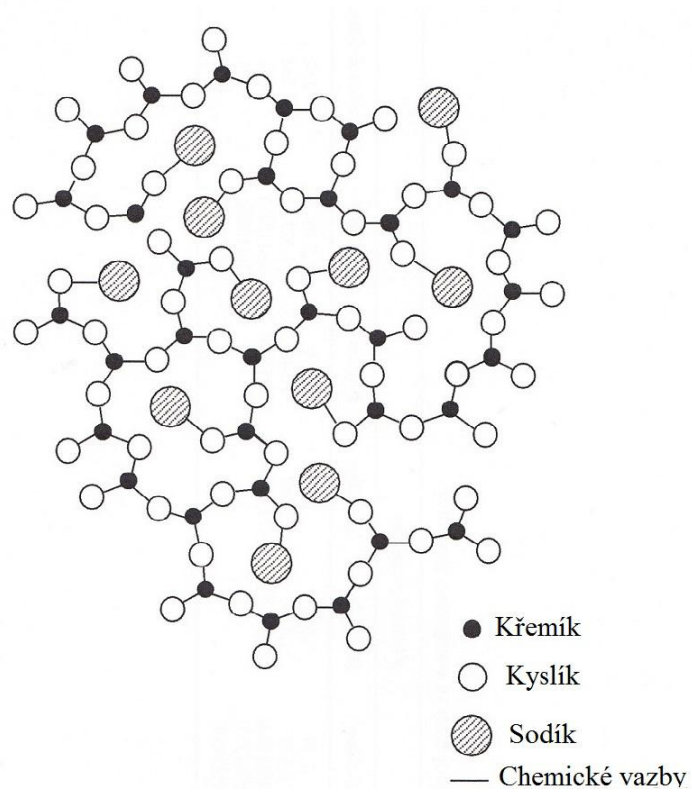
Například pro potřebu trhu byla vyvinuta skleněná vlákna s nízkou elektrickou vodivostí pro desky plošných spojů. Tato vlákna byla z vápenato-hlinito-borokřemičitého skla s maximálním obsahem alkálií 2 %. Tento typ skleněných vláken je dnes značen, jako typ vláken E. Došlo také k obchodní a technické specifikaci vláken, jejichž vlastnosti byly poté standardizovány, např. MilSpec, R-60 346, ASTM C162.

A-sklo je sklo sodno-vápenato-křemičité a jeho výroba je levnější, než výroba E-skla. Díky tomu, že A-sklo neobsahuje bór, tak má mnohem nižší výrobní teplotu. Má však, ale horší elektrické vlastnosti. D-sklo je sklo boro-křemičitého složení. Toto sklo bylo vyvinuto pro nejvýkonnější elektrické aplikace, proto má nízkou dielektrickou konstantu. ECR-sklo má podobné vlastnosti jako E-sklo, ale je více odolné vůči kyselému prostředí. ECR-skla má vápenato-hlinito-křemičité složení s maximálním obsahem alkálií 2 %. AR-sklo je alkalické a má zirkono-křemičité složení. Tento typ skla má větší alkalickou odolnost při použití jako betonové či cementové výztuže. S-sklo má hořečnato-hlinito-křemičité složení, díky čemuž dosahuje kombinaci nejlepších mechanických, teplotních a chemických vlastností ze všech komerčních vláken. Specifické složení, včetně procentuálního obsahu všech oxidů je uvedeno v tab. 2.1.

Tab. 2.1: ***Složení oxidů v komerčních skleněných vláknech [10]***

Oxid	*A-sklo* (%)	*C-sklo* (%)	*D-sklo* (%)	*E-sklo* (%)	*ECR-sklo* (%)	*AR-sklo* (%)	*R-sklo* (%)	*S-2-sklo* (%)	*E-sklo bez bóru* (%)
SiO_2	63–72	64–68	72–75	52–56	54–62	55–75	55–65	64–66	52–62
Al_2O_3	0–6	3–5	0–1	12–16	9–15	0–5	15–30	24–25	12–16
B_2O_3	0–6	4–6	21–24	5–10		0–8			
CaO	6–10	11–15	0–1	16–25	17–25	1–10	9–25	0–0.1	16–25
MgO	0–4	2–4		0–5	0–4		3–8	9.5–10	0–5
ZnO					2–5				
BaO		0–1							
Li_2O						0–1.5			
$Na_2O + K_2O$	14–16	7–10	0–4	0–2	0–2	11–21	0–1	0–0.2	0–2
TiO_2	0–06			0–1.5	0–4	0–12			0–1.5
ZrO_2						1–18			
Fe_2O_3	0–0.5	0–0.8	0–0.3	0–0.8	0–0.8	0–5		0–0.1	0–0.8
F_2	0–0.4			0–1		0–5	0–0.3		0–1.0

Oxid křemičitý vytváří základní kovalentní strukturu, kdy křemík tvoří třídimenzionální síť vazeb Si-O, tvořenou tetraedrickým uspořádáním $[SiO_4]^{4-}$. Oxid boritý tvoří polyedrickou strukturu a připojuje se ke křemičité síti. Další oxidy (Al_2O_3, TiO_2, ZrO_2) poskytující kationty, které se mohou nasubstituovat do tetraedrické struktury, přispívají k celkové stabilitě sítě. Zbylé oxidy působí jako modifikátory sítě, protože jsou pouze jedno
nebo dvojvazné a narušují strukturu kovalentní sítě. Tím zásadně snižují teplotu tání, ovlivňují viskozitně-teplotní závislost, čímž snižují výrobní problémy se zpracováním nepoddajných materiálů. Idealizovaný model amorfní atomové struktury skla můžeme vidět na obrázku 2.3 [1,10].



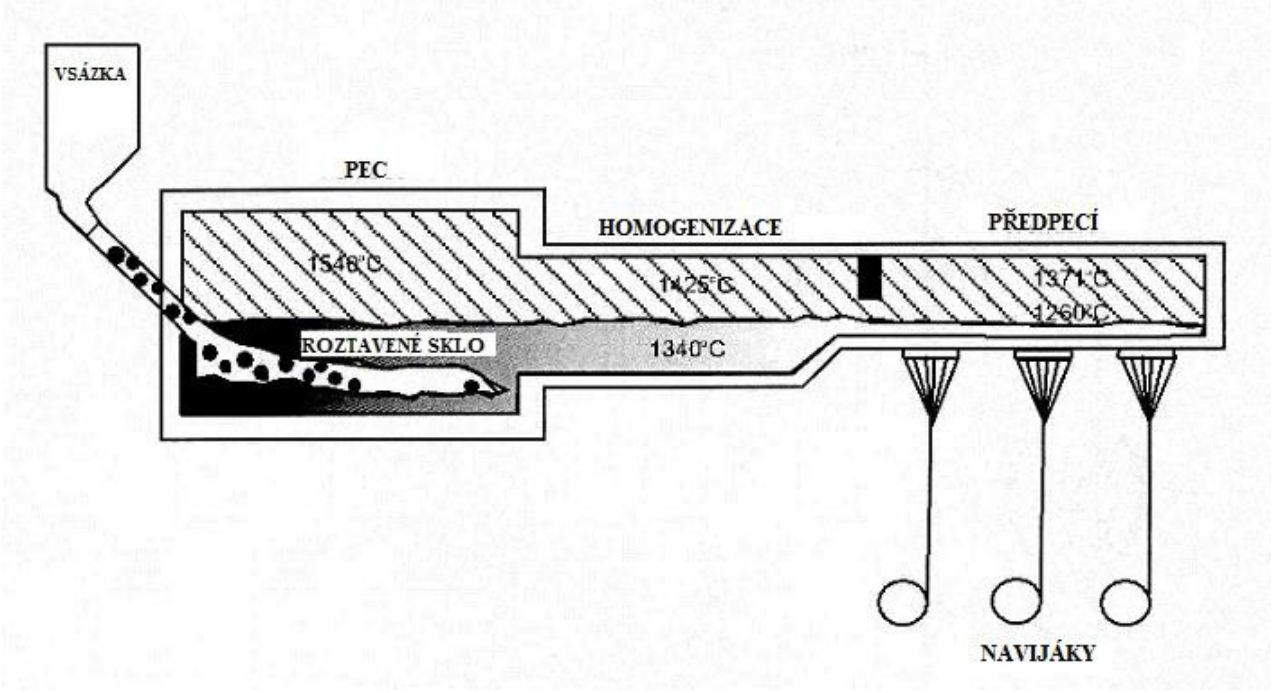
Obrázek 2.3: Znázornění idealizovaného atomového modelu amorfního skla, kdy vlastnosti skla jsou izotropní [10]

U skleněných vláken jsou vysoké hodnoty pevnosti a modulu pružnosti důsledkem silné kovalentní vazby mezi křemíkem a kyslíkem v trojrozměrné síti skloviny. Zesítěná struktura a síla jednotlivých vazeb je také závislá na použitých oxidech kovů. Skleněné vlákno nemá viskoelastické chování jako syntetická vlákna. Ani dlouhodobé trvalé tepelné namáhání při 250 °C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. Tepelná vodivost je u skleněných vláken vyšší než u ostatních materiálů, ale podstatně nižší než je tomu u kovů. Typická pevnost v tahu u vláken *E*-skla je 3 GPa. Modul pružnosti E-skla se pohybuje v rozmezí 70 – 80 GPa. Vlákno, čerstvě tažené, bez povrchových defektů disponuje pevností 3,5 GPa a tato pevnost klesá působením vzdušné vlhkosti [1, 3]. Základní mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Tab. 2.2: ***Základní mechanické vlastnosti komerčně vyráběných skleněných vláken [10]***

	A-sklo	C-sklo	D-sklo	E-sklo	ECR-sklo	AR-sklo	R-sklo	S-2-sklo	E-sklo bez bóru
Pevnost v tahu (MPa)	3310	3310	2415	3445	3445	3241	4135	4890	3450
Modul pružnosti (GPa)	68,9	68,9	51,7	72,3	72,3	73,1	85,5	86,9	80,5
Tažnost (%)	4,8	4,8	4,6	4,8	4,8	4,4	4,8	5,7	4,6

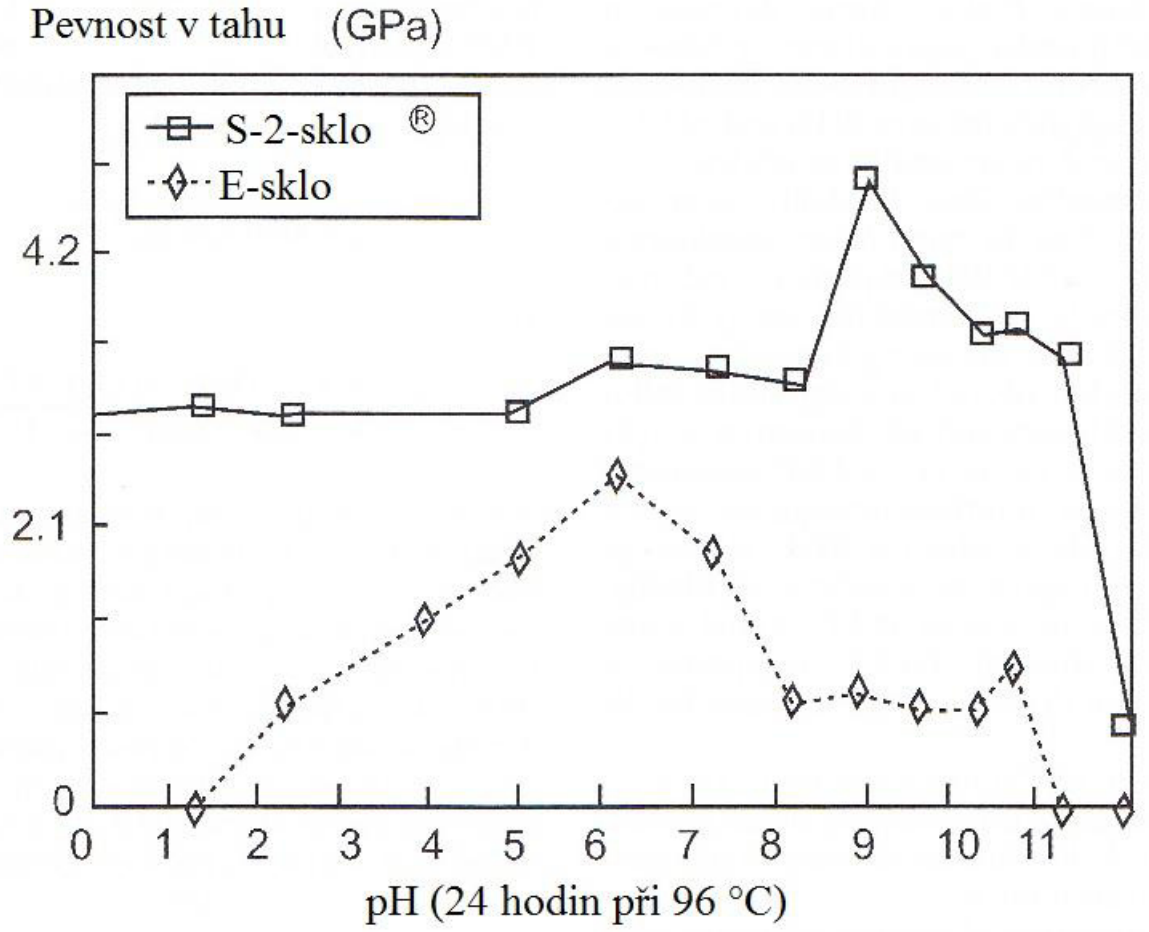
Výroba skleněných vláken probíhá tažením roztavené skloviny přes mnoho malých otvorů v desce nebo zvlákňovací mřížkou umístěnou v předpecí. Zjednodušené schéma vsázky, pece a předpecí znázorňuje obrázek 2.4.



Obrázek 2.4: Zjednodušené schéma výroby skleněných vláken [10]

Při průmyslovém zpracování skleněných vláken jsou pece konstruovány z cihel vyráběných z několika typů žáruvzdorných materiálů. Pece pro výrobu skleněných vláken se obvykle skládají ze tří zón, které jsou tavná zóna, homogenizační zóna a chladící zóna. Konečná teplota čerpání skloviny je kontrolována tak pečlivě jak je to jen možné pomocí elektricky vytápěné desky z platino-rhodiové slitiny nazvané zvlákňovací mřížka. Jedna zvlákňovací mřížka muže obsahovat 10 000 zvlákňovacích trysek. Rotační buben nebo sběrné kolo, běžně umístěné jedno podlaží pod zvlákňovací mřížkou táhne vlákna velmi vysokou rychlostí (450 – 4500 $m \cdot min^{-1}$). Jednotlivé svazky vláken jsou rychle ochlazeny rychlostí $10^4 – 10^5$ stupňů za sekundu a ihned poté dochází ke dloužení vláken. Proces dloužení také vytváří termochemickou historii materiálu, která ovlivňuje vlastnosti vyráběných vláken jako je jejich hustota, index lomu, Youngův modul pružnosti a chemickou trvanlivost vyráběných vláken.

Lze předpokládat, že povrch vlákna je bohatý na kyslík, takže na povrchu vlákna bude i vysoká koncentrace silanolových skupin (Si-OH) vzniklých z důvodu vysoké adsorpce vody na křemičitém povrchu. Měření pevnosti vláken po vystavení účinku prostředí s různým pH popisuji mechanismy snižování vláknové pevnosti po aplikaci zásaditého nebo kyselého roztoku. Hodnoty pevnosti v závislosti na době působení různých roztoků jsou uvedeny na obrázku 2.5. V kyselém prostředí dojde k rychlému odstranění kationtů jiných než křemík a k vytvoření bariéry z vyloženého skla, kdy touto bariérou je oxid křemičitý. Vytvoří se křehký pórovitý povrch, který je ochuzený o kationty. Následkem čehož dojde ke snížení pevnosti vlákna. Zásadité roztoky efektivně útočí na křemičitou síť, ale některé kovové oxidy se mohou opět vysrážet na povrch vlákna, což vede k úbytku hmotnosti. [1,3]



Obrázek 2.5: Znázornění vlivu pH na pevnost v tahu pro vlákna E-skla a S-2-skla [10]

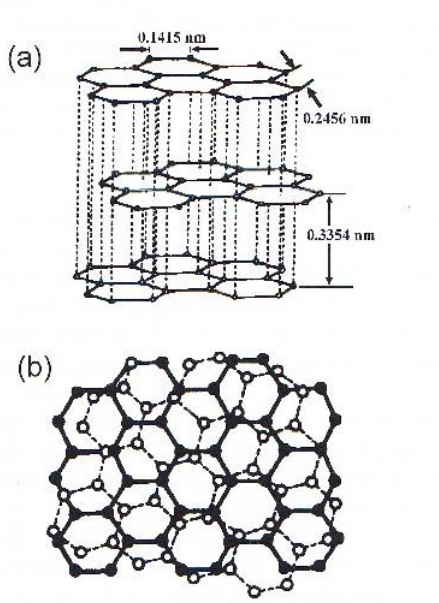
Některé oxidy ve skle jako je SiO_2, Fe_2O_3 a Al_2O_3, tvoří v přítomnosti vody vazby k hydroxylovým skupinám a tyto zase vytvářejí vodíkové vazby k molekulám vody, takže povrch skleněného vlákna velice snadno a rychle adsorbuje vodu. Časem může dojít k vylouhování např atomů Na a Ca, což má za následek vznik porézního povrchu. Dojde k tomu, že adsorbovaná voda prudce sníží povrchovou energii, což vede ke špatnému smáčení vlákna polymerní matricí. Úkolem vazebných činidel používaných při průmyslové úpravě vláken je zabránit efektu louhování a zvýšit povrchovou energii alespoň na hodnotu 40 – 50 $mJ \cdot m^{-2}$. Primární funkcí vazebních činidel je tedy pevná chemická vazba mezi oxidy na povrchu vlákna a molekulami polymeru tvořícího matrici. Nejpoužívanější jsou silanová vazební činidla s obecným chemickým vzorcem R – Si – X_3. Je to vícefunkční molekula, jejíž jeden konec reaguje s povrchem skleněného vlákna a druhý reaguje s polymerní fází. Části X představují hydrolyzovatelné skupiny, jako jsou methoxy a ethoxy. V případě že matricí je termosková pryskyřice, lze skupinu R vybrat tak, aby reagovala s pryskyřicí během polymerace, a byla tak vytvořena pevná vazba vlákno-polymer. V tabulce 2.3 jsou uvedena komerční silanová vazební činidla [5].

Tab. 2.3: ***Přehled komerčních silanových činidel [5]***

Union Carbide Silane	Dow Corning Silane	Chemical Name	Thermosetting	Thermoplastic
A-143	Z-6076	γ-Chloropropyltrimethoxysilane	Epoxy	Nylon
A-150		Vinyltrichlorosilane	Polyester	
A-151		Vinyltriethoxysilane	Polyester	
A-172		Vinyl-*tris*(β-methoxyethoxy) silane	Polyester	
A-174	Z-6030	γ-Methacryloxypropyltrimethoxysilane	Polyester, vinyl ester	Polystyrene, polyethylene, ABS, polypropylene
A-186		β-(3,4-Epoxycyclohexyl) ethyltrimethoxysilane	Polyester, epoxy	Polystyrene, polyethylene, ABS, polypropylene, SAN, nylon, TP polyester
A-187	Z-6040	γ-Glycidoxypropyltrimethoxysilane	Polyester, epoxy, melamine, phenolic	Polystyrene, ABS, SAN, nylon, TP polyester
A-188		Vinyltriacetoxysilane	Polyester	Acetal
A-189	Z-6062	γ-Mercaptopropyltrimethoxysilane	Epoxy, phenolic	
A-1100		γ-Aminopropyltriethoxysilane	Epoxy, melamine, phenolic	Nylon, polycarbonate, PVC, PP, PE, PMMA, TP polyester, PPO
A-1120	Z-6020	N-β(aminoethyl)-γ-aminopropyltrimethoxysilane	Epoxy, melamine, phenolic	Nylon, polycarbonate, PVC, PP, PE, PMMA, TP polyester, PPO
A-1160		γ-Ureidopropyltriethoxysilane	Epoxy, melamine, phenolic	Nylon, PVC
A-1111		*bis*(β-hydroxyethyl)-γ-aminopropyltriethoxysilane	Epoxy	Acetal, polycarbonate, polysulfone, nylon
A-1106		Aqueous solution of γ-aminopropyl silicone	Epoxy, melamine	Nylon
A-1128		Proprietary amino	Epoxy	
	Z-6032	Vinylbenzylamine functional silane	Epoxy, polyester	Nylon, polyolefins

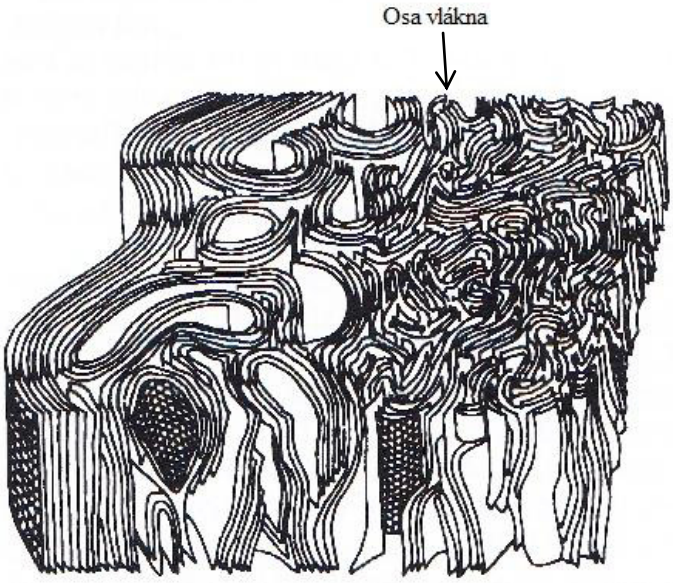
2.3.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna na bázi polyakrylonitrilu (PAN) zaujímají přední pozici mezi nejprodukovanějšími vlákny pro kompozity. Mohou být krátká nebo kontinuální, jejich struktura může být krystalická, amorfní nebo částečně krystalická. Krystalická forma má krystalickou strukturu grafitu, která se skládá z sp^2 hybridizovaných uhlíkových atomů, uspořádaných dvojdimenzionálně do hexagonálních planárních útvarů, podobných včelím plástvím.



Obrázek 2. 6: (a) Krystalická struktura grafitového krystalu. (b) Struktura turbostratického uhlíku [12].

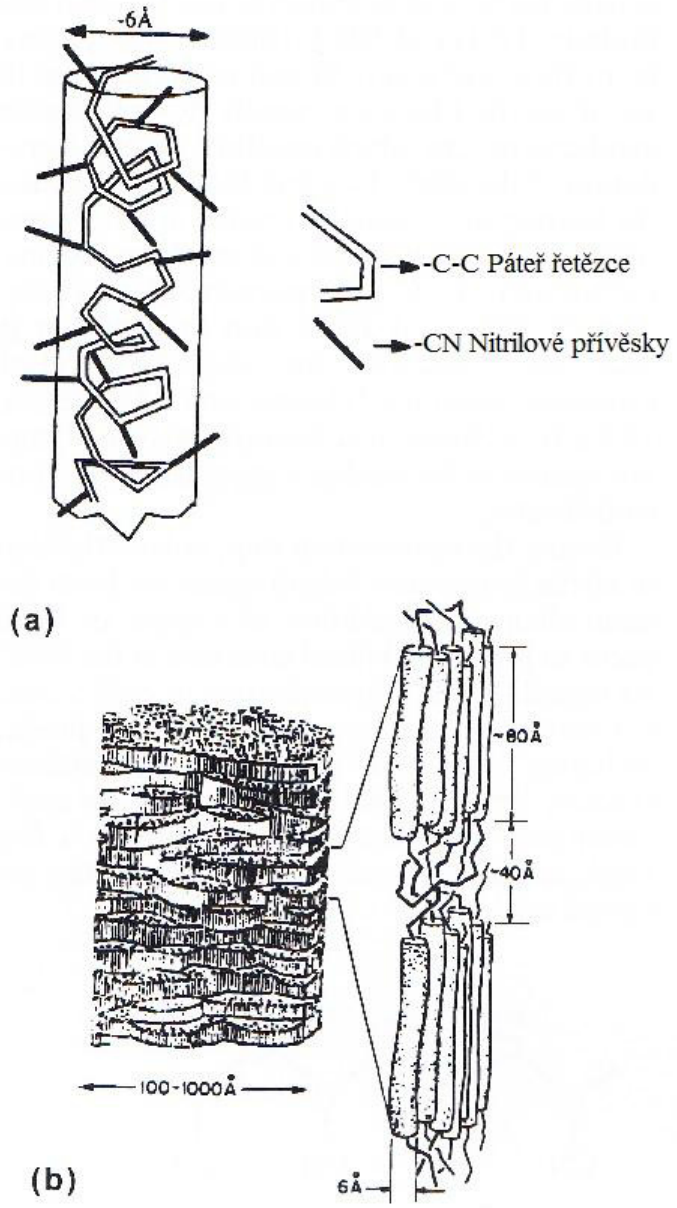
Vlastnosti uhlíkových vláken závisí na jejich struktuře, hlavně však na stupni jejich grafitizace. Struktura uhlíkových vláken je turbostatická, což znamená, že bazální roviny jsou ve směru vláken zprohýbané, jak ukazuje obrázek. 6 a 7 [11, 12, 13].



Obrázek 2.7: Schematická třídimenzionální reprezentace struktury vysokomodulových uhlíkových PAN vláken [12].

Uhlíková vlákna na bázi PAN se vyrábějí způsobem, kdy se kontinuální nitě či svazky akrylových vláken napnou a prochází řadou zón pro stabilizaci, karbonizaci a povrchovou úpravu vláken. PAN vlákna jsou použita jako prekurzory pro uhlíková vlákna, která jsou vyrobena z kopolymeru obsahujícího akrylonitril v přebytku 90 %. Pro výrobu vysokomodulových vláken (HM), se vlákna podrobí tepelnému zpracování při vysoké teplotě, těsně po ošetření karbonizací. Konečná teplota úpravy je stanovena na základě požadovaných vlastností, jako je pevnost v tahu a modul pružnosti. Podle Gupty a Harrisona (1997), intramolekulární cyklizace iniciuje amorfní části vláken kolem 200°C a vyvíjením vyšší teploty dochází k náhodné orientaci řetězců z vysoce orientované amorfní fáze, která probíhá s postupnou stabilizací. Obrázek 2.8 ilustruje strukturu PAN řetězců a morfologický model PAN vláken, kdy se intramolekulární cyklizace a náhodná orientace řetězců v amorfní fázi se šíří do krystalických oblastí při vyšších teplotách.

Samotná výroba vláken však začíná tažením PAN vláken a napínáním až do uspořádání z molekulových řetězců. Napnutá vlákna jsou zahřívána, což způsobí vyvázání nitrilový skupin a vytvoření žebříkovitého polymeru. Při dalším zahřátí v prostředí obsahujícím kyslík dojde k uspořádání vazeb mezi molekulami žebříkovitého polymeru. Oxidační stabilizace je nezbytná pro převedení vláken PAN prekurzoru na vlákna, které snesou drsné zpracování pomocí karbonizace, což je zásadní krok pro výrobu uhlíkových vláken na bázi PAN. Takto stabilizovaná vlákna jsou zahřívána, aby mohla podstoupit proces karbonizace v rozsahu teplot 1000 – 1600 ° C v dusíkové atmosféře za mírného napětí. Během procesu karbonizace uhlíkové atomy nebo řetězce ve vláknech kondenzují do uhlíkového materiálu, přičemž se zvyšuje obsah uhlíku ve vláknech, zatímco ostatní prvky jako vodík, dusík a kyslík jsou z materiálu odstraňovány prostřednictvím vyvíjení plynu. Protože jsou téměř všechna uhlíková vlákna na bázi PAN používána jako výztuž kompozitních materiálů, je zapotřebí povrchové úpravy vláken. Pro zajištění adheze vláken k matrici se používá povrchová úprava pomocí anodické oxidace nebo úprava pomocí plazmatu. Pokud je ale použita anorganická matrice, tak je vhodnější povrchovou úpravou pro uhlíková vlákna keramický povlak [12].



Obrázek 2.8: (a) Nepravidelná spirálovitá struktura PAN řetězců. (b) Morfologický model PAN vláken ilustrující uspořádané a neuspořádané oblasti [11].

2.4 Matrice

Při srovnání s kovovými slitinami vykazují polymerní matrice při zvýšených teplotách horší vlastnosti jako pevnost, tuhost, houževnatost. Polymerní matrice jsou často považovány za slabý článek v kompozitním materiálu, protože vlastnosti a druh matrice často určují provozní teploty kompozitních dílů. Polymerní matrice jsou rozděleny do dvou hlavních kategorií, kterými jsou termoplasty a termosety. Tyto dvě hlavní kategorie se liší ve svých intramolekulárních vazbách a výsledné struktuře.

Termoplasty se skládají z dlouhých uhlovodíkových molekul, které spolu drží pohromadě slabými van der Wallsovými silami a mechanickými zapleteninami řetězců. Sekundární vazby jsou mnohem slabší než primární kovalentní vazby, a proto mohou být termoplasty jednodušeji roztaveny při zvyšující se teplotě. Velký nárůst teploty může také rozplést mechanické spleteniny, ale na druhou stranu, se zvýší mobilita řetězců. Termoplasty se

mohou opakovaně formovat opětovným zahřátím a zvýšením teplot, při které polymer taje. Jestliže je uspořádání molekul náhodné jak v pevném stavu, tak když je polymer roztaven, nazývá se termoplast amorfním. Jestliže polymer tuhne z taveniny a jeho molekuly se uspořádají do pravidelné struktury, nazýváme výsledný polymer semikrystalickým. Stupeň krystalinity polymerů záleží na rychlosti chlazení. Stupeň krystalinity se zvyšuje spolu s pomalejší teplotou chlazení taveniny polymeru. Amorfní termoplasty jsou obecně tužší než ty semikrystalické.

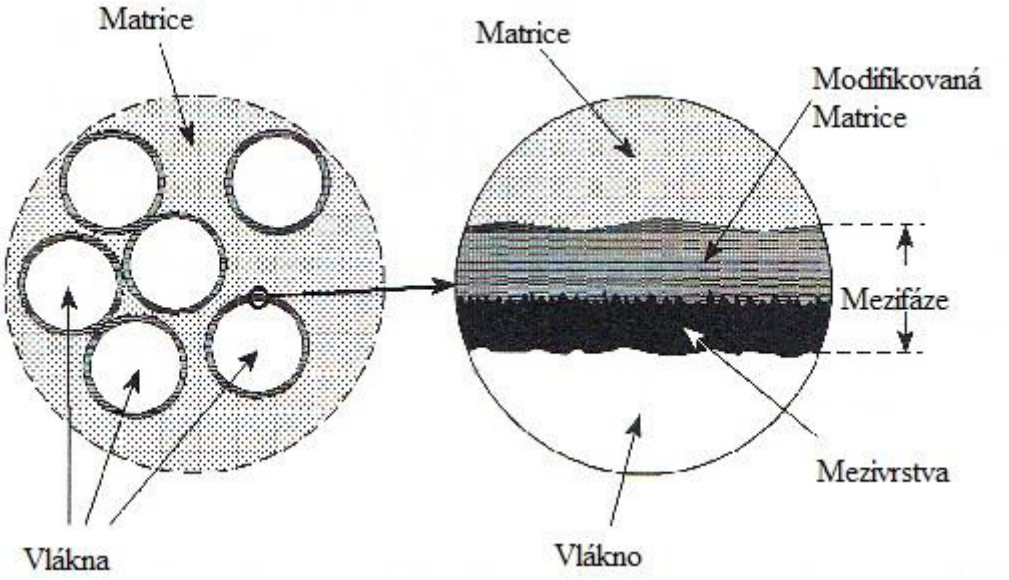
Termosety se také skládají z dlouhých uhlovodíkových molekul s primárními vazbami, které drží atomy v molekule pohromadě. Nicméně polymerní molekuly jsou zesítěné kovalentními vazbami na rozdíl od sekundárních vazeb existujících v termoplastech. Uspořádání molekul v termosetech je náhodné a v obou stavech jak v pevném tak v tavenině jsou termosety amorfní. Intramolekulární kovalentní vazby nemohou být porušeny jednoduše, a proto nemohou být termosety opětovně roztaveny zvyšováním teploty k bodu tání. Při zvyšování teploty k bodu tání se molekuly termosetů začnou rozpadat a termoset se může vznítit [14]. Porovnání vybraných polymerních matric s matricí kovovou a keramickou najdeme v tab. 2.4.

Tab. 2.4: ***Mechanické vlastnosti různých polymerních matric ve srovnání s matricí kovovou a keramickou [1]***

Matrice	Hustota ρ (Mg m^{-3})	Youngův modul E (GPa)	Poisonův poměr ν	Pevnost v tahu σ (GPa)	Tažnost ε (%)	Teplotní roztažnost α (10^{-6} K^{-1})	Tepelná vodivost K (W m^{-1} K^{-1})
Termosety							
Epoxidy	1,1–1,4	3–6	0,38–0,40	0,035–0,1	1–6	60	0,1
Polyestery	1,2–1,5	2,0–4,5	0,37–0,39	0,04–0,09	2	100–200	0,2
Termoplasty							
PA 6.6	1,14	1,4–2,8	0,3	0,06–0,07	40–80	90	0,2
PP	0,90	1,0–1,4	0,3	0,02–0,04	300	110	0,2
PEEK	1,26–1,32	3,6	0,3	0,17	50	47	0,2
Kovy							
Al	2,70	70	0,33	0,2–0,6	6–20	24	130–230
Mg	1,80	45	0,35	0,1–0,3	3–10	27	100
Ti	4,50	110	0,36	0,3–1,0	4–12	9	6–22
Keramika							
Sodnokřemičité sklo	2,3	64	0,21	0,1	0,2	3	12
SiC	3,4	400	0,20	0,4	0,1	4	50
Al2O3	3,8	380	0,25	0,5	0,1	8	30

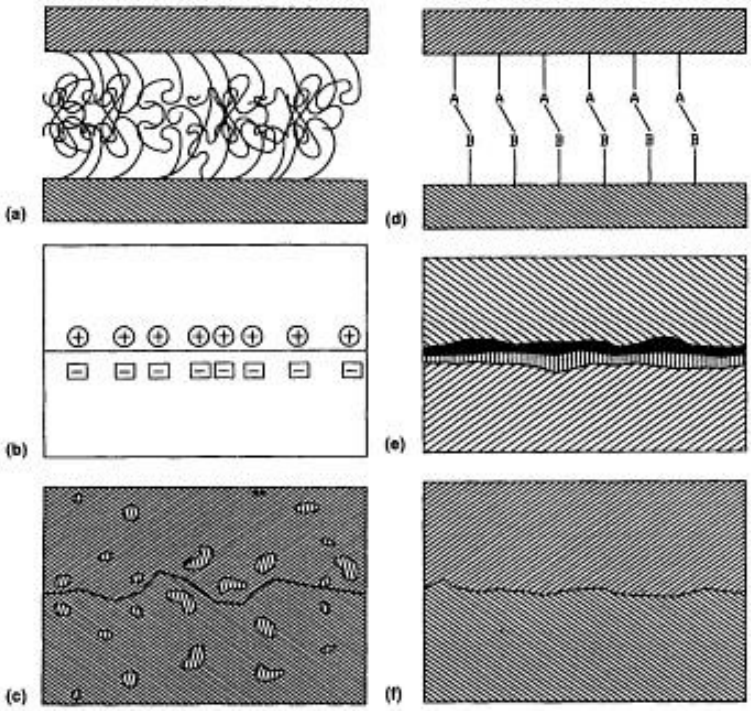
2.5 Mezifáze

Mezifáze je oblast mezi polymerem a vláknem, jenž má stejné chemické složení jako polymer, ale jinou mikrostrukturu. Primární funkcí mezifáze je přenést napětí z matrice k vláknům a ochránit tak vlákna před přirozeným poškozením. Schopnost mezifáze přenášet napětí, závisí na její tloušťce, stejně tak jako na mechanických vlastnostech vláken, matrice, mezifáze a vazebné síle (adhezi) mezifáze. Druh a síla vazby nezávisí pouze na uspořádání atomů, molekulární konformaci a chemické stavbě všech fází, ale také na morfologických vlastnostech vláken. Složení mezifáze může být rozličné v celé oblasti. Mohou zde být odlišné mikrostruktury. Toto ilustruje obrázek 2.9.



Obrázek 2.9: Schematická ilustrace kompozitní mezifáze [15]

Adheze obecně může zahrnovat několik mechanismů, ale není omezena pouze na adsorpci, smáčení, mechanickou zábranu, elektrostatické přitažlivé síly, molekulární spleteniny a vodíkovou či chemickou vazbu. Povrch výztuže musí být modifikován, pro zlepšení smáčení a adheze matrice u kompozitů s vyššími užitnými vlastnostmi. Je známo mnoho technik pro povrchovou úpravu vláken a liší se dle druhu a povahy vláken. Obrázek 2.10 ilustruje vazby, které mohou vznikat na mezifázovém rozhraní.



Obrázek 2.10: Vazebné mechanismy: (a) molekulární spleteniny; (b) elektrostatické přitažlivé síly; (c) difuze složek; (d) chemická reakce mezi skupinou A na povrchu a skupinou B na dalším povrchu; (e) chemická reakce, po níž následuje vznik nové sloučeniny; (f) mechanický zámek [6]

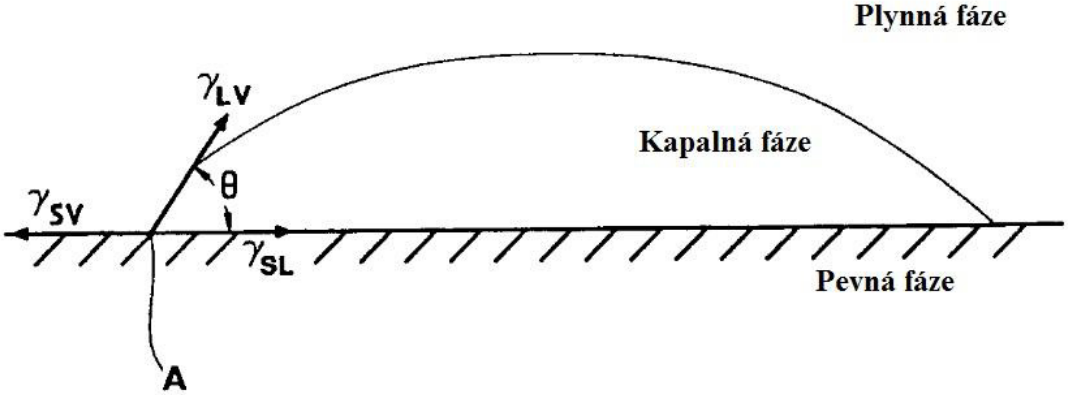
Prvním předpokladem dobré adheze je těsný kontakt povrchů dvou těles na úrovni atomů. V případě kapaliny a tělesa mluvíme o smáčení tuhého tělesa (vlákna) kapalinou (polymerem). Kápneme-li polymer na povrch vlákna, dojde po určité době k ustavení rovnováhy mezi kohezními silami v polymeru a adhezními silami mezi vláknem a polymerem a výsledný kontaktní úhel θ charakterizuje smáčení povrchu vlákna polymerem. Smáčení a kontaktní úhel θ je dán rovností horizontálních sil popsanou Youngovou rovnicí [5, 6]:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot cos\theta \tag{2}$$

Z rovnice plyne, že při dokonalém smáčení (θ = 0) bude povrchová energie pevné fáze rovna nebo větší než povrchová energie kapalné fáze a mezifázová povrchová energie, kdy se mezifázovou povrchovou energií myslí práce potřebná k vratnému a izotermnímu vzniku jednotkové plochy fázového rozhraní, spojenému s převodem molekul z nitra objemové fáze do fázového rozhraní. Základním termínem povrchové energie je adhezní práce W_a, která je definována Duprého rovnicí [6]:

$$W_a = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \tag{3}$$

Kde γ je povrchová energie a indexy S, L, V odpovídají jednotlivým fázovým stavům podle anglických názvů (S – solid pro pevný povrch, L – liquid pro kapalinu, V – vapor pro plynou fázi). Kontaktní úhel θ a povrchové energie ilustruje obrázek 2.11

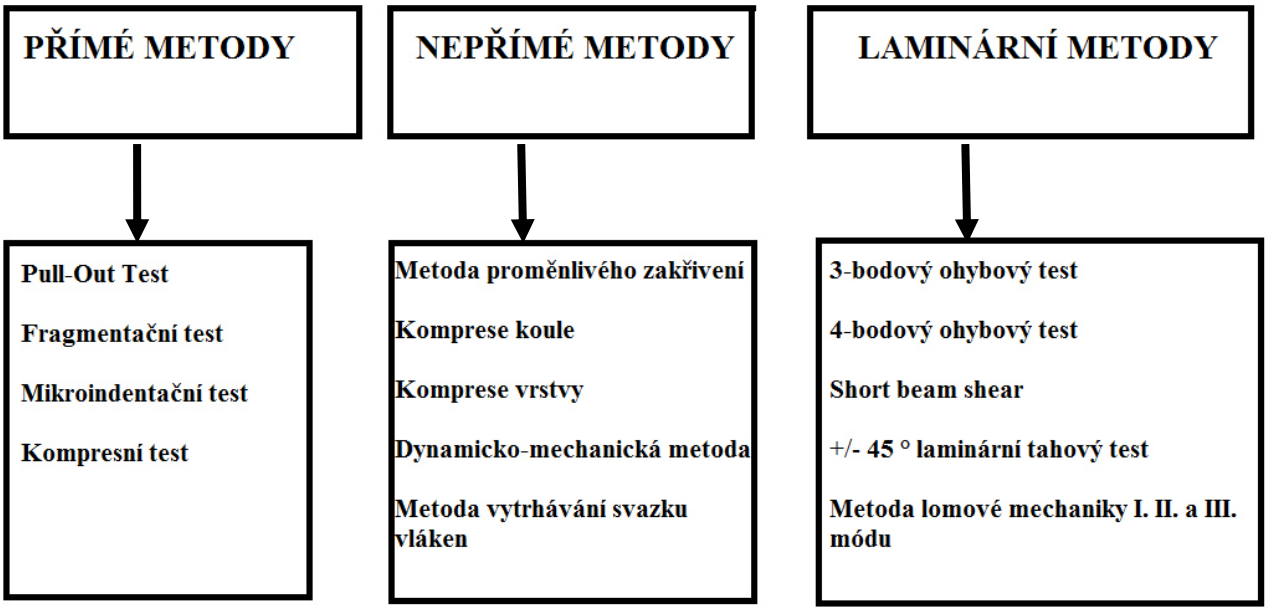


Obrázek 2.11 : Kontaktní úhel θ a povrchové energie γ_{LV}, γ_{SL} a γ_{SV} pro kapku kapalné fáze na pevném povrchu [6]

2.6 Testy mechanických vlastností kompozitů

Využití materiálů bylo vždy podporováno jejich testováním. Existuje tedy závislost mezi výhodami vědeckých znalostí a vývojem testovacích metod s dalším vývojem zařízení, pro další pokrok ve vývoji univerzálních vyhodnocovacích programů, které mohou podporovat základní průmyslové operace. Některé testovací metody jsou víceúčelové prostřednictvím různých operačních postupů. Konvenční tahová zkouška je prováděna při pevně stanovených podmínkách a může posloužit jako funkční kontrola kvality, zatímco provoz s řízenou škálou faktorů, které mají vliv na výsledek, jako jsou teplota a testovací rychlost mohou poskytnout první odhady možných vlastností testovaného materiálu. Je tu ale i další komplikace, co se týče testování materiálů. Hodnota vlastností odvozených od mechanického testu se odvíjí od vnějšího stavu testovaného vzorku, který je pro mnoho materiálových tříd citlivý na podmínky svého zpracování a další faktory [16].

Během několika let bylo vynalezeno mnoho metod k měření adheze na rozhraní vlákno-matrice. Adheze na rozhraní vlákno-matrice je důležitá pro mechanické vlastnosti kompozitního materiálu. Metody měření mohou být rozděleny do tří rozdílných kategorií. První kategorií jsou přímé metody, druhou kategorií jsou nepřímé metody a v poslední řadě lze využít laminárních testovacích metod, určených pro měření adheze na rozhraní vlákno-matrice. Schéma rozdělení metod ilustruje obrázek 2.12 [17].

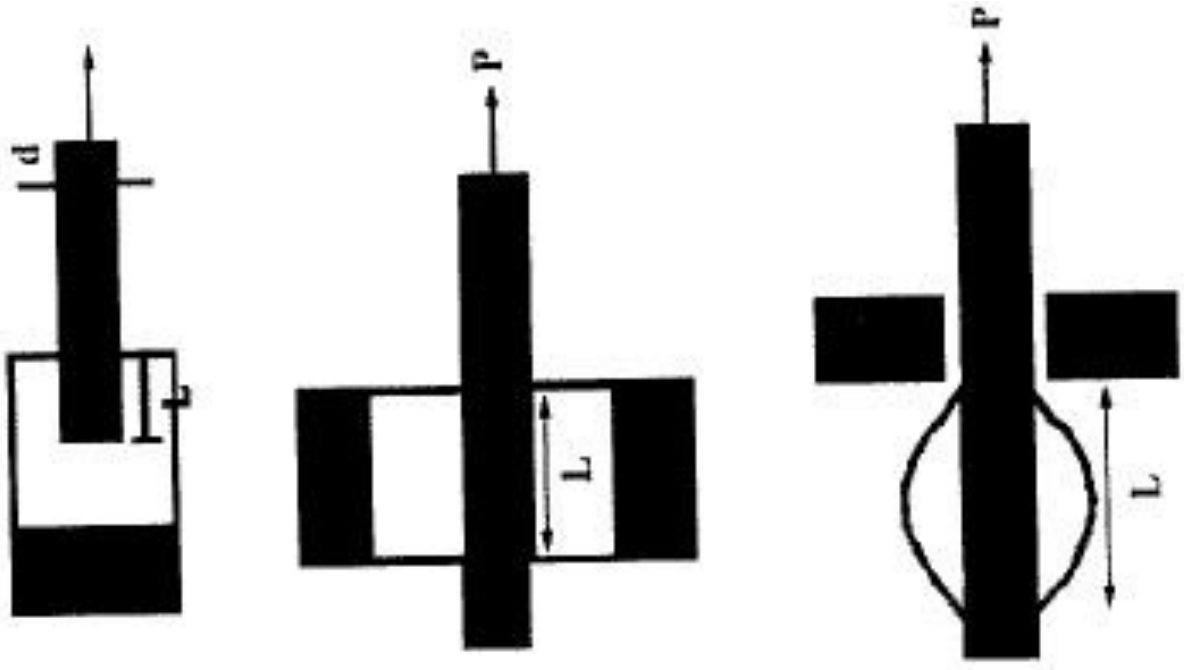


Obrázek 2.12: Rozdělení testovacích metod adheze na rozhraní vlákno-matrice [17]

Přímé metody zahrnují Pull-Out test (vytrhávání vlákna), fragmentační, mikroindentační a kompresní test. Nepřímé metody testování adheze zahrnují metodu kompresi koule a vrstvy, metodu proměnlivého zakřivení, dynamicko-mechanickou metodu a metodu vytrhávání svazku vláken. Mezi poslední kategorii laminárních testů patří tříbodový nebo čtyřbodový ohybový test, +/- 45° laminární tahový test, Short Beam shear test a metoda lomové mechaniky I., II. a III. módu. Pro tyto testovací metody existuje celá řada normovaných předpisů pro tvorbu vzorků, provádění zkoušek a analýzu dat a výsledků [17].

2.6.1 Pull out test

Nejstarším testem je vytažení jednotlivého vlákna z bloku matrice. Modernější verze této techniky zahrnuje vytažení vlákna z tenkého disku matrice nebo vytržení vlákna z malé kapky pryskyřice umístěné na konci okolo vlákna. Možnosti pull out testu znázorňuje obrázek 2.13. Maximální zatížení při porušení je vyjádřeno jako mezifázová smyková pevnost. Další výhoda použití této metody je možnost použití křehkých matricí, protože během testu je matrice pod tlakem, tudíž houževnatost matrice není významným faktorem při testování. Výsledkem testu je zjištění mezifázové smykové pevnosti na rozhraní vlákno-matrice [17].



Obrázek 2.13: Možnosti pull out testu [17]

2.6.2 Fragmentační test

Další přímou metodou je fragmentační test. Tento test zahrnuje použití jednoho vlákna zapouzdřeného v matrici ve vzorku (obvykle ve tvaru „dog bone“), který je poté namáhán v tahu. Když je vzorek namáhán v tahu roste mezifázové smykové napětí. Toto napětí ve vláknu poté zapříčiní lom vlákna ve vzorku. Při větším a větším zatěžování se proces lomu vlákna opakuje a tvoří se kratší a kratší fragmenty. To probíhá tak dlouho, dokud je zachován mechanismus přenosu napětí z matrice do vlákna a než fragmenty vlákna nedosáhnou kritické délky.

2.6.3 Smykový test (short-beam shear)

Porušení krátkého trámečku je způsobeno kombinací několika mechanismů, protože stav čistého smyku nelze dosáhnout. Při testování vzorku short-beam shear testem je vzorek zatížen 3bodovým ohybem. Aplikované tahové zatížení vyvolává smykové napětí paralelně s orientovanou vrstvou laminátu. Při použití klasické laminační teorie lze vypočítat smykový modul a smykovou pevnost laminátu. Ohybové zatížení vyvolává ve vzorku, smykové napětí, které je přímo úměrné zatížení a nezávislé na vzdálenosti podpěr. Vzdálenost podpěr musí být co nejmenší, aby došlo k interlaminárnímu smykovému porušení vzorku dříve než k ohybovému lomu. Pro testování vzorků kompozitních materiálů metodou short-beam shear byla vydána norma ASTM D 2344/ D 2344M-00 v anglickém jazyce [15, 18].

2.6.4 Ohybový test

Při ohybovém testu je třeba dosáhnout ohybového napětí ve střední části testovaného vzorku. Pro stanovení ohybového napětí se používají tříbodové nebo čtyřbodové ohybové testy. Norma stanovující přesné podmínky testování ohybových vlastností vyztužených plastových kompozitů je označena ČSN EN ISO 14125. Tato metoda testování není vhodná pro stanovení konstrukčních parametrů kompozitních materiálů, ale je možno ji použít při posuzování materiálů pro účely kontroly kvality. Je to z toho důvodu, že ohybový modul je pouze pomocnou hodnotou pro určení Youngova modulu elasticity, protože při ohybové

zkoušce není předepsána korekce na přídavný průhyb v důsledku smykového namáhání, což vede k nižší hodnotě ohybového modulu.

Principem této zkušební metody je, že zkušební těleso ve tvaru hranolu umístěné v testovacím přístroji a je ohýbáno konstantní rychlostí, dokud nedojde k porušení tělesa nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. Během zkoušky se měří síla působící na těleso a průhyb tělesa [19, 20].

Kromě normy ČSN EN ISO 14125 existuje mnoho dalších norem pro testování kompozitních materiálů. Testováním kompozitů ohybem se konkrétně zabývá i norma ASTM D 790-03 (ASTM American Society for Testing Materials), která se zabývá ohybovou zkouškou nevyztužených i vyztužených plastů a elektrických izolačních materiálů. Tato mezinárodní norma se nejvíce používá například v průmyslu pro zkvalitnění a zavedení standardu pro určité typy produktů [21, 22].

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Materiály

Matrice

Pro přípravu zkušebních těles byla použita komerční nenasycená polyesterová pryskyřice isoftalového typu POLY DS 183 B1 (dodavatel Skolil Kompozit spol. s.r.o.) rozpuštěná ve styrenu. Pryskyřice má vysokou chemickou odolností vůči hydrolytickému poškození.

Parametry POLY DS 183 B1 v expedičním stavu:

Viskozita (25 ° C):	900 – 1100 mPa·s
Obsah styrenu:	33 – 37 %
Netěkavý podíl_	63 – 67 %

Parametry POLY DS 183 B1 ve vytvrzeném stavu:

Pevnost v tahu:	80 MPa
Modul pružnosti v tahu:	3500 MPa
Pevnost v ohybu:	130 MPa
Modul pružnosti v ohybu:	3700 MPa
Protažení při přetržení:	4,8 %
Celkové objemové smrštění:	8,3 %

Aditiva používaná pro pryskyřici POLY DS 183 B1

Styren

Síťovací činidlo, transparentní kapalina.

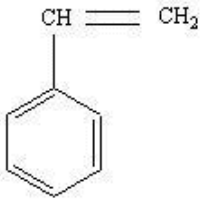
Mr = 104,152 $g \cdot mol^{-1}$

ρ (20 °C) = 0,906 $g \cdot cm^{-3}$

T_t = -30,628 °C

T_v = 145,14 °C

$T_{vzplanutí}$ = 31 °C



Perkadox® CH-50L (Dibenzoyl peroxid s 50 % dicyklohexyl ftalátu, CAS: 94-36-0)

Výrobce: Akzo Nobel Polymer Chemicals BV Amersfoort, Nizozemsko

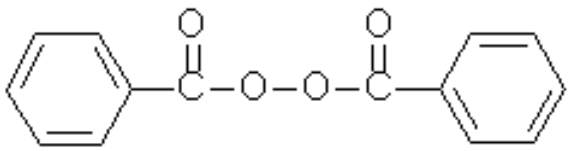
Vysokoteplotní iniciátor, bílý prášek.

Mr = 242,2 $g \cdot mol^{-1}$

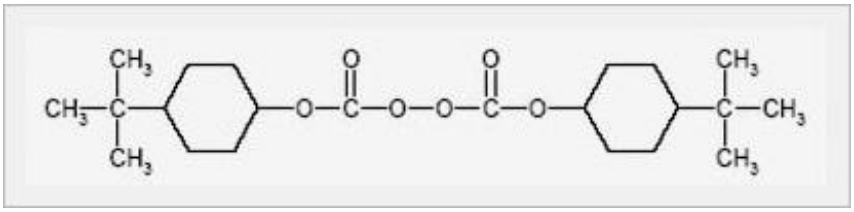
ρ = 0,64 $g \cdot cm^{-3}$ (bulk)

$T_s$max. = 25 °C

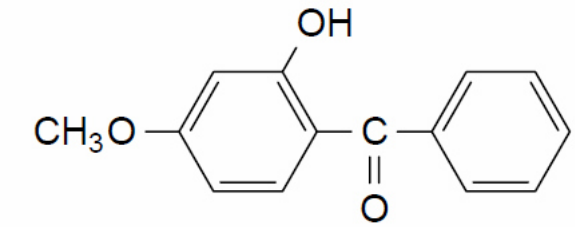
SADT: 55 °C



Perkadox® 16S (di(4-terc-butylcyklohexyl)peroxydikarbonát, CAS: 15520-11-3)
Výrobce: Akzo Nobel Polymer Chemicals BV Amersfoort, Nizozemsko
Nízkoteplotní iniciátor, bílý prášek.
$M_r = 398,5\ g \cdot mol^{-1}$
$\rho = 0,45 - 0,48\ g \cdot cm^{-3}$ (bulk)
$T_s max. = 20\ °C$
SADT: 40 °C



Uvasorb® MET (2-hydroxy-4-methoxybenzofenon, CAS: 131-57-7)
Výrobce: 3V Sigma S. p. A., Bergamo, Itálie
Stabilizátor UV záření, žlutý prášek.
$Mr = 228,2\ g \cdot mol^{-1}$
$\rho = 0,70\ g \cdot cm^{-3}$ (bulk)



MOLD WIZ INT-PUL-24
Výrobce: Axel Plastics Research Laboratories Inc., USA
Směs organických kyselin, esterů a aminů s neutralizačními činidly. Lubrikant zlepšující smáčivost vláken.
$\rho = 0,96\ g \cdot cm^{-3}$

Tab. 3.1: ***Složení nenasycené polyesterové pryskyřice pro přípravu kompozitních vzorků***

Složka	***Obsah hm. %***
Poly DS 183 B1	96,1
Styren	2,0
Perkadox® CH-50L	1,0
MOLD WIZ INT-PUL-24	0,5
Uvasorb® MET	0,2
Perkadox® 16S	0,2

Vyztužující vlákna

Jako vyztužující vlákna byla použita skleněná vlákna typu E ve formě rovingu produkovaná firmou Saint-Gobain Adfors CZ, s.r.o., Litomyšl ČR (1200 tex, nebo 600 tex ve dvou svazcích, střední průměr vláken cca 19 μm s komerční povrchovou úpravou a bez povrchové úpravy). Jako další vyztužující vlákna byla použita uhlíková vlákna s komerční povrchovou

úpravou (Torayca, tex 776 – 824, T700SC – 12K 50C se středním průměrem vláken 7 μm). Přehled základních mechanických vlastností je uveden v tab. 3.3.

Tab. 3.2: ***Přehled základní charakteristiky vláken***

Typ vláken	*Tex*	*Průměr vláken*	*Počet vláken ve svazku*
Skleněná	1200 nebo 2 x 600	19 μm	800
Uhlíková	776 – 824	7 μm	12000

Tab. 3.3: ***Přehled mechanických vlastností vláken***

Typ vláken	*Pevnost v tahu [MPa]*	*Modul pružnosti v tahu [GPa]*	*Tažnost [%]*
Skleněná	3450	80,5	4,6
Uhlíková	4900	230	2,1

3.2 Příprava kompozitních materiálů

Pro výrobu a vytvrzování tělísek byly odlity formy ve tvaru hranolů pro smykový test o rozměrech 10x18x3 mm a pro ohybový test o rozměrech 10x90x3 mm. Tyto formy byly připraveny z komerčního Lukoprenu N 1522 vytvrzením za laboratoní teploty. Přípravu lukoprenové formy ilustruje obrázek 3.1. V první a druhá části obrázku je Lukopren smíchán s iniciátorem a nalit do formičky. Spodní část obrázku zobrazuje odstranění bublin špachtlí a přiložení skleněné desky pro zajištění rovinnosti formy. Toto zabezpečí, aby vyrobená zkušební tělíska neměla přetoku z důvodu nerovné formy.

Obrázek 3.1: Příprava lukoprenové formy

LUKOPREN N 1522, Lučební závody a. s. Kolín
Univerzální silikonový dvousložkový kaučuk pro zhotovování forem na odlitky s nízkou adhezí po vytvrzení. Vytvrzení přiloženým katalyzátorem C 21 (dávkování: 2 hmot. %).
Katalyzátor C 21: dibutylcíndilaurát (20 hm. %, CAS 77-58-7)
tetraethylsilikát (< 20 hm. %, CAS 78-10-4)
Tepelná odolnost: - 50 až 180 °C
Lineární smrštění: max. 1 %

Součástí diplomové práce byly i experimentální pokusy o odstranění komerční povrchové úpravy z uhlíkových vláken. Pro tyto pokusy byly zvoleny 2 postupy.

Postup odstraňování komerční úpravy z uhlíkových vláken
a)

- *Byla odmotána dostatečná délka vláken pro výrobu série po 5 vzorcích (pro smykový test) a vlákna byla smotána do smotku a umístěna do odměrného válce o objemu 500 ml.*
- *Byly odmotány 4 smotky pro dobu ponoření vláken v acetonu na 30; 60; 120 a 300 minut*
- *Do válce bylo nalito 280 ml acetonu p.a. a vlákna byla ponořena v acetonu po určenou dobu.*
- *Po vyjmutí vláken z odměrného válce byla vlákna umístěna do 230 ml technického lihu na 20 minut a poté sušena v sušárně při 70 ° C po dobu 24 hodin.*
- *Po vysušení byla vlákna ještě jednou ponořena do technického lihu na 30 minut a sušena při stejných podmínkách.*
- *Po této proceduře byla z vláken vyrobena testovací tělíska, která byla otestována na univerzálním testovacím přístrojem ZWICK Z010.*

b)

- *Byla odmotána dostatečná délka vláken pro výrobu série po 5 vzorcích (pro smykový test) a vlákna byla smotána do smotku a umístěna na síťku v ultrazvukovém přístroji TRANSSONIC T310/H (obrázek 3.2) a do vany přístroje byl nalit aceton p.a.*
- *Byly odmotány 2 smotky pro ponoření vláken v acetonu při působení ultrazvukového čištění po dobu 30 a 60 minut.*
- *Po vyjmutí vláken z ultrazvukového přístroje byla vlákna umístěna do 230 ml technického lihu na 20 minut a poté sušena v sušárně při 70 ° C po dobu 24 hodin.*
- *Po vysušení byla vlákna ještě jednou ponořena do technického lihu na 30 minut a sušena při stejných podmínkách*
- *Po této proceduře byla z vláken vyrobena testovací tělíska, která byla otestována na univerzálním testovacím přístroji ZWICK Z010.*

Obrázek 3.2: Ultrazvukový přístroj TRANSSONIC T310/H

3.2.1 Příprava zkušebních těles pro smykovou zkoušku

Pro smykovou zkoušku byla připravována testovací tělíska v sériích po 8 vzorcích o různém objemovém podílu výztuže. U vzorků, které byly vyztuženy skleněnými vlákny, byly zpracovány série vzorků s objemovým podílem výztuže 30, 40 a 50 obj. %. U vzorků, které byly vyztuženy uhlíkovými vlákny, byly zpracovány série vzorků s objemovým podílem výztuže 30, 40 a 45 obj. %. Po odstranění neregulérních výsledků či výsledků se špatným průběhem deformačních křivek byly vyřazeny vždy 2 výsledky v rámci povoleného minimálního počtu testovaných tělísek a statistiky.

Výpočet objemu výztuže skleněnými vlákny:

Průměr vlákna: $19 \cdot 10^{-6}\ m$
Počet vláken ve svazku: 800
Průřez tělíska: $3 \cdot 10^{-5}\ m^2$
Průřez 1 svazku vláken: $\pi \cdot (9{,}5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 800 = 2{,}27 \cdot 10^{-7} m^2$

Tab. 3.4: ***Výpočet potřebného počtu svazků skleněných vláken pro vyztužení kompozitu***

Objem výztuže [%]	Odpovídající plocha průřezu [m^2]	Odpovídající počet svazků
30	$9 \cdot 10^{-6}$	40 (39,6)
40	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$	53 (52,9)
50	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$	66 (66,1)

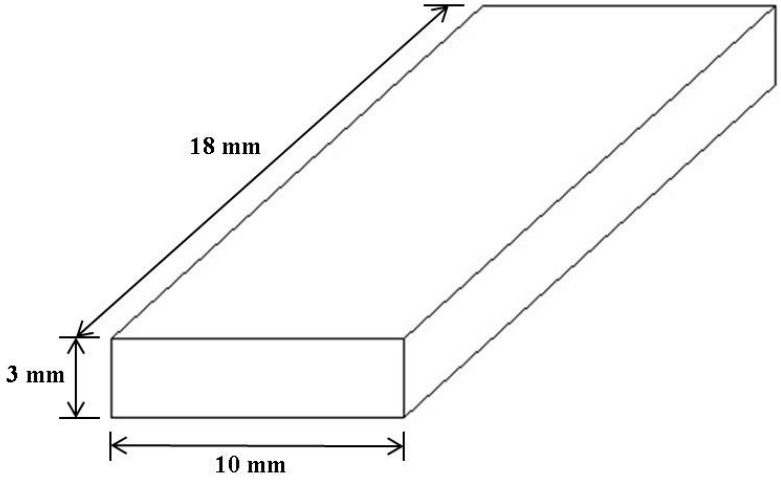
Výpočet objemu výztuže uhlíkovými vlákny:

Průměr vlákna: $7 \cdot 10^{-6}\ m$
Počet vláken ve svazku: 12000
Průřez tělíska: $3 \cdot 10^{-5}\ m^2$
Průřez 1 svazku vláken: $\pi \cdot (3{,}5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 12000 = 4{,}62 \cdot 10^{-7} m^2$

Tab. 3.5: ***Výpočet potřebného počtu svazků uhlíkových vláken pro vyztužení kompozitu***

Objem výztuže [%]	Odpovídající plocha průřezu [m^2]	Odpovídající počet svazků
30	$9 \cdot 10^{-6}$	20 (19,5)
40	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$	26 (25,9)
45	$1{,}35 \cdot 10^{-5}$	29 (29,2)

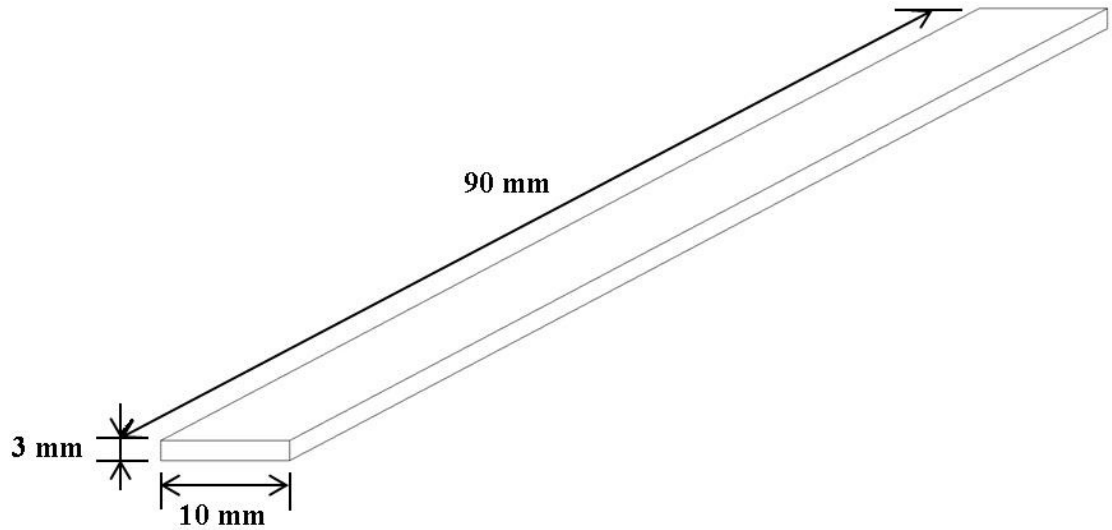
V tab. 3.4 a 3.5 je vypočten potřebný počet svazků vláken pro vyztužení kompozitních tělísek. Vypočtená hodnota počtu svazků vláken odpovídající danému objemovému podílu výztuže byla zaokrouhlena na celé číslo.



Obrázek 3.3: Rozměry testovacího tělíska pro smykovou zkoušku

3.2.2 Příprava zkušebních těles pro ohybovou zkoušku

Pro ohybovou zkoušku byla připravována testovací tělíska v sériích po 10 vzorcích o různém objemu výztuže. U vzorků, které byly vyztuženy skleněnými vlákny, byly zpracovány série vzorků s objemovým podílem výztuže 30, 40 a 50 obj. %. U vzorků, které byly vyztuženy uhlíkovými vlákny, byly zpracovány série vzorků s objemovým podílem výztuže 30, 40 a 45 obj. %. Po odstranění neregulérních výsledků či výsledků se špatným průběhem deformačních křivek byly vyřazeny vždy 2 výsledky v rámci povoleného minimálního počtu testovaných tělísek a statistiky.



Obrázek 3.4: Rozměry testovacího tělíska pro ohybovou zkoušku

Obrázek. 3.5: Příprava zkušebního tělíska za pomocí nerezové pinzety

3.3 Mechanické zkoušky

V této diplomové práce byly všechny mechanické zkoušky připravených testovacích tělísek provedeny na univerzálním testovacím přístroji ZWICK Z010.

3.3.1 Univerzální testovací přístroj ZWICK Z010

Univerzální testovací přístroj ZWICK Z010 je přístrojem pro standardizované testování. V této diplomové práci byla na všechna měření použita měřící hlava 10 kN.

Dělení zkušebních metod

a) statické - materiál je namáhán pomalu se měnícími silami rovnoměrně až do okamžiku porušení zkušebního tělíska,

b) dynamické - působící síly se mění buď rázem, nebo za velmi krátký časový úsek,

c) únavové zkoušky - dlouhodobé zkoušky za předepsaných podmínek časově proměnné

V této diplomové práci byly využity statické zkušební metody, při nichž je materiál namáhán pomalu se měnícími silami rovnoměrně až do okamžiku porušení zkoušeného tělíska.

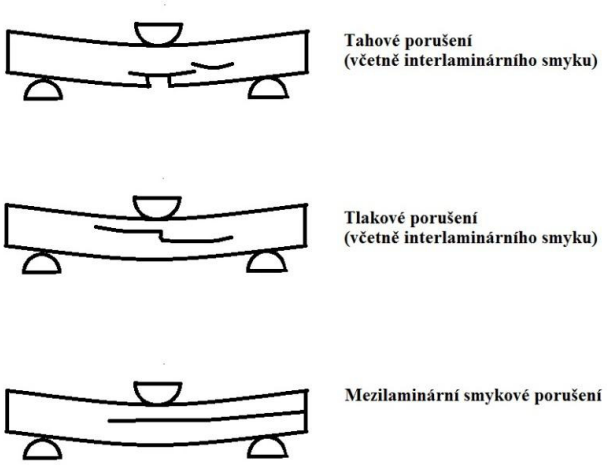
Obrázek 3.6: Univerzální testovací přístroj ZWICK [23]

3.3.2 Smyková zkouška

Stanovení smykových vlastností připravených testovacích tělísek bylo provedeno dle normy americké společnosti pro testování materiálů ASTM D 2344/ D 2344M-00. Tato norma je učena pro testování vysokomodulových vlákny vyztužených materiálů. Testovací tělísko je testováno při tříbodovém ohybu.

Zkušební rychlost:
Normou stanovená rychlost zatěžování je 1mm/min

Zatěžovací trn a podpěry:
Norma uvádí, že zatěžovací trn musí mít průměr 6,0 mm a průměr obou podpěr musí být 3,0 mm, přičemž vzdálenost obou podpěr musí být 12 mm. Zatěžovací trn i podpěry musí mít tvrdost 60 – 62 HRC (tvrdost podle Rockwella). Norma uvádí, že zatěžovací trn by měl být umístěn do středu mezi obě podpěry s maximální odchylkou 0,3 mm.



Obrázek 3.7: Přípustné typy porušení zkušebního tělíska u smykové zkoušky při tříbodovém ohybu

Výpočet smykové pevnosti na rozhraní:

$$T = 0{,}75 \cdot \frac{F_{MAX}}{a \cdot b}\ [MPa] \qquad (3)$$

kde T značí smykovou pevnost na rozhraní, F_{MAX} je maximální zatížení pozorováno během testu *a* a *b* značí tloušťku a šířku testovacího tělíska

Zkušební těleso:

Testovaným vzorkem je ploché zkušební tělísko s pravoúhlým průřezem. Normou jsou definovány dva postupy ke stanovení přípustných geometrických rozměrů testovacích tělísek. První podmínkou je minimální tloušťka tělíska, která je stanovena na 2,0 mm, přičemž délka vzorku musí být šestinásobkem jeho tloušťky a šířka dvojnásobkem délky tělíska. Druhou možností je, že není pevně stanovena délka vzorku, ale je uvedeno, že poměr délky a tloušťky testovacího tělíska by měl být 4,0 s tím, že minimální tloušťka testovacího tělíska je normou stanovena na 2,0 mm. Tento způsob testování vzorků je učen pro kompozity vyztuženy krátkými nebo dlouhými vlákny, přičemž testované tělísko je symetrické ve své podélné ose. Minimální povolený přesah tělíska je 2,0 mm. Pro validní výsledky zkoušky je dle normy potřeba testovat minimálně 5 vzorků.

Tab. 3.6: ***Parametry nastavení ZWICK Z010***

Tvar testovacího tělíska	*Rovinný*
Tloušťka vzorku	*3,0 mm*
Šířka vzorku	*10,0 mm*
Délka vzorku	*18 mm*
Testovací rychlost	*1 mm/min*
Průměr podpěr	*3,0 mm*
Průměr zatěžovacího trnu	*6,0 mm*
Předzatížení	*20 N*
Vzdálenost podpěr	*12,0 mm*
Typ hlavy	*10 kN*

3.3.3 Ohybová zkouška

Stanovení ohybových vlastností připravených vzorků bylo provedeno dle české technické normy ČSN EN ISO 14125 (dále jen norma). Tato norma je českou verzí evropské normy EN ISO 14125. Tato norma je určena pro vlákny vyztužené plastové kompozity a zahrnuje taktéž zkušební podmínky používané při zkoušení sklem vyztužených plastů.

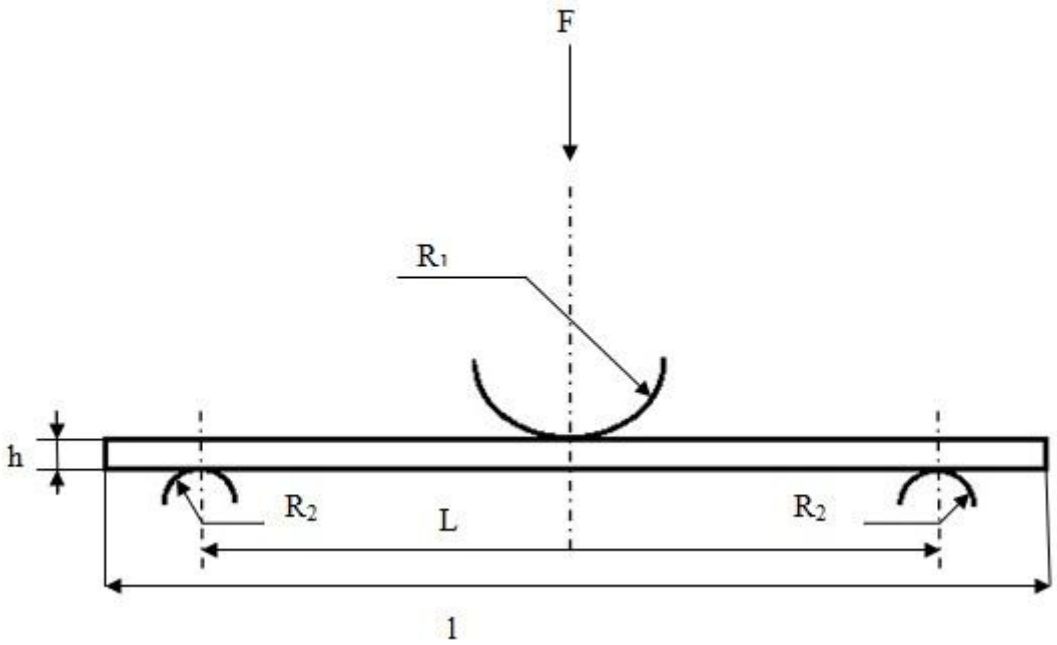
V normě jsou popsány podmínky testu vzorků pro čtyřbodový ohyb a tříbodový ohyb. V této diplomové práci byly všechny vzorky testovány metodou tříbodového ohybu. Při této zkoušce je těleso ve tvaru hranolu umístěno ve zkušebním přístroji a je ohýbáno konstantní rychlostí, dokud nedojde k porušení tělesa nebo pokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. Metoda používá k vyhodnocení ohybových vlastností a stanovení pevnosti v ohybu, ohybového modulu a jiných parametrů vyplývajících ze vztahu napětí/deformace za předepsaných podmínek.

Zkušební rychlost:

Zkušební přístroj musí být schopen udržovat zkušební rychlost s tolerancí ± 20 %. V normě je uvedena tabulka doporučených hodnot zkušebních rychlostí. Zkušební rychlost musí být co nejblíže 0,4 násobku tloušťky tělesa. Jestliže byla zvolena tloušťka tělesa 3,0 mm, 0,4 násobek této hodnoty je 1,2. Nejbližší zatěžovací rychlostí vzhledem k tomuto parametru uvedenému v normě je rychlost 1mm/min. Pro účely této práce byla tedy vybrána zkušební rychlost 1 mm/min.

Zatěžovací trn a podpěry:

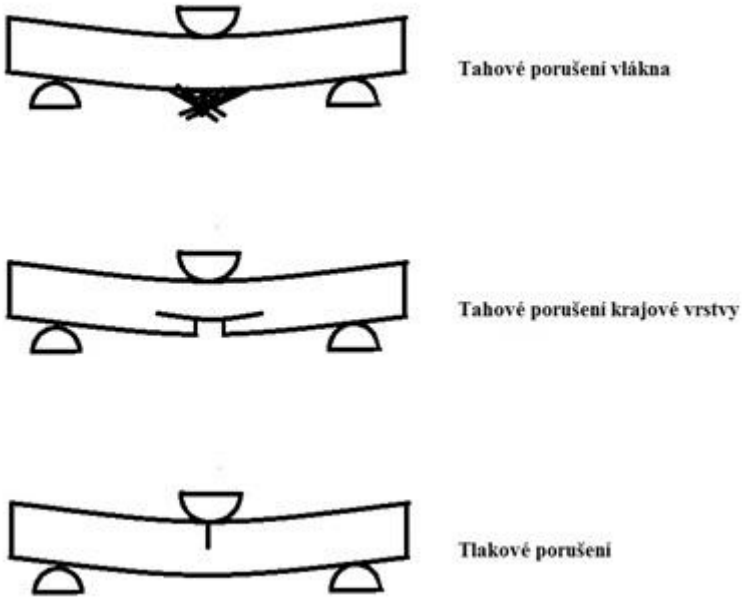
Podpěry a trn jsou uspořádány dle Obrázku 3.7. Osy podpěr a zatěžovacího trnu musí být rovnoběžné. Poloměr trnu R_1 odpovídal hodnotě 5 mm definované v normě. Hodnotu poloměru podpěr R_2 pro vzorky jejichž tloušťka je větší než 3 mm stanovuje norma na 5 mm, přičemž tolerance rozměru podpěr je 0,2 mm. Tato podmínka byla při testování tělísek taktéž dodržena. Norma také uvádí hodnoty vzdálenosti podpěr a délky tělesa jako funkce tloušťky pro tříbodový ohyb. Pro třídu materiálů III (příčné 90 ° jednosměrné kompozity, jednosměrné (0°) a vícesměrné kompozity a systémy se skleněnými vlákny) je uveden poměr vzdálenosti podpěr a tloušťky s hodnotou 20 a poměr délky tělesa ku tloušťce má v normě hodnotu 30.



Obrázek 3.8: Uspořádání tříbodového zatěžování

Zkušební těleso:

Testovaným vzorkem je ploché zkušební tělísko s pravoúhlým průřezem. Při zkoušce se tloušťka tělesa v oblasti střední třetiny nesmí odchýlit o více než 2 % od průměrné hodnoty ve střední části. Odpovídající maximální odchylka pro šířku je 3 %. Průřez tělíska musí být pravoúhlý bez zaoblení. Musí se zkoušet nejméně 5 zkušebních těles, poskytujících některý typ porušení. Přípustné typy porušení pro tuto zkoušku jsou uvedeny na Obrázku 3.8.



Obrázek 3.9: Přípustné typy porušení zkušebního tělíska u ohybové zkoušky při tříbodovém ohybu

Výpočet pevnosti v ohybu

$$\sigma_{fM} = \frac{3F_{MAX}L}{2bah^2} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

Korekce při velkém průhybu

$$\sigma_{fM} = \frac{3F_{MAX}L}{2bh^3} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

kde σ_{fM} značí pevnost v ohybu, F_{MAX} je maximální zatížení pozorováno během testu h a b značí tloušťku a šířku testovacího tělíska a L značí vzdálenost podpěr

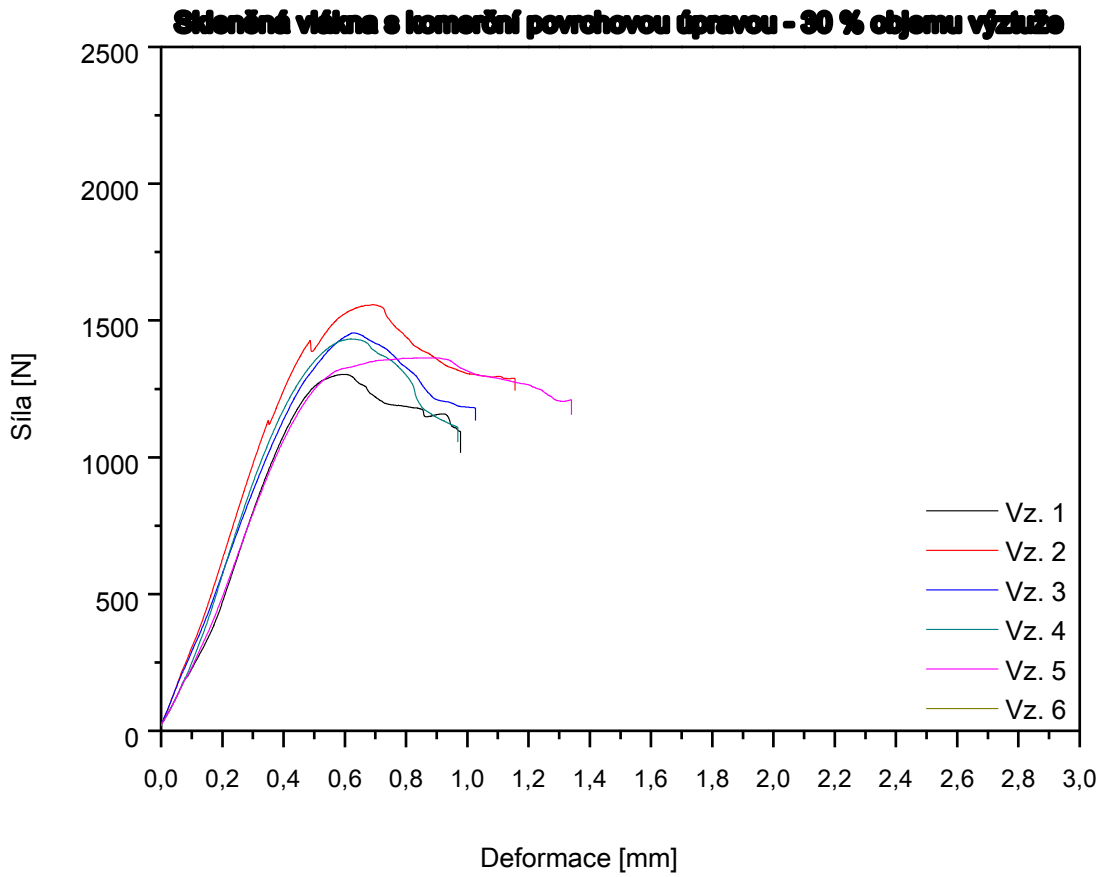
Tab. 3.7: ***Parametry nastavení ZWICK Z010***

Tvar testovacího tělíska	*Rovinný*
Tloušťka vzorku	*3,0 mm*
Šířka vzorku	*10,0 mm*
Délka vzorku	*90 mm*
Testovací rychlost	*1 mm/min*
Průměr podpěr	*5,0 mm*
Průměr zatěžovacího trnu	*5,0 mm*
Předzatížení	*20 N*
Vzdálenost podpěr	*60 mm*
Typ hlavy	*10 kN*
Konektor	*10kN*

4. VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1 Smyková zkouška

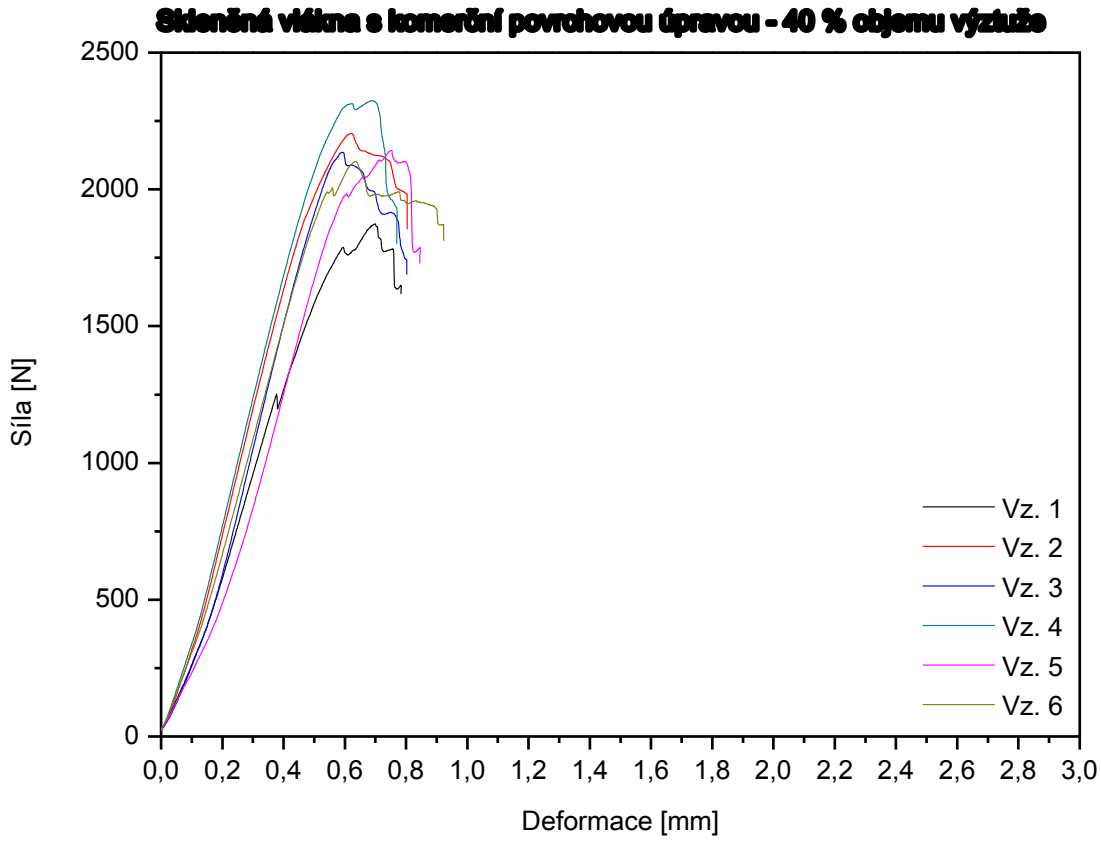
4.1.1 Skleněná vlákna



Graf 4.1: Smykový test kompozitních tělísek s 30 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Tab. 4.1: ***Výsledky – Skleněná vlákna s povrchovou úpravou 30 % objemu výztuže***

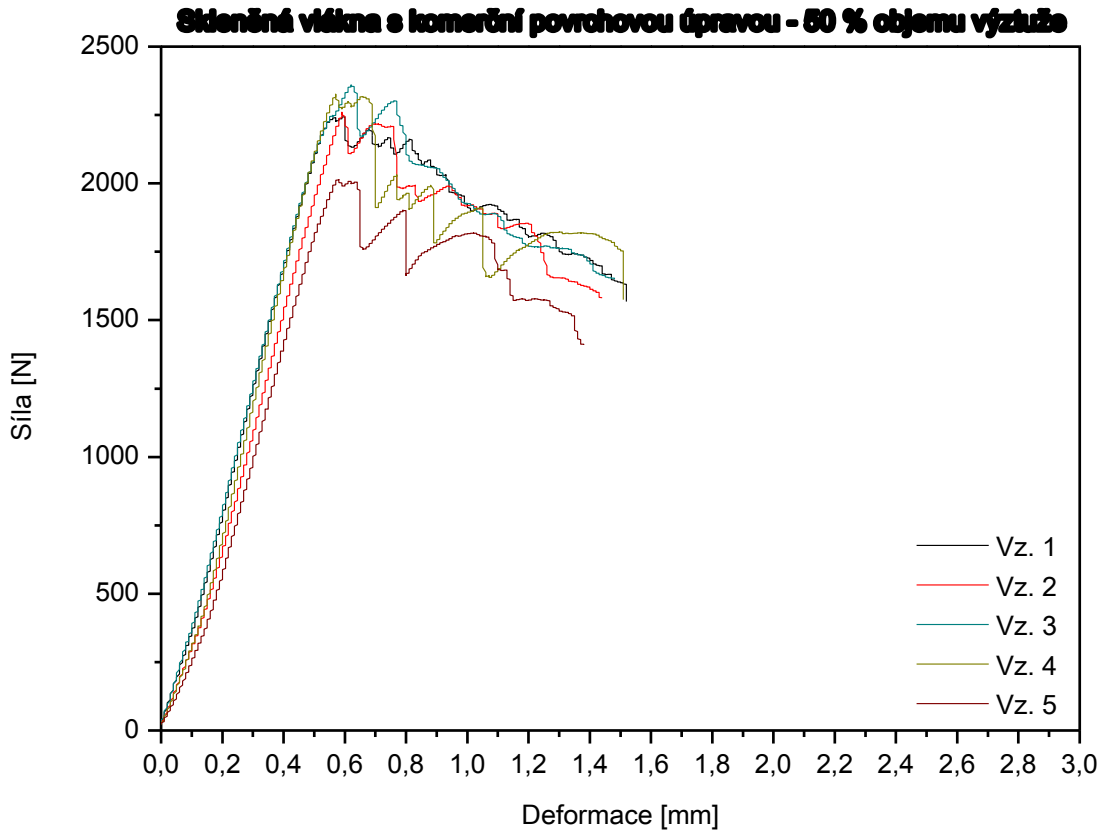
Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	Fmax. N	**T MPa**
1	2,71	10,19	1300	**35,4**
2	2,97	10,20	1560	**38,6**
3	2,87	10,08	1450	**37,7**
4	2,88	10,08	1430	**37,0**
5	2,96	10,27	1360	**33,6**
6	2,93	10,25	1530	**38,1**
Průměr:			1440	**36,7**
Směrodatná odchylka:			96,0	**1,9**
Relativní směrodatná odchylka:			6,7	**5,1**



Graf 4.2: Smykový test kompozitních tělísek s 40 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Tab. 4.2: ***Výsledky – Skleněná vlákna s povrchovou úpravou 40 % objemu výztuže***

Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	Fmax. N	**T MPa**
1	2,90	9,80	1870	**49,5**
2	3,00	9,90	2200	**55,7**
3	3,00	9,82	2140	**54,4**
4	2,98	9,49	2320	**61,6**
5	2,95	9,93	2140	**54,9**
6	2,98	9,85	2100	**53,7**
Průměr:			2130	**54,9**
Směrodatná odchylka:			148	**3,9**
Relativní směrodatná odchylka:			7,0	**7,2**

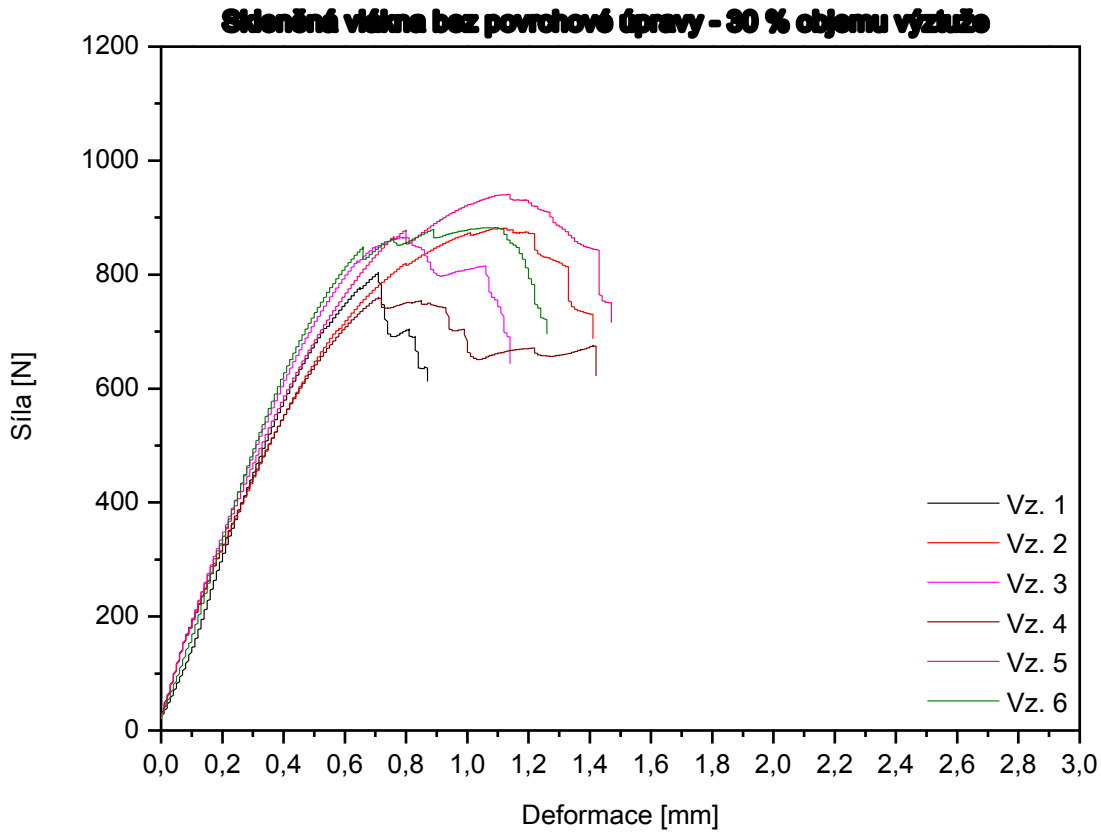


Graf 4.3: Smykový test kompozitních tělísek s 50 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Tab. 4.3: ***Výsledky – Skleněná vlákna s povrchovou úpravou 50 % objemu výztuže***

Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	Fmax. N	**T MPa**
1	2,99	10,00	2240	**56,3**
2	3,01	9,99	2260	**56,4**
3	3,13	10,03	2360	**56,4**
4	3,08	9,99	2330	**56,7**
5	2,96	9,96	2010	**51,2**
Průměr:			2240	**55,4**
Směrodatná odchylka:			135	**2,3**
Relativní směrodatná odchylka:			6,0	**4,2**

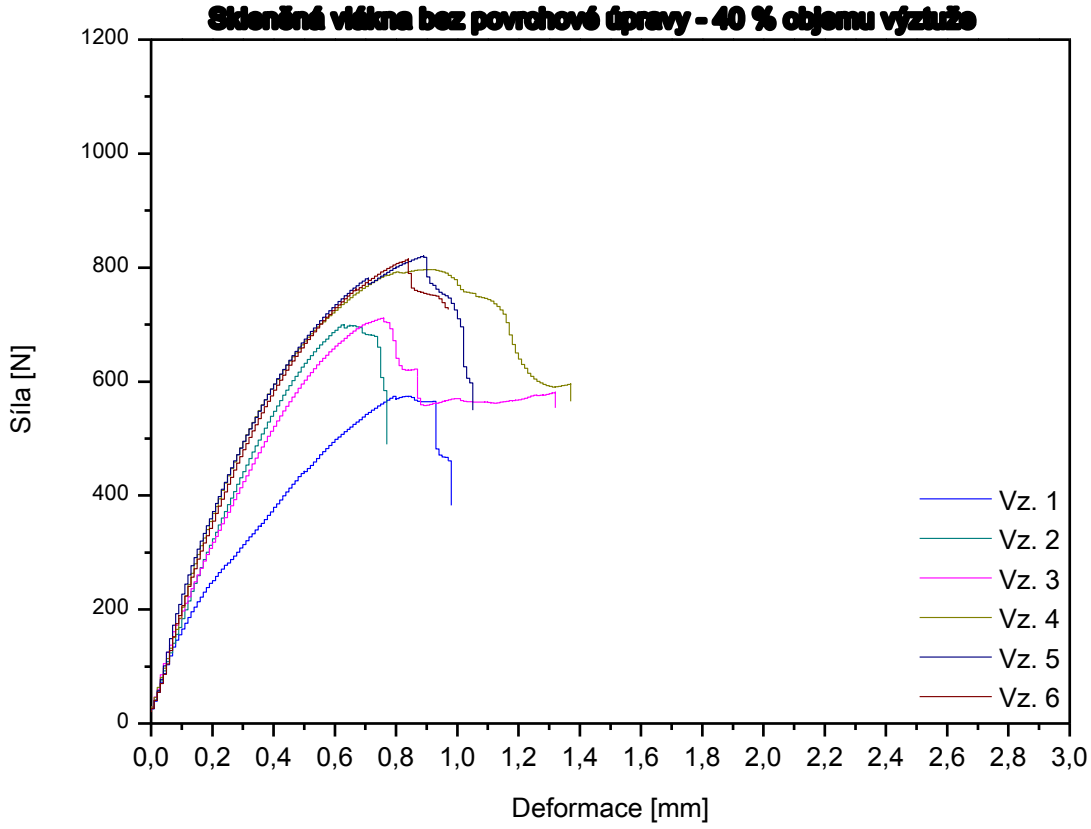
Oproti výsledkům série s objemovým podílem výztuže 30 % uvedeným v grafu 4.1 došlo u sérií s objemovým podílem komerčně upravených skleněných vláken 40 a 50 % (graf 4.2 a 4.3) téměř k 50 % nárůstu maximálního zatížení během testu. Křivky v grafech 4.2 a 4.3 mají ostřejší pokles z maxima zatížení než je tomu u křivek v grafu 4.1. V grafu 4.3 lze také pozorovat pokles z maxima typický pro postupnou delaminaci vláken v kompozitních tělíscích.



Graf 4.4: Smykový test kompozitních tělísek s 30 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena skleněnými vlákny bez komerční povrchové úpravy

Tab. 4.4: ***Výsledky – Skleněná vlákna bez povrchové úpravy 30 % objemu výztuže***

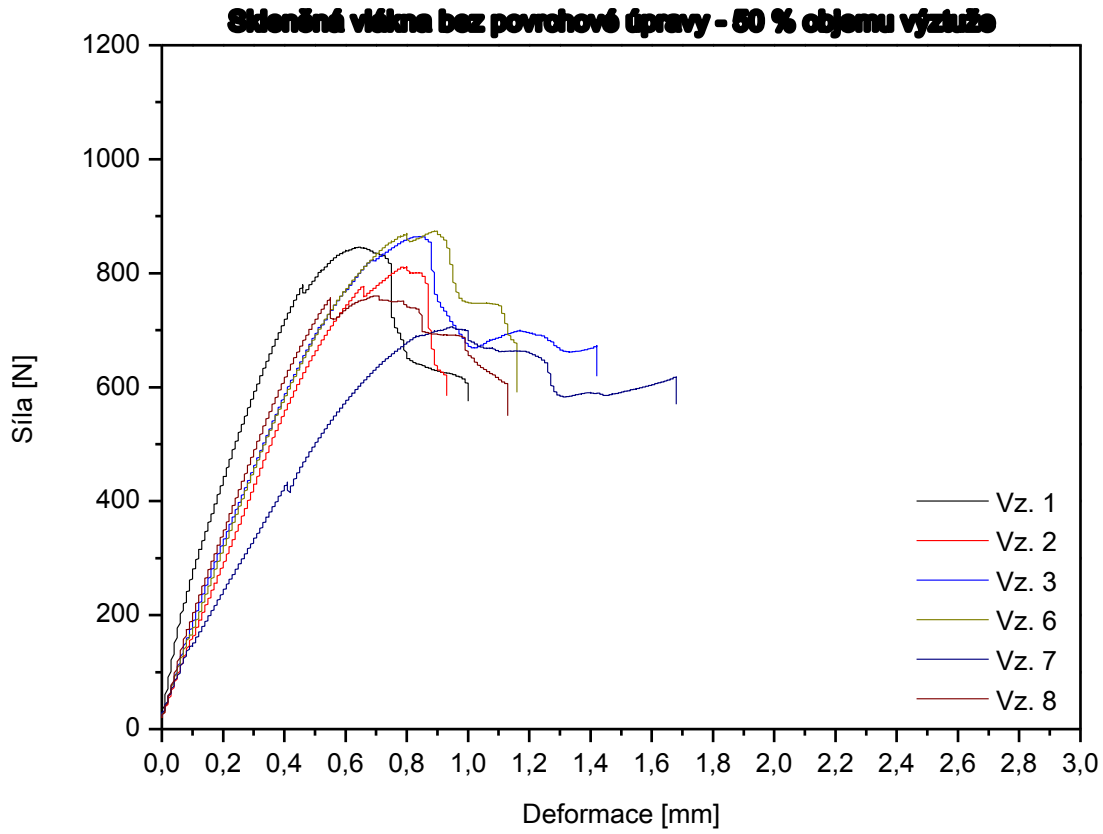
Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	Fmax. N	**T MPa**
1	3,00	8,80	804	**22,8**
2	3,05	9,82	882	**22,1**
3	3,07	9,84	865	**21,5**
4	3,10	9,36	760	**19,6**
5	2,99	9,98	941	**23,6**
6	3,06	9,90	883	**21,9**
Průměr:			8550	**21,9**
Směrodatná odchylka:			64,1	**1,4**
Relativní směrodatná odchylka:			7,5	**6,2**



Graf 4.5: Smykový test kompozitních tělísek s 40 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena skleněnými vlákny bez komerční povrchové úpravy

Tab. 4.5: ***Výsledky – Skleněná vlákna bez povrchové úpravy 40 % objemu výztuže***

Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	Fmax. N	**T MPa**
1	2,96	9,81	574	**14,8**
2	2,94	9,90	700	**18,0**
3	2,97	9,79	711	**18,3**
4	3,18	9,81	796	**19,1**
5	3,18	10,12	821	**19,1**
6	3,18	9,90	815	**19,4**
Průměr:			736	**18,1**
Směrodatná odchylka:			95,1	**1,7**
Relativní směrodatná odchylka:			12,9	**9,4**



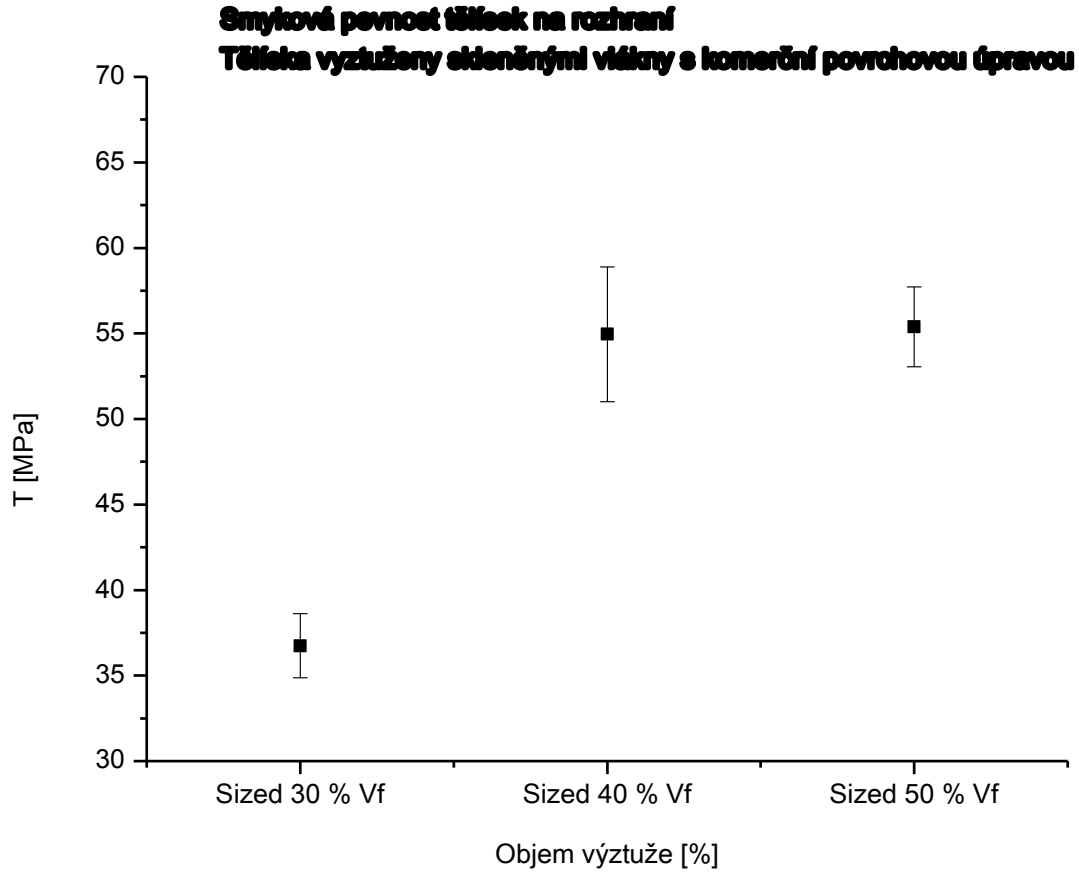
Graf 4.6: Smykový test kompozitních tělísek s 50 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena skleněnými vlákny bez komerční povrchové úpravy

Tab. 4.6: ***Výsledky – Skleněná vlákna bez povrchové úpravy 50 % objemu výztuže***

Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	Fmax. N	**T MPa**
1	3,05	9,83	845	**21,2**
2	3,06	9,96	811	**20,0**
3	3,04	9,87	865	**21,6**
4	2,70	9,78	706	**20,1**
5	2,79	9,79	760	**20,9**
6	3,01	9,64	666	**17,2**
Průměr:			776	**20,1**
Směrodatná odchylka:			78,9	**1,6**
Relativní směrodatná odchylka:			10,2	**7,8**

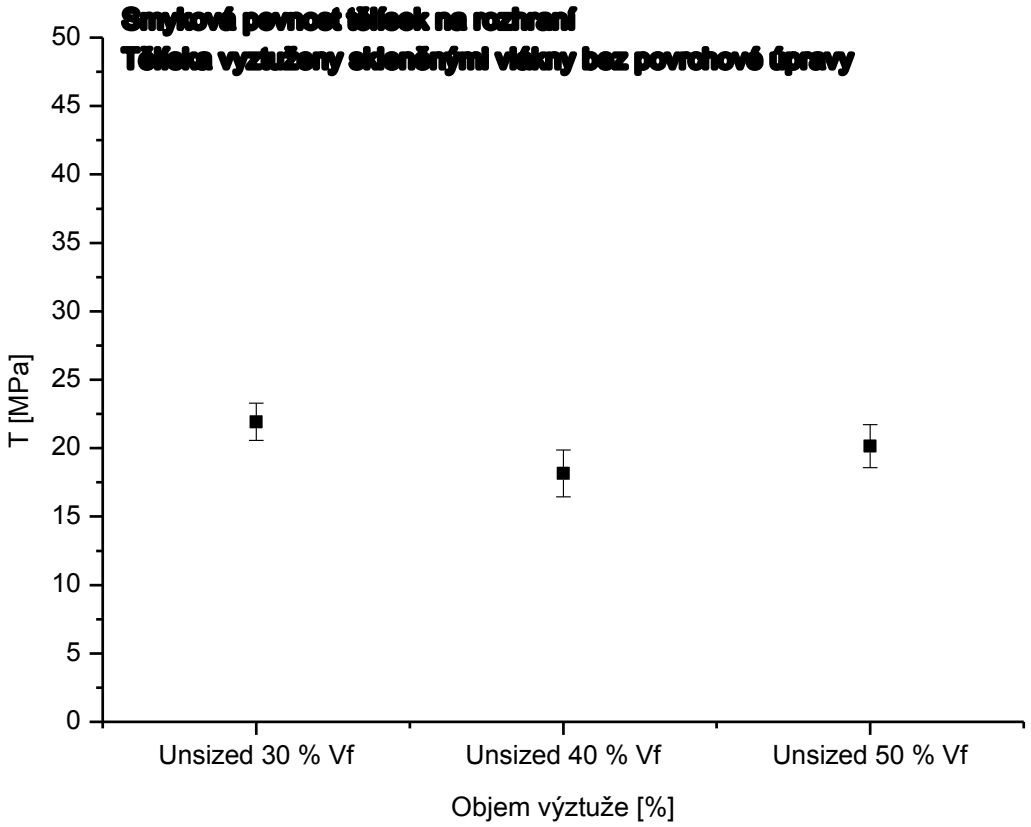
U sérií, kde byla, jako výztuž použita skleněná vlákna bez povrchové úpravy lze vidět odlišný průběh křivek než, jaký je vidět u grafů 4.1 – 4.3. Tento odlišný průběh může mít řadu důvodů. U vláken bez povrchové úpravy není zajištěna adheze na takové úrovni, jako je tomu u vláken s komerční povrchovou úpravou. Při namáhání u smykového testu může také docházet k vytahování vláken z matrice. Na vláknech mohou být také rezidua povrchové

úpravy, která mohou způsobovat nestandardní průběh křivek, kdy křivka je odlišná tím, že při růstu do maxima udělá zub. Příklad lze vidět u grafu 4.6, křivky vzorku 1.



Graf 4.7: Srovnání smykové pevnosti na rozhraní u série tělísek vyztužených skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou

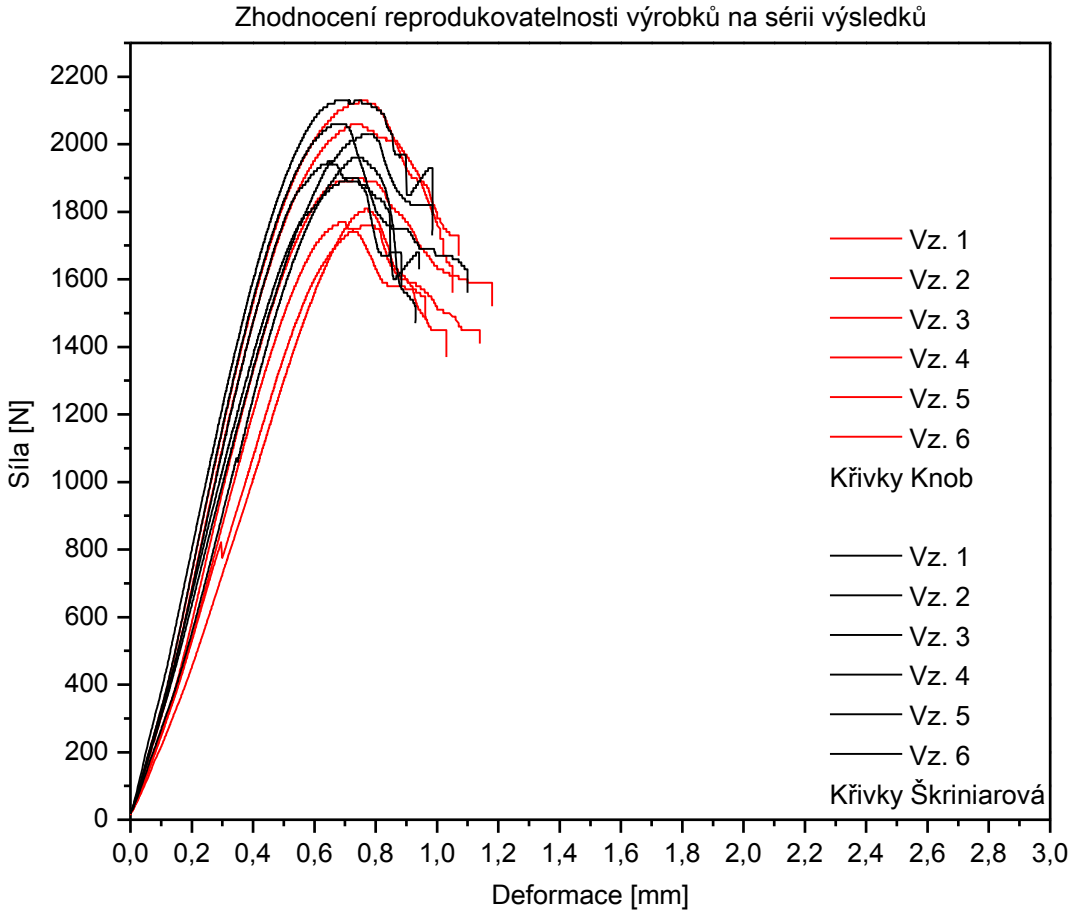
Při smykovém testu tělísek vyztužených skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou ve většině případů došlo při tříbodovém zatěžování k tlakovému porušení včetně mezilaminárního smyku a k porušení testovacích tělísek mezilaminárním smykovým porušením.



Graf 4.8: Srovnání smykové pevnosti na rozhraní u série tělísek vyztužených skleněnými vlákny bez komerční povrchové úpravy

Při smykovém testu tělísek vyztužených skleněnými vlákny bez komerční povrchové úpravy ve většině případů došlo při tříbodovém zatěžování k tahovému porušení včetně mezilaminárního smyku.

V grafu 4.7 u série s 40 % výztuže můžeme u dat vidět mnohem větší odchylku než u zbývajících dvou sérií vzorků. Proto není jednoznačné, zda se jedná o trendové chování. U grafu 4.8 je na základě výsledků zřejmé, že u kompozitních vzorků vyztužených povrchově neupravenými skleněnými vlákny je vliv objemu výztuže zanedbatelný.



Graf 4.9: Zhodnocení reprodukovatelnosti výsledků u série s objemovým podílem 40 % povrchově upravené skleněné výztuže.

Tab. 4.7: ***Výsledky – ověření reprodukovatelnosti (Ing. Antonín Knob)***

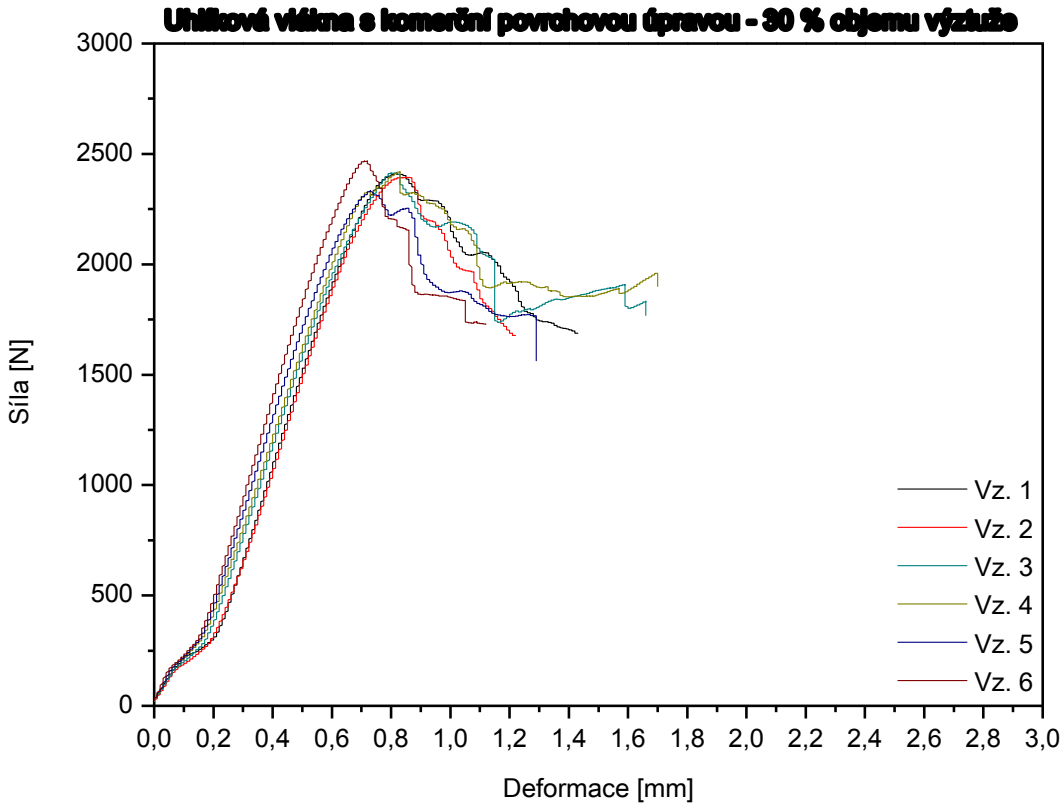
Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	Fmax. N	**T MPa**
1	3,02	9,98	1800	**45,0**
2	2,97	9,97	1900	**48,1**
3	2,87	9,99	1760	**46,0**
4	2,98	9,97	2130	**53,7**
5	3,01	9,9	2060	**51,9**
6	3,04	9,95	1770	**43,9**
Průměr:			1900	**48,1**
Směrodatná odchylka:			156	**3,93**
Relativní směrodatná odchylka:			8,23	**8,18**

Tab. 4.8: *Výsledky – ověření reprodukovatelnosti (Bc. Nina Škriniarová)*

Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	Fmax. N	**T MPa**
1	3,05	10,05	1900	**46,6**
2	3,01	10,03	2060	**51,3**
3	3,05	10,13	1960	**47,7**
4	3,03	9,95	1950	**48,4**
5	3,06	10,06	2130	**51,8**
6	3,46	9,87	2030	**44,6**
Průměr:			2000	**48,4**
Směrodatná odchylka:			83,1	**2,77**
Relativní směrodatná odchylka:			4,14	**5,72**

U série s objemovým podílem výztuže 40 % v grafu 4.8 byla ověřena reprodukovatelnost.

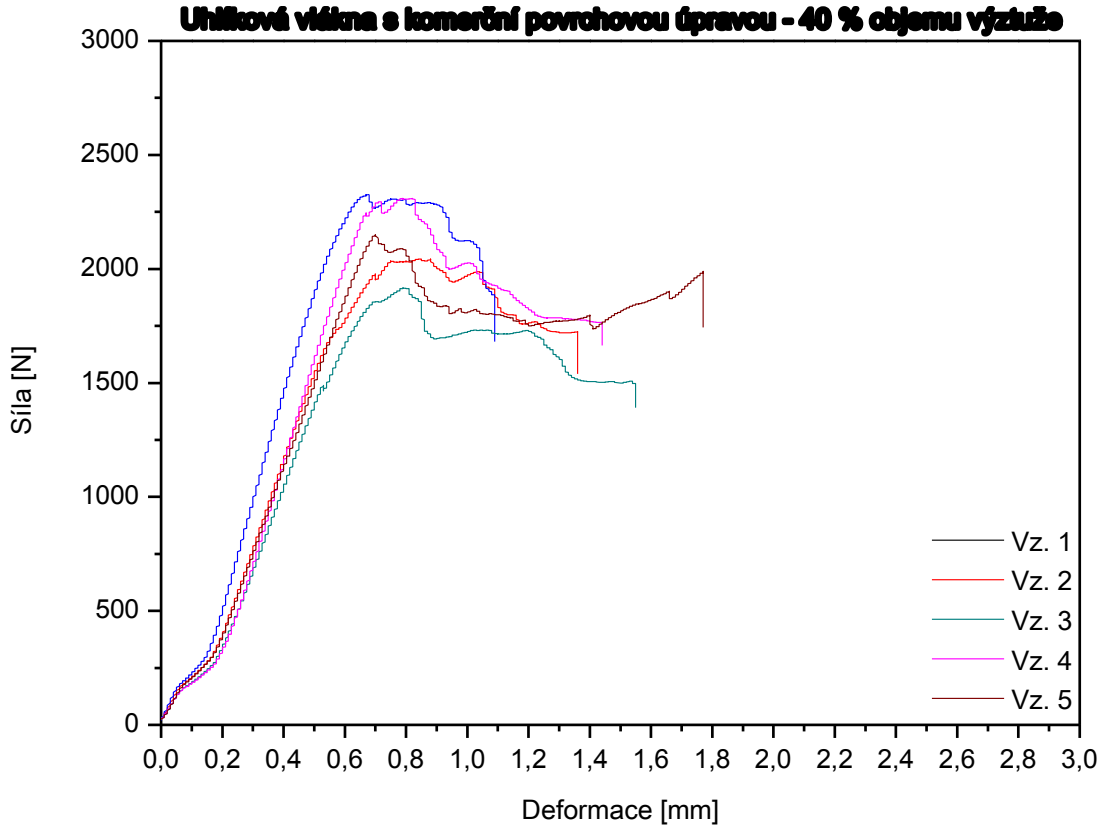
4.1.2 Uhlíková vlákna



Graf 4.10: Smykový test kompozitních tělísek s 30 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Tab. 4.9: *Výsledky – Uhlíková vlákna s povrchovou úpravou 30 % objemu výztuže*

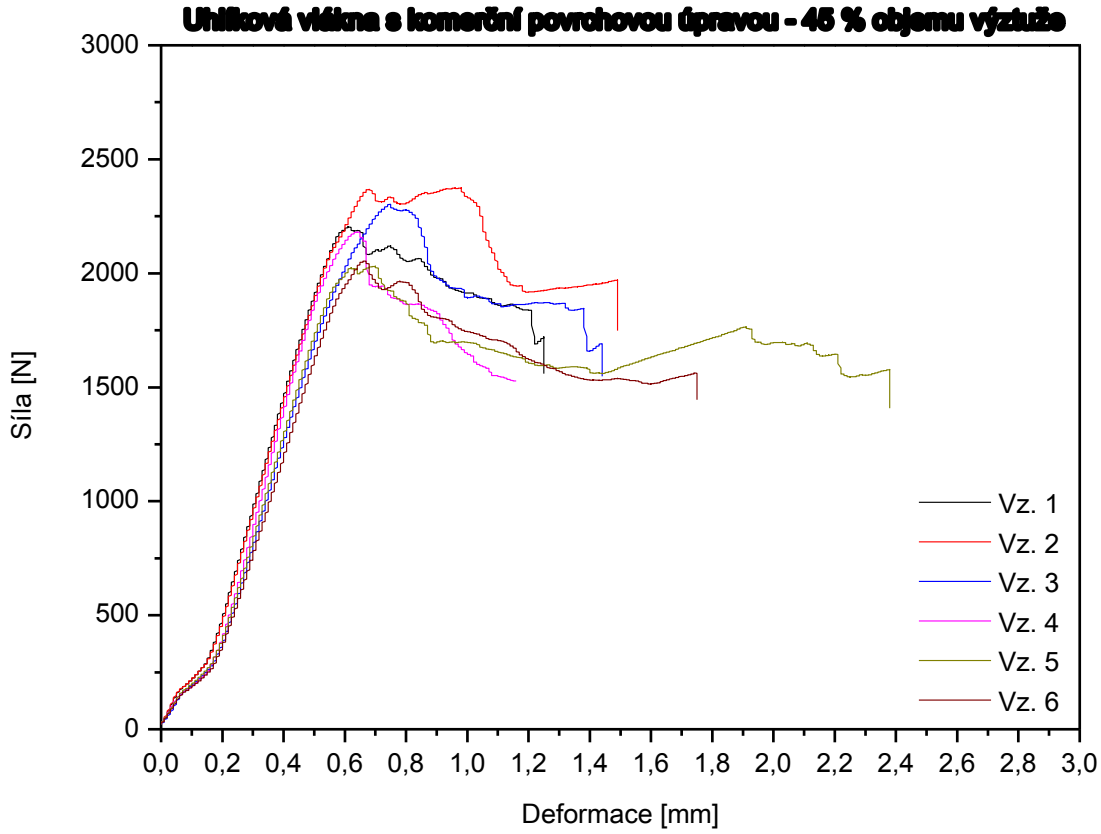
Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	Fmax. N	**T MPa**
1	3,04	9,78	2410	**60,8**
2	3,06	9,95	2390	**59,0**
3	3,02	9,95	2420	**60,3**
4	2,83	9,82	2580	**69,7**
5	3,01	9,96	2420	**60,5**
6	3,00	9,91	2330	**58,8**
Průměr:			2430	**61,5**
Směrodatná odchylka:			83,9	**4,1**
Relativní směrodatná odchylka:			3,5	**6,7**



Graf 4.11: Smykový test kompozitních tělísek s 40 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Tab. 4.10: *Výsledky – Uhlíková vlákna s povrchovou úpravou 40 % objemu výztuže*

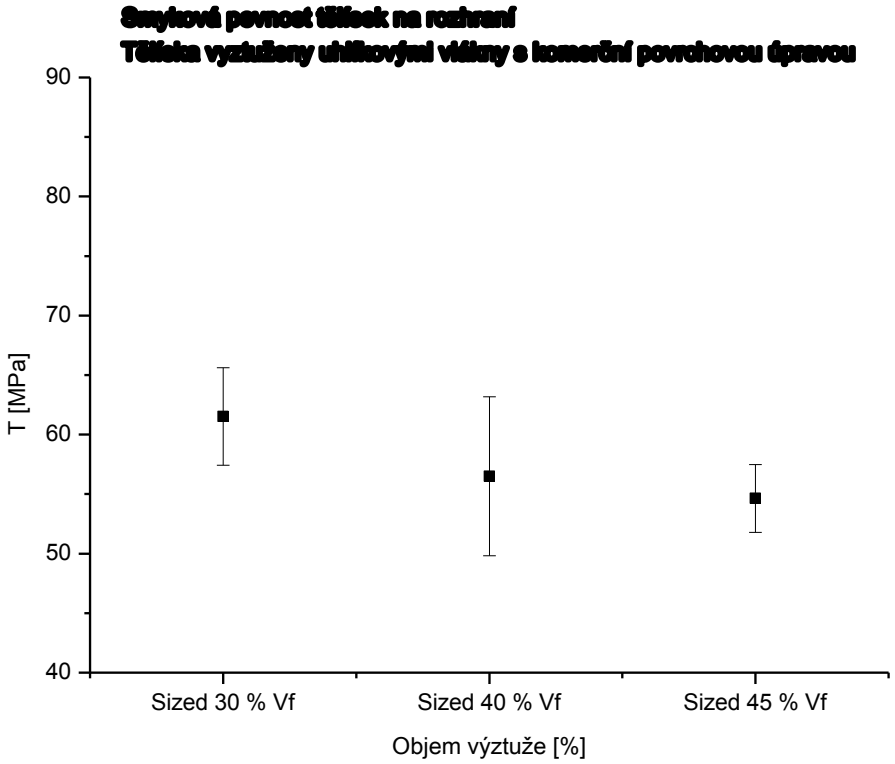
Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	Fmax. N	**T MPa**
1	2,99	9,89	2040	**51,8**
2	3,03	9,96	1920	**47,6**
3	2,94	10,04	2310	**58,7**
4	2,97	10,07	2620	**65,6**
5	3,05	9,96	2500	**61,6**
6	3,01	9,99	2150	**53,6**
Průměr:			2255	**56,5**
Směrodatná odchylka:			269	**6,7**
Relativní směrodatná odchylka:			11,9	**11,8**



Graf 4.12: Smykový test kompozitních tělísek s 45 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Tab. 4.11: *Výsledky – Uhlíková vlákna s povrchovou úpravou 45 % objemu výztuže*

Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	Fmax. N	**T MPa**
1	3,00	9,91	2200	**55,6**
2	3,08	9,96	2380	**58,1**
3	3,12	9,83	2300	**56,3**
4	2,98	9,89	2180	**55,5**
5	2,96	10,01	2030	**51,4**
6	3,02	10,02	2050	**50,9**
Průměr:			2190	**54,6**
Směrodatná odchylka:			135,0	**2,9**
Relativní směrodatná odchylka:			6,2	**5,2**



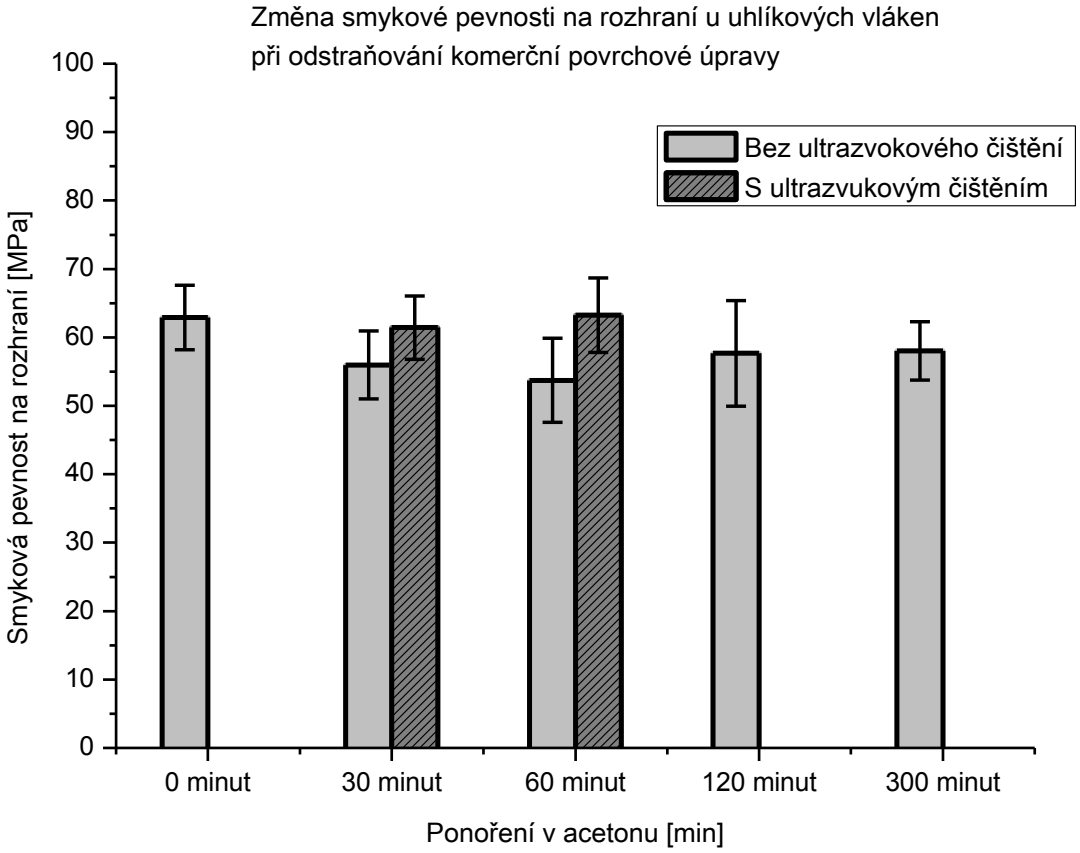
Graf 4.13: Srovnání smykové pevnosti na rozhraní u série tělísek vyztužených uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Při smykovém testu tělísek vyztužených uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou ve většině případů došlo při tříbodovém zatěžování k tlakovému porušení včetně mezilaminárního porušení. Všechna testovací tělíska, u nichž se nevyskytl ani jeden povolený typ porušení dle normy, byla vyřazena.

Smyková pevnost na rozhraní u série vzorků vyztužených uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou je mnohem vyšší než u sérií tělísek vyztužených skleněnými vlákny. Tyto výsledky ukazují dobrou adhezi na rozhraní vlákno-matrice.

4.1.3 Odstraňování průmyslové povrchové úpravy uhlíkových vláken

V rámci experimentální části této práce byly provedeny experimenty, u kterých bylo cílem odstranit komerční povrchovou úpravu uhlíkových vláken. Srovnání smykové pevnosti na rozhraní vykresluje graf 4.14.

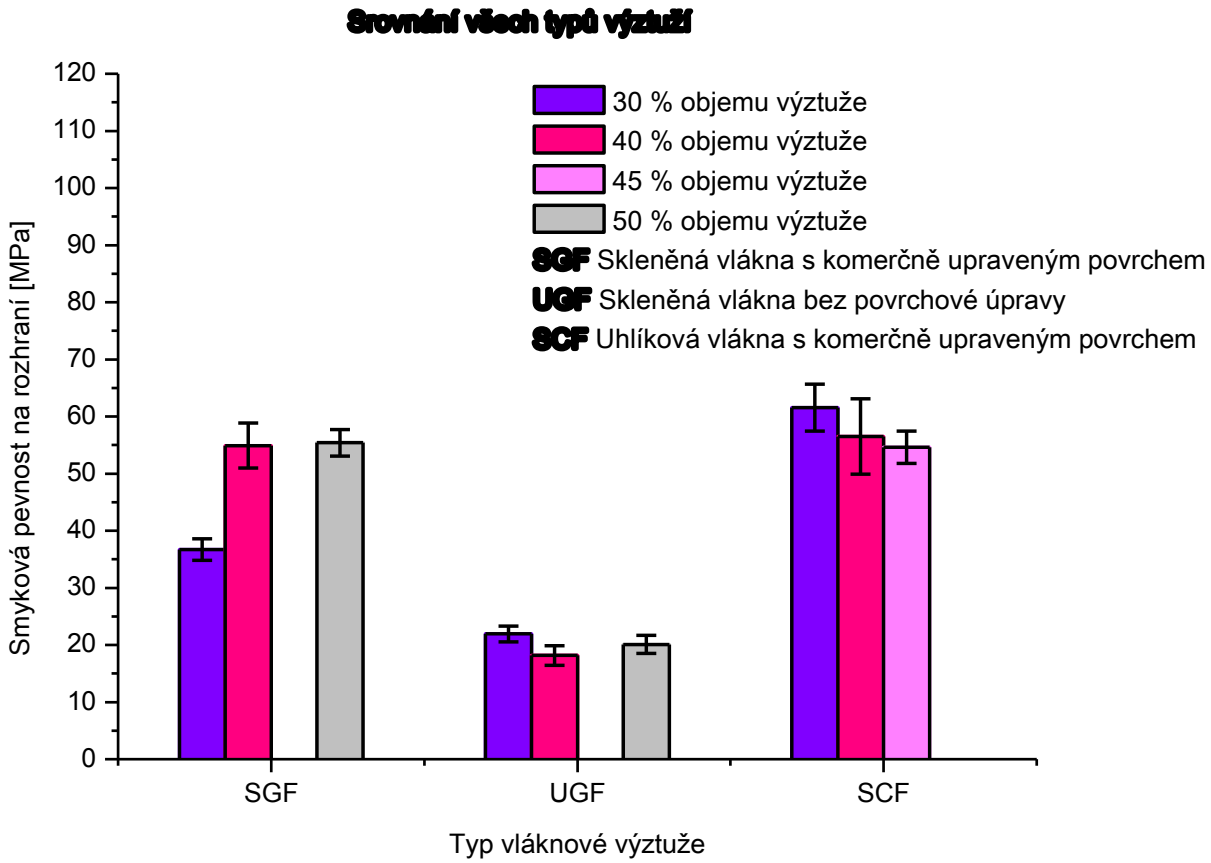


Graf 4.14: Srovnání smykové pevnosti na rozhraní při odstraňování komerční povrchové úpravy uhlíkových vláken

V tomto experimentu byla všechna testovaná tělíska připravena s objemovým podílem výztuže 30 %. Výsledkový sloupec 0 min v grafu znázorňuje testovaná tělíska, vyztužená povrchově upravenými uhlíkovými vlákny. Z těchto výsledků vyplývá, že odstranění povrchové úpravy vláken není jednoznačně prokazatelné ani v rámci postupu ***a*** ani v rámci postupu ***b***, popsaného v experimentální části práce.

4.1.4 Shrnutí výsledků smykového testu pro všechny použité typy výztuží

Pro porovnání vlastností vláknové výztuže byl vybrán jako hlavní parametr smyková pevnost na rozhraní, která je ukazatelem úrovně adheze na rozhraní vlákno-matrice. Pro porovnání tohoto parametru byly vybrány průměrné hodnoty tělísek testovaných při smykovém testu včetně odchylek u všech sérií.



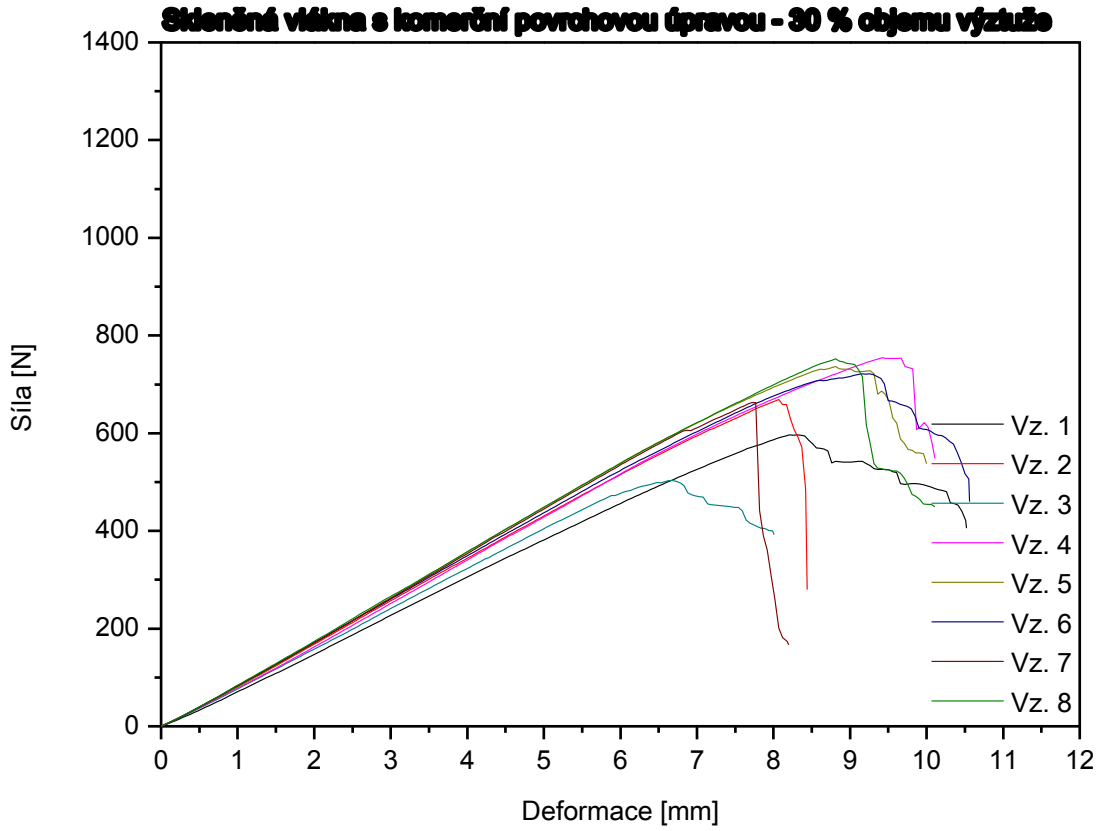
Graf 4.15: Srovnání smykové pevnosti na rozhraní u všech typů výztuží při smykovém testu

Z grafu 4.13 vyplývá, že smyková pevnost na rozhraní je u povrchově neupravené výztuže menší, tudíž adheze na rozhraní vlákno-matrice je u těchto výztuží mnohem horší než u povrchově upravených vláken. Komerční povrchová úprava zabezpečuje lepší adhezi na rozhraní vlákno-matrice. Smyková pevnost na rozhraní je vyšší u testovaných tělísek vyztužených uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou než u vláken skleněných s povrchovou úpravou. Při zvyšujícím se podílu výztuže u povrchově upravených uhlíkovým vláken se smyková pevnost na rozhraní příliš neliší a pohybuje se v rámci relativní směrodatné odchylky.

4.2 Ohybová zkouška

V této výsledkové kapitole přibyl ve výsledkových tabulkách ke grafům nový parametr označen v tabulkách jako W_{RM}. Tento parametr značí houževnatost, která je rovna integrálu plochy pod křivkou v grafu. Tento parametr je roven energii potřebné k selhání materiálu. Jednotkou tohoto parametru je Joul na metr čtverečný (J/m^2).

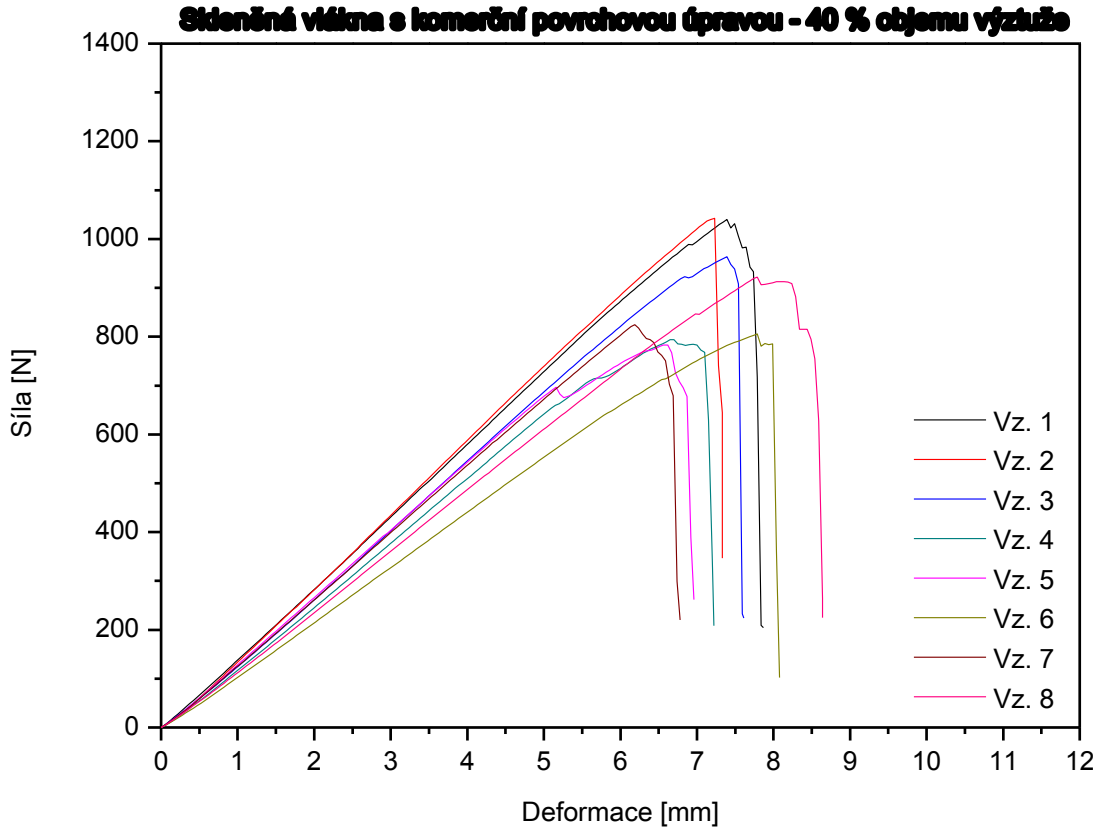
4.2.1 Skleněná vlákna



Graf 4.16: Ohybový test kompozitních tělísek s 30 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Tab. 4.12: ***Výsledky – Skleněná vlákna s povrchovou úpravou 30 % objemu výztuže***

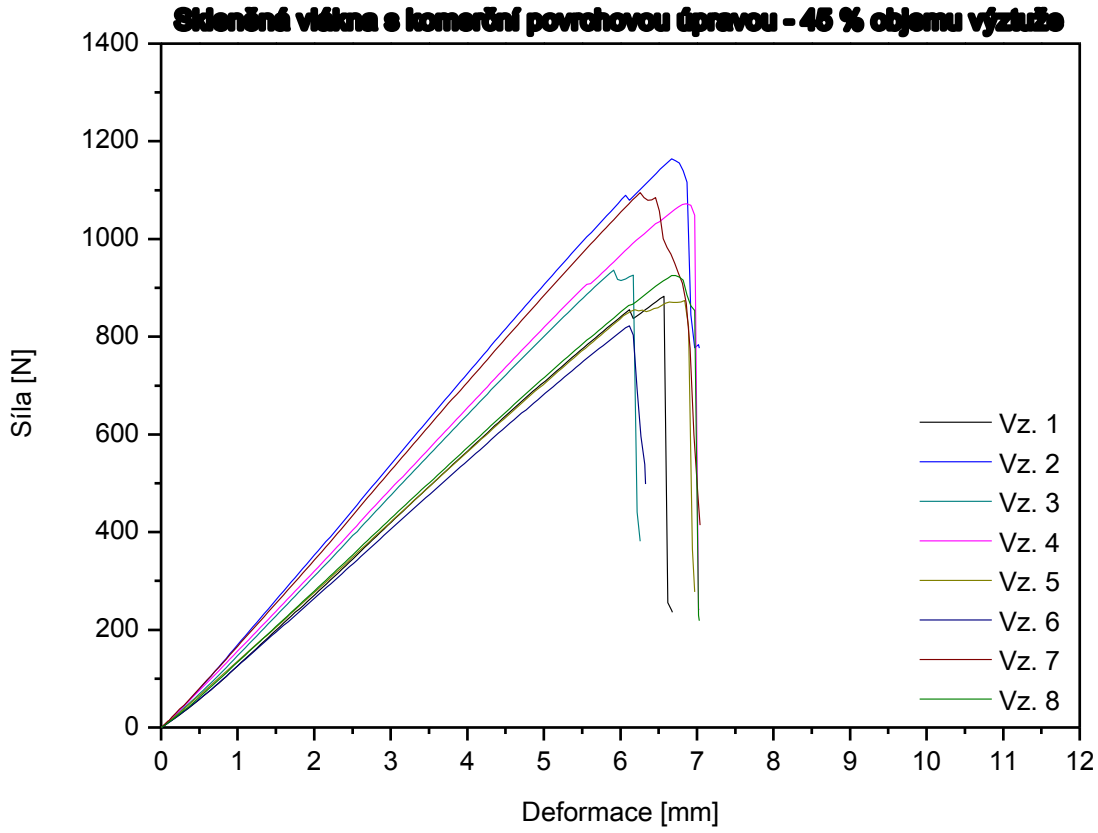
Vzorek	Tloušťka *a*	Šířka *b*	W_{RM}	Fmax.	σ_{fM}
	mm	mm	J/m^2	N	**MPa**
1	2,98	9,81	88600	596	**616**
2	3,24	9,98	85600	669	**574**
3	3,07	9,73	95500	726	**713**
5	3,23	9,91	116000	754	**657**
6	3,22	9,99	106000	736	**640**
7	3,20	9,91	115000	721	**640**
8	3,05	9,99	87000	663	**642**
10	3,11	9,90	111000	752	**707**
Průměr:			101000	702	**649**
Směrodatná odchylka:			13000	55,0	**45,3**
Relativní směrodatná odchylka:			12,9	7,8	**7,0**



Graf 4.17: Ohybový test kompozitních tělísek s 40 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Tab. 4.13: ***Výsledky – Skleněná vlákna s povrchovou úpravou 40 % objemu výztuže***

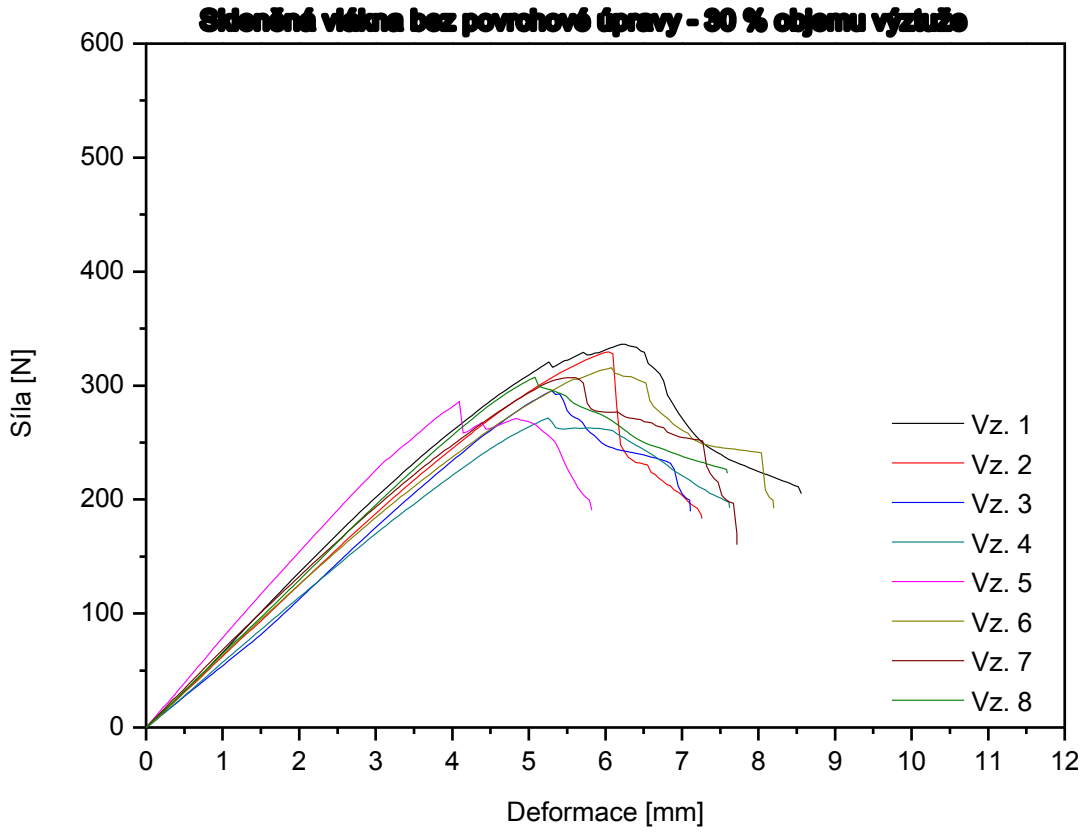
Vzorek	Tloušťka *a*	Šířka *b*	W_{RM}	Fmax.	σ_{fM}
	mm	mm	J/m^2	N	MPa
1	3,35	9,87	118715	1040	**845**
2	3,23	9,86	119510	1042	**912**
3	3,26	9,80	115215	964	**833**
4	3,20	9,93	86846	794	**703**
5	3,15	9,91	91400	783	**717**
6	3,16	9,88	105368	806	**735**
8	3,25	9,96	78764	824	**705**
9	3,17	9,82	117462	922	**841**
Průměr:			104000	897	**786**
Směrodatná odchylka:			163000	109	**80,6**
Relativní směrodatná odchylka:			15,6	12,2	**10,2**



Graf 4.18: Ohybový test kompozitních tělísek s 45 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Tab. 4.14: ***Výsledky – Skleněná vlákna s povrchovou úpravou 45 % objemu výztuže***

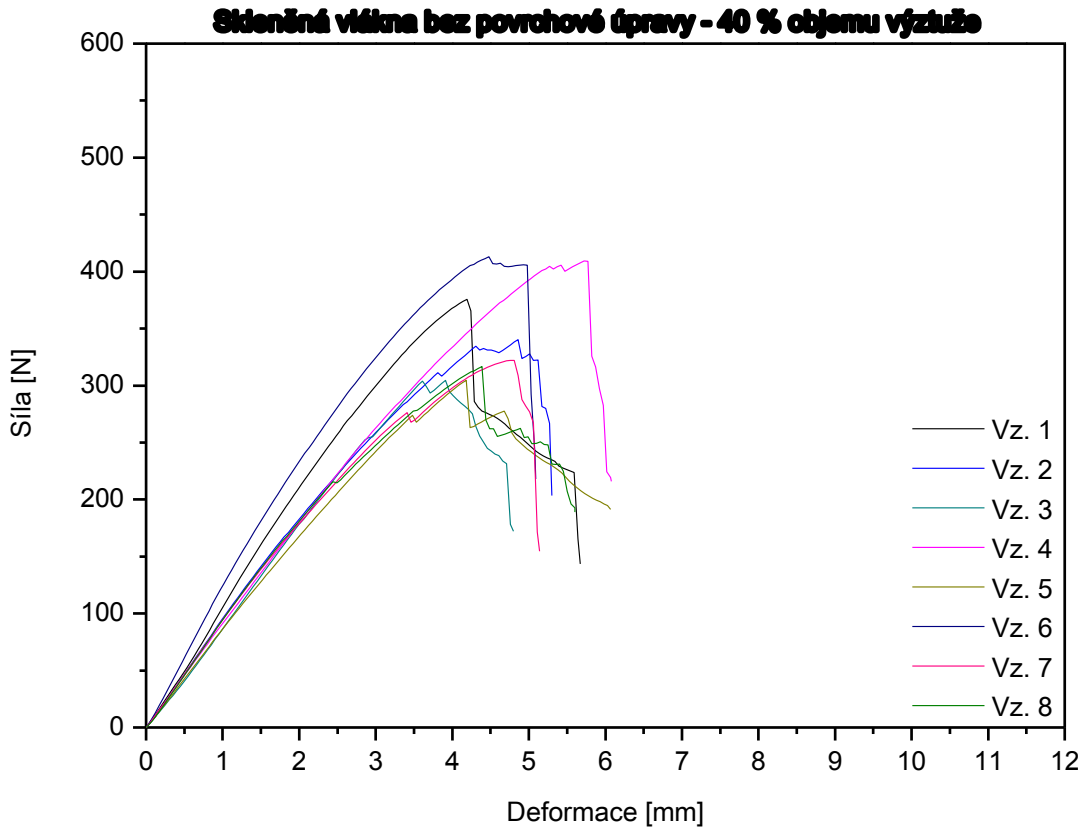
Vzorek	Tloušťka *a*	Šířka *b*	W_{RM}	Fmax.	σ_{fM}
	mm	mm	J/m^2	N	**MPa**
1	3,08	10,07	96526	883	**832**
2	3,15	10,05	125480	1164	**1050**
3	3,16	10,05	87048	936	**840**
4	3,18	9,90	120886	1072	**964**
5	3,12	10,03	103540	874	**806**
6	3,16	10,13	78841	822	**732**
7	3,20	9,90	108409	1095	**972**
8	3,03	10,07	104522	925	**901**
Průměr:			103000	972	**887**
Směrodatná odchylka:			15800	123	**104**
Relativní směrodatná odchylka:			15,3	12,6	**11,8**



Graf 4.19: Ohybový test kompozitních tělísek s 30 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena skleněnými vlákny bez komerční povrchové úpravy

Tab. 4.15: ***Výsledky – Skleněná vlákna bez povrchové úpravy 30 % objemu výztuže***

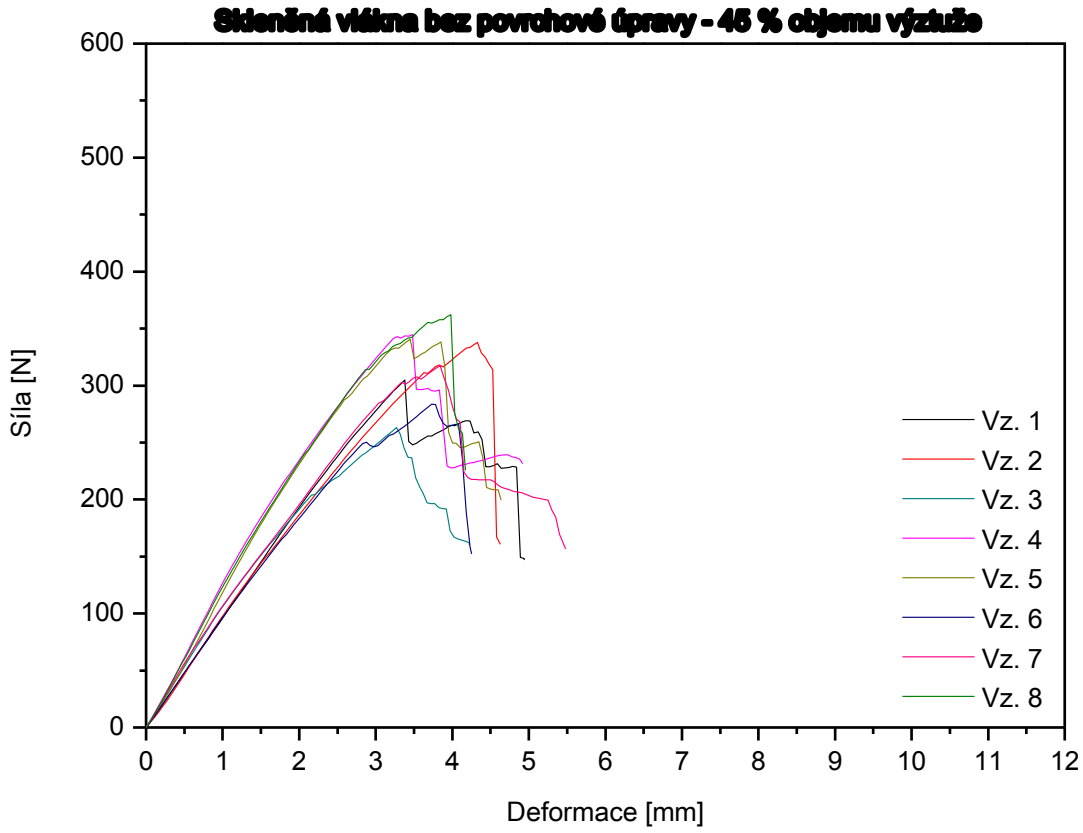
Vzorek	Tloušťka *a*	Šířka *b*	W_{RM}	Fmax.	σ_{fM}
	mm	mm	J/m^2	N	MPa
1	3,18	9,92	38500	336	**302**
2	3,19	9,86	34900	330	**296**
3	3,21	9,89	25400	296	**261**
4	3,23	9,84	24000	272	**238**
5	3,10	9,71	20800	286	**276**
6	3,20	9,86	34200	316	**281**
7	3,29	9,93	29900	307	**257**
8	3,28	9,88	25400	307	**260**
Průměr:			29100	306	**271**
Směrodatná odchylka:			6220	21,6	**21,2**
Relativní směrodatná odchylka:			21,4	7,0	**7,8**



Graf 4.20: Ohybový test kompozitních tělísek s 40 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena skleněnými vlákny bez komerční povrchové úpravy

Tab. 4.16: ***Výsledky – Skleněná vlákna bez povrchové úpravy 40 % objemu výztuže***

Vzorek	Tloušťka *a*	Šířka *b*	W_{RM}	Fmax.	σ_{fM}
	mm	mm	J/m^2	N	**MPa**
1	3,15	10,06	27600	376	**339**
2	3,17	9,91	31300	340	**307**
3	3,08	10,04	21200	305	**288**
4	3,11	9,90	44000	409	**385**
5	3,18	10,07	21800	305	**269**
6	3,27	10,07	32700	413	**345**
7	3,03	9,94	30400	322	**318**
8	3,10	9,94	25900	317	**298**
Průměr:			29400	348	**319**
Směrodatná odchylka:			7280	45,1	**36,6**
Relativní směrodatná odchylka:			24,8	12,9	**11,5**



Graf 4.21: Ohybový test kompozitních tělísek s 45 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena skleněnými vlákny bez komerční povrchové úpravy

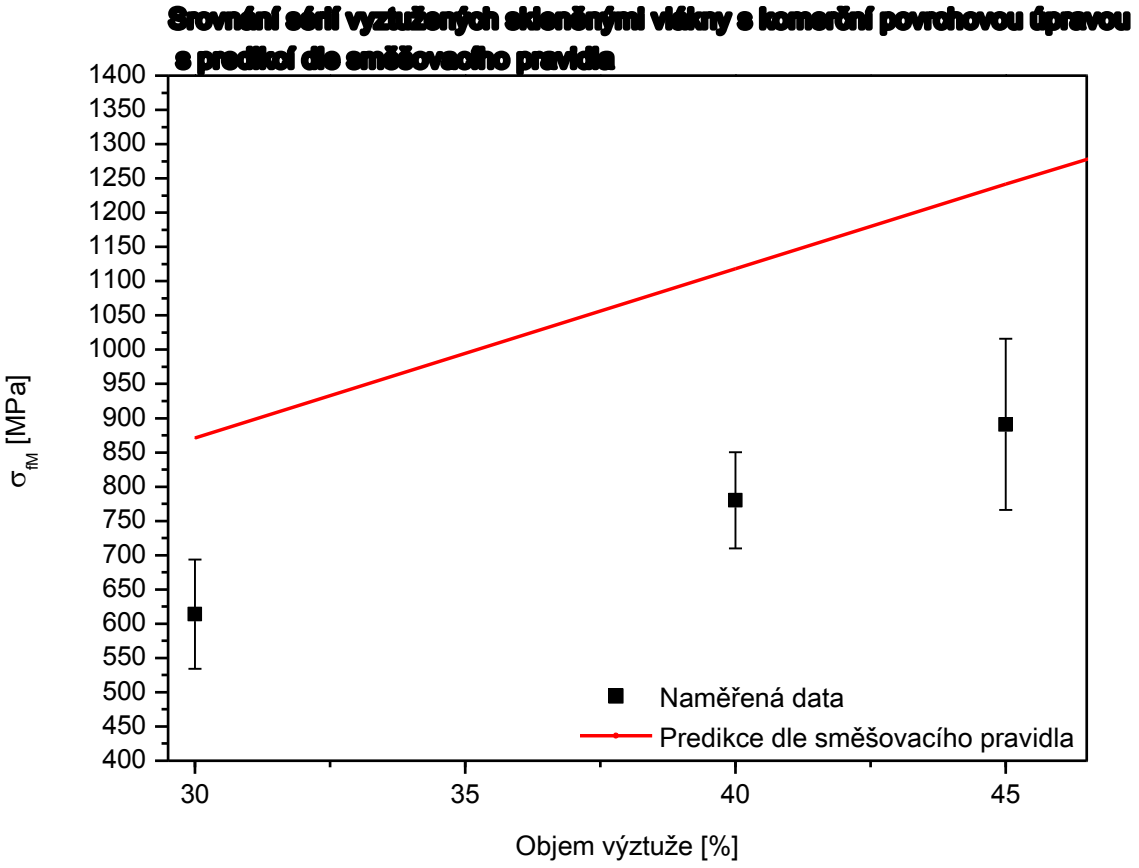
Tab. 4.17: ***Výsledky – Skleněná vlákna bez povrchové úpravy 45 % objemu výztuže***

Vzorek	Tloušťka *a*	Šířka *b*	W_{RM}	Fmax.	σ_{fM}
	mm	mm	J/m^2	N	**MPa**
1	3,12	9,95	21200	340	**316**
2	3,08	9,93	19800	284	**271**
3	3,23	10,01	21700	317	**273**
4	3,25	10,07	26200	362	**306**
5	3,10	10,15	17200	305	**281**
6	3,11	10,02	26600	338	**314**
7	3,06	10,07	16000	263	**251**
8	3,04	10,03	22600	345	**335**
Průměr:			21300	319	**294**
Směrodatná odchylka:			3790	33,6	**28,4**
Relativní směrodatná odchylka:			17,7	10,5	**9,7**

Pro porovnání naměřených výsledků byla použita predikce pomocí směšovací rovnice, která má tvar:

$$E_C = (1 - vf)E_m + vf\,E_f \qquad (6)$$

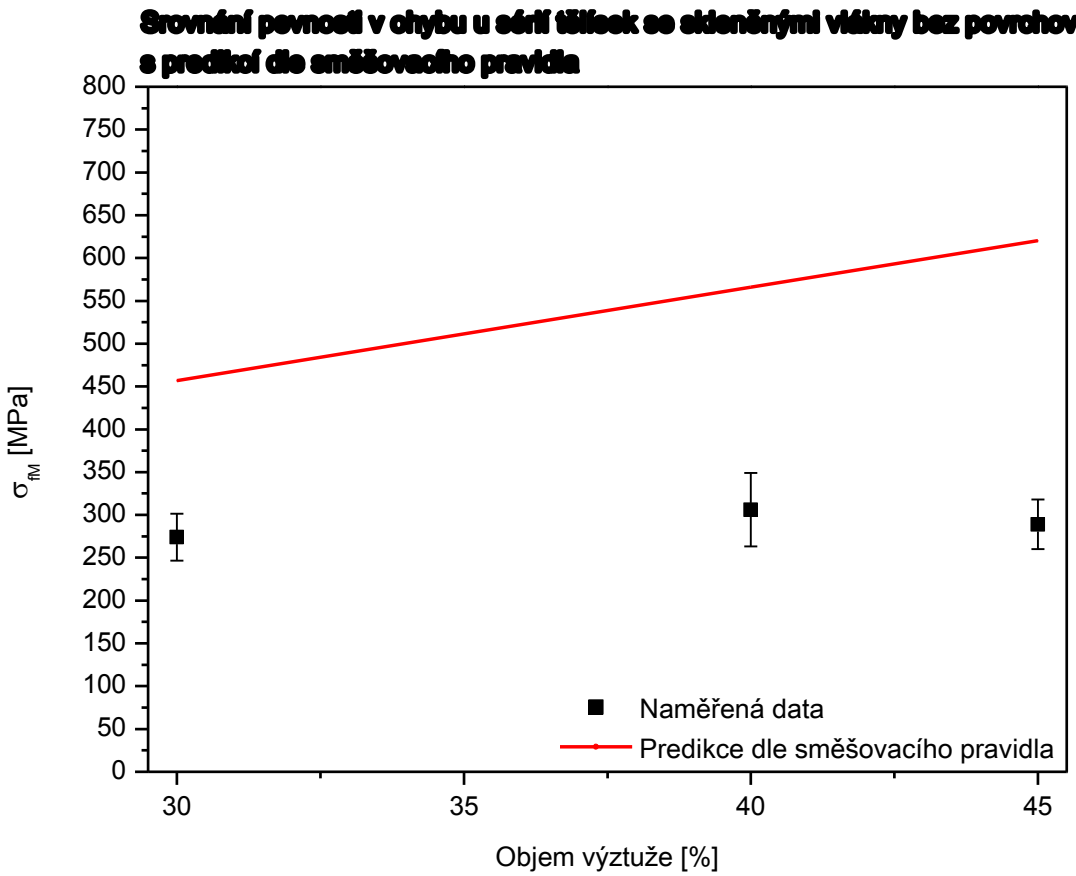
kde E je pevnost v ohybu (index C pro kompozit, index m pro matrici a index f pro vlákna) *vf* je značen objemový podíl výztuže.



Graf 4.22: Srovnání pevnosti v ohybu u všech připravených sérií testovaných tělísek vyztužených skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Při ohybovém testu tělísek vyztužených skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou došlo ve většině případů při tříbodovém zatěžování k tahovému porušení vláken. Všechna testovací tělíska, u nichž se nevyskytl ani jeden povolený typ porušení dle normy, byla vyřazena.

U série testovaných tělísek vyztužených skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou je znatelný nárůst pevnosti v ohybu při narůstajícím objemu výztuže v kompozitním vzorku. Tento trend lze vidět v grafu 4.22. Predikce výsledku dle směšovacího pravidla ukazuje také rostoucí trend pevnosti v ohybu tělísek vyztužených skleněnými vlákny s povrchovou úpravou v závislosti na zvyšujícím se objemovém podílu výztuže. Při ruční výrobě kompozitních vzorků bylo dosáhnuto nejvyššího podílu výztuže při hodnotě 45 obj. % výztuže. Tělíska s vyšším podílem výztuže by nebylo vhodné připravovat, protože před testováním vzorků je potřeba zabrousit přetoky z pryskyřice a pokud by byly připraveny vzorky s vyšším podílem výztuže, při konečném zabroušení před testováním by byla zbroušena i část vláken.

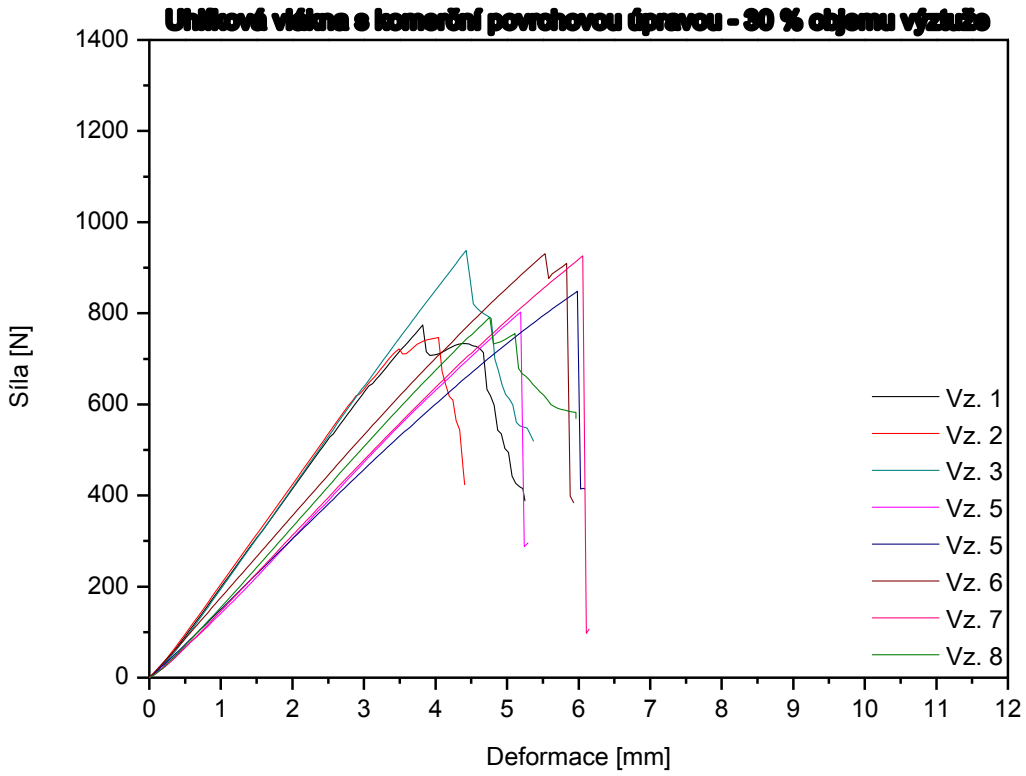


Graf 4.23: Srovnání pevnosti v ohybu u všech připravených sérií testovaných tělísek vyztužených skleněnými vlákny bez komerční povrchové úpravy

Při ohybovém testu tělísek vyztužených skleněnými vlákny bez komerční povrchové úpravy došlo ve většině případů při tříbodovém zatěžování k tahovému porušení vláken a tahovému porušení krajové vrstvy. Všechna testovací tělíska, u nichž se nevyskytl ani jeden povolený typ porušení dle normy, byla vyřazena.

V grafech zobrazující série ohybových testů s povrchově neupravenými skleněnými vlákny si lze povšimnout odlišného průběhu křivek při testování. Na rozdíl od kompozitních vzorků, kde je povrch vláken neupraven, mají křivky u tělísek s upravenými vlákny ostřejší zlom za maximem zatížení tělísek během testu. U povrchově neupravených vláken dochází k horší adhezi, která se může projevovat postupným praskáním svazků vláken v kompozitu.

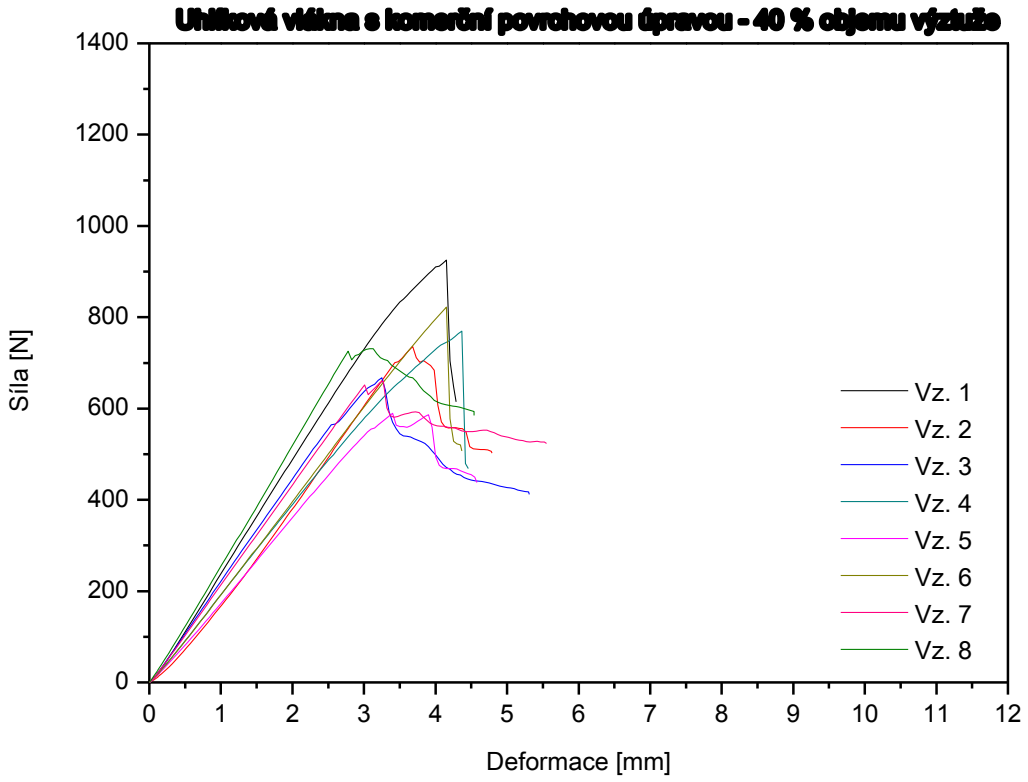
4.2.2 Uhlíková vlákna



Graf 4.24: Ohybový test kompozitních tělísek s 30 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Tab. 4.18: ***Výsledky – Uhlíková vlákna s povrchovou úpravy 30 % objemu výztuže***

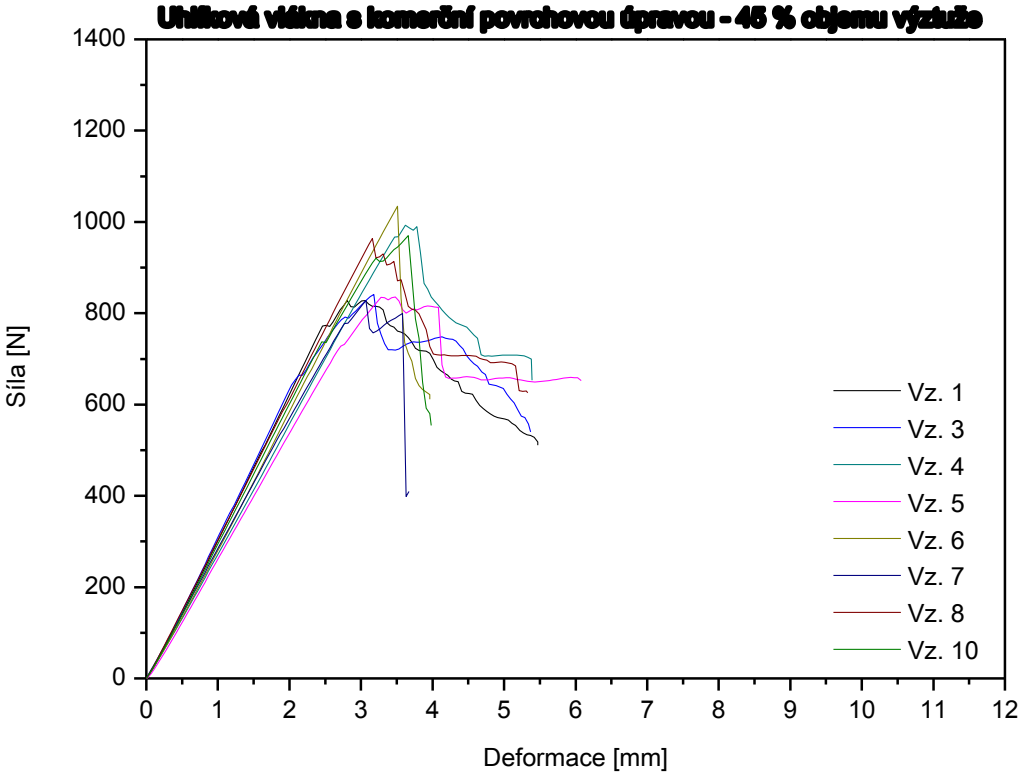
Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	WRM J/m^2	Fmax. N	σ_{fM} Mpa
1	3,08	9,97	48700	774	**737**
2	3,00	10,04	55600	747	**744**
3	3,16	9,90	65700	938	**854**
4	2,99	9,81	71200	803	**824**
5	3,26	9,93	82100	848	**723**
6	3,03	9,97	88300	931	**915**
7	3,05	10,03	93800	926	**893**
8	3,15	9,94	60000	791	**722**
Průměr:			70700	845	**802**
Směrodatná odchylka:			16100	77,5	**79,8**
Relativní směrodatná odchylka:			22,8	9,2	**10,0**



Graf 4.25: Ohybový test kompozitních tělísek s 40 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Tab. 4.19: ***Výsledky – Uhlíková vlákna s povrchovou úpravy 40 % objemu výztuže***

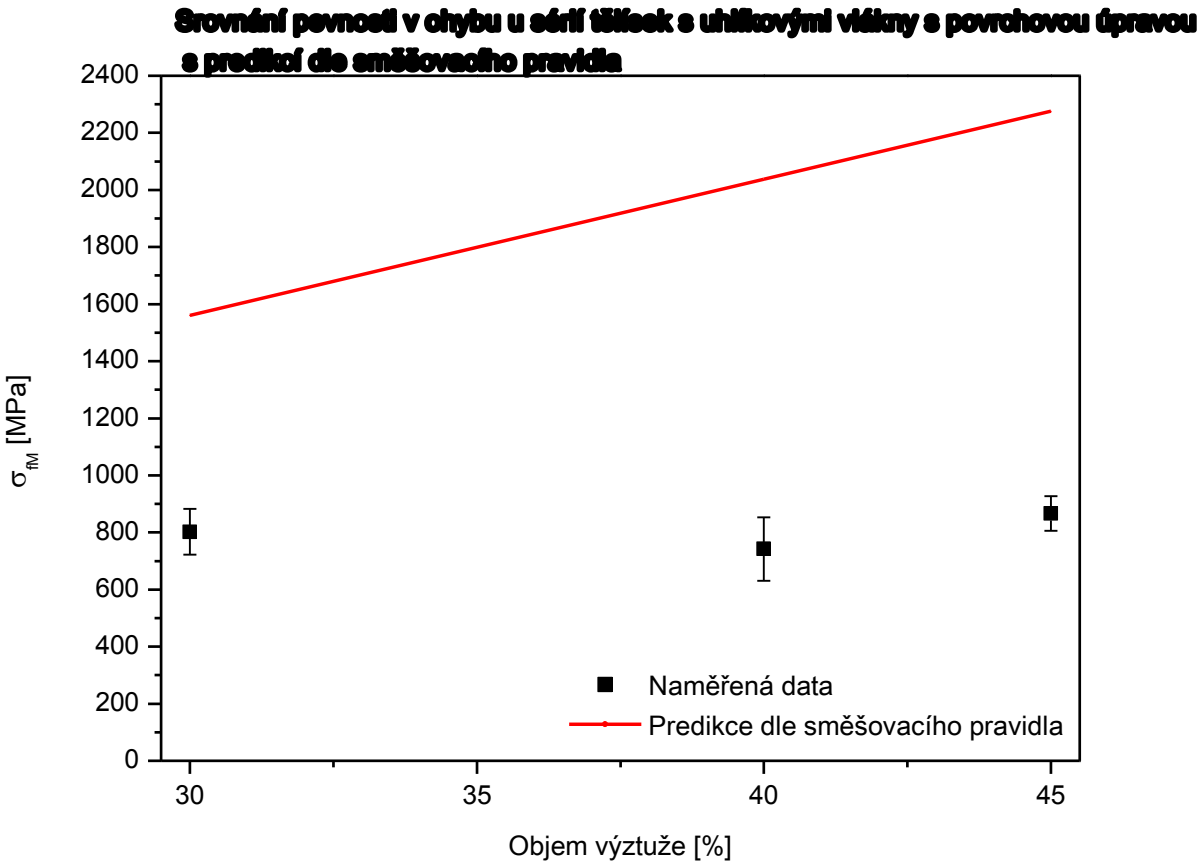
Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	WRM J/m^2	Fmax. N	σ_{fM} Mpa
1	2,98	9,88	69700	925	**949**
2	3,05	10,00	42600	736	**712**
3	2,93	10,01	39200	667	**699**
4	2,95	9,88	61900	770	**806**
5	2,98	9,88	34900	590	**605**
6	3,01	9,92	57300	822	**823**
9	3,01	10,03	37800	661	**654**
10	3,09	10,03	40300	731	**687**
Průměr:			48000	738	**742**
Směrodatná odchylka:			13100	104	**111**
Relativní směrodatná odchylka:			27,2	14,1	**14,9**



Graf 4.26: Ohybový test kompozitních tělísek s 45 % výztuže, přičemž jsou testovací tělíska vyztužena uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou

Tab. 4.20: ***Výsledky – Uhlíková vlákna s povrchovou úpravy 45 % objemu výztuže***

Vzorek	Tloušťka *a* mm	Šířka *b* mm	WRM J/m^2	Fmax. N	σ_{fM} **Mpa**
1	3,01	10,08	39700	828	**816**
3	3,03	9,98	49700	841	**826**
4	3,18	9,93	57700	993	**890**
5	3,06	10,04	51400	836	**800**
6	3,18	9,86	57100	1035	**934**
7	3,06	9,89	44000	828	**805**
8	3,07	9,81	50600	964	**938**
10	3,08	9,90	63400	970	**930**
Průměr:			51700	912	**867**
Směrodatná odchylka:			7690	86,8	**61,7**
Relativní směrodatná odchylka:			14,9	9,5	**7,1**

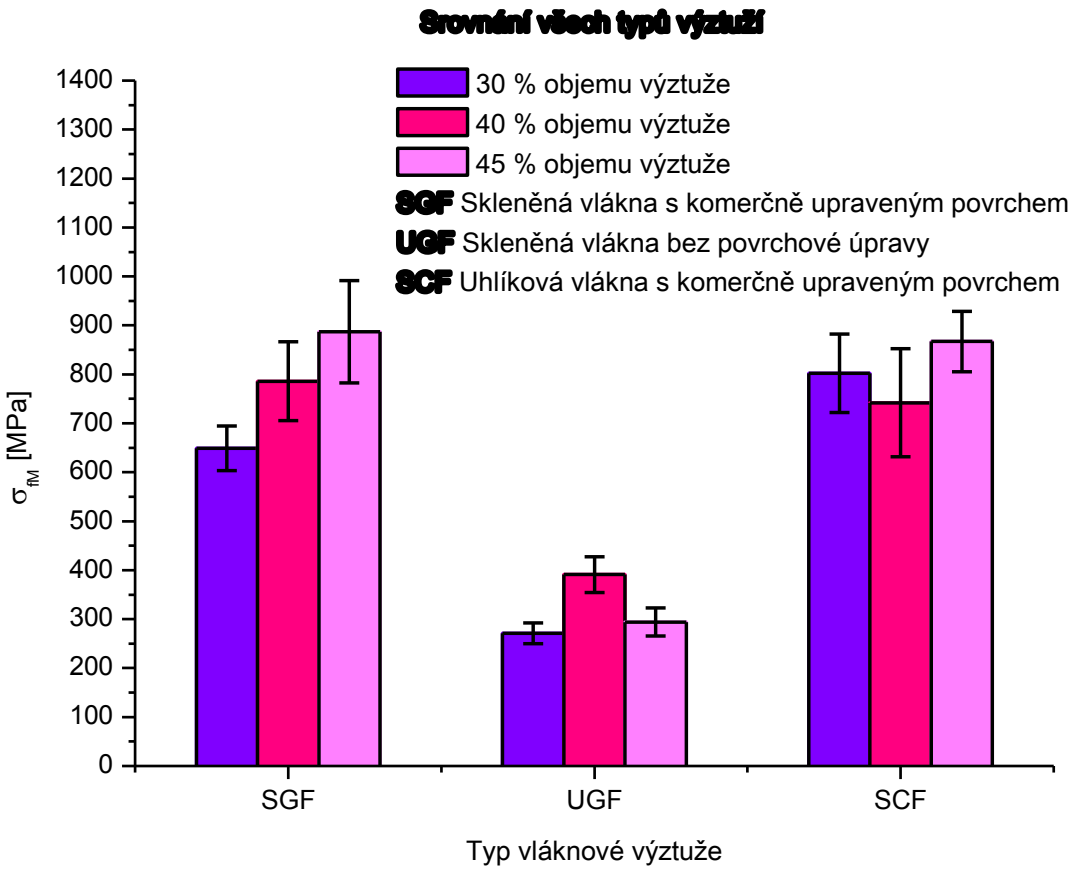


Graf 4.27: Srovnání pevnosti v ohybu u všech připravených sérií testovaných tělísek vyztužených uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou s predikcí dle směšovacího pravidla

Při ohybovém testu tělísek vyztužených uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou došlo ve většině případů při tříbodovém zatěžování k tlakovému porušení. Všechna testovací tělíska, u nichž se nevyskytl ani jeden povolený typ porušení dle normy, byla vyřazena.

V grafu 4.27 je patrné, že se chybové úsečky průměrných hodnot protínají ve stejné úrovni, proto zde není jednoznačně průkazný jakýkoliv trend závislosti pevnosti v ohybu testovaných tělísek s komerčně upravenými uhlíkovými vlákny, na zvyšujícím se objemu výztuže v kompozitním tělísku. Ačkoliv se tento trend neprokázal, dle predikce podle směšovacího pravidla by pevnost v ohybu vzorků s komerčně upravenými uhlíkovými vlákny měla narůstat spolu s rostoucím objemovým podílem výztuže. Tento trend vypočtený pro uhlíková vlákna použitá v této diplomové práci zobrazuje červená křivka v grafu 4.27.

4.2.3 Shrnutí výsledků ohybového testu pro všechny použité typy výztuží



Graf 4.28: Srovnání pevnosti v ohybu u všech připravených sérií testovaných tělísek při ohybovém testu

V rámci grafu 4.28 byly srovnány všechny typy výztuží včetně relativních směrodatných odchylek zobrazených chybovými úsečkami. V grafu 4.28 lze vidět, že kompozitní tělíska vyztužená skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou mají o více než 50 % vyšší pevnost v ohybu než kompozitní tělíska vyztužená skleněnými bez komerční povrchové úpravy.

5. ZÁVĚR

Cílem této práce byla příprava kompozitních vzorků vyztužených dlouhými vlákny a sledování mechanické odezvy připravených vzorků. Kompozitní vzorky byly připravovány ručně vkládáním svazků vláken, která byla prosycena nenasycenou polyesterovou pryskyřicí isoftalového typu do formy z Lukoprenu. Jako první typ výztuže byla použita skleněná vlákna s komerční povrchovou úpravou a bez komerční povrchové úpravy. Druhým typem výztuže byla uhlíková vlákna s komerční povrchovou úpravou.

V rámci zadání diplomové práce byla také ověřena reprodukovatelnost výsledků, provedena na sérii vzorků s 40 % objemovým podílem výztuže, kterou tvořily skleněná vlákna s komerční povrchovou úpravou. Smyková pevnost na rozhraní, vyhodnocená pomocí smykového testu, se relativní směrodatná odchylka pohybovala v intervalu od 4,2 % do 11,8 %. U pevnosti v ohybu, která byla vyhodnocena pomocí ohybového testu, se relativní směrodatná odchylka pohybovala v intervalu od 7,0 % do 14,9 %. Vzhledem k těmto výsledkům se dají tyto naměřená a vyhodnocená data pokládat za reprodukovatelná. Domnívám se, že by tuto relativní směrodatnou odchylku bylo možné dále ještě snížit.

Jako součást této práce byly také odzkoušeny dva možné postupy pro odstranění komerční povrchové úpravy uhlíkových vláken Při vyhodnocení výsledků, bylo zjištěno, že odstranění komerční povrchové úpravy uhlíkových vláken nebylo jednoznačně prokázáno ani postupem statického odstraňování povrchové úpravy v acetonu ani za modifikace tohoto postupu a použití ultrazvuku.

Bylo zjištěno, že smyková pevnost na rozhraní u sérií připravených vzorků vyztužených skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou nezáleží na objemu výztuže, a výsledky jednoznačně neprokázaly trendové chování. Výsledky značí, že adheze u připravených tělísek nezáleží na objemovém podílu výztuže, ale na tom, zda se vytvoří pevná vazba mezi vláknem a matricí, tedy zda jsou vlákna povrchově upravena či nikoliv.

Pevnost v ohybu kompozitních tělísek vyztužených uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou nevykazuje trendové chování. Dle směšovacího pravidla by se vzrůstajícím objemovým podílem výztuže měla pevnost v ohybu vzrůstat. Na rozdíl od sérií vzorků vyztužených uhlíkovými vlákny s komerční povrchovou úpravou lze u sérií vyztužených skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou sledovat trendové chování blížící se predikci dle směšovacího pravidla. U série testovacích tělísek vyztužených skleněnými vlákny s komerční povrchovou úpravou roste pevnost v ohybu se vzrůstajícím objemovým podílem výztuže.

Nižší adhezi povrchově neupravených vláken lze vidět i na jednotlivých křivkách při testování mechanických vlastností, kde u odezvy tělísek s povrchově upravenými vlákny je možné pozorovat v grafech ostrý zlom za maximem zatížení při daném testu, zatímco u tělísek s povrchově neupravenými vlákny probíhá porušování vzorku postupně nakolik je velká adheze jednotlivých svazků vláken k matrici. Tato nestejnoměrná adheze svazků vláken v kompozitu může být způsobena reziduem povrchové úpravy a projevuje se postupně praskajícími svazky vláken v testovaném tělísku.

6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] HULL, D. a CLYNE, T. W. *An introduction to composite materials*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, 326 s. ISBN 05-213-8855-4.

[2] WHITE, Edited by S. K. De. *Short fibre-polymer composites*. Cambridge, England: Woodhead Pub, 1996. ISBN 18-557-3220-3.

[3] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.

[4] KELLY, A a Carl H ZWEBEN. *Comprehensive composite materials*. New York: Elsevier, 2000, 6 v. ISBN 00-804-2993-9.

[5] ČECH, V.: Řízená mezifáze v dlouhovláknových polymerních kompozitech. *Proceeding of XXth International Conference on Reinforced P.* Karlovy Vary: Dům techniky Plzeň, s. 98.

[6] KIM, J-K, MAI Y-W. *Engineered interfaces in fiber reinforced composites*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 1998. ISBN 00-804-2695-6.

[7] BUNSELL, A a J RENARD. *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. Bristol: Institute of Physics Publishing, c2005, xii, 398 p. ISBN 07-503-0689-0.

[8] EDITED BY M. J. OWEN, Edited by M. J.V. *Integrated design and manufacture using fibre-reinforced polymeric composites*. Cambridge, Angleterre : Boca Raton, Flor: Woodhead, CRC Press, 2000. ISBN 18-557-3453-2.

[9] STARR, Compiled by Trevor F. *Glass-fibre directory and databook*. 2nd ed. London: Chapman. ISBN 04-127-8370-3.

[10] DWIGHT, D. W. Glass fiber reinforcements. *Comprehensive Composite Materials* (Ed. Kelly A., Zweben C.). Vol. 1. Amsterdam: Elsevier, 2000, pp. 231 – 261. ISBN 0-080437192.

[11] CHUNG, Deborah D. *Carbon fiber composites*. Boston: Butterworth-Heinemann, 1994, 215 p. ISBN 07-506-9169-7.

[12] SHINDO, A. W. Polyacrylonitrile (PAN)-based carbon fibers. *Comprehensive Composite Materials* (Ed. Kelly A., Zweben C.) Vol. 1. Amsterdam: Elsevier, 2000, ISBN 0-080437192.

[13] SODOMKA,L. *Uhlíková vlákna.* Výzkumná zpráva VŠCHTLiberec 1995

[14] SHEIKH-AHMAD, Jamal Y. *Machining of polymer composites*. 1st ed. New York, NY: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-038-7686-196.

[15] ČECH, V.: New progress in composite interphases: A use of plasma technologies. *Proceedings of FRC 2000.* Newcastle, GB: Woodhead Publishing Ltd, s. 246 – 252, ISBN: 1-85573-550-4.

[16] HODGKINSON, J. *Mechanical testing of advanced fibre composites*. Cambridge, England: Woodhead, 2000, xv, 362 p. ISBN 18-557-3312-9.

[17] DRZAL, Lawrence T., Pedro J. HERRERA-FRANCO a Henjen HO. Fiber – Matrix Interface Tests. *Comprehensive Composite Materials*. Elsevier, 2000, 5, 71 - 111

[18] RAVI B. DEO AND CHARLES R. SAFF. *Composite materials: testing and design (twelveth volume)*. West Conshohocken, PA: ASTM, 1996. ISBN 978-080-3124-042.

[19] ADAMS, Donald F. Test methods for Mechanical Properties. *Comprehensive Composite Materials*. Elsevier, 2000, s. 113. DOI: 10.1016/B0-08-042993-9/00037-1.

[20] ČSN EN ISO 14125. *Vlákny vyztužené plastové kompozity: Stanovení ohybových vlastností*. Praha: CEN, 1999.

[21] ASTM D 790 - 03. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2003.

[22] STM International. *ASTM International: Products and services* [online]. West Conshohocken: ASTM International, 1996 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: http://www.astm.org/Standards/D790.htm

[23] Zwick Roell: Jednička ve zkoušení materiálů. *Zwick Roell* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://www.zwick.cz/cs.html

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

PAN	Polyakrylonitril
HM	High modulus (vysokomodulový)
f / vf	Objemový podíl výztuže
σ_m	Napětí matrice
σ_f	Napětí vláken
σ_Λ	Vnější napětí
τ_i	Smykové napětí působící na povrch vlákna
ξ	Aspektní poměr
W_a	Adhezní práce
T	Smykové napětí na rozhraní
R_1	Průměr zatěžovacího trnu
R_2	Průměr podpěr
γ_{SV}	Povrchová energie na rozhraní pevné látky a plynné fáze
γ_{SL}	Povrchová energie na rozhraní pevné látky a kapaliny
γ_{LV}	Povrchová energie na rozhraní kapaliny a plynné fáze
F_{MAX}	Maximální zatížení pozorováno během testu
E_c	Pevnost v ohybu kompozitu
E_f	Pevnost v ohybu vláken
E_m	Pevnost v ohybu matrice