

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Silikony v elektrotechnice

vedoucí práce: Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.

2013

autor: Bc. Radek Štegbauer

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá studiem silikonů, tj. jejich výrobou, strukturou, vlastnostmi, jejich využitím a perspektivou. Zvláště popisuje vlastnosti a formy silikonů, které jsou využitelné především v elektrotechnice. Závěr práce je zaměřen na výhody a nevýhody v používání a také porovnání těchto materiálů s jinými druhy. Dále je uvedena úvaha o perspektivě silikonů obsahující konkrétní návrh na využití v budoucnosti.

Klíčová slova

Křemík, silikon, siloxan, kaučuk, pryskyřice, olej.

Abstract

This thesis deals with the study of silicones, ie their production, structure, properties, their using and perspective. Particularly describes features and forms of silicones, which are used primarily in the electrical engineering. The conclusion is focused on the advantages and disadvantages in using and comparison of these materials with the others. There is also listed the reflection on the perspective of silicon containing concrete proposals to use in the future.

Key words

Silicon, silicone, siloxane, rubber, resin, oil.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 6.5.2013

Radek Štegbauer

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Evě Kučerové, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	6
ÚVOD	8
1 VÝROBA A PODSTATA SILIKONŮ	9
1.1 KŘEMÍK	9
1.1.1 <i>Obecně</i>	9
1.1.2 <i>Výskyt v přírodě</i>	9
1.1.3 <i>Vlastnosti</i>	9
1.1.4 <i>Bezokyslíkaté sloučeniny křemíku</i>	10
1.1.5 <i>Kyslíkaté sloučeniny křemíku</i>	10
1.2 VÝROBA SILIKONŮ.....	11
1.2.1 <i>Grignardova syntéza</i>	11
1.2.2 <i>Přímá syntéza</i>	12
1.2.3 <i>Následné zpracování</i>	12
1.2.4 <i>Příklad výroby polydimethylsiloxanu</i>	14
1.3 OBECNÉ VLASTNOSTI SILIKONŮ A JEJICH STRUKTURA	15
2 FORMY SILIKONŮ A JEJICH VLASTNOSTI	17
2.1 SILIKONOVÉ OLEJE	17
2.1.1 <i>Silikonové emulze</i>	19
2.2 SILIKONOVÉ KAUČUKY A PRYŽE	19
2.2.1 <i>Silikonové tmely a lepidla</i>	21
2.3 SILIKONOVÉ PRYSKYŘICE	21
2.3.1 <i>Silikonové laky</i>	23
2.4 SILIKONOVÉ ELEKTRICKY VODIVÉ KAUČUKY	23
2.5 SILIKONOVÉ GELY	23
2.6 SILIKONOVÉ VAZELÍNY	24
3 UPPLATNĚNÍ SILIKONŮ V ELEKTROTECHNICE	25
3.1 KABELOVÝ PRŮMYSL	25
3.1.1 <i>Koncovky vodičů</i>	25
3.1.2 <i>Spojky vodičů</i>	25
3.1.3 <i>Izolace vodičů</i>	26
3.2 ELEKTRONIKA	26
3.2.1 <i>Pouzdrění a zalévání součástek</i>	26

3.2.2	<i>Ochranné laky plošných spojů</i>	27
3.2.3	<i>Tepelně vodivé silikonové materiály</i>	28
3.3	SILNOPROUDÁ ELEKTROTECHNIKA	29
3.3.1	<i>Izolátory</i>	29
3.3.2	<i>Omezovače přepětí VN</i>	30
3.3.3	<i>Olejové transformátory</i>	31
3.4	SPECIÁLNÍ APLIKACE	32
3.4.1	<i>Fotovoltaické panely</i>	32
3.4.2	<i>Elektricky vodivé silikony</i>	33
3.4.3	<i>Silikon – materiál, který nejen chrání</i>	33
3.5	PŘEHLED HODNOT	35
3.5.1	<i>Obecný přehled silikonových polymerů</i>	35
3.5.2	<i>Přehled vybraných silikonových materiálů</i>	35
4	ROZVAHA O VYUŽITELNOSTI A PERSPEKTIVĚ SILIKONŮ V ELEKTROTECHNICE	37
4.1	KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	37
4.1.1	<i>Vláknové kompozity se silikonovou matricí</i>	38
4.1.2	<i>Jiné kompozity se silikonovou matricí</i>	40
	ZÁVĚR	41
	POUŽITÁ LITERATURA	42

Úvod

Silikony jsou organokřemičité sloučeniny se zčásti anorganickou strukturou, u kterých je vytvářena velmi pevná vazba křemíku s kyslíkem. Veškeré silikony mají velice podobné základní vlastnosti, avšak dále se liší podle forem, ve kterých jsou vyráběny, podle způsobu zpracování a z těchto principů vychází jejich následné využití. Některými vlastnostmi jsou porovnatelné s ekvivalentními druhy forem, ale zvláště vynikají v tepelné odolnosti a dielektrické pevnosti. Právě pro tyto vlastnosti jsou silikony přímo vhodné pro použití v elektrotechnice.

1 Výroba a podstata silikonů

Pojmem silikonů nebo silikonové sloučeniny jsou nazývány takové polymery, které jsou ze základu tvořeny křemíkem a kyslíkem (Si - O - Si), neboli organokřemičité sloučeniny též nazývány jako polysiloxany.

1.1 Křemík

1.1.1 Obecně

Křemík je 14. prvek Mendělejevovy tabulky prvků. Označení Si plyne z latinského názvu Silicium, od tohoto jsou také odvozeny pojmy jako silan, silanol, siloxan atd. Anglický název je Silicon.

Převážně se využívá jako primární materiál na výrobu polovodičů (diod, tranzistorů, atd.), solárních článků, dále také skla a keramiky. Poprvé byl volný křemík separován roku 1823 švédským chemikem J. J. Berzeliem [2].

1.1.2 Výskyt v přírodě

Volný křemík se v zemské kůře nevyskytuje, oproti tomu se vyskytuje převážně jako kyslíkatá sloučenina v křemičitech, hlinitokřemičitech nebo v živých organismech jako biogenní prvek. Je druhým nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře (první je kyslík). Zemská kůra je přibližně tvořena 49 procenty kyslíku a 27 procenty křemíku [4].

1.1.3 Vlastnosti

Křemík je modrošedý až hnědočerný, lesklý metalloid. Je velmi tvrdý, ale zároveň křehký. Má kubickou krystalickou strukturu diamantového typu a význačnou kovalentní vazbu. Jeho atomové číslo je 14 a relativní atomová hmotnost 28,0855 [-]. Hranice teploty tání je 1 414 °C resp. 1 687 K a teplota varu je 2 900 °C resp. 3 173 K [5].

Disponuje velmi vysokou schopností slučovat se s kyslíkem. Při běžných teplotách je jen velmi málo reaktivní, jelikož na jeho povrchu vzniká tenká vrstva oxidu křemičitého (SiO₂) velmi pomalu a ta prakticky zabraňuje jakékoli další oxidaci. Při vyšších teplotách

naopak na vzduchu hoří.

Vazba s kyslíkem (Si - O) je velmi silná a stabilní, tudíž jsou tyto sloučeniny hodně rozšířené. Vazby s ostatními prvky jsou nestabilní a z tohoto důvodu se rychle rozkládají. Není schopen vytvářet dvojně a trojně vazby. Běžným kyselinám odolává, tzn. nerozpouští se, až na kyselinu fluorovodíkovou. Oproti tomu se v alkalických roztocích rozpouští (a to i v nízkých koncentracích) za vzniku křemičitanů.

1.1.4 Bezokyslíkaté sloučeniny křemíku

a) *Silany* - jsou sloučeniny s vodíkem. Jejich obecný vzorec je $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$, přičemž n nabývá hodnot 1 až 8. SiH_4 (monosilan) a Si_2H_6 (disilan) jsou nestálé bezbarvé plyny. Na vzduchu jsou samozápalné. Při vyšších hodnotách n ($n > 2$) se jedná o velice těkavé kapaliny. Jsou vyráběny synteticky. S přibývajícím délkou řetězce se stávají ještě více nestabilními.

b) *Křemičité halogenidy* - jsou sloučeniny s halogeny (což jsou prvky VII. skupiny) a obecným vzorcem $\text{Si}_n\text{X}_{2n+2}$. Nejčastější je fluorid křemičitý (SiF_4), dále pak SiCl_4 , SiBr_4 . Všechny tyto jsou velmi nestálé a při styku s vodou hydrolyzují. V případě SiF_4 při styku s vodou vznikne velmi silná kyselina hexafluorokřemičitá ($\text{SiF}_4 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2\text{SiF}_6$), která existuje jen jako vodný roztok.

c) *Silicidy* - jsou sloučeniny s elektropozitivnějšími prvky (alkalické kovy např. Li_4Si , kovy alkalických zemin např. Mg_2Si a kovy např. Fe_3Si). Disponují různými vazbami např. iontovou nebo kovalentní.

d) *Karbidy křemičité* - jsou sloučeniny s uhlíkem (SiC), neboli karborunda. Je to velice tvrdá látka, na Mohsově stupnici tvrdosti je výš než korund. Na výrobu je zapotřebí křemičitý písek a petrolejový koks. Vyrábí se v různých kvalitách. Převážně se dělají dva druhy (zelený 49% C a šedý 48% C). Používá se na broušení velmi tvrdých materiálů [1].

1.1.5 Kyslíkaté sloučeniny křemíku

a) *Oxid křemičitý* - je sloučenina, jak již z názvu vyplývá, s kyslíkem (SiO_2). Jedná se o krystalickou bezbarvou látku, která je téměř inertní ke všem kyselinám. Jedinou výjimku tvoří kyselina fluorovodíková.

b) *Kyseliny křemičité* - existují jen ve formě vodných roztoků např. H_2SiO_3 nebo

H₄SiO₄. Jsou vyráběny třemi způsoby. Buďto rozpouštěním SiO₂ ve vodě, hydrolyzou chloridu křemičitého nebo přidáním kyseliny do roztoku alkalických křemičitanů. Vodný roztok křemičitanu sodného se nazývá vodní sklo.

c) *Siloxany* - jsou v podstatě jakékoliv sloučeniny, které obsahují řetězec R_nSiOSi. Kde R je alkyl, aryl nebo vodík. O těchto kyslíkatých sloučeninách křemíku budou následující kapitoly.

1.2 Výroba silikonů

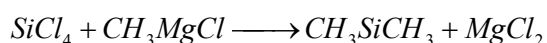
Křemíkaté sloučeniny se technologicky postupně vyvíjely, ale až počátkem 19. století J.J. Berzelius objevil tetrachlorsilan neboli chlorid křemičitý (chemický vzorec SiCl₄), který je považován za první organokřemičitou sloučeninu. V roce 1823 tentýž chemik poprvé izoloval volný křemík a v roce 1848 vyrobil tetraetoxysilan. Tímto byly položeny základy organokřemičitých sloučenin a tím zároveň i siloxanů.

Nejčastější metody pro výrobu organokřemičitých sloučenin, které se využívají k výrobě polymerů, jsou Grignardova syntéza nebo Přímá syntéza.

1.2.1 Grignardova syntéza

Grignardova syntéza (obr. 1) je založena na reakci Grignardova činidla s tetrachlorsilanem, z čehož vzniknou sloučeniny alkylsilanu a chloridu hořečnatého.

tetrachlorsilan + Grignardovo činidlo



alkylsilan + chlorid hořečnatý

Obr. 1 Grignardova syntéza [10]

Tato reakce se uskutečňuje v několika zároveň probíhajících stupních. Složení alkylsilanu je závislé na zreagovaném množství Grignardova činidla. Při procesu také vzniká chlorid křemičitý, který se separuje od alkylsilanů destilací.

To je právě jedna z největších nevýhod při používání této metody. Dále je také velká

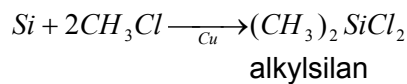
nevýhoda v používání roztoku velmi hořlavého éteru (bod varu kolem 35 °C), v němž se nachází Grignardovo činidlo. Navzdory těmto nevýhodám se stále používá na výrobu monomerů.

1.2.2 Přímá syntéza

Přímá syntéza je novější metoda než Grignardova. Používá reakce čistého rozdrčeného křemíku s organickými halogenidy při teplotách v rozmezí 250 až 450 °C. Touto reakcí a působením mědi jako katalyzátor, vzniká směs alkylsilanu nebo arylsilanu. Tato reakce je na obr. 2.

Pro přípravu různých alkylsilanů se používá rozdílných látek působících na křemík. Například pro výrobu metyltrichlorsilanu je zapotřebí, aby s křemíkem reagoval chlormethan v plynném stavu. Výsledné produkty se s vysokou účinností separují mnohonásobnou chemickou destilací neboli rektifikací.

křemík + organický halogenid

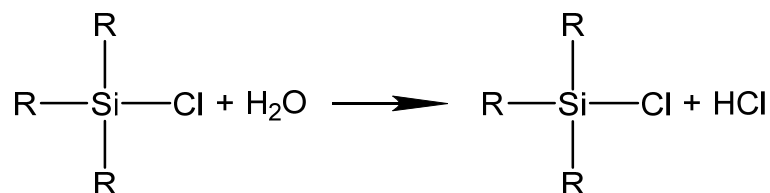


Obr. 2 Přímá syntéza [10]

Tato metoda je jak z ekonomického, tak bezpečnostního i technologického hlediska výhodnější než předchozí. Hlavní využití této metody je pro produkci monomerů, které jsou nedílnou součástí pro výrobu organokřemičitých polymerů a tudíž i siloxanů.

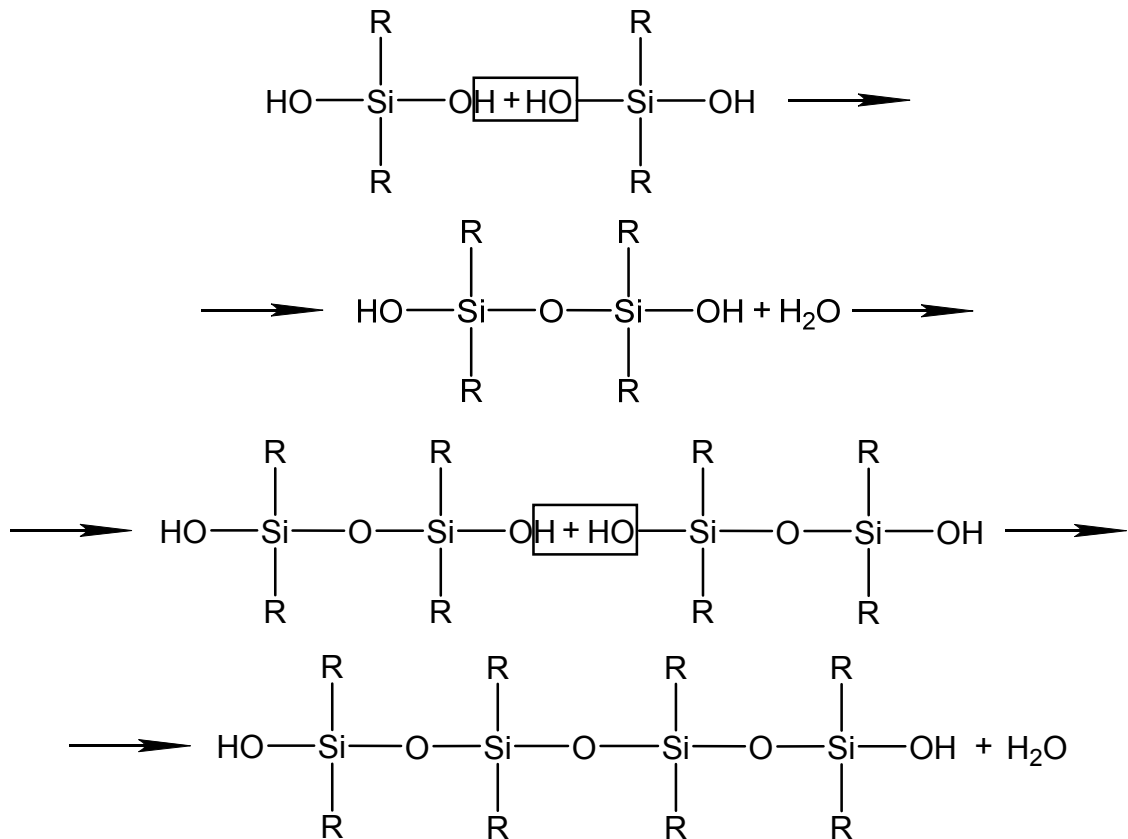
1.2.3 Následné zpracování

Takto získané monomery se dále upravují hydrolyzou. Při této reakci vzniká potřebný alkylsilanol a také kyselina chlorovodíková, jak je vidět z obr. 3.



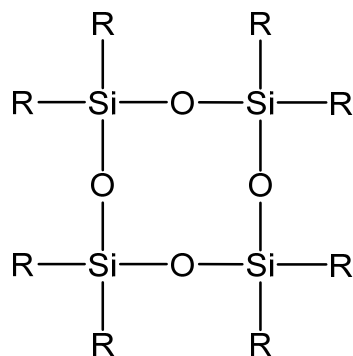
Obr. 3 Vznik trialkylsilanolu [10]

Vytvořený silanol obsahující hydroxylovou skupinu je velmi reaktivní a má tendenci k polykondenzaci. Díky tomuto jevu vzniká molekula vody ze dvou OH skupin a zbylý kyslík tvoří s křemíkem siloxanovou vazbu. Délka řetězce v podstatě roste kvadraticky. Tato reakce je přehledně ukázána na obr. 4.



Obr. 4 Vznik siloxanu [10]

Cyklické siloxany (viz obr. 5) mohou vzniknout zkapaňováním koncových hydroxylových skupin.

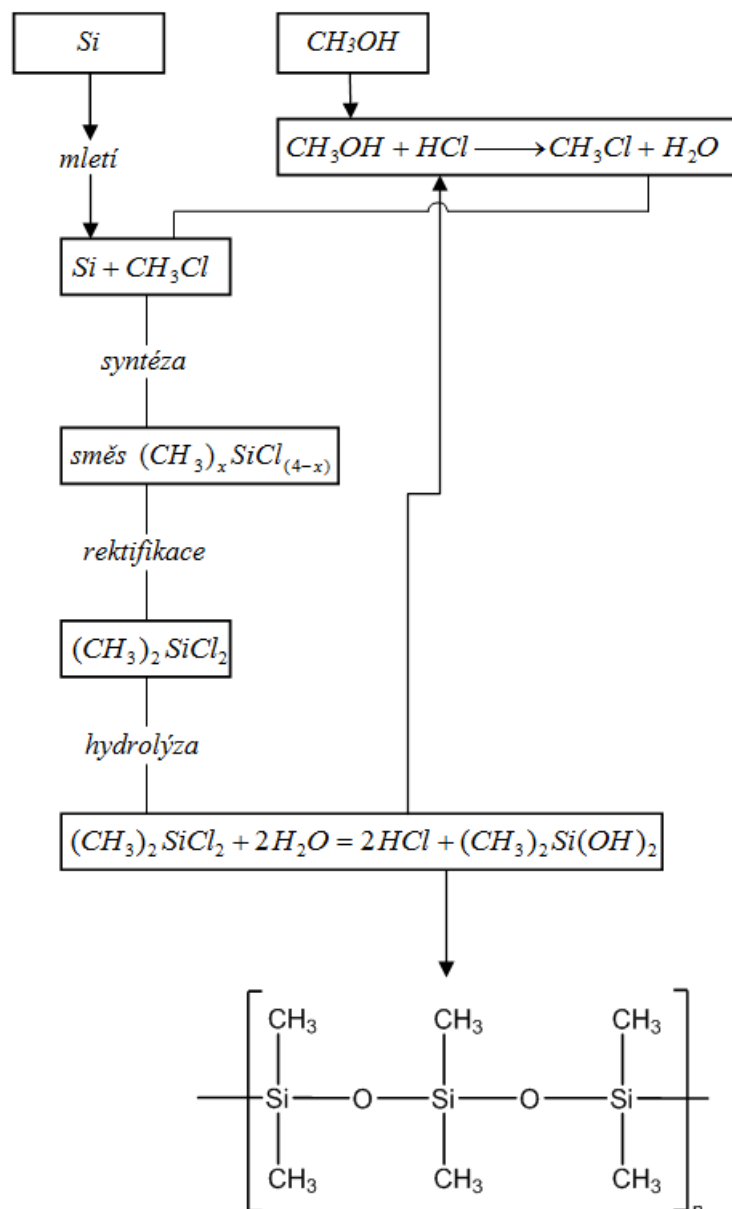


Obr. 5 Cyklický siloxan [10]

Tímto způsobem v podstatě vznikají všechny polysiloxany neboli silikony.

1.2.4 Příklad výroby polydimethylsiloxanu

Konkrétní příklad výroby je uveden na přípravě polydimethylsiloxanu (PDMS), který se v dnešní době hojně využívá pro výrobu mikrofluidních čipů. Postup jde také přehledně popsat i následujícím schématem (obr. 6):



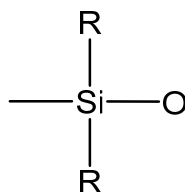
Obr. 6 Schéma výroby [12]

Pro tento postup se primárně vychází z technického křemíku a methanolu. Methanol s kyselinou chlorovodíkovou (která se produkuje v pozdější fázi procesu), vytváří chlormethan. Při syntéze chlormethanu s křemíkem vzniká methylchlorsilanová směs, která se dále rektifikací dělí na jednotlivé komponenty (dimethyldichlorsilan). Ty se poté hydrolyzují a vzniká kyselina chlorovodíková, která se dodává do začátku procesu a silanol, který dále kondenzuje a tím vzniká žádaný polydimethylsiloxan [12].

Výroba různých forem silikonů je principálně popsána ve druhé části u příslušné podkapitoly.

1.3 Obecné vlastnosti silikonů a jejich struktura

Struktura silikonu je vidět na obr. 7.



Kde R je organický substituent (např. CH₃)

Obr. 7 Struktura silikonu [9]

Silikony mají díky své zčásti anorganické struktuře výjimečné vlastnosti. Disponují i z různých hledisek velmi příznivými vlastnostmi. Nejdůležitější kladnou vlastností je zcela bezpochyby tepelná stabilita. Je dána vazbami Si – O o vysoké vazebné energii (452 kJ/mol) a také Si – CH₃. Silikony odolávají teplotním hodnotám v rozmezí od – 60 °C do + 200 °C bez větších problémů. Při krátkodobých dějích odolají až 350 °C [12]. Také z důsledku svých vazeb mají vysokou adhezivní schopnost.

Dále jsou vysoce hydrofobní, přičemž velice dobře propouští vodní páry. Chemicky jsou zařazovány mezi vysoce čisté, resp. obsahují velmi malou míru nečistot.

Jsou nepolární, z čehož vyplývá stabilní a nízký disipační faktor a taktéž hodnota permitivity v rozsáhlém spektru teplot. Nepolárnost je způsobena organickým činitelem navázaným na anorganickou makromolekulu. Jsou tedy nevodivé a mají výborné elektroizolační vlastnosti. Používají se v izolátorech nebo jako izolace např. pro

transformátory, elektrické vedení atd.

Jako další velká výhoda pro jiné obory je ta, že jsou fyziologicky inertní. Nemají žádný zápach ani chuť, nejsou vhodným prostředím pro bakterie, nezpůsobují korozi jiným materiálům a také odolávají, oproti jiným plastům, ozónu. Také jsou vyznačovány nízkými hmotnostními ztrátami ve vakuu. Patří k nejméně toxickým polymerům, a tedy z hlediska životního prostředí jsou bezpečné pro používání. Totéž platí pro výrobu, avšak tam se pracuje s kyselinami, takže se musí dbát speciálních bezpečnostních předpisů.

Z těchto důvodů resp. pro jejich vlastnosti se jedná o perspektivní sloučeniny, které se již dnes využívají v širokém spektru oborů.

Kromě svých kladných vlastností mají také jeden zápor. Tím je myšlena vysoká pořizovací cena, která je důsledkem nákladné a náročné výroby.

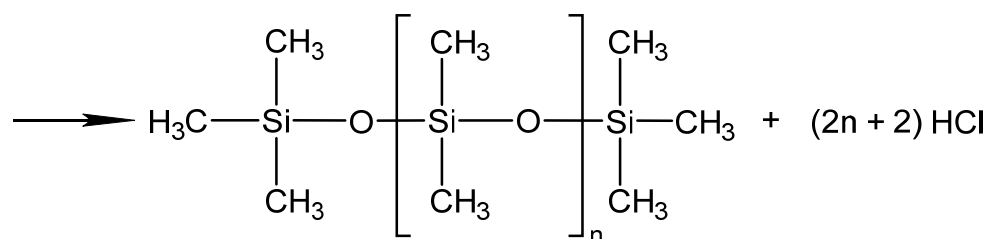
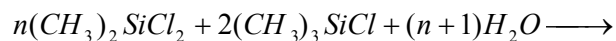
2 Formy silikonů a jejich vlastnosti

Silikony se rozdělují podle poměru organického radikálu ke křemíku na:

- oleje
- emulze
- kaučuky a pryže
- pryskyřice
- tmely a lepidla
- pěny
- laky

2.1 Silikonové oleje

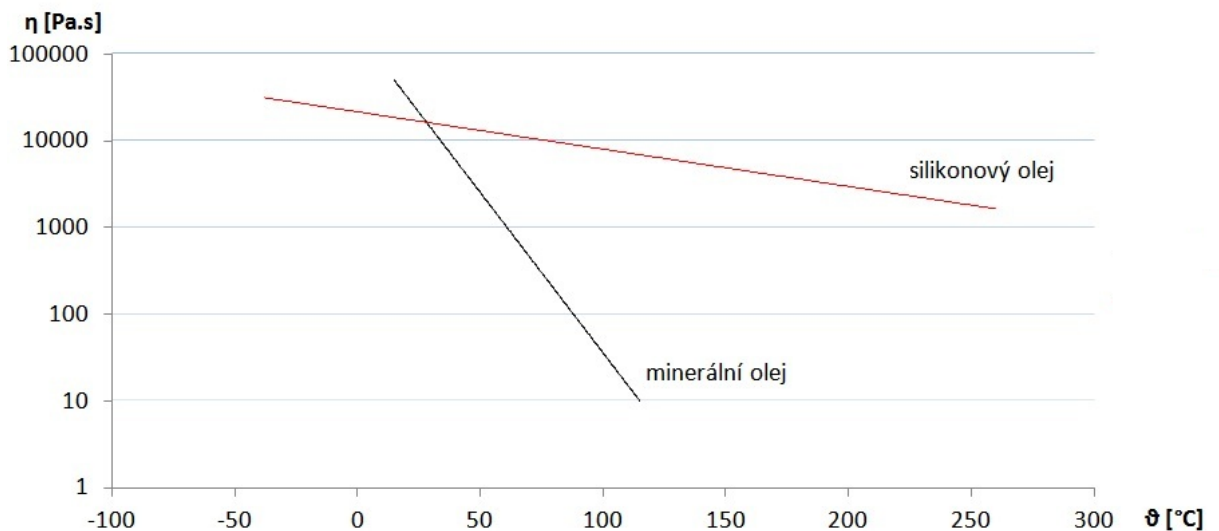
Jedná se převážně o methylsilikony (resp. polydimethylsiloxany). Připravují se hydrolýzou dimethyldichlorsilanu se silně okyselenou vodou za působení trimethylchlorsilanu jako terminační složky (obr. 8):



Obr. 8 Příprava silikonového oleje [9]

Terminační složka, lépe řečeno její množství, určuje viskozitu a molekulovou hmotnost. Svými vlastnostmi jsou velice podobné minerálním olejům. Jsou fyziologicky nezávadné, nerozpustné ve vodě a bezbarvé. Disponují také velmi dobrou chemickou odolností proti působení roztoků solí, oxidačním činidlům a minerálních kyselin. Avšak

oproti minerálním olejům mají velmi plochou křivku viskozity v závislosti na teplotě (obr. 9). Také mají lepší tj. vyšší tepelnou stálost a zároveň tuhnou při nižších teplotách než minerální oleje. Methylsilikonové oleje odolávají teplotám až do 180 °C, po překročení této hodnoty se navyšuje jejich viskozita z důvodu oxidace, ke které dochází. Z toho vyplývá, že ve vakuu nebo v inertní atmosféře se tato hodnota navyšuje až na 300 °C. Předchozí výše teplot jsou stanoveny pro dlouhodobé tepelné namáhání. Pro krátkodobé jsou ještě vyšší a to na vzduchu až 250 °C. Tuhnout začínají při - 40 °C, ale některé speciální oleje tuhnou při - 100 °C.



Obr. 9 Změna viskozity v závislosti na teplotě [12]

Použití silikonových olejů je poměrně široké. Využívají se jako kvalitní maziva pro různé obory (ve strojírenství, v letectví k mazání systémů a přístrojů, které jsou vysoce tepelně namáhány, v záznamových i projekčních filmových zařízeních atd.). Dále také jako hydraulické kapaliny a kapaliny pro difuzní pumpy. Jejich vodoodpudivost je využívána pro hydrofobizaci jiných látek, ať už např. keramika, sklo, kůže, různé tkaniny nebo také jako hydrofobní přísady do leštidel na automobily nebo nábytek atd.

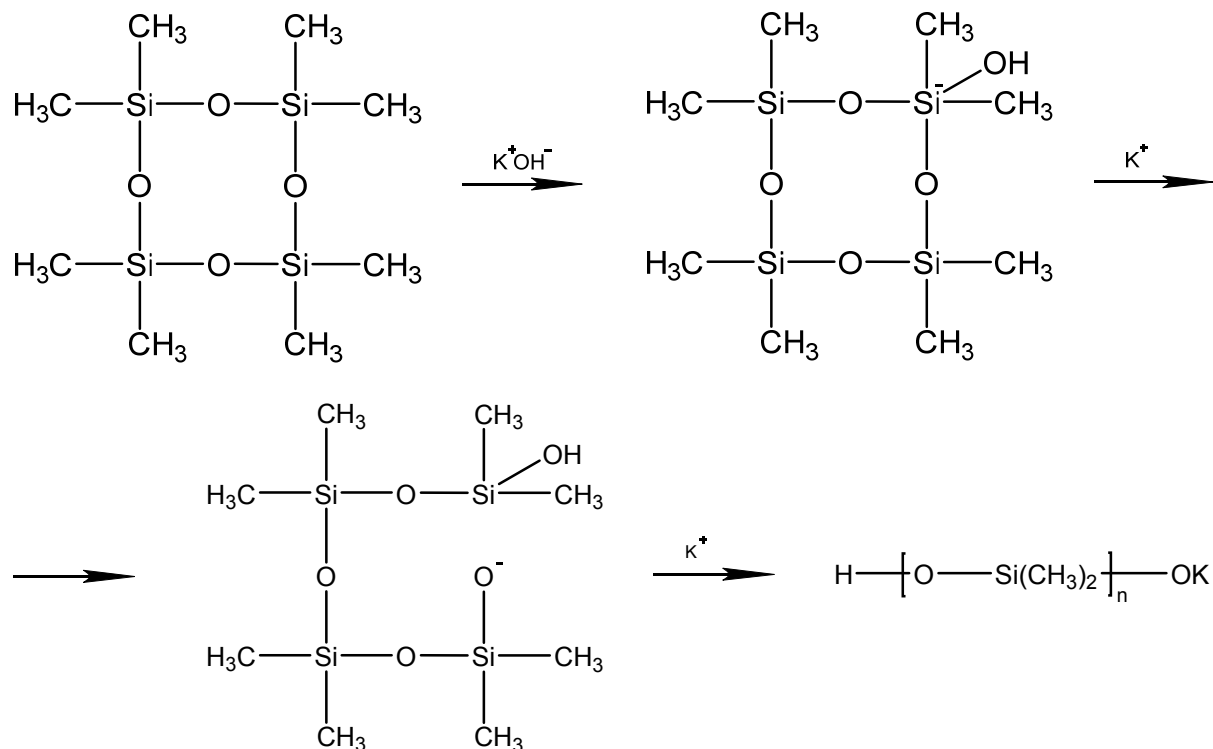
V elektrotechnice jsou používány jako transformátorové kapaliny nebo silikonová olejová dielektrika, která zvyšují a tudíž vylepšují elektroizolační vlastnosti. Dále také na keramických i skleněných izolátorech, kde slouží k hydrofobizaci těchto zařízení a opět vylepšují jejich vlastnosti.

2.1.1 Silikonové emulze

Jedná se o methylsilikonové oleje, které po zreagování s vodou vytvoří emulzi bílé nebo nažloutlé barvy. Tyto emulze mají obdobné výhody, oproti emulzím založených na minerálních základech, jako silikonové oleje. Tudíž jsou teplotně stálé, při vysokých teplotách jen velmi málo těkají, nekorodují materiál formy atd. Používají se jako separátory ve zředěném stavu při lisování, odlévání a vstřikovávání součástí z kovů, plastů a pryží. Také se používají na leštění a ochranu automobilů, na textilu zvyšují hydrofobnost a snižují mačkavost daného textilu.

2.2 Silikonové kaučuky a pryže

Silikonové kaučuky se připravují z čistých cyklických siloxanů a to konkrétně z hexamethylcyklotrisiloxan a oktamethylcyklotetrasiloxan. Následnou kyselou nebo alkalickou polymerací se vytvářejí lineární kaučukovité polymery. K tomu slouží směs kyseliny sírové a síranu hlinitého nebo KOH. Následující obrázek (obr. 8) popisuje použití KOH.



Obr. 10 Příprava lineárního kaučuku pomocí KOH [9]

Tyto kaučuky se dělí dle teploty vulkanizace a tlaku při tomto procesu. Mohou se vulkanizovat při běžné neboli pokojové teplotě nebo při teplotách vyšších. To zároveň pod tlakem nebo naprosto bez tlaku. Pokud probíhá vulkanizace při vyšší teplotě (tj. 80 °C až 110 °C nebo 140 °C až 160 °C) a v tlaku, používá se většinou dibenzylperoxid jako vulkanizační činidlo a proces probíhá ve formách v hydraulických lisech [10]. Při vulkanizaci beztlakové při vyšší teplotě se využívá jako katalyzátor bis-(2,4,-dichlorbenzoyl) peroxid.

Katalyzátor neboli vulkanizační činidlo je připojeno ke konci makromolekuly a jeho zbytky jsou deaktivovány po polymeraci neutralizací nebo jsou vypírány vodou a následně se odstraní zbytek monomeru destilací ve vakuu. Katalyzátorem lze ovlivňovat molekulovou hmotnost resp. jeho množství. Toto se v praxi nepoužívá. Bylo zjištěno, že při koncentraci katalyzátoru pod 0,01%, se dosahuje lepších vlastností. Zejména vyšší tepelné stability a vyšších elektroizolačních vlastností. Z tohoto důvodu se pro regulování molekulové hmotnosti využívá hexamethylsiloxanu.

Vlastnosti těchto silikonů jsou následující. Výborná tepelná stabilita tzn. krátkodobě až 250 °C, je dlouhodobě udávána hodnota 150 °C. Při nižších teplotách tj. -50 °C až -60 °C si ještě zachovávají svou elasticitu a jsou ohebné. Některé speciální typy mají ještě posunutou spodní hranici na -90 °C [10]. Mají velmi dobré elektroizolační vlastnosti, ale také menší strukturní pevnost, která lze odstranit přidáním speciálních plniv. Mají menší odolnost vůči oděru. Oproti tomu daleko lépe odolávají účinkům slunečního záření, radiaci i řadě chemikálií.

Jejich využití je v mnoha oborech. Například v průmyslu kabelářském jako izolant vodičů, které jsou tepelně namáhány (po shoření zůstane pouze nevodivý křemičitý popel). Pro také namáhané součástky ve strojírenství, elektrotechnice i automobilovém průmyslu. V letectví pro rozvedení horkého vzduchu a olejů. Také slouží u přístrojů, které pracují při vysokých nebo nízkých teplotách, k tlumení jejich vibrací. Dále jako tmely a zalévací hmoty v potravinářském, chemickém a farmaceutickém průmyslu. V lékařství například jako kontaktní čočky a implantáty.

Kaučuky vulkanizované při běžných teplotách jsou především používány jako zalévací materiály pro transformátory a čela vinutí elektrických přístrojů a strojů. I takto vulkanizované kaučuky se využívají v lékařství a to zejména jako obtiskovací dentální hmoty.

2.2.1 Silikonové tmely a lepidla

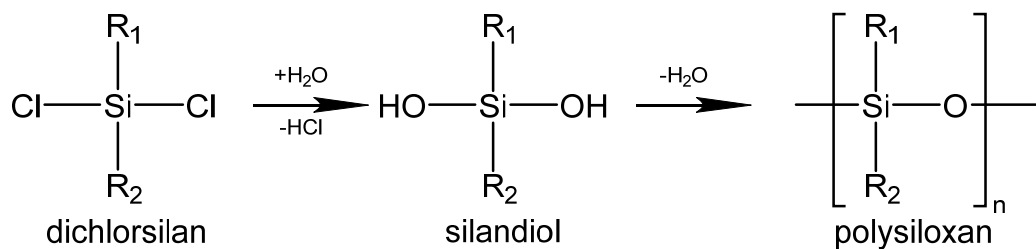
Jedná se o substance jednosložkové, které se za obvyklých teplot vytvrzují vlivem běžné vlhkosti vzduchu.

Mají výborné adhezivní vlastnosti k řadě kovů a také ke sklu. Na rozdíl oproti ostatním lepidlům mají široký teplotní rozsah. Silikonové tmely a lepidla obecně snášejí teploty od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12]. Splená část má charakter pryže, tím pádem jsou spoje pružné a zabraňuje se, u dílů s odlišnou roztažností, praskání.

Vytvářejí i v neobvyklých kombinacích pevné spoje. Mohou se využívat i k lepení silikonových pryží.

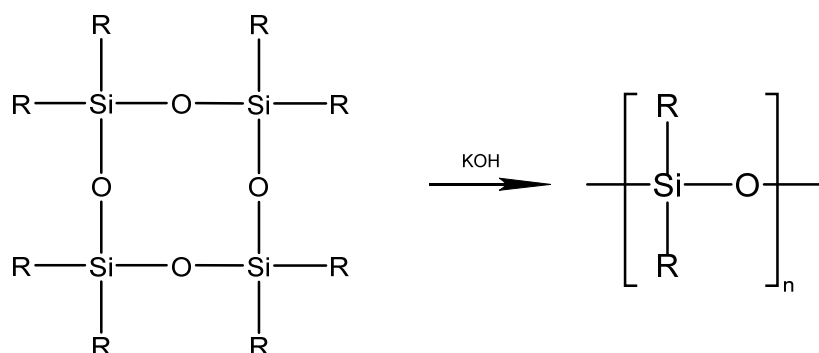
2.3 Silikonové pryskyřice

Tyto pryskyřice se připravují nejčastěji z methylchloridů a fenylochlordů (např. dimethyldichlorsilan, fenyiltrichlorsilan), ovšem proces, při kterém pryskyřice vznikají, je odlišný než při výrobě silikonových olejů. Tyto silany se hydrolyzují a následně samovolně polykondenzují, jak je vidět z obr. 11. Také se mohou připravovat polymerací cyklosiloxanů (obr. 12).



kde R_1 a R_2 jsou alkyly nebo aryly

Obr. 11 Příprava silikonové pryskyřice hydrolyzou [12]



kde R je alkyl

Obr. 12 Příprava silikonové pryskyřice polymerací cyklosiloxanu [12]

Když se směs dvoj- a troj- funkčních monomerů hydrolyzuje, vznikají makromolekuly silikonových pryskyřic (prostorově rozvětvené až zesíťované). Míra zesíťování je určována množstvím trichlorderivátu v prvotním produktu a tím jsou zároveň ovlivněny výsledné vlastnosti dané pryskyřice. Jejich formování probíhá lisováním za tepla. Základní mixy obsahují různé tvrdící materiály, proto mají omezenou skladovací dobu.

Z polysiloxanů methylových se vytvářejí pryskyřice, které odolávají zvýšeným teplotám. Tvrdá vrstva vzniklá po zaschnutí pryskyřice má k podkladovým materiálům menší přilnavost.

Z polysiloxanů fenylových se naopak po zaschnutí vytvoří neobvykle pevně přilnavé, termoplastické vrstvy.

Obecně mají silikonové pryskyřice vysokou tepelnou odolnost (krátkodobě až 300°C a trvale 180 - 200 °C). Při vyšším teplotním namáhání dojde k odtržení organických skupin a tím se stávají křehkými. Jsou také velmi hydrofobní a značně odolné vůči povětrnostním podmínkám, ultrafialovému záření a také ozónu. K horké vodě a transformátorovým olejům jsou inertní až do teploty 150 °C. Dále odolávají až 50% kyselině sírové a koncentrované kyselině chlorovodíkové. V neposlední řadě mají výborné elektroizolační vlastnosti a to zejména minimální změny elektrických veličin závislých na teplotě.

Jsou využívány pro výrobu nátěrových hmot, které odolávají zvýšeným teplotám. Ty jsou pak použity jako ochranné nátěry pro např. žáruvzdorné nádrže, výměníků tepla, spalovací motory (konkrétně výfukového potrubí) atd. Také jsou používány jako přísady k mísení s jinými druhy pryskyřic (např. v lékařství).

V elektrotechnice se využívají jakékoliv silikonové pryskyřice jako pouzdrící materiály a také jako materiály zalévací.

2.3.1 Silikonové laky

Silikonové laky se vytvářejí rozpuštěním silikonových pryskyřic např. v xylenu. Po skončení procesu se rozpouštědlo odpaří a vzniklý povlak se následně vytvrdí. Výběrem vhodného rozpouštědla se dají vytvořit roztoky, které jsou předurčeny pro přípravu elastických povlaků [12].

Vzniklé povlaky jsou všechny obecně odolné proti působení chemických činidel. Zároveň jsou hydrofobní a tvrdé.

Elastické povlaky jsou vhodnými impregnanty pro různé tkaniny. Obecně se silikonové laky využívají pro impregnaci elektrických strojů točivých, cívek a bužírek.

2.4 Silikonové elektricky vodivé kaučuky

Stejně jako u ostatních vodivých kaučuků se i u silikonového snižuje rezistivita přidáním vodivých plnidel. Grafit je častou náplní těchto vodivých kaučuků nebo se využívá v různých kovových práscích [12].

Oproti ostatním kaučukům (převážně přírodních) nejsou silikonové vulkanizované sírou a také neobsahují žádná změkčovadla. Tímto nedochází k reakci s kovy, a tudíž jsou přímo výhodné pro náročné použití (např. kontakty). Další využívaná vlastnost u silikonových vodivých kaučuků je, že jsou velmi stálé i při vysokých výkyvech teplot.

2.5 Silikonové gely

Silikonové gely (ukázka na obr. 13) jsou obvykle vytvářeny adičně pomocí platinového katalyzátoru. Až na výjimky je používán dvousložkový systém v poměru 1:1. Tvrzení gelů probíhá převážně při pokojové teplotě po dobu od 1 do 24 hodin. Jak je zmíněno, tento proces závisí na teplotě, tj. při zvýšení teploty je možno



Obr. 13 Silikonový gel [39]

dosáhnout vytvrzení během několika minut. Bez přídavku barviv je materiál čirý.

Vlastnosti silikonových gelů zejména jsou:

- vynikající dielektrické vlastnosti
- tepelný rozsah od -45 do 150°C
- nízká viskozita (snadné a rychlé dávkování)
- minimální smrštění při vytvrzení
- minimální toxicita
- opravitelnost
- odolnost proti UV záření

Tyto gely nacházejí uplatnění v mnoha oborech. Nejznámější využití je v medicíně jako prsní implantáty. To však není jediné uplatnění v medicínském odvětví. Mohou také poskytnout ochranu kůže nebo ochranu na tlumení nárazů. V automobilové elektronice také našly uplatnění, zejména pro svou dobrou vlastnost pohlcování vibrací a také neměnné mechanické namáhání okolních součástí při změně teplot.

2.6 Silikonové vazelíny

Jsou ve své podstatě vodotěsné tuky, které vznikají kombinací silikonového oleje se zahušťovadlem. Při výrobě se nejvíce využívá silikonového oleje, tím je polydimethylsiloxan a jako zahušťovadlo je využíván amorfni pyrogenní oxid křemičitý [42]. Při tomto složení je vzniklá vazelína průsvitně bílá viskózní pasta s vlastnostmi, které odrážejí podíl jednotlivých složek.

Ze své podstaty se silikonové vazelíny vyznačují výbornou odpudivostí vody, čímž je materiál chráněn také před korozi. Mají vynikající mazací a konzervační vlastnosti, jsou nízkotuhnoucí a mají také výborné dielektrické vlastnosti. Stejně jako ostatní materiály ze silikonu i tyto se vyznačují chemickou a tepelnou odolností a separačními účinky.

Použití nachází v různých odvětvích. Jsou využívány jako maziva pro dočasné těsnění spojů laboratorních skel. Také jsou využívány pro mazání a ochranu těsnících gum tzv. okroužků nebo mazání závitů, aby se zabránilo přilepení a korozi. V elektrotechnice jsou využívány na mazání přepínače, elektrických kontaktů nebo kabelových spojů.

3 Uplatnění silikonů v elektrotechnice

3.1 Kabelový průmysl

3.1.1 Koncovky vodičů

Na napěťové hladině VN i NN je obvykle zapotřebí, kromě vodivého připojení, chránit konec kabelu proti vnikání vlhkosti. Na VN mají koncovky kabelů i další uplatnění a tady plní i funkci řízení pole a ochranu před účinky plazivých proudů. Obecný požadavek pak je odolnost proti znečištěnému prostředí a UV záření, případně také proti napěťovému přeskoku.

V kabelovém průmyslu je silikon ideální materiál pro kabelové koncovky zejména pro venkovní použití (vybraný typ na obr. 14). V této funkci vysoko předčí tradiční materiály jako porcelán. Zejména vyrovnávají mnohem lépe než tvrdší materiály výkyvy teplot a nerovností. Tímto vyrovnáváním bezpečně zabraňují částečným výbojům způsobeným vzduchovými mezerami.



Obr. 14 Koncovka vodiče[44]

Silikon svými vlastnostmi nabízí, ve spojení s vysokou elasticitou, také vysoce kvalitní elektrickou izolaci a mimořádnou odolnost proti koróně a plazivým proudům. Tím umožňuje rozsáhlé použití, kde jedno tělo ze silikonového kaučuku lze použít pro různé průřezy jádra. Optimální flexibilita takového příslušenství zajišťuje rovněž snadnou montáž a tím úsporu času i finančních prostředků.

3.1.2 Spojky vodičů

U gelových spojek pro kabely NN s plastovou izolací je používán zesítený silikonový gel. Tento gel spojuje výhody pevných a tekutých těsnících materiálů. Dlouhá životnost, dobrá izolační schopnost, vysoká tažnost a pružnost, to jsou základní vlastnosti těchto gelů. Při aplikaci gel nejprve penetruje povrch tenkou vrstvou silikonového oleje a tím vytěsňuje případnou vlhkost



Obr. 15 Spojka vodiče [55]

(jak je vidět na obr. 15). Tyto spojky (plněné silikonovým gelem) je možno používat v rozsahu teplot od -40° do $+90^{\circ}\text{C}$ a nemají omezenou dobu skladování [18].

3.1.3 Izolace vodičů

Obecné výhody silikonů se zde projevují jak v silných tak v slabých stránkách. Silikonové izolace vodičů (obr. 16) se odlišují od běžných izolací zejména vyšší odolností proti provozním teplotám a dále nižší degradací materiálu. Jsou více odolné proti ohni a udrží určitou izolaci i po shoření. Také disponují větší odolností vůči vodě a olejům. Dobré chemické vlastnosti si zachovávají také při styku s ozónem a oxidačními kyselinami.



Obr. 16 Izolace vodiče [19]

K nevýhodám zajisté patří nižší odolnost proti mechanickému poškození, která je dána intermolekulárními řetězci. Jsou sice ohebnější a pružnější, ale na úkor mechanické odolnosti. Tato nevýhodná vlastnost ovšem bývá v některých případech odstraněna přidáním speciálních plniv do použitého silikonu. Také se používá opletení silikonové izolace z materiálu, který podstatně zvýší mechanickou odolnost. Tento materiál může být například ze skelných vláken.

3.2 Elektronika

3.2.1 Pouzdření a zalévání součástek

V elektronice je využíváno silikonových materiálů např. při zalévání a pouzdření citlivých elektronických součástek a elektronických sestav např. optických prvků (LED diod), transformátorů a cívek.

Tato ochrana před vlivy prostředí může být požadována z celé řady důvodů, např.:

- mechanické otřesy

- tepelné namáhání
- vibrace
- chemické vlivy (kapaliny, výpary)
- vlhkost
- extrémní teploty
- velký rozsah teplotních cyklů



Obr. 17 Zalévací hmota [22]

Zalévací hmoty (obr. 16) kromě ochrany obvykle mají i jinou funkci, zejména je využíváno vedení tepla. Ačkoliv funkce daného materiálu je zřejmá, výsledné požadavky jsou určeny způsobem výroby, použitými součástkami a v neposlední řadě také provozními podmínkami.

Na trhu jsou také různé systémy zalévacích hmot (polyuretanové, epoxidové a jiné typy polymerů než silikonové), ovšem každý systém má svá omezení a výhody. Proto je důležité znát veškeré chemické a fyzikální podstaty každého systému a pečlivě je porovnávat s parametry a požadavky součástek a výrobních procesů.

Silikonové zalévací hmoty, zejména tepelně vodivé, se staly vhodnou alternativou také pro odvádění tepla vygenerované z více součástí v rámci jednoho zařízení. Zároveň při volbě vhodné viskozity zalévací hmoty se velmi zefektivní přenos tepla tím, že se zamezí vzniku vzduchových bublin uvnitř materiálu.

3.2.2 Ochranné laky plošných spojů

Ochrana desky plošných spojů je vyžadována nejen v náročných klimatických podmínkách a je také důležitá pro zajištění spolehlivosti zařízení. Ochranné laky jsou obvykle nanášeny ve velmi tenké vrstvě tak, aby pokryly desku, požadované spoje a součástky.

Je velmi důležité pro jakýkoliv typ ochranného laku zajistit dobrou adhezi na lakovaný povrch. Dále je také důležité před nanášením lakovaný povrch zbavit kontaminace (obvykle mastnoty a otisky prstů, zbytky tavidel a vlhkosti). Po nalakování se povrch učiní odolným proti chemikáliím a také vlhkosti, tím samozřejmě zabraňuje následné korozi. Při dnešní všeobecné miniaturizaci je schopnost laku zatékat a vzlínat velmi důležitá (např. pod

součástkami). Následně se také využívá laku k zabránění pronikání kontaminace do zařízení a to tím, že se pokryjí netěsné hrany lakem.

Ochranné laky jsou většinou čiré, ale obsahují stopu, která nanosený lak zviditelňuje pod UV světlem. Toho je hlavně využíváno pro kontrolu naneseného laku resp. pokrytí lakem. Tyto laky mohou být nanášeny stříkáním, natírány štětcem nebo také ponořováním. K následnému vytvrzování se obecně využívá jeden z uvedených systémů, jsou to: vytvrzování teplem, vytvrzování UV světlem nebo volné zasychání.

Silikonové ochranné laky jsou jednosložkové. Dále mohou být adiční nebo kondenzační. Adiční jsou vytvrzované teplem. Kondenzační se vytvrzují při pokojové teplotě, resp. dochází k volnému zasychání. Jejich odolnost vůči teplotám a v neposlední řadě také vodě, je předurčuje k použití v náročnějších podmínkách např. v letectví.

Jejich klíčové vlastnosti jsou [23]:

- široký rozsah provozních teplot (-55°C až $+200^{\circ}\text{C}$)
- vynikající přilnavost k mnoha podkladům
- nízká viskozita
- vytvrzení při pokojové teplotě nebo teplem
- 100% pevné látky (žádná škodlivá rozpouštědla)
- nízký zápach

3.2.3 Tepelně vodivé silikonové materiály

Jak již bylo zmíněno, základní fyzikální vlastnosti silikonových polymerů a elastomerů jsou následující:

- široký rozsah provozních teplot
- vynikající dielektrické vlastnosti
- pružnost
- odolnost UV záření
- dobrá chemická odolnost
- odolnost vůči vlhkosti a vodě



Obr. 18 Použití tepelně vodivého silikonu [24]

- žádná nebo velmi nízká toxicita
- snadnost použití
- tvrdost v rozsahu od měkkých gelů až ke středně tvrdým pryžím

Vlastnosti se mohou dále upravovat resp. vylepšovat pro konkrétní aplikaci, popř. konkrétního zákazníka. Upravením je myšleno využití určitých plniv nebo chemických aditiv. Tímto lze upravit např. elektrickou nebo tepelnou vodivost (ta je zajištěna přidáním velkého množství tepelně vodivých oxidů kovů), samozhášivost i adhezi [45].

Tepelně vodivá silikonová lepidla (ukázka použití na obr. 18) mají velké výhody. Samozřejmostí je trvalé spojení, ale tepelná vodivost je vhodná například k připojení elektronické součástky k pasivnímu chladiči. Tím odpadá potřeba dále mechanicky upevňovat tento chladič. Zamezuje možnosti pohybu a tím vzniku vzduchové mezery. Špatný odvod tepla může způsobit snížení výkonu dané součástky nebo její předčasné selhání. Konkrétní použití je např. u procesorů, LED zařízení nebo u elektrických zdrojů.

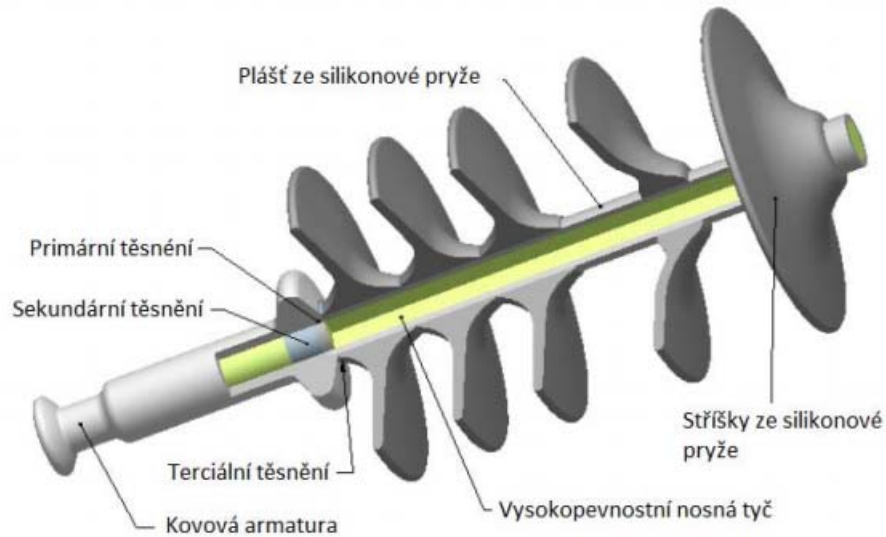
Další používané tepelně vodivé silikony jsou pasty. Tyto pasty jsou ideální pro vytvoření pružných tepelných spojení elektronických sestav. Po vytvrzení je tento materiál stále pružný a zároveň umožňuje dobrý přenos tepla např. mezi součástkami a chladiči. Je snadno aplikovatelný a hlavní výhodou spočívá v efektivním způsobu přenosu tepla mezi nerovnými povrchy. Tím se odstraní vzduchové mezery, které brání odvodu tepla z daných součástek. Zároveň jsou tyto materiály lehce odstranitelné a tím předurčeny k jednoduché opravitelnosti.

3.3 Silnoproudá elektrotechnika

3.3.1 Izolátory

Na obrázku 19 je vyobrazeno základní schéma závěsného izolátoru se zvýrazněnými hlavními částmi. Toto schéma konkrétně ukazuje závěsný izolátor, avšak existují de facto stavebnicové systémy, kterými je možné vyrobit určité typy s parametry, které si zákazník stanoví. Veškeré tyto izolátory používají vysokopevnostní nosné tyče. Tyto tyče jsou vyrobené tažením za studena (pultruzí) z orientovaného skleněného vlákna pojeného reaktoplastickou pryskyřicí. Dále je na nosnou tyč nanesen a chemicky navázán silikonový

plášť. To je prováděno z důvodu zamezení vzniku spáry nebo bubliny. Následně jsou na takto upravenou tyč navulkanizovány stříšky (sukýnky) ze silikonové pryže, natlačeny a utěsněny kovové armatury tak, aby v provozu nedocházelo k pronikání vlhkosti.



Obr. 19 Závěsný izolátor [25]

Silikonové izolátory lze využívat v širokém rozsahu teplot od -50°C do $+180^{\circ}\text{C}$. Oproti keramickým izolátorům mají jen zlomek hmotnosti (10% až 25% z jejich váhy), tím je zvýšena manipulativnost při montáži i dopravě [27]. Jsou sice mechanicky odolné, ale je velmi důležité, aby nedocházelo k poškození např. při přepravě. Většina příčin vzniklých poruch jsou přisuzovány mechanickým poškozením vzniklých před nebo při montáži. Také disponují velkou odolností proti UV záření a vlhkosti, přeskokům a povrchovým svodům.

3.3.2 Omezovače přepětí VN

Omezovače přepětí VN (obr. 20) jsou určeny pro ochranu přenosových sítí na napět'ové hladině vysokého napětí, transformátorů a spínacích zařízení před účinky spínacích i atmosférických přepětí.

Aktivní část tvoří sloupec varistorů, které jsou dimenzovány na provozní napětí. Vnější izolační plášť je tvořen, stejně jako u izolátorů, silikonovým kaučukem. Tento materiál ze své podstaty vykazuje odolnost proti účinkům elektrickému oblouku i povrchových svodových proudů. I jeho další výhody (a samozřejmě i nevýhody) jsou totožné s výhodami

(nevýhodami) izolátorů, u kterých je tento materiál použit. Jedná se například snížení hmotnosti daného zařízení a tím zvýšení manipulovatelnosti a snížení nákladů na montáž či demontáž zařízení. Dále má izolační plášť dobré hydrofobní vlastnosti, které jsou žádoucí u podobných druhů zařízení, stejně jako výborná odolnost proti povětrnostním vlivům, UV záření a znečištění.



Obr. 20 Omezovač přepětí [28]

3.3.3 Olejové transformátory

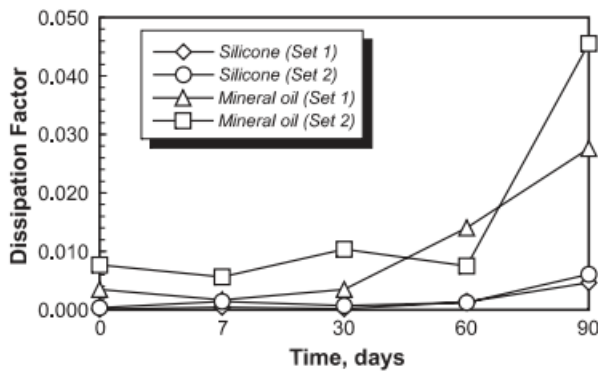
Spolehlivost olejových transformátorů (na obr. 21) je také ovlivňována kvalitou použitého média, které plní dvě základní funkce. První je elektroizolační a druhá, neméně důležitá, je odvod vzniklého tepla. Kvalita tohoto média je zhoršována v průběhu provozu a také času (viz obr. 22 a 23). Je to dáno vlivy (resp. kombinací více vlivů), které na něho působí. Jedná se zejména o tepelné namáhání, dále pak o elektrické namáhání, vodu, pevné nečistoty a kovové katalyzátory. Obecně se následky těchto vlivů nazývají jako "stárnutí transformátorového oleje".



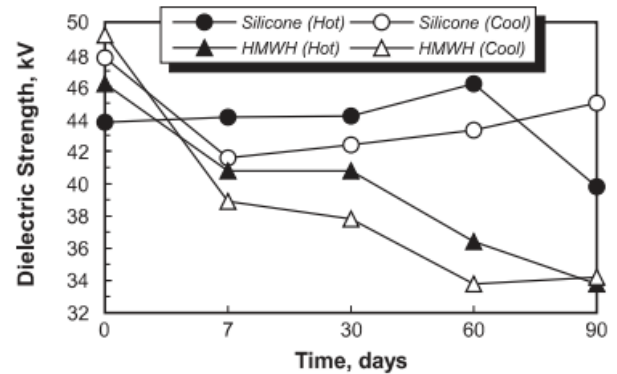
Obr. 21 Olejový transformátor [35]

Ze zmíněných důvodů vyplývají obecné požadavky na oleje používané v transformátorech a jejich parametry. Jsou to: průrazné napětí, číslo kyselosti, obsah vody, ztrátový činitel, rezistivita a obsah inhibitoru.

Silikonové oleje představují ve srovnání s jinými používanými oleji nižší riziko požáru. Po zapálení, i když samo o sobě je obtížné, produkují méně tepla i kouře a prakticky sami zhasnou, pokud je zdroj zápalu odstraněn. Také toxicita spalovacích emisí je nižší. Jsou tepelně stabilní, chemicky inertní a slučitelné s materiály používanými při výrobě. Proto snižují provozní náklady potřebné na provoz transformátoru a zároveň prodlužují jeho životnost. Při zvýšených provozních teplotách nevytvoří kal nebo vedlejší kyselé produkty, které jsou velmi nežádoucí.



Obr. 22 Ztrátový činitel [34]



Obr. 23 Dielektrická pevnost [34]

3.4 Speciální aplikace

3.4.1 Fotovoltaické panely

Fotovoltaický panel (ukázka na obr. 24) je složen z mnoha fotovoltaických článků. Jednotlivé články jsou zapojeny sérioparalelně a tím se dosahuje potřebných výkonů, resp. vyššího napětí a proudu.

Tyto solární články jsou pevně vsazeny na čelní straně v čirém etylenvinylacetátu, usazeném v nerezovém či hliníkovém rámu a zakrytém čirým sklem. V těchto aplikacích se silikonové materiály používají jako alternativní zalévací hmota k etylenvinylacetátu a také na lepení článků do rámu.

Kvalitní průmyslové silikony vytvářejí v tomto směru spolehlivý a pružný spoj, který je velmi odolný proti vlivům prostředí. Silikonová lepidla v podobných aplikacích mají tradici desítek let použití ve stavebnictví a v průmyslu. Nyní jsou již tradičním materiálem s vyzkoušenou odolností proti změnám teplotních cyklů. Protože i v tomto případě jsou spojovány materiály s nestejnou tepelnou roztažností, přirozená pružnost silikonových materiálů rozdílly absorbuje bez mechanického namáhání FV článků. Odolnost silikonů oproti rozkladnému vlivu UV záření je dalším důvodem pro použití silikonových lepidel.



Obr. 24 Fotovoltaický panel [56]

Hlavní výhody těchto lepidel jsou [37]:

- neutrální vytvrzování = nekorozivní vedlejší produkty
- vyšší pevnost = použitelnost i pro těžší články
- rychlé vytvrzování = zrychlení výrobního procesu
- vynikající adheze = výborná těsnost
- bez zdravotních rizik

3.4.2 Elektricky vodivé silikony

Drtivá většina silikonových produktů je v elektrotechnice používána kvůli jedné ze svých základních vlastností. Touto vlastností je nevodivost. Navzdory tomu jsou i elektricky vodivé silikonové kaučuky, které se v praxi používají.

Tyto kaučuky mají většinu svých vlastností stejných nebo podobných se svými nevodivými protějšky. Je to např. vysoká tepelná stabilita nebo vynikající přilnavost [29]. Jejich elektrická vodivost je poměrně dobrá a také nejsou náročné na teplotně rozdílné rozhraní.

Použití silikonových elektricky vodivých kaučuků je např. v oscilátorech a to konkrétně na jeho elektrodách, dále také v elektrickém uzemnění nebo v připojení kondenzátorů, ale také v keramických filtrech.

3.4.3 Silikon – materiál, který nejen chrání

Vzhledem k tomu, že silikon se poměrně jednoduše barví a svými obecnými vlastnostmi je vhodný ke slučování s jinými materiály a zároveň dobře plní i ochranou funkci, je využíván například na počítačové periferie.

Vyrábí se silikonové klávesnice (obr. 25) a myši, které jsou velmi odolné proti prachu a vodě, tudíž jsou dobře omyvatelné. Klávesnice jsou



Obr. 25 Silikonové klávesnice [46]

velmi ohebné a dají se i srolovat. Z jejich až nadměrné odolnosti vyplývá i použití, které

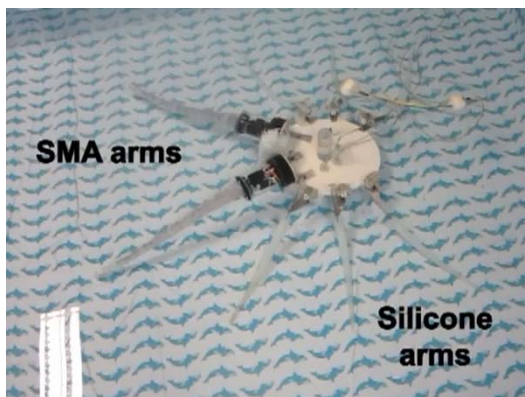
nacházejí v průmyslovém (prašném atd.) prostředí.

Pro "nepříznivé" prostředí byly vyvinuty silikonová sluchátka, která jsou odolná proti potu majitele i okolní vodě a při náročném pohybu nevypadnou z uší. Tato sluchátka vymyslel Seth Burgeth, když trénoval na delší triatlonový závod s názvem Ironman.

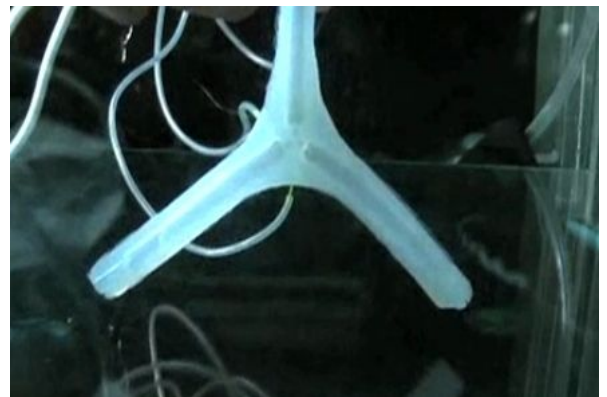


Obr. 26 Silikonová sluchátka [47]

Silikony se také často využívají jako povrchový prvek různých částí robotických systémů. Jedná se např. o roboty, které jsou vyvíjeny k armádním účelům (vyhledávací a záchranné operace v obtížném terénu, foto na obr. 28 nebo k porozumění motoriky živočichů (obr. 27) a jejich následnému komerčnímu využití anebo "jen" k vytvoření podoby lidské bytosti. U všech těchto systémů je využíváno snadného tvarování a kladných vlastností silikonu.



Obr. 27 Robotická chobotnice [50]



Obr. 28 Skákající robot [48]

3.5 Přehled hodnot

3.5.1 Obecný přehled silikonových polymerů

Následující tabulky (Tab. 1 a 2) udávají obecné mechanické a tepelné hodnoty silikonových polymerů.

Hustota	Pevnost v tahu	Modul pružnosti v tahu	Čirost	Nasákavost za 24 h
1,8 - 1,9	28 - 46	6000 - 12000	3	0,2
g/cm ³	MPa	MPa	-	%

Tab. 1 Mechanické vlastnosti [9]

Teplota použití			koef. lineární roztažnosti	tepelná vodivost	specifické teplo
max. krátkodobě	max. dlouhodobě	min. dlouhodobě			
250	180	-50	20 - 50	0,3 - 0,4	0,8 - 0,9
°C	°C	°C	10 ⁶ /K	W/m·K	kJ/kg·K

Tab. 2 Tepelné vlastnosti [9]

Z těchto hodnot je vidět, že silikonové polymery mají, oproti jiným polymerům, malou pevnost v tahu, ale naproti tomu vyšší modul pružnosti v tahu.

Tepelné vlastnosti resp. tepelné použití silikonových polymerů je vyšší oproti jiným polymerům. Koeficient tepelné roztažnosti silikonů také patří k nejnižším hodnotám. Tyto vlastnosti jsou velmi příznivé pro použitelnost v elektrotechnice.

3.5.2 Přehled vybraných silikonových materiálů

Tato tabulka přehledně ukazuje hodnoty typických vlastností silikonových materiálů vybraných typů.

	lepidlo	gel	kaučuk	olej	lak	vazelína	
Elektrická pevnost	19	15	41	20	60	21	kV/mm
Tepelná odolnost	-	-	od -50 do 180	od -60 do 180	do 230	do 200	°C
Objemová rezistivita	2	3	-	1	-	-	Ω/cm
Tepelná vodivost	0,28	-	1,5	-	-	1	W/(m·K)
Zdroj	[60]	[61]	[59]	[58]	[58]	[57]	

Tab. 3 Porovnání silikonových materiálů

Z této tabulky (Tab. 3) je patrné, že nejvyšší elektrickou pevnost z porovnávaných

materiálů obecně mají silikonové laky. Oproti tomu provozní teploty jsou velice podobné u všech materiálů.

Obecně jsou konkrétní hodnoty různých vlastností obtížně dohledatelné a navíc každý výrobce uvádí jiné vlastnosti. Proto je velmi složité porovnat různé druhy silikonových materiálů mezi sebou.

4 Rozvaha o využitelnosti a perspektivě silikonů v elektrotechnice

Z hlediska energetického uplatnění mají silikonové výrobky jisté přednosti oproti nesilikonovým. Silikonové produkty mají obecně lepší parametry (ať už např. vyšší tepelné rozsahy, tak i vyšší maximální dielektrické pevnosti), než jejich nesilikonový oponenti. Dále také mají vyšší odolnosti proti nepříznivým vlivům a s tím je spojena životnost a spotřeba daného produktu. Z energetického hlediska jsou silikonové produkty vhodnějšími kandidáty pro uplatnění než nesilikonové.

Stejně tak z ekologického pohledu jsou silikony výhodnější materiál. Obecně jsou tyto produkty zcela bezpečné pro životní prostředí a taktéž pro člověka. To platí téměř o všech produktech, až na výrobky, ve kterých tvoří silikony pouze určitou část. Z hlediska ekologického jsou inertní, a proto v tomto smyslu přebírají vlastnosti prvku, se kterým jsou smíšeny. V tomto směru mají výborné vlastnosti, a tudíž byly a jistě i budou používány právě tam, kde se na toto hledisko více apeluje.

Perspektiva silikonů je jistě velmi dobrá. Již dnes jsou hojně využívány napříč všemi obory, ale v budoucnosti najdou ještě širší využití. Silikony by se také mohly využívat ve sloučených formách materiálů např. v kompozitech nebo suchých transformátorech se zalévaným vinutím.

4.1 Kompozitní materiály

Kompozity jsou nazývány takové materiály, které jsou složeny ze dvou nebo více složek, avšak oproti slitinám musí tyto složky mít výrazně rozlišné mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti. Pokud se tyto složky sloučí do jediného materiálu, vzniká nový materiál s jedinečnými vlastnostmi, které dané složky nemají samostatně.

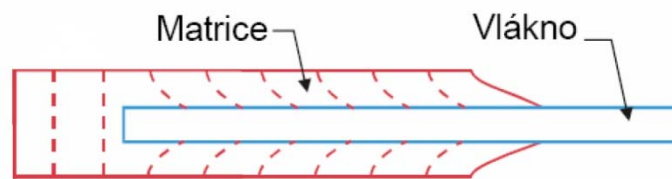
Tyto kompozity jsou tvořeny jednou nebo více nespojitými fázemi, které jsou vnořeny do spojitě fáze. Tato fáze (spojitá) se taktéž nazývá matrice. Matrice slouží převážně k tomu, aby propojila jednotlivé nespojitě fáze k sobě.

Rozdělení kompozitních materiálů:

- Partikulové

- Strukturální
- Vláknové

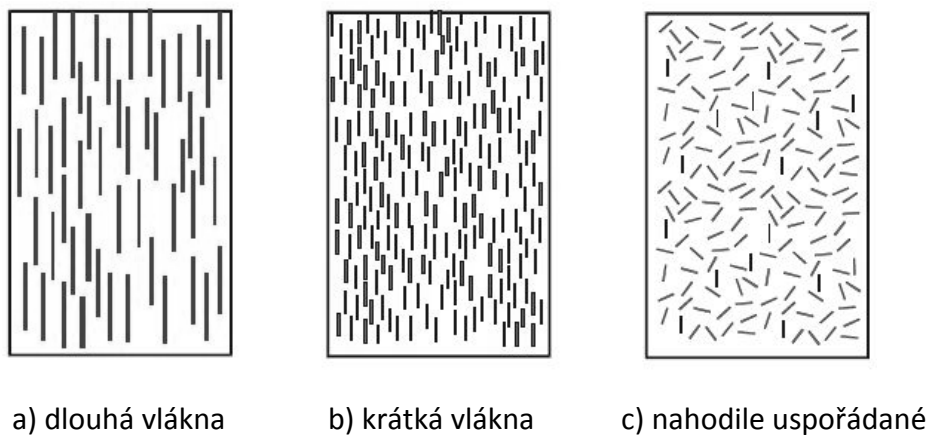
Toto je základní dělení kompozitních materiálů. Každý z těchto kompozitů se dále dělí na další nejméně dvě skupiny, přičemž každá má své specifické vlastnosti. Vláknové (obr. 29) se dále dělí na dlouhoválnové (obsahující spojitá vlákna) a krátkoválnové (obsahující diskretní vlákna).



Obr. 29 Vláknové kompozity [30]

4.1.1 Vláknové kompozity se silikonovou maticí

Silikony by mohly mít uplatnění v krátkoválnových kompozitních materiálech jako matrice. Ve vláknových kompozitech se nejčastěji používají tři typy vláken. Jsou to vlákna skleněná, uhlíková nebo kevlarová. V krátkoválnových jsou většinou nahodile upořádané, jak je vidět na obr. 30 c). Tyto vlákna plní v kompozitech nosnou funkci.



Obr. 30 Typy vláknových kompozitů [30]

Matrice je převážně tvořena polyethylenem, nebo polypropylenem z ekonomického i zpracovatelského hlediska. Přesto jsou však, ač v menší míře, používány dražší a náročnější a to za účelem dosažení vyšších hodnot např. tepelných nebo mechanických

odolností. Jak již bylo zmíněno, matrice by měla propojovat nespojité fáze a přenášet do nich zatížení. Také by je měla chránit proti narušení.

Požadavky na matrici tedy jsou:

- odolnost proti okolnímu prostředí
- tepelná odolnost a stálost
- adheze k výztuži
- dobré mechanické a dielektrické vlastnosti
- houževnatost

Tyto parametry jsou více než jen splněny u silikonových polymerů. Ty mají vysokou odolnost proti okolnímu prostředí, vysokou tepelnou odolnost i stálost, velmi dobré dielektrické vlastnosti, výbornou adhezi zejména ke sklu a zároveň jsou také houževnaté. Z tohoto aspektu jsou silikony výhodným materiálem pro používání jako matric v krátkovláknových kompozitních materiálech.

Výsledné vlastnosti kompozitů jsou vytvářeny mnoha faktory. Nejvíce ovlivňující jsou samozřejmě vlastnosti jednotlivých složek, které se podílejí na kompozitu. Nicméně se výsledek většinou nerovná součtu těchto vlastností. Také záleží na geometrii výztužení tj. velikosti, tvaru, případně způsobu vrstvení. Dále záleží na vlivu koncentrace, koncentrační distribuce a orientace.

Kompozity jsou využívány v různých odvětvích (např. v letectví jako lopatky kompresorů a turbodmychadel, v kosmonautice např. jako anténa Hubblova teleskopu, ve sportu jako tenisové rakety, lyže apod.). [30][31][32]

Základní vlastnosti krátkovláknového kompozitního materiálu ze skleněných vláken se silikonovou matricí by měly následující: podle stupně plnění skleněných vláken, délky těchto vláken a jejich orientace by se zvyšovala pevnost a tuhost daného kompozitu. Jelikož skleněná vlákna mají vyšší tepelnou odolnost než silikony, tak by tuto hodnotu neurčovaly. Stanovily by ji právě silikony, které tuto hodnotu mají sice nižší, ale stále velmi dobrou oproti ostatním polymerům [54]. Další vlastnosti by měl tento kompozit podle použitého silikonu. Tyto vlastnosti jsou popisovány v předchozích kapitolách.

Tento výsledný kompozit má využití v náročných aplikacích (např. v elektrických

trakčních motorech jako hlavní izolace), kde je tvořen důraz na pevnost, vysokou tepelnou vodivost a odolnost, dielektrickou pevnost a odolnost proti povětrnostním podmínkám. Nevýhodou tohoto kompozitu by byla vysoká pořizovací cena. Konkrétní parametry jsou navrhovány přesně dle potřeby využití.

Stejně tak by silikony byly vhodnou matricí pro keramická vlákna. Ty jsou vyrobeny z křemičitanu hlinitého, jehož hlavními přednostmi jsou:

- vysoká odolnost vysokým teplotám
- chemická stabilita- akustická a elektrická izolace
- nízká hustota
- ohebnost
- nehořlavost
- tepelné a fyzikální vlastnosti, které se nemění ve styku s vodou, párou, oleji

Keramická vlákna mají tepelnou odolnost vyšší než silikony a tudíž by byl výsledný produkt (stejně jako v předchozím případě) ovlivněn maximální hodnotou tepelné odolnosti dle použitého silikonu. [51] [52]

4.1.2 Jiné kompozity se silikonovou matricí

Dále může být silikonovou pryskyřicí doplněn např. slídový papír nebo bavlněná tkanina. U těchto materiálů je silikonová pryskyřice využívána k vzájemnému spojení vrstev.

Slídový papír se silikonovou pryskyřicí má elektrickou pevnost 20 kV/mm, trvalou tepelnou odolnost kolem 500 °C a krátkodobou až 800 °C [53].

Využití tohoto kompozitu je např. jako komutátorové manžety v trakčních motorech, elektromotorech či generátorech k izolaci mezi lamelami a kovovým stahovacím kruhem.

Některé silikonové materiály se používají jako přísady do plastů pro různé účely. Aplikace, která má velký potenciál pro uplatnění, je založena na využití vysoké molekulové hmotnosti silikonového prášku jako látky zpomalující hoření. Koncentrace prášku od jednoho do pěti procent může změnit v plastovém vypalování určité vlastnosti [61]. Jedná se o snížení míry uvolňování tepla, kouře a oxidu uhelnatého u bezhalogenového, halogenového a fosforového zhášecího systému. Použití silikonového prášku snižuje potřebné množství samozhášecího plniva. Tyto vlastnosti jsou vhodné pro využití v izolacích vodičů.

Závěr

Silikony resp. silikonové produkty jsou velmi kvalitní s vynikajícími vlastnostmi, které nacházejí uplatnění v mnoha oborech (od lékařství až po stavebnictví). V elektrotechnice jsou již dnes také hojně využívány. Zejména při náročnějších aplikacích, u kterých je kladen důraz na tepelnou stabilitu a odolnost. U těchto aplikací se budou využívat i nadále. Je možné že "masovější" výroba těchto materiálů zajistí cenový pokles a tudíž by mohli být v budoucnu využívány i v méně náročných aplikacích.

Jsou také velmi vhodnými součástmi do kompozitů a plastových slitin. Silikony se přímo nabízejí jako matrice do nahodile uspořádaných krátkovláknových kompozitů například se skelnými vlákny. Tyto vlákna zaručují vysokou mechanickou pevnost a silikonová matrice by určovala tepelné vlastnosti a zároveň mechanickou ochranu pro skelná vlákna. Silikony by mohli být použity v kompozitu také s keramickými vlákny, které mají vyšší tepelnou odolnost než skelná vlákna.

Z ekologického hlediska, na které je brán stále větší zřetel, jsou silikony velmi vhodným materiálem, a proto i z tohoto důvodu budou stále více používané.

Použitá literatura

- [9] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7
- [10] ŠKEŘÍK, Jan. *Plasty v elektrotechnice a elektronice*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1991, 514 s. ISBN 80-030-0657-0.
- [11] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-708-0617-6.
- [12] ROUS, B. *Materiály pro elektroniku a mikroelektroniku: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1991, 463 s. ISBN 80-030-0617-1
- [30] HORÁK, Pavel. Vliv struktury na mechanické chování vstříkovaných plošných prvků. 2009. Dostupné z: http://www.cacapa.wz.cz/Diplomova_prace.pdf.
- [61] STRONG, A. *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. 2nd ed. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2008, xiii, 620 p. ISBN 978-087-2638-549.

Internetové stránky

- [1] http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15886
- [2] <http://leccos.com/index.php/clanky/kremik>
- [4] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Křemík>
- [5] http://amapro.cz/datove_zdroje/stranky/chemicke_prvky/chemicprvek_14.php
- [6] <http://www.gweb.cz/dotazy/d-142/>
- [7] <http://absolventi.gymcheb.cz/2010/roplach/kremik.html>
- [8] <http://www.i15.cz/kremik/>
- [13] <http://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2005-09-14.9688084771>
- [14] http://web.elchemco.cz/text_201.php

- [15] <http://www.imaterialy.cz/Materialy/Plasty-pro-stavebnictvi-aarchitekturu-8-Silikony.html>
- [16] http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0CF8QFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.pfisterer.com%2Fdownload_download%2Fd_5721.pdf&ei=BQ8EUbPSDIq3hQfyu4GwBw&usg=AFQjCNGjjDlvCnKOzbeEr78xrB9ns46lbw&bvm=bv.41524429,d.ZG4&cad=rja
- [17] <http://www.nktcables.com/solutions/railway/mv-accessories/>
- [18] <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.odbornecasopisy.cz%2Fres%2Fpdf%2F36833.pdf&ei=GtkGUcLKEIbAhAfRuIHAAQ&usg=AFQjCNECGq5k2fVVe8H6tmP5NuizlJJ9t3g&cad=rja>
- [19] <http://www.allkabel.cz/>
- [20] www.encables.cz/data/elektricke-kabely-obecne.pdf
- [21] www.encables.cz/data/materialy-pro-vyrobu-el-kabelu.pdf
- [22] <http://www.acc-silicones.cz/applications1/encapsulation.ashx>
- [23] <http://www.acc-silicones.cz/applications1/conformalcoating.ashx>
- [24] <http://www.acc-silicones.cz/products/thermaltransfer.ashx>
- [25] http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.dribo.cz%2Fpdf%2FCZ_Kompozitni_izolatory_VVN.pdf&ei=f8EKUcKoNtD64QsJ3oCQAw&usg=AFQjCNFWBB0xRbnPjJ6o8Ard6QnXggmu7g&cad=rja
- [26] http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=17&ved=0CEoQFjAGOAo&url=http%3A%2F%2Fwww.dribo.cz%2Fpdf%2FCZ_Fiberlink.pdf&ei=t8UKUfP7G8XV4gS9uIC4DQ&usg=AFQjCNF5DkdfQIQYhcIaeyese4pI9GUXA&cad=rja
- [27] http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&sqi=2&ved=0CEEQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.nuc.elf.stuba.sk%2Fsvoc2007%2FCDFROM%2F06%2520Elektroenergetika%2FEE_IEEE_Michalik.pdf&ei=R44WUZ_yEYTStAbBtIGYAg&usg=AFQjCNGxX9_s24d_2VdnG3TtvFJvz1YomA&bvm=bv.42080656,

- d.Yms&cad=rja
- [28] http://tycoelectronics.cz/catalogue/pdf/..%5C..%5CEnergy%5CCatalogues%5CZnO_o mezovace_prepeti_nn_vn.pdf
- [29] <http://www4.dowcorning.com/DataFiles/090007c8802d7b94.pdf>
- [31] <http://www.gdpkoral.cz/UserFiles/File/PDF-design-manual/kompozity.pdf>
- [32] http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=vlaknove%20kompozitni%20material%20 pouziti&source=web&cd=7&ved=0CGAQFjAG&url=http%3A%2F%2Fime.fme.vutbr.cz%2FFiles%2FVyuka%2FBUM%2F11-BUM.ppt&ei=tXOpT4qeC43OsgbkhqWm BQ&usg=AFQjCNH9Q4dInag7_hhhu3iyep6q-bOig
- [33] http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QF jAA&url=http%3A%2F%2Fwww.acerhk.cz%2Fsoubory%2Facerhk.pdf&ei=1m4yUY ntGuf14QSbmoEo&usg=AFQjCNGvxiW3_RVPNttr- vncLeKpKcqHVg&bvm=bv.43148975,d.bGE&cad=rja
- [34] <http://www.lindberg-lund.com/files/Tekniske%20datablad/DC-561-G.pdf>
- [35] www.transformatory.cz
- [36] <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CEcQF jAE&url=http%3A%2F%2Fwww.esb-bez.cz%2Fupload%2FFile%2Fregenerace- transformatorovych-a-turbinovych- oleju.pdf&ei=zwUyUZqtCoLZtAbu1oCQAw&usg=AFQjCNEWwt7ccupkku0xg4tQ OkzZbwaJng&bvm=bv.43148975,d.Yms&cad=rja>
- [37] <http://www.acc-silicones.cz/markets/electronics/applications/solar-panels.ashx>
- [38] <http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>
- [39] <http://www.dowcorning.com/content/discover/discovertoolbox/forms-gels- structure.aspx>
- [40] <http://energy.te.com/us/PDF/ISH2005.pdf>
- [41] <http://www.acc-silicones.cz>
- [42] http://en.wikipedia.org/wiki/Silicone_grease
- [43] <http://www.panoil.cz>

- [44] http://www.tycoelectronics.cz/catalogue/pdf/..%5C..%5CEnergy%5CCatalogues%5CSoubory_vvn_EPP0500_11_07_CZ_locked.pdf
- [45] http://web.elchemco.cz/text_226.php
- [46] http://www.svethardware.cz/art_doc-2E0D2B3295D74768C1257430005485FC.html
- [47] <http://tech.ihned.cz/testy/c1-54462110-yurbuds-nejprve-vytvoril-chirurgickeho-robotu-potom-sluchatka-pro-sportovce>
- [48] http://www.rozhlas.cz/leonardo/technologie/_zprava/robot-skace-tak-ze-exploduje--1176326
- [49] <http://www.redstar.cz/katalog/mys-opticka-silikonova-usb-ps-2-p193/>
- [50] <http://robotinka.cz/news/detail/106>
- [51] <http://www.hennlich.cz>
- [52] <http://www.keratech.cz/zaruvzdorne-materialy/izolacni-materialy/keramicke-vlakno-fibratec/>
- [53] <http://www.isoma.cz>
- [54] <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [55] <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36833.pdf>
- [56] <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>
- [57] http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25281
- [58] <http://www.lucebni.cz/data/File/lukosil/Prospekty/Lukosil.pdf>
- [59] <http://www.lucebni.cz/data/File/lukopren/Lukopren-N-MT-G-katalyzator/Prospekty/Lukopren%20N%206681.pdf>
- [60] <http://www.dowcorning.com/applications/search/products/details.aspx?prod=02700051&type=PROD>