

Kompozity vyztužené uhlíkovými rovingy určené pro odstínění elektromagnetického pole

Bakalářská práce

Studijní program:

B3107 Textil

Studijní obor:

Textilní marketing

Autor práce:

Kateřina Lukáčová

Vedoucí práce:

Ing. Veronika Tunáková, Ph.D.
Katedra materiálového inženýrství





Zadání bakalářské práce

Kompozity vyztužené uhlíkovými rovingy určené pro odstínění elektromagnetického pole

Jméno a příjmení: **Kateřina Lukáčová**
Osobní číslo: T17000335
Studijní program: B3107 Textil
Studijní obor: Textilní marketing
Zadávací katedra: Katedra hodnocení textilií
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na téma: kompozitní materiály určené pro odstínění elektromagnetického pole (účel použití, materiálové složení, elektrická vodivost, schopnost odstínit elektromagnetické pole).
2. Připravte výtzuž ve formě tkaniny plátnové vazby s různou dostavou za použití uhlíkového rovingu.
3. Připravenou výtzuž charakterizujte zejména dle schopnosti odstínit elektromagnetické pole.
4. Připravte kompozitní struktury s využitím připravené výtzuže a zvolené matrice.
5. Vytvořené kompozitní materiály charakterizujte zejména dle schopnosti odstínit elektromagnetické pole, dále zhodnoťte vybrané mechanické vlastnosti.
6. Získané výsledky vyhodnoťte, interpretujte, diskutujte vliv parametrů výtzuže a vliv matrice na funkčnost kompozitu, diskutujte vhodnost použití vytvořeného kompozitu pro konkrétní aplikace.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

30 – 40 normostran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. CHUNG, D.D.L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. Carbon, 39, 2001, pp. 279-285.
2. MISTIK, s.i., SANCAK, e., USTA, I., et. al. Investigation of electromagnetic shielding properties of boron and carbon fiber woven fabrics and their polymer composites. In proceedings of: RMUTP International Conference: Textile & Fashion, 2012.
3. JOU W.S. A novel structure of woven continuous-carbon fiber composites with high electromagnetic shielding. Journal of Electronic Materials 2004, 33(3): 162-170.
4. MILITKÝ, Jiří. Textilní vlákna: klasická a speciální. V Liberci: Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-7372-844-1.

Vedoucí práce:

Ing. Veronika Tunáková, Ph.D.
Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání práce:

29. října 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

10. ledna 2021

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka

L.S.

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 14. října 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

4. ledna 2021

Kateřina Lukáčová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala své vedoucí bakalářské práce Ing. Veronice Tunákové, Ph.D. za její cenné a odborné rady a pomoc při měření elektromagnetického stínění jednotlivých kompozitů. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Janě Novotné za pomoc při vytvoření kompozitů.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala svému manželovi a dceři za podporu a poskytnutí klidu k napsání této práce.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá kompozitními materiály určenými pro odstínění elektromagnetického pole.

Teoretická část práce seznamuje čtenáře s problematikou elektromagnetických vln. Dále se teoretická část zabývá materiály vhodnými pro stínění elektrického pole, popisuje vlákna se zvýšenou elektrickou vodivostí, uhlíkatá vlákna, textilie se zvýšenou vodivostí a kompozity s textilní výztuží.

V rámci experimentální části práce bylo vytvořeno sedm výztuží ve formě tkaniny plátnové vazby s různou dostavou osnovy a útku za použití uhlíkového rovingu s různou jemností. Tyto výztuže byly charakterizovány dle schopnosti odstínit elektromagnetické pole. Z připravených výztuží byly vytvořeny kompozitní struktury s využitím laminační pryskyřice L285 a tužidla 500MGS. U těchto vytvořených kompozitních materiálů byla měřena schopnost odstínit elektromagnetické pole.

V závěru práce byl vyhodnocen vliv parametrů výztuže a vliv matrice na funkčnost kompozitu. Prozkoumány byly také vybrané mechanické vlastnosti vytvořených kompozitů.

Klíčová slova: elektromagnetické stínění, uhlíkatá vlákna, uhlíkový roving, kompozity s textilní výztuží

Annotation

This bachelor thesis deals with composite materials designed to shield the electromagnetic field.

The theoretical part of the work acquaints the reader with the issue of electromagnetic waves. Furthermore, the theoretical part deals with materials suitable for electric field shielding. It describes fibers with increased electrical conductivity, carbon fibers, textiles with increased conductivity and composites with textile reinforcement.

Within the experimental part, seven reinforcements were created in the form of a plain weave fabric with different sett of warp and weft using carbon roving with different fineness. These reinforcements were characterized by their ability to shield the electromagnetic field. Composite structures were created from the prepared reinforcements using L285 laminating resin and 500MGS hardener. The ability to shield the electromagnetic field by these composite materials was measured.

At the end of the work, the influence of reinforcement parameters and the influence of the matrix on the functionality of the composite was evaluated. Selected mechanical properties of the composites were also investigated.

Key words: electromagnetic shielding, carbon fibers, carbon roving, composites with textile reinforcement

Obsah

1	Úvod a cíl práce	10
2	Teoretická část.....	12
2.1	Stínění elektromagnetického pole	12
2.2	Materiály vhodné pro stínění elektromagnetického pole	14
2.2.1	Vlákna se zvýšenou elektrickou vodivostí.....	15
2.2.2	Uhlíkatá vlákna	18
2.2.3	Textilie se zvýšenou vodivostí	23
2.2.4	Kompozity s textilní výztuží	23
2.3	Mechanické vlastnosti.....	26
3	Experimentální část.....	29
3.1	Použité materiály.....	29
3.1.1	Uhlíkový roving	29
3.1.2	Epoxidová pryskyřice	31
3.2	Příprava vzorků uhlíkové výztuže.....	32
3.3	Příprava kompozitů	35
3.4	Použité metody.....	37
3.4.1	Měření tloušťky a hmotnosti vzorků.....	37
3.4.2	Měření elektromagnetického stínění.....	37
3.4.3	Měření mechanických vlastností.....	38
3.5	Diskuze.....	39
3.5.1	Hodnocení tloušťky a hmotnosti kompozitu.....	39
3.5.2	Hodnocení elektromagnetického stínění výztuže	40
3.5.3	Hodnocení elektromagnetického stínění kompozitu.....	43
3.5.4	Porovnání stínící účinnosti kompozitu a výztuže	46
3.5.5	Hodnocení mechanických vlastností kompozitu.....	48
4	Závěr	51
5	Literatura.....	55

Seznam zkratek a symbolů

Seznam zkratek	
A	absorpce
B	vícenásobný odrazový faktor
DNA	deoxyribonukleová kyselina
E	elektrické pole
EMI	elektromagnetické stínění
F	rovinné vlnové pole
H	magnetické pole
R	reflexe
RNA	ribonukleová kyselina
CA	konopí
CO	bavlna
LI	len
PA6	polyamid 6
PA6.6	polyamin 6.6
PAN	polyakrylonitril
PES	polyester
PP	polypropylen
SL	přírodní hedvábí
WO	vlna

Seznam symbolů

ρ	specifický elektrický odpor	[$\Omega \cdot m$]
ε	tažnost	[%]
σ_p	napětí do přetrhu	[Pa]
E_p	počáteční tangentový modul	[Pa]
F	pevnost	[N]
F_r	relativní síla (síla do přetrhu)	[N]
IS	interval spolehlivosti	[%]
Δl	podíl prodloužení	[mm]
RH	relativní vlhkost vzduchu	[%]
SE	účinnost stínění	[dB]
T	teplota	[$^{\circ}C$]

1. Úvod a cíl práce

Elektromagnetické rušení může být definováno jako elektromagnetické záření produkované elektrickými obvody, které může negativně ovlivnit chod okolních elektronických zařízení nebo způsobit poškození živých organismů. V posledních desetiletích se výrazně zvýšila úroveň tzv. elektromagnetického smogu, a to zejména v souvislosti s vývojem nových vysokofrekvenčních elektronických systémů a telekomunikačních zařízení. Tento jev zapříčinil aktivní vývoj nových a účinných řešení pro stínění rušivého elektromagnetického záření v různých aplikacích.

Z literární rešerše vyplývá, že nejběžnější je odstínění elektromagnetických polí pomocí mechanismu odrazu, který zapříčiňují kovové materiály, nejčastěji ve formě fólií nebo desek. Nevýhodou takovýchto řešení je omezená pružnost daná vysokou tuhostí, vysoká měrná hmotnost, problémy s korozí a limitovaná možnost řídit elektromagnetickou stínící účinnost. Navíc, tzv. elektromagnetický smog nelze eliminovat pouhým odrazem od stínící přepážky. Proto je velká pozornost věnována vývoji stínících materiálů pracujících na principu absorpce, založených na polymerních materiálech s využitím jejich výhodných vlastností jako je nízká váha a cena, snadná tvarovatelnost atd. Nicméně většina polymerních materiálů jsou elektrické izolanty totálně transparentních vůči elektromagnetickému záření. Začleněním elektricky vodivých komponentů různých typů a tvarů může být docíleno i schopnosti odstínit elektromagnetické pole. Díky tomu kompozitní materiály získávají velkou oblibu.

Speciální typ kompozitních materiálů představují polymery vyztužené uhlíkovými vlákny, přičemž uhlíkové vlákno poskytuje pevnost a tuhost a také elektrickou vodivost, zatímco polymer poskytuje soudržnou matici, která chrání a drží vlákna pohromadě.

Cílem této bakalářské práce je prohloubit poznatky v oblasti přípravy kompozit vyztužených uhlíkovými vlákny, vyvíjených za účelem odstínění vysokofrekvenčního elektromagnetického pole. Dílčí cíle práce představují průzkum vlivu jemnosti použitého uhlíkového rovingu a dostavy tkané uhlíkové tkaniny, jejíž osnovu i útek tvoří uhlíkové rovingy, na elektromagnetickou účinnost. Vyšetřen je také vliv matrice při přípravě kompozitu vyztuženého uhlíkovou tkaninou. Neméně důležitý cíl práce představuje zmapování vybraných mechanických vlastností vytvořeného kompozitu.

Při vypracování bakalářské práce byly stanoveny následující cíle a k nim odpovídající hypotézy:

Cíl 1: Zjistit, zda má dostava osnovy a útku uhlíkové tkaniny statisticky významný vliv na elektromagnetickou stínící účinnost výztuže/ kompozitu.

Hypotéza 1: Čím vyšší dostava osnovy a útku bude, tím vyšší bude elektromagnetické stínění výztuže/ kompozitu.

Cíl 2: Zjistit, zda má jemnost uhlíkového rovingu statisticky významný vliv na elektromagnetickou stínící účinnost výztuže/ kompozitu.

Hypotéza 2: Čím vyšší jemnost rovingu bude, tím vyšší bude elektromagnetické stínění výztuže /kompozitu.

Cíl 3: Zjistit, zda má aplikace nevodivé matrice na uhlíkovou výztuž statisticky významný vliv na elektromagnetickou stínící účinnost kompozitu.

Hypotéza 3: Aplikace nevodivé matrice na uhlíkovou výztuž statisticky významně sníží elektromagnetické stínění kompozitu v porovnání se samotnou výztuží.

Cíl 4: Zjistit, zda má dostava osnovy a útku uhlíkové tkaniny statisticky významný vliv na pevnost kompozitu.

Hypotéza 4: Čím vyšší dostava osnovy a útku bude, tím vyšší bude pevnost kompozitu.

Cíl 5: Zjistit, zda má jemnost uhlíkového rovingu statisticky významný vliv na pevnost kompozitu.

Hypotéza 5: Čím vyšší jemnost rovingu bude, tím vyšší bude pevnost kompozitu.

2. Teoretická část

Teoretická část bude zaměřena na problematiku stínění elektromagnetického pole a materiály vhodné ke stínění elektromagnetického pole. Konkrétněji se bude věnovat vláknům se zvýšenou elektrickou vodivostí jako jsou kovová vlákna, pokovená vlákna, elektricky vodivá kompozitní polymerní vlákna, bikomponentní vlákna a vlákna z vodivých polymerů. S ohledem na téma této bakalářské práce bude celá jedna podkapitola věnovaná uhlíkatým vláknům. Další podkapitoly budou zaměřeny na textilie se zvýšenou vodivostí a kompozity s textilní výztuží.

2.1 Stínění elektromagnetického pole

S rychlým růstem elektronického průmyslu a rozšířeným používáním elektrických a elektronických zařízení a příslušenství pracujících na různých frekvencích je nutné začít řešit otázku, jak chránit lidské tělo a elektronická zařízení před všemi zdroji rušivé elektromagnetické energie. Jedním z řešení jsou textilní výrobky a textilní kompozitní materiály, a to především pro jejich všestrannost a přizpůsobivost. [1]

Zvýšené povědomí o elektromagnetickém rušení vedlo k formulaci předpisů splňujících požadavky elektromagnetické kompatibility. Elektromagnetická vlna při vstupu do lidského těla vibruje a vydává teplo, tím brání regeneraci buňky DNA a RNA. Kromě toho také aktivuje abnormální chemické aktivity v těle. Tím může způsobit produkci rakovinových buněk a zvýšit například pravděpodobnost leukémie. [1] Negativní účinky dlouhodobě působícího vysokofrekvenčního elektromagnetického záření na lidský organismus nejsou zcela (podle prostudovaných odborných článků) jednoznačné, jsou stále studovány a až budoucnost ukáže jejich závažnost. Nicméně je zřejmé, že ochrana proti elektromagnetickému záření produkovaném např. mobilními telefony, wifi routery atd. je žádoucí zejména z preventivních důvodů pro rizikové skupiny obyvatel.

Otázka použití textilních struktur pro odstínění elektromagnetického pole při ochraně elektronických zařízení je však jednoznačná. Textilie vynikají nízkou hmotností, flexibilitou, propustností jak pro vzduch, tak vodní páry, a často i cenou, a to zejména v porovnání s klasickými stínícími přepážkami tvořenými kovovými deskami apod. Rádiové vlny, mikrovlny, rentgenové záření i viditelné světlo, to vše jsou elektromagnetické vlny, nebo také jinak řečeno elektromagnetické záření. Skládá se z elektrické a magnetické složky, kolmo na sebe mířící v pravém úhlu k rovině a vznikají pohybem elektricky nabitých částic.

Pro stínění elektromagnetického záření s využití kompozitních materiálů je k dispozici několik metod. Je možno je rozdělit do dvou skupin: povrchové úpravy a plniva. Povrchové úpravy jsou časově náročné a nákladné. Stále více se používají vodivá plniva, a to ať ve formě částic, vláken nebo plošných textilních materiálů. Účinnost stínění materiálů pak závisí na obsahu elektricky vodivého plniva. [1,2]

Účinnost elektromagnetického stínění je důležitý parametr, který charakterizuje schopnost materiálu odstínit elektromagnetické záření. Čím vyšší je účinnost stínění v decibelech (dB), tím menší energie prochází vzorkem. Celková měřená účinnost elektromagnetického stínění je kombinací odrazu elektromagnetické vlny od povrchu materiálu, absorpce elektromagnetické energie a její přeměna na teplo, a několikanásobných odrazů elektromagnetického záření. [2,3]

O stínění mluvíme v případě snížení magnetického pole nebo snížení rovinných vln. Účinnost stínící přepážky a výsledné elektromagnetické rušení záleží na frekvenci, vzdálenosti přepážky od zdroje, tloušťce přepážky a jeho materiálu. Účinnost stínění (SE) se vyjadřuje v decibelech (dB) jako funkce logaritmu poměru dopadající (E_0, H_0, F_0) a prošlé (E_1, H_1, F_1) intenzity elektrického (E), magnetického (H), nebo rovinného vlnového pole [1]:

$$SE \text{ [dB]} = 20\log(E_0/E_1) \quad (1)$$

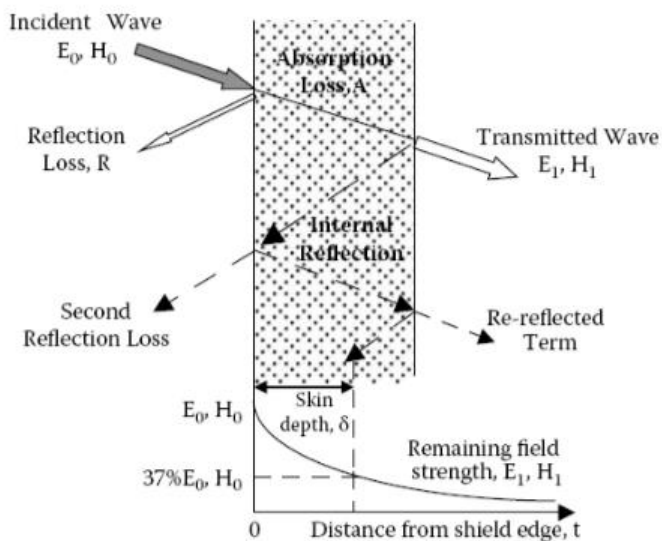
$$SE \text{ [dB]} = 20\log(H_0/H_1) \quad (2)$$

$$SE \text{ [dB]} = 20\log(F_0/F_1) \quad (3)$$

Jak již bylo zmíněno, k účinnosti elektromagnetického stínění přepážky přispívají tři mechanismy. První část záření se odráží od přední části povrchu přepážky v případě, že je povrch materiálu vysoce elektricky vodivý, další část je pohlcena uvnitř materiálu přepážky a zbylá část se odráží od zadní strany přepážky zpět dopředu, kde může pomoci či bránit účinnosti přepážky, podle jeho fázového vztahu s dopadající vlnou, jak je vidět na obrázku č. 1. Celková účinnost stínění stínícího materiálu se proto rovná součtu absorpce – absorption loss (A), reflexe – reflection loss (R) a korekčního faktoru, který je třeba zohlednit kvůli mnohonásobným odrazům – internal reflection v tenkých štítech:

$$SE = R + A + B \quad (4)$$

Všechny výrazy v rovnici jsou vyjádřeny v jednotce dB. Pokud je absorpční ztráta větší než 10dB, může být vícenásobný odrazový faktor (B) zanedbán. Stejně tak v praktickém výpočtu pro elektrická pole a rovinné vlny vícenásobný odrazový faktor zanedbáváme. [1]



Incident Wave	-	Dopadající vlna
Reflection Loss	-	Ztráta odrazem
Second Reflection Loss	-	Druhá ztráta odrazem
Absorption Loss	-	Absorpční ztráta
Internal Reflection	-	Vnitřní odraz
Skin depth.	-	Hloubka vniku
Transmitted Wave	-	Prošlá vlna
Re-reflected Term	-	Znovu odražený
Remaining field strength	-	Zbývající síla pole
Distance from shield edge	-	Vzdálenost od kraje štítu

Obrázek č. 1: Grafické znázornění elektromagnetického stínění EMI [1]

2.2 Materiály vhodné pro stínění elektromagnetického pole

Pro stínění elektromagnetického pole je z hlediska efektivnosti nejvhodnější použití kovů, a to například ve formě kovových desek. Na druhou stranu má toto řešení spoustu nevýhod, jde o vysokou hmotnost, vysokou ohybovou tuhost, nepropustnost pro vzduch a vodní páry a v neposlední řadě také cenu. Jak již bylo zmíněno výše, klíčovým parametrem při vývoji elektromagneticky stínících přepážek je zejména jejich dostatečně vysoká elektrická vodivost. Pomocí elektricky vodivých textilních struktur je možné popsané nevýhody kovových stínících krytů předejít. V následujících podkapitolách bude čtenář seznámen se základními druhy elektricky vodivých vláken, dále s elektricky vodivými textiliemi a také s kompozity s elektricky vodivou textilní výztuží.

2.2.1 Vlákna se zvýšenou elektrickou vodivostí

Textilní vlákna obecně rozdělujeme na **vlákna rostlinná**, jejichž základním stavebním prvkem je celulóza, tato vlákna získáváme především ze semen, stonků listů nebo plodů. Mezi nejznámější rostlinná vlákna patří bavlna, která se získává z květů bavlníku a má jednobuněčné vlákno, které pod mikroskopem připomíná v mrtvém stavu stužku. Další rostlinná vlákna jsou len, konopí, bambus, sisal nebo kokos.

Dále rozlišujeme **vlákna živočišného původu**, která jsou tvořena především bílkovinami. Nejčastěji tato vlákna získáváme ze srsti zvířat, například z ovce, velblouda, lamy či králíka nebo sekretu hmyzu, jako je tomu u bource morušového. Nejdůležitější představitele živočišných vláken najdeme pod názvem vlna nebo pravé hedvábí.

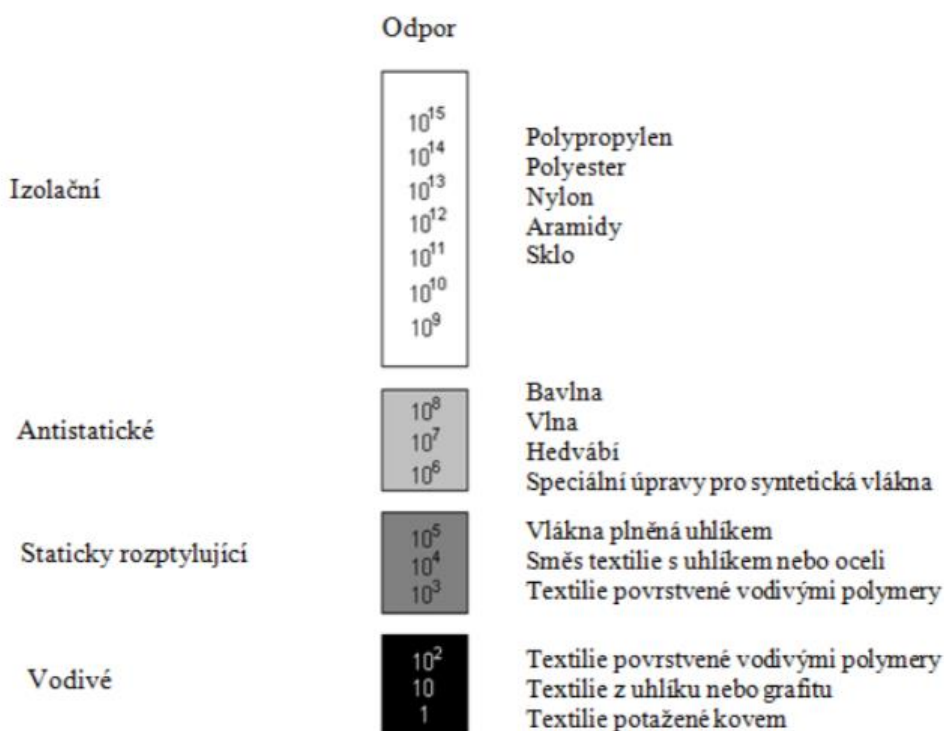
Běžně jsou také používána **vlákna na chemické bázi z přírodního polymeru**. Tato vlákna se skládají z makromolekulárních látek jako jsou celulóza, bílkoviny či kaučuk. Nejznámější jsou viskózoová vlákna, které jsou vyráběna z celulózy a jsou na povrchu rýhovaná až hladká. Jejich příčný řez může připomínat obláčky. Tato vlákna dominují vysokou navlhavostí, díky které mají nízkou pevnost a oděr za mokra. Setkat se můžeme také s vlákny měďnatými nebo acetátovými, které jsou taktéž na bázi celulózy.

Poslední jsou **chemická vlákna ze syntetických polymerů**. Často se můžeme setkat s označením vlákna budoucnosti. Sem řadíme vlákna polyamidová, polyesterová, polyuretanová a mnoho dalších. Díky jejich vysoké pevnosti a nízké mačkavosti je využití těchto vláken široké. Některá vlákna ze syntetických polymerů jsou dokonce antialergenní. Jako nevýhoda těchto vláken je uváděna jejich vysoká hořlavost. [4]

Většina textilních vláken patří do skupiny elektrických izolantů, přestože jejich vodivost není zcela nulová. To závisí na obsahu různých aditiv a také na obsahu vlhkosti. Důležitým sledovaným parametrem je hodnota specifického elektrického odporu ρ , jeho závislost odporu na obsahu vlhkosti se používá k měření vlhkosti materiálu na textilní bázi. [5] Na obrázku č. 2 jsou uvedeny hodnoty specifického elektrického odporu ρ [Ωm] vybraných textilních vláken. Elektrické vlastnosti textilií jsou často hodnoceny prostřednictvím povrchové rezistivity uvedené v [Ω]. Porovnání povrchové rezistivity plošných textilií různého materiálového složení je možno vidět v tabulce č. 1.

Tabulka č. 1: Specifický elektrický odpor ρ [Ωm] při 65 % relativní vlhkosti vzduchu a 20 °C teplotě vzduchu [13].

Textilní vlákna	CO	WO	LI	SL	CA	PA6	PA6.6	PAN	PES	PP
$\ln(\rho)$	5,6	7,3	5,9	8,7	10,6	13	11	14	17	12,5



Obrázek č. 2: Povrchové rezistivity textilních výrobků [10]

Vodivá vlákna je možno používat v podobě hedvábí nebo ve staplových délkách. Kombinací nevodivých tradičních vláken (jako jsou přírodní, syntetická atd.) a speciálních elektrických vláken mohou vzniknout příze, které mají požadovaný stupeň elektrické vodivosti. Vodivé příze můžeme také vyrobit obalením nevodivých přízí kovovými vrstvami například mědi, stříbra nebo zlaté fólie a můžeme je tak použít pro výrobu elektricky vodivých textilií. [6]

V následujících odstavcích budou popsány skupiny speciálních elektricky vodivých vláken používaných pro tvorbu textilií. Samostatná kapitola, s ohledem na experimentální část této bakalářské práce, pak bude věnována uhlíkatým vláknům.

Kovová vlákna jsou známá již od doby 3000 let před Kristem, v té době se využívala k dekorativním účelům. V dnešní době se kovová vlákna s nízkými průměry, a to cca 10 μm , používají při výrobě tkanin, pletenin, netkaných textilií či při oplétání. Díky jejich elektrické vodivosti a ohebně neměnným vlastnostem jsou tato vlákna využívána především v oblasti technických textilií. Široké využití mají kovová vlákna v praktických aplikacích, kde je nutná vysoká vodivost, například v mikroelektromechanických systémech, elektromagnetickém stínění nebo přenosu signálu. Nevýhodou kovových vláken je jejich vysoká cena, vysoká hmotnost a křehkost. Výhodami jsou dobrá odolnost vůči vysokým teplotám, vysoká pevnost v tahu, vysoké prodloužení do přetrhu, vysoká ohebnost, nehořlavost, nenásakavost, možnost praní, rozměrová stabilita a odolnost vůči chemikáliím. Pro výrobu kovových vláken se nabízejí dva základní procesy, mechanický, kam patří výroba kovových vláken tažením vláken, svazkového tažení či metoda řezání a dále tepelný výrobní proces, do kterého patří například zvláknování do rotující tekutiny nebo vytahování taveniny. [7,8]

Pokovená vlákna vznikají povrstvováním tradičních vláken kovy, galvanickými materiály nebo solemi kovů. Výhodou těchto vláken je stálý omak, relativně nízká měrná hmotnost a vysoká flexibilita. Nevýhodou je nízká odolnost vůči korozi či problém, který může způsobit adheze mezi kovem a vláknem. Pokovená vlákna je možno vyrobit několika způsoby: pokovováním s pojivem, vakuovým napařováním, katodovým napařováním či chemickým nanášením. [9]

Vodivá kompozitní polymerní vlákna jsou vyráběna rozmísením například grafitu či prášků jiných kovů v termoplastické, nebo netermoplastické nevodivé polymerní matici. Nejčastěji jsou vlákna plněna buď uhlíkovými sazemi, uhlíkovými nanotrubicemi, kovovými částicemi nebo nanočásticemi solí kovů. [9]

Bikomponentní vlákna jsou hojně využívána v nábytkářství, pro výrobu filtrace nebo jako medicínská aplikace. Hlavním znakem těchto vláken jsou odlišné chemické a fyzikální struktury plynoucí ze dvou použitých polymerů. Spojení vláken je pevné, ale oddělitelné. Spojit tato vlákna můžeme nejčastěji principem strana/strana, jádro/plášť nebo matice/vlákno. Vyrábí se pomocí zvláknování taveniny na speciálním zařízení se zvláknovacími tryskami, který je naplněn taveninou nebo roztokem polymeru. Při tvorbě elektricky vodivých bikomponentních vláken se používá jako jedna z komponent uhlík v různé formě. [9]

Vlákna z vodivých polymerů jsou pevná, lehká, pružná a mají vysokou elektrickou vodivost. Díky tomu jsou tato vlákna vhodná pro tkaní, pletení a jiné výrobní textilní procesy. Důležitá u vodivých polymerů je jejich molekulární struktura, kde se střídají jednoduché a dvojité vazby. Z vodivých

polymerů známe například polyanilín, polyacetylen, polypyrol, polythiofen a polyfenylenvinylen. Vlákná z vodivých polymerů je možno získat třemi způsoby: zaprvé vytlačení roztoku do zvlákňovací trysky, která pošle stabilní homogenní materiál do lázně, kde se okamžitě vysráží ve vlákněm tvaru. Další způsob je podobný jako první, s tím rozdílem, že se na začátku procesu spojí v roztoku nehomogenní vodivý polymer s nevodivým polymerem a díky trysce se zvlákňují. V třetím a posledním způsobu je využito nevodivé vlákno nebo textilie a tento substrát je pokryt roztokem nebo zředěným elektricky vodivým polymerem. [9]

2.2.2 Uhlíkatá vlákna

Uhlík v podobě dřevěného uhlí či sazí je znám již od pravěku, jako prvek je však znám až od druhé poloviny osmnáctého století. Jeho název je odvozen od latinského slova „carbo“, kterým Římané označovali dřevěné uhlí. Uhlík najdeme všude v přírodě, jeho výskyt byl dokázán i ve vesmíru, například na Slunci či hvězdách. [10]

Nejznámějšími modifikacemi uhlíku jsou grafit a diamant. Od roku 1985 se řadí k alotropickým modifikacím uhlíku také fullereny, které vznikají v elektrickém oblouku mezi grafitovými elektrodami nebo laserovým odpařováním grafitu. Srovnání vlastností diamantu, grafitu a fullerenu C60 můžeme vidět v tabulce č. 2. [10]

Tabulka č. 2: Vlastnosti diamantu, grafitu a fullerenu C60 [10]

Materiál/ vlastnost	diamant	grafit	fulleren - C60
vzhled krystalů	bezbarvé, silně lámající světlo	šedočerné, vrstevnaté	hnědočerné, lesklé
krystalová soustava	kubická	hexagonální	kubická
tvrdost	nejtvrdší nerost	měkký	měkký
teplota tání	netaje nad 1500 °C přechází na grafit	cca 3700 °C	při 600 °C sublimuje
hustota [g.cm⁻³]	3,51	2,26	1,65
rozpuštnost ve vodě	nerozpuštný	nerozpuštný	nerozpuštný
rozpuštnost v toluenu	nerozpuštný	nerozpuštný	rozpuštný
elektrická vodivost	nevodič	dobrý vodič	polovodič

Nejvíce uplatňovanými uhlíkovými materiály jsou pružný grafit, pyrolytický uhlík, skelný uhlík, uhlíkové aerogely, uhlíkové nanopěny, uhlíkové nanotrubičky a nanorohy, uhlíková vlákna a kompozity polymer-uhlíková vlákna a uhlík- uhlíková vlákna.[10]

Pružný grafit získáme při reakci přírodního nebo vysoce orientovaného pyrolytického grafitu s oxidačními činidly. Po tomto procesu je lisován bez pojidel a výztuže na pružné folie. Dominuje silnou anizotropií a využívá se pro těsnění ve vysokých teplotách a pro agresivní media. Také se ho můžeme použít jako topný článek nebo jako vykládání odlévacích forem pro roztavené kovy, které pružný grafit nesmáčí. [10]

Pyrolytický uhlík vzniká chemickým rozkladem těžkých uhlovodíkových sloučenin na podložce v teplotách 727 – 1827 °C. Pyrolytický uhlík je prakticky nerozpustný pro plyny. Využívá se pro výrobu rezistorů, povlaků pro jaderná paliva, v raketové technice jako vystýlka trysek atd. [10]

Skelný uhlík vzniká pyrolýzou termosetových polymerů, které mají vytvořenou trojrozměrnou strukturní síť. Dominuje velkou isotropií strukturních i fyzikálních vlastností, je prakticky

nerozpustný pro kapaliny i plyny. Jeho využití najdeme v medicínské praxi na implantáty či jako náhrada platiny nebo křemenného skla v chemických laboratořích. [10]

Uhlíkové aerogely vznikají karbonizací aerogelů připravených z resorcinformaldehydových pryskyřic. Mají nízkou měrnou hmotnost a supernízkou tepelnou vodivost, vysoký měrný povrch a ojedinělé elektrické vlastnosti. Setkáme se s ním u tepelné izolace, ale nejširší využití má u dobíjecích baterií a palivových článků jako nosič katalyzátoru. [10]

Uhlíková nanopěna. Získává se vystavením uhlíkového terčíku v argonové atmosféře výkonnému laserovému pulsnímu systému. Vzhled připomíná vzájemně pospojované sítě uhlíkových trubiček, 5mm dlouhých a vnitřní struktura obsahuje 35% uhlíku v hybridizaci sp³ a vykazuje paramagnetické chování. [10]

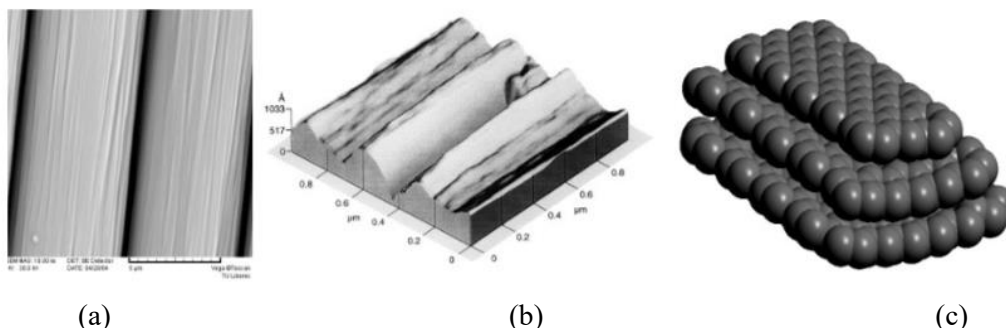
Uhlíkové nanotrubičky a nanorohy vznikají z katalytického rozkladu plynů obsahující vhodně vázaný uhlík na vhodných podložkách. Jsou schopné zachycovat velký objem plynů, iontů, vyztužovat polymerní vlákna a sloučit základní materiál v nanotechnologiích. [10]

Uhlíkové vlákno by mělo být tvořeno alespoň 90 % uhlíku, který se získá při kontrolované pyrolýze vhodných vláken. Díky jeho vlastnostem jako jsou pevnost, relativně vysoká elektrická vodivost, stabilita při vystavení reaktivnímu okolí, nízká hustota, nízký až negativní koeficient tepelné roztažnosti a odolnost vůči tepelným rázům, je možné uhlíková vlákna využívat v širokých oblastech jako například v sorpčních materiálech, materiálech odolných vůči elektrostatickému nabíjení, u katalyzátorů a u vyztužných kompozitních materiálů. [11,12]

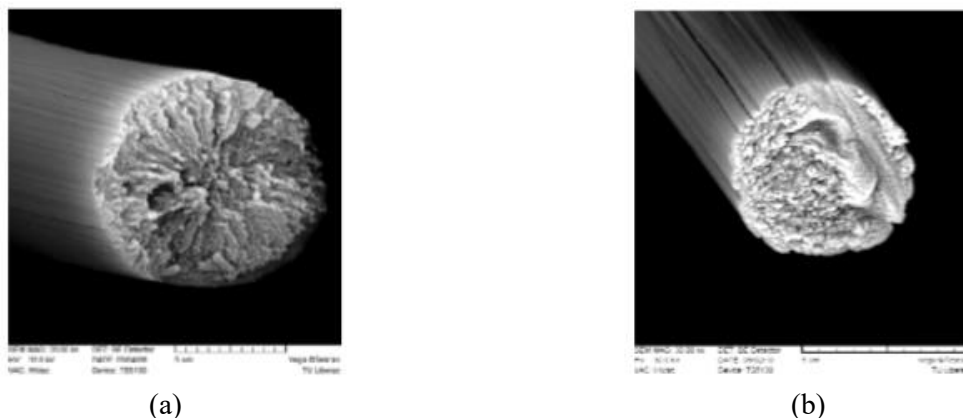
Uhlíková vlákna se vyrábí nejčastěji z vláken polyakrylonitrilových, dále je také možná výroba z vláken novoloidu. Naopak k výrobě uhlíkových vláken není využívána viskóza, protože při karbonizaci dochází k velkým ztrátám hmoty, a to až o 75 % původní hmotnosti. Vlákna vyrobená z polyakrylonitrilu mají ve směru osy vlákna protáhlé mikrokrystaly turbostatického uhlíku tvořeny vždy několika paralelními aromatickými rovinami. V příčném řezu vidíme pásy různě stočeny a jsou spíše malých rozměrů. Vzhled povrchu uhlíkových vláken je možno vidět na obrázku č. 3. Výroba uhlíkových vláken je rozdělena do tří etap: stabilizace, karbonizace a grafitizace. [12]

Pro získání nejtužších uhlíkových vláken používáme zůstatky po destilaci černého uhlí a ropy, tzv. smoly. Vysoce tuhá a přitom pevná vlákna získáme z mezifázových smol, mikrostrukturu můžeme vidět na obrázku č. 4. Aromatické roviny se orientují podél osy vlákna, a to při zvláknování smoly ve

viskózním stavu. Následuje stabilizace vlákna oxidací a pak předkarbonizace, samotná karbonizace a proces končí gravitací. [12]



Obrázek č. 3: Vzhled povrchu uhlíkových vláken: (a) SEM snímek, (b) AFM snímek a (c) molekulární model [10]



Obrázek č. 4: Mikrostruktura uhlíkových vláken: (a) vlákno z mezifázových smol, (b) vlákno z PAN [9]

Vlastnosti uhlíkových vláken jsou dány použitím výchozího polymerního materiálu, podmínkami karbonizace, tepelnou úpravou i na zavedení určitých aditiv. Rozdíl v základních vlastnostech vybraných uhlíkových rovingů můžeme vidět v tabulce č. 3. [13]

Tabulka č. 3: Porovnávání vlastností vybraných uhlíkových vláken [13]

Výrobce	Typ	Prek.	Hustota [g/cm³]	Pevnost [MPa]	Modul [GPa]	Prodloužení [%]	Rezistivita [mΩcm]
Toho	IMS60	PAN	1,8	5600	290	1,9	1,45
Toho	UTS50	PAN	1,79	4800	240	2	2,05
Celion CF	Celion	PAN	1,78	3400	230	2,2	1,82
Celion CF	Celion	PAN	1,78	3400	230	2,2	1,82
Mitsubishi	Dialed	Pitch	2,12	2620	630	0,4	0,66
Nippon	Granoc	Pitch	2,17	3430	780	0,5	0,5
Zoltec	Panex 35	PAN	1,81	4137	242	1,5	1,55
Toray	T700S	PAN	1,8	2550	135	1,7	1,6

Mezi základní vlastnosti uhlíkových vláken patří anizotropie mechanických vlastností, křehkost, záporný koeficient délkové teplotní roztažnosti α a malý elektrický odpor v podélném směru vlákna. Specifický odpor uhlíkových vláken se dá řídit třemi způsoby, zaprvé teplotně-časovým režimem v průběhu tvorby vlákna, zadruhé orientovaným dloužením v průběhu tvorby a karbonizace a posledním způsobem je zavedení chemických sloučenin a funkčních skupin do struktury výchozího surového materiálu uhlíkových vláken. [12]

2.2.3 Textilie se zvýšenou vodivostí

Kovová vlákna se v textilním průmyslu využívají již mnoho let, a to především k tvorbě dekorativních textilií. Za první elektricky vodivou textilií můžeme považovat hedvábnou organzu, která má osnovu z hedvábné příze a útek tvoří hedvábná příze ovinutá tenkou měděnou folií. [14]

Elektricky vodivé textilie by měly splňovat určité požadavky především proto, aby bylo docíleno komfortu pro jejich nositele. Textilní materiály pro oděvy musí být ohebné a pružné, tedy musí mít nízkou ohybovou a smykovou tuhost, tím budou snadno deformovatelné a splývavé. Ideálně by taková textilie měla být tvořena vlákny jemnějšími než 1 tex a plošnou hmotnost by měla mít v rozmezí 150-300 g/m². Kovy, uhlík a vodivé polymery jsou v čisté podobě celkem křehké materiály, proto jsou tyto požadavky nereálné. Z toho důvodu je nutné při tvorbě těchto materiálů pro oděvní odvětví kombinovat s klasickými vlákny. [7]

U netkaných textilií můžeme směšovat klasická vlákna například s kovovými, nebo pokovenými vlákny. U tkanin a pletenin můžeme elektricky vodivou složku zpracovat přímo do příze, a to hned několika způsoby:

- směšováním dvou a více komponent ve formě staplových vláken, z toho jedno staplové vlákno může být tvořeno kovovým vláknem,
- oprádkáním nekonečných vodivých vláken, což si můžeme představit jako kovový drát opředený klasickými staplovými vlákny,
- skaním vodivého drátu s nevodivou přízí, atd. [15]

2.2.4 Kompozity s textilní výztuží

Historie kompozitů sahá až do přírodního evolučního vývoje, který byl dlouhý 3,5 miliardy let, kde se tvořily materiály výlučně na kompozitním principu. Takovým kompozitem může být dřevo, tvořené ohebnými, ale pevnými celulóзовými vlákny v tahu a ligninu, který je použitý jako pojivo k zajištění tuhosti. Dalším velmi starým kompozitním materiálem je malta a beton. Významný příklad modernějšího kompozitního materiálu najdeme u historických zbraní, a to damascéskou ocel, kde se kompozit skládá z plátů středně uhlíkaté a vysokouhlíkaté oceli, a tím je výsledná ocel optimálně tvrdá a houževnatá. [16]

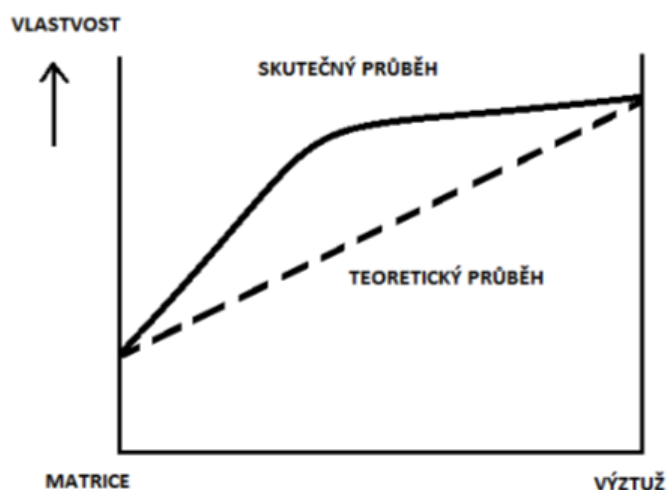
Kompozit můžeme definovat jako každý materiálový systém složený nejméně ze dvou a více fází, z nichž je alespoň jedna pevná. Rozhraní mezi fázemi musí být makroskopicky rozeznatelné. Výsledné vlastnosti nemohou být dosaženy jednotlivou složkou samočinně, ani prostou sumací. [16]

Výklad kompozitního působení je možno uvést na bimetalovém článku, který bývá součástí termostatů. Článek je tvořen ze dvou pásků různých kovů, například mosazi a železa, které jsou vzájemně pevně spojeny. Dojde-li ke změně teploty, mosazná část s větším součinitelem teplotní roztažnosti namáhá železnou část na styku tahem a sama je namáhána tlakem, článek se tak výsledně společně ohne. [16]

Pokud na kompozitní materiál působí rostoucí zatížení, matrice s nižším modulem pružnosti začne ustupovat zatížení a vlákna, která jsou obklopena měkkou matricí se nemohou deformovat, a tak přebírají zatížení. Slabost matrice se však ve skutečnosti neprojevuje, protože je skryta pod pevností vláken, která zvládnou mnohem větší zatížení než matrice. Matrice, která zprostředkovává přenos zatížení do tužších součástí musí zajišťovat odolnost celého kompozitu před vnějšími podmínkami, ve kterých se nachází, protože vždy obklopuje vyztužující vlákna. [16]

Základními vlastnostmi kompozitních materiálů je **homogenita a nehomogenita**. Vnitřně je kompozit nehomogenní, ale z makroskopického hlediska je homogenní. Účelem vytváření kompozitních materiálů je docílení požadavků, které jsou u klasických materiálů jen těžko splnitelné. **Zásadními požadavky na kompozitní materiály** jsou zvýšení tuhosti, pevnosti, rozměrové stability, houževnatosti, teplotní stability, mechanického tlumení a zvýšení korozní nebo chemické odolnosti. Naopak snížení propustnosti pro kapaliny nebo plyny, nasákavosti, negativního dopadu na životní prostředí a snížení ceny. Dalšími požadavky jsou modifikace elektrických vlastností, udržení tuhosti a pevnosti při vysoké teplotě a redukce hmotnosti. [17]

Další vlastností kompozitních materiálů je **izotropie a anizotropie**. Běžné materiály jsou izotropní, kompozitní materiály mají především anizotropní vlastnosti, což znamená, že jsou jejich vlastnosti v každém směru jiné. Kompozitní materiály se vyrábějí tak, aby měly co nejsilnější **synergický efekt**. Při tomto efektu dochází v kompozitu ke kombinaci pozitivních vlastností jeho složek tak, že jeho celek přesahuje poměrný součet složek. Tento efekt můžeme vidět na obrázku č. 5. [17]



Obrázek č. 5: Znáornění synergického efektu v kompozitu [17]

Kompozitní materiály s textilní výztuží definujeme jako kompozity, kde výztuž ve formě vláken je nejčastěji pojena polymerní matricí. Polymerní matrici dělíme na reaktoplastickou, což jsou například nenasyčené polyesterové pryskyřice, vinylesterové pryskyřice, epoxidové pryskyřice či fenolické pryskyřice a matrice termoplastické, například polypropylen či polyamidy. [18]

Pro kompozitní výztuž je možné využít tyto vlákenné produkty. **Sekané prameny**, ty se nejčastěji využívají pro přípravu lisovacích a vstřikovacích směsí, tyto prameny jsou nasekány do potřebné délky. **Mletá vlákna**, ta se využívají v případě křehkých vláken, protože díky mletí lze získat krátká vlákna. **Rovingy** jsou sdužené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů. Využívají se pro výrobu profilů tažením, navíjení a pro výrobu jednosměrných prepregů. Z rovingů lze tkaním získat **rovingové tkaniny**, které jsou určeny pro kontaktní laminování, pultruzi či navíjení a výrobu tkaninových prepregů. Nahodile uspořádaná kontinuální nebo na větší délky sekaná vlákna tvoří **rohože**. V rohoži jsou sekaná vlákna spojena polymerními pojivy a kontinuální vlákna jsou vzájemně propletena. Různě široké rohože nebo kotouče, které obsahují buď paralelně uspořádané rovingy, tkaninu nebo rohož a polymerní matrici se nazývají **prepregy**. Poslední zvláštní produkt, který je určen pro jádra sendvičových konstrukcí s různou výškou, velikostí a tvarem buněk se nazývá **voština**. [18]

Kompozitní materiály se používají například v letectví, automobilovém průmyslu, v chemii a elektrotechnice. Kompozitní materiály najdeme i u sportovního vybavení jako jsou lyže, tenisové rakety, golfové hole atd. i u nábytku a zařízení jako jsou skříně, křesla či žebřiny. [18]

2.3 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti udávají kvalitu vláken a veškerých textilních struktur zejména pro technické účely, kde je především důležitá odolnost vůči tahovým deformacím. Mechanické charakteristiky vláken jsou závislé na chemickém složení vláken, molekulové hmotnosti polymeračních řetězců a podmínkách zvlákňování. Měří se většinou deformace v určeném způsobu namáhání, a to buď jednoosé namáhání, kam patří tah, tlak nebo víceosé namáhání jako je krut či ohyb. Dále rozdělujeme s ohledem na opakování namáhání na prosté a cyklické a s ohledem na čas namáhání statické, časově závislé a dynamické. Důležité také je uvědomit si, zda měříme mechanické vlastnosti do přetrhu nebo do doby, kdy nedochází k porušení vláken. [5]

Pevnost a tažnost jsou základními charakteristikami všech typů vláken. Jsou popisovány tzv. ultimativními charakteristikami. **Pevnost** je možné definovat dvěma způsoby:

- jako relativní síla (síla do přetrhu) F_r [N/tex] nebo,
- jako napětí do přetrhu σ_p [Gpa].

Tažnost pak udává deformaci do přetrhu ε_p a je vyjádřena v procentech.

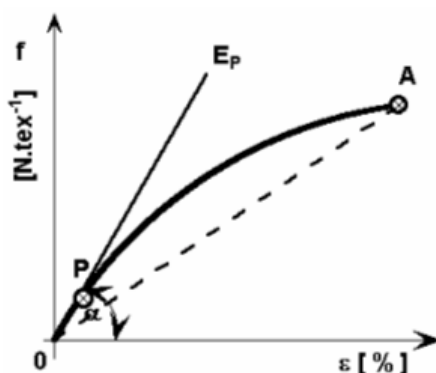
Pevnost a tažnost plošných textilií se testuje obdobně jako tomu je u vláken, do čelistí se upíná proužek tkaniny, pleteniny nebo netkané textilie obvykle šířky 50 mm.

Orientační ultimativní mechanické vlastnosti vybraných vláken jsou vypsány v tabulce č. 4. [5]

Tabulka č.4: Ultimatívni mechanické vlastnosti vláken [5]

Vlákno	Pevnost [cN.dtex⁻¹]	Tažnost [%]	Pevnost mokrá [%] ze suché	Tažnost mokrá [%]
Vlna	1 – 2	20 – 40	80 – 90	25 – 50
Bavlna	2,7 – 4,3	3 – 10	100 – 110	3,6 – 12
Viskoza	2 – 3	15 – 30	44 – 72	20 – 40
Acetát	1,3	20 – 45	60 – 70	30 – 50
PA 6	3,7 – 5,2	25 – 40	85 – 90	20 – 50
PA 6.6	3,7 – 5,4	25 – 40	85 – 90	20 – 50
PES	4,1 – 4,5	19 – 23	100	19 – 23
PP	2,7 – 6,3	25 – 75	100	25 – 75
PAN	2,0 – 2,9	20 – 28	80 – 90	26 – 34
Kevlar	19	4	100	4

Deformace je stav, kdy při natahování vzorku dochází k jeho prodloužení. Absolutní deformace se vyjadřuje v absolutních jednotkách jako Δl [mm]. Pokud chceme srovnávat deformaci různých materiálů, je nutné ji přepočítat na relativní jednotky [%]. Deformaci popisujeme jako vratnou (elastickou) a nevratnou (plastickou). Vratnou deformaci můžeme pozorovat pouze v oblasti malých sil a deformací, kde průběh $F = f(\Delta l)$ je lineární. U strojnických materiálů je tato závislost popisována Hookeovým zákonem a vyjádřena Youngovým modulem pružnosti. Tato definice se však u textilních struktur nedá použít, protože plocha průřezu vláken není přesně definována. Modul pružnosti u textilií tedy nelze definovat Youngovým modulem. Vycházíme z toho, že modul pružnosti je tečna ke křivce v počátku. Většinou ji konstruujeme graficky, změříme úhel α a vypočítáme $\tan \alpha$. U textilií tedy používáme místo pojmu Youngův modul pružnosti pojem počáteční tangentský modul E_p . Bod P , kde tečna v počátku opouští tahovou křivku pak definujeme jako mez pružnosti, můžeme vidět na obrázku č. 6. [19]



Obrázek č. 6: Modul pružnosti textilií

charakteristický bod P na tahové křivce textilie pro určení počátečního tangentského modulu. [19]

Klimatické podmínky zásadním způsobem ovlivňují výsledky měření. Vlhkost může změnit pevnost vláken až o desítky procent, jak můžeme vidět v tabulce č. 4. Normou stanovené klimatické podmínky pro měření jsou $20 \pm 2^\circ \text{C}$ – teplota a $65 \pm 2\%$ - vlhkost ovzduší. Z tabulky je možné vyčíst, že u většiny vláken pevnost za mokra klesá a tažnost roste. [19]

3. Experimentální část

V rámci experimentální části bylo vytvořeno sedm výztuží ve formě tkaniny plátnové vazby s různou dostavou za použití uhlíkového rovingu odlišné jemnosti. Uhlíkový roving tvořil jak osnovu, tak útek připravených tkanin. Tyto výztuže byly charakterizovány dle schopnosti odstínit elektromagnetické pole. Za pomoci připravených výztuží byly vytvořeny kompozitní struktury s využitím laminační epoxydivé pryskyřice a tužidla. U těchto vytvořených kompozitních materiálů byla opět hodnocena schopnost odstínit elektromagnetické pole. Na závěr byly zmapovány vybrané mechanické vlastnosti vytvořených kompozitních struktur.

3.1 Použité materiály

V následujících podkapitolách budou popsány materiály, které byly využity v experimentální části práce.

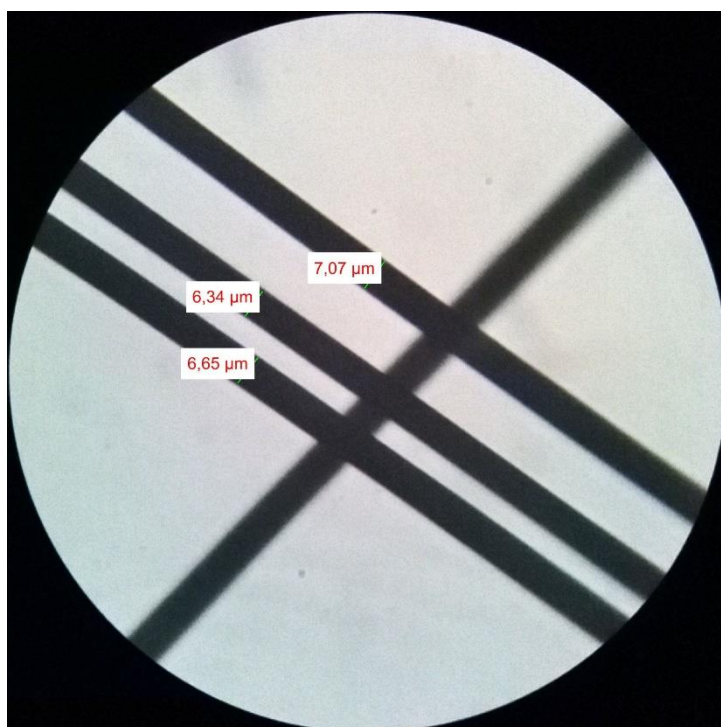
3.1.1 Uhlíkový roving

Pro vytvoření výztuže byl použit uhlíkatý roving od výrobce Aksaca, typ A – 35. Tento roving obsahuje 96 % uhlíkatých vláken a zbylé 4 % jsou uvedeny jako obchodní tajemství výrobce. Jedná se o nekonečná vlákna vyrobená z polyamidového prekurzoru.

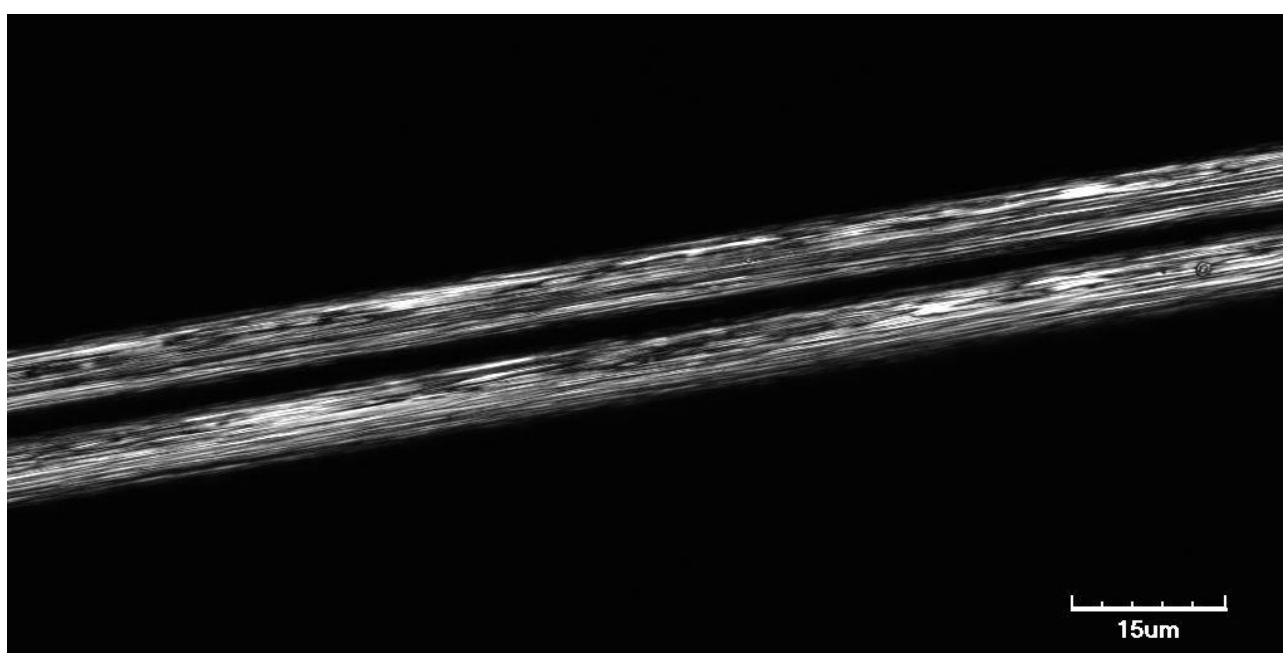
Při manipulaci s tímto rovingem nejsou nutná žádná speciální opatření. Potencionální nebezpečí nastává v případě mechanického podráždění pokožky a při řezání nebo zpracování uhlíkatých vláken, při kterém vzniká prach může dojít například k mechanickému podráždění očí. Uhlíkové vlákno, ze kterého je vytvořen tento roving není uváděn jako karcinogen a na životní prostředí může mít negativní dopad tím, že jako elektricky vodivé vlákno může způsobit zkrat oběhu elektrického zařízení. Za normálních podmínek nehrozí vzplanutí, pokud je tento produkt přítomen v ohni, bojuje se s ohněm na základě přítomnosti ostatních zapálených materiálů. [20]

Fyzikální a chemické vlastnosti jsou pro přehlednost zobrazeny v tabulce č. 5. s tím, že hmotnostní rezistivita, rezistivita a lineární hustota jsou hodnoty naměřené v laboratoři a zbylá data jsou hodnoty uváděné výrobcem.

Na obrázku č. 7 a 8 jsou zobrazeny snímky filamentů (nekonečných vláken) tvořících uhlíkový roving.



Obrázek č. 7: Snímek uhlíkového vlákna pořízený optickým mikroskopem



Obrázek č. 8: Snímek uhlíkového vlákna pořízený konfokálním mikroskopem

Tabulka č. 5: Fyzikální a chemické vlastnosti uhlíkatého rovingu A-35 [20]

Zápach	NE
Rozpustnost ve vodě	NE
Hmotnostní rezistivita [$m\Omega\text{g}/\text{cm}^2$]	3,03
Rezistivita ρ [$m\Omega\cdot\text{cm}$]	1,73
Lineární hustota [tex]	196
Počet filamentů [-]	3000
Objemová hmotnost [g/cm^3]	1,75
Lineární hustota [tex]	196
Pevnost [MPa]	3500
Modul pružnosti [GPa]	230
Tažnost [%]	1,5

3.1.2 Epoxidová pryskyřice

Jako matrice pro výrobu kompozitu byla použita epoxidová pryskyřice. Tvoří ji dvě složky: epoxid 285 a tvrdidlo 500. Poměr míchání je 100:40/váhově a 100:50/objemově. Doba zpracovatelnosti 100g/20 °C je 10-15 min.

Laminační pryskyřice L 285 se vyznačuje vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi. Je schválena německým federálním úřadem pro letectví. Používá se pro výrobu kompozitních prvků, lodí a jejich staveb, sportovního nářadí, leteckých modelů, forem a nástrojů. Zpracovává se všemi běžnými metodami, při teplotách mezi 10°C a 40°C. Má extrémně dobrou fyziologickou kompatibilitu, dobré mechanické a tepelné vlastnosti, velmi krátkou dobu vytvrzení dokonce i při nízké teplotě. [21]

Tvrdidlo 500 je možné využít pro rychlé vytvrzování při nízkých teplotách již od +10 C. Jeho vdechnutí je zdraví škodlivé, je toxický pro vodní organismy, s dlouhodobými účinky. Uvádí se u něj podezření na poškození reprodukční schopnosti a podezření na poškození plodu v těle matky. Způsobuje těžké poleptání kůže a poškození očí. Může vyvolat alergickou kožní reakci. Specifikace laminační pryskyřice a tvrdidla je pro lepší přehlednost uvedena v tabulce č. 6. [21]

Tabulka č. 6: Specifikace laminační pryskyřice L 285 a tvrdidla 500 [21]

	Laminační pryskyřice L 285	Tužidlo 500
Hustota g/cm³ / 25 °C	1,18 - 1,23	1,00 - 1,06
Viskozita mPas / 25 °C	600 - 900	200 - 350
Ekvivalent epoxidu	165 - 170	–
Hodnota epoxidu	0,59 - 0,65	–
Barva Gardner	max 3	max 5
Hodnota Aminu mg KOH/ g	–	350 - 400

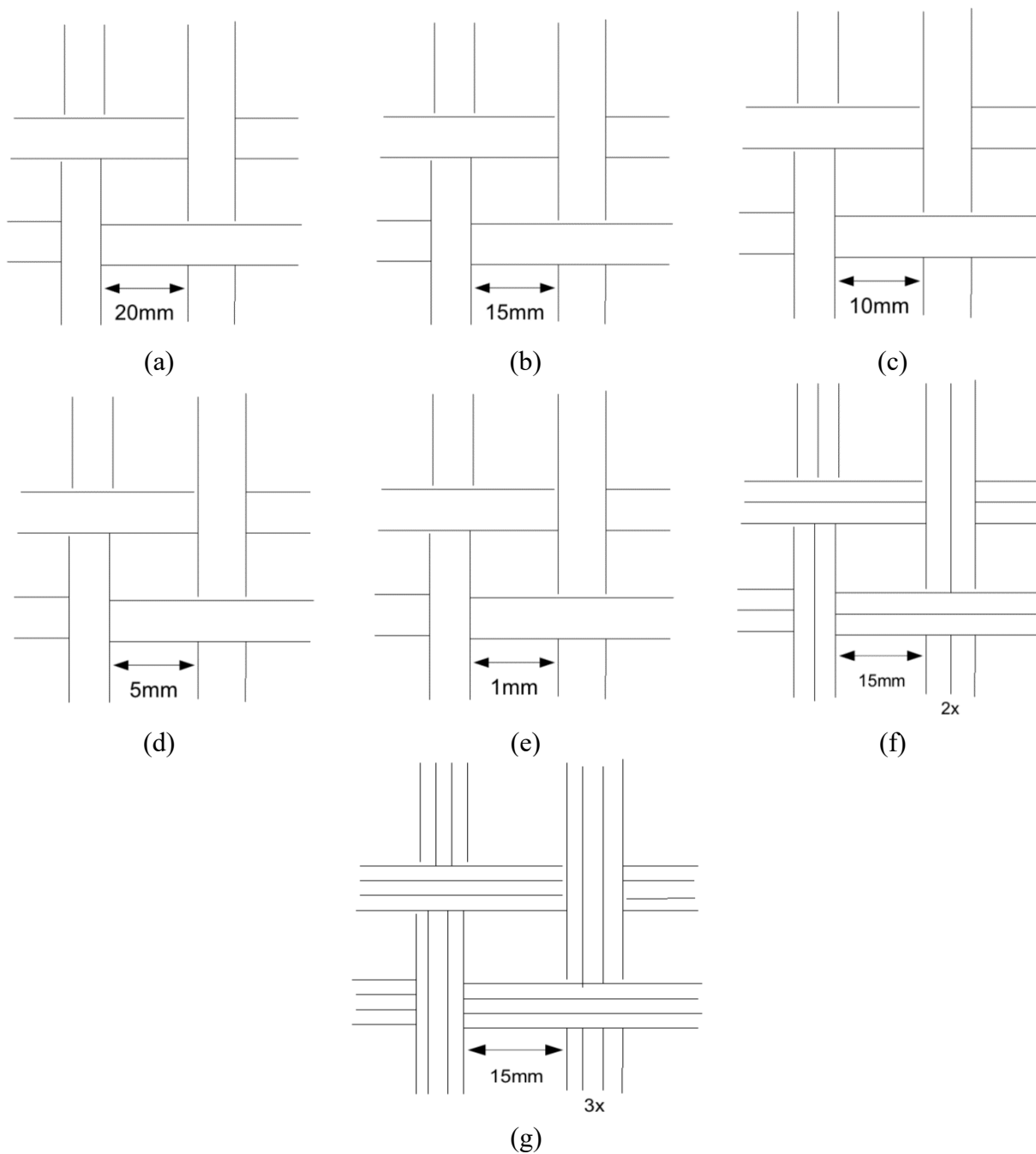
3.2 Příprava vzorků uhlíkové výztuže

Bylo vytvořeno sedm typů výztuží ve formě tkaniny plátnové vazby s různou dostavou za použití uhlíkového rovingu popsaného v kapitole 3.1.1. Postup přípravy vzorků byl u všech stejný. Na připravenou teflonovou folii, která sloužila jako nepřilnavá podložka, byly ručně provázány osnovní a útkové nitě, které tak tvořily tkaninu v plátnové vazbě. Nití je označen uhlíkatý roving. Okraje tkaniny byly přichyceny lepicí páskou, aby při manipulaci s výztuží nedošlo k porušení vazby tkaniny. Výztuže byly vytvořeny ve velikosti cca 25 x 25 cm.

U prvních pěti vzorků byla použita jednoduchá nit pro tvorbu osnovy a útku. Vzorky se lišily dostavou osnovy a útku, resp. roztečí mezi osnovními a útkovými nitěmi. Dostava osnovy a útku byla u daného vzorku vždy stejná. Vzorek s nejnižší dostavou měl 5 nití na 100 mm, což odpovídalo 20 mm mezeře mezi uhlíkatými rovingy jak v osnově, tak v útku. Nej hustší výztuž měla s dostavu 100 nití na 100 mm. Dále byly připraveny vzorky s vyšší jemností osnovní a útkové nitě sdružením jednoduché příze, a to 2x a 3x. U těchto vzorků byla totožná dostava osnovy a útku. Popis vzorků je uveden v tabulce č. 7. Schématický náčrt tvorby výztuží je znázorněn na obrázku č. 9.

Tabulka č. 7: Základní charakteristiky tkaných výztuží

Pořadí vzorku	Dostava osnovy a útku [dm ⁻¹]	Rozteč mezi osnovními a útkovými nitěmi [mm]	Počet uhlíkových rovingů tvořící osnovní / útkovou nit [-]
1	5	20	1
2	7	15	1
3	9	10	1
4	18	5	1
5	100	1	1
6	7	15	2
7	7	15	3



Obrázek č. 9: (a) – (e) vzorky s konstantní jemností osnovní a útkové nitě a různou dostavou osnovy a útku, (f), (g) – vzorky s konstantní dostavou osnovních a útkových nití a různou jemností osnovní a útkové nitě

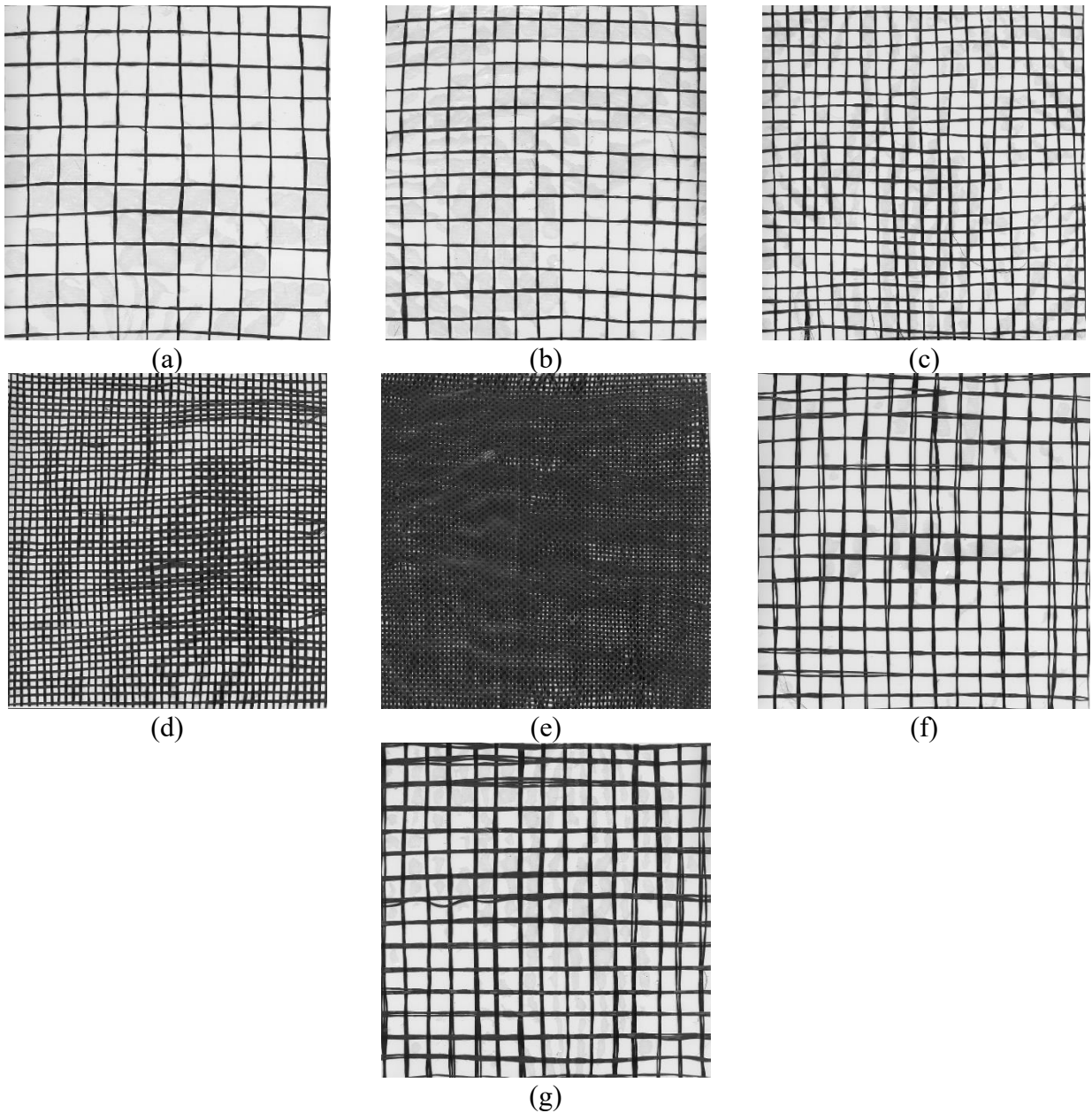
3.3 Příprava kompozitů

Byla vyrobena série vzorků z epoxidové pryskyřice MGS L 285a tvrdidla H 500. Míchací poměr byl 100:40 dle hmotnosti [22]. Laminační systém L 285 byla epoxidová pryskyřice z Bisfenolu A a epichlorhydrinu s hydrofilním charakterem. V tabulce č. 8 je uvedena specifikace použití pryskyřice a tvrdidla.

Tabulka č.8: Specifikace pryskyřice a tvrdidla od výrobce při 25 °C [22]

	L 285	H 500
Viskozita [mPa.s]	600-900	200-350
Hustota [kg/m³]	1200	1030

Směs tvrdidla a epoxidu byla míchána při pokojové teplotě po dobu 5 min. pomocí magnetického míchadla Hanna HI190, poté aplikována na tkaniny (výztuž) a pak ponechána 24 hod. při pokojové teplotě zatvrdnout při současném působení vakua. Následovalo vytvrzení v horkovzdušné peci na 15 hod. při teplotě 60 °C. Výsledné kompozity jsou k vidění na obrázku č. 10.



Obrázek č. 10: Makroskopické snímky kompozitů: (a) – (g) – vzorky 1 – 7, viz popis vzorků v tabulce č. 7

3.4 Použité metody

3.4.1 Měření tloušťky a hmotnosti vzorků

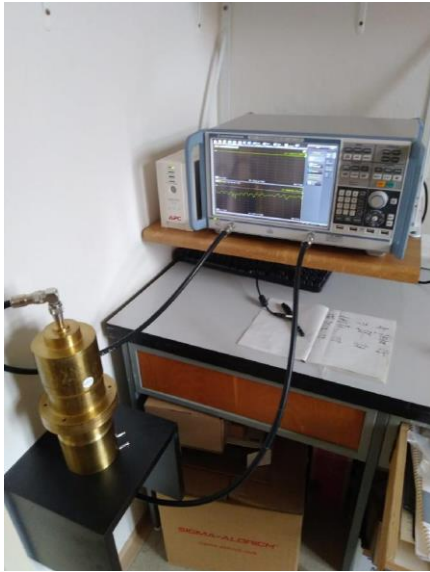
Měření tloušťky se provádí na tloušťkoměrech, kde je jako vstupní nastavitelná veličina přítlak, který se volí podle typu textilie a vymezi v textilií tloušťku h . Tlak je vyvinut kruhovou čelistí, která je také nastavitelná podle druhu textilie. Měření probíhá na tvrdé podložce. K měření byl využit digitálním tloušťkoměr dle ČSN EN ISO 5084 [23]. Použit byl přítlak 1 kPa. Měřena byla 3 místa na vzorku a z nich pak byla vypočtena průměrná hodnota.

Měření hmotnosti bylo prováděno na digitální váze. Nejprve byly změřeny samotné výztuže, poté kompozit a vypočítány byly hmotnostní podíly vláken a matrice (pryskyřice).

Měření probíhalo za standardních laboratorních klimatických podmínek.

3.4.2 Měření elektromagnetického stínění

Efektivita stínění (SE) textilií byla hodnocena dle normy ASTM 4935-10 [24], která je určena pro hodnocení plošných materiálů. Tato norma pracuje s předpokladem dopadu rovinné vlny na stínící přepážku v blízké zóně elektromagnetického pole pro frekvenci 30 MHz až 1,5 GHz. Měřicí přípravek sestával z držáku vzorku koaxiálního tvaru (výrobce Electro-Metrics, Inc., model EM-2107A), jehož vstup a výstup byl připojen k obvodovému analyzátoru. Pro generování a přijímání elektromagnetického signálu byl použit obvodový analyzátor Rhode & Schwarz ZNC3. Celé zařízení je vyfoceno na obrázku č. 11. Měřený vzorek má tvar kruhu. Měřena byla 3 odlišná místa a ze změřených hodnot pak byla vypočtena průměrná hodnota. Měření probíhalo při následujících klimatických podmínkách: $T = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 46 \text{ } \%$.



Obrázek č.11: Zařízení k měření SE



Obrázek č. 12: Trhačka Tiratest T2400

3.4.3 Měření mechanických vlastností

K měření mechanických vlastností byla využita trhačka Tiratest T2400, která je zobrazena na obrázku č. 12. Měření probíhalo dle normy ČSN EN 2561 [25]. Měřicí hlava byla použita o rozsahu 10 kN. K upnutí vzorku byly použity mechanické čelisti. Upínací délka vzorku byla 100 mm a šířka všech vzorků byla 40 mm. Rychlost posuvu čelistí byla 10 mm/min. Změřena byla závislost síly v N na posuvu čelistí v mm. Jako výstup byla získána pevnost a tažnost kompozitu. Pro každý vzorek bylo provedeno 5 opakování hodnocení ultimativních charakteristik. Měření probíhalo za standardních laboratorních klimatických podmínek.

3.5 Diskuze

3.5.1 Hodnocení tloušťky a hmotnosti kompozitu

Cílem této podkapitoly bylo provést základní charakterizaci vzniklých kompozitů. Výsledky hodnocení tloušťky a hmotnosti jsou zobrazeny v tabulce č. 9. Charakteristika vzorků je uvedena v tabulce č. 7. Zkoumána je zde hmotnost výztuže, kompozitu a z nich vypočtena hmotnost pryskyřice v matrici. Z výsledků je patrné, že nejvyšší hmotnost má vzorek č. 5, jedná se o vzorek s dostavou osnovy a útku 100 dm^{-1} . Dále je vidět, že stejný vzorek obsahuje nejméně gramů pryskyřice. Nejlehčí je vzorek č. 1 o dostavě osnovy a útku 5 dm^{-1} .

Dále byl hodnocen hmotnostní podíl vlákna a matrice, který byl získán pomocí následujících vztahů:

$$m_f = M_f / M_c, \quad (5)$$

$$m_m = M_m / M_c. \quad (6)$$

V rovnici m_f označuje hmotnostní podíl vláken, M_f hmotnost výztuže a M_c hmotnost kompozitu. Hmotnostní podíl matrice se značí m_m a M_m je hmotnost pryskyřice. [26]

Z výsledků je možno říci, že nejvyšší hmotnostní podíl vláken má vzorek č. 5, stejný vzorek má zároveň nejnižší hmotnostní podíl matrice. Nejvyšší podíl matrice má vzorek č. 4, rozdíl mezi hmotnostním podílem matrice u vzorků 2–4 je však zanedbatelný.

Nejmenší průměrnou tloušťku má vzorek č. 1. Největší průměrnou tloušťku má vzorek č. 7, jedná se o vzorek s nejvyšší jemností rovingů, vzniklý sdružením osnovní a útkové nitě jednoduché příze 3x.

Tabulka č. 9: Hodnocení tloušťky a hmotnosti kompozitu

Vzorek č.	Hmotnost [g]			Hmotnostní podíl [%]		Průměrná tloušťka [mm]
	Výztuž	Kompozit	Matrice	Výztuž m_f	Matrice m_m	Kompozit
1	0,83	2,59	1,76	0,32	0,68	0,32
2	1,17	3,93	2,76	0,3	0,7	0,35
3	1,5	5,03	3,53	0,3	0,7	0,43
4	3	10,13	7,13	0,23	0,7	0,38
5	16,64	16,88	0,23	0,99	0,014	0,52
6	2,33	5,32	2,99	0,44	0,56	0,53
7	3,5	8,42	4,92	0,42	0,58	0,56

3.5.2 Hodnocení elektromagnetického stínění výztuže

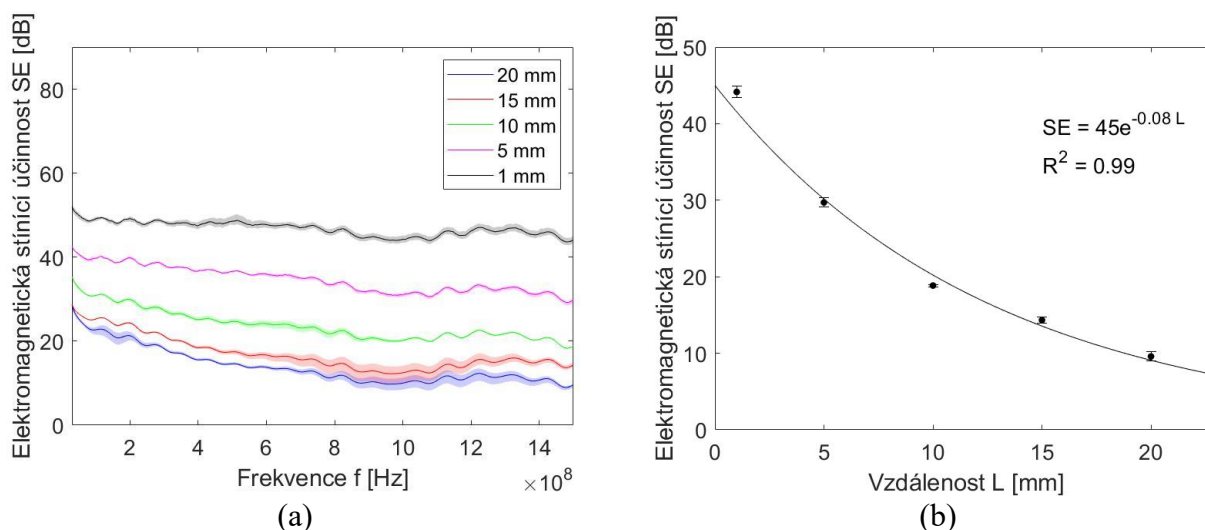
Cílem této podkapitoly je zjistit, jaký vliv má dostava osnovy a útku na výslednou stínící schopnost textilní výztuže, která bude sloužit k výrobě kompozitu. Dále bude prozkoumáno, jaký vliv má jemnost osnovní a útkové nitě na stínící schopnost při zachování ostatních parametrů výztuže konstantních.

V tabulce č. 10 jsou uvedeny průměrné, maximální a minimální hodnoty naměřeného elektromagnetického stínění vzorků uhlíkové výztuže pro frekvenci 1,5 GHz. Vzorky 1 až 5 jsou vzorky se stejnou jemností uhlíkového rovingu, ale různou dostavou. Vzorky 2, 6 a 7 jsou vzorky se stejnou dostavou, ale různou jemností uhlíkového rovingu, viz popis vzorků v tabulce č. 10.

Tabulka č.10: Průměrné, maximální a minimální hodnoty naměřeného elektromagnetického stínění vzorků uhlíkové výztuže pro frekvenci 1,5 GHz

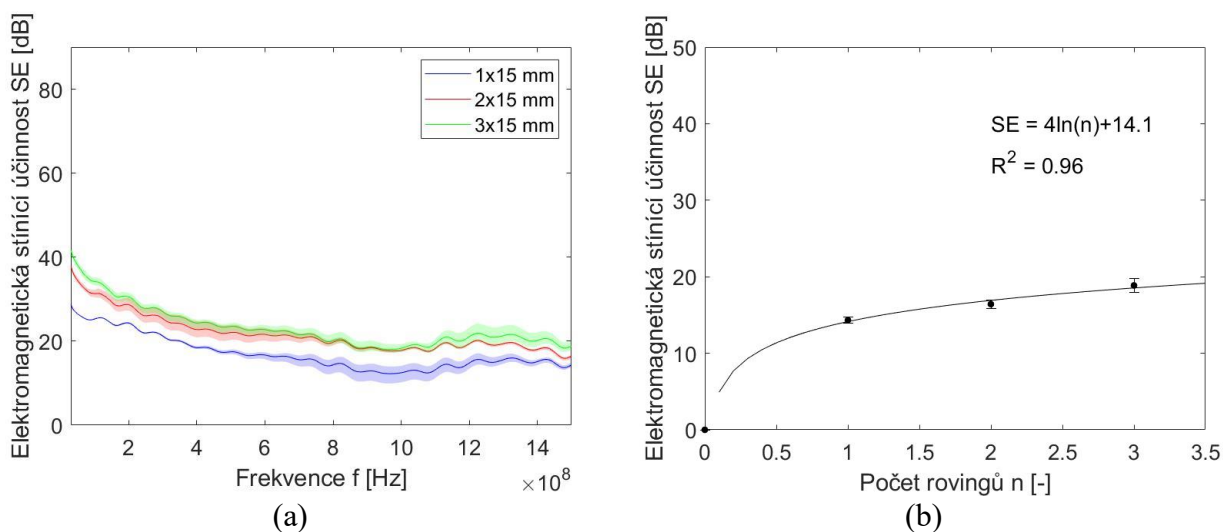
Vzorek č.	SE [dB] $f = 1,5 \text{ GHz}$		
	průměr	max	min
1	9,58	9,90	8,97
2	14,33	14,92	13,91
3	18,85	18,98	18,70
4	29,71	30,02	29,11
5	44,16	45,23	43,38
6	16,42	16,76	15,87
7	18,86	20,09	17,97

Na obrázku č. 13(a) je zobrazena závislost účinnosti elektromagnetického stínění (SE) na frekvenci. Zobrazeny jsou zde všechny vzorky, kde osnovu i útek tvoří jednoduchá nit (vzorky 1-5). Vzorky se liší dostavou osnovy a útku. U každého vzorku je zobrazena průměrná hodnota (střední křivka) a pro vizualizaci variability měřené veličiny je dále zobrazena minimální a maximální naměřená hodnota, která tvoří pás okolo průměrné hodnoty. Z grafu je zřejmé, že SE mírně klesá se stoupající frekvencí. Dále je možno pozorovat, že čím vyšší je rozteč osnovy a útku, tím nižší je SE. Tento jev je v souladu s teoretickým rozbohem. Čím je totiž více vodivých komponentů v ploše, tím k vyššímu stínícímu efektu dochází. Nejvyšší schopnosti odstínit elektromagnetické pole má vzorek č. 5, kde SE převyšuje 40 dB při frekvenci 1,5 GHz. Na obrázku č. 13(b) je zobrazena závislost elektromagnetické stínící účinnosti (pro frekvenci 1,5 GHz) na vzdálenosti mezi osnovními a útkovými nitěmi. V grafu jsou zobrazeny u průměrných hodnot také chybové úsečky, které představují minimální a maximální naměřené hodnoty. I zde je patrné, že SE klesá se zvyšující se vzdáleností mezi elektricky vodivými uhlíkovými rovingy. Závislost je možno popsat exponenciální funkcí, viz obr. 13(b).



Obrázek č. 13: (a) Závislost SE na frekvenci pro vzorky výztuží 1 – 5, (b) závislost SE (frekvence 1,5 GHz) na vzdálenosti mezi osovnými a útkovými nitěmi pro vzorky 1 – 5

Na obrázku 14(a) je zobrazeno frekvenčně závislé elektromagnetické stínění vzorků s totožnou dostavou osnovy a útku a různou jemností osnovy a útku. Jedná se o vzorky č.: 2, 6 a 7. U každého vzorku je zobrazena průměrná hodnota (střední křivka) a pro vizualizaci variability měřené veličiny je dále zobrazena minimální a maximální naměřená hodnota, která tvoří pás okolo průměrné hodnoty. I zde je vidět, že SE mírně klesá se vzrůstající frekvencí. Dále je pozorovatelné, že vzorek s jednoduchou nití dosahuje nejnižšího SE na celém frekvenčním pásmu. SE je cca 15 dB při frekvenci 1,5 GHz. Naopak nevyšší SE vykazuje vzorek s 3x sdruženou jednoduchou nití, a to cca 20 dB při frekvenci 1,5 GHz. Na obrázku 10(b) je zobrazena závislost SE při frekvenci 1,5 GHz na počtu rovingů, které tvoří osovní a útkovou nit. I zde jsou zobrazeny vedle průměrných hodnot také minima a maxima, a to pomocí chybových úseček. Je viditelné, že SE stoupá se zvyšujícím se počtem sdružených nití tvořících osnovu a útek tkaniny. Tuto křivku je možno aproximovat logaritmickou funkcí a plyne dále, že další zvyšování jemnosti útkové a osovní nitě nemá velký význam.



Obrázek č. 14: (a) Závislost SE na frekvenci pro vzorky výztuží 2, 6, 7, (b) závislost SE (frekvence 1.5 GHz) na počtu rovingů tvořící osnovní a útkovou nit pro vzorky 2, 6 a 7

3.5.3 Hodnocení elektromagnetického stínění kompozitu

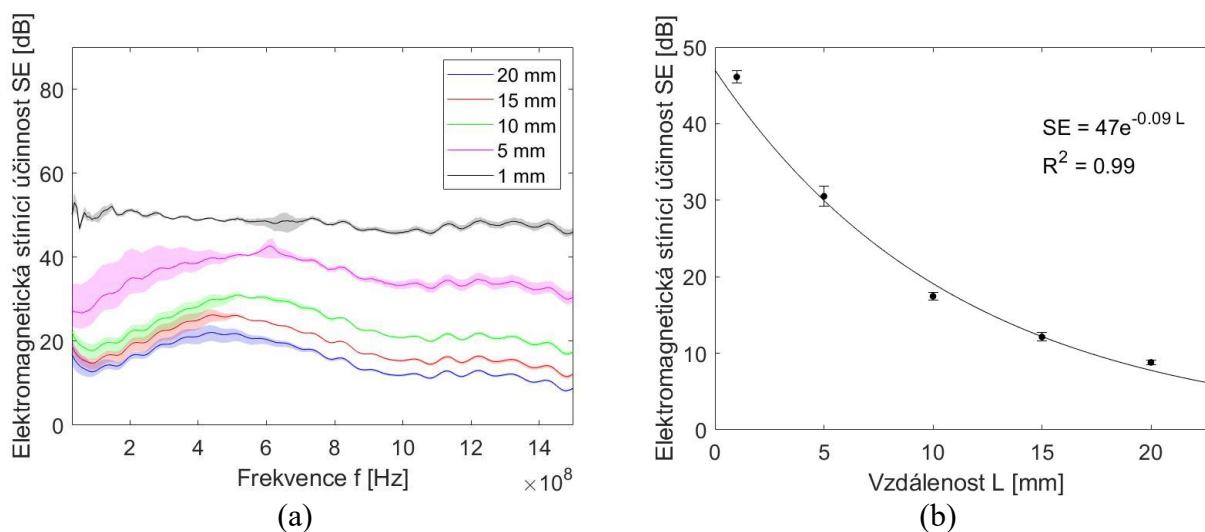
Cílem této podkapitoly je prozkoumat, jaký vliv má dostava osnovy a útku a také jemnost uhlíkového rovingu na elektromagnetickou stínící účinnost kompozitu sestávajícího se z elektricky vodivé uhlíkové výztuže a nevodivé matrice.

V tabulce č. 11 jsou uvedeny průměrné, maximální a minimální hodnoty naměřeného elektromagnetického stínění vzorků kompozitů pro frekvenci 1,5 GHz. Vzorky 1 až 5 jsou vzorky se stejnou jemností uhlíkového rovingu, ale různou dostavou. Vzorky 2, 6 a 7 jsou vzorky se stejnou dostavou, ale různou jemností uhlíkového rovingu, viz popis vzorků v tabulce č. 11.

Tabulka č.11: Průměrné, maximální a minimální hodnoty naměřeného elektromagnetického stínění vzorků kompozitů pro frekvenci 1,5 GHz

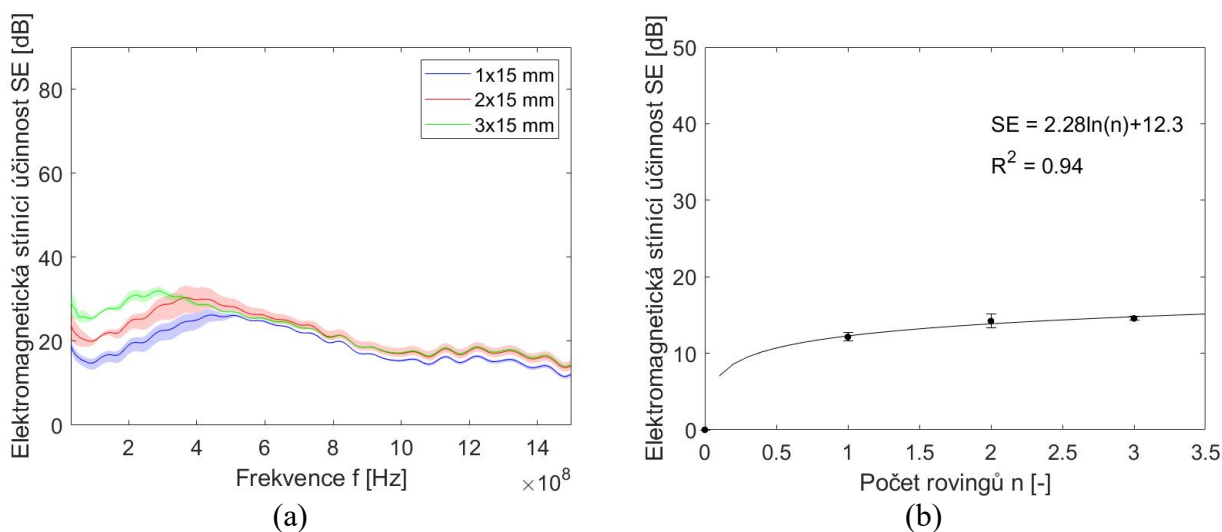
Vzorek č.	SE [dB] f=1,5 GHz		
	průměr	max	min
1	8,81	9,02	8,52
2	12,14	12,47	11,58
3	17,45	17,95	16,94
4	30,52	32,29	29,24
5	46,11	47,17	45,30
6	14,22	15,48	13,28
7	14,55	14,71	14,29

Na obrázku 15(a) je zobrazena závislost elektromagnetického stínění na frekvenci pro vzorky 1 – 5, tzn. vzorky lišící se dostavou osnovy a útku. I v tomto případě je pro každý vzorek zobrazena průměrná hodnota a také minimální a maximální hodnota, která vymezuje pás okolo průměrné hodnoty. Je možno si všimnout, že vzorek s nejvyšší dostavou má téměř konstantní SE na celém měřeném frekvenčním pásmu. Ostatní vzorky vykazují nejprve vzrůst SE se vzrůstající frekvencí (maximum je okolo 200 – 600 MHz). Následuje mírný pokles SE s dalším vzrůstem frekvence. Nejvyšší elektromagnetickou stínící schopnost má vzorek s nejvyšší dostavou výztuže ve formě tkaniny, což potvrzuje teoretické předpoklady. Tento vzorek má SE okolo hodnoty 50 dB pro celé frekvenční pásmo. Se snížením dostavy výztuže klesá postupně také stínící schopnost kompozitu. Na obrázku 15(b) je zobrazena závislost SE na vzdálenosti mezi uhlíkovými rovingy (čím vyšší je vzdálenost mezi rovingy, tím nižší je dostava, viz tabulka č. 11). Zobrazeny jsou zde průměrné hodnoty SE pro frekvenci 1.5 GHz spolu s chybovými úsečkami, které ukazují naměřená minima a maxima. Z této závislosti je patrné, že SE klesá se vzrůstající vzdáleností mezi uhlíkovými rovingy, tj. se snižující se dostavou osnovy a útku. SE cca 47 dB dosahuje vzorek s nejnižší vzdáleností mezi rovingy. Vzorek se vzdáleností mezi rovingy 10 mm vykazuje SE cca 19 dB. Nejnižší SE (cca 10 dB) má vzorek s nejnižší dostavou, tj. nevyšší vzdáleností mezi rovingy. Závislost je možno proložit exponenciální funkcí. Tato aproximační funkce může být využita pro predikci elektromagnetického stínění kompozitu při použití vzdálenosti mezi rovingy výztuže např. 25 mm, nebo 3 mm.



Obrázek č. 15: (a) Závislost SE na frekvenci pro vzorky kompozitů 1 – 5, (b) závislost SE (frekvence 1,5 GHz) na vzdálenosti mezi osnovními a útkovými nitěmi pro vzorky 1 – 5

Obrázek 16(a) zobrazuje závislost SE na frekvenci pro vzorky kompozitů 2, 6, 7, tj. pro vzorky, které mají konstantní dostavu, ale liší se jemností nitě (rovingu), která tvoří osnovní a útkovou soustavu výztuže ve formě tkaniny. Při průzkumu frekvenční závislosti je možno pozorovat vzrůst SE při zvyšování frekvence až do cca 200 – 500 MHz následovaný mírným poklesem SE s dalším zvyšováním frekvence. Zdá se, že čím vyšší je jemnost nitě, tím se posouvá frekvence globálního maxima k nižším hodnotám. Dále se zdá, že pro vyšší frekvence je elektromagnetické stínění porovnávaných vzorků téměř stejné. Rozdílnost je patrná zejména pro nižší frekvence, kde nevyšší stínící schopnost ($SE > 30$ dB pro $f = 200$ MHz) poskytuje vzorek s nejvyšší jemností rovingu (3x družený) a nejnižší stínící schopnost (SE cca 20 dB pro $f = 200$ MHz) poskytuje vzorek s nejjemnějším rovingem (jednoduchý). Na obrázku 16(b) je zobrazena závislost SE na počtu rovingů (vzorky kompozitů 2, 6, 7) pro frekvenci 1,5 GHz. Zobrazeny jsou opět průměrné hodnoty spolu s chybovými úsečkami, které vymezuje minimální a maximální hodnota. Z provedené vizualizace plyne, že se vzrůstajícím počtem rovingů roste SE výrazně cca do hodnoty 1.5 rovingu. Zdá se, že není statisticky významný rozdíl mezi stínící účinností vzorků 6 a 7 (vzorky s počtem rovingů 2 a 3) pro frekvenci 1,5 GHz, protože se chybové úsečky překrývají. Tuto závislost lze popsat pomocí logaritmické funkce, která vhodně popisuje ustalování SE s dalším zvýšením počtu rovingů.



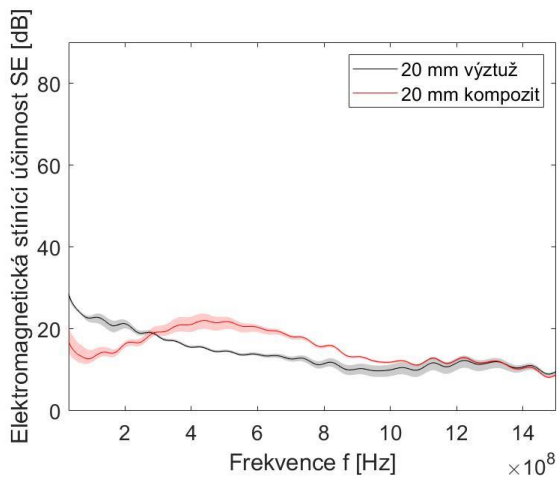
Obrázek č. 16: (a) Závislost SE na frekvenci pro vzorky kompozitů 2, 6, 7, (b) závislost SE (frekvence 1,5 GHz) na počtu rovingů tvořící osnovní a útkovou nit pro vzorky 2, 6 a 7

3.5.4 Porovnání stínící účinnosti kompozitu a výztuže

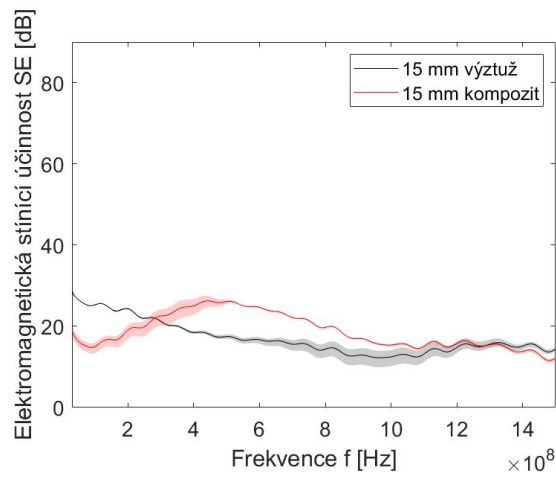
V předchozích podkapitolách byla prozkoumána elektromagnetická stínící účinnost jak samotné uhlíkové výztuže, tak kompozitu sestávajícího se z elektricky vodivé výztuže a elektricky nevodivé matrice. Cílem této podkapitoly je analyzovat, zda aplikace elektricky nevodivé matrice má statisticky významný vliv na elektromagnetické stínění kompozitu. Dalo by se předpokládat, že nevodivá matrice pronikne mezi vlákna výztuže, dojde ke snížení kontaktů, a díky celkově nižší elektrické vodivosti dojde ke snížení elektromagnetické stínící účinnosti kompozitu.

Na obrázku 17 je zobrazeno porovnání frekvenčně závislé elektromagnetické stínící účinnosti pro všechny studované vzorky. Porovnáváno je SE výztuže a SE kompozitu se stejnými parametry výztuže. Vždy jsou zobrazeny průměrné hodnoty spolu s pásem vymezeným minimálními a maximálními hodnotami. Ze zobrazených frekvenčních závislostí je patrné, že se aplikací matrice mírně změnil tvar závislosti. Zatímco SE samotné výztuže mírně klesá se vzrůstem frekvence, SE kompozitu téměř u všech vzorků nejprve roste (cca do frekvence 200 – 500 MHz) a poté mírně klesá. Jedinou výjimku tvoří vzorek 5 s nejvyšší dostavou. V tomto případě má jak výztuž, tak kompozit téměř konstantní SE na frekvenci. Významný rozdíl mezi SE výztuže a kompozitu je ve frekvenční oblasti 30 MHz – 300 MHz. V této frekvenční oblasti má u všech vzorků (mimo vzorku 5) vyšší SE samotná výztuž, přičemž rozdíl mezi SE výztuže a kompozitu je až cca 15 dB. Další rozdíl je pozorovatelný v oblasti cca 300 MHz – 1 GHz. V tomto frekvenčním rozmezí vykazuje vyšší SE kompozit, a to průměrně cca o 10 dB v porovnání se samotnou uhlíkovou výztuží (opět vyjma vzorku

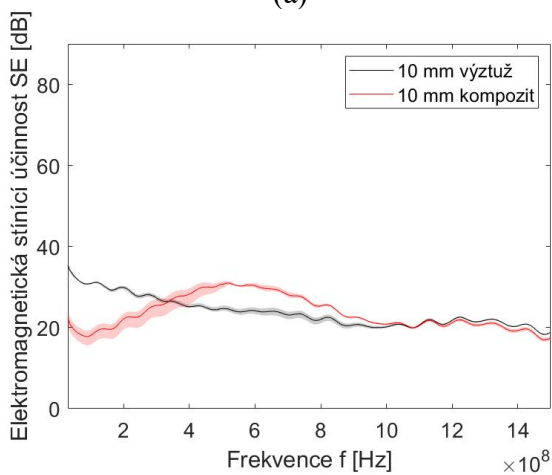
5). Pro frekvence vyšší jak 1 GHz je elektromagnetická stínící účinnost výztuže i kompozitu pro všechny vzorky téměř stejná.



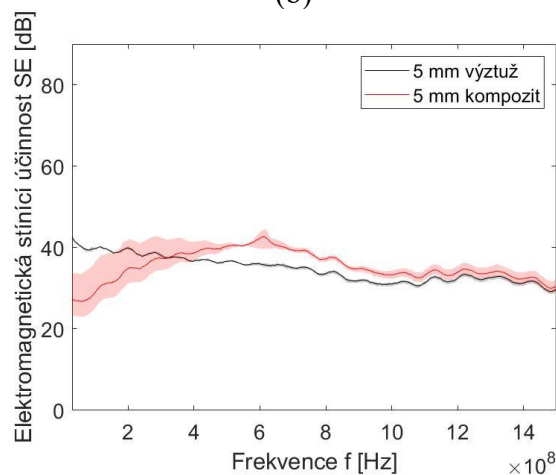
(a)



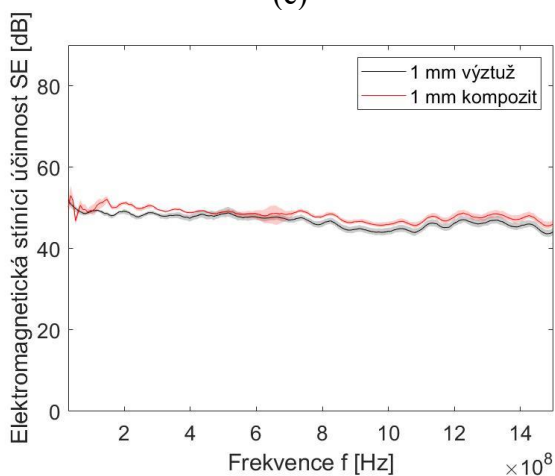
(b)



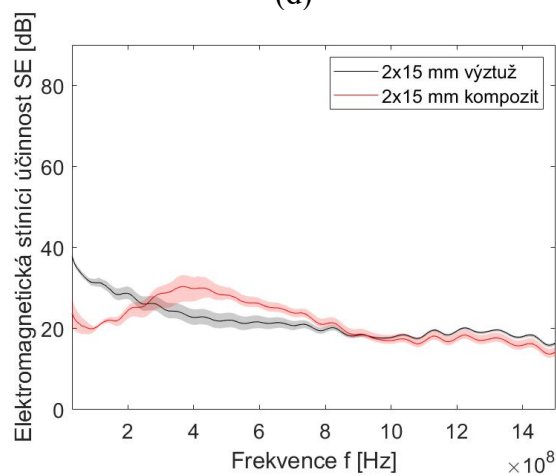
(c)



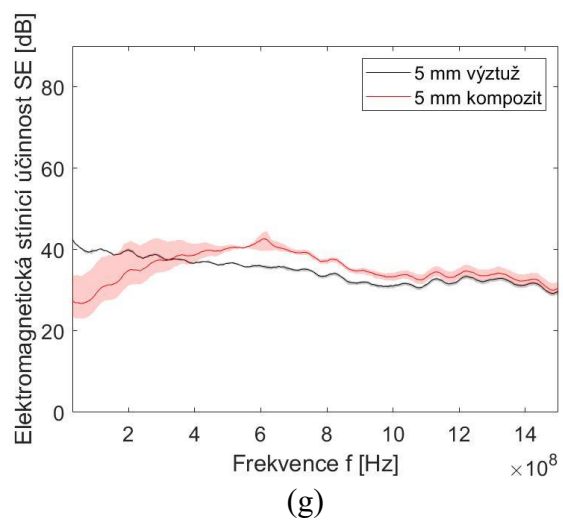
(d)



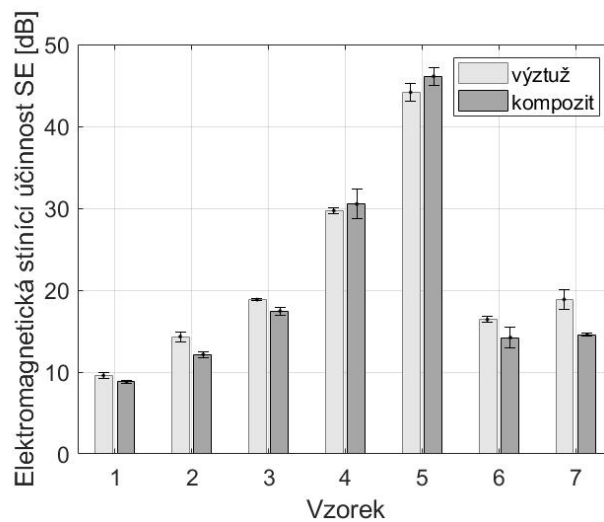
(e)



(f)



Obrázek č. 17: Závislost SE na frekvenci pro vzorky kompozitů a výztuže: (a) vzorek 1, (b) vzorek 2, (c) vzorek 3, (d) vzorek 4, (e) vzorek 5, (f) vzorek 6, (g) vzorek 7



Obrázek č. 18: Porovnání elektromagnetické stínící účinnosti uhlíkové výztuže a kompozitu obsahující uhlíkovou výztuž pro frekvenci 1,5 GHz

Pro přehlednější vyhodnocení rozdílu SE mezi samotnou výztuží a kompozitem sestávajícím z výztuže a matrice je na obrázku č. 18 zobrazeno porovnání průměrných hodnot spolu s chybovými úsečkami představující naměřená minima a maxima. Z uvedeného se zdá, že pro vzorek 1, 2, 3, 6 a 7 má vyšší SE výztuž v porovnání s kompozitem. Dále se zdá, že mezi SE výztuže a kompozitu vzorků 4 a 5 není rozdíl (chybové úsečky se překrývají). Aby bylo možno vyhodnotit statistickou významnost vlivu aplikované matrice, bylo by třeba připravit vzorky vyšších rozměrů a zvýšit počet opakovaných měření. Následně by bylo vhodné otestovat shodu středních hodnot.

3.5.5 Hodnocení mechanických vlastností kompozitu

V rámci experimentální práce bylo zjištěno, že samotná uhlíková výztuž je poměrně nestabilní a je nutno ji zpevnit aplikací matrice. Cílem této podkapitoly je provést průzkum základních mechanických vlastností připravených kompozitních struktur. Pozornost byla zaměřena na pevnost a tažnost kompozitu.

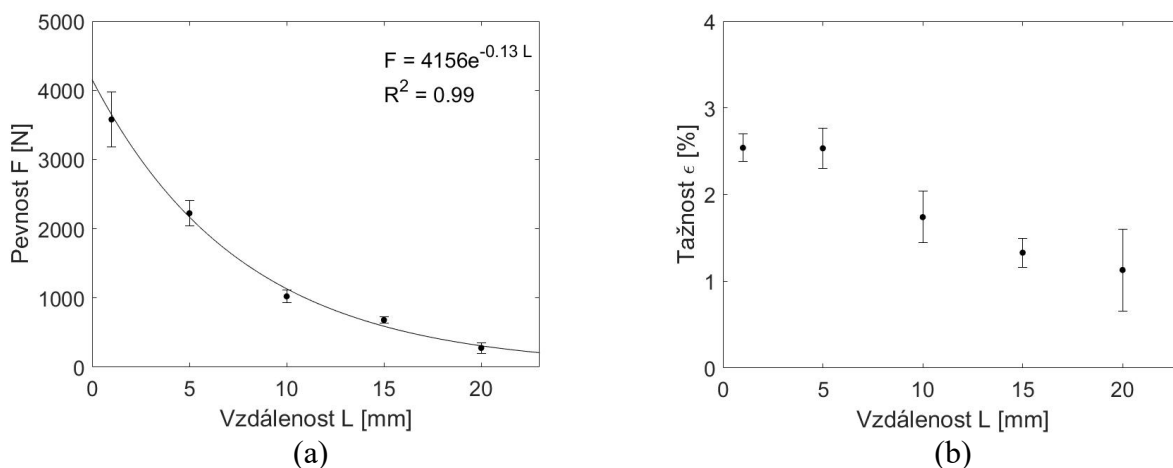
Výsledky mechanické zkoušky jsou pro lepší přehlednost zobrazeny v tabulce č. 12. Charakteristika vzorků je uvedena v tabulce č. 7. Zobrazena je zde průměrná hodnota pro pevnost a tažnost a 95 % interval spolehlivosti průměrné hodnoty.

Tabulka č. 12: Hodnocení mechanických vlastností kompozitu

Vzorek č.	F [N]	IS [N]	ϵ [%]	IS [%]
1	278,22	74,84	1,13	0,47
2	682,04	44,33	1,33	0,17
3	1022,78	89,74	1,74	0,3
4	2223,57	185,04	2,534	0,23
5	3579,64	394,78	2,54	0,16
6	822,98	159,16	1,18	0,25
7	1599,28	167,41	1,56	0,11

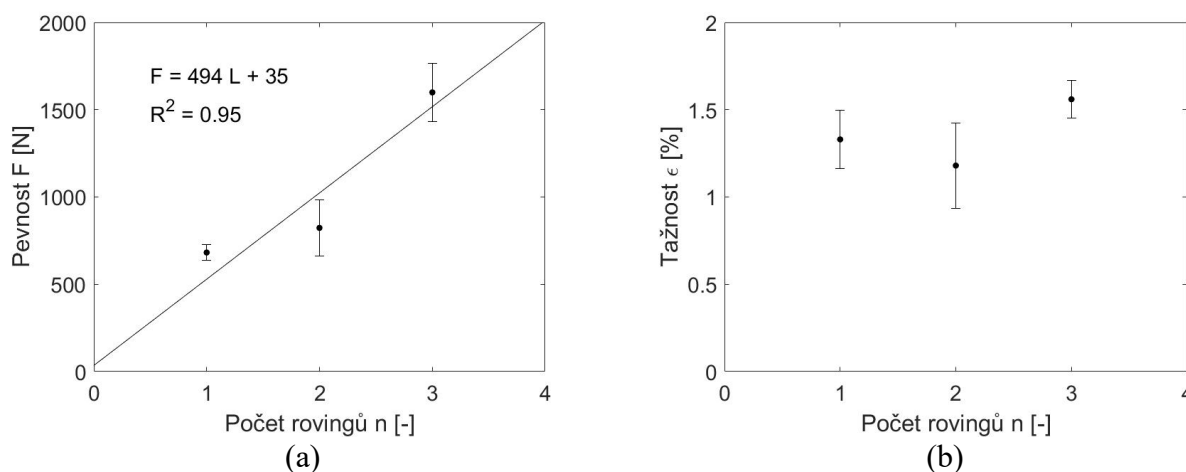
Z tabulky č. 12 je možno vyčíst, že nejvyšší pevnost má vzorek č. 5. Jedná se o vzorek s nejvyšší dostavou osnovy a útku, a to 100 dm^{-1} . Stejný vzorek má i nejvyšší tažnost. Nejnížší pevnost a tažnost má vzorek č. 1. Zajímavé je pozorovat, že u sady vzorků s rozdílnou jemností při konstantní hustotě je rozdíl v pružnosti na rozdíl od pevnosti téměř zanedbatelný.

Na obrázku 19(a) je zobrazena závislost pevnosti na vzdálenosti mezi rovingy, tedy na jemnosti. Zobrazeny jsou průměrné hodnoty spolu s 95 % intervaly spolehlivosti průměrné hodnoty. Z obrázku je zřejmé, že čím vyšší je vzdálenost mezi rovingy v osnově a útku (tedy čím nižší je dostava osnovy a útku), tím nižší je pevnost kompozitu. Tento jev je zapříčiněn tím, že s vyšší dostavou se účastní vyšší počet uhlíkových vláken k přenášení síly a vzrůstá tedy pevnost vzorku. Vzorek s nevyšší dostavou má pevnost cca 3 kN. Vzorek s nejnižší dostavou má pevnost cca 280 N. Závislost je možno popsat pomocí exponenciální funkce. Na obrázku 19(b) je k vidění závislost tažnosti na vzdálenosti mezi uhlíkovými rovingy tvořící osnovu a útek výztuže kompozitu. I zde jsou zobrazeny průměrné hodnoty spolu s 95% intervaly spolehlivosti průměrné hodnoty. Tažnost všech vzorků se pohybuje v rozmezí 1 – 2,5 %. Z obrázku je vidět, že tažnost klesá se vzrůstající vzdáleností (tedy klesající dostavou). Tento jev je pravděpodobně závislý na množství vazných bodů, které umožňují prodloužení. Mezi vzorky 1, 2 a 3 není statisticky významný rozdíl – intervaly spolehlivosti se překrývají.



Obrázek č. 19: (a) Závislost pevnosti na vzdálenosti a (b) závislost tažnosti na vzdálenosti mezi rovingy pro vzorky 1 až 5

Na obrázku 20(a) je zobrazena závislost pevnosti na počtu rovingů pro vzorky 2, 6 a 7. Zobrazeny jsou průměrné hodnoty spolu s 95 % intervaly spolehlivosti. Patrný je vzrůstající trend pevnosti se zvyšujícím se počtem rovingů tvořících osnovní a útkové nitě. Závislost je aproximována přímkou. Její platnost je však omezena pouze na zkoumanou oblast počtu rovingů. Na obrázku 20(b) je zobrazena závislost tažnosti na počtu rovingů. V tomto případě nelze pozorovat jednoznačný trend. Intervaly spolehlivosti se překrývají, tzn. mezi vzorky není statisticky významný rozdíl při studiu jejich tažnosti.



Obrázek č. 20: (a) závislost pevnosti na počtu rovingů (b) závislost tažnosti na počtu rovingů pro vzorky 2, 6 a 7

4. Závěr

Motivací k psaní této bakalářské práce bylo prohloubit poznatky v oblasti přípravy kompozit vyztužených uhlíkovými vlákny, vyvíjených za účelem odstínění vysokofrekvenčního elektromagnetického pole. V posledních desetiletích se výrazně zvýšila úroveň tzv. elektromagnetického smogu, a to zejména v souvislosti s vývojem nových vysokofrekvenčních elektronických systémů a telekomunikačních zařízení. Tento jev zapříčinil aktivní vývoj nových a účinných řešení pro stínění rušivého elektromagnetického záření v různých aplikacích.

Teoretická část práce seznamuje čtenáře s problematikou elektromagnetických vln. Dále se teoretická část zabývá materiály vhodnými pro stínění elektrického pole, popisuje vlákna se zvýšenou elektrickou vodivostí, uhlíkatá vlákna, textilie se zvýšenou vodivostí a kompozity s textilní výztuží.

Experimentální část práce pojednává o návrhu struktury uhlíkové výztuže, přípravě kompozitů s uhlíkovou výztuží a o charakterizaci jak samotné výztuže, tak vytvořených kompozitů, které jsou vyvíjeny zejména s cílem odstínit elektromagnetické pole. V rámci experimentu bylo studováno sedm výztuží ve formě tkaniny plátňové vazby s různou dostavou osnovy a útku za použití uhlíkového rovingu s různou jemností. Z připravených výztuží byly vytvořeny kompozitní struktury s využitím laminační pryskyřice L285 a tvrdidla 500MGS. U těchto vytvořených kompozitních materiálů byla měřena schopnost odstínit elektromagnetické pole dle normy ASTM 4935-10 [24], která je určená pro hodnocení plošných materiálů, dále pak měření tloušťky provedené na tloušťkoměru dle normy ČSN EN ISO 5084 [23], měření hmotnosti na digitální váze, díky kterému bylo možné vypočítat hmotnostní podíly vláken a matrice (pryskyřice) a v neposlední řadě byly měřeny mechanické vlastnosti za použití trhačky Tiratest T2400, dle normy ČSN EN 2561 [25].

Při vypracování bakalářské práce bylo stanoveno pět cílů.

Prvním cílem bylo zjistit, zda má dostava osnovy a útku uhlíkové tkaniny statisticky významný vliv na elektromagnetickou stínící účinnost výztuže/ kompozitu. Nejvyšší schopnosti odstínit elektromagnetické pole má vzorek č. 5, jedná se o vzorek s nejvyšší dostavou osnovy a útku, a to 100 dm^{-1} . Celkově nejvyšší stínící účinnosti bylo dosaženo u vzorku kompozitu s nejvyšší dostavou výztuže, a to 45 dB při frekvenci 1,5 GHz.

Bylo zjištěno, že zvyšování dostavy má pozitivní vliv na elektromagnetickou stínící schopnost jak samotné výztuže, tak i kompozitu. Jak u výztuže, tak u kompozitu lze závislost elektromagnetické stínící schopnosti na vzdálenosti mezi rovingy popsat pomocí exponenciální funkce. Tím byla

potvrzena hypotéza, že čím vyšší dostava osnovy a útku bude, tím vyšší bude elektromagnetické stínění výztuže/ kompozitu.

Dalším úkolem bylo prozkoumat, zda má jemnost uhlíkového rovingu statisticky významný vliv na elektromagnetickou stínící účinnost výztuže/ kompozitu. Zde byla na začátku práce vyslovena hypotéza, že čím vyšší jemnost rovingu bude, tím vyšší je elektromagnetické stínění výztuže /kompozitu. Po analýze výsledků bylo zjištěno, že SE stoupá se zvyšujícím se počtem sdružených nití tvořících osnovu a útek tkaniny. V případě použití jednoduché nitě má vzorek výztuže elektromagnetickou stínící schopnost cca 14 dB. V případě použití trojmo sdružené nitě má vzorek výztuže schopnost odstínit elektromagnetické pole cca 19 dB. V případě kompozitu je tento vzrůst cca 2,5 dB. Závislost SE na počtu sdružených nití lze v obou případech možno aproximovat logaritmickou funkcí a z toho vyplývá, že další zvyšování jemnosti útkové a osnovní nitě nemá velký význam a tím nemůžeme hypotézu zcela potvrdit ani vyvrátit.

Třetím cílem bylo odhalit, zda má aplikace nevodivé matrice na uhlíkovou výztuž statisticky významný vliv na elektromagnetickou stínící účinnost kompozitu. Z výsledků porovnání elektromagnetické stínící účinnosti uhlíkové výztuže a kompozitu pro frekvenci 1,5 GHz se zdá, že pro vzorek 1, 2, 3, 6 a 7 má vyšší SE výztuž v porovnání s kompozitem. Po aplikaci nevodivé matrice dochází k poklesu SE kompozitu průměrně cca o necelé 2 dB v porovnání se samotnou výztuží. Dále se zdá, že mezi SE při frekvenci 1,5 GHz výztuže a kompozitu vzorků 4 a 5 není rozdíl (chybové úsečky se překrývají). V hypotéze bylo předpokládáno, že aplikace nevodivé matrice na uhlíkovou výztuž statisticky významně sníží elektromagnetické stínění kompozitu v porovnání se samotnou výztuží. Aby však bylo možno vyhodnotit statistickou významnost vlivu aplikované matrice, a hypotézu potvrdit, bylo by třeba připravit vzorky vyšších rozměrů a zvýšit počet opakovaných měření. Následně by bylo vhodné otestovat shodu středních hodnot. I v tomto případě tedy nelze hypotézu zcela potvrdit, či vyvrátit.

Dalším cílem bylo zjistit, zda má dostava osnovy a útku uhlíkové tkaniny statisticky významný vliv na pevnost kompozitu. Bylo předpokládáno, že čím vyšší dostava osnovy a útku bude, tím vyšší bude pevnost kompozitu. Tento jev je zapříčiněn tím, že s vyšší dostavou se účastní vyšší počet uhlíkových vláken k přenášení síly a vzrůstá tedy pevnost vzorku. Při měření má vzorek s nevyšší dostavou pevnost cca 3 kN. Vzorek s nejnižší dostavou má pevnost cca 280 N. Závislost pevnosti na vzdálenosti mezi uhlíkovými rovingy lze popsat exponenciální funkcí, a tím je možno hypotézu potvrdit.

Posledním úkolem bylo objevit, zda má jemnost uhlíkového rovingu statisticky významný vliv na pevnost kompozitu. Z výsledků je patrný lineární vzrůstající trend pevnosti se zvyšujícím se počtem rovingů tvořících osnovní a útkové nitě. Tím je možno potvrdit pátou hypotézu, že čím vyšší jemnost rovingu bude, tím vyšší bude pevnost kompozitu.

Lze shrnout, že se se podařilo vhodně navrhnout, vytvořit a následně charakterizovat kompozitní vzorky tak, aby byly vyslovené hypotézy prozkoumány a splnit tak všechny vytyčené cíle této bakalářské práce.

Získané závislosti je možno použít pro návrh elektromagnetické stínící přepážky s požadovanou úrovní odstínění elektromagnetického pole dle konkrétního účelu použití a také pro predikci SE dle základních parametrů výztuže. Mezi výhody studovaných kompozitů patří velmi nízká hmotnost, flexibilita, díky porézní struktuře také propustnost pro vzduch a vodní páry, a to zejména v porovnání s tradičními kovovými deskami. Díky použití uhlíkových vláken je možné také předpokládat, že k elektromagnetickému stínění dochází zejména díky absorpci elektromagnetických vln, což je také žádoucí pro spoustu aplikací. Nevýhodou studovaných kompozitních materiálů je, že čím větší množství uhlíku ve struktuře bude, tím bude vyšší cena, vyšší ohybová tuhost, a také menší propustnost pro vzduch a páry. Je tedy nutné volit množství uhlíku podle požadované stínící účinnosti dle konkrétní aplikace.

Na závěr práce je možno zmínit využití vyvinutých kompozitních materiálů s elektricky vodivou výztuží vytvořenou uhlíkovými vlákny. Možné je využití v letectví například pro elektromagnetické odstínění trupu letadla, k výrobě obalů citlivých elektronických přístrojů ve zdravotnictví, ve stavebnictví do zdí pro odstínění vnitřního prostoru atd.

5. Literatura

1. MISTIK, S.I., SANCAK, E., USTA, I., et. al. Investigation of electromagnetic shielding properties of boron and carbon fiber woven fabrics and their polymer composites. In proceedings of: *RMUTP International Conference: Textile & Fashion*, 2012.
2. CHUNG, D.D.L., *Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. Carbon*, 39, 2001, pp. 279-285
3. JOU, W.S., A novel structure of woven continuous-carbon fiber composites with high electromagnetic shielding. *Journal of Electronic Materials* 2004, 33(3): 162-170.
4. SEIDLOVÁ, M., *Vliv údržby elektricky vodivé textilie praním na její funkčnost a stálost potisku*. Liberec, 2019. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní.
5. MILITKÝ, J., *Textilní vlákna: klasická a speciální*. Liberec: Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-7372-844-1.
6. XUE, P., TAO, X., LEUNG, M., ZHANG, H., *Wearable electronics and photonics: Electromechanical properties of conductive fibres, yarns and fabrics*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005. ISBN 1 85573 605 5.
7. MAC, T., HOUIS, S., GRIES, T., *Metal fibers*. In: *Technical Textiles*. 2004, vol. 47, no. 1, s. 11-24.
8. KRCMA, R., *Manual of nonwovens*. Manchester: The Textile Trade Press, 1971. 325 s.
9. ŠAFÁŘOVÁ, V., *Textilní materiály se zvýšenou elektrickou vodivostí*. Výzkumná zpráva. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010.
10. GRÉGR, J., *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken*. Zpráva pro Výzkumné centrum „Textil“ LN00B090. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014.
11. MORGAN, P., *Carbon fibers and their composites*. USA: CRC Press, 2005. 1133 s. ISBN 0-8247-0983-7.
12. DONNET, J.B, et al. *Carbon fibers*. New York: Marcel Dekker, 1998. 567 s. ISBN 0-8247-0172-0.

13. KRYVENKOVÁ, T., *Elektromechanické vlastnosti textilních útvarů se zvýšenou elektrickou vodivostí*. Liberec, 2012. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní.
14. ORTH, M., POST, E.R. Smart Fabric, or Washable Computing. In Digest of Papers of the *First IEEE International Symposium on Wearable Computers*. Massachusetts: Cambridge, 1997. s. 167-168.
15. TUNÁKOVÁ, V., *Textilie se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému smogu*. Liberec, 2014. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní.
16. BAREŠ R., *Kompozitní materiály*. Praha: SNLT, , 1988. 325 s.
17. DAĐOUREK, K., *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita, 2007. 114 s.
18. HOVORKOVÁ, M., *Dynamicko – mechanická analýza kompozitů s anorganickou výztuží*. Liberec, 2010. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní.
19. KOVAČIČ, V., *Zkoušení textilií I*, skriptu TU v Liberci, 2002 Dostupné z : http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20080228/ZKB_1_dil.pdf
20. AKSA ACRYLIC CHEMICAL COMPANY. [online katalogový list]. MDS AK-CF-T.09.001.rev1 ©2011 [cit.17.12.2020]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/DevTools/Arduino/MCP2551.pdf>
21. HAVEL COMPOSITES. [online katalogový list] *Tužidlo 500 MGS*. © 2018-2020 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/produkty/tuzidlo-500-mgs-61-2657>
22. EPIKOTE RESIN MGS LR285. [online katalogový list] 2010 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: www.swiss-composite.ch/pdf/t-Epoxyd-Harz-L-285-LF-e.pdf
23. ČSN EN ISO 5084. *Textilie – Zjišťování tloušťky textilií a textilních výrobků*, 1998. Třídící znak 800844.
24. ASTM D4935-10. *Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org

25. ČSN EN 2561. *Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity - Zkouška tahem rovnoběžně se směrem vláken*, 1998. Třídící znak 317710.
26. VRBKA, J., *Mechanika kompozitů*. Brno, 2008. Učební text. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Grafické znázornění elektromagnetického stínění EMI [1].....	14
Obrázek č. 2: Povrchové rezistivity textilních výrobků [10].....	16
Obrázek č. 3: Vzhled povrchu uhlíkových vláken – SEM snímek, AFM snímek a molekulární model [10].....	21
Obrázek č. 4: Mikrostruktura uhlíkových vláken: a) vlákno z mezifázových smol, b) vlákno z PAN [9].....	21
Obrázek č. 5: Znázornění synergického efektu v kompozitu [17].....	25
Obrázek č. 6: Modul pružnosti textilií, charakteristický bod P na tahové křivce textilie pro určení počátečního tangentského modulu [19].....	28
Obrázek č. 7: Snímek uhlíkového vlákna pořízený optickým mikroskopem.....	30
Obrázek č. 8: Snímek uhlíkového vlákna pořízený konfokálním mikroskopem.....	30
Obrázek č. 9: (a) – (e) vzorky s konstantní jemností osnovní a útkové nitě a různou dostavou osnovy a útku, (f), (g) – vzorky s konstantní dostavou osnovních a útkových nití a různou jemností osnovní a útkové nitě.....	34
Obrázek č. 10: (a) – (g) – vzorky 1 – 7, viz popis vzorků v tabulce č. 7.....	36
Obrázek č. 11: Zařízení k měření SE.....	38
Obrázek č. 12: Trhačka Tiratest T2400.....	38
Obrázek č. 13: (a) Závislost SE na frekvenci pro vzorky výztuží 1 – 5, (b) závislost SE (frekvence 1,5 GHz) na vzdálenosti mezi osnovními a útkovými nitěmi pro vzorky 1 – 5.....	42
Obrázek č. 14: (a) Závislost SE na frekvenci pro vzorky výztuží 2, 6, 7, (b) závislost SE (frekvence 1,5 GHz) na počtu rovingů tvořící osnovní a útkovou nit pro vzorky 2, 6 a 7.....	42
Obrázek č. 15: (a) Závislost SE na frekvenci pro vzorky kompozitů 1–5, (b) závislost SE (frekvence 1,5 GHz) na vzdálenosti mezi osnovními a útkovými nitěmi pro vzorky 1–5.....	45

Obrázek č. 16: (a) Závislost SE na frekvenci pro vzorky kompozitů 2, 6, 7, (b) závislost SE (frekvence 1,5 GHz) na počtu rovingů tvořící osnovní a útkovou nit pro vzorky 2, 6 a 7.....	46
Obrázek č. 17: Závislost SE na frekvenci pro vzorky kompozitů a výztuže: (a) vzorek 1, (b) vzorek 2, (c) vzorek 3, (d) vzorek 4, (e) vzorek 5, (f) vzorek 6, (g) vzorek 7.....	48
Obrázek č. 18: Porovnání elektromagnetické stínící účinnosti uhlíkové výztuže a kompozitu obsahující uhlíkovou výztuž pro frekvenci 1,5 GHz.....	49
Obrázek č. 19: (a) Závislost pevnosti na vzdálenosti a (b) závislost tažnosti na vzdálenosti mezi rovingy pro vzorky 1 až 5.....	51
Obrázek č. 20: (a) závislost pevnosti na počtu rovingů (b) závislost tažnosti na počtu rovingů pro vzorky 2, 6 a 7.....	51

Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Specifický elektrický odpor ρ [Ωm] při 65 % relativní vlhkosti vzduchu a 20 °C teplotě vzduchu [13].....	16
Tabulka č. 2: Vlastnosti diamantu, grafitu a fullerenu C60 [10].....	19
Tabulka č. 3: Porovnávání vlastností vybraných uhlíkových vláken [13].....	22
Tabulka č.4: Ultimatívni mechanické vlastnosti vláken [5].....	27
Tabulka č. 5: Fyzikální a chemické vlastnosti uhlíkatého rovingu A-35 [20].....	31
Tabulka č. 6: Specifikace laminační pryskyřice L 285 a tužidla 500 [21].....	32
Tabulka č. 7: Základní charakteristiky tkaných výztuží.....	33
Tabulka č. 8: Specifikace pryskyřice a tvrdidla od výrobce při 25 °C [22].....	35
Tabulka č. 9: Hodnocení tloušťky a hmotnosti kompozitu.....	40
Tabulka č.10: Průměrné, maximální a minimální hodnoty naměřeného elektromagnetického stínění vzorků uhlíkové výztuže pro frekvenci 1,5 GHz.....	41
Tabulka č.11: Průměrné, maximální a minimální hodnoty naměřeného elektromagnetického stínění vzorků kompozitů pro frekvenci 1,5 GHz.....	44
Tabulka č. 12: Hodnocení mechanických vlastností kompozitu.....	50