

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Elektroizolační reaktoplastické kompozity s konvenční
vláknovou výztuží doplněnou nanovláknny**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ondřej MUSIL**
Osobní číslo: **E18B0081P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Elektroizolační reaktplastické kompozity s konvenční vláknovou výztuží doplněnou nanovlákný**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte teoretický úvod k problematice kompozitů s reaktplastickou maticí a s vláknovou výztuží. Uvedte přehled využívaných reaktplastů a vláknových struktur (tvořených různými anorganickými i organickými vlákný).
2. Definujte oblasti využívání daných kompozitů v elektrotechnice primárně ve funkci elektroizolačních materiálů a jejich specifika (vhodnost použití odlišných typů vláken a odlišných typu reaktplastů pro určité aplikace).
3. Ve stručnosti představte možnosti úpravy konvenčních kompozitů s vláknovou výztuží pomocí nanotechnologií zakomponování další složky tvořené nanovlákný.
4. Navrhněte dle získaných teoretických informací optimální postup přípravy konvenčního elektroizolačního vrstveného kompozitu z prepregů bez a s vrstvou z nanovláken.
5. Proveďte měření vybraných dielektrických či mechanických parametrů dokazující vliv zakomponování vrstvy z nanovláken na užité vlastnosti.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. J. Mleziva a J. Šňupárek. Polymery: Výroba struktura, vlastnosti a použití, 2. přepracované vyd., Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
2. G. W. Ehrenstein. Polymerní kompozitní materiály, 1. vyd. V ČR, Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
3. A. Barhoum, M. Bechelany, A. S. H. Makhlof. Handbook of Nanofibers, Cham: Springer, 2019. ISBN 978-3-319-53654-5.
4. M. O. Seydibeyoglu, A. K. Mohanty, M. Misra. Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites, 1. vyd., Cambridge: Elsevier (Woodhead Publishing), 2017. ISBN 978-0-08-101871-2.
5. elektronické informační zdroje (SUMMON vyhledávací nástroj knihovny ZČU, případně přímo Science Direct, IEEE Explore atd.)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Kadlec, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan





Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou reaktoplastických kompozitních materiálů s vláknovou výztuží a jejich užitných vlastností pro elektrotechniku. Konkrétně se tato práce věnuje jejich použití jako elektroizolačních materiálů. Bakalářská práce se dělí do několika tematických celků, kdy v první části se zabývá konvenčně používanými druhy reaktoplastů, vláken a vláknových struktur a jejich aplikaci v elektrotechnice jako elektroizolačních prvků. V další části se tato práce zabývá experimentální úpravou elektroizolačních vlastností těchto kompozitních materiálů zakomponováním nanovláken do struktury materiálu. V závěru se tato práce zabývá výsledky měření vybraných dielektrických vlastností vyrobených kompozitních materiálů a zhodnocení vlivu přidání nanovláken na měřené elektroizolační vlastnosti.

Klíčová slova

Nanovláknna, kompozity, reaktoplasty, elektroizolační vlastnosti, vláknová výztuž, pojivo, vlákna, nanospider, elektrická pevnost, vnitřní rezistivita, povrchová rezistivita, nanokompozit, polyamid, skleněná vlákna, elektrická izolace

Abstract

This bachelor's thesis focuses on thermoset composite materials with fibre reinforcement and its useful properties for electrical engineering. More specifically its properties for usage in electrical insulations. This thesis is divided into several chapters, where the first one focuses on the conventionally used types of thermoset resins, fibres and fibre structures and their application in electrical engineering as electrical insulating elements. The following part of this thesis focuses on the experimental modification of electrical insulating properties of these materials by incorporating nanofibers into the structure of the material. This thesis concludes with results of the measurement of selected dielectric properties of the produced material and assesses the influence on the electrical insulating properties.

Key words

Nanofibers, composites, thermoplastic, electrical insulation, fibre reinforcement, matrix, fibres, nanospider, dielectric strength, volume resistivity, surface resistivity, nanocomposite, polyamide, glass fibre, thermosets

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.



.....
podpis

V Plzni dne 24.5.2021

Ondřej Musil

Poděkování

Rád bych zde vyslovil poděkování vedoucímu této bakalářské práce Ing. Petru Kadlecovi Ph.D. za výborné vedení, odborné konzultace, motivaci a obrovskou pomoc při realizaci této práce. Děkuji také své rodině, která mě při studiu na vysoké škole vždy plně podporovala.

Tato bakalářská/diplomová práce vznikla s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu OP VVV Elektrotechnické technologie s vysokým podílem vestavěné inteligence, číslo CZ.02.1.01/0.0/0.0/18_069/0009855. Tato práce byla dále podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2021-003 „Materiály, technologie a diagnostika v elektrotechnice“.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY PRO ELEKTROTECHNIKU	12
1.1 DRUHY PRYSKYŘIC	13
1.1.1 Epoxidové pryskyřice.....	14
1.1.2 Polyesterové pryskyřice.....	14
1.1.3 Vinylesterové pryskyřice.....	15
1.1.4 Fenolické pryskyřice.....	15
1.1.5 Polyuretanové pryskyřice	16
1.2 DRUHY VLÁKEN	16
1.2.1 Skleněná vlákna	17
1.2.2 Keramická vlákna.....	17
1.2.3 Uhlíková vlákna.....	18
1.2.4 Polyamidová vlákna	18
1.2.5 Aramidová vlákna.....	19
1.2.6 Polyethylenová vlákna.....	20
1.3 VLÁKNOVÉ STRUKTURY	21
1.4 NANOVLÁKNA.....	24
1.4.1 Electrospinning.....	25
1.4.2 Tažení vláken z roztoku.....	28
1.4.3 Výroba pomocí šablony	29
1.4.4 Laserová ablace.....	30
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	31
2.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	31
2.1.1 Příprava referenčních vzorků.....	32
2.1.2 Příprava vzorků s nanovláknny	35
2.2 MĚŘENÍ VYBRANÝCH ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ.....	40
2.2.1 Měření vnitřní a povrchové rezistivity	40
2.2.2 Měření elektrické pevnosti	45
ZÁVĚR	52
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	53
PŘÍLOHY	55
PŘÍLOHA A	55
PŘÍLOHA B	55
PŘÍLOHA C	56

Seznam symbolů a zkratk

VN – Vysoké napětí

EP-R – Epoxidová pryskyřice

UP-R – Polyesterová pryskyřice

VE-R – Vinylesterová pryskyřice

PF-R – Fenolická pryskyřice

UV záření – Ultrafialové záření

PA – Polyamid

PU – Polyuretan

SiO₂ – Oxid křemičitý

PVD – Fyzikální depozice par

Úvod

Kompozitní materiály jsou nedílnou součástí dnešních technologií. V dnešní době jsou tyto materiály stále častěji užívány v různých odvětvích průmyslu pro své výhodné vlastnosti. Kompozitní materiály sestávají ze dvou či více materiálů, které se od sebe navzájem svými vlastnostmi liší. Spojením těchto materiálů má výsledný produkt lepší užité vlastnosti než každý z materiálů samostatně. Tyto materiály jsou spojeny do jednoho celku, přičemž jsou oba zachovány a jsou jeden v druhém nerozpustné.[1] V porovnání se slitinami kovů si pak každá složka kompozitního materiálu zachová své chemické a mechanické vlastnosti. Mezi přednosti kompozitních materiálů patří jejich vysoká pevnost, tuhost, odolnost vůči korozi a vysoká elektrická pevnost. Ve srovnání s konvenčními materiály mají kompozitní materiály standardně nižší hustotu, tudíž je možné dosahovat konstrukcí s mnohem nižšími hmotnostmi.[2]

Mimo oblast použití v elektrotechnice, lze zmínit například kompozitní součásti automobilů nebo dokonce celé karoserie, kdy hmotnost je výrazně nižší a je tedy možnost dosáhnouti vyšších rychlostí nebo také nižší spotřeby pohonných hmot při zachování požadované tuhosti karoserie nebo zmíněného dílu. S těmito materiály se lze setkat i mimo automobilový průmysl, a to například v odvětví sportu kde je možné tyto kompozity nalézt v podobě rámu bicyklů, golfových holí atd. Jako jeden ze starších a dlouhodobě používaných kompozitních materiálů je možné nalézt i ve stavebnictví, kde se jedná o železobeton. Železné armovací tyče slouží jako výztuž a beton je potom pojivo, sdružující výztuž dohromady.

Při návratu zpět k oboru našeho zájmu a tj. do elektrotechniky, je možné nalézt spoustu různorodých použití pro tyto kompozitní materiály, kdy ne na všechny jsou kladeny stejné požadavky. Ve velké míře jsou kompozitní materiály v elektrotechnice používány na zhotovení substrátů pro desky plošných spojů. S tímto produktem se lze v běžném životě setkat nejčastěji, jelikož převážná většina dnešních zařízení v sobě obsahuje obvody s deskami plošných spojů. Hlavním odvětvím, kde jsou kompozitní materiály v elektrotechnice hojně používány, je oblast elektroizolačních systémů. Lze se s těmito

materiály tedy setkat například ve vysokonapětových (VN) aplikacích, například v problematice izolace točivých i netočivých elektrických strojů, kde jsou na tyto materiály kladeny specifické požadavky z hlediska elektrické pevnosti materiálu a odolnosti tepelnému namáhání.

Další zajímavou aplikací kompozitních materiálů v elektrotechnice je jejich použití jako zesilující jádra pro vodiče energetických přenosových soustav, kdy je oproti konvenčnímu ocelovému jádru dosaženo nižší celkové hmotnosti a vodiče tak mohou být většího průřezu při použití stávajících sloupů elektrického vedení a izolátorů a je tedy možné soustavou přenášet vyšší výkon.[3] Další aplikací kompozitních materiálů v oblasti přenosových soustav je jejich využití jako konstrukčních částí sloupů elektrického vedení. Konkrétně lze například zmínit kompozitní ramena stožárů, která plní nejen konstrukční funkci, ale také na sloupu figurují jako izolátory. Ramena stožárů jsou pak bezúdržbová a dále odpadá nutnost závěsných izolátorů, čímž je snížena cena celkového řešení.[4]

1 Kompozitní materiály pro elektrotechniku

Kompozitní materiály pro elektrotechniku se stejně jako ostatní kompozity skládají minimálně ze dvou materiálů (složek), které spolu dohromady tvoří jeden celek, přičemž kompozity pro elektrotechniku jsou obecně elektroizolačními materiály a hlavními stavebními složkami jsou nejčastěji polymerní matrice a výztuž. Matrice takového kompozitního materiálu může být buď reaktoplastická, nebo termoplastická. U kompozitních materiálů s polymerní matricí převažuje použití reaktoplastických pryskyřic hlavně kvůli jednoduššímu zpracování. Při použití termoplastických matric je nutnost při výrobě pracovat s taveninou tohoto materiálu, která je viskózní. Zakomponování výztužné složky, například vláken, do této viskózní taveniny je obtížné.[5]

Termoplastické matrice mají v elektrotechnice své zastoupení, nicméně pro účely elektrických izolací například v točivých a netočivých strojích nejsou tyto matrice vhodné. Nevýhoda termoplastických pojiv pro použití v takových aplikacích je, že termoplastické materiály při teplotním zatížení měknou a přecházejí do plastického stavu. V oblasti elektrických strojů se lze setkat s takovými teplotami, které již neumožňují využívání většiny termoplastů. V oblasti elektroizolační techniky také hrozí vystavení prvku elektrickému oblouku, přičemž dochází k velkému tepelnému namáhání. Z těchto důvodů se nejčastěji používají reaktoplasty, kde vytvrzené a zesíťované reaktoplastické pryskyřice se již při dalším zahřívání a teplotním působení netaví.[6] Termoplastické matrice se nejčastěji kombinují s částicovým plnivem a pro jejich zpracování se používá vstřikování (izolačních komponentů do forem) a vytlačování (např. kontinuální izolace kabelů).[5]

Jak již bylo zmíněno, výroba kompozitních materiálů s vláknovou výztuží je s použitím reaktoplastických pryskyřic snazší a objevují se zde i různé způsoby výroby výsledného kompozitu jako například použití prepregů viz dále. Jako výztuž mohou být použita vlákna, částice či tkaniny. Kompozitní materiály s částicovou výztuží jsou obecně méně pevné než kompozity s výztuží vláknovou, jejich výroba je ale méně nákladná.[7] Při zaměření na vláknovou výztuž, je pak možné takový kompozit popsat jako již zmíněná vlákna sdružená do jednoho celku pojivem, které poskytuje vláknům základní ochranu a též určuje dielektrické vlastnosti materiálu. Vlákna pak zaujímají ve výsledném materiálu pozici nosného materiálu. Pojivo zde mimo jiné plní účel ochrany výztuže před vnějšími

vlivy.[5] Tato práce se bude zabývat pouze kompozitními materiály s reaktoplastickou maticí a vláknovou výztuží. Druhů vláken a pryskyřic je dnes používána celá řada a jejich rozdělení a vlastnosti jednotlivých z nich budou shrnuty v následujících podkapitolách.

1.1 Druhy pryskyřic

Hlavními úlohami pojiv v kompozitním materiálu je sdružit vlákna výztuže do jednoho celku, rovnoměrně rozložit působící síly na kompozitní materiál mezi vlákna výztuže. Dále pojiva poskytují ochranu vláknům proti účinkům prostředí, ať už se jedná o chemické látky, nebo vlhkost. Matrice též poskytuje ochranu vláknům proti mechanickým poškozením jako je například otěr, který je pro vlákna vysoce nežádoucí. Pojivo jako takové nehraje příliš důležitou roli pro zatížení kompozitního materiálu tahem, nicméně volba materiálu matrice je velmi důležitá a určuje vlastnosti kompozitu ve smyku, stříhu a při stlačení. Pro izolační systémy v elektrotechnice jsou také velice důležité parametry jako například elektrická pevnost, rezistivita, polarizace a výdržné napětí, které jsou volbou materiálu určeny. Důležité kritérium pro volbu matrice je i uvažované tepelné zatížení výsledného kompozitního materiálu, jelikož jeho odolnost vůči teplotám je dána především pojivem. Použité pryskyřice mohou mít vylepšené vlastnosti aditivity, která dokážou například zpomalovat hoření. Reaktoplastické pryskyřice, kterými se tato práce zabývá, jsou v nevytvrzeném stavu viskózní kapaliny. Pro potřeby kompozitních materiálů je třeba pryskyřici vytvrdit. Vytvrzení probíhá primárně přidáním vytvrzovacího prostředku (tvrdidla) do pryskyřice, poté v materiálu dochází k tvorbě vazeb tvořících prostorovou strukturu. Vytvrzení reaktoplastu je nevratná chemická reakce.[6] Poté, co jsou tyto pryskyřice vytvrzeny, tak již nemohou být znovu roztaveny či jinak vráceny do své původní tekuté formy.[8][5][9]

1.1.1 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice (EP-R) obsahují více než dvě epoxidové skupiny¹ v každé molekule.[10] Existuje mnoho typů v závislosti na chemické struktuře a molární hmotnosti. Nejčastěji používané epoxidové pryskyřice jsou vytvořeny reakcí bisfenolu-A s epichlorohydrinem. Vlastnosti vytvrzené pryskyřice závisí na hustotě vazeb tvořících prostorovou strukturu v materiálu. S nárůstem hustoty těchto vazeb se zvyšuje modul pevnosti v tahu, chemická odolnost a teplota skelného přechodu. Nicméně s nárůstem hustoty se také snižuje houževnatost materiálu. Hustota vazeb tvořících prostorovou strukturu závisí na volbě pryskyřice, tvrdidla a na podmínkách, za kterých se vytvrzovací děj odehrává, a to sice na čase a teplotě. Mezi výhody epoxidových pryskyřic patří výborná přilnavost k vláknům výztuže a též výborná odolnost vůči chemikáliím a elektroizolační vlastnosti. Pryskyřice má též při vytvrzení malé objemové smrštění, které je pouze v rozsahu 1 % - 5 %.[5] Za další výhodu je možné považovat široký rozsah dosažitelných vlastností díky velkému výběru tvrdidel a výchozích materiálů. [8][11][5]

1.1.2 Polyesterové pryskyřice

Polyesterová pryskyřice (UP-R) je připravená reakcí anhydridu kyseliny maleinové a ethylenglykolu doplněná o kyselinu isoftalovou pro úpravu chemické struktury. Jako tvrdidlo je pro polyesterové pryskyřice používán organický peroxid.[5] Společně s dodaným teplem a tvrdidlem se v materiálu vytváří prostorové vazby a vzniká pevná struktura vytvrzené pryskyřice. Stejně jako u epoxidových pryskyřic, tak i u polyesterových výsledné vlastnosti pryskyřice závisí na hustotě vazeb v materiálu. Modul pevnosti v tahu a teplota skelného přechodu se při vyšší hustotě vazeb zvyšují, ale houževnatost se snižuje. Různou hustotu zesíťování vazeb v materiálu je možné dosáhnout různým poměrem přidaných prvků, jelikož hustota vazeb je závislá na počtu bodů nenasytění v nevytvrzené polyesterové molekule. Výhody polyesterových pryskyřic jsou nízká viskozita, krátká doba vytvrzení a finanční nenáročnost. Velká nevýhoda polyesterových pryskyřic v porovnání s epoxidovými je vysoké objemové smrštění, které se pohybuje v rozmezí 5 % - 12 %. Toto smrštění má sice výhodu v jednodušším vyjmutí zalitého materiálu z formy, ale kvůli tomuto smrštění se vytváří nerovnoměrné prohlubně na povrchu vytvrzeného materiálu.[5]

¹ Epoxidová skupina je trojčlenný kruh skládající se ze dvou uhlíkových a jednoho kyslíkového atomu[13]

1.1.3 Vinylesterové pryskyřice

Jako základní materiál pro tyto matrice je použita nenasycená vinylesterová pryskyřice (VE-R), která vzniká reakcí nenasycené karboxylové kyseliny a epoxidové pryskyřice. Body nenasycení se vyskytují pouze na konci vinylesterových molekul a tím pádem se prostorové vazby tvoří pouze na koncích, protože vazby se tvoří právě v bodech nenasycení. To má za důsledek méně vazeb v materiálu, a proto je tato pryskyřice více elastická a houževnatá než pryskyřice polyesterová. Díky svým chemickým vlastnostem tato pryskyřice velmi dobře přilne ke skleněným vláknům, protože chemické skupiny obsažené v molekulách se váží s podobnými skupinami na povrchu těchto vláken. Smrštění vinylesterových pryskyřic se pohybuje v rozmezí 5 % - 10 %, což je stejně jako u polyesterových pryskyřic vyšší, než u epoxidových pryskyřic.[5] Mezi výhody použití těchto pryskyřic se řadí výborná odolnost vůči chemikáliím, rychlé vytvrzení, vysoká pevnost v tahu a nízká viskozita. [12]

1.1.4 Fenolické pryskyřice

Fenolické pryskyřice (PF-R) jsou připravovány polykondenzací fenolu a roztoku aldehydů, kde se nejčastěji jedná o formaldehyd. Vzniká tím tak fenol-formaldehydová pryskyřice. Jednotlivé varianty vycházejí z různých poměrů fenolu a formaldehydu. Vytvrzení probíhá teplem nebo účinkem vytvrzovacího prostředku. Existují dva druhy fenolických pryskyřic, a to buď novolaky, nebo rezoly. Novolaky vznikají při přebytku fenolu v molárním poměru fenolu a formaldehydu. Rezoly naopak vznikají při přebytku formaldehydu. Novolaky na rozdíl od rezolů potřebují tvrdidla a zvýšené teploty pro vytvrzení, zesíťování rezolů je možné dosáhnout přidáním kyseliny, nebo dodáním tepla. Rezoly totiž obsahují reaktivní skupiny reagující na kyselé prostředí a teplo. Samotné fenolické pryskyřice jsou křehké a musí proto být modifikovány pro konstrukční použití. Pro modifikaci se používají deriváty fenolu např. bisfenol.[10] Fenolické pryskyřice disponují vysokou mechanickou pevností, nízkou hořlavostí a s tím související nízkou kouřivostí a malou toxicitou kouře. Dále jsou chemicky a teplotně odolné. Pryskyřici lze naléznout pod obchodními názvy Bakelit nebo Ebolit.[13][10]

1.1.5 Polyuretanové pryskyřice

Polyuretanové pryskyřice (PU-R) vznikají polyadiční reakcí mezi dialkoholy nebo polyoly a polyisokyanáty. Mezi výhody těchto pryskyřic patří malé objemové smrštění při vytvrzení, dobrá teplotní odolnost a elektroizolační vlastnosti. Pryskyřice také vyniká svým tečením a vyplněním formy a rychlým vytvrzením. Mezi nevýhody naopak patří neodolnost vůči UV záření, což je nutné řešit aditivou. Polyuretanové pryskyřice též vykazují malou odolnost vůči chemikáliím.[14] Polyuretanové pryskyřice jsou v elektrotechnice využívány pro zalévání desek plošných spojů a jejich následné ochraně proti vlivům prostředí.[15]

1.2 Druhy vláken

Vlákna použitá jako výztuž mohou být buď přírodního původu, nebo syntetická. Přírodní plniva mohou být například rákos, bavlna, bambus. Dále se tato práce bude zabývat pouze vlákny syntetickými. Syntetická vlákna pro elektroizolační kompozity lze rozdělit na dvě základní skupiny, a to sice organická a anorganická. V literatuře se uvádí ještě skupina třetí a tou jsou plniva kovová. Mezi anorganická plniva je možné zařadit například skleněná vlákna nebo vlákna uhlíková. Nicméně uhlíková vlákna jsou pro potřeby elektroizolačních kompozitů nevhodná z důvodu jejich elektrické vodivosti. Do skupiny plniv organických patří například nylonová vlákna, aramidová vlákna a polyesterová a polyethylenová vlákna.[8]

Volba vláken pro kompozitní materiál je velmi důležitá, jelikož vlákna jsou hlavní nosný prvek a různá vlákna dodají konečnému materiálu různé vlastnosti. Vlastnosti nezáleží pouze na vláknech samotných, ale i na jejich celkovém zastoupení v kompozitním materiálu, jejich délce a orientaci vláken. Volba vláken u konečného materiálu ovlivňuje jednak cenu, což je pro většinu aplikací klíčový faktor, dále pak celkovou elektrickou a tepelnou vodivost materiálu a odolnost vůči vysokým teplotám. Modul pevnosti v tahu, únava materiálu a pevnost v tlaku jsou další důležité mechanické vlastnosti, které jsou volbou vláken přímo ovlivněny. Dále je pak důležitá hustota, protože ta pak ovlivní celkovou hmotnost výsledného materiálu.[5]

1.2.1 Skleněná vlákna

Tato vlákna jsou nejpoužívanější materiál pro výztuže kompozitních materiálů s polymerní matricí. Mezi jejich největší výhody patří nízká cena, vysoká odolnost vůči chemickým látkám a výborné izolační vlastnosti. Naopak mezi jejich nevýhody se řadí vyšší hmotnost oproti ostatním používaným druhům vláken, snížení jejich pevnosti při otěru, nízká odolnost vůči únavě materiálu a jejich vysoká tvrdost, což klade zvýšené nároky na řezné nástroje při zpracování. Hustota těchto vláken se liší podle druhu (budou zmíněny dále), průměrně se u těchto vláken však pohybuje kolem $2,5 \text{ g/cm}^3$. [5] Rozlišuje se několik druhů skleněných vláken používaných jako výztuž kompozitních materiálů. Konkrétně se označují jako E-sklo (E-glass), S-sklo (S-glass) a C-sklo (C-glass). Poslední ze jmenovaných, tj. C-sklo je používané pro chemické aplikace, kde je vyžadována zvýšená odolnost vůči účinkům kyselin. Nicméně tato chemická odolnost je na úkor pevnosti vláken. [5] E-sklo je nejlevnější ze všech druhů vláken používaných v kompozitních materiálech. To je hlavní příčina jeho častého použití. Má též dobré elektroizolační vlastnosti, pevnost a odolnost vůči vlhkosti a je to používaný prvek při výrobě desek plošných spojů. [5] Druh vláken označený jako S-sklo byl původně vyvinut pro výrobu komponent použitých v letectví, přičemž má největší modul pevnosti a hlavně největší tepelnou odolnost oproti ostatním používaným vláknům. Tato vlákna jsou drahá a jsou používána hlavně pro náročné aplikace, kde je nutnost co nejlepších vlastností materiálu. Z chemického hlediska je základem všech skleněných vláken SiO_2 a k němu jsou přidávány další oxidy pro úpravu vlastností vláken, například oxid boritý a oxid hlinitý. [5]

1.2.2 Keramická vlákna

Keramická vlákna jsou využívána pro svoje výborné výsledky ve zvládnání vysokých teplot a také díky vysokému modulu elasticity. [8] Jsou tedy využitelná pro veškeré aplikace, kde je nutnost odolávání vysokým teplotám, ve vesmírných programech a automobilovém průmyslu. Vlákna mají také zvýšenou odolnost vůči korozivnímu prostředí. Základem těchto vláken je Al_2O_3 nebo sloučeniny Al_2O_3 a SiO_2 . Mezi jejich vlastnosti patří dobrá mechanická pevnost a dlouhodobá odolnost vůči tečení při vysokých teplotách. Tato vlákna mají špatnou elektrickou a tepelnou vodivost. [8] [5]

Na trhu jsou tato vlákna zastoupena vlákny pod označením Nextel od firmy 3M. Tato vlákna se dále dělí na 4 verze podle chemického složení. Konkrétně se jedná o verze 312, 440, 610 a 720. Podle dostupného technického listu firmy 3M mají tato vlákna extrémní odolnost vůči vysokým teplotám a jejich teplota tavení dosahuje až 2000 °C (2000 °C pro variantu Nextel 610, ostatní varianty vláken dosahují bodu tavení při 1800 °C). Hustota vláken je pak 2,8 g/cm³ pro Nextel 312, 3,0 g/cm³ pro Nextel 440, 3,9 g/cm³ pro Nextel 610 a 3,4 g/cm³ pro Nextel 720. Vlákna nejsou v elektrotechnice standardně používána. Mohou být použita například jako výztuž pro matrice s keramickým pojivem, kovovým pojivem a polymerním pojivem s výjimkou verzí 312 a 440, které nemohou být použity v kompozitech s kovovým pojivem. Použití naleznou ve vesmírných programech jako tepelné izolace a různá těsnění.[16]

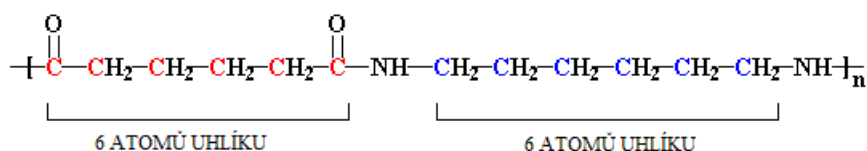
1.2.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou velmi často využívána pro různorodé účely. Nicméně pro účely elektroizolační techniky tato vlákna nejsou vhodná, a proto jsou v této práci pouze stručně zmíněna. Tento druh vláken je komerčně dostupný v mnoha různých kvalitách, od kterých se odvíjí i jeho cena. Levnější druhy vláken mají menší hustotu a malý modul pevnosti. Mezi přednosti těchto vláken patří výborný poměr pevnosti v tahu a hmotnosti, malý koeficient tepelné roztažnosti, vysokou tepelnou vodivost a stálost vlastností při různých teplotách. Mezi nevýhody patří malá odolnost vůči nárazu a z pohledu použití jako elektroizolačního materiálu je jeho nevýhodou i dobrá elektrická vodivost.[11]

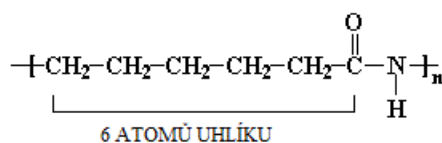
1.2.4 Polyamidová vlákna

Polyamidy (PA) jsou připravovány nejčastěji kondenzací dikarboxylových kyselin a diaminů.[17] Tento materiál je možné nalézt pod obchodním názvem Nylon.[14] Komerčně dostupné verze nylonu zahrnují polyamid 6 (PA 6), polyamid 66 (PA 66), polyamid 46 (PA 46), polyamid 610 (PA 610), polyamid 612 (PA 612), polyamid 11 (PA 11) a polyamid 12 (PA 12). Číselné označení nylonu značí počet atomů uhlíku v použitých stavebních jednotkách řetězců. Pokud je polyamid složen ze dvou monomerů, tak první číslice udává počet atomů uhlíku v diaminu a druhá číslice udává počet atomů uhlíku v dikarboxylové kyselině.[18] Podíl atomů uhlíku udává každému druhu nylonu jeho vlastnosti.[19] Tato vlákna mají obecně velice dobrou elasticitu, odolnost vůči otěru, dobré

elektroizolační vlastnosti, odolnost vůči únavě materiálu, tvrdost a houževnatost. Mezi nevýhody patří špatná odolnost vůči UV záření a pohlcování vlhkosti. Neodolnost vůči UV záření lze potlačit přidáním stabilizátorů.[20] Z hlediska odolnosti vůči tepelnému působení, nejsou tato vlákna vhodná pro aplikace zahrnující zvýšené teploty nad 100 °C.[14] Nejdůležitějšími zástupci této skupiny jsou materiály polyamid 6 a polyamid 66. V porovnání polyamidu 66 s polyamidem 6, má polyamid 66 vyšší teplotu tavení, menší nasákavost, lepší chemickou odolnost a vyšší pevnost v tahu. Důležitou vlastností polyamidových vláken je velké rozmezí pracovních teplot. U Nylonu 6 (polyamid 6) se toto rozmezí pohybuje od -40 °C až do 85 °C a u Nylonu 66 je toto rozmezí od -30 °C až do 95 °C.[21]



Obr. 1 – Lineární polymerní řetězec polyamidu 66 [22]



Obr. 2 – Lineární polymerní řetězec polyamidu 6 [22]

1.2.5 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (vysoce krystalická aromatická polyamidová vlákna) byla jako první ze skupiny organických vláken, která byla použita jako plnivo v kompozitních materiálech a dosahovala požadovaných mechanických vlastností.[5] Vztaženo na jednotku hmotnosti, mají tato vlákna nejlepší mechanické vlastnosti v tahu ze všech dosud používaných vláken. Nezanedbatelnou předností těchto vláken je i jejich žáruvzdornost, přičemž si i při vyšších teplotách dokážou zachovat své vlastnosti. Tato vlákna nepodporují hoření ani se nataví, přičemž po překročení teploty zhruba 427 °C začínají uhelnatět. Doporučená maximální teplota dlouhodobé expozice je stanovena na 120 °C.[5] Vlákna jsou též odolná vůči vlivu chemikálií, s výjimkou silných kyselin. Aramidová vlákna byla vyvinuta a představena firmou DuPont, která je vyrábí pod obchodním názvem Kevlar. Doposud byly vyvinuty 3 varianty materiálu Kevlar. Jmenovitě se jedná o Kevlar

29, Kevlar 49 a Kevlar 149.[11] Nejpoužívanější z nich je Kevlar 49, který nalézá využití v mnoha kompozitních materiálech díky svému velkému modulu pevnosti. Kevlar 29 se používá v aplikacích, kde je vyžadována houževnatost materiálu a balistická ochrana. Nejmladší ze zmíněných materiálů je Kevlar 149, který má modul pevnosti ještě vyšší, než materiál Kevlar 49. Mezi nevýhody těchto vláken patří horší zpracovatelnost, zejména pak jejich obtížné řezání a také jejich citlivost na UV záření, kdy po dlouhodobé expozici ztrácí významnou část svých mechanických vlastností. Problém se ztrátou vlastností při vystavení UV záření lze omezit přidáním aditiv pohlcujících UV záření do matrice kompozitního materiálu. Tato vlákna jsou hygroskopická, tudíž velice ochotně pohlcují vlhkost. Pohlcená vlhkost má na mechanické vlastnosti těchto vláken pouze malý dopad, nicméně při vyšším podílu vlhkosti ve vláknech tato vlákna vnitřně praskají v již existujících mikrokavitách a zapříčiňují tak podélné štěpení vláken. Hustota těchto vláken je $1,45 \text{ g/cm}^3$, což je činí druhými nejlehčími hned za polyethylenovými.[5] [11]

1.2.6 Polyethylenová vlákna

Tato vlákna produkovaná z polyethylenu s vysokou molekulovou hmotností lze naléznout pod obchodním názvem Spectra nebo Dyneema. Oproti aramidovým vláknům mají pouze minimální tendenci pohlcovat vlhkost. Jejich další přednost je i vysoká odolnost vůči otěru. Dále mají tato vlákna (Dyneema) nejnižší hustotu ze všech výše zmiňovaných syntetických vláken, konkrétně $0,97 - 0,98 \text{ g/cm}^3$. [23] Bod tavení těchto vláken je však nízký, konkrétně $147 \text{ }^\circ\text{C}$ a jejich použití je limitováno teplotami $80 - 90 \text{ }^\circ\text{C}$ z důvodu tečení materiálu při teplotách nad $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Při teplotě vyšší než $125 \text{ }^\circ\text{C}$ se u těchto vláken dostavuje rapidní pokles pevnosti. Mezi hlavní nevýhody těchto vláken patří špatná přilnavost k matrici kompozitu. Tato nevýhoda může být částečně kompenzována ošetřením plazmou. Toto však činí takovéto kompozity technologicky a finančně náročné na výrobu. Mezi jejich přednosti však patří vysoká odolnost vůči nárazu, a to i při nízkých teplotách. Pro tuto vlastnost mají budoucí potenciál i mimo obor elektrotechniky, konkrétně v oboru balistických ochran.[11]

1.3 Vláknové struktury

Jednotlivá vlákna se samostatně používají ve výztužích pouze výjimečně. Nejčastěji se spřádají do tzv. příze a poté jsou tyto příze dále používány k vytvoření tkanin. Různé druhy tkanin určují nejen mechanické vlastnosti kompozitního materiálu, ale také náklady na jeho výrobu a zpracování.[13] Mechanické vlastnosti jsou pak především ovlivněny orientací vláken a propojením vláken. Pokud jsou uvažovány pouze kompozitní materiály s kontinuálními (nepřerušnými) vlákny, pak lze dělit architektury vláken na jednodimenzionální (1D), dvoudimenzionální (2D) a třídimenzionální – prostorové (3D).

Jako jednodimenzionální architektura je označována ta, ve které jsou použita vlákna orientována pouze v jednom směru. Hlavní vlákna mohou být udržována ve směru tenkými termoplastickými výztužemi, které se při zpracování kompozitního materiálu přetaví, nebo tkaním, či prošíváním.[8] Taková struktura má poté výborné vlastnosti v tahu v podélném směru zakomponovaných vláken, nicméně ve směru příčném jsou vlastnosti v tahu výrazně sníženy. V kompozitním materiálu jsou tedy omezeny pouze na použití při více vrstvách, kdy jednotlivé vrstvy vláken musí být natočeny pod úhlem, aby byly vlastnosti v různých směrech stejné.

Mnohem běžnější jsou 2D architektury vláken. Tato architektura se dále dělí na struktury s vlákny orientovanými ve dvou směrech (bidirectional) a na struktury s vlákny orientovanými ve více směrech (multidirectional). Ve struktuře založené na použití vláken orientovaných ve dvou směrech jsou jednotlivé příze vláken prokládány ve směrech na sebe kolmých. Příze probíhající rovnoběžně se směrem tkaní se nazývá osnova a příze probíhající příčně ke směru tkaní se nazývá útek.[5] Výztuž takového kompozitního materiálu je oproti jednodimenzionálnímu uspořádání zajištěna ve dvou směrech. Tyto struktury mají tedy oproti jednodimenzionálním lepší mechanické vlastnosti při méně vrstvách vláken a jsou snáze zpracovatelné.[13]

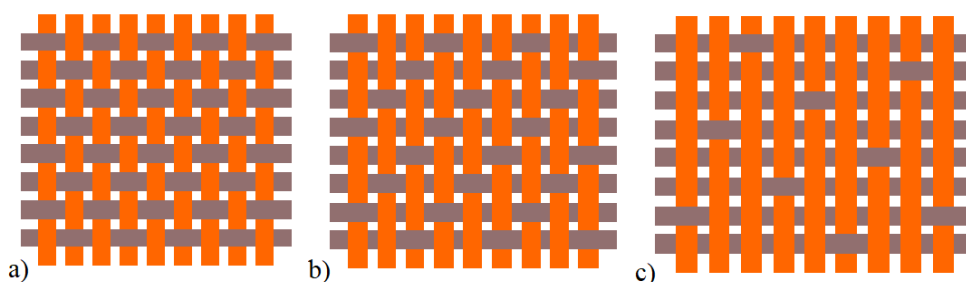
Často se lze také setkat s prepregy, u kterých tato struktura převažuje a kterými se bude zabývat další podkapitola. Změnou počtu vláken v přízi útku nebo osnovy lze dosáhnout různých vlastností výsledného kompozitního materiálu. Pokud je počet vláken v přízích osnovy i útku stejný, potom jsou vlastnosti tkaniny v obou směrech stejné a tkanina je vyrovnaná. Vlastnosti v jiných směrech jsou nicméně stále špatné a pro některé

aplikace mohou být nevyhovující. Pro zlepšení vlastností mohou být vláknové struktury prokládány přízemi v jiných směrech, čímž vznikne tkanina vícesměrná (Obr. 3). Struktura s vlákny orientovanými ve dvou směrech (bidirectional) se dále dělí na několik druhů vazeb.

Nejběžnější vazby tkanin jsou plátňová vazba (plain weave), keprová vazba (twill weave) a saténová vazba (satin weave). Plátňová vazba (Obr. 4a) je nejjednodušší a nejčastěji používaná ze všech zmiňovaných vazeb. Každá osnova prochází střídavě pod a nad každým útkem. Celá tkanina je tedy symetrická. Při řezání tkaniny se také objevuje menší roztřepení než při použití jiných vazeb. Nicméně mezi nevýhody této vazby patří zhoršení mechanických vlastností, což je zapříčiněno těsností vazby a jejím zvlněním. Krová vazba (Obr. 4b) je vytvořena průchodem útkové příze přes dvě nebo více osnovních přízí a opakováním se vytvoří diagonální linie. Díky menšímu zvlnění, než jaké se objevuje u plátňové vazby, má keprová vazba vyšší pevnost a tuhost kompozitního materiálu. Vzhledem k tomu, že je keprová vazba ohebnější, je dobře využitelná i pro prvky, kde je potřeba různé tvarování. Saténová vazba (Obr. 4c) je tvořena tak, že každá útková nebo osnovní příze prochází přes obecně n přízí a poté pod jednou křížující přízí. Tato vazba je vhodná i pro náročnější tvarované objekty, díky své tvárnosti. Saténové tkaniny mají také velmi hladký povrch, což je zapříčiněno menším zvlněním tkaniny. [24][8]



Obr. 3 – 2D tkanina s vlákny orientovanými ve více směrech [8]



Obr. 4 – Druhy vazeb tkanin; a) plátňová vazba, b) keprová vazba a c) saténová vazba [24]

Prepreg je označení pro pryskyřici v částečně vytvrzeném stavu, nejčastěji ve formě listu, která je vyztužena vlákny, částicemi, případně fólií nebo se jedná o samostatnou pryskyřici v částečně vytvrzeném stavu.[25] Nejpoužívanější pryskyřicí na výrobu prepregů je epoxidová pryskyřice. Původ označení prepreg vychází z anglického termínu „preimpregnated fibers“ tzn předimpregnovaná vlákna.[13] Výhodou prepregů je, že jejich použitím je oddělen proces výroby koncového prvku a samotného prosycení vyztuže pryskyřicí. Prepregy jsou připravovány za reprodukovatelných a kontrolovaných podmínek. Prepregy je nutné po výrobě skladovat v chladu, aby nedošlo k jejich znehodnocení postupným dotvrzováním při okolní teplotě, a po dobu maximálně 6 měsíců.[13] Po zpracování jsou vytvrzovány v lisu za dodávaného tepla nebo v autoklávu². Při použití autoklávu se prepregy navrství do požadované formy, která je poté zabalena do vakuového pytle a vložena do autoklávu (Obr. 5), kde dojde podle předem nastaveného programu k vytvrzení prepregů.[26] Vakuové pytle jsou vyráběny z materiálů nylon, mylar³, polyethylen a silikon.[27][28]

Česká firma 5M, zabývající se výrobou kompozitních materiálů, představila alternativu ke konvenčním prepregům. Jedná se o produkt nazvaný „semipreg“. Semipreg je tkanina jednostranně impregnovaná fóliovou pryskyřicí Letoxit LFX. Udávaná výhoda semipregů je, že pro zpracování není potřeba použití autoklávu.[29]



Obr. 5 – Forma s vrstvenými prepregy ve vakuovém pytli ukládána do autoklávu [26]

² Autokláv je přístroj, který je schopen dosahovat vysokých teplot a tlaků vzhledem k okolí.[39]

³ Mylar je materiál vyrobený firmou DuPont a jedná se o polyesterovou fólii.[40]

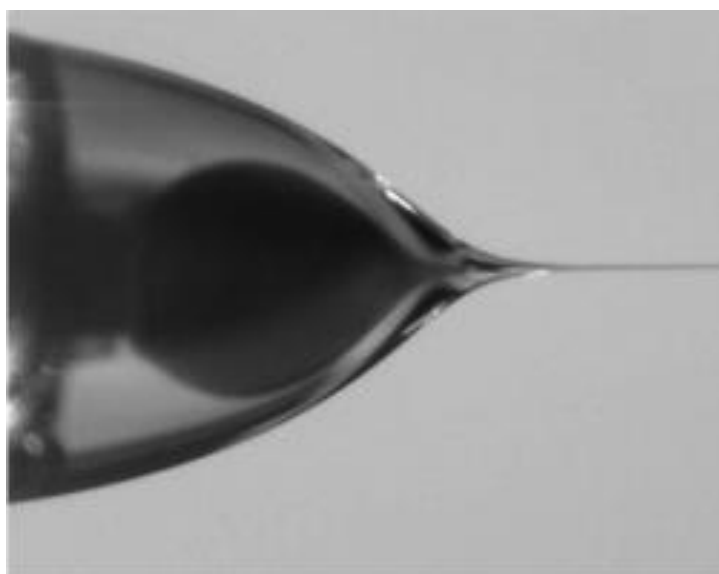
1.4 Nanovlákn

V předchozí kapitole se tato práce zabývala konvenčními vlákny používanými jako výztuže kompozitních materiálů, přičemž průměr těchto vláken se pohyboval v řádu mikrometrů[5]. Jak již název napovídá, nanovlákn se průměrem pohybují v řádu nanometrů, konkrétně můžeme nalézt vlákna různých druhů v rozsahu 1 až 100 nm.[14] Nanovlákn se vyznačují velkým poměrem povrchu k objemu. Tato vlákna mohou být anorganického původu, dále je možné se setkat s polymerními vlákny, vlákny uhlíkovými, nebo kompozitními vlákny. Anorganická vlákna zahrnují kovová vlákna, kde typickými zástupci používaných kovů mohou být měď, nikl, nebo stříbro. Nicméně tato vlákna nejsou, kvůli svojí dobré elektrické vodivosti vhodná pro použití pro elektroizolační materiály. Zajímavými jsou vlákna kompozitní, která obsahují více než jednu složku s rozdílným chemickým složením nebo strukturou. Taková vlákna mají obvykle dobrou vodivost či odolnost vůči vysokým teplotám.[30] Vodivá vlákna mají v elektrotechnice širokou škálu uplatnění. Například v senzorech, tranzistorech nebo vysoce výkonných bateriích a fotovoltaice.[31] Tato práce se však bude dále zabývat pouze vlákny polymerními.

Metod pro výrobu polymerních nanovláken je celá řada. Vlákna je možno vyrábět tažením vláken z roztoku (drawing), výrobou pomocí šablony (template synthesis), laserovou ablací (laser ablation) nebo metodou electrospinningu a dalšími.[30] Důležitý aspekt pro dělení výroby je rozlišení metod masové výroby a metod určených převážně pro laboratorní použití. Metody pro laboratorní výrobu, například tažení jednotlivých vláken z roztoku mikropipetou, není možné provádět komerčně ve velkém měřítku a jejich uplatnění je časově náročnější. Naopak metody pro komerční využití a velkovýrobu, např. electrospinning, jsou časově méně náročné metody s vyšší efektivitou.

1.4.1 Electrospinning

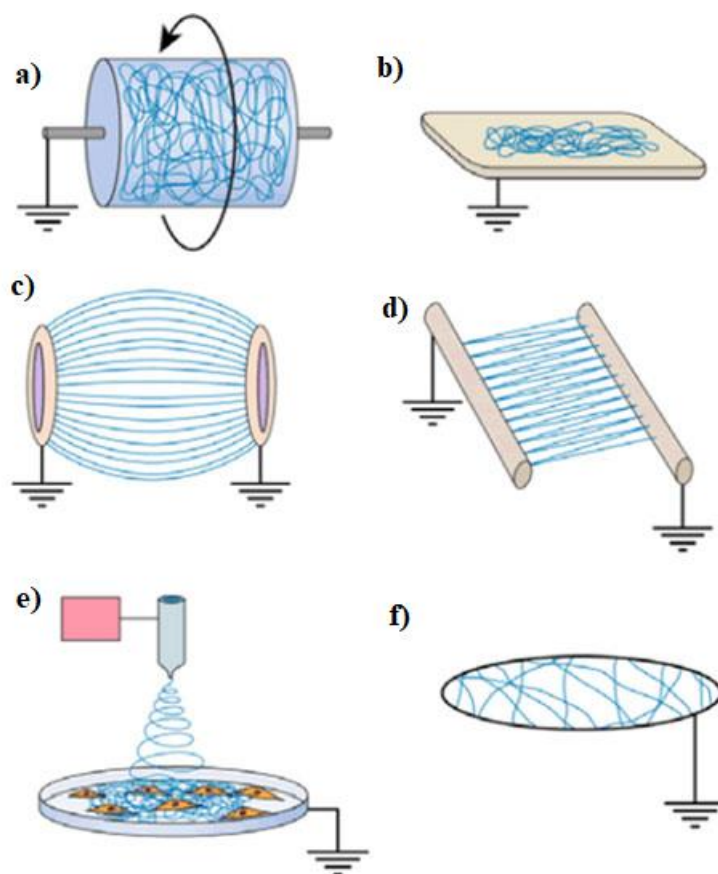
Metoda electrospinning je dnes ze všech metod nejčastěji používána hlavně pro svoji relativní jednoduchost, možnost masové výroby nanovláken a flexibilitu v oblasti výroby různých průměrů vláken. Z hlediska vybavení je pro tuto metodu potřeba vysokonapěťový zdroj, tryska či stříkačka s jehlou a uzemněný vodivý kolektor vláken. Polymerní roztok je konstantní rychlostí vytlačován z trysky. Tryska je připojena na kladný pól vysokonapěťového zdroje a vodivý kolektor vláken je připojen na záporný pól. Na kapku roztoku na konci trysky působí dvě vzájemně opačné síly. Konkrétně elektrostatická síla a povrchové napětí kapaliny. Přítomné elektrostatické pole kapku deformuje, přičemž se roztok snaží zachovat stav s nejnižší energií a zachovat si tak tedy původní tvar. V okamžiku, kdy elektrostatická síla překoná povrchové napětí roztoku, kapka na konci trysky se zdeformuje do kuželovitého tvaru, který se nazývá Taylorův kužel (Obr. 6). Ze špičky tohoto kuželu potom dojde k toku jemného paprsku roztoku směrem k uzemněné elektrodě. Interakce obou sil způsobí, že proud roztoku je vychylován ve spirálovitém tvaru. Výsledná vlákna jsou poté zachytávána na uzemněné vodivé podložce.[32]



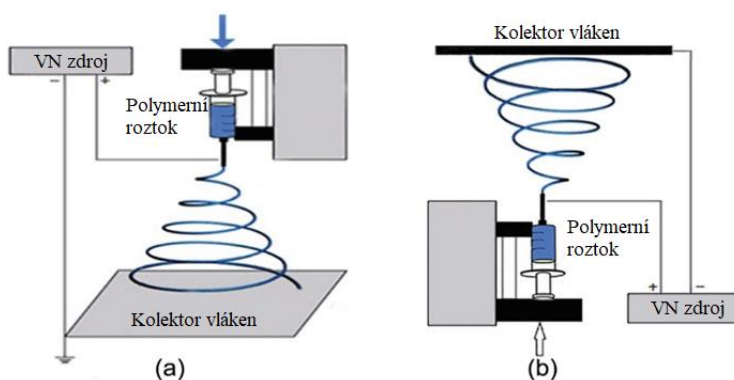
Obr. 6 – Taylorův kužel [34]

Průměr vlákna může být u této metody regulován velikostí aplikovaného elektrického vysokého napětí, koncentrací polymerního roztoku a rychlostí vytlačování roztoku. Vlákna vyrobená touto metodou jsou obvykle zachytávána na podložce v podobě neorientovaných či částečně orientovaných vláknových rohoží.[30][33] Na Obr. 7 jsou znázorněny různé druhy uzemňovacích elektrod, na kterých jsou vlákna zachytávána. Záchytné elektrody

mohou být uzpůsobeny jako a) rotující válec, b) uzemněná podložka, c) dvojitá nebo jednoduchá (f) prstencová elektroda, d) tyčová elektroda a e) uzemněná podložka s částicemi, na kterou jsou nanovláknna mířena.[30] Electrospinning může být provozován buď s tryskou orientovanou směrem dolů, nebo tryskou směrem nahoru (Obr. 8). Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma orientacemi trysky je následná orientace výsledných vláken. Při orientaci tryskou nahoru jsou vlákna zachytávána na podložku a tvoří jednotný vzor, naproti tomu s tryskou orientovanou dolů je rozložení vláken náhodné. Pro velkovýrobu se používají rozložení s tryskami orientovanými nahoru.[32] V současné době se vyskytují různé modifikace základního modelu pro electrospinning jako například vícetryskové uspořádání, trysky s více otvory pro tažení více vláken z jedné trysky či technologie nanospider.



Obr. 7 – Různé druhy uzemňovacích elektrod pro zachytávání vláken [30]



Obr. 8 – Metoda electrospinning: (a) shora dolů, (b) zespod nahoru [32]

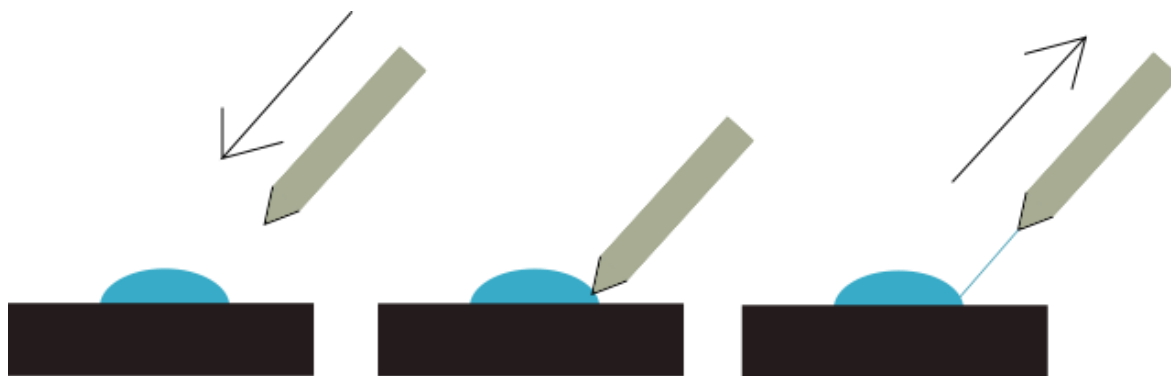
Technologie nanospider je přelomová technologie využitelná pro komerční výrobu s původem v České republice. Základními potřebami pro realizaci této metody jsou polymerní roztok, zvlákňovací elektroda v podobě struny, uzemněná vodivá elektroda, zdroj vysokého napětí a nosný materiál, na který budou vlákna nanášena. Na zvlákňovací elektrodu, která je připojena k VN zdroji, je pomocí pohyblivé hlavy nanášena vrstva polymerního roztoku po celé její délce. Na zvlákňovací elektrodě je vytvořen tenký film roztoku a v silném elektrostatickém poli vznikají taylorovy kužely, ze kterých jsou tažena vlákna proti druhé elektrodě (Obr. 9). Zároveň je posunován podkladový materiál, na kterém jsou nanovláknna zachytávána.[35][36]



Obr. 9 – Technologie nanospider [35]

1.4.2 Tažení vláken z roztoku

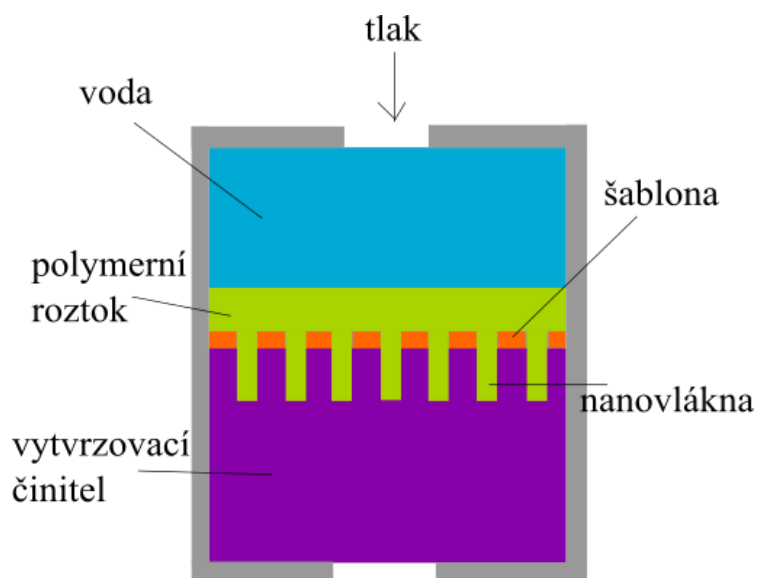
Výrobní metoda tažením vláken z roztoku je jednou z laboratorních metod a pro velkovýrobu vláken není vhodná. S každým tažením je vyrobeno pouze jedno vlákno. Výhodou této metody je opakovatelnost při stejných podmínkách a možnost kontroly nad průměrem tažených vláken.[30] Oproti ostatním zmíněným metodám, tato metoda vyžaduje jen minimální vybavení. Pro tuto metodu je potřeba ostrý hrot s průměrem několik mikrometrů. Tímto hrotem je z kapky polymerního roztoku taženo vlákno. Hrot je po namočení do roztoku oddalován konstantní rychlostí kolem 10^{-4} m/s [32] a tím je dosaženo tažení kontinuálního vlákna (Obr. 10). Tažení může být opakováno několikrát pro každou kapku roztoku. Tuto metodu je možné použít pouze pro dostatečně viskózní roztoky.[33]



Obr. 10 – Metoda tažení vláken z roztoku [33]

1.4.3 Výroba pomocí šablony

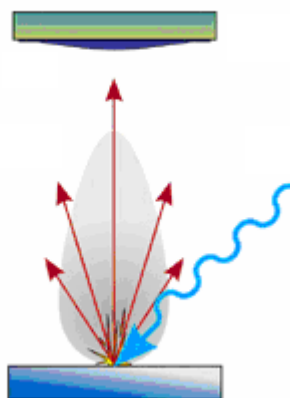
Pro tuto metodu je potřeba šablona s póry v rozměru nanometrů, vytvrzovací činidlo, voda a polymerní roztok. Na šablonu je aplikován polymerní roztok a je protlačován přes póry šablony tlakem vody. Pod šablonou je umístěno vytvrzovací činidlo, kterým se polymerní roztok protlačený póry šablony vytvrdí a vznikají tak vlákna o rozměrech pórů šablony viz Obr. 11. Výhoda této metody je ta, že v závislosti na použité šabloně může být dosaženo i výroby vláken o více průměrech naráz. Šablona může mít tedy různou variaci šířky otvorů. Případně výměnou šablony je možnost jednoduše změnit průměr vláken. Nevýhodou této metody je pak nemožnost výroby dlouhých kontinuálních vláken, tato metoda umožňuje výrobu pouze krátkých vláken v řádu mikrometrů. [32]



Obr. 11 – Metoda výroby vláken pomocí šablony [32]

1.4.4 Laserová ablace

Laserová ablace je jedna z metod výroby struktur s nanovlákný či nanočásticemi pomocí fyzikální depozice par (physical vapor deposition, PVD). PVD je proces, při kterém materiál přechází z pevného či kapalného skupenství na páry, které následně kondenzují a tvoří struktury nanovláken, nanočástice či filmy. K tomuto je zapotřebí atmosféra z inertního plynu například He nebo Ar. Při laserové ablaci je pro vytvoření par materiálu použit vysoce výkonný laserový puls, který na materiál působí v řádu femto sekund. Laserový paprsek je soustředěn na zpracovávaný materiál a při překročení určité prahové hodnoty pro daný materiál jsou chemické vazby v materiálu porušeny a materiál je tak rozbit na fragmenty sestávající z atomů, molekul a iontů. Většina absorbované energie je uložena ve fragmentech materiálu a okolí zpracovaného materiálu není tudíž příliš tepelně zatíženo. Vlastnosti nanostruktur či filmů závisejí na použitém materiálu, druhu použité atmosféry a jejího tlaku, vzdálenosti zpracovávaného materiálu a záchytné plochy částic a její teploty. [37] Odpařované částice se shlukují a tvoří nanovlákná. Bylo zjištěno, že existuje prahová četnost laserových pulzů, při které se začínají formovat shluky vláknových nanočástic. Výhoda této metody je rychlost výroby, která je obvykle 2 – 3 mg/min.[30] Tato metoda může být použita pro výrobu struktur nanovláken a částic z různorodých materiálů například skleněná, křemíková nebo uhlíková nanovlákná, ale také polymerní nanovlákná.[38] Na Obr. 12 je znázorněn proces laserové ablace, kdy modrá šipka značí laserový puls mířený na materiál a červené šipky jsou fragmenty zpracovávaného materiálu, které jsou poté zachytávány na záchytné ploše.



Obr. 12 – Znázornění metody laserové ablace [37]

2 Experimentální část

Tato práce se věnuje laboratorní výrobě kompozitních materiálů za účelem prokázání vlivu zakomponování nanovláken na užité vlastnosti kompozitního materiálu při použití v elektrotechnice. Výsledné kompozitní materiály jsou zamýšlené pro použití ve VN izolacích například jako izolační přepážky, podložky atd. Tyto kompozitní materiály se primárně skládají z epoxidové pryskyřice, slídových částic a skleněných vláken (tkaniny). Většina připravovaných a testovaných kompozitů obsahuje kromě zmíněných základních složek také vrstvu neorientovaných polyamidových vláken vyrobenou pomocí electrospinningu.

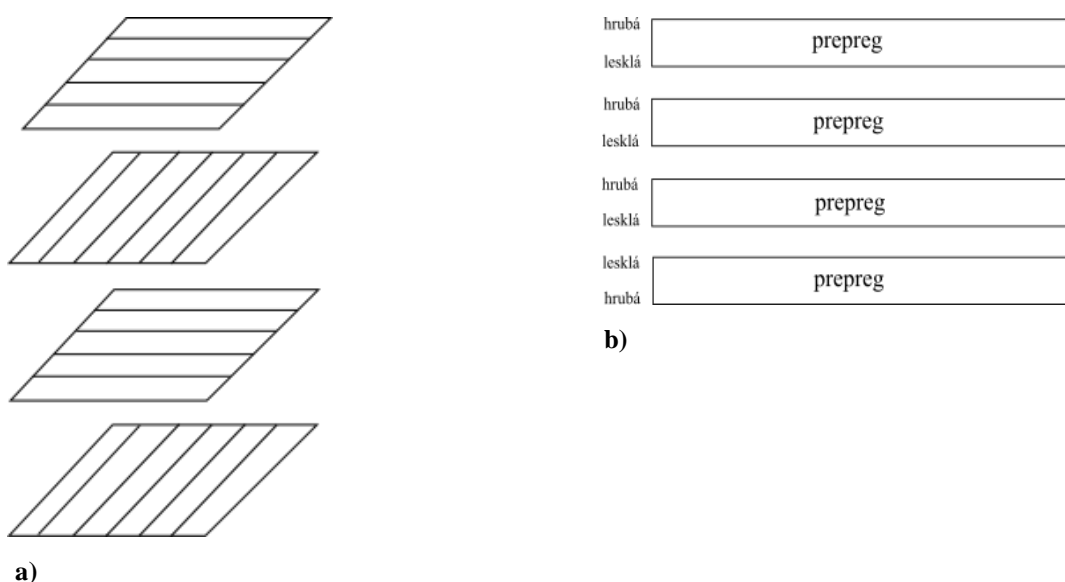
2.1 Příprava vzorků

Při přípravě vzorků kompozitních materiálů byly použity pouze prepregy z důvodu snazšího zpracování výsledného kompozitního materiálu. Použité prepregy byly dodány několika výrobci s různým typem výztuže, aby byl provedený experiment co nejvíce komplexní a bylo dále možné porovnávat co nejvíce naměřených dat, ze kterých by bylo možné prokázání vlivu zakomponovaných nanovláken. Konkrétně byly použity prepregy od výrobců Isovolta (prepreg s obchodním názvem Calmicaglas), Cogebi (prepreg s obchodním názvem Relanex, Remikakit) a Nippon Rika (prepreg s obchodním názvem Rikamicapreg G355H). Relanex, Calmicaglas a Rikamicapreg G355H jsou skloslídové prepregy tvořené epoxidovou pryskyřicí, výztuží ze skleněných vláken a slídou pro lepší elektroizolační vlastnosti. Remikakit je prepreg bez vláknové výztuže, který je tvořen pouze epoxidovou pryskyřicí a slídou. Fotografie znázorňující odlišnosti ve struktuře používaných prepregů umístěných pod mikroskopem jsou uvedeny Obr. 15. Používaná nanovlákná byla vyrobena z polyamidu 6. U všech vzorků s nanovlákný byla použita plošná hmotnost nanovláken $1,9 \text{ g/m}^2$. Polyamidová nanovlákná byla vybrána z toho důvodu, že polyamid 6 je materiál, který disponuje dobrými dielektrickými vlastnostmi a dobrou tepelnou odolností, takže ani vlivem vytvrzování kompozitního materiálu při vysoké teplotě nedojde k jejich tavení.

Před samotným zakomponováním nanovlákné složky do kompozitních materiálů, bylo důležité nejprve vyrobit referenční vzorky, které nanovlákná neobsahovaly. To bylo učiněno za účelem pozdějšího porovnání naměřených výsledků a zjištění vlivu nanovláken na vlastnosti koncového materiálu.

2.1.1 Příprava referenčních vzorků

Referenční vzorky, tj. vzorky bez zakomponovaných nanovláken, byly vyráběné seskládáním prepregů a vylisováním materiálu v hydraulickém lisu s vyhřívanými plotnami. Jelikož prepregy musí být uchovávány před použitím vždy v chladu z důvodu postupného dotvrzování již částečně vytvrzené pryskyřice za tepla, což vede k jejich znehodnocení, musely být prepregy několik hodin před výrobou vyjmuty z mrazničky, kde byly uchovávány při teplotě přibližně $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Několik hodin před lisováním musely být prepregy z mrazničky vyjmuty, aby byl zajištěn dostatek času k vyrovnání teplot a nedošlo ke srážení vlhkosti. U prepregů, které obsahovaly krycí fólii na částečně vytvrzené pryskyřici, musela být tato fólie před dalším zpracováním odstraněna (Obr. 14a). Poté byl první list prepregu umístěn na teflonový podklad, který měl následně zabraňovat rozlití pryskyřice na plotny lisu při dalším postupu. Na spodní prepreg byly vrstveny další prepregy. Pokud všechny použité prepregy obsahovaly výztuž vlákny, tak byly na sebe kladeny vždy pootočené o 90 ° , aby na sebe byly směry osnov vláknové výztuže kolmé a výztuž tak směřovala do dvou směrů viz Obr. 13a. Bylo také dodržované kladení prepregů na sebe podle Obr. 13b, jelikož prepreg má vždy hrubou a lesklou stranu. Toto bylo dodržováno, aby byly všechny vzorky srovnatelné. Při přípravě vzorků byly využity čtyři prepregy.



Obr. 13 – Znázornění skládání prepregů: a) Natočení prepregů o 90 ° ; b) Vrstvení prepregů

Po každé další vrstvě byl sendvič prepregů stlačen válečkem, aby byly mezi prepregy eliminovány vzduchové mezery a aby bylo zajištěno alespoň částečné dočasné spojení prepregů a vrstvy se nemohly při vkládání do hydraulického lisu vzájemně posunout. V den přípravy kompozitních materiálů byly vždy připravovány a lisovány dva vzorky, aby byl plně využit hydraulický lis. Po navrstvení prepregů byly prepregové sendviče v teflonové fólii vloženy do lisu a do každého rohu byly vloženy distanční podložky, aby byla zajištěna přibližně konstantní tloušťka kompozitního materiálu a vlastnosti materiálů mohly být dále objektivně porovnávány. Na spodní vzorek pak byla položena ocelová deska, která zajistila oddělení od materiálu lisovaného nad ním (Obr. 14b).

Hydraulický lis (Obr. 14c) byl poté dotažen na lehký dotyk materiálů k vyhřívaným plotnám a byl zapnut program vyhřívání. Po zapnutí vyhřívání, je automaticky postupně zvyšována teplota vyhřívání ploten lisu až na teplotu 100 °C. Na teplotě 100 °C je setrváno 5 minut a po uplynutí této doby začne program zvyšovat teplotu ploten na 165 °C. V okamžiku začátku nárůstu teploty ze 100 °C byl na lisu nastaven tlak přibližně 65 kN.

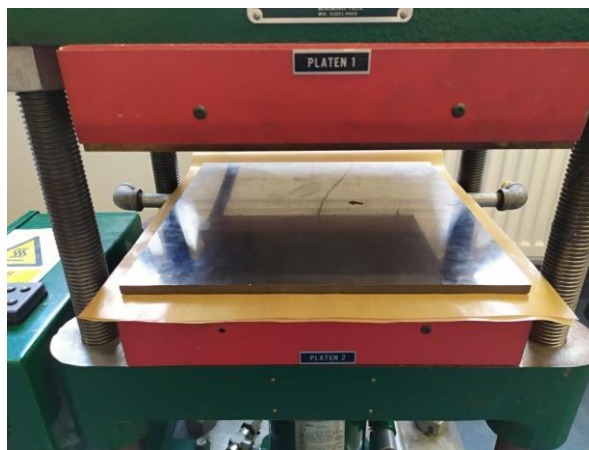
Vytvrzovací proces trval 3 h při již zmiňované teplotě 165 °C a tlaku 65 kN a poté byly vzorky v lisu ponechány do rána následujícího dne, kdy již došlo k postupnému vychladnutí ploten lisu. Po vyjmutí z lisu byly vzorky ihned označeny, který byl na vrchní a který na spodní pozici v lisu. Jelikož při lisování došlo k vytlačení určitého množství pryskyřice, která byla roztavena a roztekla se na teflonové fólie, tak musela být ze vzorků nejprve očištěna a poté mohly být vzorky důkladněji popsány (Obr. 14d). Vzorky také byly rozměřeny, aby z každého vyrobeného kompozitního materiálu vznikly 4 vzorky o rozměru 10 x 10 cm (Obr. 21a,b). Po rozměření a rozkreslení byly vzorky nastříhány na pákových nůžkách. Při stříhání bylo zjištěno mírné rozlaminování kolem hran vzorků. U dalšího vzorku stejného materiálu bylo proto přistoupeno k nařezání materiálu pilou s diamantovým kotoučem. Bylo zjištěno, že nařezání situaci mírného rozlaminování neřešilo a bylo též časově mnohem náročnější, a proto bylo pro všechny vzorky nadále používáno dělení pákovými nůžkami. Po popsání a rozdělení na jednotlivé vzorky byly materiály připraveny k měření.

Zkušebně byly vyrobeny i 2 vzorky s přidanou skleněnou tkaninou mezi prepregy, které z výroby neměly vláknovou výztuž. U jejich výroby se předchozí postup lišil pouze tím, že byla mezi prepregy vložena výztuž a na ní byl kladen další prepreg. U jednoho

vzorku byla použita pouze jedna vrstva skleněné výztuže, která byla vložena mezi dva prostřední prepregy. U druhého vzorku byly vrstvy skleněné výztuže vloženy mezi každý prepreg, což graficky znázorňuje Obr. 18. Lisování samotných prepregů bez vláknové výztuže (Remikakit) se nepodařilo provést, protože pokaždé došlo k sesednutí materiálu a izolační vrstva slídy obsažená v prepregu nebyla ve výsledku konzistentní, a tudíž výrobek neodpovídal požadavkům.



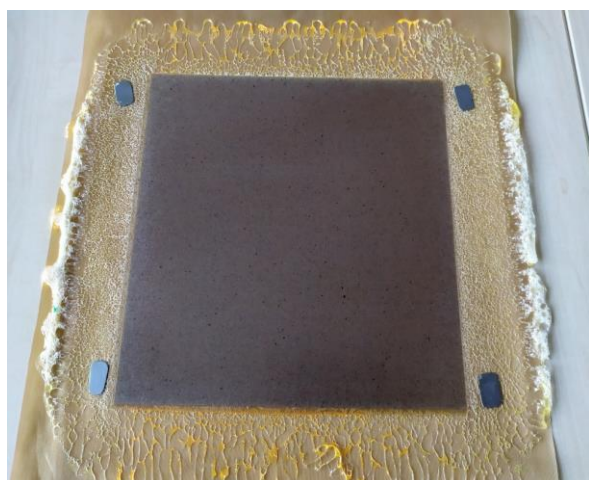
a)



b)

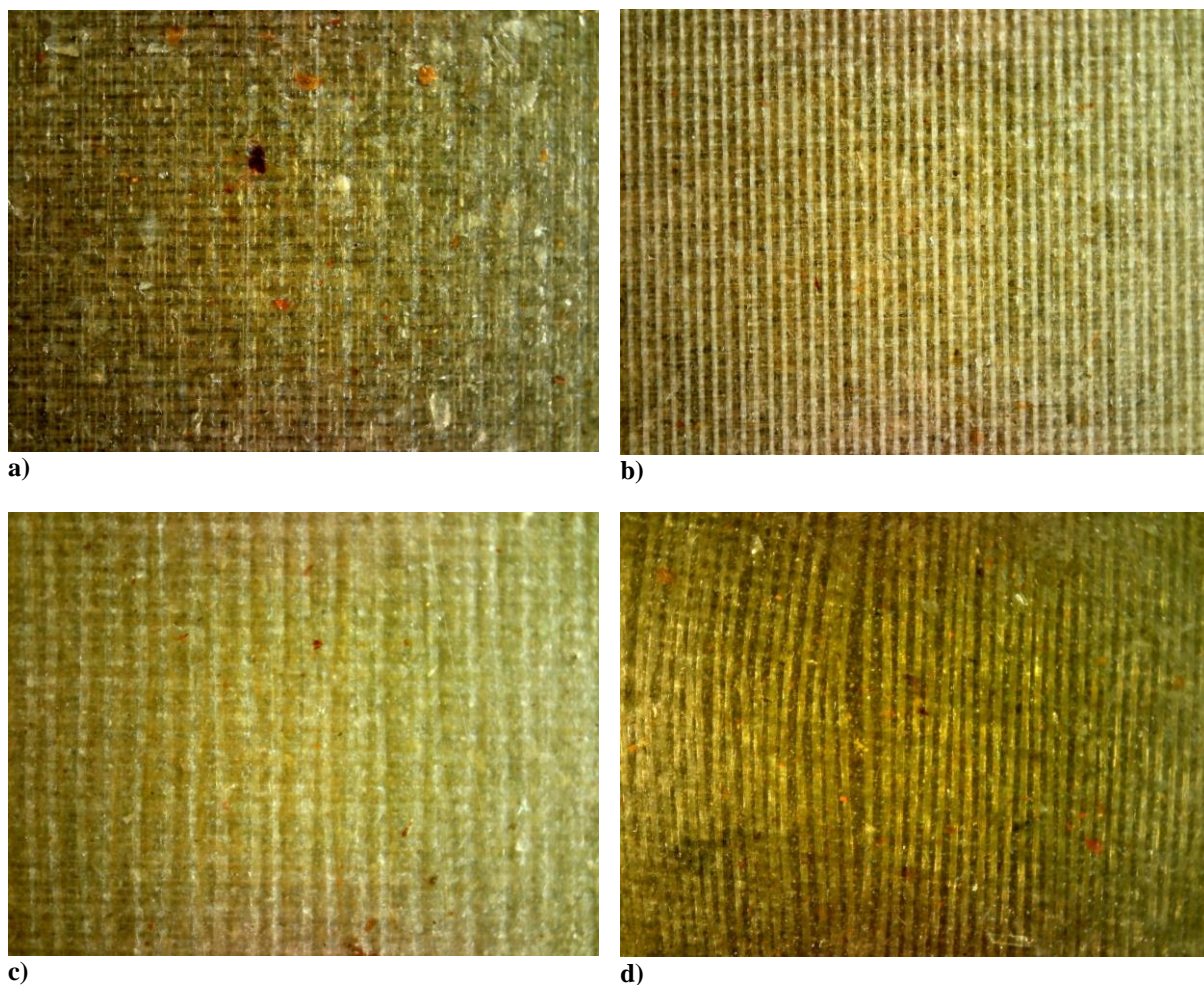


c)



d)

Obr. 14 – Postup výroby vzorků: a) Prepregy s krycí fólií před lisováním; b) Detail vložení spodního kompozitu a ocelové oddělovací desky; c) Hydraulický lis; d) Kompozitní materiál po vylisování



Obr. 15 – Záběry jednotlivých vylisovaných druhů prepregů pod mikroskopem: a) Calmicaglas, b) Relanex, c) Rikamicapreg G355H, d) Remikakit s vloženými skleněnými vlákny

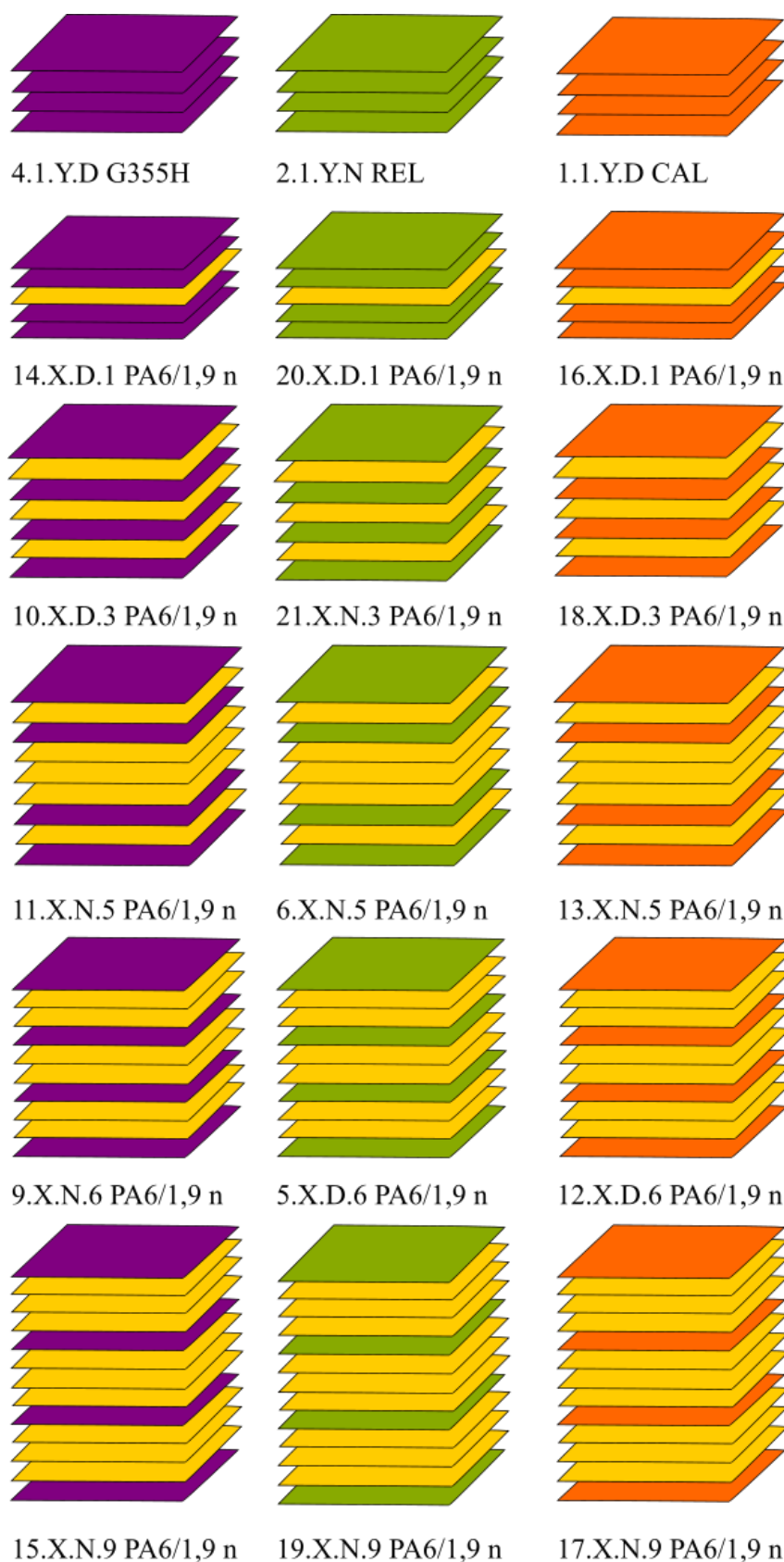
2.1.2 Příprava vzorků s nanovlákný

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, pro výrobu kompozitních materiálů s nanovlákný byla použita nanovlákná vždy o stejné gramáži. Jelikož se jednalo o experimentální přípravu vzorků s cílem zjistit změnu užitných vlastností kompozitního materiálu způsobenou přidáním nanovláken, tak bylo nutné vyrobit co nejvíce kombinací jednak založených na odlišných typech prepregů, ale také s různým množstvím vrstev vložených nanovláken. Dodržením stejných materiálových skladeb pro vzorky s různými materiály prepregů bylo dosaženo toho, že bylo možné porovnávat nejen daný vzorek s nanovlákný vůči své referenci, ale bylo možné také porovnávat různé materiály o stejné struktuře mezi sebou. Následující Obr. 16 a Obr. 18 ukazují různé použité způsoby vkládání nanovláken mezi různé prepregy a na Obr. 17 a Obr. 19 je poté legenda barev použitých pro odlišení jednotlivých materiálů. V tabulce (Tab. 1) jsou uvedena jednotlivá značení materiálů a jejich materiálové struktury.

Označení vzorků s nanovlákný bylo zvolené jinak než pro referenční vzorky, aby obsahovalo co nejvíce užitečných informací o vzorku a zároveň bylo na první pohled patrné, že se jedná o vzorek s nanovlákný a nemohlo nedopatřením dojít k záměně. Ukázka značení je na Obr. 21a,b. V levém horním rohu bylo zvoleno číselné označení, kdy první číslice znamená o kolikátý vyrobený vzorek se jedná, druhá číslice znamená, z jaké části vylišovaného kompozitu daný vzorek je (1-4). Na třetím místě pak je písmeno (D nebo N), které značí, na jaké pozici v lisu byl daný kompozitní materiál vyráběn (dole nebo nahoře). Nejdůležitější číslicí je číslice čtvrtá, která označuje počet vrstev nanovláken v daném vzorku. V pravém horním rohu byla umístěna informace o typu nanovláken a použité gramáži. V pravém dolním rohu pak bylo umístěno značení “nano“, aby bylo na první pohled jasné, že jde o vzorek s nanovlákný.

Tab. 1 – Přehled materiálových skladeb a jejich kódové označení

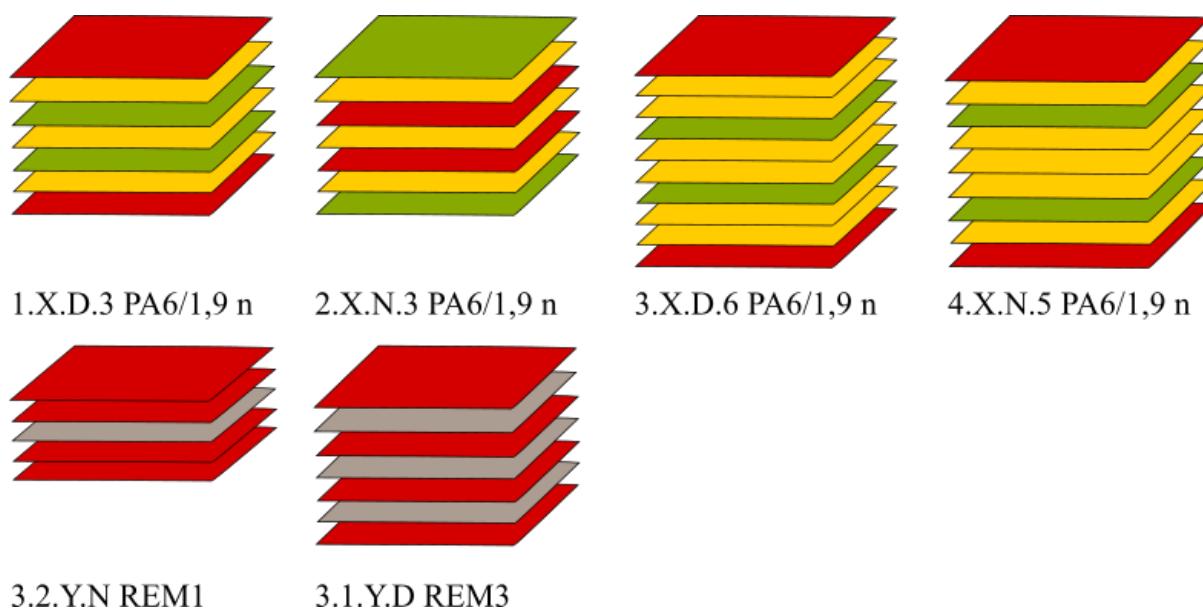
materiálová skladba	označení	popis skladby kompozitního materiálu
Relanex (Rel)	2.1.Y.N REL	4x Relanex (referenční vzorek)
Remikakit (Rem1)	3.2.Z.N REM1	Rem-sklo-Rem-sklo-Rem-sklo-Rem (referenční Remikakit)
Remikakit (Rem3)	3.1.Z.D REM3	Rem-Rem-sklo-Rem-Rem (referenční Remikakit)
Calmicaglas (Cal)	1.2.Y.D CAL	4x Calmicaglas (referenční vzorek)
Rikamicapreg (GH)	4.1.1.D G355H	4x Rikamicapreg (referenční vzorek)
Rel-Rel-n-Rel-Rel	20.1.D.1 PA6/1.9 nano	Relanex s nanovlákný 1 vrstva
Rel-n-Rel-n-Rel-n-Rel	21.1.N.3 PA6/1.9 nano	Relanex s nanovlákný 3 vrstvy
Rel-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rel	5.1.D.6 PA6/1.9 nano	Relanex s nanovlákný 6 vrstev
Rel-n-Rel-3n-Rel-n-Rel	6.1.N.5 PA6/1.9 nano	Relanex s nanovlákný 5 vrstev
Rel-3n-Rel-3n-Rel-3n-Rel	19.1.N.9 PA6/1.9 nano	Relanex s nanovlákný 9 vrstev
Rel-n-Rem-n-Rem-n-Rel	2.1.N.3 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 3 vrstvy
Rem-n-Rel-n-Rel-n-Rem	1.1.D.3 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný (opačné pořadí) 3 vrstvy
Rem-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rem	3.1.D.6 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 6 vrstev
Rem-n-Rel-3n-Rel-n-Rem	4.1.N.5 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 5 vrstev
Cal-Cal-n-Cal-Cal	16.1.D.1 PA6/1.9 nano	Calmicaglas s nanovlákný 1 vrstva
Cal-n-Cal-n-Cal-n-Cal	18.1.D.3 PA6/1.9 nano	Calmicaglas s nanovlákný 3 vrstvy
Cal-2n-Cal-2n-Cal-2n-Cal	12.1.D.6 PA6/1.9 nano	Calmicaglas s nanovlákný 6 vrstev
Cal-n-Cal-3n-Cal-n-Cal	13.1.N.5 PA6/1.9 nano	Calmicaglas s nanovlákný 5 vrstev
Cal-3n-Cal-3n-Cal-3n-Cal	17.1.N.9 PA6/1.9 nano	Calmicaglas s nanovlákný 9 vrstev
GH-GH-n-GH-GH	14.1.D.1 PA6/1.9 nano	Rikamicapreg s nanovlákný 1 vrstva
GH-n-GH-n-GH-n-GH	10.1.D.3 PA6/1.9 nano	Rikamicapreg s nanovlákný 3 vrstvy
GH-2n-GH-2n-GH-2n-GH	9.1.N.6 PA6/1.9 nano	Rikamicapreg s nanovlákný 6 vrstev
GH-n-GH-3n-GH-n-GH	11.1.N.5 PA6/1.9 nano	Rikamicapreg s nanovlákný 5 vrstev
GH-3n-GH-3n-GH-3n-GH	15.1.N.9 PA6/1.9 nano	Rikamicapreg s nanovlákný 9 vrstev



Obr. 16 – Přehled použitých struktur skládání kompozitních materiálů

■ Calmicaglas
 ■ Rikamicapreg
 ■ Relanex
 ■ Nanovlákná 1,9 g/m²

Obr. 17 – Legenda první části materiálových skladeb



Obr. 18 – Další pokusné materiálové skladby kompozitních materiálů

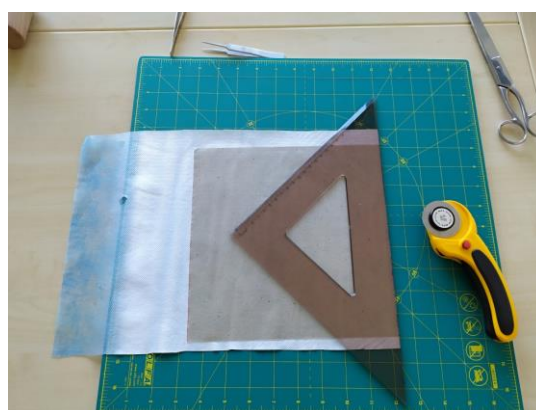
■ Remikakit ■ Relanex ■ Skleněná vlákna ■ Nanovlákná 1,9 g/m²

Obr. 19 – Legenda druhé části materiálových skladeb

Samotná výroba kompozitů se zakomponovanou nanovláknennou složkou se příliš nelišila od výroby referenčních vzorků. Hlavní rozdíl ve výrobě bylo přidání vrstev nanovláken polyamidu 6 mezi prepregy. Nanovlákná byla dodána na podkladovém netkaném materiálu namotána na roli viz Obr. 20a. Bylo tedy nutné jejich nařezání na rozměry prepregů a poté oddělení od jejich podkladového materiálu. Při zpracování nanovláken jsem došel k závěru, že jejich stříhání není vhodné, jelikož mají nanovlákná tendenci lepit se na použitý nástroj. Zvolil jsem proto řezací kolečko (viz Obr. 20b), čímž byl tento problém ve velké míře omezen. Dále jsem došel k závěru, že oddělení vláken od podkladového materiálu je vhodné provádět až po uložení na prepreg. V opačném případě se oddělená vlákna zkrabatila a nebylo by poté dosaženo konzistentně rozložené nanosložky, což by zcela jistě ovlivnilo zkoumané vlastnosti a znehodnotilo vzorek. Byl proto zvolen postup oddělení podkladové netkané textilie pinzetou po uložení na prepreg Obr. 20c. Další problém, který se při přidávání nanovláknenné složky vyskytl, byl ten, že pokud se pokládalo více vrstev nanovláken na sebe, tak k sobě měly tyto vrstvy problém přilnout. Tento problém byl částečně vyřešen přejetím vrstev dřevěným válečkem, na který se nanovlákná nepřichytávala a zároveň k sobě částečně přilnula. Po vytvoření kompletní sestavy byl „prepregový sendvič“ (Obr. 20d) vložen do lisu a další proces byl shodný jako u výroby referenčních vzorků.



a)



b)

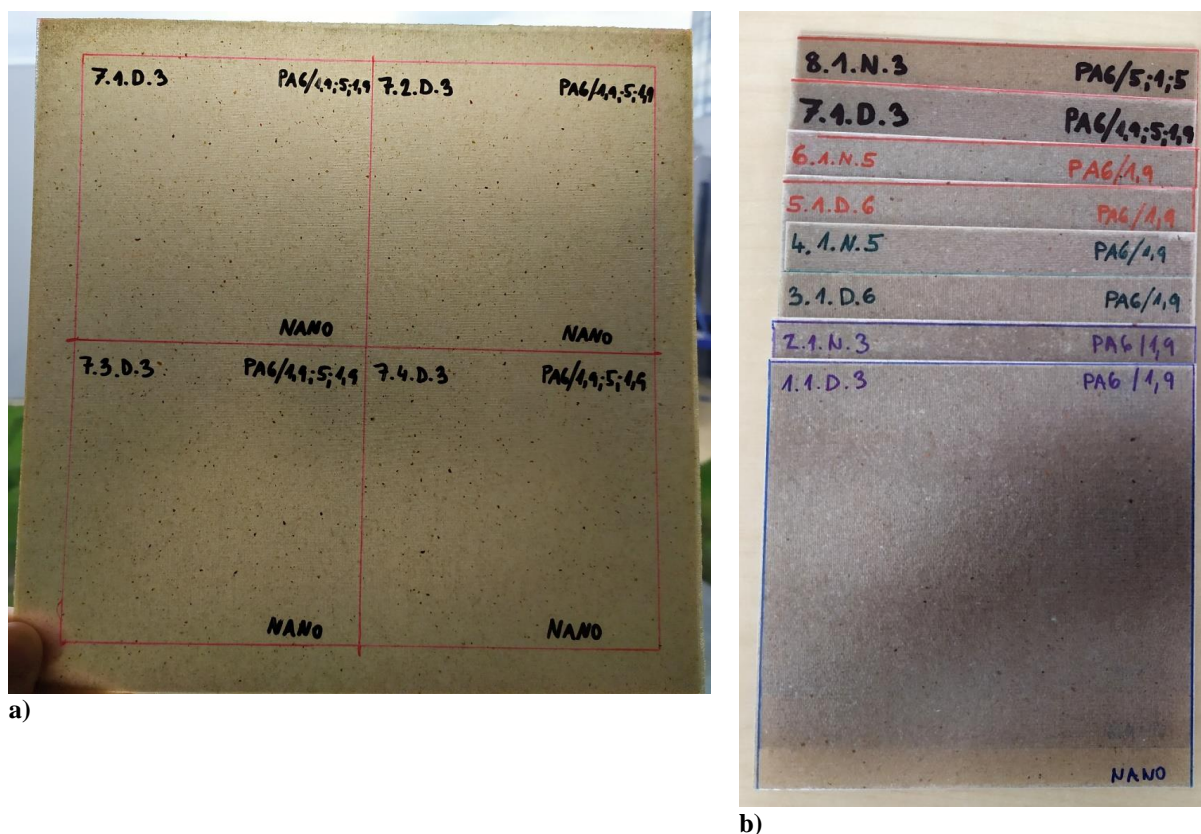


c)



d)

Obr. 20 – Aplikace nanovláken: a) Nanovláknna na podkladovém materiálu; b) Použité vybavení na řezání nanovláken; c) Aplikace nanovláknenné složky; d) Prepreg s nanovláknny připravený k lisování



Obr. 21 – Hotový kompozitní materiál: a) před nastřiháním na jednotlivé vzorky; b) po nastřihání

2.2 Měření vybraných elektrických parametrů

Po výrobě jednotlivých verzí kompozitních materiálů byla provedena měření vybraných elektrických vlastností vzorků. Jednalo se o měření vnitřní a povrchové rezistivity vzorků a měření elektrické pevnosti.

2.2.1 Měření vnitřní a povrchové rezistivity

Nejprve bylo realizováno měření vnitřní a povrchové rezistivity jednotlivých vzorků, protože se jedná o nedestruktivní metodu měření (oproti měření elektrické pevnosti) a vzorky tedy mohly být použity i dále pro další měření.

Před začátkem měření musely být vzorky ponechány alespoň 12 hodin ve zkratovacích knížkách (Obr. 22c), kde se ze vzorků odvedl případný naakumulovaný náboj, který by ovlivnil výsledky měření. Po uplynutí stanovené doby ve zkratovacích knížkách byl vzorek vložen do elektrodového systému, přičemž osoba vkládající vzorek měla uzemňovací náramek, aby nedošlo k případnému nabití vzorku. Po vložení do elektrodového systému bylo přepínačem zvoleno uspořádání elektrod buď pro měření povrchové, nebo vnitřní

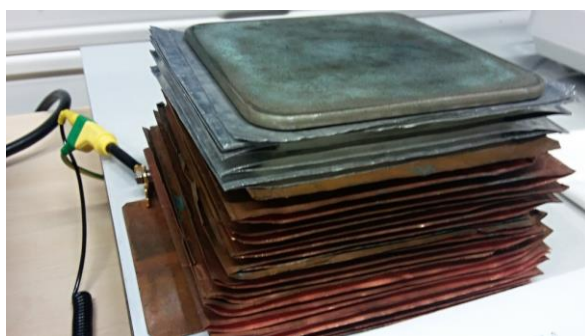
rezistivity. Elektrodotový systém byl připojen k elektrometru s napět'ovým zdrojem a k ovládacímu PC. Vnitřní rezistivita byla měřena při napětí 1000 V a pro měření povrchové rezistivity bylo zvoleno jako dostatečné napětí 500 V. Pro měření vnitřní rezistivity byl zvolen program 10 minut vybíjení vzorku, 30 minut měření při připojeném napětí a 5 minut opětovného vybíjení. Při měření povrchové rezistivity se tyto časy lišily a konkrétně byl program nastaven na 5 minut vybíjení vzorku, 1 minuta měření při připojeném napětí a 1 minuta opětovného vybíjení. Pro měření byl použit elektrodotový systém Keithley 8009 (Obr. 22a,b) a přesný elektrometr se zabudovaným napět'ovým zdrojem Keithley 6517A (Obr. 22d). U každého vzorku před měřením vnitřní rezistivity musela být změřena tloušťka mikrometrem, jelikož tento rozměr je pro následný výpočet potřebný. Protože tento parametr se může v různých místech materiálu lehce lišit, tak byla tloušťka změřena na pěti místech vzorku a poté byla hodnota tloušťky zprůměrována. Konkrétně byla tloušťka měřena v každém rohu vzorku materiálu a uprostřed. Od každého materiálu byly k měření připraveny 4 vzorky a naměřené hodnoty rezistivit byly poté zprůměrovány.



a)



b)



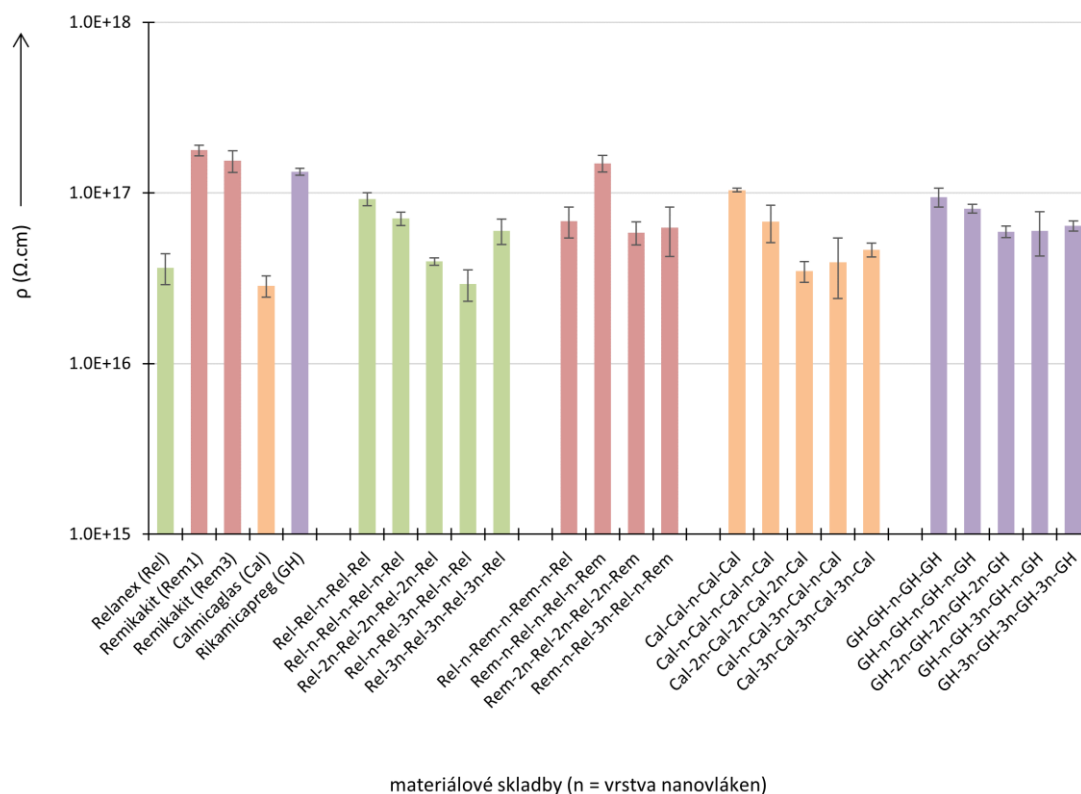
c)



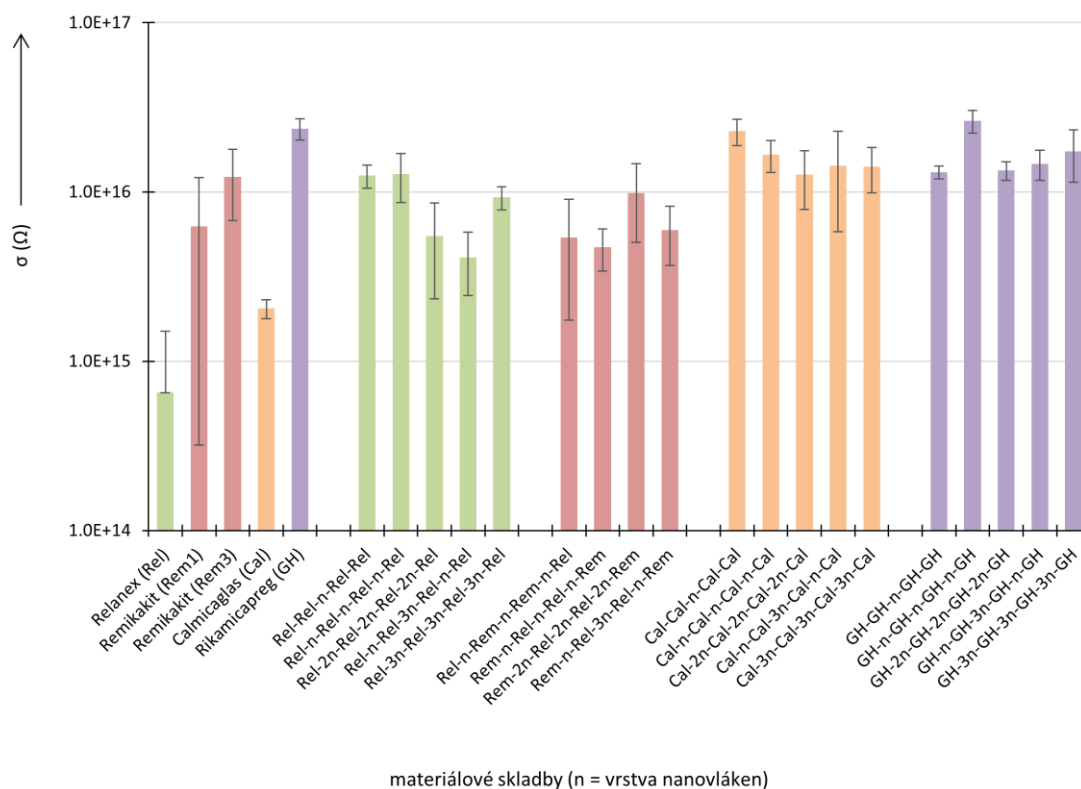
d)

Obr. 22 – Přístrojové vybavení použité pro měření rezistivit: a) Elektrodotový systém; b) Elektrodotový systém uvnitř; c) Zkratovací knížka; d) Elektrometr

Naměřené hodnoty rezistivit



Obr. 23 – Vyhodnocení měření vnitřní rezistivity (se směrodatnými odchylkami)



Obr. 24 – Vyhodnocení měření povrchové rezistivity (se směrodatnými odchylkami)

Z grafů (Obr. 23 a Obr. 24) lze vyvodit srovnání hodnot vnitřní a povrchové rezistivity pro jednotlivé měřené materiály. U povrchové rezistivity (Obr. 24) nebyl očekáván zřetelný nárůst vzhledem k tomu, že rezistivita měřeného povrchu materiálu se nezmění ani po zakomponování nanosložky, případně skleněné tkaniny. Zakomponovaná složka je uvnitř materiálu, a tudíž by neměla mít na povrchovou rezistivitu vliv, nicméně z měření vyšel nárůst této rezistivity zhruba o jeden řád. Tento jev je nejvíce zřejmý pro materiály Calmicaglas a Relanex. Při bližším pohledu je zřejmé, že referenční materiál Relanex (Rel) měl hodnotu povrchové rezistivity $6,53E+14 \Omega$ a při zprůměrování hodnot povrchové rezistivity vzorků Relanexu s nanovláknny vychází hodnota $8,84E+15 \Omega$. Zde je tedy vidět nárůst povrchové rezistivity v rámci přibližně jednoho řádu. Při provedení stejné operace pro materiál Calmicaglas, kde je hodnota povrchové rezistivity referenčního vzorku $2,05E+15 \Omega$, tak vyjde, že zprůměrovaná hodnota povrchové rezistivity pro vzorky Calmicaglasu s nanovláknny je $1,61E+16 \Omega$. Z tohoto plyne, že nárůst u materiálu Calmicaglas je také v rámci jednoho řádu. Proč se objevil nárůst u měření povrchové rezistivity, když by změna vnitřní struktury neměla mít na toto měření vliv, není zcela jasné. Jedno z možných vysvětlení je, že povrchové vrstvy materiálu Calmicaglas a Relanex mají nižší elektrickou vodivost než jejich vnitřní vrstvy a proud tak částečně tekl mezi elektrodami s určitou hloubkou vniku do vzorku. Po přidání nanovláken do vzorku se pak objevila překážka proudu i v cestách vnitřkem vzorku, a tudíž došlo k nárůstu změřené povrchové rezistivity u těchto materiálů. Jedná se však pouze o teorii. Další možností je ovlivnění chemické struktury pryskyřice vložení polyamidových nanovláken, ke kterému mohlo dojít při vytvrzování při vysoké teplotě ve vyhřívaném lisu, přičemž by podle další teorie mohlo dojít k uvolnění látek z polyamidových vláken, a tudíž k ovlivnění pryskyřice z chemického hlediska. U ostatních materiálů nedošlo při měření povrchové rezistivity k výrazným rozdílům mezi hodnotami vzorků s nanovláknny a vzorků referenčních.

Z grafu povrchové rezistivity je také patrné, že materiál s nejvyšší hodnotou povrchové rezistivity pro referenční vzorek je Rikamicapreg G355H. Po zakomponování nanovláken Rikamicapreg G355H stále dosahuje nejvyšší hodnoty, ta se sice příliš neliší od hodnot pro materiál Calmicaglas, nicméně u materiálu Rikamicapreg G355H byly výrazně menší hodnoty rozptylu hodnot, tudíž i při uvažování záporné směrodatné odchylky by hodnoty pro G355H vyšly stále nejvyšší.

Z měření vnitřní rezistivity (Obr. 23) kompozitních materiálů lze vyvodit hned několik závěrů. Z naměřených hodnot je patrný nárůst hodnot vnitřní rezistivity u vzorků s nanovlákný oproti referenčním vzorkům. Tento nárůst není výrazný a objevil se pouze pro vzorky z materiálů Relanex a Calmicaglas. Při zprůměrování hodnot vnitřní rezistivity u vzorků Relanexu s nanovlákný vyjde hodnota $5,48E+16 \Omega \cdot \text{cm}$, přičemž hodnota u referenčního vzorku je $3,65E+16 \Omega \cdot \text{cm}$. Při provedení stejné operace u vzorku Calmicaglasu vyjde zprůměrovaná hodnota vzorků s nanovlákný $5,85E+16 \Omega \cdot \text{cm}$ a hodnota referenčního vzorku je $2,86E+16 \Omega \cdot \text{cm}$. Z těchto hodnot vnitřní rezistivity je zřejmé, že ač se jedná o nárůst, tak velikost nárůstu je zanedbatelná. Naopak u materiálu Rikamicapreg G355H došlo k mírnému poklesu hodnot vnitřní rezistivity.

Další výsledek, který je z grafu a hodnot měření vnitřní rezistivity patrný je ten, že u všech tří materiálů (Relanex, Rikamicapreg G355H, Calmicaglas) byl stejný pozorovatelný trend vývoje hodnot vnitřní rezistivity s navyšováním vrstev nanovláken ve vzorku. Dále budou srovnávány jen vzorky různých materiálů s nanovlákný mezi sebou, nikoliv s referenčními vzorky. Vzorky, které byly připravené kombinací prepregů Remikakitu a Relanexu není možné do tohoto srovnání zahrnout, protože se nejedná o homogenní strukturu jednoho materiálu a závěry pak tedy nemusí být platné i pro tuto kombinaci.

Při porovnání jednotlivých materiálů je zřejmé, že nejvyšší hodnotu vnitřní rezistivity vykazuje vždy vzorek s pouze jednou vrstvou nanovláken uprostřed vzorku. S postupným zvyšováním počtu vrstev nanovláken vnitřní rezistivita klesá a nejnižší z naměřených hodnot je pak u vzorků se třemi vrstvami nanovláken uprostřed a jednou vždy mezi krajními prepregy (zobrazení viz Obr. 16 např. 11.X.N.5 PA6/1,9 nano). U vzorků s nejvyšším počtem nanovlákných vrstev (9 vrstev, děleno po 3 mezi každým prepregem) naopak již není zaznamenán pokles, ale opětovný nárůst hodnoty vnitřní rezistivity. Nárůst je malý, ale tyto vzorky svou rezistivitou překonají u všech tří sledovaných materiálů hodnoty rezistivity předchozích dvou skladeb, tj. ty, kde je zastoupeno dohromady 6 vrstev nanovláken dělených vždy po 2 a ty, kde je dohromady 5 vrstev nanovláken, přičemž 3 jsou ve středu a po jedné vrstvě mezi krajními prepregy. Toto zjištění prokazuje, že s narůstajícím počtem vrstev nanovláken nenarůstá vnitřní rezistivita měřeného vzorku. Největší efekt má použití pouze jedné vrstvy nanovláken uprostřed vzorku. Možné vysvětlení tohoto zjištění je to, že s narůstajícím počtem nanovláken je struktura stále více nehomogenní a je zde prostor pro vznik vzduchových

bublinek. Vzduchové bublinky by měly být nanovláknny rozptýleny na menší bublinky, ale předpoklad je ten, že jich ve výsledném materiálu vznikne více. Při pohledu zpět na výrobní postup by tato teorie mohla být potvrzena faktem, že při skládání prepregů bez nanovláken došlo k převážně bezproblémovému přilnutí (neplatí pro Rikamicapreg G355H, tam se jednalo o “suché“ prepregy, které nepřilnuly ani k sobě navzájem). Přičemž při použití nanovláken tato vlákna k prepregům nepřilnula a nebylo tak možné jejich dokonalé přilnutí již před vložením do lisu a případná eliminace vzduchových bublin. Tato teorie by byla možná ověřit důkladnější a časově i finančně náročnější analýzou vyrobených vzorků, případně by ji bylo možné potvrdit či vyvrátit výrobou stejných vzorků s použitím autoklávu, kde by byla přítomnost těchto bublinek eliminována.

Ze získaných hodnot vnitřní rezistivity je možné vyvodit, že s ohledem na vnitřní rezistivitu je nejlepší materiál Remikakit, který dosáhl nejvyšších hodnot rezistivity. Tento materiál však není možné aplikovat v základním stavu všude, protože neobsahuje výztuž, a tudíž dochází k jeho sesedání při lisování. V průmyslu pro eliminaci kroku přidání výztuže do tohoto základového materiálu je vhodné volit materiál již vhodný pro danou aplikaci a jako nejvhodnější materiál s výztuží už od výrobce vychází Rikamicapreg G355H. Po zakomponování nanovláken do základních materiálů vychází hodnoty rezistivit pro srovnání jednotlivých materiálů velice podobné a rozdíly jsou velice minimální.

2.2.2 Měření elektrické pevnosti

Jelikož je elektrická pevnost velice důležitým parametrem elektroizolačních materiálů, nemohla být při testování vzorků opomenuta. Jedná se o destruktivní zkoušku, která spočívá ve vystavení materiálu působení silného elektrického pole až do okamžiku, kdy dojde k průrazu elektroizolačního materiálu. Z důvodu destruktivní povahy musela být tato zkouška řazena až za ostatní nedestruktivní testy.

Elektrody použité pro měření elektrické pevnosti byly mosazné válcové o průměru 2 cm. Elektrody byly ponořeny v oleji, aby nemohlo dojít k nežádoucím přeskokům zionizovaným okolním prostředím jako v případě, že by se zkouška odehrávala na vzduchu (Obr. 25d). Elektrody byly umístěny společně s olejem v keramické nádobě ve VN laboratoři (Obr. 25b,c). Mezi elektrody byl vložen vzorek kompozitního materiálu, přičemž bylo dbáno na to, aby se v oleji pod ním neusadily vzduchové bubliny, které by měření

znehodnotily. Zároveň se také dbalo na to, aby byl materiál umístěn mezi elektrody s dostatečným odstupem elektrod od krajů materiálu, aby byla eliminována možnost přeskočení olejem mimo testovaný kompozitní materiál. Na ovládacím panelu SIMATIC OP17 (Obr. 25a) byla nastavena rychlost zvyšování napětí 1 kV/s. Po nastavení parametrů bylo spuštěno měření. Přístroj s nastavenou rychlostí náběhu zvyšoval hodnotu elektrického napětí až do průrazu materiálu. Při průrazu jsem odečetl průrazné napětí z displeje ovládacího panelu, které pak společně s již změřenou tloušťkou materiálu sloužilo k výpočtu elektrické pevnosti materiálu.



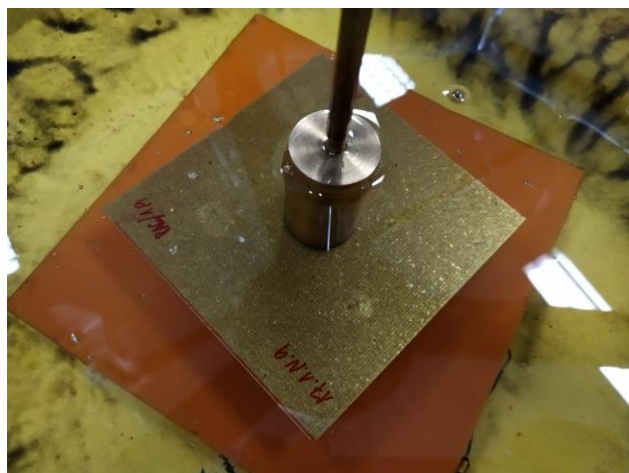
a)



b)



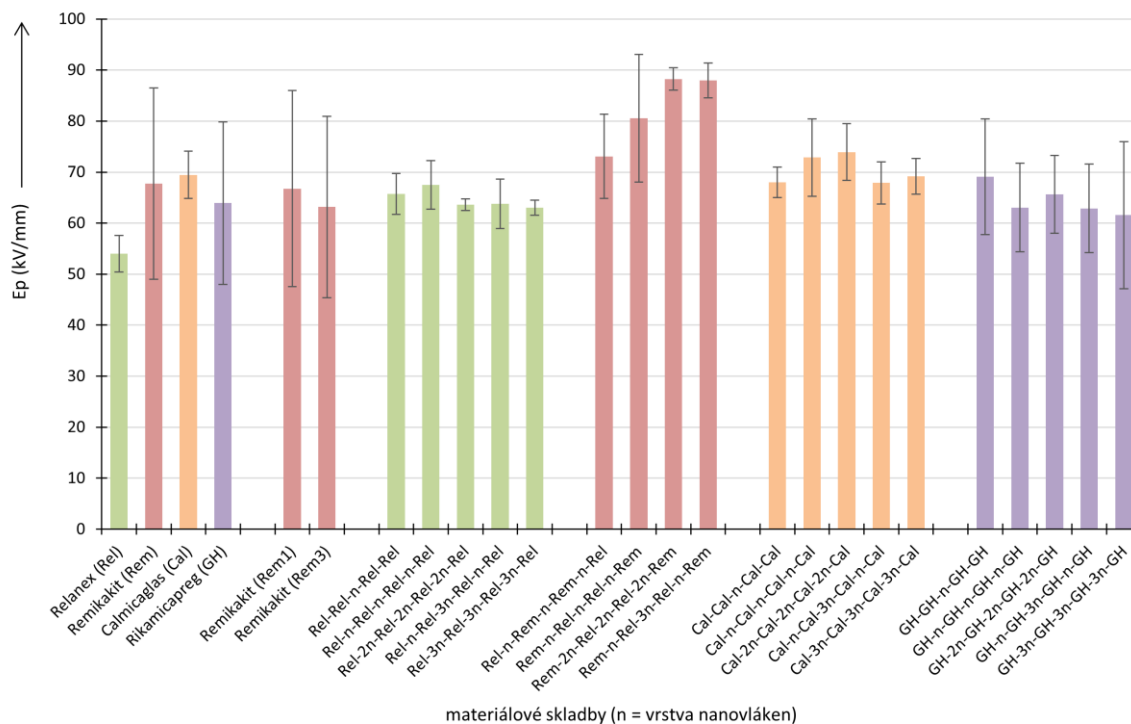
c)



d)

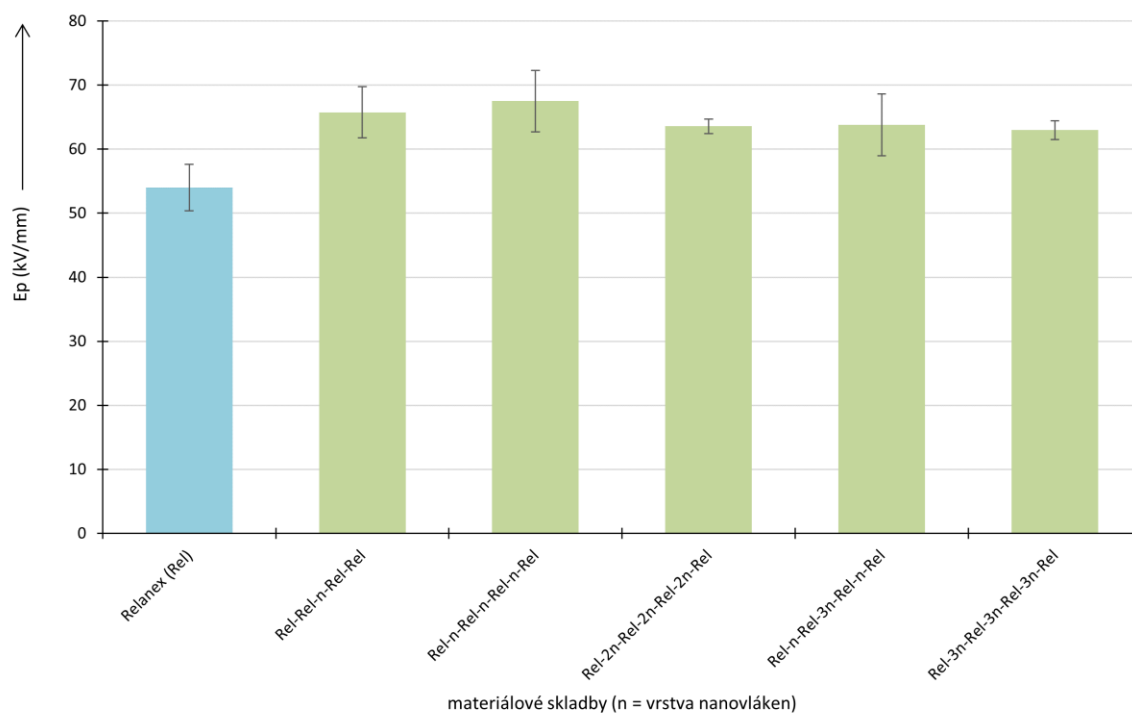
Obr. 25 – Přístrojové vybavení pro měření elektrické pevnosti: a) ovládací panel SIMATIC OP17; b) prostor vysokonapěťové laboratoře; c) detail vnitřního prostoru VN laboratoře s keramickou nádobou s olejem pro měření vzorků; d) vzorek v nádobě s olejem a elektrodami

Naměřené hodnoty elektrické pevnosti



Obr. 26 – Vyhodnocení měření elektrické pevnosti (se směrodatnými odchylkami)

Z výsledného grafu elektrické pevnosti (Obr. 26) porovnávaných vzorků je vidět, že při srovnání referenčních vzorků a vzorků s nanovlákný, tvořených stejnými materiály (prepregy), pro některé materiály nastal výraznější nárůst elektrické pevnosti a u jiných nedošlo k viditelnému nárůstu. K nárůstu elektrické pevnosti, který není zanedbatelný, došlo pouze u materiálu Relanex. Při porovnání referenčního vzorku materiálu Relanex (Rel) se průměrovanou hodnotou vzorků Relanexu s nanovlákný, tak vychází nárůst elektrické pevnosti ve prospěch vzorků s nanovlákný o hodnotu 10,72 kV, což není zanedbatelná hodnota. Grafický souhrn výsledků pouze pro vzorky tvořené prepregy Relanexu uvádí obrázek Obr. 27.



Obr. 27 – Graf porovnání hodnot elektrické pevnosti materiálu Relanex (referenční materiál modře)

K nárůstu elektrické pevnosti také došlo u vzorků, kde byla použita kombinace Relanexu a Remikakitu s nanovlákný, zde byl pozorován ještě výraznější nárůst, ať již oproti vzorkům Relanexu, či Remikakitu. U vzorků zahrnujících Remikakit byl ale obecně problém s velkým rozptylem hodnot při měření. Tento materiál i bez zakomponovaných nanovláken dosahoval příznivých hodnot elektrické pevnosti, nicméně vlivem rozptylu se při uvažování záporné směrodatné odchylky dostal pod hodnotu elektrické pevnosti referenčního materiálu Relanexu. Konkrétně toto nastalo pro vzorky Remikakit (Rem), Remikakit (Rem1) a Remikakit (Rem3). Velký rozptyl hodnot se týkal také vzorků z materiálu Rikamicapreg G355H. I zde se při uvažování záporné směrodatné odchylky pohybovala hodnota elektrické pevnosti tohoto referenčního materiálu pod hranicí elektrické pevnosti referenčního Relanexu přičemž pro referenční Relanex vycházela průměrná hodnota elektrické pevnosti nejnižší ze všech naměřených vzorků. Tento aspekt je důležitý, protože elektrickou izolaci je potřeba navrhovat tak, aby nedošlo k nežádoucímu průrazu, a proto je nutné uvažovat nejnižší hodnoty z rozptylu.

Z výsledků tohoto testu je ale možné vyvodit více závěrů. Například je z naměřených hodnot zřejmé, že do určitého počtu vrstev nanovláken nezávisí na jejich rozložení ve struktuře kompozitního materiálu. Toto zjištění dokazuje hned několik testovaných vzorků. Při srovnání vzorků označených Rel-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rel a Rel-n-Rel-3n-Rel-n-Rel,

kteřé byly oba tvořeny pouze prepregy materiálu Relanex a jejich jediná odlišnost byla ta, že vzorek Rel-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rel obsahoval 6 vrstev nanovláken, přičemž tyto byly rozložené po dvou vrstvách na sobě mezi 4 prepregy a vzorek Rel-n-Rel-3n-Rel-n-Rel obsahoval 5 vrstev nanovláken, které byly ve třech vrstvách uprostřed sendviče prepregů a mezi zbylými dvěma prepregy byly po jedné vrstvě viz Obr. 16. Průměrná hodnota elektrické pevnosti vzorku Rel-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rel byla 63,57 kV/mm a u vzorku Rel-n-Rel-3n-Rel-n-Rel byla tato hodnota 63,80 kV/mm. Obě hodnoty jsou si vzájemně tedy velice blízké a jejich rozdíl je jen v rámci desetin kV/mm, konkrétně 0,23 kV/mm. Stejný jev se objevuje u vzorků Rem-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rem a Rem-n-Rel-3n-Rel-n-Rem. Tyto vzorky mají stejnou strukturu, co se týká rozložení vrstev nanovláken v kompozitním materiálu, jejich odlišnost oproti předchozím vzorkům je ale ta, že se skládají ze dvou druhů prepregů. Konkrétně je každý tento vzorek kompozitu seskládán z prepregů Relanexu a Remikakitu. Pozice jednotlivých druhů prepregů byly dodrženy pro oba vzorky stejné, aby byla možnost dokonalého srovnání vlivu rozložení vrstev. Průměrná hodnota elektrické pevnosti vzorku Rem-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rem byla 88,23 kV/mm a hodnota u vzorku Rem-n-Rel-3n-Rel-n-Rem byla 87,95 kV/mm. Stejně jako v předchozím případě je rozdíl mezi naměřenými hodnotami elektrické pevnosti malý a pohybuje se též v desetinách kV/mm, konkrétně 0,28 kV/mm. Všechny výše porovnávané vzorky měly zakomponovány nanovlákná o stejné gramáži, a proto bylo možné přímé srovnání.

Další závěr plynoucí z tohoto měření je ten, že přidáním více vrstev nanovláken do struktury kompozitního materiálu nedochází k většímu efektu zvýšení hodnoty elektrické pevnosti vzorku. Tento závěr je patrný z porovnání hodnot průměrné elektrické pevnosti u vzorků Cal-2n-Cal-2n-Cal-2n-Cal a například vzorku Cal-3n-Cal-3n-Cal-3n-Cal. Oba vzorky jsou tvořeny čtyřmi prepregy stejného materiálu a liší se pouze v počtu vrstev nanovláken, kdy u jednoho jich je použito 6 a u druhého 9. Z hodnot vyplývá, že nedošlo k nárůstu elektrické pevnosti se zvyšujícím se počtem vrstev nanovláken, ale naopak došlo k mírnému poklesu. Konkrétněji je rozdíl 4,76 kV/mm, kdy vzorek Cal-2n-Cal-2n-Cal-2n-Cal dosahuje hodnoty elektrické pevnosti 73,91 kV/mm a vzorek s větším počtem vrstev nanovláken Cal-3n-Cal-3n-Cal-3n-Cal dosahuje hodnoty 69,15 kV/mm. Stejný trend poklesu lze pozorovat i u materiálů Relanex a Rikamicapreg G355H.

Z provedeného měření elektrické pevnosti, kromě vlivu zakomponování nanovláken do kompozitu, vplynuly i další užitečné informace. Z průměrných hodnot elektrických

pevností je patrné, že jsou i velké rozdíly mezi jednotlivými prepregy. Konkrétně při porovnání referenčních vzorků Remikakitu, Relanexu, Calmicaglasu a Rikamicapregu G355H vychází, že z hlediska elektrické pevnosti samostatný Relanex z ostatních zmíněných materiálů dosahuje nejnižší průměrné hodnoty elektrické pevnosti. Konkrétně je hodnota elektrické pevnosti pro referenční Relanex 54 kV/mm, pro Remikakit je to 67,76 kV/mm, pro Calmicaglas je hodnota 69,45 kV/mm a pro Rikamicapreg G355H je hodnota 63,93 kV/mm.

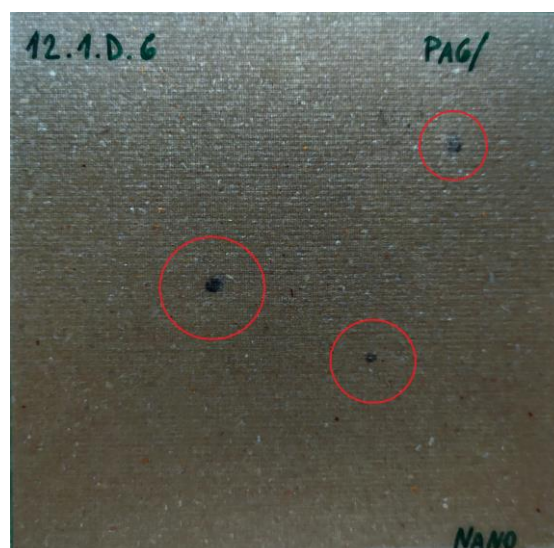
Rozdíl je také patrný při bližším prozkoumání průměrných hodnot elektrických pevností pro vzorky se stejným rozložením vrstev nanovláken, které se ale liší v materiálu použitých prepregů. Konkrétně toto srovnání lze provést například pro vzorky Rem-n-Rel-3n-Rel-n-Rem, Rel-n-Rel-3n-Rel-n-Rel, Cal-n-Cal-3n-Cal-n-Cal a GH-n-GH-3n-GH-n-GH. Rozložení i gramáž nanovláken je pro srovnávané vzorky stejná. Průměrná elektrická pevnost pro vzorek Rem-n-Rel-3n-Rel-n-Rem je 87,95 kV/mm, pro vzorek Rel-n-Rel-3n-Rel-n-Rel je hodnota 63,80 kV/mm, pro Cal-n-Cal-3n-Cal-n-Cal je hodnota 67,86 kV/mm a pro GH-n-GH-3n-GH-n-GH je hodnota 62,88 kV/mm. Zde je vidět veliký rozdíl v dosažených hodnotách elektrické pevnosti.

Při samotném měření byly zaznamenány i rozdíly v rozrušení různých materiálů při samotném průrazu. Na Obr. 28a,b jsou fotografie elektrických průrazů u materiálů Relanex (a) a Calmicaglas (b). Zde se jednalo o bodové průrazy izolačního materiálu téměř bez narušení materiálu okolo průrazu. Naopak u materiálu Rikamicapreg G355H došlo při průrazech k silnému rozrušení vzorku v okolí přiložené elektrody a poté až k bodovému průrazu (Obr. 28c,d).

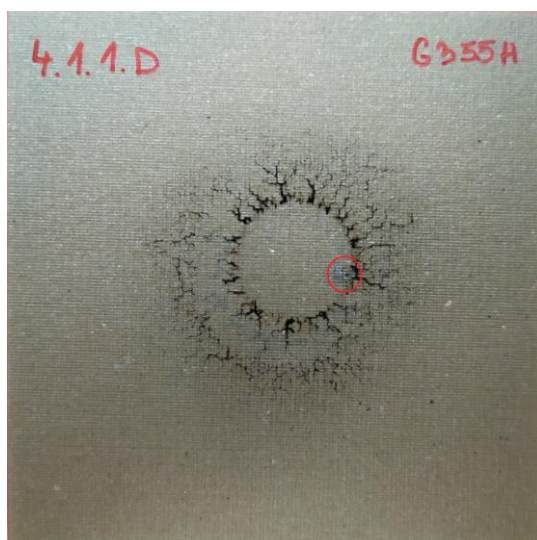
Zkouška elektrické pevnosti byla pro tuto práci velmi přínosná a dokázala, že vliv zakomponování nanovláken do kompozitního materiálu má z hlediska elektrické pevnosti smysl použít pro vylepšení vlastností materiálů, které samostatně nedosahovaly velkých hodnot elektrické pevnosti. Pro materiály, kde tato hodnota byla vysoká již pro samotný materiál toto obohacení nemá smysl. Dále také odhalila, že volba samotných prepregů je též velmi důležitý aspekt při výrobě elektroizolačních kompozitních materiálů.



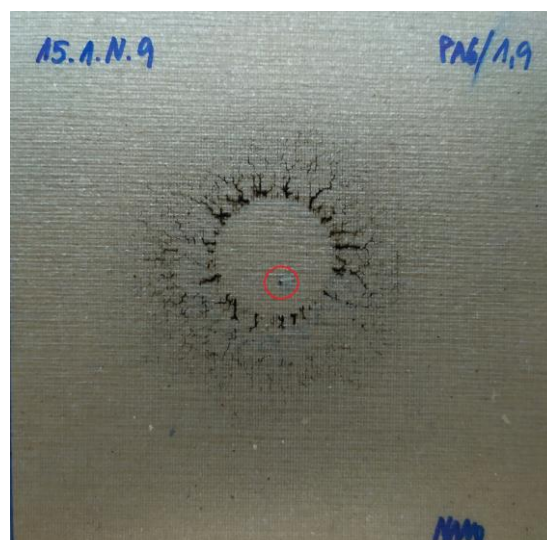
a)



b)



c)



d)

Obr. 28 – Záběry materiálů po zkoušce elektrické pevnosti: a) ukázka průrazů v materiálu Relanex; b) ukázka průrazů v materiálu Calmicaglas s nanovláknny; c) ukázka průrazu v referenčním materiálu Rikamicapreg G355H; d) ukázka průrazu v materiálu Rikamicapreg G355H s nanovláknny

Závěr

V první části se tato práce věnovala rešeršní činnosti v oblasti kompozitních materiálů pro elektrotechniku a byly shrnuty informace o používaných pryskyřicích, výztužích a oblasti použití v elektrotechnice. Zabývala se dále také způsoby výroby nanovláken. V současné době se stále zvyšuje tlak na zlepšování vlastností elektrických izolací ve všech odvětvích elektrotechniky. Mnohdy nejsou již konvenční materiály a řešení postačující, a proto je důležité hledat v budoucnosti nové směry vývoje a výroby perspektivních materiálů, případně vylepšovat stávající řešení, což bylo záměrem experimentální části této bakalářské práce.

Z experimentální části vyplývá, že zakomponování nanovláken PA6 do struktury konvenčních reaktoplastických kompozitních materiálů má do určité míry vliv na výsledné elektroizolační vlastnosti. Efekt zvýšení vnitřní rezistivity, jakožto důležitého parametru při volbě elektrických izolací, je zanedbatelný a nelze jednoznačně říct, že by došlo k výraznému nárůstu této hodnoty. Lze ovšem dokázat vliv přidání nanovláken do struktury kompozitu na zvýšení elektrické pevnosti výsledného vzorku. Ovšem opět toto platí pouze do určité míry. U materiálů, které již bez nanovláken měly vysoké hodnoty elektrické pevnosti, nedošlo k nárůstu této hodnoty a aplikace nanovláken by tak byla v průmyslu zbytečná. Nicméně pro vzorky, kde hodnota elektrické pevnosti byla nižší došlo k výraznějšímu nárůstu elektrické pevnosti. Lze tedy uvažovat, že pro materiály s nižší elektrickou pevností má smysl použití nanovláken pro vylepšení elektroizolačních vlastností.

Začlenění nanovláknenných vrstev do standardních kompozitních systémů pro elektroizolační aplikace může být v průmyslu v současnosti hodnoceno jako příliš nákladné, ale je třeba uvažovat zjištěné přínosy a do budoucna i snížení ceny nanomateriálů. Vhodnost použití nanovláken v testovaných kompozitech by bylo možné dále hodnotit z hlediska chování kompozitů vystavených vlivům stárnutí, kdy se může ukázat ještě výraznější přínos tepelně odolných polyamidových vláken.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] T.-D. Ngo, *Introduction to Composite Materials*, IntechOpen, p. 13, 2020.
- [2] American Composites Manufacturers Association, *Composites Basics : Materials*, pp. 1–21, 2007.
- [3] 3M, *3M Aluminum Conductor Composite Reinforced (ACCR)*.
- [4] Shemar, *Transmission line Composite Cross-arm Tower*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: https://www.shemar.com.cn/en/product_info.aspx?CateId=111&Id=55&jsid=4.
- [5] P. K. Mallick, *Fibre-reinforced composites: materials, manufacturing and design*. New York, NY: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2008.
- [6] L. Běhálek, *Polymery*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/21.html>.
- [7] F. C. Campbell, *Structural Composite Materials*, ASM Int., 2010.
- [8] A. K. Seydibeyoglu, M.O. , Mohanty and M. Misra, *Fiber technology for fiber-reinforced composites*. Cambridge: Elsevier (Woodhead Publishing), 2017.
- [9] Hexcel, *HexPly Prepreg Technology*, 2013.
- [10] D. Ratna, *Handbook of Thermoset Resins*. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, United Kingdom: iSmithers, 2009.
- [11] A. K. Kulshreshtha and C. Vasile, *Handbook of Polymer Blends and Composites*. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2002.
- [12] Fiberglass, *About Resins*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://www.fiberglass.com/product/about-resins>.
- [13] G. W. Ehrenstein, *Polymerní kompozitní materiály*, 1. vyd. v. Praha: Scientia, 2009.
- [14] F. Cardarelli, *Materials handbook*, 2nd ed. Springer-Verlag London Limited, 2000.
- [15] Resin Expert, *Polyurethane Resin Guide – Everything you need to know*, 2020. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://resin-expert.com/en/guide/polyurethane-resin>.
- [16] 3M, *3M Nextel Ceramic Fibers and Textiles : Technical Reference Guide*, 2018, [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://multimedia.3m.com/mws/media/1327055O/3m-nextel-technical-reference-guide.pdf>.
- [17] J. Mleziva and J. Šňupánek, *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Sobotáles, Praha, 2000.
- [18] I. Vejražková, *Plasty pro stavebnictví a architekturu 11 – Polyamidy*, 2008. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-11-polyamidy_41299.html.
- [19] RTP Company, *Nylon 6 (PA) — Polyamide 6*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://www.rtpcompany.com/products/product-guide/nylon-6-pa-polyamide-6/>.
- [20] Essentra Components, *The differences between nylon 6 and nylon 66*, 2019. [online]. [cit. 2021-05-23]. Dostupné z: <https://www.essentracomponents.com/en-gb/news/guides/the-differences-between-nylon-6-and-nylon-6/6>.
- [21] FTP Plastics, *Polyamidy*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://www.prumysloveplasty.cz/polyamidy/>.
- [22] Polymer Science Learning Center, *Nylons*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://www.pslc.ws/macrog/nylon.htm>.

- [23] DSM Dyneema, *Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fiber from DSM Dyneema*, Tech. DataSheet, 2016, [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://issuu.com/eurofibers/docs/name8f0d44>.
- [24] Shaoxing Qiyu Import & Export Co.Ltd., *The basic structures of woven fabrics – plain weave, twill weave, and satin weave*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://m.sxqiyu.com/news/the-basic-structures-of-woven-fabrics-plain-weave-twill-weave-and-satin-weave>.
- [25] Department of defense United States of America, *Composite materials handbook*, vol. 3. United States of America: Approved for public release; distribution unlimited, 2002.
- [26] Plastic, *Autokláv*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <http://www.plastic.cz/technologie-autoklav-cz>.
- [27] Smartech International LP., *Composites and Vacuum Bagging Materials*. [online]. [cit. 2021-05-23]. Dostupné z: <https://www.smartechonline.com/composites/>.
- [28] CompositesLab, *Vacuum Bag Molding*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/vacuum-bag-molding/>.
- [29] 5M, *Semipregy*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://www.5m.cz/produkty/semipregy>.
- [30] A. Barhoum, *Handbook of Nanofibers*. Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- [31] Z. M. Huang, Y. Z. Zhang, M. Kotaki, and S. Ramakrishna, *A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites*, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 15, pp. 2223–2253, 2003.
- [32] I. Alghoraibi and S. Alomari, *Different Methods for Nanofiber Design and Fabrication*. 2019.
- [33] S. Ramakrishna, K. Fujihara, W. E. Teo, T. C. Lim, and Z. Ma, *An introduction to electrospinning and nanofibers*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2005.
- [34] A. M. Gañán-Calvo, J. M. López-Herrera, M. A. Herrada, A. Ramos, and J. M. Montanero, *Review on the physics of electrospray: From electrokinetics to the operating conditions of single and coaxial Taylor cone-jets, and AC electrospray*, *J. Aerosol Sci.*, vol. 125, no. May, pp. 32–56, 2018.
- [35] Elmarco, *Technologie Nanospider*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://www.elmarco.cz/ns-technologie>.
- [36] D. Kala, M. S. Athira, and M. Mohan, *Nanospider Technology And Its Applications*, vol. 11, no. 4, pp. 1557–1561, 2020.
- [37] Oxford Instruments, *Laser Ablation of a Plasma Plume*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/laser-plume-ablation>.
- [38] J. A. Dahl, B. L. S. Maddux, and J. E. Hutchison, *Toward greener nanosynthesis*, *Chem. Rev.*, vol. 107, no. 6, pp. 2228–2269, 2007.
- [39] S. Anupama, *Autoclave*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://microbenotes.com/autoclave/>.
- [40] Ligno Servis, *Folie do lisu*. [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <https://www.lignoservis.cz/folie-do-lisu>.

Přílohy

Příloha A

Tab. 2 – Hodnoty z měření vnitřní rezistivity

materiálová skladba	ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	sm. odch.	označení	popis
Relanex (Rel)	3.65E+16	7.47E+15	2.1.Y.N REL	Relanex 1.deska nahoře
Remikakit (Rem1)	1.78E+17	1.29E+16	Remikakit 1 vrstva skla	Remikakit 1. deska, tři vrstvy vlákn
Remikakit (Rem3)	1.54E+17	2.25E+16	Remikakit 3 vrstvy skla	Remikakit 2. deska, jedna vrstva vlákn
Calmicaglas (Cal)	2.86E+16	4.07E+15	1.2.Y.D CAL**řezaná	Calmicaglas 2. deska **řezaná
Rikamicapreg (GH)	1.33E+17	6.26E+15	4.1.1.D G355H	pouze 4x G355H - reference pro porovnání (bez nanovláken a mezivrstev)
Rel-Rel-n-Rel-Rel	9.23E+16	8.18E+15	20.1.D.1 PA6/1.9 nano	REL, REL, 1x nano 1.9g/m ² , REL, REL
Rel-n-Rel-n-Rel-n-Rel	7.09E+16	6.38E+15	21.1.N.3 PA6/1.9 nano	REL, nano 1.9g/m ² , REL, nano 1.9g/m ² , REL, nano 1.9g/m ² , REL
Rel-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rel	3.96E+16	1.94E+15	5.1.D.6 PA6/1.9 nano	Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REL-2n-REL-2n-REL-2n-REL
Rel-n-Rel-3n-Rel-n-Rel	2.93E+16	6.10E+15	6.1.N.5 PA6/1.9 nano	Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REL-n-REL-3n-REL-n-REL
Rel-3n-Rel-3n-Rel-3n-Rel	6.00E+16	1.02E+16	19.1.N.9 PA6/1.9 nano	REL, 3x nano 1.9g/m ² , REL, 3x nano 1.9g/m ² , REL, 3x nano 1.9g/m ² , REL
Rel-n-Rem-n-Rem-n-Rel	6.85E+16	1.42E+16	2.1.N.3 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REL-n-REM-n-REM-n-REL
Rem-n-Rel-n-Rel-n-Rem	1.49E+17	1.65E+16	1.1.D.3 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REM-n-REL-n-REL-n-REM
Rem-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rem	5.86E+16	8.96E+15	3.1.D.6 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REM-2n-REL-2n-REL-2n-REM
Rem-n-Rel-3n-Rel-n-Rem	6.26E+16	2.01E+16	4.1.N.5 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REM-n-REL-3n-REL-n-REM
Cal-Cal-n-Cal-Cal	1.04E+17	2.77E+15	16.1.D.1 PA6/1.9 nano	CAL, CAL, 1x nano 1.9g/m ² , CAL, CAL
Cal-n-Cal-n-Cal-n-Cal	6.80E+16	1.69E+16	18.1.D.3 PA6/1.9 nano	CAL, nano 1.9g/m ² , CAL, nano 1.9g/m ² , CAL, nano 1.9g/m ² , CAL
Cal-2n-Cal-2n-Cal-2n-Cal	3.48E+16	4.80E+15	12.1.D.6 PA6/1.9 nano	CAL, 2x nano 1.9g/m ² , CAL, 2x nano 1.9g/m ² , CAL, 2x nano 1.9g/m ² , CAL
Cal-n-Cal-3n-Cal-n-Cal	3.92E+16	1.52E+16	13.1.N.5 PA6/1.9 nano	CAL, nano 1.9g/m ² , CAL, 3x nano 1.9g/m ² , CAL, nano 1.9g/m ² , CAL
Cal-3n-Cal-3n-Cal-3n-Cal	4.65E+16	4.41E+15	17.1.N.9 PA6/1.9 nano	CAL, 3x nano 1.9g/m ² , CAL, 3x nano 31.9g/m ² , CAL, 3x nano 1.9g/m ² , CAL
GH-GH-n-GH-GH	9.46E+16	1.20E+16	14.1.D.1 PA6/1.9 nano	G355H, G355H, 1x nano 1.9g/m ² , G355H, G355H
GH-n-GH-n-GH-n-GH	8.09E+16	4.91E+15	10.1.D.3 PA6/1.9 nano	G355H, nano 1.9g/m ² , G355H, nano 1.9g/m ² , G355H, nano 1.9g/m ² , G355H
GH-2n-GH-2n-GH-2n-GH	5.92E+16	4.60E+15	9.1.N.6 PA6/1.9 nano	G355H, 2x nano 1.9g/m ² , G355H, 2x nano 1.9g/m ² , G355H, 2x nano 1.9g/m ² , G355H
GH-n-GH-3n-GH-n-GH	6.00E+16	1.74E+16	11.1.N.5 PA6/1.9 nano	G355H, nano 1.9g/m ² , G355H, 3x nano 1.9g/m ² , G355H, nano 1.9g/m ² , G355H
GH-3n-GH-3n-GH-3n-GH	6.40E+16	4.41E+15	15.1.N.9 PA6/1.9 nano	G355H, 3x nano 1.9g/m ² , G355H, 3x nano 1.9g/m ² , G355H, 3x nano 1.9g/m ² , G355H

Příloha B

Tab. 3 – Hodnoty z měření povrchové rezistivity

materiálová skladba	σ (Ω)	sm. odch.	označení	popis
Relanex (Rel)	6.53E+14	8.49E+14	2.1.Y.N REL	Relanex 1.deska nahoře
Remikakit (Rem1)	6.25E+15	5.93E+15	Remikakit 1 vrstva skla	Remikakit 1. deska, tři vrstvy vlákn
Remikakit (Rem3)	1.23E+16	5.52E+15	Remikakit 3 vrstvy skla	Remikakit 2. deska, jedna vrstva vlákn
Calmicaglas (Cal)	2.05E+15	2.61E+14	1.2.Y.D CAL**řezaná	Calmicaglas 2. deska **řezaná
Rikamicapreg (GH)	2.37E+16	3.46E+15	4.1.1.D G355H	pouze 4x G355H - reference pro porovnání (bez nanovláken a mezivrstev)
Rel-Rel-n-Rel-Rel	1.25E+16	1.95E+15	20.1.D.1 PA6/1.9 nano	REL, REL, 1x nano 1.9g/m ² , REL, REL
Rel-n-Rel-n-Rel-n-Rel	1.28E+16	4.11E+15	21.1.N.3 PA6/1.9 nano	REL, nano 1.9g/m ² , REL, nano 1.9g/m ² , REL, nano 1.9g/m ² , REL
Rel-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rel	5.48E+15	3.14E+15	5.1.D.6 PA6/1.9 nano	Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REL-2n-REL-2n-REL-2n-REL
Rel-n-Rel-3n-Rel-n-Rel	4.12E+15	1.68E+15	6.1.N.5 PA6/1.9 nano	Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REL-n-REL-3n-REL-n-REL
Rel-3n-Rel-3n-Rel-3n-Rel	9.29E+15	1.43E+15	19.1.N.9 PA6/1.9 nano	REL, 3x nano 1.9g/m ² , REL, 3x nano 1.9g/m ² , REL, 3x nano 1.9g/m ² , REL
Rel-n-Rem-n-Rem-n-Rel	5.40E+15	3.65E+15	2.1.N.3 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REL-n-REM-n-REM-n-REL
Rem-n-Rel-n-Rel-n-Rem	4.73E+15	1.31E+15	1.1.D.3 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REM-n-REL-n-REL-n-REM
Rem-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rem	9.86E+15	4.82E+15	3.1.D.6 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REM-2n-REL-2n-REL-2n-REM
Rem-n-Rel-3n-Rel-n-Rem	5.95E+15	2.27E+15	4.1.N.5 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REM-n-REL-3n-REL-n-REM
Cal-Cal-n-Cal-Cal	2.29E+16	4.09E+15	16.1.D.1 PA6/1.9 nano	CAL, CAL, 1x nano 1.9g/m ² , CAL, CAL
Cal-n-Cal-n-Cal-n-Cal	1.66E+16	3.57E+15	18.1.D.3 PA6/1.9 nano	CAL, nano 1.9g/m ² , CAL, nano 1.9g/m ² , CAL, nano 1.9g/m ² , CAL
Cal-2n-Cal-2n-Cal-2n-Cal	1.27E+16	4.81E+15	12.1.D.6 PA6/1.9 nano	CAL, 2x nano 1.9g/m ² , CAL, 2x nano 1.9g/m ² , CAL, 2x nano 1.9g/m ² , CAL
Cal-n-Cal-3n-Cal-n-Cal	1.43E+16	8.48E+15	13.1.N.5 PA6/1.9 nano	CAL, nano 1.9g/m ² , CAL, 3x nano 1.9g/m ² , CAL, nano 1.9g/m ² , CAL
Cal-3n-Cal-3n-Cal-3n-Cal	1.41E+16	4.23E+15	17.1.N.9 PA6/1.9 nano	CAL, 3x nano 1.9g/m ² , CAL, 3x nano 31.9g/m ² , CAL, 3x nano 1.9g/m ² , CAL
GH-GH-n-GH-GH	1.31E+16	1.12E+15	14.1.D.1 PA6/1.9 nano	G355H, G355H, 1x nano 1.9g/m ² , G355H, G355H
GH-n-GH-n-GH-n-GH	2.63E+16	4.04E+15	10.1.D.3 PA6/1.9 nano	G355H, nano 1.9g/m ² , G355H, nano 1.9g/m ² , G355H, nano 1.9g/m ² , G355H
GH-2n-GH-2n-GH-2n-GH	1.34E+16	1.67E+15	9.1.N.6 PA6/1.9 nano	G355H, 2x nano 1.9g/m ² , G355H, 2x nano 1.9g/m ² , G355H, 2x nano 1.9g/m ² , G355H
GH-n-GH-3n-GH-n-GH	1.47E+16	3.00E+15	11.1.N.5 PA6/1.9 nano	G355H, nano 1.9g/m ² , G355H, 3x nano 1.9g/m ² , G355H, nano 1.9g/m ² , G355H
GH-3n-GH-3n-GH-3n-GH	1.74E+16	5.95E+15	15.1.N.9 PA6/1.9 nano	G355H, 3x nano 1.9g/m ² , G355H, 3x nano 1.9g/m ² , G355H, 3x nano 1.9g/m ² , G355H

Příloha C

Tab. 4 - Hodnoty z měření elektrické pevnosti

materiálová skladba	Ep (kV/mm)	sm. odch.	označení	popis
Relanex (Rel)	54.00	3.61	2.1.1.N REL	Relanex 1.deska nahoře
Remikakit (Rem)	67.76	18.74	Remikakit samostatný	stříženo z nepovedené desky
Calmicaglas (Cal)	69.45	4.67	1.2.1.D CAL**řezaná	Calmicaglas 2. deska **řezaná
Rikamicapreg (GH)	63.93	15.94	4.1.1.D G355H	pouze 4x G355H - reference pro porovnání (bez nanovláken a mezivrstev)
Remikakit (Rem1)	66.76	19.24	3.2.1.N REM1	Remikakit 2. deska, jedna vrstva vlákn
Remikakit (Rem3)	63.15	17.77	3.1.1.D REM3	Remikakit 1. deska,tři vrstvy vlákn
Rel-Rel-n-Rel-Rel	65.73	3.99	20.1.D.1 PA6/1.9 nano	REL, REL, 1x nano 1.9g/m2, REL, REL
Rel-n-Rel-n-Rel-n-Rel	67.50	4.78	21.1.N.3 PA6/1.9 nano	REL, nano 1.9g/m2, REL, nano 1.9g/m2, REL, nano 1.9g/m2, REL
Rel-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rel	63.57	1.14	5.1.D.6 PA6/1.9 nano	Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REL-2n-REL-2n-REL-2n-REL
Rel-n-Rel-3n-Rel-n-Rel	63.80	4.84	6.1.N.5 PA6/1.9 nano	Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REL-n-REL-3n-REL-n-REL
Rel-3n-Rel-3n-Rel-3n-Rel	62.98	1.48	19.1.N.9 PA6/1.9 nano	REL, 3x nano 1.9g/m2, REL, 3x nano 1.9g/m2, REL, 3x nano 1.9g/m2, REL
Rel-n-Rem-n-Rem-n-Rel	73.07	8.26	2.1.N.3 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REL-n-REM-n-REM-n-REL
Rem-n-Rel-n-Rel-n-Rem	80.53	12.49	1.1.D.3 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REM-n-REL-n-REL-n-REM
Rem-2n-Rel-2n-Rel-2n-Rem	88.23	2.20	3.1.D.6 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REM-2n-REL-2n-REL-2n-REM
Rem-n-Rel-3n-Rel-n-Rem	87.95	3.38	4.1.N.5 PA6/1.9 nano	Remikakit a Relanex s nanovlákný 4 prepregy, REM-n-REL-3n-REL-n-REM
Cal-Cal-n-Cal-Cal	67.98	2.96	16.1.D.1 PA6/1.9 nano	CAL, CAL, 1x nano 1.9g/m2, CAL, CAL
Cal-n-Cal-n-Cal-n-Cal	72.86	7.59	18.1.D.3 PA6/1.9 nano	CAL, nano 1.9g/m2, CAL, nano 1.9g/m2, CAL, nano 1.9g/m2, CAL
Cal-2n-Cal-2n-Cal-2n-Cal	73.91	5.57	12.1.D.6 PA6/1.9 nano	CAL, 2x nano 1.9g/m2, CAL, 2x nano 1.9g/m2, CAL, 2x nano 1.9g/m2, CAL
Cal-n-Cal-3n-Cal-n-Cal	67.86	4.16	13.1.N.5 PA6/1.9 nano	CAL, nano 1.9g/m2, CAL, 3x nano 1.9g/m2, CAL, nano 1.9g/m2, CAL
Cal-3n-Cal-3n-Cal-3n-Cal	69.15	3.51	17.1.N.9 PA6/1.9 nano	CAL, 3x nano 1.9g/m2, CAL, 3x nano 31.9g/m2, CAL, 3x nano 1.9g/m2, CAL
GH-GH-n-GH-GH	69.09	11.33	14.1.D.1 PA6/1.9 nano	G355H, G355H, 1x nano 1.9g/m2, G355H, G355H
GH-n-GH-n-GH-n-GH	63.05	8.65	10.1.D.3 PA6/1.9 nano	G355H, nano 1.9g/m2, G355H, nano 1.9g/m2, G355H, nano 1.9g/m2, G355H
GH-2n-GH-2n-GH-2n-GH	65.65	7.62	9.1.N.6 PA6/1.9 nano	G355H, 2x nano 1.9g/m2, G355H, 2x nano 1.9g/m2, G355H, 2x nano 1.9g/m2, G355H
GH-n-GH-3n-GH-n-GH	62.88	8.65	11.1.N.5 PA6/1.9 nano	G355H, nano 1.9g/m2, G355H, 3x nano 1.9g/m2, G355H, nano 1.9g/m2, G355H
GH-3n-GH-3n-GH-3n-GH	61.56	14.39	15.1.N.9 PA6/1.9 nano	G355H, 3x nano 1.9g/m2, G355H, 3x nano 1.9g/m2, G355H, 3x nano 1.9g/m2, G355H