ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav materiálového inženýrství

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Mechanické vlastnosti kompozitu s nanočásticemi

Mechanical properties of the composite with nanoparticles

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jiří Cejp, CSc.

Jan Málek

Praha 2016

PODĚKOVÁNÍ

V prvé řadě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Cejpovi, CSc. za jeho odborné vedení a připomínky, které mi poskytl během zpracování této bakalářské práce a za trpělivost a čas, který byl ochoten věnovat konzultacím. Dále bych rád poděkoval konzultantovi Ing. Ladislavu Pecháčkovi za cenné rady a pomoc při zpracování této bakalářské práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval všem, kteří mě svými radami a připomínkami pomohli k dokončení bakalářské práce.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá zjištěním mechanických vlastností a struktury kompozitního materiálu s pracovním názvem CCE6 na bázi epoxidové matrice a výztuže zejména z uhlíkových nanočástic CNT´S. V teoretické části jsou popsány základní rozdělení kompozitu dle typu matrice a výztuže. Dále je popsána technologie výroby kompozitních materiálů a struktura uhlíkových nanotrubiček (nanočástic).

Experimentální část bakalářské práce obsahuje přípravu vzorků pro stanovení mechanických vlastností litím do forem. Dále je v experimentální části provedeno testování mechanických vlastností a doplňková analýza struktury materiálu s pracovním názvem CCE6. U testovaných zkušebních vzorků byly změřeny moduly pružnosti v tahu E_T [GPa], ohybu E_O [GPa], napětí v ohybu σ_o [MPa], průhyb y [mm], adhezní síla F_{Amax} [N], adheze (přilnavost) M_A [MPa] a tvrdost Shore *HSD* [ShD]. Tyto mechanické vlastnosti byly zjišťovány zkouškami v tahu, v ohybu a tvrdosti dle Shorea za pokojové teploty. Vnitřní struktura kompozitu byla doplňkově studována s použitím skenovacího elektronového mikroskopu (SEM).

V závěru jsou shrnuty výsledky mechanických zkoušek a doplňkového zjištění struktury kompozitu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozity

Matrice

Výztuž

Nanočástice

Mechanické vlastnosti

Struktura

Disperze

Kompozit CCE6

Uhlíkové nanočástice CNT´S

ABSTRACT

This thesis specifies mechanical properties and structure of composite material the CCE6, based on epoxy matrix and reinforcement made of carbon nanoparticles CNT´S. The theoretical part describes the basic distribution of composite material type matrix and reinforcement. The manufacture technology of composite materials and structure of carbon nanotubes (nanoparticles) is described further.

The experimental part of this thesis includes the preparation of samples for determining the mechanical properties of casting into molds. Further on, tests of mechanical properties and additional analysis of material structure with the working title CCE6 are conducted. Tensile moduli of elasticity E_T [GPa], bending E_O [GPa], the bending stress σ_o [MPa], the deflection y [mm], the adhesion strength F_{Amax} [N], adhesion M_A [MPa] and hardness Shore *HSD* [ShD] were measured at the test specimens. These mechanical properties were measured by tensile tests and bending strength, Shore hardness at room temperature. The internal structure of the composite has been additionally lexamined by a scanning electron microscope (SEM).

The conclusion summarizes the results of mechanical tests and additional findings composite structure.

KEYWORDS

Composites

Matrix

Reinforcement

Nanoparticles

Mechanical properties

Structure

Dispersion

Composite CCE6

Carbon nanoparticles CNT´S

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu, který je na konci této práce.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Praze dne …….. Podpis …….

OBSAH

1 ÚVOD 8
1.1 Rozdělení podle druhu matrice 9
1.1.1 Kompozity s polymerní matricí 9
1.2 Charakteristiky matric 11
1.2.1 Mechanické vlastnosti vybraných matricových materiálů 12
1.3 Rozdělení podle geometrického tvaru sekundární fáze 13
1.3.1 Částicové kompozity 15
1.4 Charakteristiky výztuže 16
1.5 Výroba kompozitních materiálů 17
1.6 Nanočástice 18
1.6.1 Uhlíkové nanotrubičky 18
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 21
2.1 Experimentální materiál ,,CCE6“ 21
2.1.1 Matrice 22
2.1.2 Výztuž 23
2.2 Výroba zkušebních vzorků 23
2.2.1 Formy a vzorky 23
2.2.2 Odlévání vzorků 26
2.3 Experimentální metody 28
2.3.1 Zkouška tahem 28
2.3.2 Zkouška ohybem 29
2.3.3 Odtrhávací zkouška 31
2.3.4 Zkouška tvrdosti podle Shorea 32
2.3.5 SEM kontrola struktury 33
3 VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE 35
3.1 Zkouška tahem 35
3.1.1 Válcové vzorky 35
3.1.2 Ploché vzorky 36
3.2 Zkouška ohybem 38
3.3 Odtrhávací zkouška 39

3.4 Zkouška tvrdosti podle Shorea 40

3.5 SEM kontrola struktury 40

3.6 Diskuze výsledků 42

4 ZÁVĚR 47

1 ÚVOD

Kompozit je materiál složený ze spojité fáze zvané matrice a nespojité fáze dispergované v matrici. Nespojitá sekundární fáze má nejčastěji úlohu fáze vyztužující a nazývá se proto výztuží. Výztuž slouží obecně k vytvoření nového materiálu s celkově vysokou úrovní mechanických vlastností. Nespojitá fáze však může být nositelem i jiných výsledných vlastností materiálu, např. elektrické vodivosti aj. Matrice má v kompozitu několikerou úlohu: zajišťuje spojení sekundární fáze v kompaktní celek (tvar výrobku) a zastává tedy funkci pojiva, zprostředkovává přenos sil na dispergovanou fázi a odděluje vzájemně jednotlivé částice nebo vlákna dispergované fáze od sebe. Kompozity se rozdělují podle dvou základních kritérií: podle druhu matrice a podle druhu sekundární fáze [3].

Ke zvýšení vzájemné soudržnosti fázi a k omezení difúze cizích molekul mezifázovým rozhraním se povrch sekundární fází (plniva) upravuje tzv. apretací. Úprava spočívá v nanesení vhodné chemické látky na povrch částic nebo vláken. U anorganických částicových plniv a vláknitých výztuží vede ke zvýšení tuhosti a pevnosti, u kompozitů s částicovými plnivy obvykle zhoršuje houževnatost [2].

Cílem experimentální části bakalářské práce bylo zejména testování a zjištění hodnot vybraných mechanických vlastností a s tím související příprava vzorků kompozitu s pracovním názvem CCE6. Dále byla provedena doplňková analýza struktury tohoto materiálu. Materiál s pracovním názvem CCE6 je kompozit na bázi epoxidové matrice a výztuže mikrometrických částic (saze – CB (carbon black), typu FT podle ASTM – N880) a nanometrických uhlíkových nanočástic CNT´S.

Pro experimentální část byly stanoveny cíle:

- Mechanické zkoušky za pokojové teploty (zjištění modulu pružnosti v tahu E_T [GPa] a ohybu E_O [GPa], ohybové napětí σ_o [MPa], průhybu y [mm], adhezní síly F_{Amax} [N], adheze (přilnavosti) M_A [MPa], tvrdosti Shore *HSD* [ShD])
- Doplňková SEM kontrola struktury (určení disperze a typu CNT´S částic)
- Zpracování výsledků

1.1 Rozdělení podle druhu matrice

Kompozitní materiály se nejčastěji člení podle materiálu matrice na:

- **Kompozity s polymerní matricí** – Matrici může tvořit termoplast (např. polypropylen, polyamid, polykarbonát), reaktoplast (např. nenasycený polyester, epoxid) nebo sesíťovaný eleastomer (např. styren-butadien, akrylonitril- butadiien).
- **Kompozity s kovovou matricí** – Z matric mají největší význam lehké slitiny (hliníku, hořčíku, titanu), ale i slitiny železa, kobaltu nebo mědi. Sekundární fázi mohou tvořit jak keramické, (např. vlákna z karbidu křemíku), tak kovové materiály, jako např. wolframová vlákna.
- **Kompozity s keramickou matricí** – Jako matrice nejčastěji slouží např. karbid a nitrid křemíku, oxidy křemíku a zirkonia. Funkci vyztužující fáze jsou uhlíková vlákna.
- **Kompozity s uhlíkovou matricí** – Matrici tvoří uhlík v různém stavu strukturní uspořádanosti. Sekundární vyztužující fází jsou uhlíková vlákna [3].

1.1.1 Kompozity s polymerní matricí

Epoxidy

Epoxidové pryskyřice jsou nejvšestrannější reaktoplasty pro konstrukční použití s výbornou odolností proti únavě a tečení, velmi dobrou chemickou odolností a malým smrštěním při vytvrzování. Při vytvrzování se neuvolňují vedlejší zplodiny. Mají přitom velkou adhezi ke kovům [3].

V současnosti je velká pozornost věnována zlepšování mechanických i tepelných vlastností epoxidů pomocí nanočástic. Nanočástice zvyšují tvrdost i modul pružnosti takto vzniklého kompozitu. Z ekonomických důvodů se u epoxidů největší zájem projevuje o zlepšení tepelných a mechanických vlastností u konvenčních dvoj funkčních epoxidů na bázi Bisfenolu A (každá molekula obsahuje dvě reaktivní epoxidové skupiny) [3].

Snahy o zvětšení modulu pružnosti epoxidů vedou k použití i jiných druhů anorganických nanočástic než na bázi jílů. Objevily se již ojedinělé práce o epoxidových nanokompozitech s diamantovými nanočásticemi, s nanočásticemi oxidu křemičitého, zirkoničitého a titaničitého a dále s uhlíkovými nanotrubičkami. Ve všech případech byl

zaznamenán pozitivní vliv na modul pružnosti. Obecným problémem u epoxidových pryskyřic je jejich malá odolnost proti šíření trhliny. Snaha o zvětšení jejich lomové houževnatosti je jedním ze základních vývojových směrů u těchto typů matric [3].

Reaktivní pryskyřice

Tvoří skupinu termosetů nejčastěji používanou při výrobě kompozitů. Jsou to kapalné nebo tavitelné pryskyřice, které se samostatně, nebo za pomocí jiných složek – tvrdidel, tj. iniciátorů, katalyzátorů, urychlovačů, aldehydů (fenolů) apod. – vytvrzují polyadicí nebo polymerací bez odštěpení těkavých složek (ČSN 64 2001). Reaktivní pryskyřice nazýváme také licí, laminační, impregnační, prosycovací nebo zalévací (elektro) pryskyřice [1].

Mezi nejdůležitější typy reaktivních pryskyřic patří:

- **Nenasycené polyesterové pryskyřice** (UP-R) – jednou jejich složkou je nenasycená karbonová kyselina (většinou vícesytná) a nejméně jednou další složkou je alkohol (nejčastěji vícemocný). Pryskyřice je rozpuštěna v monomerním rozpouštědle (často ve styren), se kterým je kopolymerizovatelná.
- **Vinylesterové** (VE-R) nebo **fenakrylátové** (PFA-R) **pryskyřice** z fenylových nebo fenolenových derivátů – jako koncovou skupinou řetězce mají esterifikovanou kyselinu akrylovou. Pryskyřice je rozpuštěna v monomerním rozpouštědle (často ve styrenu), se kterým je kopolymerizovatelná.
- **Epoxidové pryskyřice** (EP-R) – obsahují dostatečné množství epoxidových skupin potřebných pro vytvrzení.
- **Fenolické pryskyřice** - vyrábějí se kondenzací fenolů a vodných roztoků aldehydů.
- **Metakrylátové pryskyřice** (MA-R) – vyrábějí se z polymerizovatelné směsi polymerních a monomerních esterů kyseliny metakrylové.
- **Izokyanátové pryskyřice** – obsahují dostatečné množství izokyanátových skupin potřebných pro vytvrzení [1].

Reaktivní pryskyřice se vytvrzují smícháním s tvrdidly. Mezi nejdůležitější tvrdidla patří iniciátory a urychlovače, ale také aldehydy (fenol).

Tvrdidla jsou sloučeny, které iniciují katalyticky polymerizaci pryskyřic MA-R, UP-R, VE-R nebo FA-R, příp. ovlivňují vytvrzování v průběhu polyadiceepoxidových (EP-R) nebo izokyanátových pryskyřic [1].

Urychlovače jsou látky, které přidány v malém množství urychlují síťovací reakci. Směsi reaktivních pryskyřic s potřebnými tvrdidly (katalyzátor, urychlovač apod.) s plnivy nebo bez plniv, příp. obsahující rozpouštědlo, ale neobsahující vyztužující vlákna, jsou lisovací směsi. Ty se dále zpracovávají [1].

Polymerní kompozity pro vyšší teploty

Nízká teplotní odolnost polymerních materiálů ve srovnání s kovy je problém, který omezuje jejich použití jako matric pro kompozity. Týká se to přirozeně i kompozitů s polymerními matricemi. Proto je vývoji kompozitů s teplotně odolnými matricemi věnována ve světě značná pozornost [3].

Jak konvenční termoplasty, tak i klasické reaktoplasty, tj. bifunkční epoxidy a nenasycené polyesterové pryskyřice již nevyhovují současným požadavkům na teplotní odolnost. Použití kompozitů s polymerní matricí se totiž předpokládá i pro teplotní zatížení vyšší než 180 °C, tedy nad hranicí použitelnosti nejlepších bifunkčních epoxidů [3].

Kompozity pro antikorozní aplikace

Pro antikorozní aplikace byly vyvinuty vinylesterové pryskyřice. Vznikají reakcí mezi epoxidy a nenasycenými kyselinami, jako je akrylová nebo methakrylová. Základní myšlenkou této reakce je náhrada epoxidových skupin nenasycenými molekulárními segmenty, které umožňují snadnou síťovací reakci podobným způsobem jako u nenasycených polyesterů, tj. styrenem, v němž je pryskyřice rozpustná [3].

1.2 Charakteristiky matric

Hlavní úlohou matrice je spojovat vyztužující fázi a chránit ji před vlivy okolí. Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách vláknové výztuže. Mezní poměrné prodloužení matrice při tahovém namáhání by mělo být větší než mezní prodloužení vláken. Tento požadavek však splňují pouze polymerní a kovové matrice. Keramické, skelné, sklokeramické a uhlíkové matrice mají prodloužení při lomu menší než vlákna. Na obrázku 1

jsou schematicky znázorněny křivky napětí – poměrné prodloužení různých matric v porovnání s chováním uhlíkového vlákna se středními hodnotami modulu pružnosti a pevnosti v tahu [4].

Obrázek 1 Schematické znázornění rozdílů v křivkách napětí [4]

Obecným mechanickým požadavkem na matrici je dobrá adheze k výztuži a dobrá mezní tažnost $\varepsilon_{m,krit}$ [4].

1.2.1 Mechanické vlastnosti vybraných matricových materiálů

Nejčastěji se používají organické polymerní matrice. Zaměřím se na jejich dvě základní charakteristické skupiny - reaktoplasty a termoplasty [6].

Základní vlastností reaktoplastů je skutečnost, že zůstávají v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jejich odolnost vůči creepu (tečení) a vyšším teplotám. Při procesu vytvrzování ke vzniku tuhé prostorové polymerní sítě. U konstrukčních aplikací vláknovitých kompozitů tento typ matric převládá. Mechanické vlastnosti u typických reaktoplastů jsou uvedeny v následující tab. 1 [6].

	ρ	E_T	R_{mT}	$\varepsilon_{m,krit}$
	10^3 kg.m^{-3}	GPa	Mpa	%
Epoxidová pryskyřice	1,1 - 1,4	2,1 - 6,0	35 - 90	1 - 10
Polyestery	1,1 - 1,5	1,3 - 4,5	45 - 85	1 - 5
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50 - 60	1 - 3
Polyamidy (až do teploty 350 °C)	1,2	3,0 - 3,1	80 - 190	2 - 40

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti vybraných reaktoplastů [6]

U polymerních matric dochází se zvyšující teplotou ke snížení modulu pružnosti E_T, meze pevnosti R_{mT} s a ke zvýšení tažnosti. Například pro pryskyřici s obchodním názvem EPON

ve složení 100 váhových dílů pryskyřice a 39 váhových dílů tvrdidla (diaminodifenylsulfonu) jsou poměry udány v následující tab. 2 [6].

Teplota	ρ	E_T	R_{mT}	$\varepsilon_{f,krit}$
°C	10^3 kg.m^{-3}	GPa	Mpa	%
25	1,22	2,8	95,1	5,5
120	1,22	2,1	46,2	9,6

Tabulka 2 Závislost mechanických vlastností epoxidové pryskyřice EPON na teplotě [6]

1.3 Rozdělení podle geometrického tvaru sekundární fáze

Kompozitní materiály se člení podle tvaru sekundární fáze na:

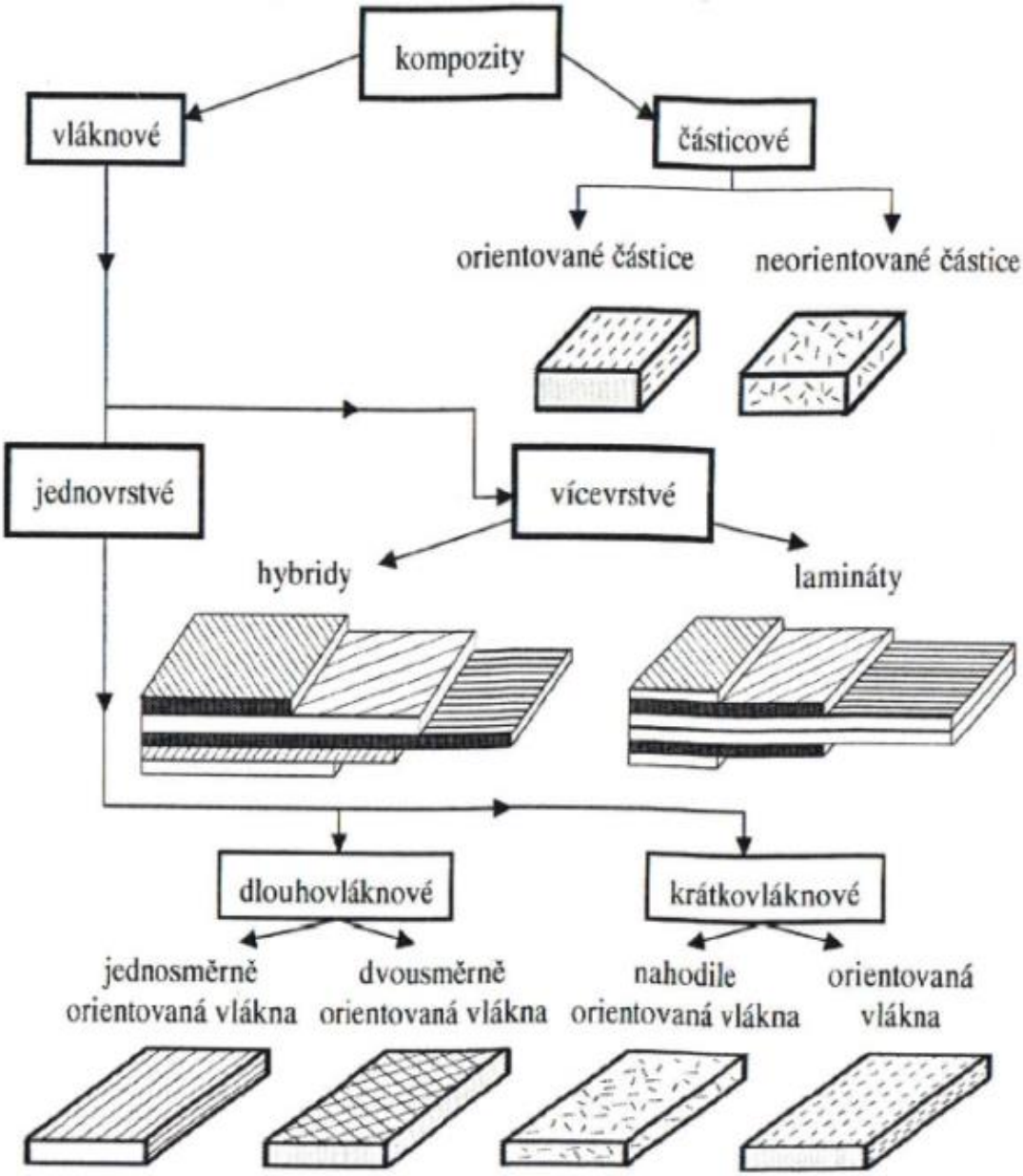
- **Částicové kompozity** – jsou plněny částicemi, které jsou definovány jako nevláknový útvar, který nemá dlouhý rozměr. Mohou být ve tvaru koule, krychle, kvádru, popř. jiného tvaru. Částice se mohou rovněž podílet na přenosu namáhání, ale v mnohem menším měřítku než vlákna [5].

- **Krátkovláknové kompozity** – jsou krátká vlákna (někdy označovaná jako sekaná vlákna) orientovaná nahodile nebo v určitém směru. Ve většině případů jsou orientována nahodile a bývají často vstřikována do formy zároveň s tekutou pryskyřicí [5]. Mezi výhody těchto kompozitů patří odolnost proti stárnutí, nízký creep (tečení) a poměrně dobrá rozměrová stabilita. Nejběžněji používaná vlákna jsou skleněná vlákna ze skloviny E [8].

- **Dlouhovláknové kompozity** – mohou být vlákna uspořádána v jednom směru (jednosměrně orientovaná vlákna) a tím je vytvořen tzv. jednosměrný kompozit - lamina. Tyto kompozity se vyrábějí rovnoběžným ukládáním vláken a jejich prosycením pryskyřicí, která udržuje vlákna v dané poloze a tvoří matrici. Aby se dosáhlo vyrovnanějších vlastností kompozitu, provádí se vyztužení i v druhém směru. Kompozit s dvousměrně orientovanými vlákny je tvořen např. tkaninou (rohoží), která obsahuje vzájemně kolmá vlákna v jedné vrstvě a pryskyřicí (matricí). Může být i trojsměrná orientace [5]. Pro výrobu polymerních kompozitů a kompozitních dílů mají ve

strojírenských oborech praktický význam tři druhy vlákna: skleněná, uhlíková a aramidová [3].

- **Hybridní kompozity** – vrstvy jsou vyrobeny z různých materiálů, například jedna vrstva je vyztužená skelnými vlákny a druhá uhlíkovými. Řadí se k nim i kompozity s vláknovou výztuží současně obsahující částicová plniva, která modifikují vlastnosti plniva [5].



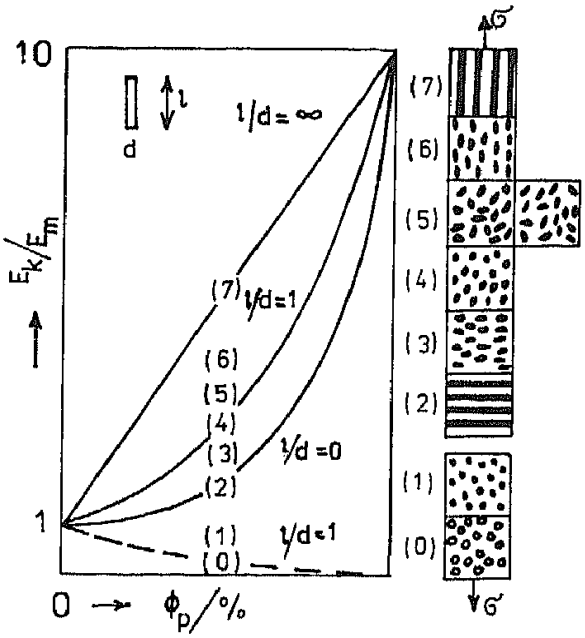
Obrázek 2 Schematické rozdělení kompozitů podle tvaru sekundární fáze [5]

1.3.1 Částicové kompozity

U polymerních kompozitů s částicovými plnivy jsou kromě tvaru částic (sférického, destičkového, jehlicového, nepravidelného) důležité jejich termomechanické vlastnosti (teplotní roztažnost, tuhost, deformační vlastnosti). Anorganické výztuže (např. uhličitan vápenatý, oxidy křemíku a hliníku, malé skleněné kuličky o průměru 5 až 500 µm, zvlášť jemně mletá slída, mikroskopické částice kovů) jsou tužší a zpravidla i pevnější než polymerní matrice, přičemž jsou málo plastické (mimo částice kovů), proto i jimi vytvořené kompozity jsou tužší než matrice a získávají podle typu výztuže některé speciální fyzikální a mechanické vlastnosti (větší elektrickou a tepelnou vodivost, menší teplotní roztažnost, lepší kluzné vlastnosti) [2].

Málo tuhé elastomerní částice, které se snadno elasticky deformují, naopak zmenšují tuhost matrice a současně zvětšují jejich houževnatost, ale také zlepšují odolnost proti cyklické únavě [2].

Z uvedených relací (Obr. 3) vyplývá, že vláknitá výztuž při vhodné orientaci vláken k působícímu silovému toku umožňuje dosáhnout většího zvýšení tuhosti, než k působícímu silovému toku umožňuje dosáhnout většího zvýšení tuhosti než plniva (výztuž) částicová [2].



E_k – modul kompozitu, E_m – modul matrice, E_p – modul plniva, E_d – modul dutin ($E_d = 0$), l, d – podélný a příčný rozměr vláken (částic)
0 – matrice s dutinami (tuhá pěna),
1 – matrice s částicemi elastomeru ($E_m > E_p$),
2, 7 – matrice s dlouhými vlákny ($E_m < E_p$),
3, 6 – matrice s usměrněnými krátkými vlákny ($E_m < E_p$), *4* – matrice se sférickými částicemi ($E_m < E_p$), *5* – matrice s nahodilými vlákny ($E_m < E_p$)

Obrázek 3 Vliv částicových a vláknitých výztuží na relativní změnu modulu pružnosti *E* [2]

1.4 Charakteristiky výztuže

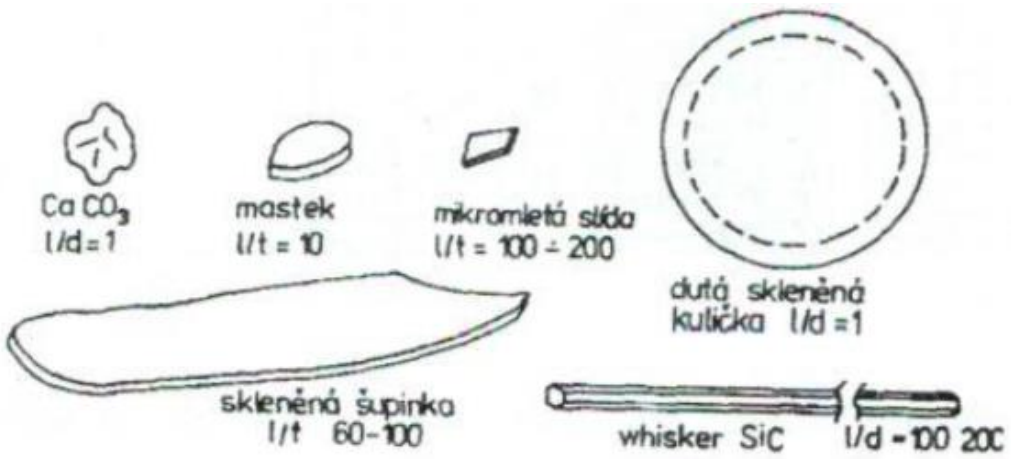
Vlákna jsou vždy mnohem pevnější než stejné materiály v kompaktní podobě (Tab. 3). Pevnost vláken roste se zmenšujícím se průřezem, protože přirozené defekty struktury jsou u vláken malých průměrů také malé a navíc příznivě orientované svým delším rozměrem ve směru osy vlákna. Části vzniklé porušením vlákna při tahovém namáhání mají větší pevnost než vlákno původní, protože k prvnímu lomu došlo z největšího defektu vlákna. Většina vyráběných vláken má kruhový průřez o průměru od 5 do 20 µm. Menší průměry se nepoužívají z technologických důvodů - produkty s velmi tenkými vlákny se obtížně prosycují matricemi [4].

Materiál	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]
Skleněné vlákno typu E	73	2500
Sklovina E	73	100
Uhlíkové vlákno	230 až 950	2000 až 6000
Polykrystalický grafit	10	20
Keramické vlákno SiC	300	3000
SiC monolitický	410	500
UHMW polyethylenové vlákno	90 až 170	3000
Lineární polyethylen	0,4	26
Vícestěnné uhlíkové nanotrubičky (MWCNT) *	**270 až 950**	**11000 až 63000**
Jednostěnné uhlíkové nanotrubičky (SWCNT) *	**320 až 1470**	**10000 až 52000**

** Hodnoty daných materiálů jsou převzaty z publikace /[18], str. 1626 a 1627/.*

Tabulka 3 Porovnávání mechanických vlastností vláken a nanočástic [4]

Pro kompozity jsou vyráběna vlákna skleněná, uhlíková, polymerní, keramická a kovová. Polymerní matrice se nevyztužují kovovými nebo keramickými vlákny nejen z cenových důvodů, ale také proto, že jde o vlákna s větší hustotou. Pro kovové a keramické matrice zase nelze použít vlákna s malou chemickou a tepelnou odolností [4].



Obrázek 4 Tvary a rozměry částic k vyztužení kompozitu s polymerní matricí [4]

1.5 Výroba kompozitních materiálů

Vlastní výrobní technologie spojení nosné části (vlákna) a pojiva (matrice) závisí do značné míry na materiálu matrice. U kompozitních materiálů s polymerní matricí se používá laminace, tlakového vytlačování nebo tažení, při použití kovových matric se používá laminování, válcování či vytlačování [6].

Výrobní technologie	Dlouhé vlákno, organická matrice	Dlouhé vlákno, kovová matrice	Krátké vlákno
Ruční ukládání	x		x
Vakuové zpracování v autoklávu	x		x
Lisování v přípravku	x	x	x
Navíjení	x	x	
Válcování tlakem		x	
Nastříkávání			x
Přenos kapalné matrice	x	x	x
Vytlačování		x	x
Tváření tahem	x	x	
Vstřikování			x
Prášková metalurgie			x

Tabulka 4 Výrobní technologické postupy kompozitních materiálů [6]

Technologie ručního ukládání, kde se jedná o nejjednodušší metodu je omezena jen na kompozity s polymerní matricí. Používá se přitom buď tradiční techniky mokrého ukládání (wet lay-up) nebo techniky před impregnace (prepreg – částečně vytvrzená lisovací hmota neboli polotovar). V prvním případě je vlákno impregnováno kapalnou matricí přímo ve formě a to buď štětcem, nebo nastříkáno pistolí. Tvrdidlo je smícháno s pryskyřicí těsně před aplikací. Nevýhodou této technologie je poměrná nehomogenita struktury. V případě prepregu je již vlákno impregnováno u dodavatele tekutou matricí včetně tvrdidla, přičemž může dojít k částečné polymerizaci. K finálnímu vytvrzení a patřičnému ztuhnutí kompozitu potom dochází v autoklávu při zvýšené teplotě u finálního výrobce [6].

U způsobu wet lay-up se používají výztuže ve formě tkaných rohoží, u techniky prepreg může být výztuž ve tvaru dlouhých vláken, krátkých náhodně uspořádaných vláken nebo ve formě tkaných rohoží [6].

V případě práškové metody je hlavní podstatou této metody kombinace vláknové nebo částicové výztuže s matricí v podobě prášku [4].

1.6 Nanočástice

Za nanočástice a nanokoloidy se považují takové částice, které mají alespoň jeden nebo dva rozměry o velikosti 1 – 100 nm [7].

V současné době jsou požadavky pro nanočástice takové, že průměr nanočástic se musí pohybovat od jednotek do desítek nanometrů. Mají mít dobře definované složení povrchu. Při výrobě musí být reprodukovatelná syntéza se stejnými vlastnostmi částic. Jednoduchá izolovatelnost s možností pro opětovné rozpuštění [7].

1.6.1 Uhlíkové nanotrubičky

Uhlíkové nanočástice (CNT´S – carbon nanotubes) patří k relativně novým nanomateriálům, které jsou veřejností známé již 20 let. K pochopení struktury a vlastností nanotrubiček (CNT´S) je třeba znát vazby mezi jednotlivými molekulami uhlíku [9].

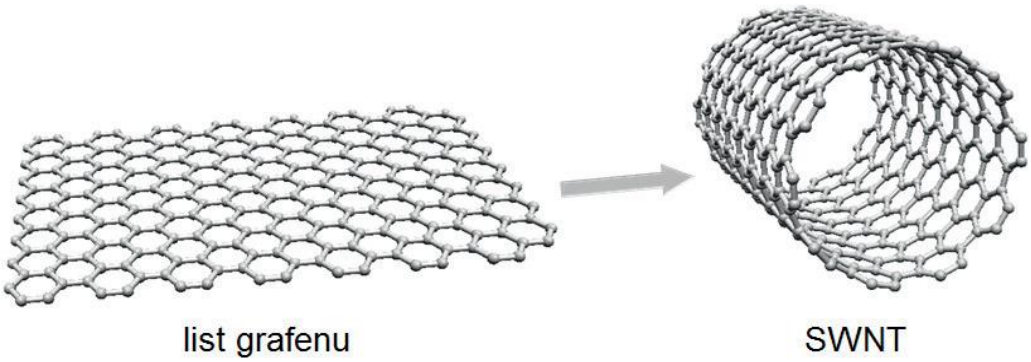
Bohatost uhlíkových struktur lze pozorovat právě na nanotrubičkách, které jsou tvořeny srolovanými uhlíkovými rovinami s sp^2 konfigurací. Kruhové zakřivení způsobí σ-π rehybridizaci, kde jsou σ vazby lehce mimo rovinu. Zbývající π orbital je více delokalizovaný

vně trubičky. Struktura nanotrubiček je tvoří víc elektricky i teplotně vodivými, mechanicky silnějšími a biologicky i chemicky aktivnějšími než grafit. Díky této delokalizaci se může do struktury nanotrubiček zapojit určité defekty, jako například pentagony a heptogony, což má za následek vytvoření zahnutých, toroidních nebo spirálových nanotrubiček, ve kterých budou elektrony lokalizovány právě v pentagonech a hexagonech z důvodu redistribuce π elektronů. Nanotrubičky rozlišujeme nejen na vícevrstvé (MWCNT) a jednovrstvé (SWCNT), ale také na defektní a bezdefektní. Za bezdefektní se považují nanotrubičky, které se skládají pouze z hexagonální struktury. Za defektní se považují ty nanotrubičky, které obsahují topologické defekty, jako pentagony, heptagony nebo jiné strukturní či chemické defekty [10].

Typy uhlíkových nanotrubiček

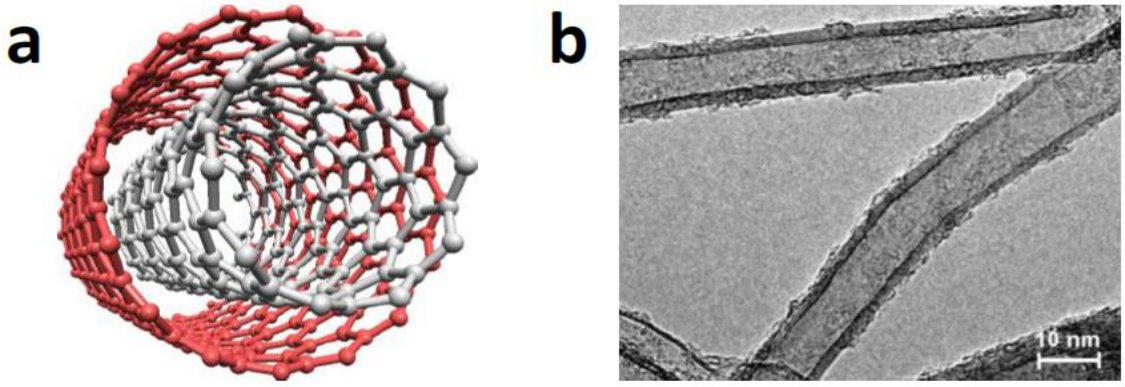
Mezi dva hlavní typy nanotrubiček patří jednostěnné a vícestěnné, které řadíme také mezi bezdefektní. Ovšem existují i jiné vzácné druhy, jako toroidní nebo spirálové, tedy nanotrubičky defektní [10].

Jednostěnné uhlíkové nanotrubičky (SWCNT – single-walled carbon nanotubes) jsou tvořeny srolováním jedné vrstvy grafitu (tzv. grafenová vrstva) do hladkého válce. Nanotrubičky obecně mají poměr délky k průměru asi 1000, takže je vlastně můžeme považovat za jednorozměrné struktury. Většina jednostěnných nanotrubiček (SWCNT) mají průměr okolo 1 nm. Skládá se ze dvou částí s odlišnými fyzikálními vlastnostmi. První část tvoří boční stěna trubice a druhou koncová trubice. SWCNT jsou důležitou skupinou nanotrubiček, protože vykazují mimořádné elektrické vlastnosti, které vícestěnná varianta nanotrubiček (MWCNT) nemá. SWCNT jsou tak velmi dobrými vodiči. Výroba jednostěnných nanotrubiček je stále velmi drahá, což může mít negativní vliv na budoucnost uhlíkové nanotechnologie [10].



Obrázek 5 Srolování grafenu do SWCNT [9]

Vícestěnné uhlíkové nanotrubičky (MWCNT – multi-walled carbon nanotubes) jsou soubor soustředěných SWCNT. Strukturu trubice tak tvoří více srolovaných vrstev grafitu s různými průměry v sobě. Délka a průměr MWCNT jsou velmi odlišné od těch, které měly SWCNT. Samozřejmě jsou velmi odlišné i jejich vlastnosti. Vzdálenost mezi jednotlivými vrstvami trubičky je podobná vzdálenosti mezi vrstvami grafenu v grafitu, přibližně 3,3°. Zvláštním případem jsou dvoustěnné uhlíkové nanotrubičky, jejichž vlastnosti jsou spíše podobné SWCNT než MWCNT [10].



Obrázek 6 a) DWCNT jako nejjednodušší příklad MWCNT, b) TEM snímek MWCNT realizované pomocí PECVD [9]

Struktura uhlíkových nanotrubiček

Uhlíkové nanotrubičky jsou vlastně desky zhotovené z grafitu, které byly srolovány do válcového tvaru. Grafitové listy mohou být rolovány více než jedním způsobem a mohou produkovat různé typy uhlíkových nanotrubiček. CNT´S jsou považovány za téměř jednodimenzionální struktury, v závislosti na jejich velkém poměru délky k průměru. Nejvýznamnějšími zástupci jsou jednostěnné a vícestěnné uhlíkové nanotrubičky. Za jednostěnné nanotrubičky se považují ty, s jedním srolovaným grafitovým listem, zatímco za vícestěnné se považuje několik soustředných jednostěnných nanotrubiček [10].

Vlastnosti uhlíkových nanotrubiček

Jednou z nejdůležitějších vlastností uhlíkových nanotrubiček je, že se mohou chovat buď jako vodiče, nebo jako polovodiče v závislosti na struktuře. To z nich dělá ideální materiál pro uplatnění v elektronice či nanoelektronice. Jejich mechanické vlastnosti z nich zase dělají ideální materiál využívaný jako plnivo do plastů [10].

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Základní popis testovaného kompozitu „CCE6“

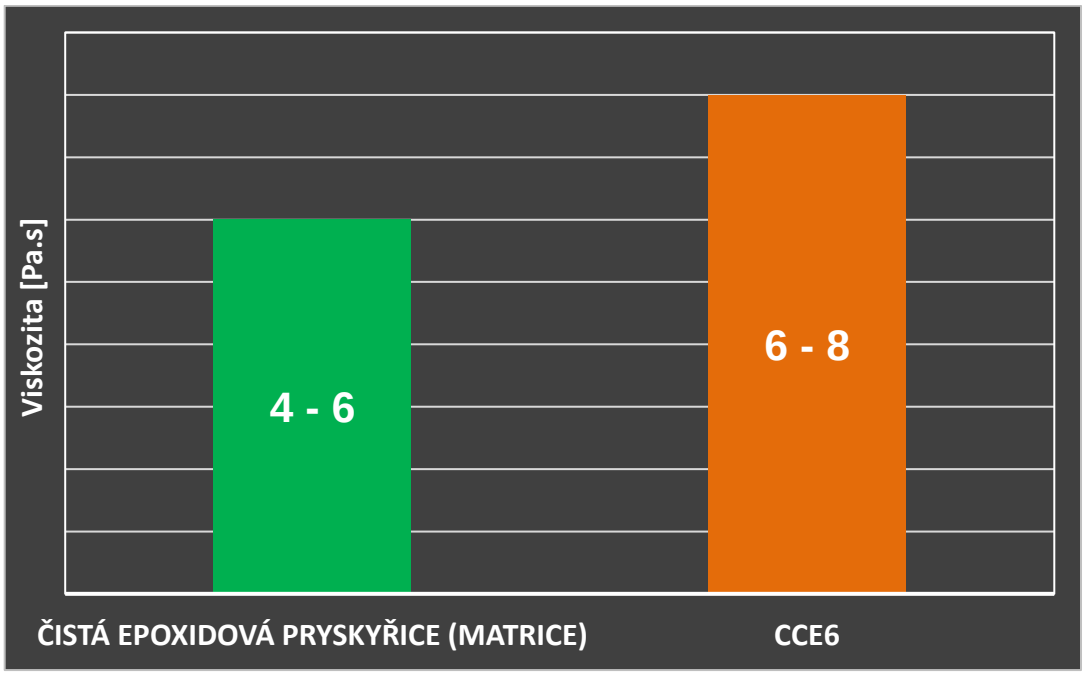
CCE6 je kompozit epoxidové pryskyřice s výztuží mikrometrických částic (saze – CB (carbon black), typu FT podle ASTM – N880) a nanometrických uhlíkových nanočástic CNT´S. Podíl částic v kompozitu je celkem 0,5 % wt. Částice CNT´S jsou zastoupeny zejména typem SWCNT. Materiál byl připraven ve spolupráci firem SOMA spol. s r.o./ SVÚM a.s. V následující tabulce jsou uvedeny již zjištěné vlastnosti a také předpokládané vlastnosti kompozitu CCE6, které byly ověřeny v této bakalářské práci.

Zjištěné a předpokládané charakteristiky kompozitu CCE6	
Specifická elektrická vodivost	< 10^2 Ω.cm
CNT koncentrace	0,5 % hmot.
Epoxidový ekvivalent	181 – 191 g/equ.
Viskozita	6 až 8 Pa.s (smyková rychlost 100 s^{-1})
Modul pružnosti v tahu (Youngův modul)	3,5 GPa *
Ohybové napětí	V rozmezí 60 až 80 MPa *
Adheze (přilnavost)	20 MPa *
Barva	Černá
Tvrdost dle Shorea	V rozmezí 80 až 90 ShD *

Předpokládané hodnoty vychází z hodnot zjištěných firmou SOMA spol. s r.o. po zajišťování ocelových dílů do polymerního betonu.

Tabulka 5 Předpokládané označené jako * a již zjištěné hodnoty fyzikálně – mechanických vlastností materiálu CCE6

Jeho elektrická vodivost a mechanické vlastnosti jsou výsledkem speciální výplně, kombinace mikroskopických a nanometrových částic uhlíku. Bylo ověřeno, že materiál stabilně krystalizuje. Jeho nízká viskozita, daná vlastnostmi zejména epoxidové matrice v tekutém stavu umožňuje dobré zpracování, zejména litím. Materiál je zejména vhodný pro použití jako vodivý povlak. V následujícím grafu č. 7 je uvedeno porovnání viskozity čisté pryskyřice, která byla použita jako matrice a viskozity vlastního kompozitu CCE6.



Graf 7 Porovnání viskozity u čisté epoxidové pryskyřice a kompozitu CCE6

2.1.1 Matrice

Matricí je epoxidová pryskyřice s teplotní odolností min. 80 °C po vytvrzení. Pryskyřice je na bázi bisfenolu – A/F. Obsah reakčních produktů bisfenol-A-(epichlorhydrin) 25 – 50 %, reakční produkty bisfenol-F-(epichlorhydrin) a epichlorhydrin 50 %. Tvrdidlo použité pro síťování a vytvrzení matrice je na aminové bázi – 3-aminomethyl – 3,5, 5-trimethylcyclohexamin 100 %. Tato čistá epoxidová pryskyřice matrice má modul pružnosti 3,4 GPa, zjištěná experimentálně v rámci jiné činnosti SOMA spol. s r.o. / SVÚM a.s.

Základní vlastnosti tvrdidla	
Bod vzplanutí	ca. 117 °C
Hodnota pH	11,6
Bod varu	247 °C
Bod vznícení	380 °C
Bod tuhnutí	10 °C
Dolní mez výbušnosti	1,2 %
Viskozita	18 mPa.s
Hustota	0,920 – 0,925 $g.cm^{-3}$

Tabulka 6 Základní vlastnosti tvrdidla

2.1.2 Výztuž

Výztuží jsou zejména SW a v menší míře MW nanotrubice CNT´S (viz kapitola 1.6.1) a saze CB (carbon black ,,typ FT podle ASTM – N880“) s následujícím objemovým podílem CNT´S: 0,5 % wt. a saze CB: 0,1 % wt. Mísicí poměr pryskyřice s vyztuží/tvrdidlo: 100/23.

Vytvrzení systému probíhá při 80 °C / 24 h (viz kapitola 2.2.2).

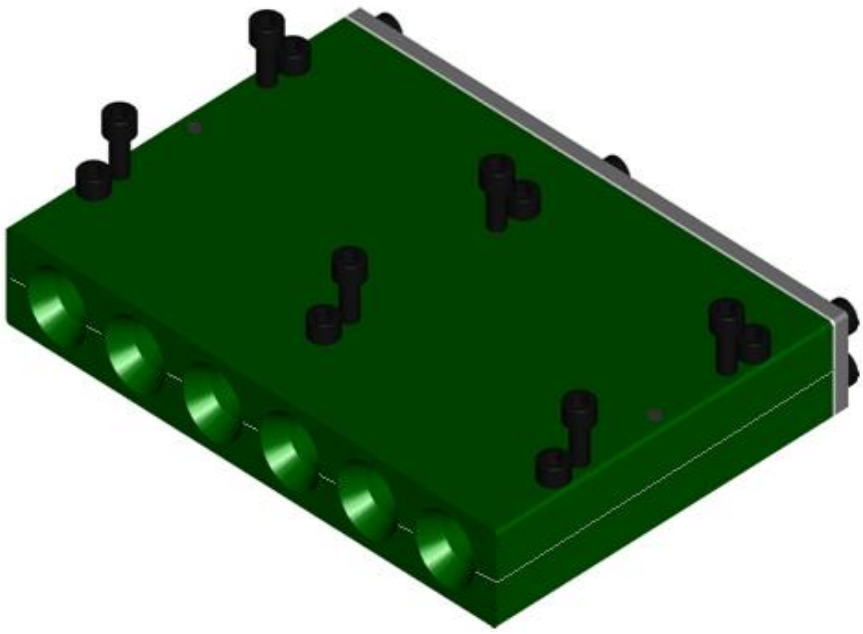
2.2 Výroba zkušebních vzorků

Zkušební vzorky pro následné testování byly odlity firmou SVÚM a.s. (Výzkumné testovací centrum) do forem připravených firmou SOMA spol. s r.o. na základě konstrukčních návrhů J. Málka. Odlité vzorky byly plochého, válcového a kruhového tvaru. Specifické vzorky pro měření adheze byly ocelové trubičky spojené kompozitem.

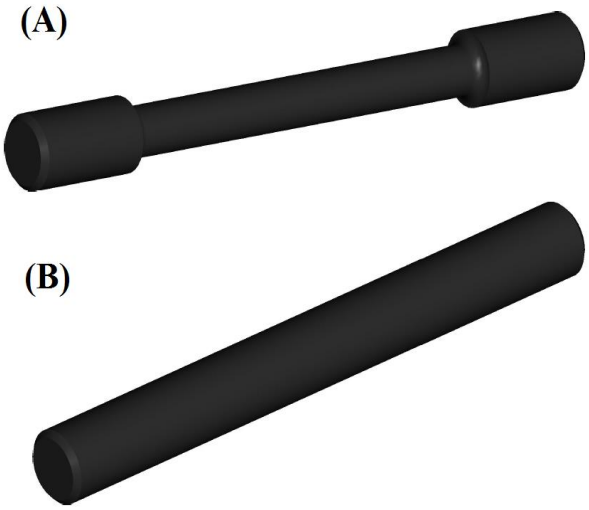
2.2.1 Formy a vzorky

Forma na válcové vzorky

Forma se skládá ze čtyř části (spodní část, vrchní část, víko a těsnění), které jsou zajištěné kolíky a šrouby. Ve formě lze odlít šest válcových vzorků najednou. Odlité válcové vzorky byly obrobeny na dané rozměry dle výkresů M4720.61-19-25-012D-P51, listy 2 a 3 (viz příloha). Vzorky se použily na mechanické zkoušky v tahu a ohybu.



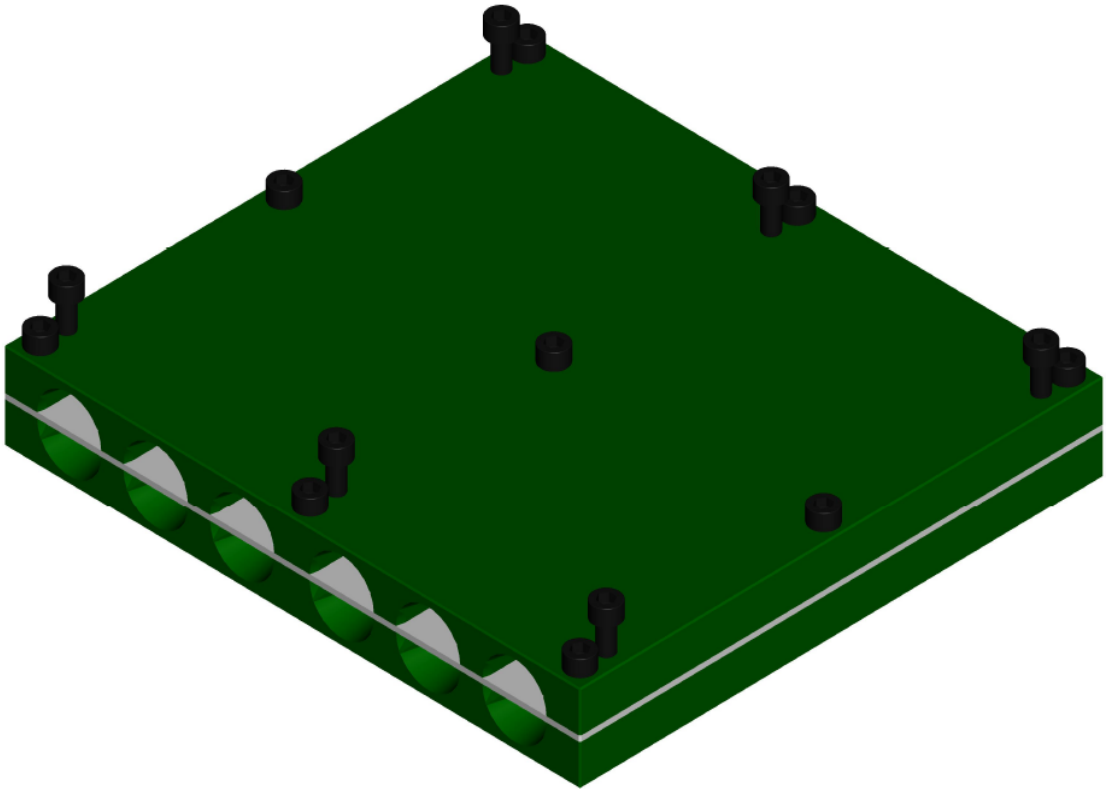
Obrázek 8 Forma na odlévání válcových vzorků (M4720.61-19-25-012D-P51)



Obrázek 9 Válcový vzorek: (A) na tah (ČSN EN ISO 527), (B) na ohyb (ČSN EN ISO 178)

Forma na ploché vzorky

Tentýž princip jako u předchozí formy jen bez víka a kolíků. Možnost odlití dvanácti plochých vzorků. Ploché vzorky byly po odlití, obrobeny v přípravku na dané rozměry dle výkresu M4720.61-19-25-012D-P80, list 2 (viz příloha). Tyto vzorky byly použity na zkoušku tahem.

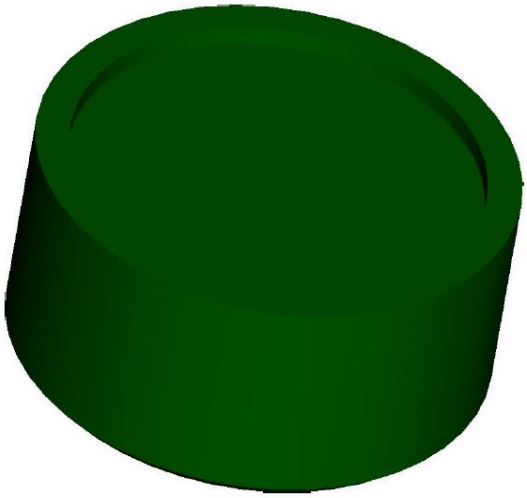


Obrázek 10 Forma na odlévání plochých vzorků (M4720.61-19-25-012D-P80)

Obrázek 11 Plochý vzorek na tah (ČSN EN ISO 527)

Forma na kruhové vzorky

Ve formě lze odlít jeden kruhový vzorek. Kompozitní vzorky byly použity na změření tvrdosti podle Shorea.

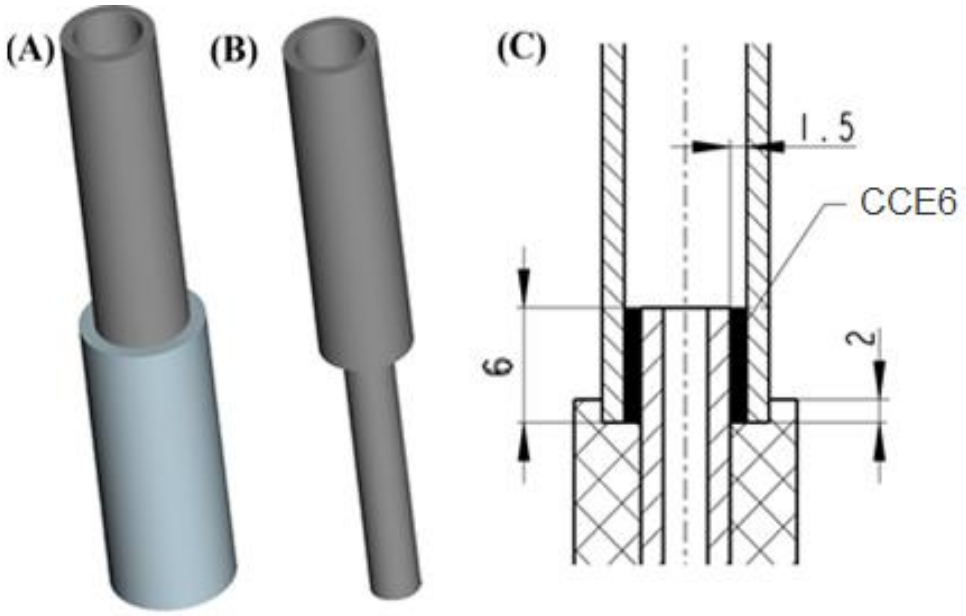


Obrázek 12 Forma na odlévání kruhového vzorku (M4720.61-19-25-012E-P52)

Obrázek 13 Kruhové vzorky na měření tvrdosti podle Shorea

Ocelové trubičky spojené kompozitem CCE6

Dvě ocelové trubičky se nasadily do přípravku, který je vystředil. Mezi trubičky byl nalit kompozit do výšky 6 mm. Přípravek je vyroben z teflonu, aby šel po vytvrzení kompozitu lehce sundat. Vzorky se použily na zkoušku adhezní síly.



Obrázek 14 Ocelové trubičky: (A) v přípravku před nalití kompozitu CCE6, (B) bez přípravku po nalití kompozitu CCE6, (C) detail spojení trubiček kompozitem CCE6

2.2.2 Odlévání vzorků

Při výrobě vzorků nejdříve proběhlo odplynění pryskyřice a tvrdidla ve vakuové nádobě. Pryskyřice byla ohřáta na 65 °C pro snížení viskozity, podmínky 40 až 100 mBar a čas okolo 15 min. Následovalo opatrné smísení složek vlitím tvrdidla přes skleněnou tyčinku po stěně mísící nádoby. Dále byla směs homogenizována mechanickým mícháním za atmosférických podmínek, 30 min opatrně evakuována na přibližně 50 mBar a opět po tyčince přes stěny vlita do forem. Formy byly opět vloženy do evakuační soustavy a bylo provedeno odplynování při 60 až 70 mBar po dobu 30 min. Docházelo k poměrně bouřlivému odplynění, proto bylo soustavu nutno přivzdušňovat, aby příliš nepřetékala. Následně byly formy vloženy do horkovzdušné pece a ponechány vytvrzovat po dobu 24 hodin při teplotě 80 °C. Stejný postup byl použit při výrobě vzorků z čisté pryskyřice.

U některých vzorků se vyskytovala vnější a vnitřní porezita, která vznikla při lití do formy (Obr. 15). U jedné sady válcových vzorků se po obrobení vyskytla nevytvrzená fáze (Obr. 16).

Obrázek 15 Příklad vnější a vnitřní porezity u válcových vzorků

Obrázek 16 Nevytvrzená fáze u válcových vzorků

Aby bylo zamezeno ovlivnění výsledku těmito vadami, byla provedena selekce vzorků a pro testování byly vybrány vzorky bez vad.

2.3 Experimentální metody

2.3.1 Zkouška tahem

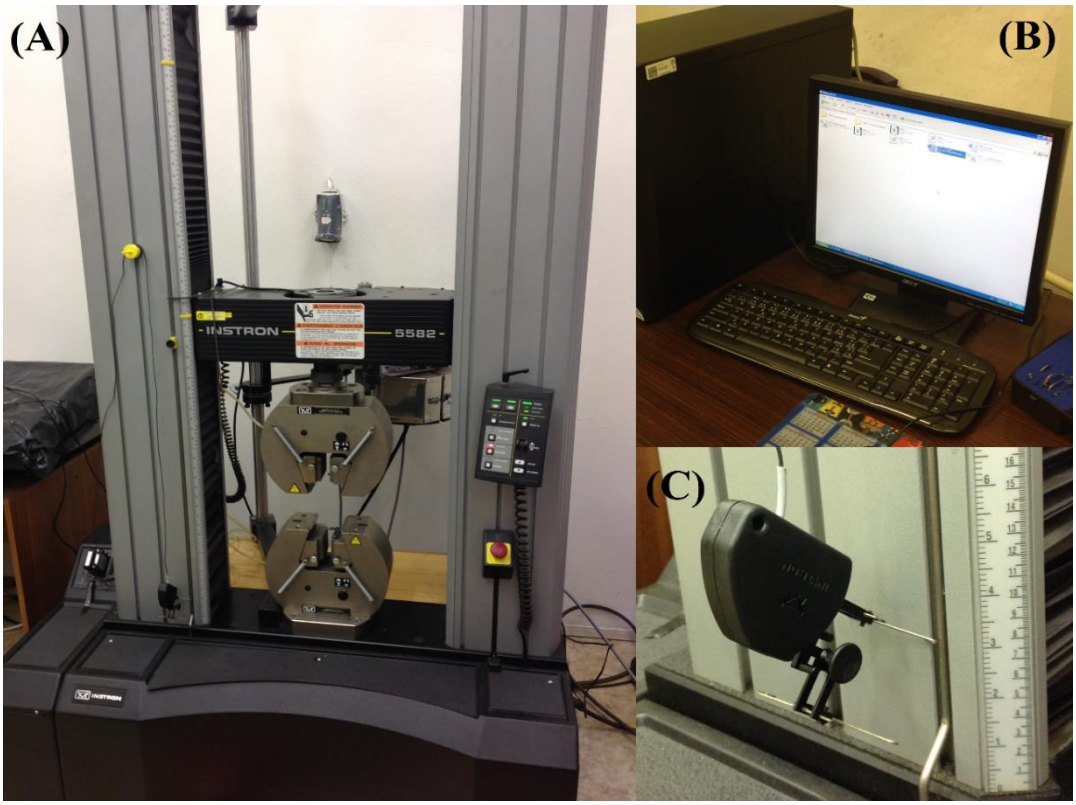
Je to nejrozšířenější mechanická zkouška. Zkouška spočívá v pomalém zatěžování zkušebního vzorku v tahu až do jeho přetržení. Při měření se zaznamenává diagram závislosti prodloužení zkušebního vzorku na zatěžující síle tzv. diagram tahové zkoušky [11]. Tato zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 527.

Hodnota modulu pružnosti v tahu (Youngův modul) byla stanovena dle rovnice:

$$E_T = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [MPa]}$$

kde σ [MPa] tahové napětí, ε [-] deformace (tzv. relativní prodloužení) [12].

Měření bylo provedeno na zkušebním trhacím stroji INSTRON 5582 s průtahoměrem INSTRON (Obr. 17) za pokojové teploty 20 °C. K měření byly použity válcové a ploché vzorky (Obr. 18 a 19). Před měření každé série byly změřeny počáteční hodnoty vzorků (válcové – průměr a měřená délka, ploché – šířka, tloušťka a měřená délka).



Obrázek 17 (A) Zkušební trhací stroj INSTRON 5582, (B) počítač, (C) průtahoměr INSTRON

Obrázek 18 Válcové vzorky: (A) před přetržením, (B) a (C) po přetržení

Obrázek 19 Ploché vzorky: (A) před přetržením, (B) po přetržení

Měřil se modul pružnosti v tahu E_T [GPa] (Youngův modul) v rozsahu tahového napětí 5 MPa do 25 MPa. Při stanovení modulu pružnosti v tahu byl vykreslen graf v souřadnicích tahové závislosti napětí na deformaci, z kterého byl určen modul pružnosti v tahu. Při zkoušce tahem probíhalo zatěžování až do přetržení vzorku.

Měření bylo provedeno na 5-ti válcových vzorcích a 7 plochých vzorků.

2.3.2 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem patří mezi mechanické zkoušky. Běžně se provádí tříbodovým nebo čtyřbodovým ohybem. Při tříbodové zkoušce se vzorek podepře na dvou koncích a zatíží středovým břemenem. To vyvolá ohybový moment v nosníku, který se mění lineárně od nuly u podpor k maximální hodnotě uprostřed [17]. Tato zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 178.

Hodnota ohybového napětí byla stanovena dle odvozené rovnice:

$$\sigma_O = \frac{8.F.l}{\pi.d^3} \text{ [MPa]}$$

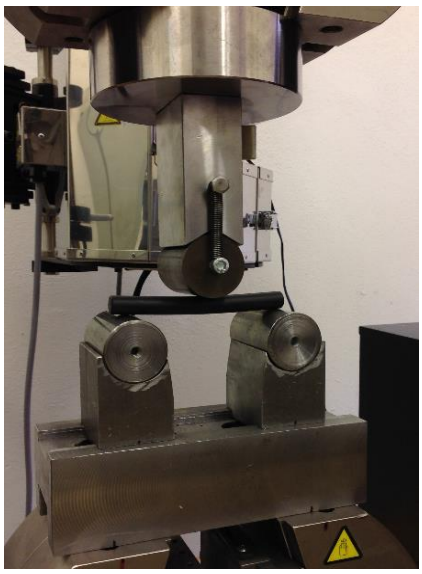
kde F [N] zatěžující síla, l [mm] rozpětí podpěr, d [mm] průměr [12].

Z lineární závislosti průhybu na zatížení byl vypočítán modul pružnosti v ohybu dle odvozené rovnice:

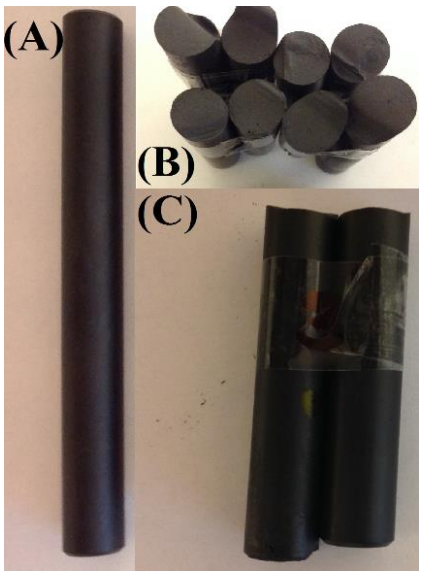
$$E_O = \frac{4.F.l^3}{3.y.\pi.d^4} \text{ [MPa]}$$

kde *F* [N] zatěžující síla, *l* [mm] rozpětí podpěr (délka), *y* [mm] průhyb, *d* [mm] průměr [12].

Měření bylo provedeno na stejném trhacím stroji jako zkouška tahem. Byl zvolen princip tříbodovým ohybem (Obr. 24) za pokojové teploty 20 °C. Na měření se použily válcové vzorky (Obr. 25). Před zkouškou ohybem byl změřen průměr zkušebních vzorků.



Obrázek 20 Zkouška tříbodovým ohybem na zkušebním trhacím stroji INSTRON 5582



Obrázek 21 Válcové vzorky na ohyb: (A) před přetržením, (B) a (C) po přetržení

Každý vzorek byl umístěn na podpěry na dolní čelisti s rozpětím 100 mm a horní čelist se zatěžovacím trnem byla nastavena do polohy, aby se lehce dotýkala zkušebního vzorku. Vzorek byl následně zatěžován rychlostí ohybu 1 mm/min, dokud nedošlo k porušení vzorku. Během této zkoušky byl vykreslován graf v souřadnicích zatížení na průhybu, z něhož se po přelomení vzorku stanovily hodnoty maximálního zatížení σ_o [MPa] a průhybu *y* [mm]. Posléze byl vypočítán modul pružnosti v ohybu E_O [GPa].

Měření bylo provedeno na 6-ti válcových vzorcích.

2.3.3 Odtrhávací zkouška

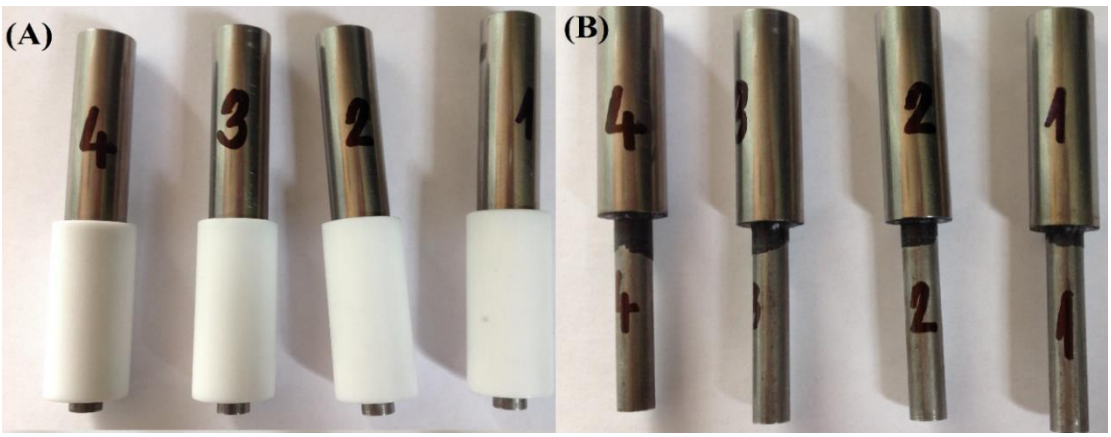
Jedná se o mechanickou zkoušku na testování adheze. Adheze neboli přilnavost znamená míru velikosti vazebních sil mezi materiálem a vrstvou. Při odtrhávací zkoušce se měří adhezní síla potřebná k odtržení vrstvy o určité ploše od substrátu [13]. Tato zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 527.

Hodnota adheze byla stanovena dle odvozené rovnice:

$$M_A = \frac{F_{A_{max}}}{\frac{\pi}{4}.(D^2 - d^2)} \text{ [MPa]}$$

kde $F_{A_{max}}$ [N] maximální adhezní síla, *D* [mm] velký průměr, *d* [mm] malý průměr.

Měření bylo provedeno na totožném trhacím stroji jako zkouška tahem za pokojové teploty 20 °C. K měření byly použity válcové vzorky, které se skládaly ze dvou ocelových trubiček spojené do tloušťky 6 mm kompozitem (Obr. 27 a 28).



Obrázek 22 Válcové vzorky spojené kompozitem CCE6: (A) v přípravku, (B) před odtržením

Obrázek 23 Válcové vzorky po odtržení

Každý vzorek byl na obou koncích pevně upnut do zkušebního trhacího stroje a následně zatěžovaný jednoosým tahem. Zkouška probíhala až do maximálního zatížení (maximální adhezní zatížení), při kterém došlo k uvolnění kompozitu a odtržení trubiček od sebe. Během této zkoušky byl vykreslován graf v souřadnicích zatížení na délce protažení, z něhož se po odtržení trubiček stanovila maximální adhezní síla F_{Amax} [N].

Měření bylo provedeno u 4 vzorků.

2.3.4 Zkouška tvrdosti podle Shorea

Zkouška patří mezi elasticko-dynamické zkoušky. Jedná se o zkoušku odrazem zkušebního tělesa, kdy se zjišťuje výška jeho odskoku od měřené plochy. Touto metodou se zjišťuje tvrdost z velikosti odskoku závaží (kulička, diamantový hrot) spuštěného z určité výše od zkoušeného materiálu [14]. Tato zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 868.

Měření bylo provedeno s analogovým tvrdoměrem typu ASTM D2240 INSTRON (Obr. 30) za pokojové teploty 20 °C. Na měření se použily kruhové vzorky (Obr. 31). Tloušťka kruhových vzorků byla 2 mm. Předpokládaná tvrdost materiálu CCE6 je 80 až 90 ShD.

Obrázek 24 Analogový tvrdoměr typu ASTM D2240 INSTRON

Obrázek 25 Kruhové vzorky na měření tvrdosti

Při zkoušce byly vzorky položeny na pracovní stůl s podložkou. Na vzorek se přiložil tvrdoměr, tak aby patka pevně dosedla po celé ploše. Přitlačilo se na hlavu měřicího přístroje, kde došlo ke stlačení pružiny, a působením síly vnikla kulička do materiálu vzorku. Posléze se na stupnici tvrdoměru zobrazila naměřená hodnota v jednotkách Shore D. Tento postup měření byl proveden u obou vzorků třikrát.

Měření bylo provedeno u 2 vzorků po 3 měřeních.

2.3.5 SEM kontrola struktury

Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) se používá nejčastěji pro zobrazení povrchu vzorků, kde primární elektronový paprsek skenuje povrch vzorku řádek po řádku. Detektor pak zaznamenává úroveň odražených sekundárních elektronů synchronně s elektronovým paprskem v pozorovací obrazovce. Postupně vzniká bod po bodu obraz skenované plochy. Skenovací elektronový mikroskop musí zásadně pracovat ve vakuu – řádově 10^{-5} Pa [15]. Průměr nanovláken je výrazně nižší, než vlnová délka světla, a proto lze provést pozorování vzorku pouze na skenovacím elektronovým mikroskopu.

Obrázek 26 Vzorek použitý pro SEM diagnostiku struktury

Měření bylo provedeno na skenovacím elektronovém mikroskopu JEOL JSM – 7600 F (Obr. 33). Na měření se použil kruhový odřezek z válcového vzorku (Obr. 32). Rozměr vzorku byl ø12x5 mm.

Obrázek 27 Skenovací elektronový mikroskop JEOL JSM – 7600 F

Před pozorováním na mikroskopu byl odebrán kousek materiálu od válcového vzorku po zkoušce ohybem. Vzorek byl začištěn od otřepů, poté uložen do přípravku a vložen do mikroskopu. Při prohlížení bylo nastaveno urychlující napětí 2,7 kV. Na monitoru se po zvětšení a zaostření objevil softwarově obraz struktury vzorku. Prohlížení struktury bylo provedeno vícekrát v různých zvětšení a místech.

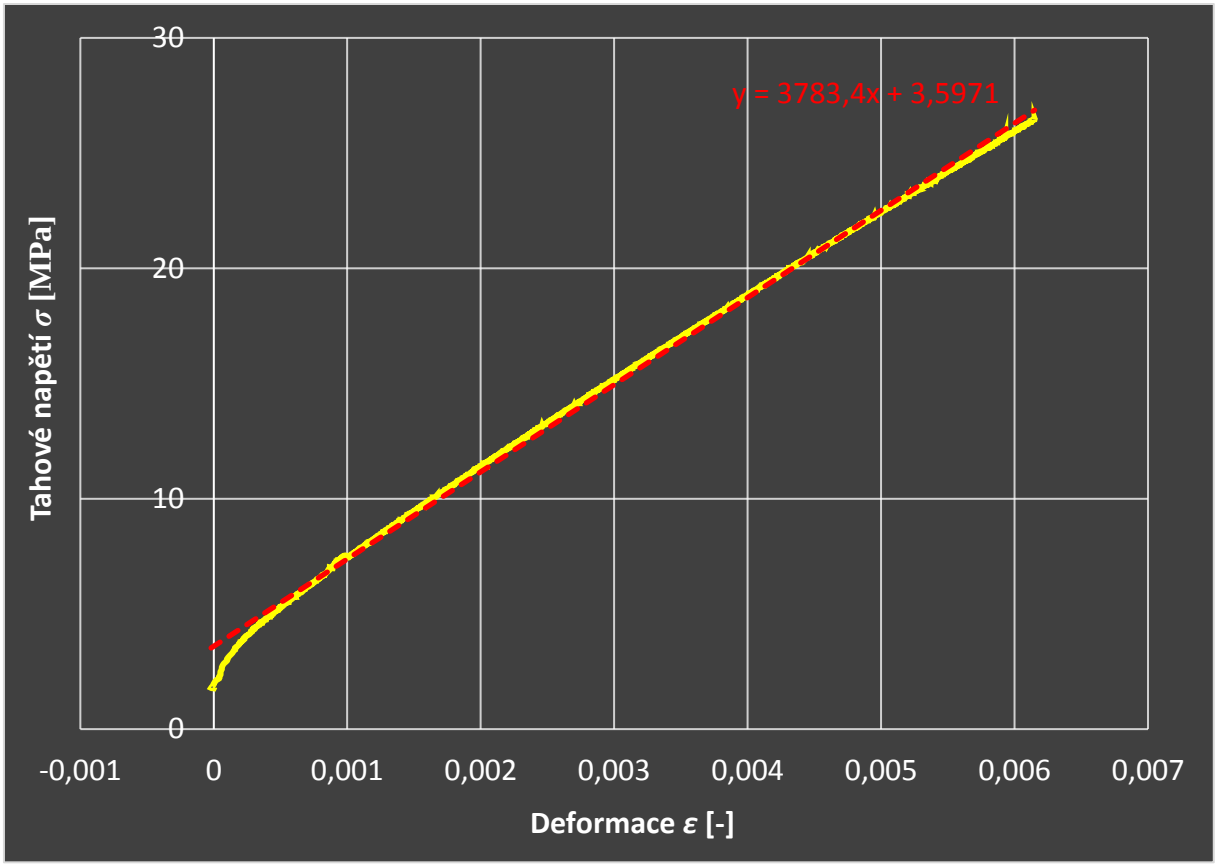
3 VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE

3.1 Zkouška tahem

3.1.1 Válcové vzorky

Kompletní výstup z programu na počítači pro válcové zkušební vzorky:

- Grafické znázornění modulu pružnosti v tahu viz graf 28
- Hodnoty naměřených veličin (modul pružnosti v tahu E_T [GPa]) viz tab. 7



Graf 28 Grafické znázornění σ = f(ε) válcového vzorku č. 3 (modul pružnosti v tahu)

Číslo vzorku	Průměr d_0 [mm]	Modul pružnosti (σ_T = 5 – 25 MPa) E_T [GPa]
1	8,02	3,953
2	8,01	3,729
3	8,02	**4,294**
4	8,03	3,819
5	8,05	3,832
Ø	**8,026**	**3,925**

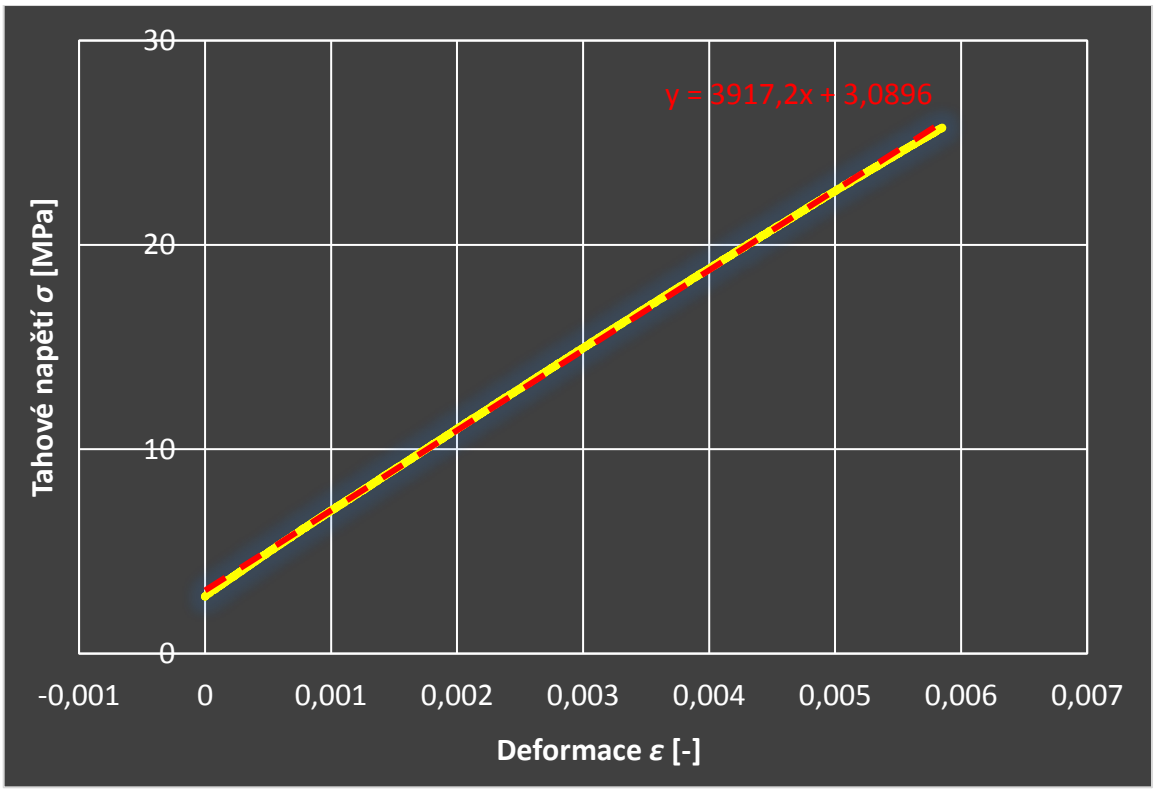
Barevné znázornění: žlutá – nejvyšší výsledná hodnota, modrá – průměrné výsledné hodnoty

Tabulka 7 Naměřené hodnoty válcových vzorků z materiálu CCE6 (zkouška tahem)

3.1.2 Ploché vzorky

Kompletní výstup z programu na počítači pro ploché zkušební vzorky:

- Grafické znázornění modulu pružnosti v tahu viz graf 29
- Hodnoty naměřených veličin (modul pružnosti v tahu E_T [GPa]) viz tab. 8



Graf 29 Grafické znázornění σ = f(ε) plochého vzorku č. 3 (modul pružnosti v tahu)

Číslo vzorku	Šířka b_0 [mm]	Tloušťka h_0 [mm]	Modul pružnosti (σ_T = 5 – 25 MPa) E_T [GPa]
1	10,19	5,98	3,836
2	10,06	5,96	3,898
3	10,09	5,95	**4,036**
4	10,06	6,02	3,996
5	10,13	5,98	3,988
6	10,08	5,96	3,929
7	10,07	5,94	3,801
Ø	**10,097**	**5,970**	**3,926**

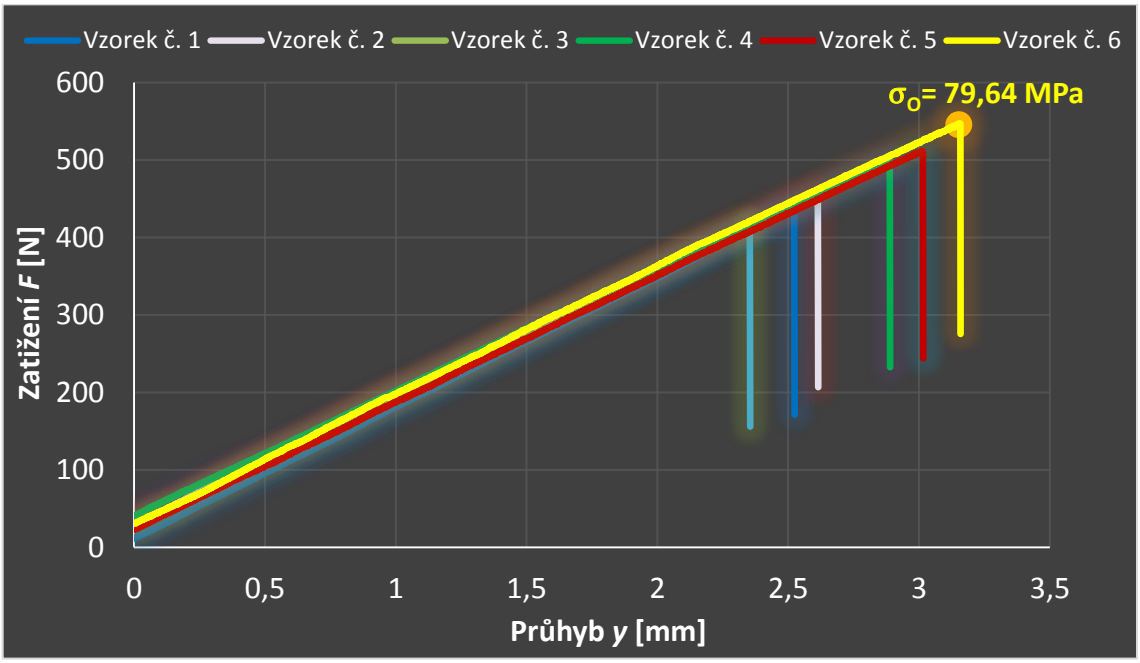
Barevné znázornění: žlutá – nejvyšší výsledná hodnota, modrá – průměrné výsledné hodnoty

Tabulka 8 Naměřené hodnoty plochých vzorků z materiálu CCE6 (zkouška tahem)

3.2 Zkouška ohybem

Kompletní výstup z programu na počítači pro válcové zkušební vzorky:

- Grafické znázornění zkoušky ohybem viz graf 30
- Hodnoty naměřených a vypočítaných veličin (ohybové napětí σ_o [MPa], průhyb y [mm] a modul pružnosti v ohybu E_O [GPa]) viz tab. 9



Graf 30 Grafické znázornění F = f(y) válcových vzorků (zkouška ohybem)

Číslo vzorku	Průměr d_0 [mm]	Maximální zatížení F [N]	Ohybové napětí σ_o [MPa]	Maximální průhyb y [mm]	Modul pružnosti v ohybu E_O [GPa]
1	12,06	437	63,45	2,523	3,475
2	12,04	458	66,82	2,610	3,544
3	12,03	416	60,91	2,348	**3,590**
4	12,06	501	72,72	2,888	3,480
5	12,02	512	75,01	3,013	3,455
6	12,05	547	**79,64**	**3,157**	3,488
Ø	**12,043**	**478,5**	**69,76**	**2,757**	**3,505**

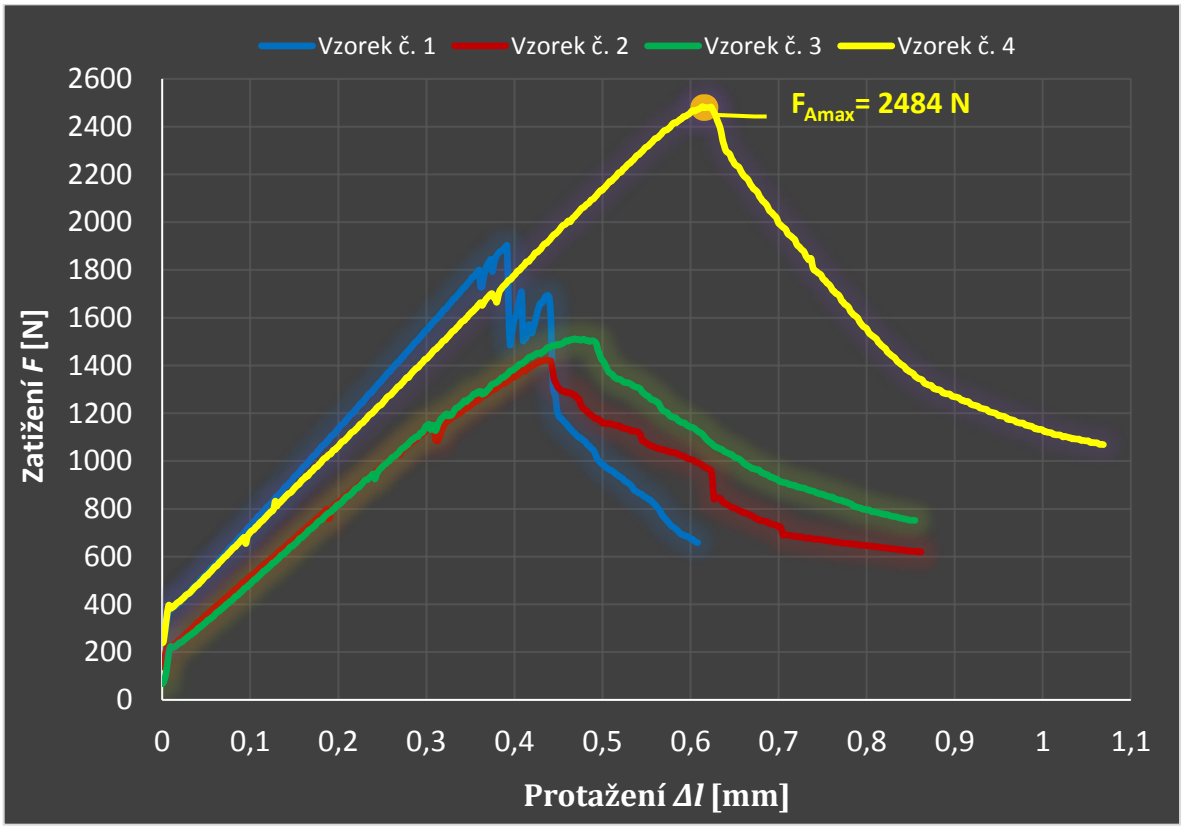
Barevné znázornění: žlutá – nejvyšší výsledné hodnoty, modrá – průměrné výsledné hodnoty

Tabulka 9 Naměřené a vypočítané hodnoty válcových vzorků z materiálu CCE6 (zkouška ohybem)

3.3 Odtrhávací zkouška

Kompletní výstup z programu na počítači pro válcové zkušební vzorky:

- Grafické znázornění odtrhávací zkoušky viz graf 31
- Hodnoty naměřených a vypočítaných veličin (maximální adhezní síla F_{Amax} [N], která je určena maximálním zatížení, adheze (přilnavost) M_A [MPa]) viz tab. 10



Graf 31 Grafické znázornění F = f(Δl) válcových vzorků (odtrhávací zkouška)

Číslo vzorku	Maximální adhezní síla $F_{A_{max}}$ [N]	Protažení při maximálním zatížení Δl [mm]	Adheze (přilnavost) M_A [MPa]
1	1903	0,392	42,51
2	1423	0,437	31,79
3	1512	0,468	33,77
4	**2484**	0,613	**55,49**
Ø	**1830,5**	**0,478**	**40,89**

Barevné znázornění: žlutá – nejvyšší výsledné hodnoty, modrá – průměrné výsledné hodnoty

Tabulka 10 Naměřené hodnoty válcových vzorků z materiálu CCE6 (odtrhávací zkouška)

3.4 Zkouška tvrdosti podle Shorea

Kompletní naměřené (Tab. 11) hodnoty tvrdosti podle Shorea *HSD* [ShD] pro kruhové zkušební vzorky.

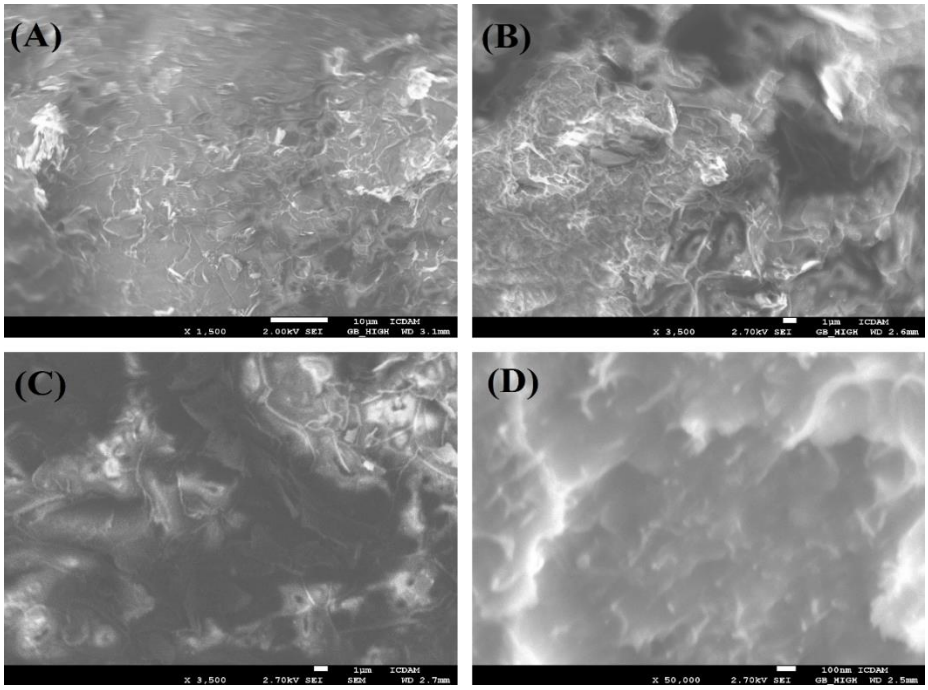
	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2
Číslo měření	**Tvrdost *HSD* [ShD]**	
1	85	83
2	84	85
3	85	84
Ø	**85**	**84**
Celkový Ø	**85**	

Barevné znázornění: žlutá – nejvyšší výsledné hodnoty, modrá – průměrné výsledné hodnoty

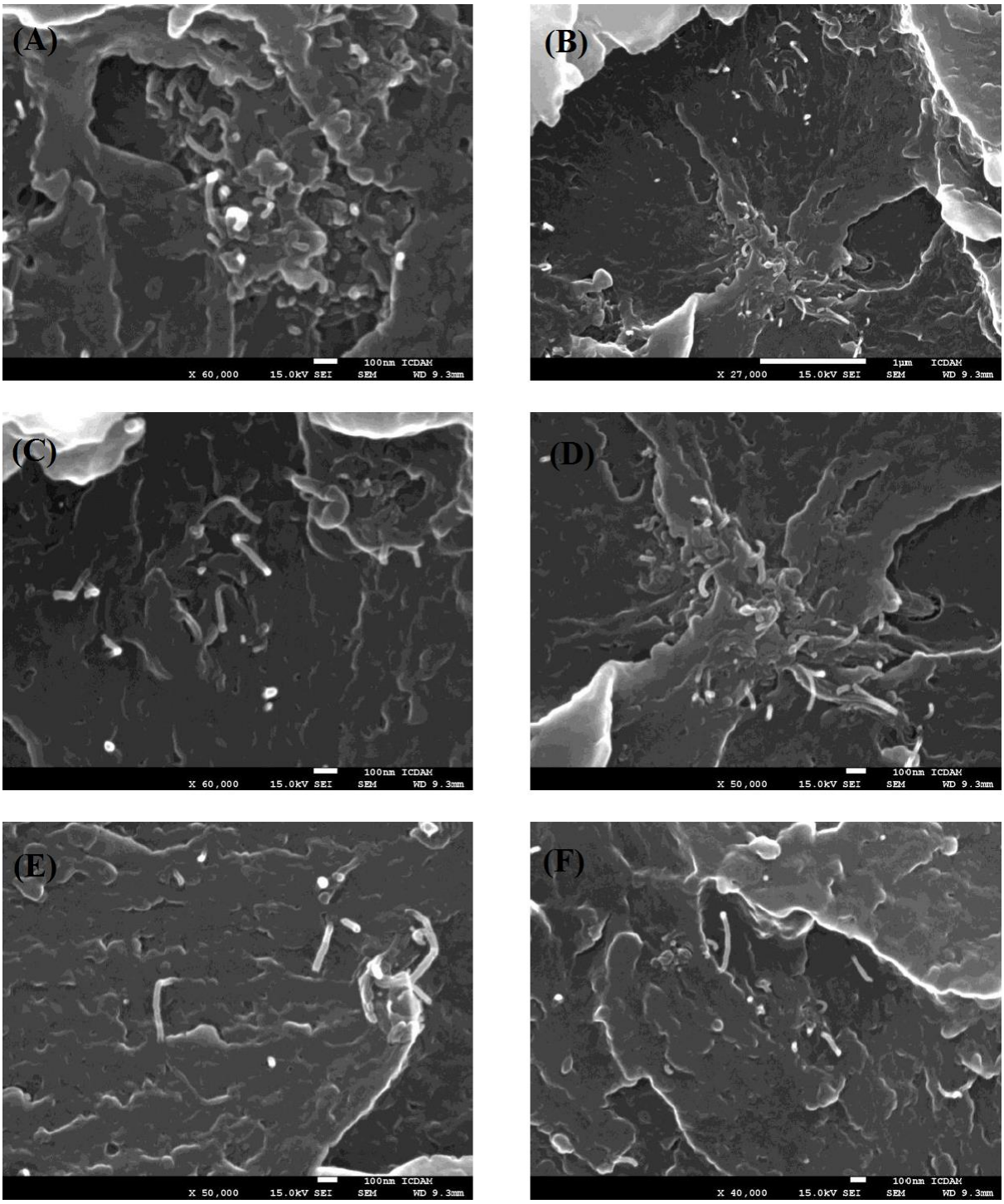
Tabulka 11 Naměřené hodnoty kruhových vzorků z materiálu CCE6 (zkouška tvrdosti podle Shorea)

3.5 SEM kontrola struktury

Při SEM analýze struktury byly vyobrazeny snímky na obr. 32. Dodatečně na objednávku firmy SOMA spol. s r.o. byly pořízeny u ICDAM snímky struktury kompozitu CCE6 na obr. 33.



Obrázek 32 SEM snímek struktury kompozitu CCE6 na lomové ploše při zvětšení: A) 1500x, (B) 3500x, (C) 3500x a (D) 50000x



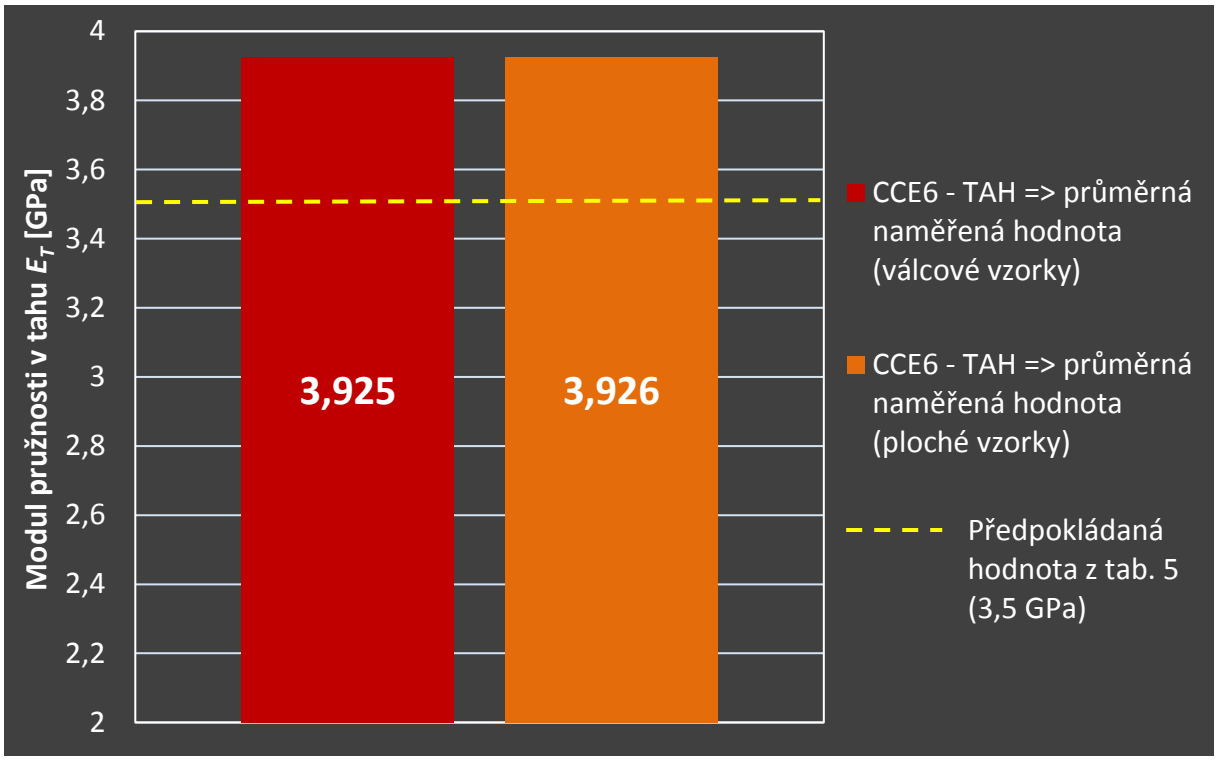
Obrázek 33 SEM snímky mikrostruktury – nanotrubičky vystupující z naneseného Cr povlaku při zvětšení: (A) 60000x, (B) 27000x, (C) 60000x, (D) 50000x, (E) 50000x, (F) 40000x [21]

3.6 Diskuze výsledků

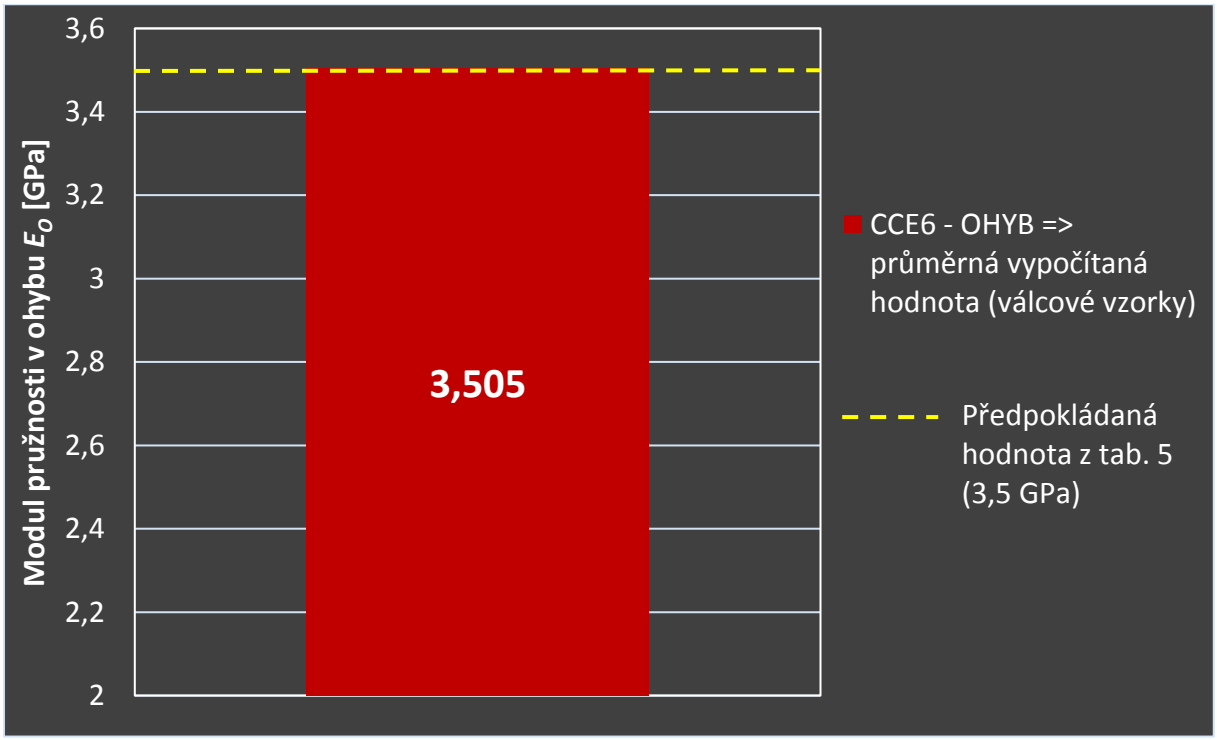
Po testech mechanických vlastností modulu pružnosti v tahu E_T [GPa] a ohybu E_O [GPa], ohybového napětí σ_o [MPa], průhybu y [mm], adhezní síly F_{Amax} [N], adheze (přilnavost) M_A [MPa] a tvrdosti Shore *HSD* [ShD]) u kompozitu CCE6 byly vypočteny jejich nejvyšší a průměrné výsledné hodnoty. Tyto hodnoty byly posléze porovnány s předpokládanými hodnotami kompozitu CCE6 viz tab. 12 a zobrazeny do grafů 34, 35, 36, 37 a 38.

Zkouška	Zkušební vzorek	Materiálová charakteristika	Materiál CCE6		
			Nejvyšší výsledné hodnoty	Průměrné výsledné hodnoty	Předpokládané hodnoty
Tahová	Válcové tyče	Modul pružnosti v tahu E_T [GPa]	4,294	3,925	3,5
	Ploché tyče	Modul pružnosti v tahu E_T [GPa]	4,036	3,926	3,5
Ohybová	Válcové tyče	Modul pružnosti v ohybu E_O [GPa]	3,590	3,505	3,5
		Maximální průhyb y [mm]	3,157	2,757	–
		Ohybové napětí σ_o [MPa]	79,64	69,76	60 až 80
Odtrhávací	Válcové trubičky	Maximální adhezní síla $F_{A_{max}}$ [N]	2484	1830,5	–
		Adheze (přilnavost) M_A [MPa]	55,49	40,89	20
Tvrdost dle Shorea	Kruhové	Tvrdost *HSD* [ShD]	85	85	80 až 90

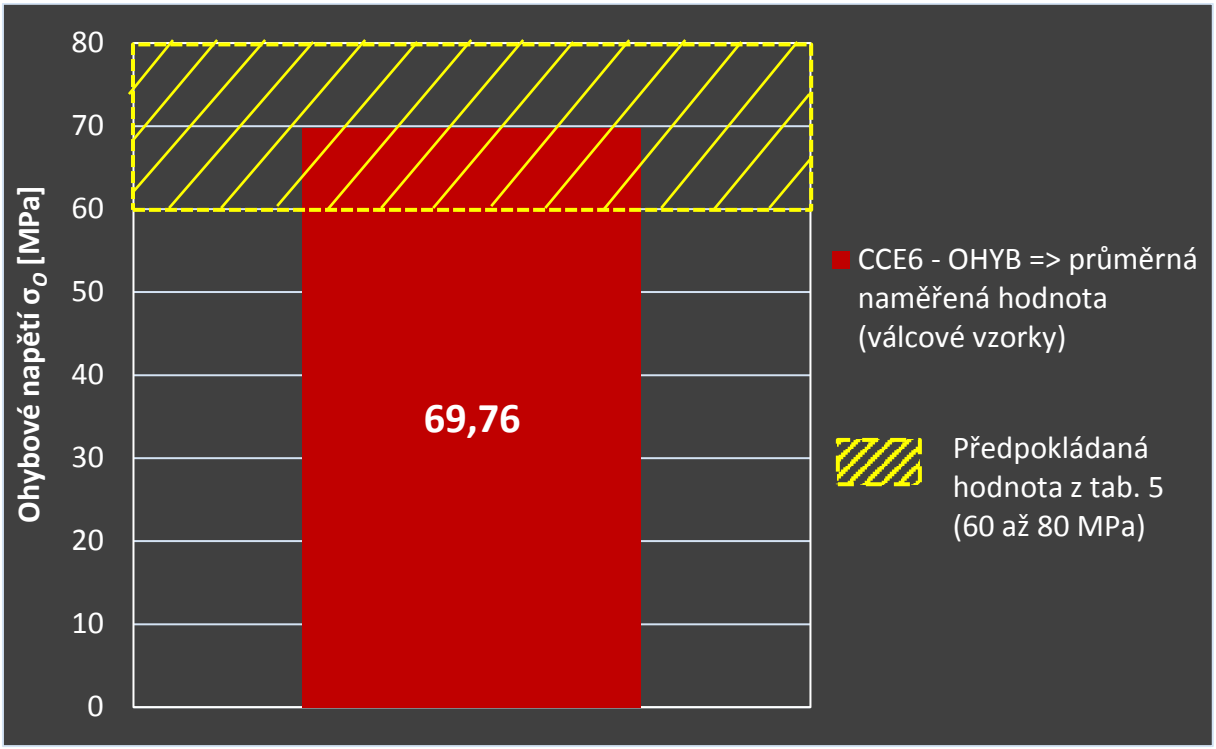
Tabulka 12 Hodnoty s nejvyššími a průměrnými výsledky měřeného kompozitu CCE6



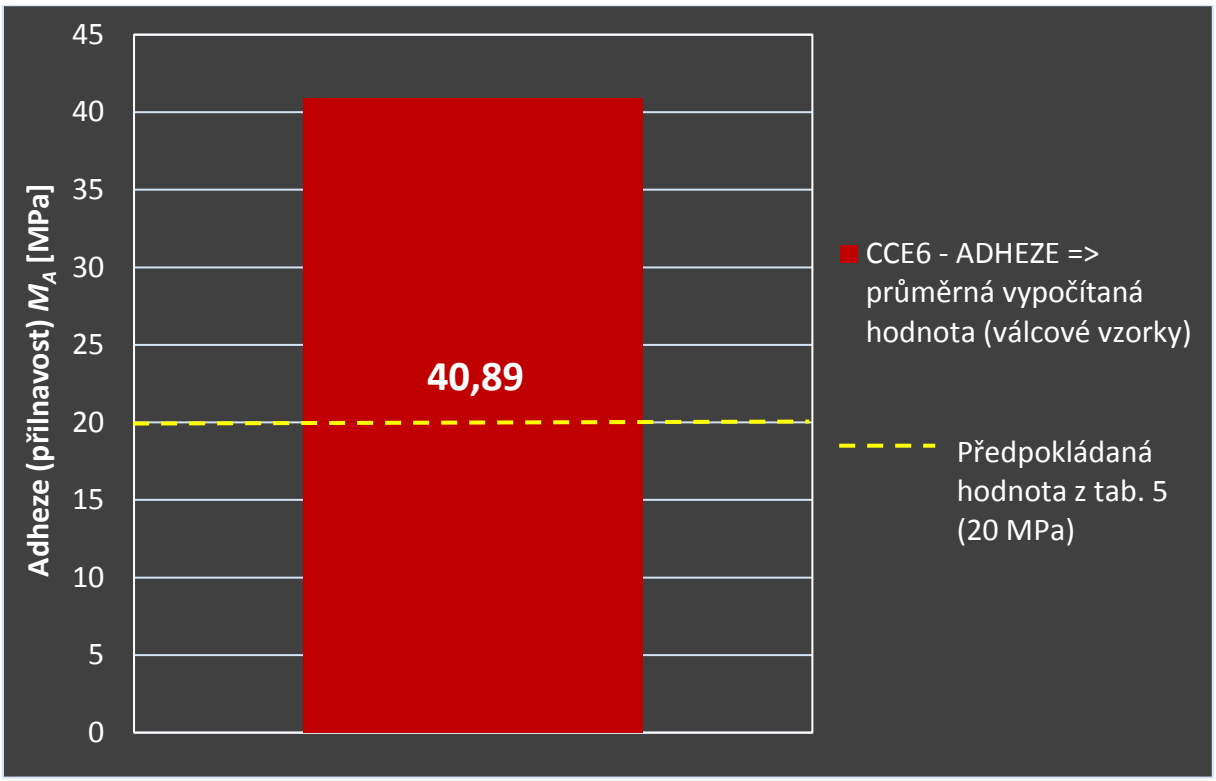
Graf 34 Porovnání modulu pružnosti v tahu E_T u kompozitu CCE6 pro různé typy kompozitních vzorků



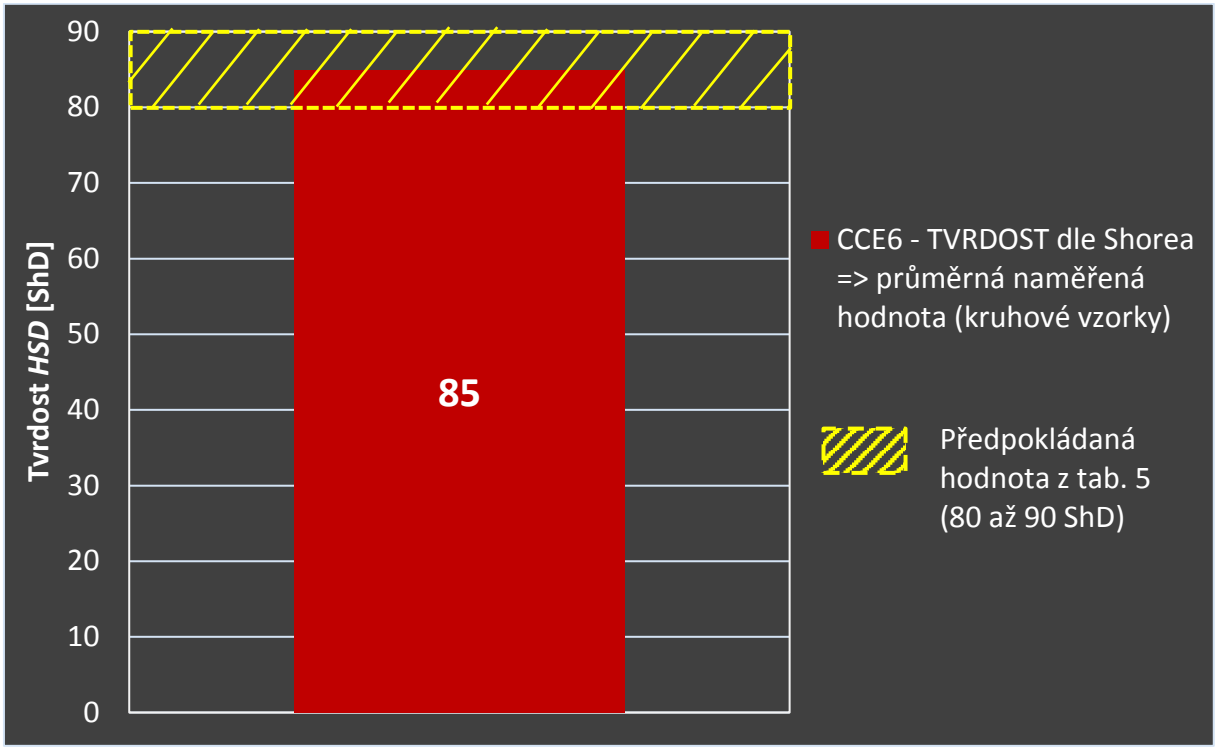
Graf 35 Porovnání modulu pružnosti v ohybu E_O u kompozitu CCE6



Graf 36 Porovnání ohybového napětí σ_O u kompozitu CCE6



Graf 37 Porovnání adheze M_A (přilnavost) u kompozitu CCE6



Graf 38 Porovnání tvrdosti podle Shorea *HSD* u kompozitu CCE6

Po testování vzorků bylo zjištěno a lze konstatovat, že mechanické vlastnosti kompozitního materiálu s pracovním názvem CCE6 na bázi epoxidové matrice a výztuže z uhlíkových nanočástic CNT´S vykazují vyšší hodnoty modulu pružnosti v tahu E_T [GPa], ohybu E_O [GPa] a adheze (přilnavost) M_A [MPa], než jak uvádí očekávané předpoklady v tab. 5. U kompozitu CCE6 byl stanoven průměrný modul pružnosti v tahu u válcových vzorků 3,925 GPa a plochých vzorků 3,926 GPa. Dále byl vypočten průměrný modul pružnosti v ohybu 3,505 GPa. Ohybové napětí naměřené při zkoušce ohybem dosáhlo průměrné hodnoty 69,76 MPa při průhybu 2,757 mm, což je v rozmezí přepokládaného ohybového napětí 60 až 80 MPa.

Tvrdost podle Shorea u kompozitu CCE6 dosáhla hodnoty 85 ShD, což koresponduje s předpokládanou tvrdostí v rozsahu 80 až 90 ShD. Na tvrdost má vliv i způsob vytvrzení a charakter tvrdidla při zachování ostatních požadovaných vlastností. Toto je předmětem dalšího výzkumu.

Při měření maximální adhezní síly u čtyř vzorků byl nejlepší výsledek naměřen u čtvrtého vzorku, který měl nejlepší přilnavost a bez porezity. Přilnavost kompozitu je velice dobrá a splnila předpoklad z tab. 5. Průměrná přilnavost (adheze) u kompozitního materiálu

CCE6 vyšla 40,89 MPa, což je vyšší než předpoklad z tab. 5. Nejvyšší dosažená hodnota adheze činila 55,49 MPa.

Při doplňkovém zjišťování SEM kontroly disperze a struktury byly pořízeny snímky na obr. 32. Ze snímku D při zvětšení 50000x jsou viditelné některé CNT´S částice. Snímky na obr. 33 byly dodatečně pořízeny na objednávku firmy SOMA spol. s r.o. u ICDAM. Na těchto snímcích jsou zobrazeny CNT´S částice, podrobněji uvedeny v závěru. Na obr. 32 jsou také pravděpodobně tyto částice jak je vidět i z porovnání ze snímků z literatury /[16], str. 289/. Opět pro porovnání přikládán v závěru. Diagnostika struktury je nadále otázka dalšího výzkumu a vývoje ve spolupráci firem SOMA spol. s r.o. / SVÚM a.s.

4 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo testování a zjištění hodnot vybraných mechanických vlastností kompozitu CCE6 a s tím související příprava vzorků. Jmenovitě byly testovány a zjišťovány hodnoty modulu pružnosti v tahu E_T [GPa], ohybu E_O [GPa], ohybové napětí σ_o [MPa], průhyb y [mm], adhezní síly F_{Amax} [N], adheze (přilnavosti) M_A [MPa] a tvrdost podle Shorea *HSD* [ShD]. Doplňkově byla provedena diagnostika metodou SEM pro určení disperze a typu CNT´S částic kompozitu s pracovním názvem CCE6.

Pro testování vybraných výše zmíněných mechanických vlastností bylo nutno připravit odpovídající charakter (tvar, velikost a počet) vzorků. Pro odlití zvolených válcových, plochých a kruhových vzorků byly konstruovány a vyrobeny formy. K přípravě těchto vzorků byla využita technologie lití do 3D forem za průběžného vakuování. U jednotlivých dílů forem byly funkční plochy opatřeny separačním teflonovým povlakem. Dále byly navrženy a vyrobeny ocelové trubičky s teflonovým přípravkem pro testování adhezní síly F_{Amax} [N]. Po odlití byly ve formě (formách) vzorky následně vytvrzeny po dobu 24 hodin při teplotě 80 °C.

Některé vzorky vykazovaly po procesech odlití a vytvrzení zjevné vady (porezitu). Vzorky, které vykazovaly tyto vady, byly vyřazeny z testování a následně byly připraveny nové vzorky. Vzorky bez zjevných vad byly otestovány. Pokud se u některého z nich objevila porezita (v tomto případě vnitřní), byly tyto vzorky také vyřazeny. Pro výsledky mechanických zkoušek byly hodnoceny pouze vzorky bez vad.

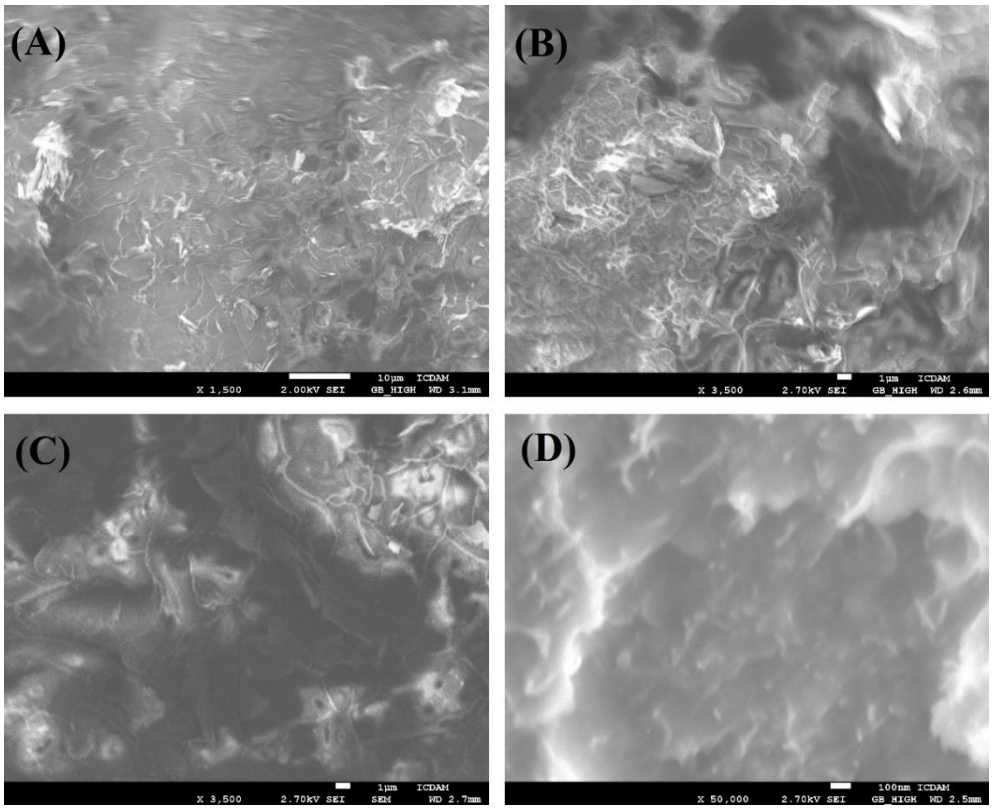
Vzhledem k experimentálně zjištěným hodnotám, dopočteným výsledkům a předpokládaným vlastnostem uvedených v tab. 5, lze stanovit následující závěry. Mechanické vlastnosti kompozitního materiálu s pracovním názvem CCE6 na bázi epoxidové matrice a výztuže z uhlíkových nanočástic CNT´S vykazují vyšší hodnoty modulu pružnosti v tahu E_T [GPa], ohybu E_O [GPa] a adheze (přilnavost) M_A [MPa], než bylo uvedeno v předpokladech v tab. 5. Kompozit CCE6 vykázal průměrný modul pružnosti v tahu u válcových vzorků 3,925 GPa a plochých vzorků 3,926 GPa, což je o 12 % než uvedená předpokládaná hodnota v tab. 5, která činí 3,5 GPa (viz graf 34). Hodnota průměrného modulu pružnosti v ohybu vyšla 3,505 GPa, což je ve shodě s předpokládanou hodnotou v tab. 5 (viz graf 35). V porovnání s hodnotou modulu pružnosti v tahu čisté pryskyřice (matrice) 3,4 GPa (tato hodnota byla zjištěna v rámci

výzkumu SOMA spol. s r.o. a SVÚM a.s.) je hodnota modulu pružnosti kompozitu CCE6 o 15 % vyšší.

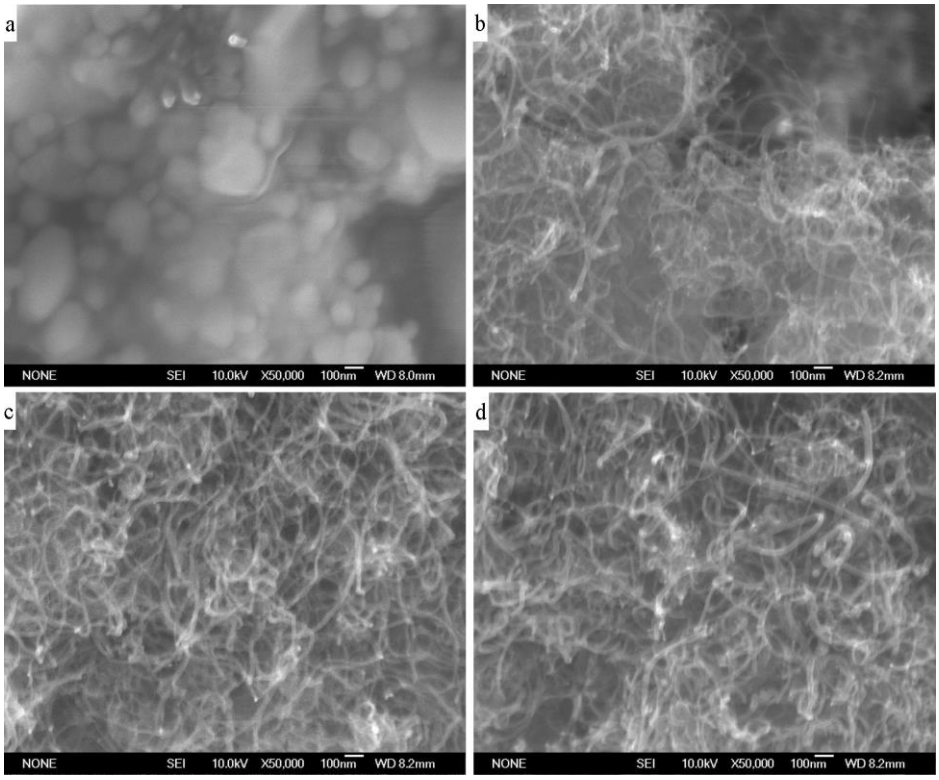
Přidáním výztuže nanotrubic o objemu 0,5 % wt. bylo zjištěno, že došlo k 15 % nárůstu hodnoty modulu pružnosti v tahu porovnání čistou epoxidovou matricí. Toto zjištění koresponduje s hodnoty z literatury /[19], str. 2306/, kdy pro systém v tomto případě již čisté matrice E_m o vyšším modulu v tahu je nárůst modulu kompozitu E_c oproti E_m řádově v jednotkách procent. U matric s nižším modulem pružnosti v tahu, kdy E_c = 1 GPa je nárůst E_m oproti E_c možný až v rámci 200 % [20]. Další výzkum, který již není předmětem této bakalářské práce, se bude zabývat variací mechanických vlastností kompozitu při různých procentech wt. nanotrubic. Jako nejvhodnější z literatury /[19], str. 2306/ se jeví typ nanotrubic DWCNT – NH_2.

Kompozit CCE6 vykázal průměrné ohybové napětí 69,76 MPa, což se pohybuje v rozmezí předpokládaných hodnot uvedených v tab. 5 a zobrazených v grafu 36. Lze dále konstatovat, že zjištěná hodnota adheze (přilnavosti) 40,89 MPa je o 200 % vyšší než předpokládaná hodnota 20 MPa viz tab. 5 (viz graf 37). Stejně jako předchozí mechanická vlastnost dosáhla i tvrdost podle Shorea hodnoty 85 ShD, což se opět pohybuje v rozmezí předpokládaných hodnot uvedených v tab. 5 a zobrazených v grafu 38. Dále byl navíc splněn požadavek, aby byl kompozit antistatický (vodivý).

Pro porovnání pořízených SEM snímků z kapitoly 3.6 na obr. 32 je znovu přikládám a uvádím pro porovnání i obr. 39, který byl převzat z literatury /[16], str. 289/ při stejném zvětšení jako na snímku D obr. 32. Na obr. 32 u SEM snímku lomové plochy lze sledovat, že se jedná s největší pravděpodobností o zachycení CNT´S částic jako na snímcích na obr. 39 při stejném zvětšení.

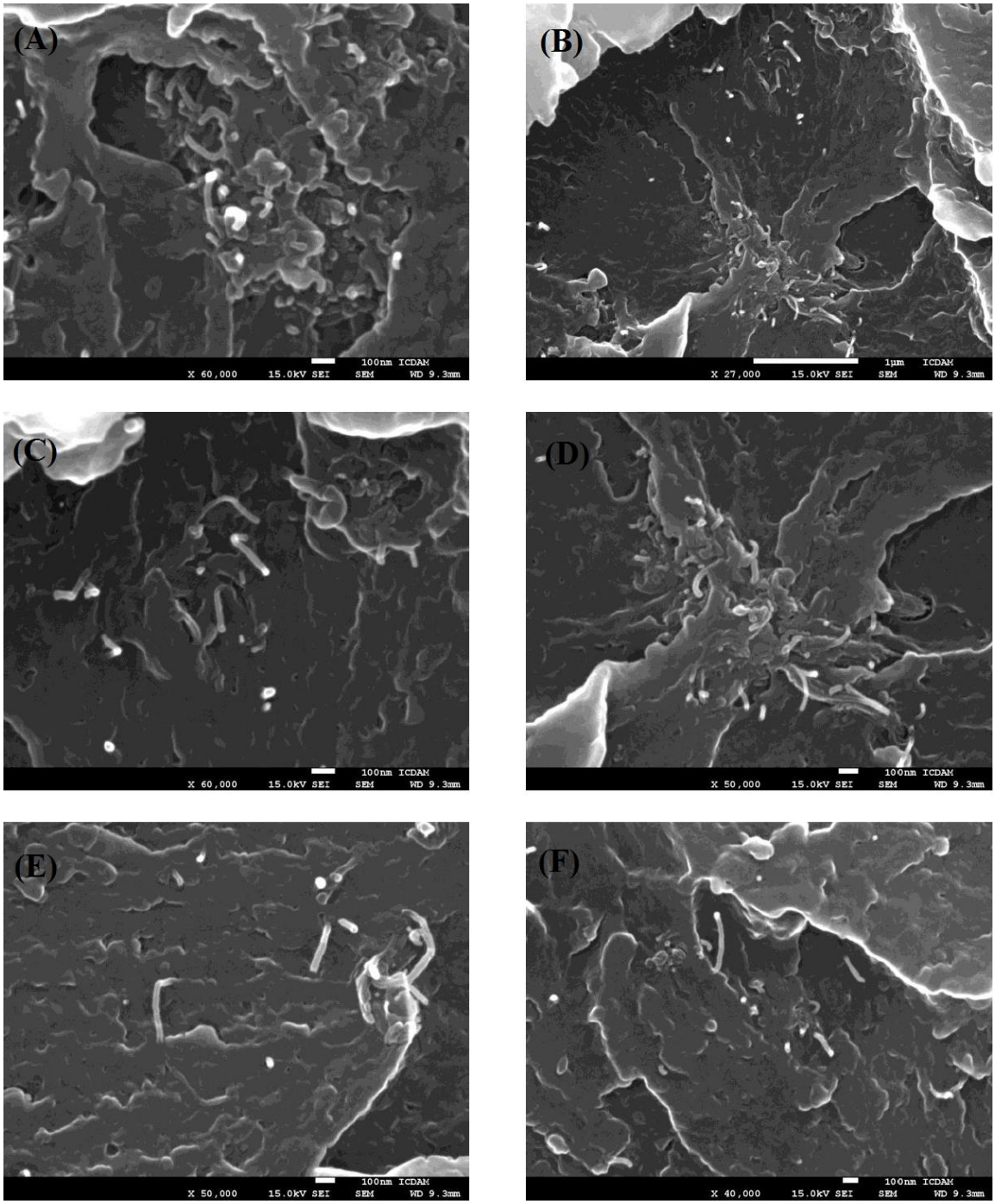


Obrázek 32 SEM snímek struktury kompozitu CCE6 na lomové ploše při zvětšení: A) 1500x, (B) 3500x, (C) 3500x a (D) 50000x



Obrázek 39 SEM snímek mikrostruktury s různým obsahem MWCNT povlaky: a) 2 %, (b) 4 %, (c) 6 % a (d) 8 % [16]

Ve spolupráci ICDAM / SOMA spol. s r.o. byla provedena analýza nanokompozitního materiálu CCE6, při které byly pořízeny a uvedeny SEM snímky na obr. 33.



Obrázek 33 SEM snímky mikrostruktury – nanotrubičky vystupující z naneseného Cr povlaku při zvětšení: (A) 60000x, (B) 27000x, (C) 60000x, (D) 50000x, (E) 50000x, (F) 40000x [21]

Diagnostika struktury je nadále otázkou dalšího výzkumu a vývoje ve spolupráci firem SOMA spol. s r.o. / SVÚM a.s. Lze konstatovat, že veškeré cíle bakalářské práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

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

[2] MEISSENER, Bohumil, ZILVAR, Václav. *Fyzika polymerů - struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. Praha, SNTL/ALFA, 1987. ISBN: 04-634-87, 308 stran.

[3] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3, 143 stran.

[4] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8, 204 stran.

[5] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273-X, 156 stran.

[6] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. [cit. 2015-16-11, 15:30]. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340>.

[7] VENDL, Ladislav. *Kompozitní tenké vrstvy.* Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 14. 05. 2010. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivo Kuřitka, Ph.D.

[8] SK. De; WHITE, J. R.. *Short fibre - polymer composite*. [online]. Cambridge in England, Woodhead Publishing, 1996. [cit. 2015-18-11, 9:15]. Dostupné z: <http://books.google.cz/books?id=W7UZ2FORQo4C&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>.

[9] ZÍTKA, Ondřej (ed.). *Moderní nanotechnologie na počátku 21. století: kolekce učebních textů projektu OPVK NANOTEAM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. ISBN 978-80-214-4802-5, 240 stran.

[10] KOUTNÁ, Martina. *Uhlíkové nanotrubičky (CNT) a jejich aplikační možnosti.* Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 28. 05. 2014. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Barbora Šafaříková.

[11] PROCHÁZKA, Karel. *Statická zkouška v tahu 1*. [online]. 2012 [cit. 2015-08-12, 9:28]. Dostupné z: <http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablony/KOM_III/VY_52_INOVACE_J-05-21.pdf>.

[12] OVMT. *Mechanické zkoušky*. [online]. 2007 [cit. 2015-08-12, 20:29]. Dostupné z: <http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/tahova_zkouska.pdf>.

[13] NOVOTNÝ, Tomáš. *Studium mechanických vlastností tenkých vrstev.* Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně, Fakulta přírodovědecká, 14. 05. 2012. Vedoucí diplomové práce RNDr. Vilma Buršíková, Ph.D.

[14] BUREŠ, Jiří. *Shore – zkouška tvrdosti dle Shorea*. [online]. 2002 [cit. 2015-09-12, 15:35]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-shore.htm>.

[15] ROZSYPÁLEK, Milan. *Změna elektrické vodivosti stlačením uhlíkového papíru ze zapletených nanotrubic.* Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 14. 05. 2010. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Slobodián, Ph.D.

[16] GUANGZHAO, Li, Feng LAJUN, Tong PEIRU a Zhai ZHE. *Progress in Organic coatings.* Elsevier, Progress in Organic coatings 90, 2016. School of Materials science and Engineering, Xi´an University of Technology, China. ISSN 0300-9440, s. 284 – 290.

[17] JIRKŮ, Martina. *Vliv úhlu křížení vrstev na výsledné vlastnosti kompozitních materiálů.* Diplomová práce. Technická universita v Liberci, Fakulta textilní, Studijní obor průmyslového manegementu, 2013. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miroslava Maršalíková, Ph.D.

[18] COLEMAN, N. J., Umar KHAN, Werner J. BLAU a Yurii K. GUN´KO. *Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube – polymer composites.* Elsevier, Carbon 44, 2006. School of Physics and Chemistry, Trinity College Dublin, Ireland. s. 1624 – 1652.

[19] GOJNY, H. F., Malte H.G. WICHMANN, Bodo FIEDLER a Karl SCHULTE. *Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study.* Elsevier, Composites Science and Technology 65, 2005. Technical University Hamburg-Harburg, Polymer Composites Section, Hamburg, Germany. s. 2300 – 2313.

[20] CI, L., JinBo Bai. *The reinforcement role of carbon nanotubes in epoxy composite with different matrix stiffness.* Elsevier, Composites Science and Technology 66, 2006. Laboratory of Mechanics of Soils, Structures and Materials, Paris, France. s. 599 – 603.

[21] HORNÍK, J. a Stanislav KRUM. *Analýza nanokompozitního povlaku.* Praha: ICDAM, 22. 6. 2016. 3 s. Technický protokol č. 16-06-060.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Δl	Protažení (Extension)
ε	Relativní prodloužení (Relative elongation)
$\varepsilon_{m,krit}$	Kritická mezní tažnost (Critical limit of elongation)
σ	Tahové napětí (Tensile stress)
σ_o	Napětí v ohybu (Bending stress)
ρ	Hustota (Density)
b_0	Šířka (Width)
CNT´S	Uhlíkové nanočástice (Carbon nanoparticles)
CB	Černý uhlík (Carbon black)
d	Průměr (Diameter)
D	Průměr (Diameter)
DWCNT	Dvoustěnné uhlíkové nanotrubičky (Double-walled carbon nanotubes)
E_O	Modul pružnosti v ohybu (Moduli of bending)
E_T	Modul pružnosti v tahu (Moduli of elasticity)
EP-R	Epoxidová pryskyřice (Epoxy resin)
F	Síla (Strength)
F_{Amax}	Adhezní síla (Adhesion strength)
h_0	Tloušťka (Thickness)
HSD	Tvrdost Shore (Hardness Shore)
l	Délka (Length)
M_A	Adheze (Adhesion)
MA-R	Metakrylátová pryskyřice (Methacrylate resin)
MWCNT	Vícestěnné uhlíkové nanotrubičky (Multi-walled carbon nanotubes)

PFA-R	Fenakrylátová pryskyřice (Fenacrylic resin)
R_{mT}	Mez pevnosti (Ultimate strength)
SEM	Skenovací elektronový mikroskop (Scanning electron microscope)
SWCNT	Jednostěnné uhlíkové nanotrubičky (Single-walled carbon nanotubes)
UP-R	Nenasycená polyesterová pryskyřice (Unsaturated polyester resin)
VE-R	Vinylesterová pryskyřice (Vinylester resin)
y	Průhyb (Deflection)

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 1 Schematické znázornění rozdílů v křivkách napětí [4] 12
Obrázek 2 Schematické rozdělení kompozitů podle tvaru sekundární fáze [5] 14
Obrázek 3 Vliv částicových a vláknitých výztuží na relativní změnu modulu pružnosti *E* [2]...15
Obrázek 4 Tvary a rozměry částic k vyztužení kompozitu s polymerní matricí [4] 17
Obrázek 5 Srolování grafenu do SWCNT [9] 19
Obrázek 6 a) DWCNT jako nejjednodušší příklad MWCNT, b) TEM snímek MWCNT realizované pomocí PECVD [9] 20
Graf 7 Porovnání viskozity u čisté epoxidové pryskyřice a kompozitu CCE6 22
Obrázek 8 Forma na odlévání válcových vzorků (M4720.61-19-25-012D-P51) 23
Obrázek 9 Válcový vzorek: (A) na tah (ČSN EN ISO 527), (B) na ohyb (ČSN EN ISO 178) 24
Obrázek 10 Forma na odlévání plochých vzorků (M4720.61-19-25-012D-P80) 24
Obrázek 11 Plochý vzorek na tah (ČSN EN ISO 527) 25
Obrázek 12 Forma na odlévání kruhového vzorku (M4720.61-19-25-012D-P52) 25
Obrázek 13 Kruhové vzorky na měření tvrdosti podle Shorea 25
Obrázek 14 Ocelové trubičky: (A) v přípravku před nalití kompozitu CCE6, (B) bez přípravku po nalití kompozitu CCE6, (C) detail spojení trubiček kompozitem CCE6 26
Obrázek 15 Příklad vnější a vnitřní porezity u válcových vzorků 27
Obrázek 16 Nevytvrzená fáze u válcových vzorků 27
Obrázek 17 (A) Zkušební trhací stroj INSTRON 5582, (B) počítač, (C) průtahoměr INSTRON..28
Obrázek 18 Válcové vzorky: (A) před přetržením, (B) a (C) po přetržení 29
Obrázek 19 Ploché vzorky: (A) před přetržením, (B) po přetržení 29
Obrázek 20 Zkouška tříbodovým ohybem na zkušebním trhacím stroji INSTRON 5582 30
Obrázek 21 Válcové vzorky na ohyb: (A) před přetržením, (B) a (C) po přetržení 30
Obrázek 22 Válcové vzorky spojené kompozitem CCE6: (A) v přípravku, (B) před odtržením 31
Obrázek 23 Válcové vzorky po odtržení 31
Obrázek 24 Analogový tvrdoměr typu ASTM D2240 INSTRON 32
Obrázek 25 Kruhové vzorky na měření tvrdosti 33
Obrázek 26 Vzorek použitý pro SEM diagnostiku struktury 33
Obrázek 27 Skenovací elektronový mikroskop JEOL JSM – 7600 F 34
Graf 28 Grafické znázornění $\sigma = f(\varepsilon)$ válcového vzorku č. 3 (modul pružnosti v tahu) 35
Graf 29 Grafické znázornění $\sigma = f(\varepsilon)$ plochého vzorku č. 3 (modul pružnosti v tahu)..... 36
Graf 30 Grafické znázornění $F = f(y)$ válcových vzorků (zkouška ohybem) 38
Graf 31 Grafické znázornění $F = f(\Delta l)$ válcových vzorků (odtrhávací zkouška) 39
Obrázek 32 SEM snímek struktury kompozitu CCE6 na lomové ploše při zvětšení: (A) 1500x, (B) 3500x, (C) 3500x a (D) 50000x 40
Obrázek 33 SEM snímky mikrosturktury – nanotrubičky vystupují z naneseného Cr povlaku při zvětšení: (A) 60000x, (B) 27000x, (C) 60000x, (D) 50000x, (E) 50000x, (F) 40000x 41

Graf 34 Porovnání modulu pružnosti v tahu E_T u kompozitu CCE6 pro růzé typy kompozitních vzorků 43
Graf 35 Porovnání modulu pružnosti v ohybu E_O u kompozitu CCE6 43
Graf 36 Porovnání ohybového napětí σ_o u kompozitu CCE6 44
Graf 37 Porovnání adheze M_A (přilnavost) u kompozitu CCE6 44
Graf 38 Porovnání tvrdosti Shore *HSD* u kompozitu CCE6 45
Obrázek 39 SEM snímek mikrostruktury s různým obsahem MWCNT povlaky: a) 2 %, (b) 4 %, (c) 6 % a (d) 8 % [16] 49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti vybraných reaktoplastů [6] 12
Tabulka 2 Závislost mechanických vlastností epoxidové pryskyřice EPON na teplotě [6] 13
Tabulka 3 Porovnávání mechanických vlastností vláken a nanočástic [4] 16
Tabulka 4 Výrobní technologické postupy kompozitních materiálů [6] 17
Tabulka 5 Předpokládané označené jako * a již zjištěné hodnoty fyzikálně – mechanických vlastností materiálu CCE6 21
Tabulka 6 Základní vlastnosti tvrdidla 22
Tabulka 7 Naměřené hodnoty válcových vzorků z materiálu CCE6 (zkouška tahem) 36
Tabulka 8 Naměřené hodnoty plochých vzorků z materiálu CCE6 (zkouška tahem) 37
Tabulka 9 Naměřené a vypočtené hodnoty válcových vzorků z materiálu CCE6 (zkouška ohybem) 38
Tabulka 10 Naměřené hodnoty válcových vzorků z materiálu CCE6 (odtrhávací zkouška) ... 39
Tabulka 11 Naměřené hodnoty kruhových vzorků z materiálu CCE6 (zkouška tvrdosti podle Shorea) 40
Tabulka 12 Hodnoty s nejvyššími a průměrnými výsledky měřeného kompozitu CCE6 42

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Výsledky všech měření včetně výpočtů a grafů (CD)

Příloha 2: Výkresová dokumentace formy s číslem výkresu M4720.61-19-25-012D-P51

Příloha 3: Výkres formy s číslem výkresu M4720.61-19-25-012E-P52

Příloha 4: Výkres formy s číslem výkresu M4720.61-19-25-012E-P53

Příloha 5: Výkresová dokumentace formy s číslem výkresu M4720.61-19-25-012D-P80