

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Silikony v kabelovém průmyslu

Autor práce: **Bc. Kateřina Samcová**
Vedoucí práce: **Ing. Petr Kadlec, Ph.D.**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Kateřina SAMCOVÁ**
Osobní číslo: **E21N0026P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Silikonové materiály pro kabelový průmysl**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Realizujte rešerši zaměřenou na současný stav využívání silikonových materiálů v kabelovém průmyslu. Zaměřte se primárně na specifické charakteristiky silikonových materiálů pro vysokonapěťové aplikace a porovnejte silikonové materiály s ostatními v kabelech standardně používanými elektroizolačními materiály. Uvedte také základní informace o využívání silikonových materiálů v kabelech pro nízkonapěťové aplikace.
2. Zhodnoťte potenciál silikonových materiálů z hlediska požární bezpečnosti s ohledem na jejich oheň retardační vlastnosti a charakter jejich tepelné degradace. Proveďte srovnání s principem tepelné degradace konvenčních termoplastických materiálů, např. polyethylenu.
3. Navrhněte vhodné komerčně dostupné silikonové materiály a z alespoň jednoho vybraného silikonového materiálu připravte vzorky pro testování. Analyzujte dielektrické, mechanické a termické vlastnosti připravených vzorků.
4. Zhodnoťte výsledky analýz a navrhněte vhodnou aplikaci testovaného materiálu (případně testovaných materiálů) v rámci konstrukce kabelu. Zhodnoťte možné využití silikonových materiálů v kombinaci s dalšími materiály pro vytvoření kvalitního izolačního systému kabelu.

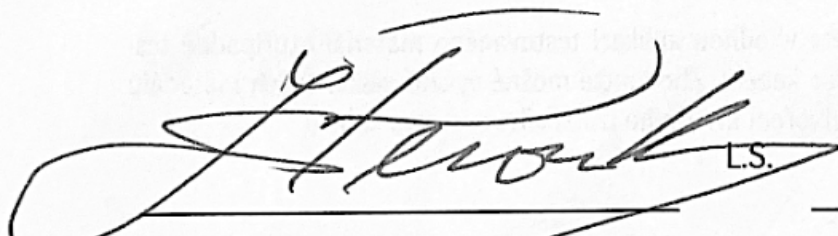
Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

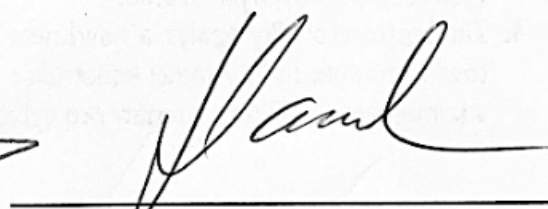
1. J. Mleziva a J. Šňupárek, Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901570-4-1.
2. T. A. Osswald a G. Menges, Material Science of Polymers for Engineers. Munich: Hanser, 2012. ISBN 978-1-56990-514-2.
3. S. K. Ganguli a V. Kohli, Power Cable Technology. Boca Raton: CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4987-0910-1.
4. Ch. A. Wilkie, A. B. Morgan, Fire Retardancy of Polymeric Materials. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-8399-6.
5. M. Wagner, Thermal Analysis in Practice: Fundamental Aspects. Munich: Hanser, 2018. ISBN 978-1-56990-643-9.
6. elektronické informační zdroje (SUMMON – vyhledávací nástroj knihovny ZČU, případně přímo Science Direct, IEEE Explore atd.).

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

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**



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



Prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá popisem silikonových materiálů, jejich vlastnostmi a využitím v elektrotechnice. Zaměřuje se primárně na využití silikonových materiálů v oblasti kabelového průmyslu s důrazem na jejich oheň retardační vlastnosti. V práci je popsána příprava vzorků jednosložkového silikonového materiálu, dvousložkového silikonového materiálu a silikonového kompozitu a metody, kterými byly vzorky testovány. Připravené vzorky byly testovány pomocí infračervené spektroskopie, termických analýz, širokopásmové dielektrické spektroskopie, pro vzorky byla měřena rezistivita a elektrická pevnost a byly realizovány mechanické zkoušky. Pro určení dopadu různých příprav jednosložkového vzorku a kompozitu byly primárně vyhodnocovány mechanické zkoušky. V rámci práce byly potvrzeny výborné dielektrické a mechanické vlastnosti silikonových materiálů a výhoda jejich využití pro retardaci hoření.

Klíčová slova

Silikonové materiály, silikony, silikonová pryž, kompozity, termické analýzy, mechanické testování, rezistivita, elektrická pevnost, širokopásmová dielektrická spektroskopie

Abstract

This diploma thesis focuses on the description of silicone materials, their properties and application in electrical engineering. Primarily it deals with the use of silicone materials in the cable industry in particular on their fire retardant properties. The experimental part of the thesis describes the preparation of samples of single component silicone material, two component silicone material and silicone composite and the methods used for samples testing. The prepared samples were tested by infrared spectroscopy, thermal analysis, broadband dielectric spectroscopy, resistivity and dielectric strength measurements were performed for the samples and mechanical tests were carried out. Mechanical tests were primarily evaluated to determine the impact of different single component sample and composite preparations processes. The excellent dielectric and mechanical properties of silicone materials and the advantage of using them for flame retardancy were confirmed.

Key Words

Silicone materials, silicones, silicone rubber, composites, thermal analysis, mechanical testing, resistivity, dielectric strength, broadband dielectric spectroscopy

Poděkování

Ráda bych touto cestou vyjádřila poděkování vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Kadlecovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a trpělivost.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2021-003 „Materiály, technologie a diagnostika v elektrotechnice“.

Obsah

Úvod.....	11
1 Silikonové materiály.....	12
1.1 Chemická struktura a vlastnosti.....	12
1.2 Typy silikonových materiálů.....	13
1.3 Silikonové materiály v elektrotechnice	15
1.3.1 Kabelová vedení	15
1.3.2 Elektroizolační komponenty přenosové soustavy	15
1.3.3 Pouzdření elektronických zařízení.....	15
1.4 Kompozity na bázi silikonu.....	16
2 Silikonové materiály v kabelovém průmyslu	17
2.1 Využití	17
2.2 Požární bezpečnost	18
3 Experimentální část	21
3.1 Testované materiály a příprava vzorků	21
3.1.1 Specifikace materiálů	21
3.1.2 Zpracování jednosložkového silikonového materiálu	22
3.1.3 Příprava dvousložkového silikonového materiálu.....	23
3.1.4 Příprava vzorků kompozitu na bázi silikonu	23
3.2 Diagnostické metody a postupy měření.....	25
3.2.1 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací	26
3.2.2 Simultánní termická analýza	27
3.2.3 Diferenční skenovací kalorimetrie.....	28
3.2.4 Měření rezistivity a elektrické pevnosti.....	29
3.2.5 Širokopásmová dielektrická spektroskopie	30
3.2.6 Mechanické zkoušky	31

4	Výsledky měření.....	33
4.1	Základní analýza chemické struktury	33
4.2	Výsledky termických analýz	34
4.3	Vnitřní rezistivita a elektrická pevnost.....	35
4.4	Výsledky širokopásmové dielektrické spektroskopie.....	38
4.5	Výsledky tahových zkoušek	41
5	Závěr.....	46
	Literatura.....	48

Seznam symbolů a zkratk

Značka	Popisek	Jednotka
ϕ_q	Tepelný tok	(W/g)
m	Hmotnostní úbytek	(%)
T	Teplota	(°C)
t_p	Průměrná tloušťka vzorku	(mm)
ρ_V	Vnitřní rezistivita	($\Omega \cdot \text{cm}$)
I	Proud	(A)
U	Napětí	(V)
t	Čas	(s)
U_P	Průrazné napětí	(kV)
E_p	Elektrická pevnost	(kV/mm)
d	Tloušťka vzorku	(mm)
f	Frekvence	(Hz)
σ	Mechanické napětí	(MPa)
ε	Poměrné prodloužení	(%)
ε'	Reálná složka permitivity	(-)
ε''	Imaginární složka permitivity	(-)
$\text{tg } \sigma$	Ztrátový činitel	(-)
Si	Křemík	
PI	Polarizační index	
O	Kyslík	
SiO_2	Oxid křemičitý	
$ZnSe$	Selenid zinečnatý	
CH_2	Methylen	
CH_3	Methyl	

<i>SiC</i>	Karbid křemíku
<i>LTV</i>	Pryže vulkanizované při nízké teplotě
<i>RTV</i>	Pryže vulkanizované při pokojové teplotě
<i>HTV</i>	Pryže vulkanizované při vysoké teplotě
<i>SBR</i>	Styren butadienový kaučuk
<i>PVC</i>	Polyvinylchlorid
<i>SR</i>	Siliková pryž
<i>FTIR</i>	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
<i>ATR</i>	Zeslabený úplný odraz
<i>UV</i>	Ultrafialové
<i>STA</i>	Simultánní termická analýza
<i>DCS</i>	Diferenční skenovací kalorimetrie
<i>BDS</i>	Širokopásmová dielektrická spektroskopie
<i>CT</i>	Výpočetní tomografie
<i>IR</i>	Infračervené

Úvod

Silikonové materiály jsou prokazatelně jedním z nejvíce odolných polymerních materiálů, co se týče teplotní odolnosti, kdy pracovní teploty těchto materiálů, například pro silikonovou pryž, se pohybují dle informací výrobců od -60 do 200 °C [1]. Tato vlastnost dělá ze silikonových materiálů velmi oblíbené a využívané materiály. Mezi běžné silikonové materiály patří zmíněné silikonové pryže nejčastěji využívané v kabelovém průmyslu, silikonové pryskyřice využívané například jako impregnační laky a silikonové oleje, které jsou využívané jako kapalná dielektrika [2]. Silikonová pryž je materiálem využívaným v řadě aplikací v elektrotechnickém průmyslu, přičemž je možné ji nalézt v aplikacích v oblastech elektroizolační soustavy, kabelová vedení nebo pouzdření elektronických součástí.

Silikonové pryže jsou ideálním materiálem z pohledu požární bezpečnosti, mají velmi dobré oheň retardační vlastnosti. Vzhledem k neustále se zvyšujícím požadavkům na bezpečnost je důležité zajistit možnost bezpečné evakuace v oblastech s velkou koncentrací osob, jako jsou například obchodní střediska nebo kina. Právě izolace ze silikonové pryže mohou k bezpečné evakuaci budov přispět, protože kabely se silikonovou izolací obecně umožňují při požáru zajistit funkci různých bezpečnostních systémů po delší dobu, navíc při hoření takového materiálu nedochází k uvolňování nebezpečných zplodin. To dělá ze silikonové pryže perspektivní materiál pro ještě častější využívání. Samotný silikonový materiál je sice velmi dobrý v oblasti požární bezpečnosti, nicméně pro splnění standardů se ukazuje jako vhodnější volba využití silikonových kompozitů, kdy do silikonové matrice jsou přimíchávána částicová plniva.

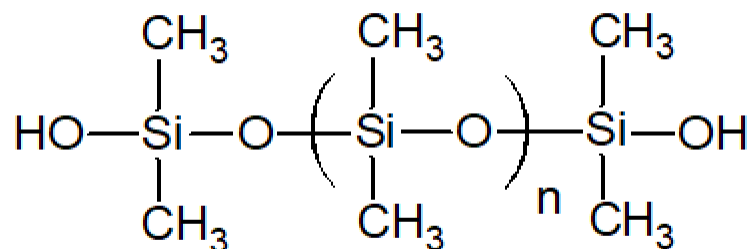
Pro ověření pracovních teplot je možné využívat analýzy, které sledují chování materiálu v určeném teplotním pásmu, vhodnými metodami jsou například simultánní termická analýza, či diferenční skenovací kalorimetrie. Silikonové materiály vykazují velmi dobré dielektrické vlastnosti, které je možné ověřit pomocí širokopásmové dielektrické spektroskopie. Pro zjištění odolnosti vůči elektrickému průrazu, lze využít metodu měření elektrické pevnosti a pro ověření mechanické pevnosti, lze využít testování pomocí zkoušky tahem. Tyto analýzy by měly komplexně ověřit materiálové vlastnosti silikonové pryže, což je předmětem i předkládané diplomové práce.

1 Silikonové materiály

Silikony jsou syntetické polymery, které byly pojmenovány na začátku 20. století chemikem Frederickem Kippingem [3]. Silikonové materiály disponují jedinečnou kombinací vlastností, kdy můžeme zmínit teplotní stálost, chemickou odolnost, odolnost vůči UV záření. Základem jejich struktury jsou siloxany, které jsou složeny z křemíku a kyslíku, dále se v jejich struktuře nachází uhlík a atomy vodíku. Je možné je využívat například ve formě oleje, pryskyřice, či pryže. Jedná se o materiály, které nachází stále častěji uplatnění i v oblasti elektrotechniky. Konkrétní aplikace silikonových materiálů jsou v oblasti kabelových vedení, tvoří části elektroizolačních komponentů přenosové soustavy nebo jsou využívány pro pouzdření elektronických zařízení. Vlastnosti samotných silikonů je možné dále zlepšovat přechodem ke kompozitům se silikonovou maticí. Silikonové materiály lze např. kombinovat s vláknovými strukturami nebo lze začleňovat částicová plniva, která mohou zlepšovat např. termické nebo dielektrické vlastnosti. Používaná aditiva mohou také pozitivně ovlivňovat celkovou životnost připravovaných materiálů.

1.1 Chemická struktura a vlastnosti

Silikony představují specifickou skupinu syntetických polymerů, které je možné nazývat polysiloxany, protože jsou složeny z mnoha siloxanů. Pojem siloxan dovede přesněji popsat chemickou strukturu, kdy sil ze slova silicon (česky křemík) a oxan ze slova oxygen (česky kyslík) [4]. Z křemíku a kyslíku se skládá základní kostra silikonového řetězce, ale kromě křemíku a kyslíku se poté dále vážou atomy uhlíku a vodíku. Právě siloxan dělá ze silikonů anorganický polymer na rozdíl od organických polymerů, kde tvoří základ řetězce uhlík [5]. Silikony se tudíž řadí mezi organokřemičité sloučeniny [2].



Obr. 1: Řetězec polysiloxanu (silikonu) [5]

Kombinace křemíku s organickými sloučeninami poskytuje silikonům jedinečné vlastnosti, např. chemickou odolnost, teplotní stálost a schopnost udržovat si požadované vlastnosti ve velkém rozsahu teplot. Silikonové materiály jsou zdatně odolnějši než většina organických látek. Tyto vlastnosti lze připisovat pevnosti a flexibilitě Si-O vazby[6].

Silikonové materiály mají dále např. nízké povrchové napětí a jsou hydrofobní (mají schopnost odpuzovat vodu) [7]. Hydrofobní vlastnosti přetrvávají i v případě povrchového znečištění materiálu. Jedním z dalších důvodů využívání silikonových materiálů je jejich tepelná stabilita. Většinou jsou jejich vlastnosti stabilní až do teploty 200 °C, pro určité modifikace materiálu může tato teplota dosáhnout až 300 °C a výborné vlastnosti si udržuje i v nízkých teplotách [7].

1.2 Typy silikonových materiálů

Silikonové materiály existují v různých podobách, tyto podoby se liší vzhledem ke stupni zesíťování či rozvětvení molekul, což určuje, do jaké míry jsou propojené silikonové řetězce. Čím vyšší je stupeň zesíťování, tím méně ohebné silikony jsou. Tato proměnná určuje i další vlastnosti, jako například termické vlastnosti nebo pevnost v tahu. Silikonové materiály, jak již bylo uvedeno výše, se standardně rozdělují na silikonové oleje, pryskyřice a kaučuky. Toto rozdělení je definované dle poměru organických radikálů ke křemíku, který určuje úroveň zesíťování. Kdy poměr definovaný pro oleje je vyšší než dva, pro kaučuky je rovný dvěma a pro pryskyřice je menší než dva. [2,8]

Silikonové oleje mají velmi nízké povrchové napětí, což jim velmi snadno umožňuje pokrýt povrchy. V porovnání s jinými uhlovodíky a minerálními oleji mají silikonové oleje zdatně vyšší stlačitelnost. Siloxanové polymery mají velmi dobré dielektrické vlastnosti a vynikající odolnost vůči stárnutí, oxidaci a smykovému napětí. Jako všechny silikony mají velice dobrou tepelnou stabilitu [9].

Silikonové pryskyřice mají molekuly s 3D strukturou sítě. Silikonové pryskyřice jsou využívány jako impregnační laky nebo skelné lamináty. Je možné jimi vytvořit vrstvy, které mají výborné dielektrické vlastnosti, tepelnou odolnost a odpuzují vodu. Jsou využívány v elektrických aplikacích, kde vylepšují odolnost, bezpečnost a spolehlivost. [2,10]

Silikonový kaučuk má poměrně unikátní molekulární strukturu, protože má jak vlastnosti anorganických sloučenin, tak i organických sloučenin. Z kaučuků je možné fyzikálním či chemickým zesíťováním vytvořit elastomery, které jsou často označovány jako pryže. Díky

spojení křemíku a kyslíku v silikonové pryži a jejími neorganickými vlastnostmi se silikonová pryž stává lepší než běžné organické pryže. Silikonové pryže je možné klasifikovat podle procesu vulkanizace na pryže vulkanizované při nízkých teplotách (LTV), pokojových teplotách (RTV) a vysokých teplotách (HTV) [11].

Výhody silikonové pryže spočívají primárně v lepší odolnosti vůči tepelnému namáhání. Například na rozdíl od organické pryže (butadien styrenového kaučuku), kdy pracovní teplota tohoto materiálu je uváděna od -46 °C do 100 °C, tak pro silikonovou pryž je rozsah těchto hodnot vyšší a to od -60 °C do 200 °C. Dalšími vlastnostmi, kterými předčí SBR, jsou stálost v různých podnebích a také rezistence vůči ozonu. Dalšími přínosy jsou chemická stabilita nebo dobré dielektrické vlastnosti. Díky těmto vlastnostem je silikonová pryž využívána v mnoha různých odvětvích, například v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu, elektrických a elektronických aplikacích, lékařství či v potravinářském průmyslu. [2,12,13]

Pro výrobu silikonové pryže je možné využití různých metod. Jsou to metody vstřikování do forem, extruze a tvarování pod tlakem.

Extruze je zahájena vložením silikonové preformy do extrudéru a proces extruze probíhá při vysokých teplotách, kdy je rotačním pohybem šneku protlačován materiál přes matici, která udává tvar před vytvrzením. Finální produkt je očištěný, zchlazený a upravený na požadovanou velikost. Tato metoda je využívána pro masové produkce, aby bylo dosaženo správného výsledku, tak jsou kladeny vysoké nároky na optimální nastavení a seřízení používaných zařízení. [14,15]

Vstřikování je používáno pro tvorbu složitějších tvarů, kdy jsou složky tekutého silikonového kaučuku vloženy do vstřikovacího lisu. V přístroji se nachází míchací hlavice, které důkladně promísí směs, následně je směs protlačena přes síto eliminující případné části předčasně vytvrzeného materiálu. Nakonec je směs vstřikována do forem, které jsou vyhřívané na 160 °C - 200 °C. Ve formě probíhá síťování. Nevýhodou mohou být bubliny ve výsledném výrobku [16].

Tvarování pod tlakem probíhá vložením předvytvrzené silikonové pryže do vyhřívané formy. Dutina formy je následně uzavřena pístem, který vyvíjí vysoký tlak na materiál, tím je materiál rozmístěn rovnoměrně po celé formě. Pro homogenní vytvrzení finálního produktu je forma rovnoměrně zahřívána [15].

1.3 Silikonové materiály v elektrotechnice

Silikonové materiály jsou v elektrotechnice využívány primárně pro jejich dobré dielektrické vlastnosti. Tyto dielektrické vlastnosti jsou pro silikonovou pryž stabilní i ve vysokém rozsahu teplot. Dalšími vlastnosti, které dělají silikony atraktivní, jsou voděodolnost a velmi nízká absorpce vody. Silikony většinou splňují požadované vlastnosti i desítky let v nepříznivých podmínkách a mají velmi dobrou odolnost vůči UV záření [17].

1.3.1 Kabelová vedení

V kabelovém vedení jsou silikonové materiály využívány primárně jako kabelové spoje a kabelové koncovky. Od kabelových spojů a koncovek jsou očekávány výborné izolační schopnosti. Dále je vhodné, aby tyto prvky byly elastické, což je vlastnost, kterou silikon splňuje. I díky svým hydrofobním vlastnostem jsou silikonové prvky vhodnou volbou, dále jsou odolné vůči zvýšené teplotě, UV záření a ozonu. V případě, že je požadavkem stínění kabelového spoje, je možné silikonový prvek pokrýt vodivým povlakem. V neposlední řadě jsou pro kabelová vedení využívány silikonové materiály jako žilové izolace kabelů či pláště kabelů pro různé aplikace, například v prostředí s vysokými provozními teplotami. [7,18]

1.3.2 Elektroizolační komponenty přenosové soustavy

V elektrické přenosové a distribuční soustavě je důležitým komponentem elektrický izolátor. Často využívané skleněné či keramické izolátory mají sice dobré mechanické vlastnosti a dobrou odolnost vůči UV záření. Nicméně jejich křehkost a vysoká hmotnost je velkou nevýhodou těchto materiálů. Pro tyto vysokonapěťové aplikace je proto stále častěji využívána právě silikonová pryž. Izolátory ze silikonové pryže jsou výrazně dražší variantou, ale je možné na porcelánové či keramické izolátory nanést jen vrstvu silikonového materiálu, což výrazně sníží cenu [19]. Takovéto řešení je vhodné využívat například v místech, kde jsou izolátory vystaveny znečištění a vlhkosti, protože silikonová vrstva odpuzuje vodu a snižuje tak i riziko vzniku případných požárů. [7,20]

1.3.3 Pouzdření elektronických zařízení

Silikonové elastomery se často využívají pro zalévání obvodů či pouzdření součástek. Z materiálů pro pouzdření elektroniky se připravují ochranné vrstvy proti působení různých okolních faktorů, které by mohly způsobit narušení funkce elektronických systémů.

Například předchází vniknutí vody a znečištění elektrického obvodu a chrání systém v případě nárazů a vibrací [21].

Výhodou silikonových materiálů oproti epoxidovým pryskyřicím je například vyšší flexibilita spolu s tepelnou odolností, kdy si materiál uchovává své mechanické vlastnosti ve vysokém rozsahu teplot. Dále je výhodou výborná odolnost vůči UV záření a schopnost samozhášení. Silikonové materiály jsou často využívány pro citlivé komponenty, protože v případě poruchy je možné je rozpustit pomocí rozpouštědla, a tudíž je jednoduše opravit. Mají nižší adhezi, ale tento problém je možné řešit podkladovými nátěry. V adhezi vynikají stále běžnější epoxidové pryskyřice, které mají také jako silikony výbornou chemickou odolnost a fungují dobře při vysokých teplotách. [21,22]

1.4 Kompozity na bázi silikonu

Pro zlepšení vlastností silikonové pryže se do materiálu přimíchávají různá plniva a aditiva, která spolu se silikonovou pryží po vytvrzení tvoří kompozit. Kompozity mohou mít oproti samotné silikonové pryži lepší mechanické, termické nebo také elektrické vlastnosti. Mohou být využívány v různých aplikacích, například v automobilovém průmyslu, letectví, elektronice [23].

Pro vylepšení mechanických vlastností jsou využívána plniva ve formě vláken. Mohou to být skleněná, uhlíková nebo aramidová vlákna. Tyto kompozity mají oproti čistému materiálu vyšší pevnost v tahu a tuhost [23].

Pro vylepšení elektrických vlastností jsou přimíchávána některá částicová plniva. Při vyšší intenzitě elektrického napětí dochází k předčasné degradaci dielektrického chování a hydrofobicity kompozitních materiálů. Za účelem homogenizace rozložení elektrického pole podél povrchu izolátorů ze silikonové pryže se připravují nelineární kompozity ze silikonové pryže plněné nanokarbidem [24].

2 Silikonové materiály v kabelovém průmyslu

V kabelovém průmyslu je využívána silikonová pryž díky svým výborným vlastnostem (vysoká rezistivita, nízký ztrátový činitel, teplotní odolnost, ...). Je využívána jako izolace vodičů díky své teplotní odolnosti, flexibilitě a dalším již výše zmíněným vlastnostem, nalezneme jí také jako kabelové pláště [25].

Tab. 1: Porovnání izolačních materiálů PVC a SR [1,26,27]

	PVC	SR
Výhody	Levné, odolnost vůči chemikáliím, korozi, abrazi, povětrnostním vlivům	Flexibilita, tepelná odolnost
Prostředí	Vnitřní/Venkovní	Prostředí s vysokými a nízkými teplotami
Teplota	-40 °C až 105 °C	-60 °C až 200 °C
Nevýhody	Nízká flexibilita	Nízká schopnost odvádět elektrický náboj

2.1 Využití

Kabely s izolační vrstvou ze silikonové pryže mají pracovní teplotu mezi -60 a 200 °C. Nicméně není vhodné dlouhodobé překračování teplotám nad 160 °C. Také není vhodné, aby byl kabel vystaven teplotě nižší než -60 °C. Při dlouhodobém překročení těchto teplot dochází ke změně vlastností materiálu a nemusí být zajištěna správná funkce izolace, případně dojde k rychlejší degradaci. Do teploty 160 °C nedochází k žádným patrným změnám vlastností silikonové pryže, při překročení teploty 200 °C je stále možné používat pryže až po dobu 10 000 hodin. Při teplotě dosahující 350 °C si silikonová pryž zachová své vlastnosti pouze krátkodobě [1]. Tyto teploty se mohou mírně lišit vzhledem k určitým rozdílům ve struktuře silikonových pryží od různých výrobců. Například společnost Elkem, výrobce níže testovaného materiálu, definuje pracovní teploty od -50 °C do 300 °C [28].

Takovéto kabely mají vedle výborné teplotní odolnosti, dobrou odolnost vůči chemikáliím, jsou hydrofobní a mají velmi dobrou odolnost vůči UV záření [25,29]. Zmíněné vlastnosti dělají z kabelů se silikonovou izolací ideální volbou pro různé aplikace,

například v průmyslu je možné je nalézt ve slévárnách, ocelárnách, hutích, válcovnách, sklárnách, či pekárnách. Takové to kabely jsou vhodné i pro klimatizace. [17,25,30]

Silikonové pryže využívané jako izolace vodičů můžeme nalézt i v aplikacích (např. letecký průmysl), kde je důležitá v použitých materiálech absence halogenových prvků, které se v případě degradace izolace uvolňují a vytváří toxické zplodiny. Tyto materiály také disponují výbornou flexibilitou, díky čemuž jsou využívány například v medicínské oblasti, kde je od materiálu vyžadována odolnost vůči častému ohýbání, například u vodičů sond. Vzhledem k tomu, že v medicínských aplikacích přijdou určité části do styku s pacienty, je důležité někdy i kabely sterilizovat při vysokých teplotách, přičemž i v tomto ohledu silikonová pryž vyniká [31,32]

Silikonová pryž je například od často využívaného PVC výrazně flexibilnější a je vhodnější pro vyšší rozsah teplot, při rozkladu nedochází k uvolňování toxických zplodin, ale velkou roli hraje cena produktu, protože silikon je finančně náročnější volbou tudíž je před jeho využitím je potřeba zvážit i tento aspekt [27].

2.2 Požární bezpečnost

Z pohledu požární bezpečnosti je velice důležitá volba správného materiálu pro izolaci kabelů. Požadavky na izolaci jsou takové, že by si v případě požáru měla udržet funkci i ve vysokých teplotách a ideálně odolávat ohni. Mnoho míst vyžaduje povinné využití bezpečnostních kabelů za účelem zajištění správného fungování důležitých systémů. Tato opatření jsou obzvláště důležitá v oblastech s vysokou koncentrací lidí, aby byla zajištěna správná funkce kritických elektrických zařízení. Tyto zařízení slouží k evakuaci osob v případě požáru a zahrnují nouzové osvětlení a únikové cesty. Rovněž je nezbytné, aby byla zajištěna správná funkce poplašných systémů pro upozornění osob a aktivaci hasicích zařízení. Zároveň je žádoucí, aby při tavení či hoření izolace nedocházelo k úniku nebezpečných zplodin do okolí. Už výše zmiňované PVC sice poskytuje výborné oheň retardační vlastnosti, nicméně při hoření dochází k uvolnění kyselých plynů a černého kouře. Tyto jevy při případné evakuaci znemožňují bezpečný únik kvůli snížené viditelnosti a vdechování toxických zplodin. Při hoření silikonu k žádnému takovému jevu nedochází. [33,34,35,36]

Odolnost vůči plamenu je poměrně komplexní vlastnost materiálu, která je závislá na mnoha faktorech, například složení, struktuře, tepelné stabilitě a prostředí. Především

složení materiálu má výrazný vliv na finální odolnost vůči plamenu. Izolace odolná vůči plamenu musí splnit požadavky normy IEC 60331 (Zkoušky elektrických kabelů za podmínek požáru – Celistvost obvodu). Tato odolnost zaručuje funkci vodiče pro výše zmíněné funkce důležité pro evakuaci osob. Velmi často je k tomuto využívána silikonová pryž, která má i dobré oheň retardační vlastnosti pro jejichž vylepšení mohou být následně přimíchávány i různé další složky (aditiva). Aby byla izolace kabelu označená za oheň retardační, musí splňovat normu IEC 60332 (Zkoušky elektrických a optických kabelů v podmínkách požáru).[35,37,38]

Při vystavení plamenu se silikon přemění na tvrdou keramickou vrstvu na vodiči, která dovede izolovat vodič až do 950 °C. Při hoření silikonu dochází k uvolňování oxidu uhličitého, vodních par a oxidu křemičitého, které nejsou pro lidský organismus toxické [34].

V různých oblastech začínají být vyšší požadavky pro oheň retardační materiály, například v oblasti raketové techniky, jaderné energetiky nebo letectví. Pro vylepšení keramizačních vlastností jsou využívána minerální plniva a tavidla, která jsou přimíchávána do silikonové pryže [39,40].

Tato plniva jsou založena na vápníku a patří mezi ně například [41]:

- oxid vápenatý (CaO),
- kalcit (CaCO₃),
- wollastonit (CaSiO₃).

Dále se využívá minerálů na bázi hliníku:

- oxid hlinitý (Al₂O₃),
- bohmit (AlOOH),
- slída.

Využití těchto plniv zajistí posun tavení keramické fáze, tím se sníží teplota a výsledkem je keramizační proces, který probíhá zároveň s degradací polymerní matrice. Díky tomuto procesu je omezený únik toxických zplodin a vytvoří se tenká keramická vrstva na povrchu vodiče. Tato tenká vrstva na povrchu vodiče se nerozpadne a vydrží velmi vysoké teploty, které sahají až k bodu tání mědi [42].

Nicméně i přes slibné výsledky těchto plniv je nutné provedení dalších výzkumů. Hlavní nejistotou při využívání kompozitů ze silikonové pryže jsou její ablační vlastnosti, kdy

dochází k degradaci materiálu a na povrchu zůstává keramická vrstva. Tyto ablační vlastnosti omezují vývoj těchto kompozitů, tudíž je kladen důraz na hlubší pochopení struktury a chemických reakcí. K rozšíření znalostí bude nutný také výzkum s různými druhy silikonové pryže jako matrice, kdy zatím je většina studií prováděna s RTV silikonovou pryží. Změnou typu silikonové matrice a různých plniv vykazují kompozity různé chování, a proto je nutné objasnit mechanismy probíhající v takovýchto kompozitech [40].

3 Experimentální část

Experimentální část této diplomové práce představuje nejprve přípravu vzorků ze silikonového materiálu Bluesil FRC 8470 E dodaného společností Elkem. Vzorky pro testování byly připravovány pomocí extrudéru, což byl doporučený způsob přípravy výrobcem, a následně byl vyzkoušen i postup přípravy pomocí lisu. Pomocí lisu byl vytvořen kompozit na bázi silikonu, kdy byla k silikonovému materiálu Bluesil FRC 8470 E přidána skleněná vlákna. Dále byly připraveny vzorky ze silikonového materiálu Lukopren N 1000, který je materiálem určeným primárně k pouzdření elektronických zařízení a je připravován smícháním dvou složek a následným vytvrzením. Připravené vzorky byly následně analyzovány vybranými diagnostickými metodami a získané výsledky byly vyhodnoceny.

3.1 Testované materiály a příprava vzorků

V rámci realizovaného experimentu byl primárně analyzován materiál Bluesil FRC 8470 E od výrobce Elkem, který je jednosložkovým HTV silikonem, který je vyráběn pro izolaci vodičů a má zajišťovat výborné bezpečnostní vlastnosti kabelu. Také byl testován silikonový materiál pro zalévání elektronických součástek Lukopren N 1000, který je dvousložkovým RTV silikonovým materiálem.

Bluesil byl zpracován na extrudéru, pro který je materiál určený. Dále byl zpracován pomocí lisu pro možnost srovnání vlastností výsledného vulkanizovaného materiálu podle použité metody přípravy. Byl připraven i ve formě kompozitu, kdy byla mezi vylisované pláty vkládána a vlisována skleněná tkanina.

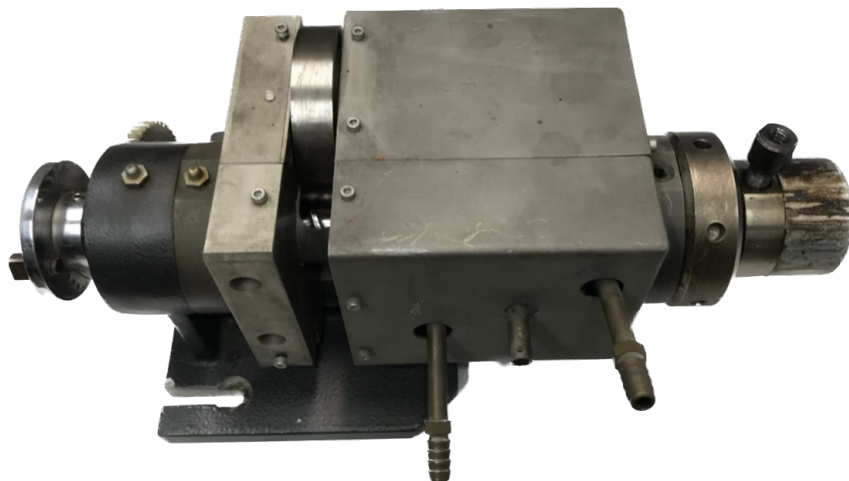
3.1.1 Specifikace materiálů

Bluesil FRC 8470 E je silikonový jednosložkový materiál, který přímo obsahuje vulkanizační činidlo 2,4-dichlorobenzoyl peroxid. Tato silikonová pryž je navržena pro kabely důležitých rozvodných systémů včetně bezpečnostních systémů (např. požárních alarmů). V daných kabelech je potřeba z důvodu bezpečnosti využít izolace, které i v případě požáru zajistí integritu kabelů a jejich dlouhodobou funkčnost. Tento materiál je stabilní v teplotním rozsahu -50 °C až 300 °C . Tento materiál je dodáván ve formě jednosložkové hmoty se zakomponovaným vulkanizačním činidlem, které zajišťuje vulkanizaci při zvýšené teplotě. Doporučovaným způsobem zpracování materiálu je využití extrudéru [28].

Lukopren N 1000 je dvousložkový silikonový materiál kondenzačního typu, kdy složka A představuje samotný silikonový polymer (terminovaný poly(dimethylsiloxan) hydroxy) a složka B je katalyzátorem (tvoří dimethylcín dineodekanoát), který zajišťuje vulkanizaci při laboratorní teplotě. Reakcí složky A se složkou B tak dochází při běžných podmínkách k vytvoření silikonové pryže (k vulkanizaci v celém objemu směsi). Tento materiál slibuje skvělé elektroizolační vlastnosti, které jsou neměnné i při významném tepelném zatížení. Je využívám především pro zalévání součástek za účelem jejich ochrany. Tento materiál je velmi flexibilní, ale zároveň není příliš mechanicky pevný a odolný vůči mechanickému poškození. Daný materiál vyrábí Lučební závody Kolín.

3.1.2 Zpracování jednosložkového silikonového materiálu

První série vzorků jednosložkového silikonového materiálu byla připravena pomocí laboratorního jednošnekového extrudéru pro gumárenské aplikace (viz Obr. 2). Připravené vzorky se lišily teplotou při vytlačování a dobou dosít'ování. Vzorky označené A0, A1 a A2 byly vytlačovány při teplotě 70 °C a vzorky označené B0, B1 a B2 byly vytlačovány při teplotě 90 °C. Dosít'ování probíhalo v horkovzdušné sušárně při teplotě 115 °C, kdy vzorky A0 a B0 do sušárny nebyly umístěny vůbec. Vzorky A1 a A2 byly v horkovzdušné sušárně po dobu 8 minut a vzorky A2 a B2 po dobu 16 minut.



Obr. 2: Fotografie extrudéru

Pro přípravu pomocí lisu (viz Obr. 3) byl nejdříve z výchozího silikonového materiálu ve formě plátu o tloušťce cca 1 cm vyříznut čtvercový vzorek o rozměrech přibližně 3,5 × 3,5 cm, který byl umístěn do teflonové fólie spolu s distančními podložkami o tloušťce 0,5 mm. Takto připravený vzorek byl vložen do lisu a přitlačen silou 10 kN. Vzorek byl nejprve plynule zahříván na teplotu 100 °C, tato teplota byla udržována po dobu 5 minut a

následně byl vzorek zahřát na teplotu 165 °C. Teplota 165 °C byla udržována po dobu 15 minut. Vzorek byl vyjmut z lisu a samovolně vychladnul.



Obr. 3: Výchozí silikonový materiál Bluesil (vlevo), vyhřívaný hydraulický lis (uprostřed) a vzorek připravený lisováním (vpravo)

3.1.3 Příprava dvousložkového silikonového materiálu

Dvousložkový silikonový materiál Lukopren byl připraven smícháním dvou složek Lukopren N 1000 a Lukopren Katalyzátor N. Připravená směs byla nalita do teflonové formy (viz Obr. 4) a pro zředukování vzduchových bublinek byl vzorek ve formě umístěn do exikátoru umožňujícího vyvakuování. Takto vytvořený vzorek silikonového materiálu se nechal vulkanizovat při pokojové teplotě po dobu 24 hodin.

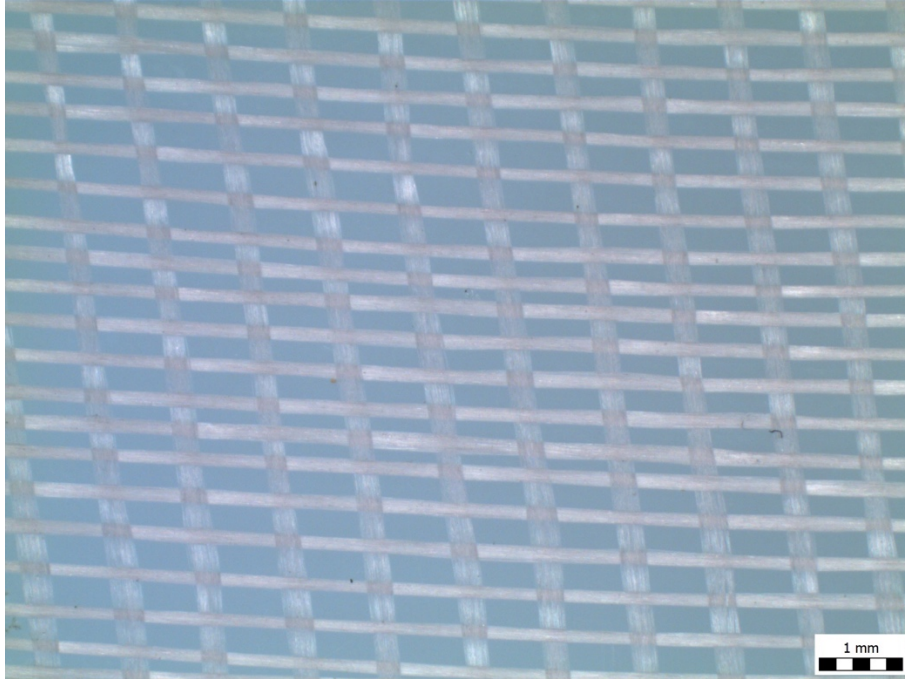


Obr. 4: Příprava dvousložkového silikonu

3.1.4 Příprava vzorků kompozitu na bázi silikonu

Kompozit byl připravován z vylisovaných plátů, byl připraven dvouvrstvý a třívrstvý kompozit. Jednotlivé pláty byly připravovány pomocí lisu, kdy byly z dodaného materiálu

vyříznuty čtvercové vzorky o rozměrech cca $3,5 \times 3,5$ cm, postupně byly všechny čtvercové vzorky rozlisovány na tloušťku určenou distančními podložkami o tloušťce 0,5 mm a vylisovány pomocí lisu. Plotny lisu byly k sobě přitlačeny silou 10 kN. Poté byly jednotlivé pláty z lisu vyjmuty (viz Obr. 6). Mezi takto připravené pláty byla vložena tkanina tvořená skleněnými vlákny. Skleněná vlákna jsou mezi sebou protkaná ve dvou směrech dle Obr. 5.



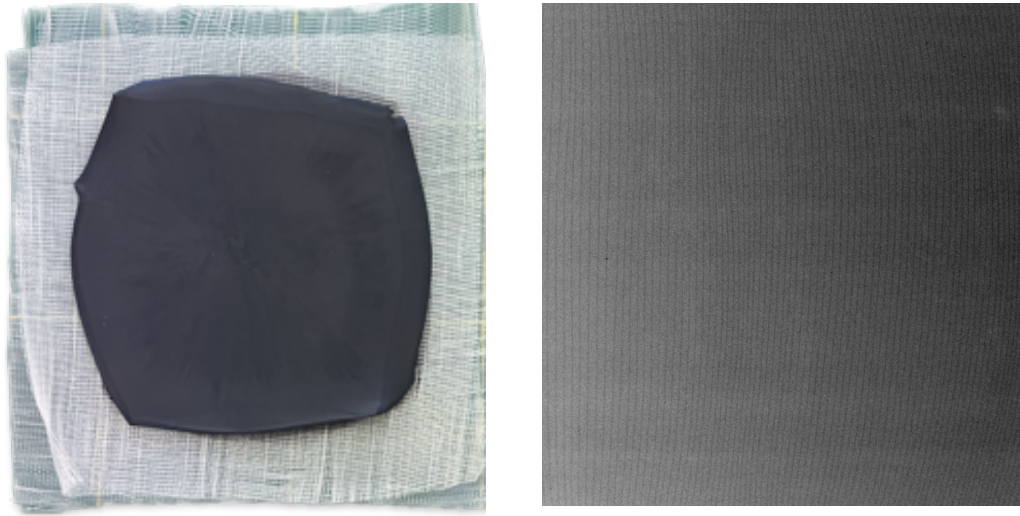
Obr. 5: Mikroskopický snímek struktury tkaniny ze skleněných vláken



Obr. 6: Pláty silikonového materiálu a skleněné tkaniny pro vytvoření kompozitu

Pláty se skleněnou tkaninou byly umístěny do teflonové fólie a spolu s distančními podložkami o tloušťce 1 mm umístěny do lisu. Byly přitlačeny silou 10 kN a zahřívány na $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 5 min a na $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 15 min. Třívrstvý kompozit byl připraven obdobně, jen obsahoval vyšší počet vrstev. Třívrstvý kompozit byl složen ze tří plátů silikonového materiálu, mezi které byly umístěny dvě vrstvy skleněné tkaniny (střídání

silikonových plátů a skleněné tkaniny) viz Obr. 7. Vytvrzovací teploty byly stejné jako u dvouvrstvého kompozitu a rozdíl byl jen v tloušťce distančních podložek, která byla 2 mm.



Obr. 7: Fotografie vzorku dvouvrstvého kompozitu (vlevo) a snímek struktury skleněných vláken v silikonu z CT (vpravo)

Pro takto připravovaný kompozit bylo využito jednosložkového silikonového materiálu, hlavně z důvodu přípravy. Pro dvousložkový silikonový materiál by byla příprava kompozitu s obsahem skleněné tkaniny problematická.

3.2 Diagnostické metody a postupy měření

Vzorky silikonových materiálů byly testovány různými metodami, přičemž nejprve bylo provedeno testování pomocí infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací. Tato metoda je ideální pro prvotní určení chemické struktury materiálu. Následně byla využita simultánní termická analýza a diferenční skenovací kalorimetrie jako metody, které patří do kategorie termických analýz a popisují chování materiálu v určitém rozsahu teplot. Měření vnitřní rezistivity bylo následně provedeno jako standardní měření elektroizolačních materiálů. Elektrická pevnost byla měřena jako další standardní parametr elektroizolačních materiálů, který charakterizuje odolnost materiálu při jeho namáhání v silném elektrickém poli. Širokopásmová dielektrická spektroskopie byla využita pro popis chování dielektrika v širokém rozsahu teplot a frekvencí. Tato diagnostická metoda umožňuje popis chování materiálu z pohledu vznikajících dielektrických polarizací. V neposlední řadě byly realizovány mechanické zkoušky.

3.2.1 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR) je široce využívaná metoda pro hodnocení chemických vazeb v materiálech, čehož se často využívá např. v oblasti organické syntézy, polymerní vědy, petrochemického průmyslu a farmacie. Na základě hodnocení chemických vazeb je možné popisovat i mechanismy chemických reakcí probíhajících v materiálech a detekovat případné nestabilní látky [43].

V materiálu neustále vibrují všechny atomy v molekulách. Tyto vibrace mají své specifické frekvence a pokud tato vibrační frekvence odpovídá využitému infračervenému záření, kterému je vzorek vystaven, je toto záření o určité frekvenci molekulami absorbováno [43].

Pro analýzu silikonového materiálu pomocí infračervené spektroskopie byl využit přístroj Nicolet 380 od výrobce Thermo Scientific (viz Obr. 8). Daný přístroj byl využit s přípravkem pro měření metodou zeslabeného úplného odrazu ATR (attenuated total reflection). Při této metodě je vzorek přitlačen k hranolu (krystalu) s vysokým indexem lomu zhotoveným v daném případě ze ZnSe a IR záření interaguje s přiloženým vzorkem při opakovaném odrazu v povrchové vrstvě vzorku, přičemž dochází k utlumení určitých absorbovaných frekvencí [44]. V rámci analýzy byla nejprve změřena odezva na okolí, čímž se eliminuje vliv okolní atmosféry na výsledky měření, a poté byl měřen samotný materiál.

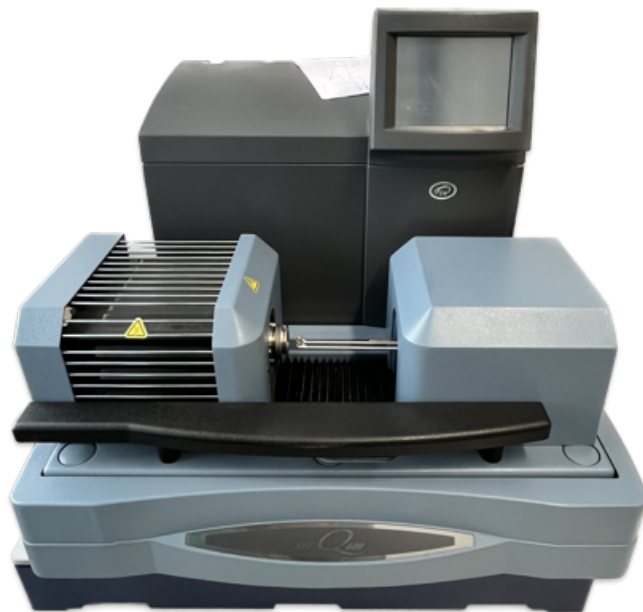


Obr. 8: Aparatura pro FTIR v režimu ATR s vloženým vzorkem silikonového materiálu

3.2.2 Simultánní termická analýza

Simultánní termická analýza je metoda, která umožňuje zkoumat vzorek z pohledu teplotní závislosti změny hmotnosti a teplotní závislosti tepelného toku. Při analýze vzorku je možné hodnotit výsledky obou měřicích metod současně. Velkou výhodou je, že měření probíhá při stejných okolních podmínkách, tedy při stejném rozložení tepelného pole v pídce či při stejné rychlosti ohřevu. Dále je simultánní analýza výhodná z důvodu kompenzace variability výsledků při měření více vzorků. Variabilita může být způsobena nehomogenitami ve vzorcích a případnými rozdíly ve tvaru vzorků. Touto analýzou je možné sledovat rozdíly mezi endotermními a exotermními reakcemi, které nejsou spojeny se změnou hmotnosti (tavení a krystalizace), a reakcemi, při kterých ke změnám hmotnosti dochází (oxidace či dekompozice).[45]

Pro simultánní termickou analýzu byl připraven vzorek vždy o hmotnosti 10 mg. Vzorek byl vložen do platinového kelímku a umístěn na vahadlo přístroje TA Instruments, SDT Q600 (viz Obr. 9). Měření probíhalo v teplotním rozsahu od laboratorní teploty do 700 °C s rychlostí ohřevu 10 °C/min.



Obr. 9: Aparatura pro simultánní termickou analýzu

3.2.3 Diferenční skenovací kalorimetrie

Diferenční skenovací kalorimetrie je metoda využívaná pro zkoumání vlivu tepelného působení v oblasti skelné transformace, krystalizace, či tavení. Změna tepelného toku může být zkoumána v závislosti na teplotě či na času v průběhu definovaného teplotního programu. Většina změn fáze v materiálech je doprovázena uvolněním nebo pohlcením tepla (exotermní či endotermní reakcí) [46].

Metodou DSC je možné zjistit charakteristiky materiálu, jako jsou teploty skelného přechodu, tavení, krystalizace, tepelná kapacita, teplotní stabilita či čistota materiálu. Pro určení čistoty materiálu je možné porovnávat průběh tepelného toku čistého referenčního polymeru a materiálů na bázi daného polymeru, kdy odchylky mohou znamenat například přítomnost příměsí. Metodu je možné využívat primárně pro pevné materiály (polymery, kompozity atd.), ale je možné analyzovat i kapaliny [47].

Pro analýzu DSC byl využit přístroj TA instruments DSC Q2000 (viz Obr. 10). Vzorek byl vždy připraven s hmotností 10 mg a byl vložen do hliníkového kelímku. Kelímek byl opatřen hliníkovým víčkem, které bylo propíchnuto pro přístup okolní atmosféry ke vzorku. Takto připravený vzorek byl vložen do autosampleru přístroje a bylo provedeno měření v teplotním intervalu od $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ s rychlostí ohřevu $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.



Obr. 10: Přístroj pro diferenční skenovací kalorimetrii

3.2.4 Měření rezistivity a elektrické pevnosti

Měření vnitřní rezistivity se provádí při hodnocení materiálu primárně pro aplikace v elektroizolačním systému. Při aplikaci stejnosměrného napětí na elektrody v kontaktu se vzorkem se proud vzorkem snižuje k ustálenému stavu. Snižování velikosti proudu je způsobeno odezníváním polarizací v materiálu a přesunem volných elektronů k elektrodám. Pro materiály, které mají vnitřní rezistivitu kolem $10^{10} \Omega \cdot m$, je ustáleného stavu obvykle dosaženo během 1 min, pro materiály s vyšší vnitřní rezistivitou se může hodnota proudu snižovat výrazně déle a pro takové materiály je potřeba realizovat další testování. [48]

Měření vnitřní rezistivity probíhá přiložením stejnosměrného napětí na elektrody, které jsou v kontaktu se vzorkem. Je možné vypočítat polarizační indexy (PI), které popisují časovou proměnnost absorpčního proudu. Polarizační indexy se určují v jedné minutě měření a v desáté minutě měření, kdy jsou počítány jako poměry proudů. Pro jednodominutový PI je vypočítán poměr proudu v patnácté a šedesáté sekundě a pro desetiminutový PI je poměr daný proudem v první a v desáté minutě. [49]

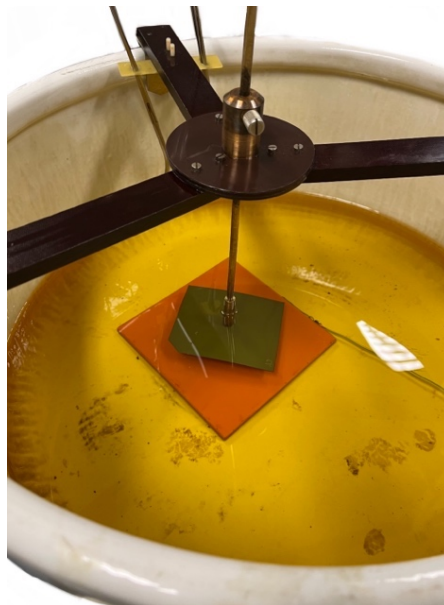
Pro měření byly připraveny vzorky s rozměry 10×10 cm. Tyto vzorky byly umístěny do zkratovací knížky, která zajišťuje vybití vzorku před testováním. Jednotlivé vzorky byly vkládány do elektrodového systému měřící soustavy skládající se z elektrodového systému elektrometru s integrovaným zdrojem a PC (viz Obr. 11). Měření probíhalo při stejnosměrném napětí 500 V.



Obr. 11: Sestava pro měření vnitřní rezistivity

Pro zjištění mezního elektrického namáhání izolantu je hodnocena elektrická pevnost materiálu. Elektrická pevnost materiálu je posuzována při zvyšování elektrického napětí na elektrodách, které jsou v kontaktu s pevným vzorkem. Při dosažení určitého napětí dochází u pevného materiálu k elektrickému průrazu, který vytvoří vodivou cestu mezi elektrodami. Pro kapalné a plynné materiály je tento jev nazýván přeskokem a po určité době dochází k regeneraci materiálu. Elektrická pevnost je poměrem průrazného napětí a tloušťky vzorku.

Elektrická pevnost byla měřena na vzorcích o rozměrech 10×10 cm. Nejdříve byla změřena tloušťka vzorku na 5 různých místech a z jednotlivých hodnot byla vypočítána průměrná hodnota tloušťky vzorku. Vzorek byl umístěn mezi elektrody o průměru 10 mm. Elektrodotový systém byl ponořen v nádobě s olejem (viz Obr. 12), který zajišťuje vyšší elektrickou pevnost okolí.



Obr. 12: Vzorek umístěný v elektrodotovém systému pro měření elektrické pevnosti

3.2.5 Širokopásmová dielektrická spektroskopie

Širokopásmová dielektrická spektroskopie (BDS) je laboratorní měřicí technika, která pokryje velice široké pásmo frekvencí od μHz po GHz. Měřený materiál je vložen do oscilujícího vnějšího elektrického pole. Pokud vzorek obsahuje jakékoliv nosiče náboje (ionty, či elektrony), vnější elektrické pole vyvolá jejich pohyb v prostoru, to vede k nenulovému makroskopickému dipólovému momentu nebo makroskopické polarizaci vzorku.[50]

Měření bylo prováděno na modulárním frekvenčním analyzátoru Alpha-A od výrobce Novocontrol. Na Obr. 13 vlevo je mainframe Alpha-A s aktivním elektrodovým systémem, který je umístěn v horní části. Na daném obrázku vpravo se nachází kryosystém Quatro s Dewarovou nádobou s tekutým dusíkem.

Měřený vzorek o rozměrech $3,5 \times 3,5$ cm byl vložen mezi válcové elektrody elektrodového systému, přičemž elektrody měly průměr 3 cm. Tento elektrodový systém se vzorkem byl umístěn do kryostatu, kde byla automaticky regulována teplota dle teplotního programu. Teplotní program byl nastaven od -150 °C do 150 °C a frekvenční interval byl nastaven od 1 Hz do 1 MHz.



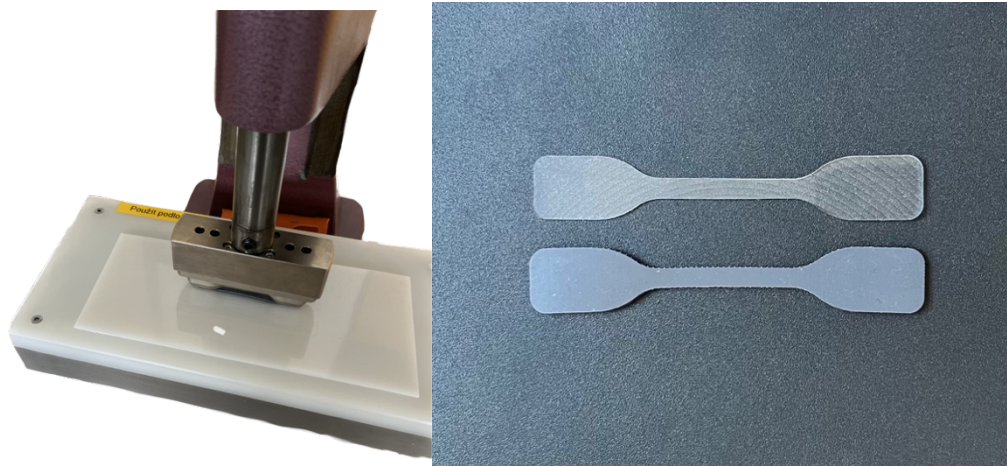
Obr. 13: Aparatura pro širokopásmovou dielektrickou spektroskopii s kryosystémem

3.2.6 Mechanické zkoušky

Pro mechanické testování materiálu byla vybrána tahová zkouška. Tato zkouška je prováděna na zkušebních vzorcích definovaných normou ČSN EN ISO 527-2. Tyto vzorky jsou protahovány na zkušebním stroji ve směru své hlavní podélné osy konstantní rychlostí. Zkouška probíhá, dokud nedojde k přetržení zkušebního vzorku nebo dokud napětí či deformace nedosáhnou předem zvolené hodnoty. Pro měření silikonového materiálu byla zkouška vždy ukončena přetržením vzorku ve zúžené části. Byla měřena síla působící na zkušební vzorek a také prodloužení vzorku (dráha příčnicku). Při znalosti průřezu vzorku ve

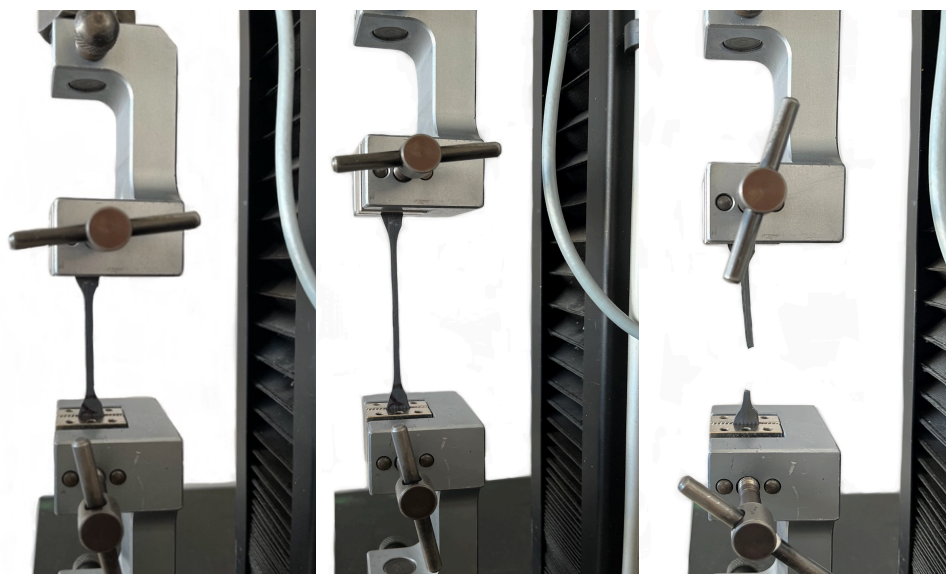
středové části je přepočítávána síla na mechanické napětí a dráha příčniku je přepočítávána na poměrné prodloužení.[51]

Při zkoušení materiálu tahem byl využit univerzální zkušební stroj LaborTech, LabTest 3.030, jehož maximální síla dosahuje 1000 N, nicméně pro testování silikonového materiálu nebylo potřeba využití vyšší síly než 50 N. Vzorky vyobrazené na Obr. 14 byly označeny a byla změřena jejich šířka a tloušťka ve zúžené středové části pomocí mikrometru.



Obr. 14: Ravnice pro přípravu vzorků (vlevo) a vzorky z materiálů Bluesil a Lukopren (vpravo)

Vzdálenost čelistí pro měření byla nastavena na 45 mm, rychlost průběhu byla nastavena na 100 mm/min a síla pro předpětí na 1 N. Vzorek byl upnut do čelistí tak, aby při zkoušce nevyklouzl, a bylo zahájeno měření, které se automaticky ukončilo po přetržení vzorku. Průběh zkoušky je viditelný na Obr. 15.



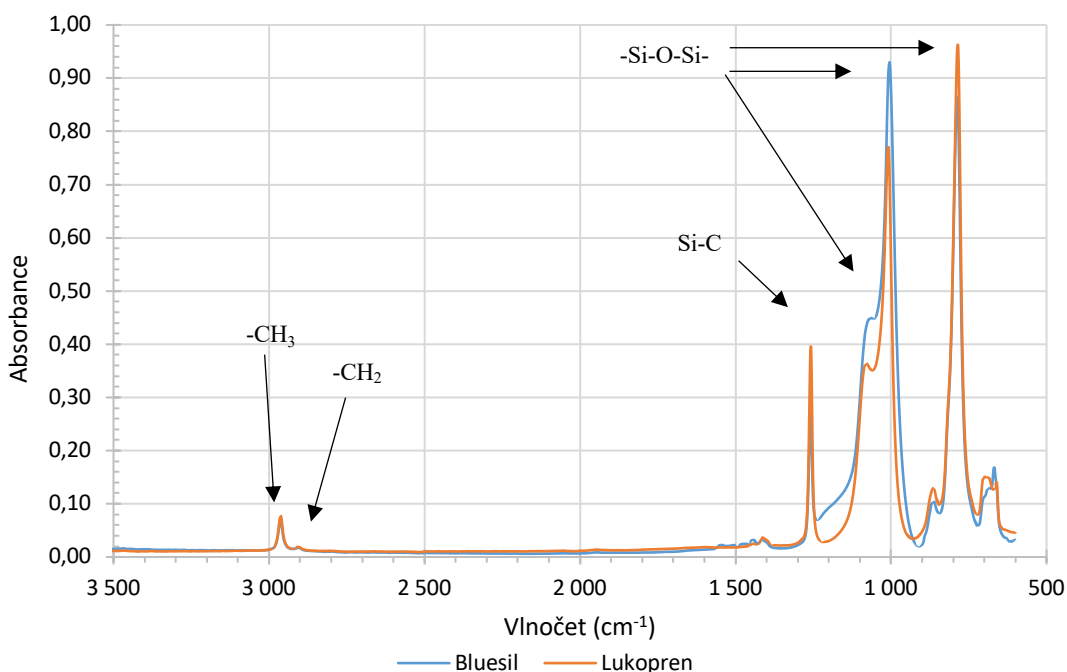
Obr. 15: Vzorek určený pro mechanické testování, zleva upnutý do čelistí, při zkoušce, po přetržení a ukončení zkoušky

4 Výsledky měření

V této kapitole jsou zpracovány a vyhodnoceny výsledky výše zmiňovaných analýz a měření. Testované materiály byly nejprve analyzovány pomocí infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací pro určení chemické struktury. Pro určení chování materiálů ve vysokém rozsahu teplot bylo využito metod STA a DSC. Pro posouzení chování vzorků z pohledu dielektrických vlastností byla měřena vnitřní rezistivita a elektrická pevnost a byla využita širokopásmové dielektrické spektroskopii. Nakonec byly vzorky mechanicky testovány na univerzálním zkušebním stroji uzpůsobeném pro tahové zkoušky.

4.1 Základní analýza chemické struktury

Pro zjištění chemické struktury připravených silikonových materiálů byla využita infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací. Výsledky prezentované ve výsledném grafu na Obr. 16 potvrzují, že se jedná o typické silikonové materiály. Výsledky byly porovnávány s výsledky v literatuře [52], kde je možné pozorovat kolem vlnočtu 3000 cm^{-1} vazby CH_3 vazba CH_2 . Na vlnočtu 1200 cm^{-1} je možné pozorovat vazbu Si-C a vrcholy v oblasti kolem 1000 cm^{-1} představují Si-O-Si vazby. Je patrné, že spektrogramy pro vzorek jednosložkového materiálu Bluesil a dvousložkového materiálu Lukopren jsou velmi podobné.

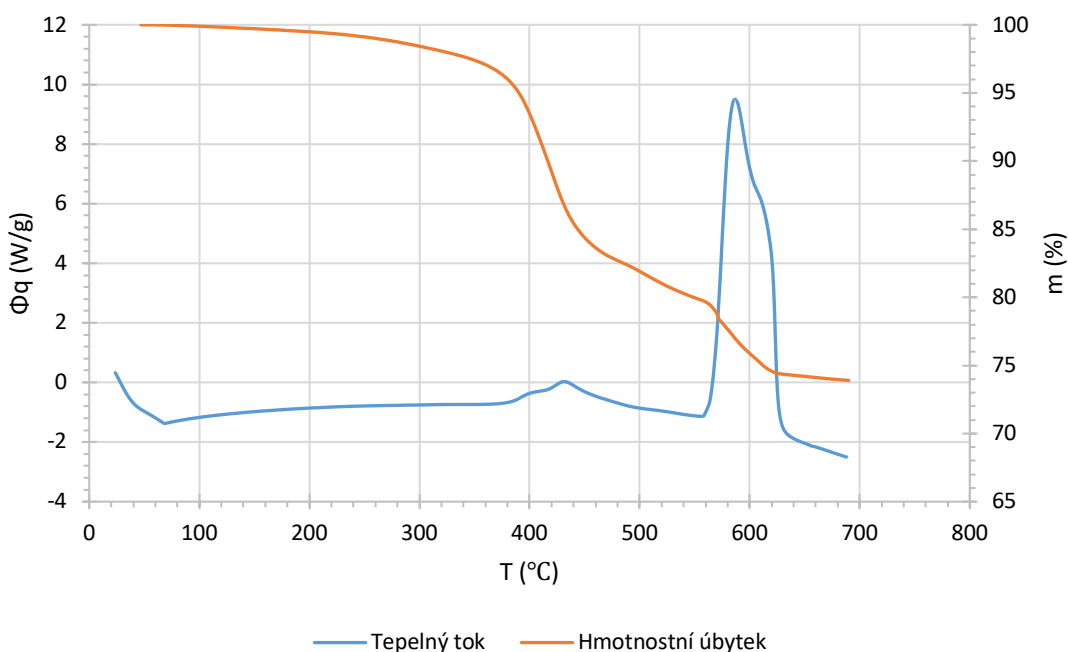


Obr. 16: Spektrogram pro testované silikonové materiály Bluesil a Lukopren

4.2 Výsledky termických analýz

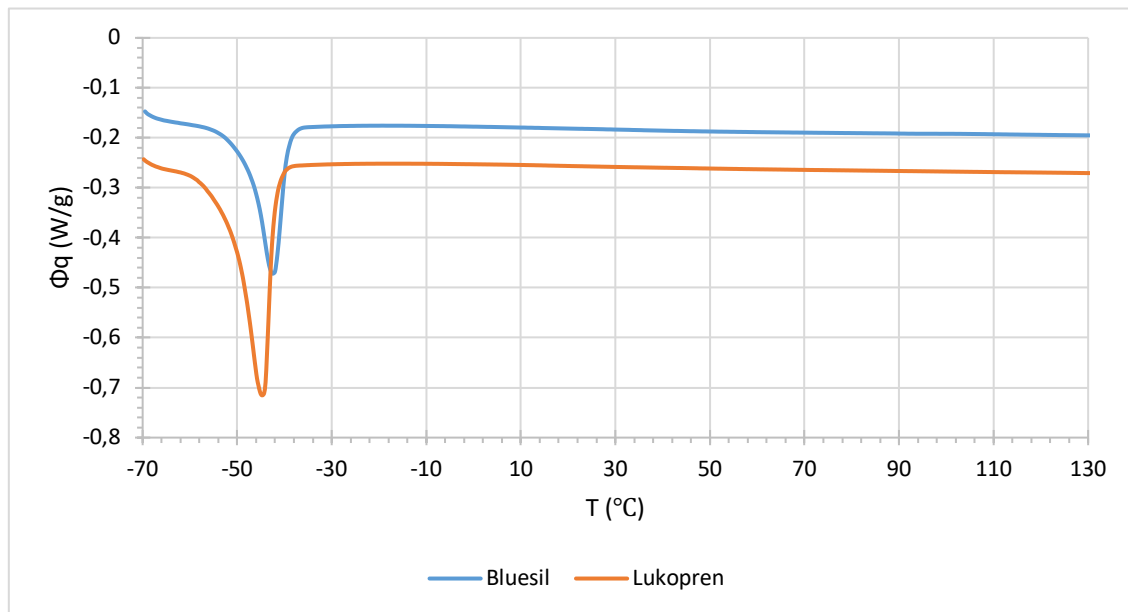
Po určení chemické struktury materiálu Bluesil byla provedena simultánní termická analýza, jejíž výsledky jsou znázorněny na Obr. 17. STA je prováděna z termických analýz jako první z důvodu určení teploty, při které materiál degraduje. Tato informace napomáhá při nastavení teplotních rozsahů pro další analýzy. Např. v případě samostatné diferenční skenovací kalorimetrie by nemělo docházet v přístroji k významnějšímu uvolňování degradačních produktů, které by mohly postupně zanášet píčku.

Z Obr. 17 je možné pozorovat hmotnostní úbytek materiálu, kdy úbytky materiálu jsou minimální do teploty přibližně 400 °C. Zjištěná hmotnostní stabilita koresponduje s poměrně konstantní hodnotou tepelného toku, který je taktéž vykreslen v grafu. Kolem zmiňované teploty 400 °C začíná docházet k termooxidaci, která probíhá do teploty 630 °C. Celková entalpie této termooxidace byla pomocí softwaru TA instruments vypočtena jako plocha pod křivkou a její hodnota je 2665 J/g. Je vhodné zmínit, že celkový hmotnostní úbytek materiálu byl přibližně 25 %.



Obr. 17: Závislost změny hmotnosti a tepelného toku na teplotě pro jednosložkový silikonový materiál

Na Obr. 18 je možné vidět výsledky diferenční skenovací kalorimetrie. Nejvýraznějším dějem je proces tavení krystalické fáze materiálu, který nastává v oblasti s maximem, pro materiál Bluesil při 42 °C. Tato reakce má endotermní charakter, což znamená, že je potřeba danou energii materiálu dodat. Plocha vzniklého endotermního vrcholu byla určena obdobně jako u analýzy STA pomocí softwaru TA Instruments a její hodnota je 10,69 J/g. Pro materiál Lukopren tavení krystalické fáze probíhá v oblasti s maximem při -45 °C.



Obr. 18: Závislost tepelného toku na teplotě pro materiál Bluesil a Lukopren

4.3 Vnitřní rezistivita a elektrická pevnost

Vnitřní rezistivita byla měřena na vzorcích silikonového materiálu Bluesil připravených na lisu a vzorcích odvozeného kompozitu s 1 vrstvou skleněné tkaniny a se 2 vrstvami skleněné tkaniny. Pro všechny testované vzorky byla změřena jejich průměrná tloušťka, vypočteny polarizační indexy a byla vypočtena vnitřní rezistivita vzorku.

Vypočítané a naměřené hodnoty pro vzorky samotného silikonu Bluesil připravené lisováním jsou v Tab. 2 a pro vzorky kompozitu jsou výsledky v Tab. 3, kdy vzorky s označením 1v jsou vzorky s jednou vrstvou skleněné tkaniny a vzorky s označením 2v jsou vzorky s dvěma vrstvami skleněné tkaniny. Průměrná hodnota polarizačního indexu v první minutě pro vzorek samotného silikonu je 3,095 a pro kompozity byly hodnoty srovnatelné. Průměrná hodnota polarizačního indexu v desáté minutě pro samotný silikon je 4,613 a i tato hodnota je velmi podobná s hodnotami pro kompozity. Vypočtená průměrná vnitřní rezistivita pro samotný silikon Bluesil je $7,84 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ a pro vzorky kompozitu se výsledná hodnota vnitřní rezistivity liší jen minimálně.

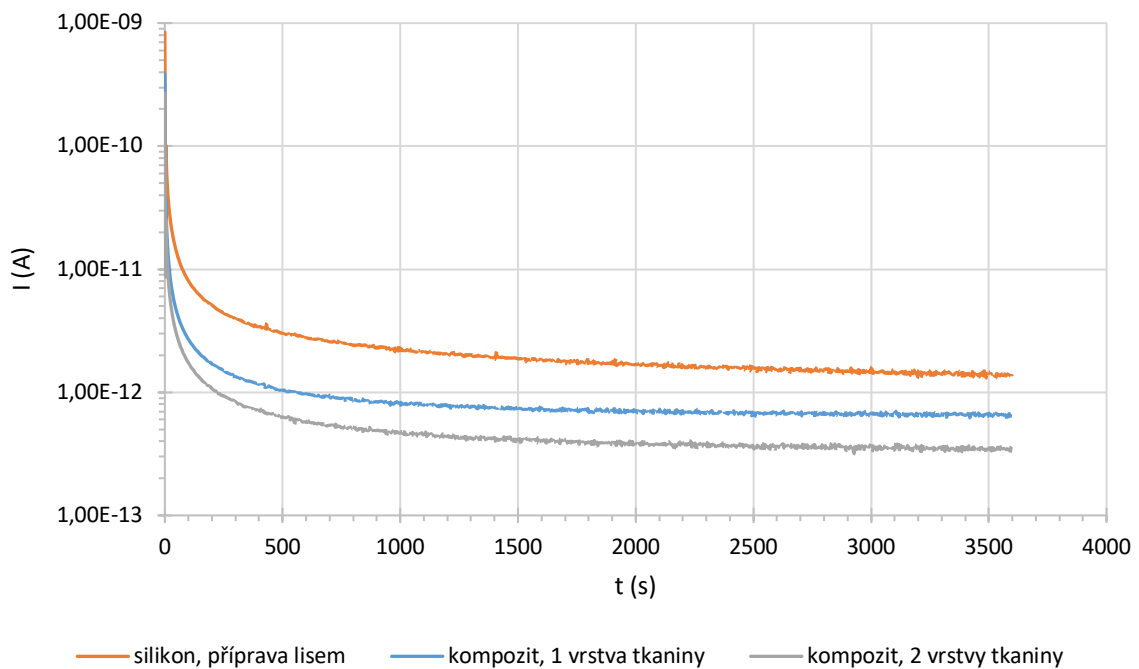
Tab. 2: Souhrn tloušťek, vnitřních rezistivit a polarizačních indexů pro lisovaný silikon Bluesil

	S1	S2	S3	S4	Průměr
t_p (mm)	0,736	0,696	0,701	0,715	0,712
$\rho_V (\cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm})$	8,87	7,65	5,90	8,94	7,84
PI_I (-)	2,854	3,152	3,191	3,184	3,095
PI_{I0} (-)	4,897	4,518	4,290	4,747	4,613

Tab. 3: Souhrn tloušťek, vnitřních rezistivit a polarizačních indexů pro vzory kompozitu s 1 vrstvou tkaniny a se 2 vrstvami tkaniny

	K1 – 1v	K2 – 1v	K3 – 2v	K4 – 2v	Průměr
t_p (mm)	1,762	1,722	2,327	2,350	2,040
$\rho_V (\cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm})$	6,70	2,89	7,33	8,45	6,34
PI_I (-)	3,298	2,768	3,202	3,363	3,158
PI_{I0} (-)	4,038	3,023	4,384	4,434	3,970

Na Obr. 19 jsou znázorněny časové závislosti proudu pro vzorky silikonu Bluesil připraveného lisováním, jednovrstvého kompozitu a dvouvrstvého kompozitu. Trend poklesu proudu je pro všechny vzorky stejný a nemění se tak začleněním skleněné tkaniny.



Obr. 19: Závislosti proudu na čase pro vybrané testované vzorky při absorpčních měřeních

Výsledky měření elektrické pevnosti silikonového materiálu Bluesil uvádí Tab. 4, kde jsou kromě hodnot elektrické pevnosti shrnuty také naměřené hodnoty tloušťky testovaných vzorků a průrazného napětí. Při měření došlo k destruktivnímu elektrickému průrazu, kdy došlo k vytvoření vodivé cesty napříč izolačním materiálem. Průměrná hodnota elektrické pevnosti je 34,58 kV/mm.

Tab. 4: Naměřené hodnoty průrazného napětí, tloušťka vzorků a vypočtená elektrická pevnost

vzorek	d (mm)	U_p (kV)	E_p (kV/mm)
1	0,72	20,92	28,93
2	0,72	24,93	34,48
3	0,71	24,22	34,35
4	0,69	26,64	38,55
5	0,72	26,31	36,75
		průměr	34,58

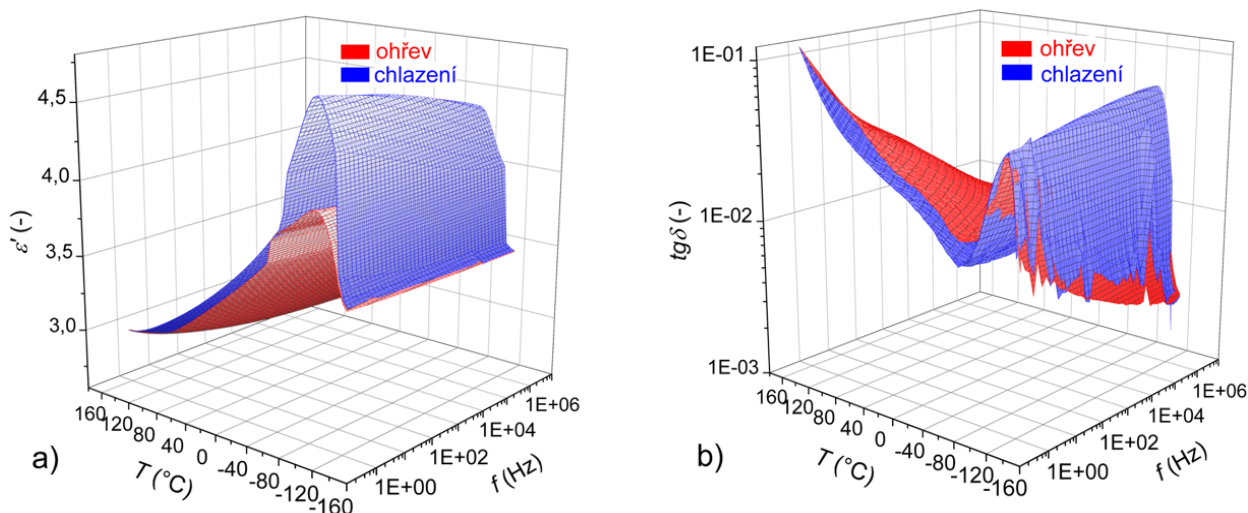
Na Obr. 20 je zobrazen vzorek se vzniklou vodivou cestou po elektrickém průrazu. Tato vodivá cesta má průřez o rozměrech přibližně 0,22 mm x 0,31 mm (hodnoty změřeny pomocí softwaru pro obsluhu mikroskopu).



Obr. 20: Fotografie místa průrazu, pořízená mikroskopem

4.4 Výsledky širokopásmové dielektrické spektroskopie

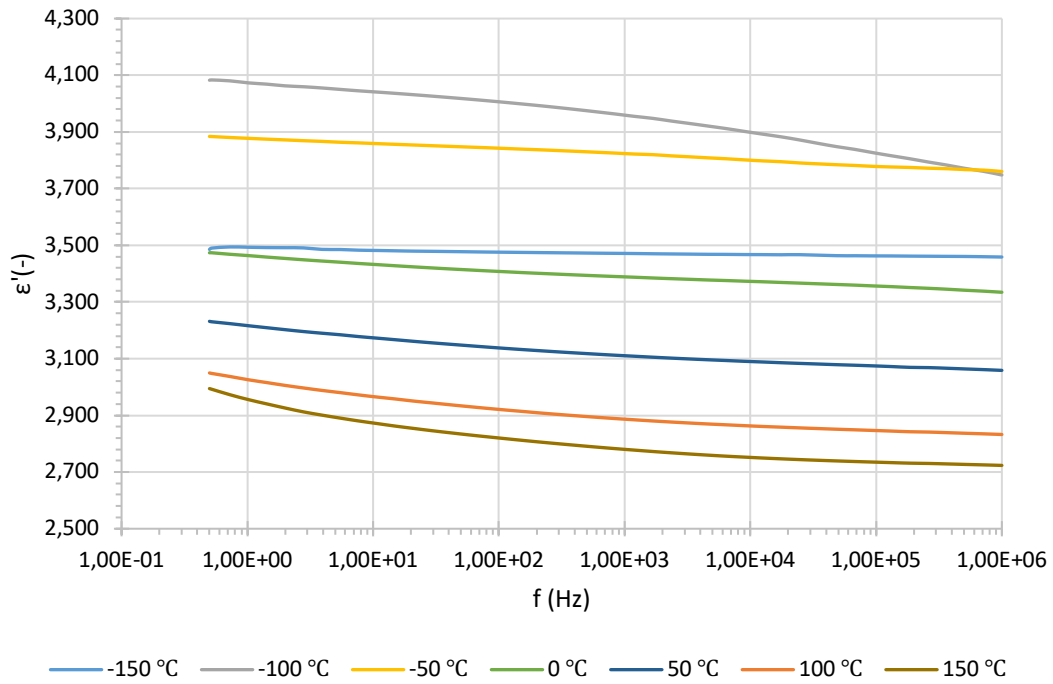
Měření pomocí širokopásmové dielektrické spektroskopie proběhlo ve frekvenční oblasti od 0,5 Hz po 1 MHz a v teplotním rozsahu od -150 °C do 150 °C. Na Obr. 21 jsou znázorněny frekvenčně – teplotní závislosti reálné složky permitivity a ztrátového činitele.



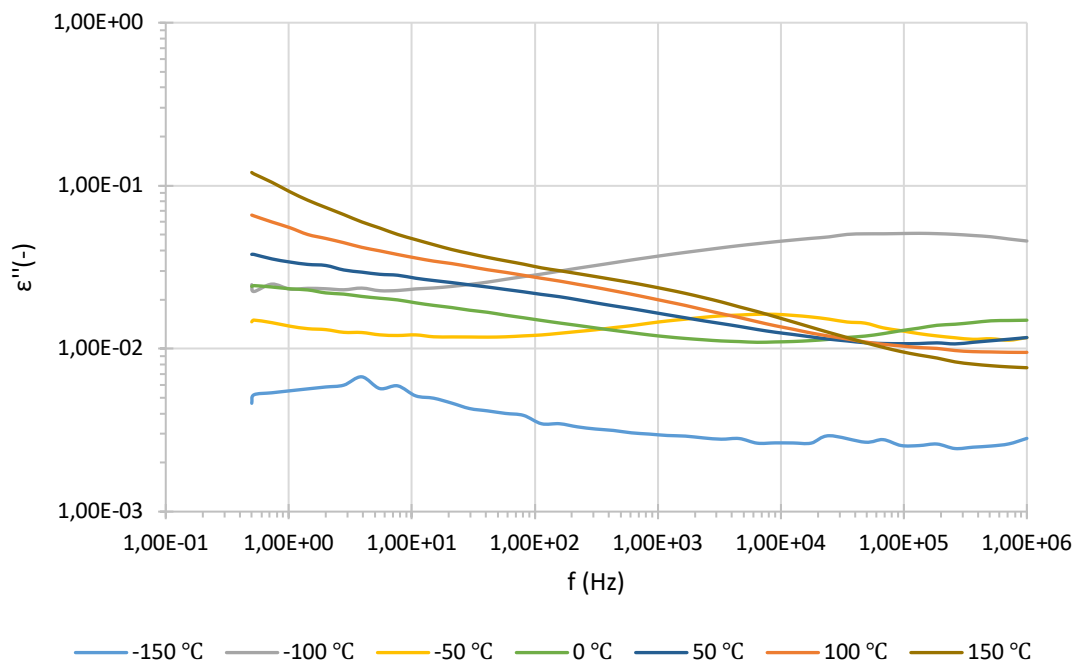
Obr. 21: Frekvenčně-teplotní závislost (a) reálné složky permitivity, (b) ztrátového činitele

Reálná složka permitivity je na frekvenci téměř nezávislá v téměř celé analyzované oblasti, výsledky jsou vidět na Obr. 22. Pro teplotu -150 °C je hodnota reálné složky permitivity kolem 3,5. Se stoupající teplotou tato hodnota roste přibližně do teploty -100 °C. Při dalším nárůstu teploty začínají hodnoty reálné složky permitivity klesat, kdy pro 150 °C je hodnota 2,8 na 1 kHz.

Na Obr. 23 je možné sledovat změny imaginární složky permitivity v závislosti na frekvenci. Pro teplotu -150 °C je hodnota imaginární složky permitivity nejnižší a poměrně stabilní v celém frekvenčním pásmu. Pro vyšší teploty je v průběhu možné sledovat polarizace materiálu, kdy pro hodnotu -100 °C je možné polarizaci pozorovat v oblasti od 10 Hz. Frekvence, při které začíná k polarizaci docházet, s rostoucí teplotou taktéž roste. Pro hodnotu -50 °C polarizace začíná v oblasti 1 kHz, pro teplotu 0 °C polarizace začíná v oblasti 15 kHz. Pro vyšší teploty už není možné polarizace ve frekvenčním pásmu do 1 MHz pozorovat.



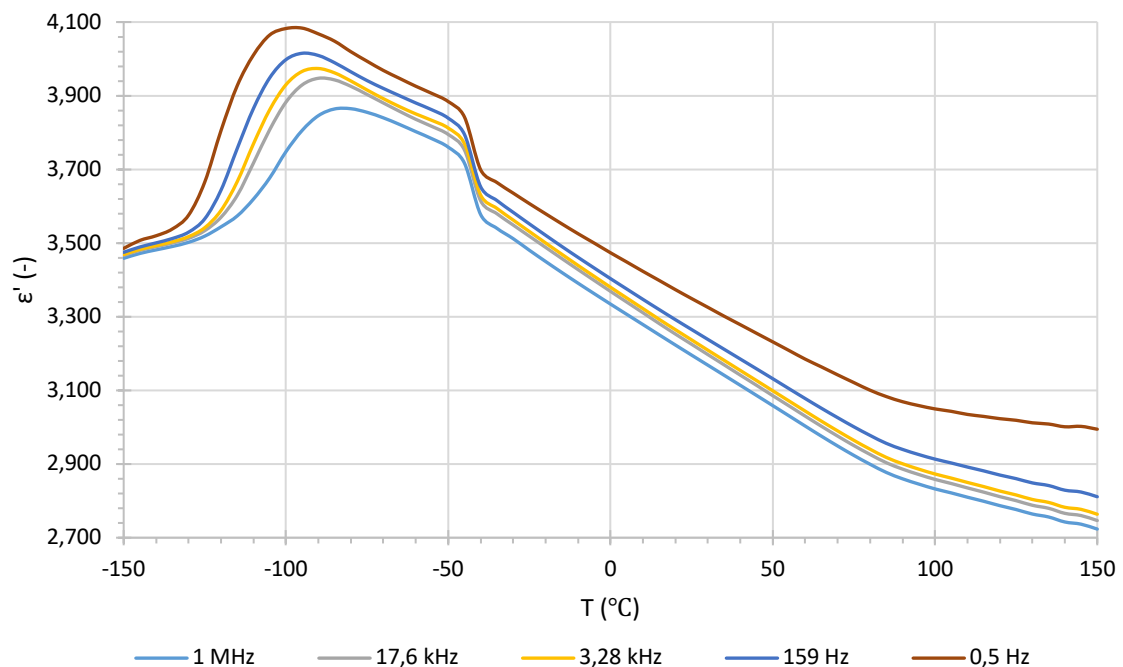
Obr. 22: Závislost reálné složky permitivity na frekvenci pro vybrané teploty při ohřevu



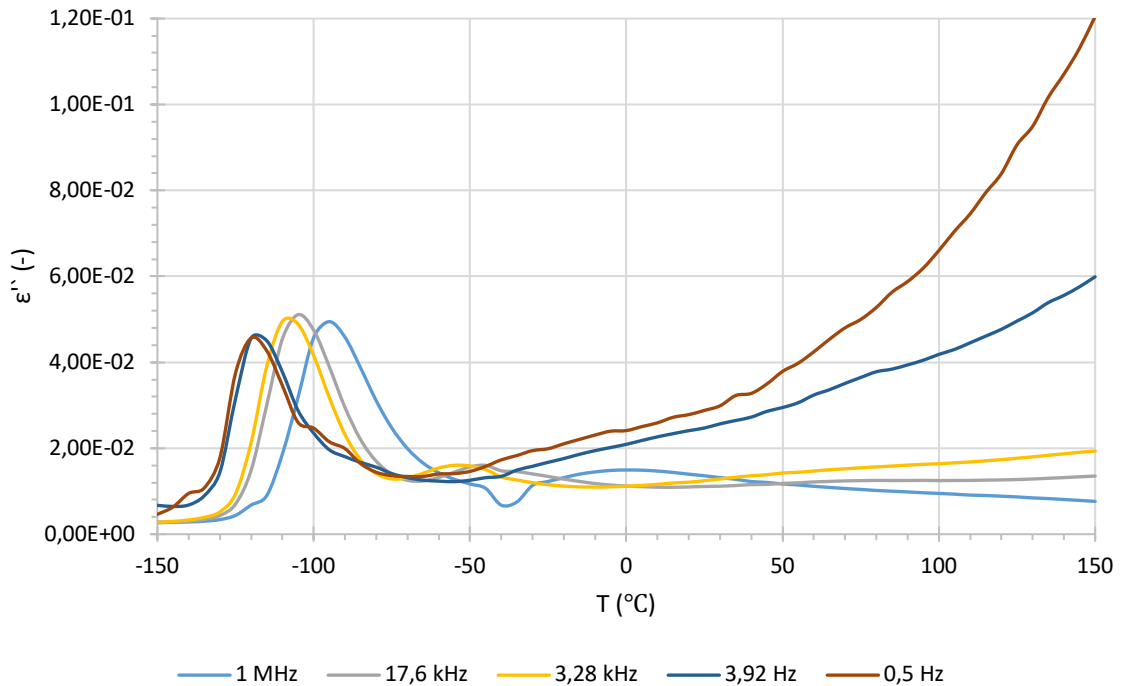
Obr. 23: Závislost imaginární složky permitivity na frekvenci pro vybrané teploty při ohřevu

Z grafu na Obr. 24 je možné sledovat změny hodnoty reálné složky permitivity pro celé frekvenční pásmo. Hodnota reálné složky permitivity prudce roste od $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy začne následně klesat. K výraznějšímu klesání hodnoty ϵ' dochází přibližně od teploty $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Změny v oblasti okolo $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ budou způsobeny probíhající skelnou transformací v materiálu. Prudký pokles hodnoty kolem $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ je způsoben specifickým tavením silikonového materiálu, které je možné potvrdit i na základně analýzy DSC prezentované na Obr. 18, kde je možné v průběhu tepelného toku pozorovat změnu stavu popisovanou jako specifické tavení materiálu taktéž kolem hodnoty $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Následně při rostoucích teplotách reálná složka permitivity dále klesá, kdy nižších hodnot dosahuje při vyšších frekvencích.

Při sledování závislosti imaginární složky permitivity na rostoucí teplotě na Obr. 25 je možné pozorovat vrcholy, které nejspíše vznikly v souvislosti se skelnou transformací. Hodnota imaginární složky permitivity klesá v celém frekvenčním pásmu přibližně do hodnoty $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následně je hodnota pro vyšší frekvence poměrně konstantní. Nicméně pro nízké frekvence začne hodnota ϵ'' při vyšších teplotách stoupat, kdy pro $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při $0,5\text{ Hz}$ dosahuje hodnoty $0,12$.



Obr. 24: Závislost reálné složky permitivity na teplotě pro vybrané frekvence při ohřevu

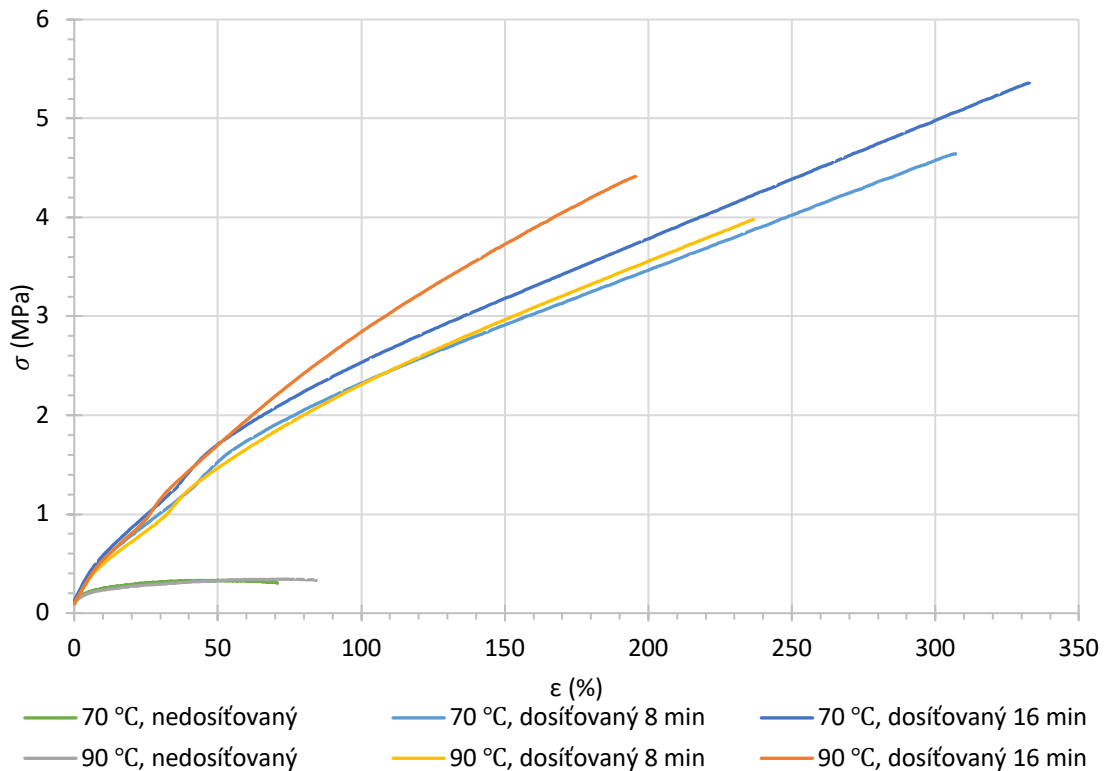


Obr. 25: Závislost imaginární složky permitivity na teplotě pro vybrané frekvence při ohřevu

4.5 Výsledky tahových zkoušek

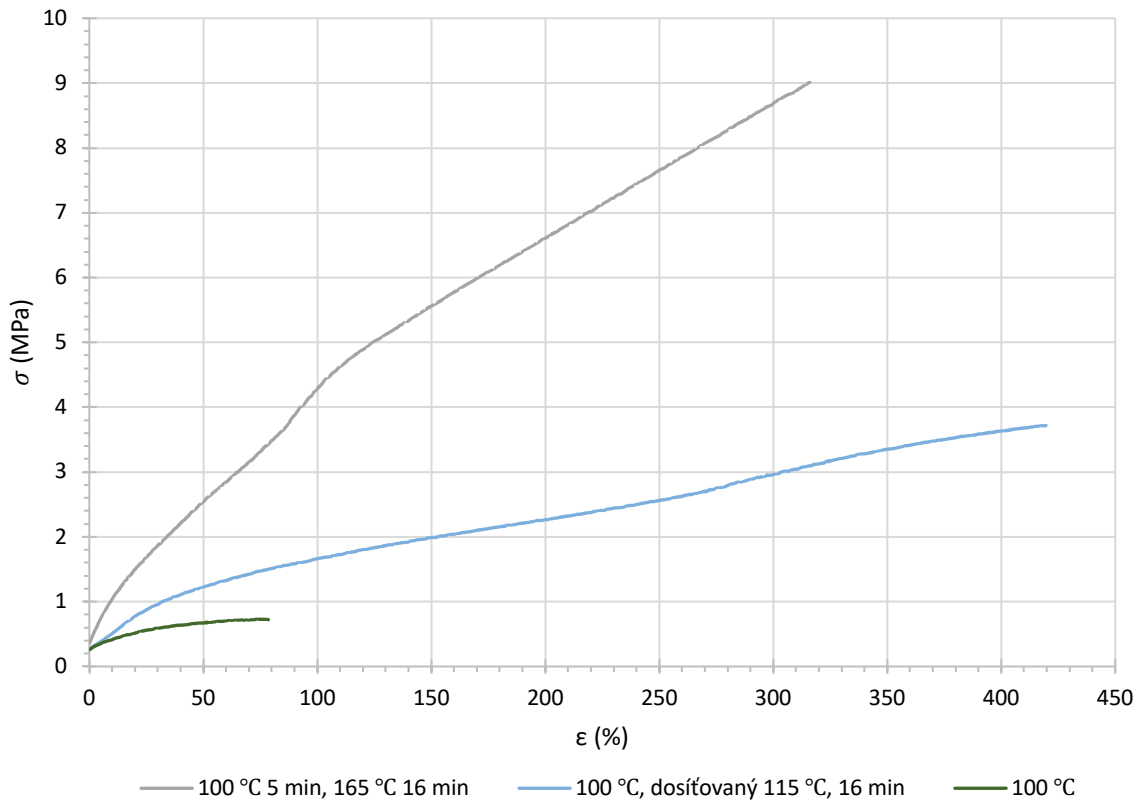
Výsledky mechanických zkoušek na silikonových materiálech jsou vyobrazeny v následujících grafech. Na Obr. 26 jsou uvedeny výsledky pro vzorky připravené pomocí extrudéru (vzorky připraveny při teplotě 70 °C a 90 °C, následně vzorky dosít'ovány v sušárně při 115 °C po dobu 16 minut nebo 8 minut anebo nedosít'ovány).

Nejlepší mechanické vlastnosti vykazují vzorky, které byly extrudované při 70 °C a následně dosít'ované. Lepší vlastnosti vykazuje vzorek dosít'ovaný 16 min, kdy dosahuje poměrného prodloužení 330 % a mechanického napětí 5,3 MPa. Vzorek dosít'ovaný po dobu 8 minut vykazuje poměrné prodloužení 310 % a k přetržení došlo při 4,4 MPa. Vzorky extrudované při 90 °C vykazují horší vlastnosti především z hlediska nižších hodnot poměrného prodloužení, kdy vzorek dosít'ovaný po dobu 8 minut dosáhl poměrného prodloužení 240 % při mechanickém napětí 4 MPa. Vzorek dosít'ovaný po dobu 16 minut dosáhl srovnatelných hodnot, mechanického napětí 4,2 MPa a poměrného prodloužení 195 %. Nedosít'ované vzorky nevykazují obecně dobré mechanické vlastnosti, přičemž jejich poměrné prodloužení není ani 100 % a mechanické napětí, při kterém došlo k přetržení vzorku, je jen 0,2 MPa.



Obr. 26: Závislost mechanického napětí na poměrném prodloužení vzorků připravených pomocí extrudéru

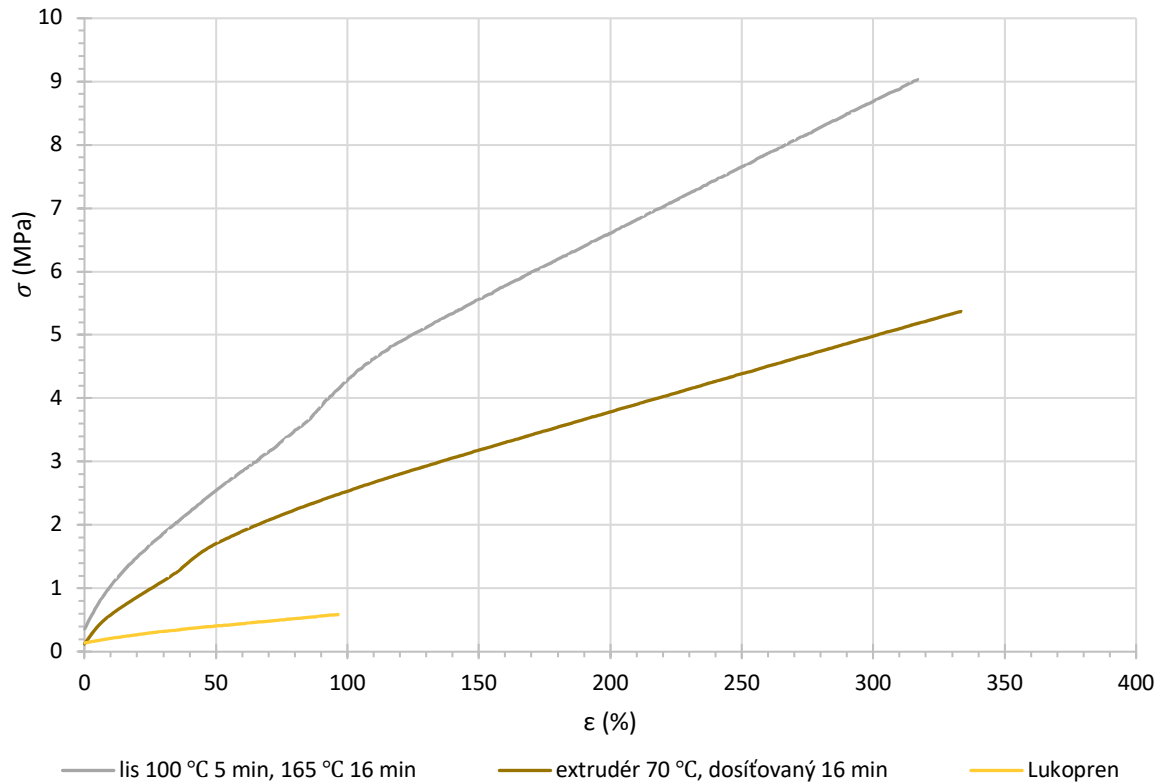
Na následujícím Obr. 27 je možné pozorovat porovnání pracovních diagramů zkoušky v tahu pro vzorky připravené pomocí vyhřívaného lisu. Nejlepších vlastností jednoznačně dosahuje vzorek lisovaný při 100 °C po dobu 5 minut a následně při teplotě 165 °C po dobu 16 minut, u kterého bylo dosaženo mechanického napětí 9 MPa a poměrného prodloužení 320 %. Horší vlastnosti vykazuje vzorek lisovaný jen do teploty 100 °C, který byl následně přemístěn do sušárny a byl dosíťovaný při 115 °C po dobu 16 minut. U tohoto vzorku došlo k přetržení při 2,8 MPa a při poměrného prodloužení 430 %. Špatné vlastnosti vykazoval vzorek lisovaný jen do 100 °C bez další tepelné úpravy, kdy mechanické napětí dosáhlo 0,8 MPa a poměrného prodloužení 80 %.



Obr. 27: Závislost mechanického napětí na poměrném prodloužení pro vzorky připravené lisováním

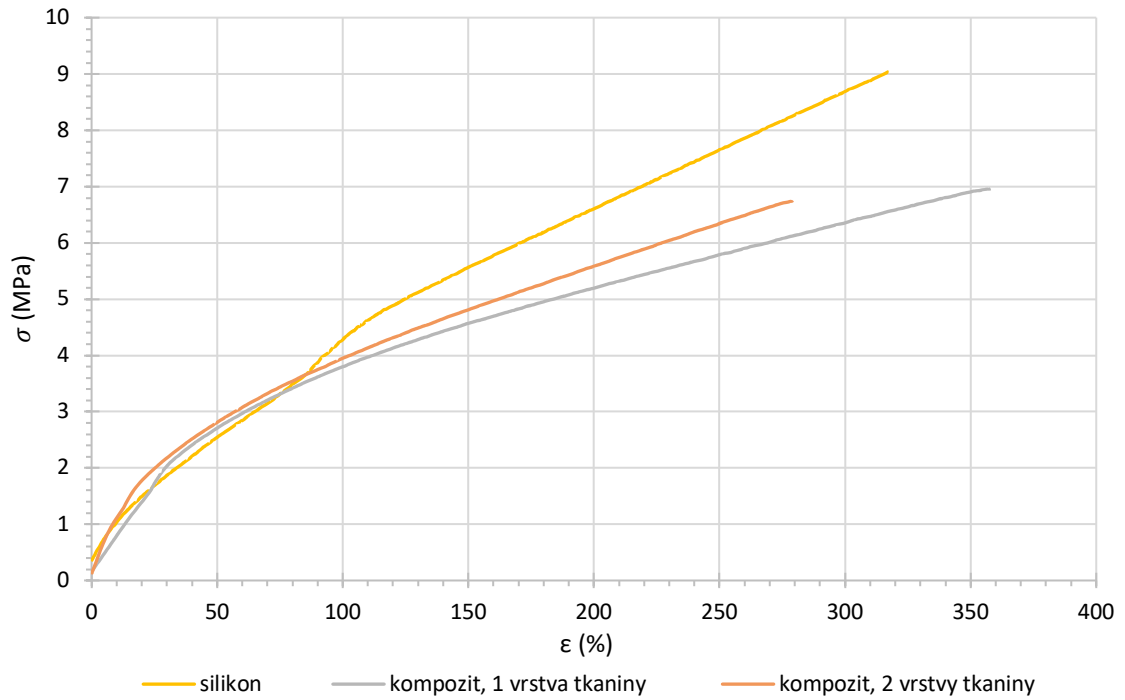
Porovnání různých způsobů přípravy je možné vidět na Obr. 28, kde jsou porovnávány vzorky připravené na vyhřívaném lisu, nejprve do 100 °C po dobu 5 minut a následně do 165 °C po dobu 16 minut. Pro vzorek připravený pomocí extrudéru byl vybrán vzorek s nejlepšími mechanickými vlastnostmi, tedy vzorek připravený při 70 °C a následně dosít'ovaný po dobu 16 minut při 115 °C v sušárně. Je možné provést porovnání mechanických vlastností i se vzorky Lukoprenu, který jednoznačně vykazuje nejhorší mechanické vlastnosti, k přetržení došlo při 0,6 MPa a poměrné prodloužení nebylo vyšší, než 100 %.

Lepších mechanických vlastností dosahuje vzorek připravený lisováním, kdy mechanická pevnost byla vyšší o 3,4 MPa, nicméně poměrné prodloužení vzorku bylo obdobné a vzorek připravený na extrudéru dosáhl poměrného prodloužení většího o 10 %.



Obr. 28: Závislost mechanického napětí na poměrném prodloužení, porovnání vzorku připraveného lisem, extrudérem a silikonem pro zalévání

Na Obr. 29 je možné vidět porovnání pracovních diagramů tahových zkoušek pro vzorky samotného silikonu Bluesil a odvozených kompozitů s jednou a dvěma vrstvami skleněné tkaniny. Nejlepší mechanické vlastnosti, i přes využití skleněné tkaniny, stále vykazoval samotný silikon. Tato skutečnost mohla být způsobena přípravou vzorku vzhledem k tomu, že jednotlivé pláty silikonu byly lisovány postupně bez zahřívání, poté do nich byla vložena tkanina a až celek byl lisován na vyhřívaném lisu při zvýšené teplotě. Mohlo dojít ke špatnému propojení jednotlivých vrstev, případně k porušení skleněných vláken již při lisování, i když významnější porušení skleněných vláken lze na základě snímku z CT (viz Obr. 7) vyloučit.



Obr. 29: Závislost mechanického napětí na poměrném prodloužení, porovnání 1 vrstvého kompozitu, 2 vrstvého kompozitu a vzorku bez vláken, připraveno v lisu (100 °C po dobu 5 min a následně 165 °C po dobu 15 min)

5 Závěr

Diplomová práce byla vypracována s cílem vytvořit přehledný základ problematiky silikonových materiálů se zaměřením na kabelový průmysl a možnosti využití silikonových materiálů v souvislosti s požární bezpečností kabelových systémů. V teoretické části je popsána základní chemická struktura silikonových materiálů spolu s vlastnostmi, které silikonové materiály vykazují. Dále jsou přehledově popsány typy silikonových materiálů, kdy jsou zmíněny silikonové oleje, silikonové pryskyřice a primárně silikonové pryže. Silikonové materiály vykazují obecně velmi dobrou tepelnou odolnost a z toho důvodu jsou využívány pro aplikace, kde je od materiálu vyžadováno udržení si vlastností ve vysokém rozsahu teplot. Silikonová pryž vyniká v nízkých teplotách, až do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy stále vykazuje skvělé mechanické vlastnosti a využívána může být až po teplotu $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez významné změny v chování materiálu.

Silikonová pryž je využívána v kabelových vedeních pro výrobu izolačních vrstev vodičů a spojek. V rámci elektrické rozvodné soustavy jsou perspektivní silikonové izolátory, jejichž velkou výhodou oproti keramickým a skleněným je jejich nízká hmotnost, ale i výborné dielektrické vlastnosti. V elektronice je možné najít aplikace se silikonovou pryží využívanou jako zalévací hmota např. v případě LED pásek, kde slouží zalévací hmota jako ochrana před vlhkostí, vibracemi či nárazem.

V kabelovém průmyslu je u silikonů nejvíce oceňována teplotní odolnost, ale také výborná chemická odolnost, UV stabilita, hydrofobnost či flexibilita. Tyto vlastnosti jsou stabilní po desítky let. Flexibilita je výrazně oceňovaná také např. v medicínské oblasti, kdy nedochází k porušení izolace při časté manipulaci a ohýbání a silikonové materiály si zachovávají své vlastnosti i při časté sterilizaci. V leteckém průmyslu je silikonová pryž oceňovaná, protože je nutné využití izolací, kdy při hoření nedochází k uvolňování nebezpečných zplodin, jako je fluor či chlor. Navíc má silikonová pryž výborné vlastnosti v oblasti hoření a její oheň retardační vlastnosti umožní zajistit funkčnost kabelů v případě požáru po delší dobu než u řady dalších elektroizolačních materiálů.

Pro ověření vlastností silikonových materiálů byly pro testování vybrány materiály Bluesil FRC 8470 E (jednosložkový silikonový materiál) a Lukopren N 1000 (dvousložkový silikonový materiál). Lukopren byl připraven doporučeným způsobem dle návodu od výrobce. Pro silikonový materiál od společnosti Elkem je doporučeným způsobem extrudování při zvýšené teplotě ($115\text{ }^{\circ}\text{C}$), nicméně vzorky byly připraveny jak na extrudéru,

tak na vyhříváním lisu. Také byly připravovány kompozity ze silikonového materiálu Bluesil, kdy byly vrstveny vylisované silikonové vzorky se skleněnou tkaninou a následně byly společně vytvrzeny na vyhříváním lisu.

Pro určení vlastností vzorků byly využívány analýzy a metody měření, kdy byla nejprve ověřena chemická struktura vybraných silikonových materiálů na základě infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací. Poté bylo pro ověření tepelných vlastností jednosložkového silikonu využito termických analýz. Simultánní termická analýza potvrdila tepelnou stabilitu materiálu do 300 °C, kdy poté docházelo k postupné degradaci, nicméně i při 700 °C, do kterých analýza probíhala, byl hmotnostní úbytek materiálu pouze 25 %. Diferenční skenovací kalorimetrie také poukazuje na stabilitu materiálu, kdy průběh tepelného toku je téměř konstantní od teploty -30 °C až do teploty 195 °C, kdy došlo k ukončení zkoušky. Z průběhu tepelného toku je možné pozorovat výrazný endotermní vrchol označený jako specifické tavení materiálu s maximem při -42 °C.

Průměrná elektrická pevnost materiálu Bluesil byla stanovena na 34,58 kV/mm, což je pro běžné elektroizolační systémy dostatečná hodnota. Vnitřní rezistivita pro vzorky připravené pomocí vyhříváním lisu z materiálu Bluesil je $7,84 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ a polarizační index PI_1 je 3,095 a PI_{10} je 4,613. Tyto hodnoty jsou pro izolační materiál velmi dobré. Širokopásmová dielektrická spektroskopie umožnila charakterizovat polarizace vyskytující se v silikonovém materiálu a ukazuje např. i vhodnost materiálu pro vysokofrekvenční aplikace díky frekvenčně stabilní relativní permitivitě a poměrně nízkým hodnotám ztrátového činitele.

Při testování mechanických vlastností se ukázaly výhodné vlastnosti testovaného silikonového materiálu Bluesil oproti materiálu Lukopren. Nejlepší mechanické vlastnosti vykazoval materiál Bluesil připravený v lisu na 100 °C po dobu 5 minut a následně na 165 °C po dobu 15 minut, kdy hodnota mechanického napětí dosáhla 9 MPa a poměrného prodloužení 320 %.

Literatura

- [1] Shin-Etsu Silicone [online]. [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: https://www.shinetsusilicone-global.com/catalog/pdf/rubber_e.pdf
- [2] J. Mleziva, *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 1993.
- [3] Silicones (Inventions). [online]. [cit 16.10.2022]. Dostupné z: <http://what-when-how.com/inventions/silicones-inventions/>.
- [4] Walter. Noll, *Chemistry and technology of silicones*. Elsevier, 2012.
- [5] K. Jenkins and K. Jenkins, “The applications and uses of Silicone. Silicone Engineering [online]. [cit. 13.02.2023]. Dostupné z: <https://silicone.co.uk/news/an-introduction-to-silicone/>,” <https://silicone.co.uk/news/an-introduction-to-silicone/>.
- [6] A. J. O’lenick, “Basic Silicone Chemistry-A Review,” 1999.
- [7] INMR, Chemistry & Properties of Silicones -. INMR - Enriching Technical Knowledge of T&D Professionals [online]. [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: <https://www.inmr.com/chemistry-properties-silicones-2/>
- [8] A. Lim, Silicone: Definitions, History, and Uses[online]. [cit. 09.03.2023] z. Dostupné: <https://www.thoughtco.com/what-is-silicone-4164214>.
- [9] Elkem, What are Silicone Oils? | Elkem.com. Elkem [online]. [cit. 09.03.2023]. Dostupné z: <https://www.elkem.com/silicones/technologies/basic-silicones-products/oils/>.
- [10] Shin-Etsu Silicone: Silicone resins [online]. [cit. 12.04.2023]. Dostupné z: <https://www.shinetsusilicone-global.com/products/type/resin/index.shtml>.
- [11] S. K. Srivastava and T. Kuila, “Fire Retardancy of Elastomers and Elastomer Nanocomposites,” in *Polymer Green Flame Retardants*, Elsevier, 2014, pp. 597–651. doi: 10.1016/B978-0-444-53808-6.00018-4.
- [12] S. C. Shit and P. Shah, “A Review on Silicone Rubber,” *National Academy Science Letters*, vol. 36, no. 4, pp. 355–365, Aug. 2013, doi: 10.1007/s40009-013-0150-2.
- [13] Custom Rubber Corp., What is SBR (Styrene-Butadiene) Rubber? | Custom Rubber Corp.. Custom Rubber Molding, Design, and Engineering | Custom Rubber Corp.

- [online]. [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: https://www.customrubbercorp.com/services/rubber_materials_used/sbr-rubber
- [14] Elkem, Silicone Rubber Extrusion | Elkem.com. Elkem | Elkem.com [online]. [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: <https://www.elkem.com/products/silicones/heat-cured-rubber/extrusion/>
- [15] How is silicone rubber made? - ARIS Performance Silicones | [online]. [cit. 21.02.2023]. Dostupné z: <https://arisperformance.com/blogs/news-and-resources/how-is-silicone-rubber-made>
- [16] Simtec, Injection Molding Optical Liquid Silicone Rubber [online]. [cit. 10.04.2023]. Dostupné z: <https://www.simtec-silicone.com/blogs/injection-molding-optical-liquid-silicone-rubber/>
- [17] Lindemann, Silicone, Silicone in electrical engineering | Lindemann Silicone. Silikon Hersteller: Silikonschläuche, Silikonprofile & Silikonformteile [online]. [cit. 10.04.2023]. Dostupné z:” <https://lindemannsilikon.de/en/electrical-engineering/>
- [18] Galaxy Wire, Silicone Insulation/Jacket Material for Wire and Cable Galaxy Wire & Cable, Inc. [online]. [cit. 07.05.2023]. Dostupné z: <https://www.galaxywire.com/custom-wire-cable/jacket-insulation/silicone/>
- [19] Verescence, Silicone-coated insulators (RTV) - Verescence Insulators. VERESCENCE · La Granja Insulators · Spain [online]. [cit. 07.05.2023]. Dostupné z: <https://www.verescenceinsulators.com/rage-of-insulators/silicone-coated-insulators-rtv/>
- [20]: H Khan, H. Khan, M. Amin, and A. Ahmad, “Characteristics of silicone composites for high voltage insulations 2018.
- [21] Polymer G, Choosing the Right Potting Material: Epoxy, Polyurethane, Silicone Potting - Polymer G. Custom Made Bonding, Casting and Dispensing Solutions - Polymer G [online]. [cit. 08.05.2023]. Dostupné z: <https://www.polymer-g.com/choosing-the-right-potting-material/>
- [22] Elkem magazine, The 8 benefits of encapsulation and potting electronics | Magazine. Elkem blog | Magazine [online]. [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: <https://magazine.elkem.com/digital-communications/benefits-of-encapsulation-and-potting-electronics/>

- [23] Simtec, Reinforcing Fillers in LSR Compounds, SIMTEC Silicone Parts - Custom LSR Injection Molding [online]. [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: <https://www.simtec-silicone.com/blogs/reinforcing-fillers-in-liquid-silicone-rubber-compounds-simtec/>
- [24] W. Feifeng, Z. Peihong, and G. Mingze, “Improvement in the electric field distribution of silicone rubber composite insulators by non-linear fillers,” in *Ifostr*, IEEE, Jun. 2013, pp. 217–221. doi: 10.1109/IFOST.2013.6616972.
- [25] ZW cable, The Application of Silicone Rubber Cables. Cable Manufacturer - ZW is a Leading Cable & Wire Manufacturer [online]. [cit. 21.02.2023]. Dostupné z: https://www.zw-cable.com/news/The_Application_of_Silicone_Rubber_Cables.html
- [26] Mueller Electric, PVC vs Silicone vs Rubber Wire Insulation. Blog | Mueller Electric [online]. [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: <https://blog.muellerelectric.com/types-of-wire-insulation>
- [27] Warwick, Differences of PVC Vs. Silicon Test Lead Cables | Warwick Test Supplies. Distributor of Industrial Electrical Components & Tools | Warwick Test Supplies [online]. [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: <https://warwickts.com/4739/Guide-on-PVC-vs-Silicone-Test-Lead-Cables>
- [28] Elkem, Silicone rubber insulated cable | Elkem.com. Elkem | Elkem.com [online]. [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: [Dostupné z: https://www.elkem.com/markets/energy-power/electricity-grids/safety-cables/](https://www.elkem.com/markets/energy-power/electricity-grids/safety-cables/)
- [29] Silicone in electrical engineering | Lindemann Silicone. Silikon Hersteller: Silikonschläuche, Silikonprofile & Silikonformteile [online]. [cit. 21.02.2023]. Dostupné z: <https://lindemannsilikon.de/en/electrical-engineering/>
- [30] Besilen - Silicone Cables [online]. [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: www.sab-cable.com
- [31] Epectec, Silicone Jacketed Cables Used in Medical Applications Article. Manufacturing That Eliminates Risk and Improves Reliability | Epec [online]. [cit. 07.05.2023]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/articles/using-silicone-jacketed-cables-medical-applications.html>
- [32] Calmont, The Most Popular Applications for Silicone Wire and Cable. Custom Cable & Wire Company | Calmont Wire & Cable [online]. [cit. 21.02.2023]. Dostupné z:

- <https://www.calmont.com/2017/08/the-most-popular-applications-for-silicone-wire-and-cable/>
- [33] R. Anyszka, D. Bielinski, D. M. Bielinski, R. Anyszka, Z. Pedzich, and J. Dul, Ceramizable silicone rubber-based composites, 2012. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/259692568>
- [34] A. Bacher, Silicone rubber used for fire safety and fire retardant cables. Proceedings of the Universities Power Engineering Conference. (2010).
- [35] Cavicel, FIRE RESISTANT CABLES [online]. [cit. 26.04.2023]. Dostupné z: <https://www.cavicel.com>
- [36] M. E. Slevin, "Materials for use in fire risk areas," in *IEE Colloquium on Materials for Electrical Applications in Fire Risk Areas*, IEE, 1996, pp. 1–1
- [37] RRkabel, Flame Resistive Cables vs. Flame Retardant Cables RR Kabel | Leading Wire & Cable Manufacturer Company in India [online]. [cit. 08.05.2023]. Dostupné z: <https://www.rrkabel.com/media-centre/blogs/flame-resistive-cables-vs-flame-retardant-cables>
- [38] D. C. Timpe, Silicone Rubber Flame Resistance
- [39] N. Kamarudin *et al.*, Mechanical and Electrical Properties of Silicone Rubber Based Composite for High Voltage Insulator Application, 2018. [Online]. Available: www.sciencepubco.com/index.php/IJET
- [40] J. Li, Research status and development trend of ceramifiable silicone rubber composites: a brief review, *Mater Res Express*, vol. 9, no. 1, p. 012001, Jan. 2022, doi: 10.1088/2053-1591/ac4625
- [41] N. Kamarudin, Mechanical and electrical properties of silicone rubber based composite for high voltage insulator application. *Int. J. Eng. Technol*, 2018, 7.3.25: 452-457.
- [42] Anyszka, Rafał & Bielinski, Dariusz & Pędzich, Zbigniew & Dul, Jan. (2012). Ceramizable silicone rubber-based composites. *International Journal of Advanced Materials Manufacturing and Characterization*. 1
- [43] How an FTIR Spectrometer Operates - Chemistry LibreTexts. Home - Chemistry LibreTexts [online]. Copyright © Copyright 2022 Chemistry LibreTexts [cit.

- 06.12.2022]. Dostupné z:
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Spectroscopy/Vibrational_Spectroscopy/Infrared_Spectroscopy/How_an_FTIR_Spectrometer_Operates](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Vibrational_Spectroscopy/Infrared_Spectroscopy/How_an_FTIR_Spectrometer_Operates)
- [44] Shimadzu Scientific, FTIR Accessories: Attenuated Total Reflectance (ATR). Analytical Instrumentation | Shimadzu Scientific [online]. [cit. 08.05.2023]. Dostupné z:
<https://www.ssi.shimadzu.com/products/ftir/ftir-spectroscopy-consumables/attenuated-total-reflectance/index.html>
- [45] Linseis, Simultaneous thermal analysis - a combined method. LINSEIS - Messgeräte für Thermische Analysen bis 2800°C [online]. [cit. 02.04.2023]. Dostupné z:
<https://www.linseis.com/en/methods/simultaneous-thermal-analysis-tga-dsc/>
- [46] Differential Scanning Calorimetry (DSC) | Faculty of Mathematics and Physics. MFF UK | Matematicko-fyzikální fakulta [online]. Copyright © 2022 [cit. 06.12.2022]. Dostupné z: <https://www.mff.cuni.cz/en/kfm/experimental-facilities/differential-scanning-calorimetry-dsc>
- [47] Differential Scanning Calorimetry (DSC) Analysis. Intertek [online]. Copyright © Intertek Group plc [cit. 06.12.2022]. Dostupné z:
<https://www.intertek.com/analysis/dsc/>
- [48] ČSN EN IEC 62631-3-1. Dielektrické a izolační vlastnosti pevných elektroizolačních materiálů - Část 3-1: Stanovení izolačních vlastností (stejnoseměrné metody) - Objemový odpor a objemová rezistivita, obecné metody. 2016. 28 p.
- [49] V. Mentlík, *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [50] I. Popov, S. Cheng, and A. P. Sokolov, "Broadband Dielectric Spectroscopy and Its Application in Polymeric Materials," in *Macromolecular Engineering*, Wiley, 2022, pp. 1–39. doi: 10.1002/9783527815562.mme0059.
- [51] ČSN EN ISO 527-1. Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy. 2020. 28 p.
- [52] J. Hofmann, "IR SPECTROSCOPIC METHOD FOR DETERMINATION OF SILICONE CROSS-LINKING."