

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**TECHNICKÁ FAKULTA**



**Použití a aplikace zalévacích hmot pro elektroniku**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Autor práce: Marek Vojkůvka

PRAHA 2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Marek Vojkůvka

Zemědělská technika

Název práce

**Použití a aplikace zalévacích hmot pro elektroniku.**

Název anglicky

**Use and application of plotting materials for electronics.**

---

### Cíle práce

Cílem práce je analýza parametrů zalévacích hmot pro aplikace v elektronice. Rozbor druhů zalévacích hmot vhodných pro zalévání snímačů, DPS s ohledem na jejich provozní parametry. Užití vícevrstvých povlaků v oboru zalévání s ohledem na teplotně-mechanické parametry systému. Provedení technického a ekonomického zhodnocení vybraných zalévacích hmot.

### Metodika

Rozbor parametrů zalévacích hmot. (elektrická pevnost, roztažnost, tepelná vodivost atd.). Provedení analýzy mechanických vlastností vzorků zalévacích hmot. Možnosti zalévání a výroby modelů. Hodnocení získaných dat.

## **Doporučený rozsah práce**

40 stran, bez příloh

## **Klíčová slova**

elektronika, zalévací hmoty, plast, ochranné vrstvy, výplň, vodivost

---

## **Doporučené zdroje informací**

FUKÁTKO, T., FUKÁTKO, J. Teplo a chlazení v elektronice. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 120 s. ISBN 80-7300-199-3.

KREIDL, M. Měření teploty. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.

MENTLÍK, V. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.

NĚMEC, M. Základy technologie. 2. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 2011. 159 s. ISBN 978-80-01-04867-2.

PECINA, P. Materiály a technologie – plasty. 1. vyd. Brno: MU, 2006. 54 s. ISBN 80-210-4100-5.



---

## **Předběžný termín obhajoby**

2016/17 LS – TF

## **Vedoucí práce**

Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

## **Garantující pracoviště**

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 29. 9. 2016

**prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 9. 2016

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan

V Praze dne 02. 04. 2017

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literární prameny a publikace) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze: 2017. ....

Marek Vojkůvka

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Miloslavovi Lindovi, Ph.D, který mi pomáhal při zpracování zadání Použití a aplikace zalévacích hmot pro elektroniku, tak aby mohla v závěru vzniknout tato bakalářská práce. Především bych chtěl poděkovat za cenné rady a doporučení.

## **Abstrakt a klíčová slova**

**Abstrakt:** Práce se věnuje použití a aplikaci zalévacích hmot pro elektroniku. Zejména vhodných při zalévání snímačů teplot a desek s plošnými spoji. Úvodní část se věnuje základnímu rozdělení zalévacích hmot vodných pro elektroniku a popisuje jejich vlastnosti a parametry. Další kapitola se zabývá popisem a porovnáním konkrétních zalévacích hmot. V závěru je provedeno technické a ekonomické zhodnocení vybraných zalévacích hmot a doporučení pro praxi z hlediska provozních podmínek.

**Klíčová slova:** elektronika, zalévací hmoty, plasty, ochranné vrstvy, výplň, vodivost.

### **Use and application of potting materials for electronics.**

**Summary:** This thesis deals with the use and application of potting materials for electronics. Especially with the ones that are suitable for potting of temperature sensors and printed circuit boards. Introductory part of this thesis is devoted to the basic division of potting materials suitable for electronics and describes its characteristics and parameters. Another chapter deals with description and compares the specific potting materials. In the conclusion part there is performed technical and economic evaluation of selected potting materials and given recommendations for practical use in terms of operating conditions.

**Key words:** electronics, potting material, plastics, protective coating, padding, conductivity.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Cíle práce .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Rozbor vlastností a parametrů zalévacích hmot .....</b>	<b>3</b>
3.1	Plasty – rozdělení, vlastnosti.....	3
3.2	Zalévací hmoty .....	4
3.2.1	Epoxidové pryskyřice.....	5
3.2.2	Polyuretanové pryskyřice.....	6
3.2.3	Silikonové pryskyřice.....	7
3.3	Vlastnosti a parametry zalévacích hmot .....	8
3.3.1	Nasákavost a hygroskopičnost .....	8
3.3.2	Elektrický izolační odpor .....	9
3.3.3	Elektrická vodivost.....	10
3.3.4	Elektrická pevnost.....	11
3.3.5	Relativní permitivita.....	12
3.3.6	Tepelná vodivost .....	13
3.3.7	Měrná tepelná kapacita.....	14
3.3.8	Tepelný součinitel délkové roztažnosti.....	14
3.3.9	Tepelný šok .....	15
3.3.10	Viskozita.....	16
<b>4</b>	<b>Stanovení použitelnosti zalévacích hmot.....</b>	<b>18</b>
4.1	Parametry pro zalévání sestav.....	18
4.2	Zalévací hmoty .....	20
4.2.1	Epoxidová pryskyřice typ MC62-W360 .....	20
4.2.2	Epoxidová pryskyřice typ MC622/W342 .....	21

4.2.3	Epoxidová pryskyřice typ EC570/W363.....	22
4.2.4	Jednosložkový silikonový lak DC 1-2577 .....	23
4.2.5	Silikonový kaučuk typ Sylgard 527 Dow Corning .....	23
4.2.6	Silikonový kaučuk typ Sylgard 170 A& B.....	23
4.2.7	Silikonový kaučuk typ Sylgard Q3-3600 .....	24
4.2.8	Polyuretanová pryskyřice typ PU430-PH30 .....	25
4.2.9	Polyuretanová pryskyřice typ PU515/PH27 .....	26
4.3	Porovnání parametrů zalévacích hmot.....	27
4.3.1	Dynamická viskozita .....	27
4.3.2	Maximální doporučený rozsah teplot.....	28
4.3.3	Absorpce vody (hygroskopičnost) .....	29
4.3.4	Tepelná vodivost .....	30
4.3.5	Součinitel teplotní roztažnosti.....	30
4.3.6	Elektrická pevnost .....	31
4.3.7	Měrný elektrický odpor (rezistivita) .....	32
4.3.8	Dielektrická konstanta (relativní permitivita) .....	33
4.3.9	Mez pevnosti v tahu .....	34
4.3.10	Cena zalévacích hmot.....	35
<b>5</b>	<b>Závěry a doporučení pro praxi .....</b>	<b>36</b>
5.1	Výběr zalévací hmoty pro jednotlivé aplikace.....	36
5.1.1	Snímač teploty.....	36
5.1.2	Datalogger .....	38
5.1.3	DPS s mikroprocesorem.....	39
5.1.4	Speciální konektory.....	41
5.1.5	Sonda čírosti kapalin .....	42
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>Seznam odborné literatury .....</b>	<b>47</b>



# **1 Úvod**

Tato bakalářská práce se zabývá především vhodným výběrem zalévacích hmot pro použití v elektronice a elektrotechnice. Obecně jsou zalévací hmoty hojně používány v mnoha průmyslových odvětvích, např. ve stavebnictví, strojnictví, letectví, potravinářství a především pro aplikace v elektronice a elektrotechnice. Předností zalévacích hmot je dokonalé zalití sestavy při běžných teplotách nebo zhotovení přesných odlitků.

Zalévací hmoty jsou využívány především pro jejich elektroizolační schopnosti, pro jejich teplotně-mechanické vlastnosti, a v případě snímačů teploty i z hlediska jejich tepelné vodivosti, která je důležitá pro přenos tepla.

V závěru této bakalářské práce jsou uvedena konkrétní použití zalévacích hmot, ekonomické zhodnocení a doporučení pro praxi z hlediska provozních podmínek. Podle provozních podmínek a požadovaných parametrů budou vybrány vhodné zalévací hmoty.

## **2 Cíle práce**

Cílem práce je:

- a) Analýza parametrů zalévacích hmot pro aplikace v elektronice.
- b) Rozbor druhů zalévacích hmot vhodných pro zalévání snímačů teploty a desek plošných spojů s ohledem na jejich provozní parametry.
- c) Užití vícevrstvých povlaků v oboru zalévání s ohledem na teplotně-mechanické parametry systému.
- d) Provedení technického a ekonomického zhodnocení vybraných zalévacích hmot.

### **3 Rozbor vlastností a parametrů zalévacích hmot**

Podstatou zalévacích hmot jsou plasty. Pojmem plasty je označována skupina materiálů, které jsou tvořeny syntetickými a přírodními makromolekulárními látkami. Získávají se přeměnou (syntetizací) materiálů z ropy, zemního plynu či z přírodních látek jako je kaučuk nebo bavlna. Plasty obsahují hlavně prvky jako je uhlík - C, vodík - H, kyslík - O, dusík - N, chlor - Cl, síra - S, křemík Si. Vhodným spojením vznikají plasty, tedy makromolekulární látky, které jsou tvořeny alespoň tisíci atomy, někdy dokonce milióny, takové plasty pak mají mnoho různých vlastností a možností použití.[1, 3]

#### **3.1 Plasty – rozdělení, vlastnosti**

Plasty se mohou rozdělovat podle mnoha hledisek. Mezi nejčastější rozdělení patří rozdělení podle původu a výchozích surovin, podle chemické reakce, kterou vznikly a podle chování při zvýšené teplotě: [1, 3]

a) podle výchozích surovin: [3]

- Přírodní látky – přírodní pryskyřice, přírodní kaučuk, škrob, celulóza, albumin.
- Zušlechtěné (modifikované) přírodní látky – estery celulózy, celofán, deriváty přírodního kaučuku, zušlechtěné oleje.
- Syntetické látky – většina současných plastů - polyuretany, epoxidy, silikon, polypropylen, polystyrén, polyakrylát atd..

b) podle chemické reakce, kterou vznikly: [1, 3]

- Polymeráty – polymery vznikající polymerací, na bázi polymeračních produktů např.: polystyren, polyvinylchlorid, polyalkeny, syntetické kaučuky atd..

- Polykondenzáty – polymery vznikající polykondenzací, na bázi kondenzačních produktů např.: polyestery, polyamidy, epoxidové pryskyřice atd..
  - Polyadukty – polymery vznikající polyadicí, na bázi polyadičních produktů např.: polyuretany.
- c) podle chování za zvýšené teploty (patří k nejpoužívanějšímu rozdělení plastů):
- Termoplasty** – plasty teplem tavitelné. Působením zvýšené teploty na hranici teploty tání měknou a ochlazením opět ztuhnou, aniž by se podstatně změnila jejich vlastnosti. Jde o fyzikální proces, který lze opakovat. např.: polyvinylchlorid, polystyren, polyvinylacetát, polyetylen. [1, 3]
- Reaktoplasty** (termosety) – plasty teplem tvrditelné. Zahříváním se chemicky vytvrzují. Jedná se o nevratný proces, dalším zahříváním pryskyřice nelze převést do plastického (tvárného) stavu. Např.: polyuretanové pryskyřice (PUR), epoxidové pryskyřice (EP), fenolová pryskyřice, melamino-formaldehydová pryskyřice, močovinoformaldehydová pryskyřice a ne-nasycené polyesterové pryskyřice. [1, 3]
- Elastomery** – plasty s elastickými vlastnostmi. Jejich elasticita z velké části nezávisí na teplotě. Např.: kaučuky (syntetické a přírodní) - butylkaučuk, polysulfidový kaučuk, polyuretanový kaučuk a silikonový kaučuk. U některých kaučuků jsou elastické vlastnosti dosaženy vulkanizací. [1]

### 3.2 Zalévací hmoty

Základními materiály pro zalévací hmoty používaných v elektronice a elektrotechnice, jsou hlavně epoxidové pryskyřice (EP), polyuretanové pryskyřice (PUR) a silikonové kaučuky (Si). Základní materiál volíme podle požadovaných vlastností pro daný systém. Zalévací hmoty jsou většinou dvousložkové, základní složka (pryskyřice) + tvrdidlo, méně častější jsou jednosložkové, které jsou například ve formě laku ve spreji či pasty v tubě. To v jaké formě zalévací hmotu použijeme záleží na požadovaném způsobu aplikace. [6]

### 3.2.1 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou pro svoje dobré vlastnosti používány v mnoha oborech a odvětvích, jako například v elektronice a elektrotechnice, v chemickém, automobilovém a leteckém průmyslu, ve stavebnictví či strojírenství. [2, 4]

Epoxidové pryskyřice obsahují v molekule více než jednu epoxidovou skupinu, které jsou velmi reaktivní. Reaktivita vede k zesílení makromolekul. Při vysokém stupni zesílení jsou epoxidové pryskyřice tvrdé a nepružné, proto jsou vhodné pro lepení, nátěrové a zalévací hmoty a lamináty. Mají výborné elektrotechnické, mechanické a fyzikální vlastnosti, které jsou uplatněny u zalévacích a licích pryskyřic. Používají se na izolátory pro vysoké napětí, zhášecí komory, průchodky transformátorů a měřičů. Mají velmi dobrou adhezi k jiným materiálům např. ke kovu, sklu, dřevu, pryži a keramice. Vytvrzují se za malých objemových změn. [2, 4]

Klasické epoxidové pryskyřice na bázi dianu, vytvrzené běžnými tvrdidly jsou tuhé, neohebné, někdy až křehké. Po vytvrzení ve spojení s materiálem s jinou objemovou teplotní roztažností mají značná vnitřní pnutí, která často vedou k popraskání výrobků. Projevuje se to hlavně v případě aplikací, které mají relativně velké rozměry odlitku. Tyto nežádoucí vlastnosti je možno odstranit plastifikací epoxidových pryskyřic. [4]

Plastifikací epoxidových pryskyřic lze dosáhnout toho, že vytvrzená pryskyřice bude mít vyšší pružnost, ohebnost, rázovou houževnost, nižší vnitřní pnutí apod. Nelze však připravit materiál, který by konkuroval svou pružností a ohebností polyuretanům nebo silikonům. Kdyby ano, výroba materiálů takových vlastností nebude ekonomicky vhodná. [4]

### 3.2.2 Polyuretanové pryskyřice

Pod pojmem polyuretany rozumíme skupiny polymerů vzniklých reakcí více-funkčních izokyanátů s polyalkoholy. Reakcí izokyanátů s alkoholy vznikají uretany–estery kyseliny karbamové. [2]

Polyuretanové pryskyřice mají celou řadu výhod. Mezi tyto výhody patří:

regulovatelná viskozita, zvětšování objemu, nízká viskozita PUR (umožňuje pronikání směsi i do nejmenších trhlin o rozměrech pod 0,1 mm), plasticita (vytvrzené pryskyřice neztrácejí svou soudržnost), přilnavost, pevnost, dobré elektrické a mechanické vlastnosti. [2]

Určitě největší uplatnění mají polyuretanové pryskyřice ve stavebnictví a elektronice. Pro zapouzdřování elektronických součástek a desek plošných spojů, ve výrobě a servisu elektronických zařízení, utěšňování konektorů a drobných mezer, atd.

U licích pryskyřic je nepřípustná přítomnost stopových množství vody v bezrozpuštědlových kapalných složkách (0,1 % vody v polypové složce uvolňuje takové množství CO<sub>2</sub>, které způsobí napěnění téměř na dvojnásobný objem.) Proto je nezbytně nutné používat látky schopné vázat vodu, které jsou obvyklé i při výrobě polyuretanových nátěrových hmot. [2]

Vhodné jsou orthomravenčan ethylnatý, který reaguje s vodou, nebo zeolity (natriumalumosilikáty), které vážou vodu fyzikálně v krystalové mřížce. [2]

Polyuretanové licí pryskyřice jsou dvousložkové systémy. Izokyanátovou složkou je surový diisokyanatodifenylmethan (pro nízký tlak par přípustný i pro zpracování ve volném prostoru) nebo zkapalněný čistý 4,4'– diisokyanatodifenylmethan. Polypová složka pak určuje, zda je získaný produkt tvrdý, nebo měkký. Pro odstranění vody se přidávají zeolity (zpravidla v 50% suspenzi v ricinovém oleji). Tyto licí směsi lze dobře plnit všemi plnivými. Používají se pro podlahoviny, pro zalévání kabelových koncovek nebo spár ve

stavebnictví, pro povrchy startovacích drah letadel aj. Zajímavé je použití elastomerů licích polyuretanů pro přípravu atletických sportovních drah odolávajících náročným podmínkám. [2]

### 3.2.3 Silikonové pryskyřice

Pod pojmem silikony se zahrnují zpravidla všechny organokřemičité sloučeniny. Největší význam mají polymery, u nichž jsou křemíkové atomy spojeny kyslíkovými atomy a zbylé valence jsou vázány na uhlovodíkové zbytky – tzv. polyorganosoloxany. [2]

Silikonové pryskyřice jsou připravovány na bázi polymethylsiloxanů. Ovšem častěji jsou připravovány na bázi smíšených polyfenylmethylsiloxanů. [2]

Různými kombinacemi výchozích dvoufunkčních a trojfunkčních methyl- a fenylchlorsilanů (50 až 90 %) za nutné přítomnosti organických rozpouštědel se připravuje řada typů s odlišnými vlastnostmi. Zpravidla se dodávají se ve formě 50% až 75% roztoků v xylenu a v jeho směsích s cyklohexanonem nebo butanolem. Dokončení kondenzačních reakcí až do vzniku zesíťovaného makromolekulárního stavu proběhne teprve po odpaření rozpouštědla a po zahřátí na 220 až 240 °C po dobu 1 až 5 hodin. Pro zkrácení poměrně dlouhé doby vypalování jsou přidávány vybrané kovové soli, např. naftenál olovnatý (tento přípravek však zkracuje životnost laků a poněkud snižuje i tepelnou odolnost lakových filmů; uvedené nevýhody se zčásti odstraní použitím směsí kovových solí, např. 1 až 3 % Zn-naftenátu a 0,05 až 1 % Pb-naftenátu; vztaženo na sušinu laku). [2]

Vytvrzené pryskyřice se vyznačují vysokou tepelnou odolností, výbornými elektroinstalačními vlastnostmi (zvláště malou změnou elektrických veličin s teplotou) a dobrou odolností vůči povětrnosti. Silikonové pryskyřice v podobě impregnačních laků nebo skelných laminátů slouží hlavně v elektronice, kde umožňují konstruovat motory pracující za vysokých teplot. I v jiných průmyslových odvětvích nacházejí silikonové pryskyřice svá použití. Hlavně tam, kde jsou žádány nátěry odolávající vysokým teplotám (v takových případech se zpravidla pigmentují hliníkovým

bronzem.) Silikonové lakové filmy vykazují vynikající separační vlastnosti, a používají se proto pro lakování pekařských forem a plechů i forem a nástrojů pro zpracování plastů a kaučuku. Pekařské formy opatřené silikonovým lakem lze použít nejméně 200krát. Náročná je vždy úprava povrchu před lakováním. [2]

Vytvrzené silikonové pryskyřice ve formě lakových filmů i laminátů trvale odolávají teplotám do 180 až 200°C. Tyto vytvrzené silikonové pryskyřice snesou i na kratší dobu teplotu až 300°C. Při vyšších teplotách ovšem dochází k odbourávání organických skupin a ke křehnutí (polyorganosiloxan přechází zvolna na SiO<sub>2</sub>). [2]

Také tepelnou odolnost fenolických, melaminových, epoxidových a alkydových pryskyřic lze zlepšit modifikací vhodnými silikonovými pryskyřicemi s vysokým obsahem fenylskupin, které obsahují ještě reaktivní alkoxylové skupiny. Za tepla dojde k reakci alkoxy skupin silikonového meziproductu a reaktivními skupinami modifikované pryskyřice a produkt získá zvýšenou odolnost proti teplu a povětrnosti. [2]

### **3.3 Vlastnosti a parametry zalévacích hmot**

Zalévací hmoty jsou různých druhů, které mají rozsáhlé možnosti použití a tedy i mnoho vlastností a parametrů, které je třeba znát případně stanovit. Každá konkrétní aplikace vyžaduje přednostně jiné parametry, případně jejich rozdílné hodnoty. Proto jsou následně popsány vlastnosti a možnosti stanovení parametrů zalévacích hmot, které jsou pro zmíněné konkrétní aplikace důležité, případně směrodatné. [6]

#### **3.3.1 Nasákavost a hygroskopičnost**

Nasákavost jinak také absorpce vody. Podstatou stanovení nasákavosti materiálů ve vodě tvoří zjištění přírůstku hmotnosti zkušebního tělesa ponořeného do vody na předepsanou dobu a při předepsané teplotě. Porovnání nasákavosti různých plastů je možné pouze tehdy, jsou-li použity zkušební vzorky stejných rozměrů a nasákavost se stanovuje při shodných podmínkách. Nasákavost se stanovuje jak ve studené vodě (při



23 °C nebo 25 °C), tak i ve vroucí vodě (při 100 °C), ale při kratší expozici než u studené vody, ovšem pouze u materiálů, které se teplotou 100 °C nedeformují ani jinak nenarušují. [3]

Podle americké normy ASTM D570 se absorpce vody stanovuje ve vodě při 23 °C po dobu 24 hod. a ve vodě při 100 °C po dobu 7200 s  $\pm$  240 s. [7]

Hygroskopičnost je schopnost materiálů přijímat vodu ze vzdušné vlhkosti. Je nutno ji znát z hlediska použitelnosti zalévacích hmot ve vlhkých prostředích. Pro představu míry hygroskopičnosti nám dostatečně poslouží hodnoty nasákavosti, případně absorpce vody, protože to jsou obdobné vlastnosti.

Vysoká míra nasákavosti a hygroskopičnosti jsou nežádoucími vlastnostmi. Zvyšujícím obsahem vody v materiálu se zhoršují dielektrické i mechanické vlastnosti. Vlivem nízkých teplot může dojít k vnitřnímu pnutí, tvorbě mikrotrhlin a následně až k deformaci (roztržení) systému. "Vymrzání" je způsobeno anomálií vody, která má největší hustotu při 4°C.

Při aplikaci materiálu v dielektrickém systému je potřeba, aby materiál měl nízkou míru hygroskopičnosti. Tento parametr je důležitý z hlediska elektroizolačních vlastností materiálu. Také při aplikaci zalévacích hmot k zapouzďení snímačů teploty, pro venkovní použití, je důležité, aby materiál absorboval co nejméně vzdušné vlhkosti z důvodu vymrzání.

### **3.3.2 Elektrický izolační odpor**

Celkový elektrický izolační odpor  $R$  ( $\Omega$ ) je poměr stejnoměrného napětí a proudu procházejícím objemem a po povrchu vzorku mezi dvěma elektrodami, které se dotýkají povrchu vzorku. [3]

Vnitřní elektrický odpor  $R_V$  ( $\Omega$ ) je poměr stejnoměrného napětí a ustáleného proudu procházejícího objemem zkušebního vzorku mezi dvěma elektrodami, které se dotýkají povrchu vzorku. [3]

Objemová rezistivita  $\rho_V$  ( $\Omega \cdot m$ ) je poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a proudové hustoty vnitřku zkušební tělesa. [3]

Povrchový elektrický odpor  $R_S$  ( $\Omega$ ) je poměr stejnosměrného napětí a proudu procházejícího po povrchu vzorku mezi dvěma elektrodami. [3]

Povrchová rezistivita  $\rho_S$  ( $\Omega \cdot m$ ) je poměr intenzity elektrického pole a proudové hustoty na povrchu vzorku. [3]

Z hlediska elektroizolačního systému jsou požadovány vysoké hodnoty rezistivity a elektrického odporu.

### 3.3.3 Elektrická vodivost

Pro hodnocení dielektrik z hlediska jejich elektrické vodivosti jsou používány hodnoty měrného elektrického odporu (rezistivita –  $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ )) a měrné elektrické vodivosti (konduktivita –  $\gamma$  ( $S \cdot m^{-1}$ )). Vzájemný vztah obou veličin je následující [5]:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

Číselně je hodnota rezistivity  $\rho$  rovna odporu krychle o hraně 1 m daného materiálu, protéká-li proud mezi dvěma jejími protilehlými stěnami. Pro plochý vzorek při předpokladu homogenního pole vyjádříme měrný elektrický odpor [5]:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h} \quad (2)$$

kde:  $S$  ( $m^2$ ) je plocha elektrod;  
 $h$  (m) je tloušťka vzorku;  
 $R$  ( $\Omega$ ) je velikost izolačního el. odporu

Stanovení rezistivity a konduktivity je popsáno americkou normou ASTM D257 - Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials.

Při aplikaci materiálu v dielektrickém systému je potřeba, aby materiál měl značný měrný elektrický odpor, čím vyšší je hodnota rezistivity tím je materiál vhodnější k aplikaci. Za izolanty jsou považovány materiály, které mají hodnotu rezistivity rovnu nebo vyšší  $\rho > 10^9$  ( $\Omega \cdot \text{mm}$ ).

### 3.3.4 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost, někdy označována jako dielektrická pevnost, je schopnost dielektrického materiálu od sebe elektricky oddělit elektrody s různým elektrickým potenciálem. Tento parametr je nezastupitelný při konstrukci elektrických zařízení. Přesně stanovuje jaké musí být minimální rozměry izolačního materiálu pro danou velikost napětí. V případě, že překročíme velikost elektrického napětí povolenou pro izolační materiál, dochází k nárůstu koncentrace volných nosičů elektrického náboje. Následně roste vodivost materiálu a prudký pokles izolačních schopností. Důsledkem tohoto náhlého procesu dojde k průrazu a dříve izolované místa s různým potenciálem jsou vodivě spojena. Takový jev má k izolačnímu materiálu značné degradační účinky, které jsou v pevných materiálech nevratným dějem a prakticky dochází k jeho znehodnocení jako izolantu. [5]

Elektrická pevnost  $E_p$  ( $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) materiálu se stanoví jako poměr nejmenší hodnoty napětí, při které dochází k průrazu, k tloušťce zkušební vzorku[5]:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (3)$$

Kde:  $U_p$  (kV) je průrazné napětí ;  
 $d$  (mm) je tloušťka izolantu v místě průrazu.

Elektrická pevnost je do značné míry závislá na mnoha faktorech jako je tloušťka, obsah nečistot, vlhkost, struktura a teplota izolantu, závisí také na frekvenci a době působení napětí blízkých průraznému napětí. [5]

Stanovení dielektrické pevnosti je popsáno americkou normou ASTM D149 - Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies.

Při aplikaci materiálu v dielektrickém systému je potřeba, aby materiál měl výbornou dielektrickou pevnost, zvláště při namáhání materiálu napětím o vyšších frekvencích. Tento parametr je důležitý z hlediska izolačních vlastností materiálu.

### 3.3.5 Relativní permitivita

Relativní permitivita (dielektrická konstanta)  $\epsilon_r$  (-) je látková konstanta, která vyjadřuje poměr kapacity kondenzátoru  $C_x$  (F) jehož elektrody jsou v prostoru vyplněném zkoušeným materiálem, ke kapacitě shodně uspořádaných elektrod ve vakuu  $C_0$  (F). K určování kapacity  $C_0$  je možné s dostačující přesností použít místo vakua suchý vzduch, protože relativní permitivita suchého vzduchu je rovna 1,00054. [3]

Stanovení relativní permitivity je popsáno normou ASTM D150-11 Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation.

Relativní permitivita je definována vztahy [3, 5]:

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (4)$$

$$\epsilon_r = 1 + \kappa \quad (5)$$

kde  $\epsilon_r$  (-) je relativní permitivita ;

$C_x$  (F) je kapacita kondenzátoru s dielektrikem ze zkoušeného materiálu;

$C_0$  (F) je kapacita vzduchového (vakuového) kondenzátoru;

$\kappa$  (-) je dielektrická susceptibilita (koeficient polarizace).

Relativní permitivita lze také vyjádřit vztahem [5]:

$$\epsilon_r = \frac{E}{E_0} \quad (6)$$

kde  $E_0$  ( $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ) je intenzita elektrického pole ve vakuu;  
 $E$  ( $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ) je intenzita elektrického pole v dielektriku

Intenzita elektrického pole je dána poměrem napětí na kondenzátoru a vzdálenosti elektrod [5]:

$$E = \frac{U}{d} \quad (7)$$

kde  $U$  (V) je napětí na kondenzátoru;  
 $d$  (m) je vzdálenost mezi elektrodami.

Relativní permitivita je nejdůležitějším parametrem pro určení chování dielektrika ve vnějším elektrickém poli. Určuje zda se dielektrikum polarizuje a vytváří vnitřní elektrické pole. Kapacita dielektrika je přímo závislá na permitivitě. Na povrchu dielektrika, které bylo vystaveno elektrickému poli, je náboj (muže se jednat i o elektrostatický náboj), taková vlastnost je nevhodná pro použití materiálu jako izolantu, náhlím výbojem nashromážděného náboje může dojít k poškození systému. [5]

### 3.3.6 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je schopnost materiálu vést teplo. Vyjadřuje se jako součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), který udává teplo za jednotku času procházející plochou  $1\text{ m}^2$  rovinné stěny z dané látky o tloušťce  $1\text{ m}$  při teplotním rozdílu plochy stěny  $1\text{ K}$ . [3]

Stanovení součinitele tepelné vodivosti je popsáno normou ASTM C518-10 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus.

Při aplikaci zalévacích hmot k zapouzdření snímačů teploty je důležité, aby materiál byl tepelně vodivý. Některé zalévací hmoty mohou být nejen elektrickými ale i tepelnými izolanty, takový snímač teploty by byl prakticky nepoužitelný. Případně při zalití DPS s polovodičovými součástkami, které mají tepelné ztráty. Pokud umožníme

dostatečný odvod tepla ze systému (např. na chladič) může prodloužit životnost a zvýšit výkon polovodivých součástek.

### 3.3.7 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita  $c$  ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) udává množství tepla, které musíme dodat do tělesa o hmotnosti 1 kg, aby se jeho teplota zvýšila o 1 K. Vztah pro výpočet měrné tepelné kapacity[3]:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (8)$$

kde  $Q$  (J) je přivedené (odvedené) množství tepla;  
 $m$  (kg) je hmotnost materiálu;  
 $\Delta T$  (K) je rozdíl počáteční a koncové teploty ( $t_2 - t_1$ ).

Při určování měrné tepelné kapacity u plastů, které obsahují určitý obsah vlhkosti, je nutné vzorky před zkouškou nejdříve vysušit. [3]

### 3.3.8 Teplotní součinitel délkové roztažnosti

Drtivá většina látek se při zvýšení teploty roztahuje. Tato vlastnost se vyjadřuje teplotním součinitelem délkové roztažnosti  $\alpha$  ( $\text{K}^{-1}$ ) nebo ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), udává poměrnou změnu délky materiálu při změně teploty o 1 K.

Délková roztažnost je definována vztahem [8]:

$$l_2 = l_1(1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (9)$$

kde  $l_1$  (m) je délka tělesa při teplotě  $t_1$   
 $l_2$  (m) je délka tělesa při teplotě  $t_2$   
 $\Delta t = (t_2 - t_1)$  (K) je rozdíl teplot

Objemové roztažnost je délkové roztažnost ve třech směrech je definována vztahem [8]:

$$V_2 = l_2^3 = [l_1(1 + \alpha \cdot \Delta t)]^3 = V_1(1 + 3 \cdot \alpha \cdot \Delta t) \quad (10)$$

kde  $V_1$  (m<sup>3</sup>) je objem tělesa při teplotě  $t_1$

$V_2$  (m<sup>3</sup>) je objem tělesa při teplotě  $t_2$

$\Delta t = (t_2 - t_1)$  (K) je rozdíl teplot

*„Součinitel  $\alpha$  je závislý na teplotě, a proto se určuje jeho střední hodnota. Interval teplot a teplotní hranice, při kterých se bude stanovovat střední teplotní součinitel délkové roztažnosti, se určují podle materiálových norem. Minimální hodnota intervalu je 10 K nebo násobek 10 K. délka zkušebního tělesa se měří v prostředí při teplotě  $23 \pm 2$  °C a relativní vlhkosti vzduchu  $50 \pm 5$  %.“ [3]*

Pro zapouzdření snímačů teploty je vhodnější použít zalévací hmotu, která má menší hodnotu teplotního součinitele délkové (objemové) roztažnosti. V ideálním případě je nejvhodnější pro zalévání systému použít takových materiálů, které mají shodnou velikost teplotního součinitele délkové (objemové) roztažnosti. V takovém případě, pak při rovnoměrném zahřívání systému nedochází k pnutí, mezi pouzdrem a výplní (zalévací hmotou), následkem teplotní roztažnosti.

### 3.3.9 Tepelný šok

Tepelný šok nastává při nerovnoměrném zahřívání materiálu, pak nastane značný rozdíl teplot mezi různými místy jednoho celku. Takový materiál je namáhán na pevnost v tahu, při překročení meze pevnosti dochází v materiálu ke tvorbě trhlin. Selháním systému důsledkem tepelného šoku může být zabráněno použitím materiálu, který má menší teplotní součinitel délkové roztažnosti, menší hodnotu Youngova modulu nebo větší tepelnou vodivost.

Odolnost materiálu k tepelným rázům nebo tepelnému šoku je charakterizována parametrem tepelného šoku [9]:

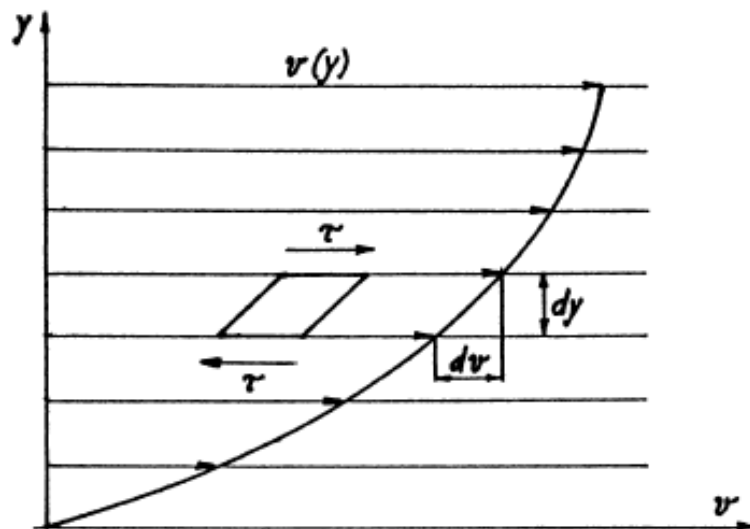
$$R_T = \frac{\lambda \cdot \sigma_t (1 - \mu)}{\alpha \cdot E} \quad (11)$$

Kde  $R_T$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ) je parametrem tepelného šoku;  
 $\lambda$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) je součinitel tepelné vodivosti;  
 $\sigma_t$  (MPa) je mez pevnosti v tahu;  
 $\mu$  (-) je poissonův poměr  
 $\alpha$  ( $\text{K}^{-1}$ ) je tepelná vodivost;  
 $E$  (MPa) je Youngův modul (Modul pružnosti v tahu).

### 3.3.10 Viskozita

Viskozita je schopnost látky (kapaliny) přenášet smykové napětí. Při proudění viskózních kapalin dochází ke smykovému napětí  $\tau$  ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ) vyvolané vnitřním třením. Konstantu úměrnosti mezi rychlostním gradientem  $\frac{dv}{dy}$  (s) a tečným napětím nazýváme dynamická viskozita  $\eta$  (Pa.s), která je dána vztahem [10]:

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \quad (12)$$

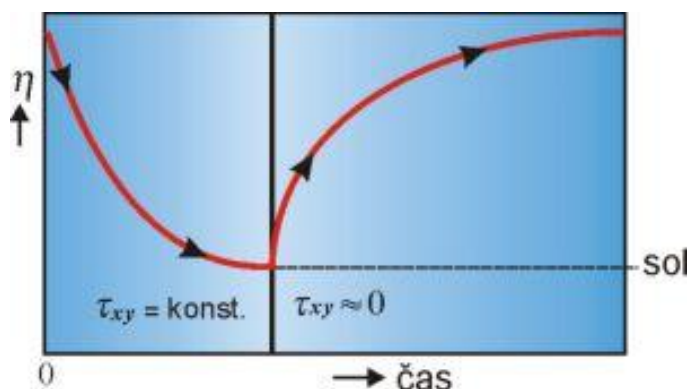


obr. 1 - Proudění kapaliny přímým korytem [10]



Ideální kapalina, v níž nedochází ke vnitřnímu tření, má viskozitu rovnu nule. V reálných kapalinách dochází ke vnitřnímu tření, tedy hodnota viskozity je větší než nula. Viskozita všech kapalin závisí na teplotě, při zvýšení teploty viskozita klesá. [10]

**Tixotropie** je vlastnost některých zalévacích hmot, které mají vysokou viskozitu, která se při míchání nebo protřepání snižuje, pokud hmota následně bude v klidu, viskozita se opět vrátí na původní hodnotu (viz. obr.2) [11]



obr. 2 - Časová závislost zdánlivé viskozity tixotropního systému [11]

Viskozita je důležitá zejména při aplikaci zalévacích hmot, při odlévání. Pokud má hmota nízkou viskozitu lépe se dostane do štěrbin. Viskozitu je možné (případně žádoucí) značně snížit, pokud se zalévací hmota při aplikaci zahřeje na 40-60°C (záleží na druhu zalévací hmoty). Pro zalévání například konektorů je vhodné aby byla viskozita vyšší, při nízké viskozitě může dojít k protečení zalévací hmoty až na piny konektoru.

## 4 Stanovení použitelnosti zalévacích hmot

Výběr zalévacích hmot závisí na podmínkách, při kterých má daný systém pracovat. Pokud jsou pracovní podmínky pro danou aplikaci pečlivě stanoveny, vybere se několik zalévacích hmot, které se následně mezi sebou porovnají, vybere se taková zalévací hmota, která splňuje dané parametry a je ekonomicky výhodná. V některých případech je složité jednoznačně určit vhodnou zalévací hmotu, protože nesplňují přesně požadované vlastnosti. Potom je vhodné použít tzv. vyřazovací metodu. Případně při výběru zalévacích hmot spolupracovat přímo s výrobcem nebo dodavatelem.

### 4.1 Parametry pro zalévání sestav

a) **snímač teploty** - snímač bude sloužit pro měření venkovních teplot. Důležitými parametry pro zapouzdření snímače jsou:

- vysoká tepelná vodivost
- součinitel teplotní délkové roztažnosti (přibližné hodnoty jako má pouzdro snímače - hliník)
- odolnost proti vlhkosti (nízká hygroskopičnost)
- použitelnost v teplotním rozsahu  $-40\text{ °C}$  až  $100\text{ °C}$
- dobrá adheze k použitému materiálu pouzdra (adheze k hliníku)

b) **datalogger** - zapouzdření desky plošných spojů pro sběr dat ze snímače teploty. Důležitými parametry pro zalití dataloggeru jsou:

- elektroizolační odpor
- nízká viskozita

- použitelnost v teplotním rozsahu -40 °C až 100 °C
- odolnost proti vlhkosti a vodě (zamezení styku vody s elektronickým zařízením)
- elektrická pevnost
- nízká permitivita (ochrana před elektrostatickým nábojem)

c) **DPS s mikroprocesorem** - ochranný povlak pro desku plošných spojů s mikroprocesorem pro laboratorní aplikace. Důležité parametry pro zalití mikroprocesoru jsou:

- odolnost proti mechanickému namáhání (pružnost)
- elektroizolační odpor
- nízká viskozita (zatečení zalévací hmoty pod jednotlivé součástky)
- nízká permitivita (ochrana před elektrostatickým nábojem)

d) **speciální konektory** - výroba speciálních konektorů. Důležité parametry pro odlévání konektorů jsou:

- mechanická odolnost (pevnost)
- elektroizolační odpor
- nízká permitivita (ochrana před elektrostatickým nábojem)
- odolnost proti vlhkosti (nízká hygroskopičnost)

e) **sonda čirosti kapalin** - sonda na měření čirosti kapalin, hlavně vody, pomocí foto-rezistoru a LED diody. Dále tato sonda měří teplotu vody pomocí odporového teplotního čidla. Důležitými parametry pro výrobu sondy jsou:

- odolnost proti vlhkosti a vodě (zamezení styku vody s vodiči)
- elektroizolační odpor
- mechanická odolnost (pevnost)
- odolnost vůči slané vodě

## **4.2 Zalévací hmoty**

Vzhledem k požadovaným aplikacím je vybráno několik zalévacích hmot, které mezi sebou porovnáme a vybereme nejvhodnější z nich. Zalévací hmoty jsou vybrány ze sortimentu firmy ELCHEMCo, která vyrábí zalévací hmoty pro elektroniku a elektrotechniku a také distribuuje výrobky zahraničních firem Dow Corning a Elantas.

Popis všech níže uvedených zalévacích hmot je převzatý z datalistu firmy ELCHEMCo. [6]

### **4.2.1 Epoxidová pryskyřice typ MC62-W360**

Popis: Dvousložková plněná epoxidová pryskyřice. Pryskyřice MC62 a tvrdidlo W360. Systém neobsahuje halogeny a rozpouštědla, je samozhášivý UL94V0. Maximální doporučená pracovní teplota 155°C. Nízká viskozita. Malé smrštění. Dobré elektrické a mechanické vlastnosti. Dobrá tepelná vodivost.

Použití: Systém vhodný pro zalévání transformátorů, elektronických zapalovačů, ponorných pump a odrušovacích filtrů.

**Aplikace:** Ruční zalévání nebo zalévání ve vakuu. Vytvrzuje se při normální teplotě. Pro získání nejlepších elektrických, mechanických a chemických vlastností je doporučeno dotvrzení při teplotě 40 až 50 °C.

Tvrdilo je velmi citlivé na vlhkost, proto se musí po aplikaci neprodleně uzavřít.

**Instrukce pro aplikaci:** Obě složky je možno před smísením předeheat. Nejprve se pryskyřice důkladně promíchají, poté se smísí s tvrdidlem v daném poměru. Před samotným odléváním je vhodné odvzdušnit směs od vzduchu, který se dostal do směsi mícháním.

**UL 94 V-0:** UL 94 je norma stanovující schopnost materiálu (plastu) buďto uhasit nebo šířit plameny po zapálení.

V-0 je klasifikace - hoření se zastaví do 10 s na svislém vzorku (materiál může odkapávat, pokud kapky nehoří). [12]

#### **4.2.2 Epoxidová pryskyřice typ MC622/W342**

**Popis:** Dvousložková plněná epoxidová pryskyřice. Pryskyřice MC622 a tvrdidlo W342. Systém neobsahuje halogeny a rozpouštědla, je samozhášivý UL94V0. Maximální doporučená pracovní teplota 180°C. Má dobré elektrické a mechanické vlastnosti. Dotvrzením při teplotě 80 až 90°C, systém dosahuje vysoké tepelné odolnosti.

**Použití:** Systém vhodný pro zalévání transformátorů, elektronických zapalovačů, ponorných pump a odrušovacích filtrů.

**Aplikace:** Ruční zalévání nebo zalévání ve vakuu. Vytvrzuje se při normální teplotě případně kombinované dotvrzení. Pro zvýšení impregnačních schopností pryskyřice je vhodné díly k zalití předeheat na teplotu 35 až 40 °C.

Instrukce pro aplikaci: Obě složky je možno před smísením předeřhřát. Nejprve se pryskyřice důkladně promíchají, poté se smísí s tvrdidlem v daném poměru. Před samotným odléváním je vhodné odvzdušnit směs od vzduchu, který se dostal do směsi mícháním.

#### 4.2.3 Epoxidová pryskyřice typ EC570/W363

Popis: Dvousložková čirá epoxidová pryskyřice. Pryskyřice EC570 a tvrdidlo W363. Systém neobsahuje rozpouštědla., plastifikátory. Systém je vysoce reaktivní, má nízkou viskozitu a dobrou elektrickou charakteristiku. Maximální doporučená pracovní teplota 155°C.

Použití: Pro průhledné zapouzdření malých dílů - zapalovače, transformátory, cívky nebo modely.



obr.3 - příklad použití EC570/W363 [6]

Aplikace: Ruční nebo automatické lití nebo vakuové lití s pomocí míchacích zařízení. Vytvrzování při pokojové teplotě. Barva vytvrzeného epoxidu závisí na barvě tužidla - modrá nebo neutrální.

#### **4.2.4 Jednosložkový silikonový lak DC 1-2577**

**Popis:** Dow Corning 1-2577 Conformal Coating je jednosložkový silikonový lak. Vhodný pro impregnaci porézních materiálů, například keramiku, ke zvýšení odolnosti proti vlhkosti - dobrá odolnost proti vlhkosti. Obsahuje barvu, která fluoreskuje působením UV záření.

**Použití:** Vhodný jako ochrana desek plošných spojů, flexibilních plošných spojů nebo speciální elektroniky.

**Aplikace:** Snadné nanášení stříkáním, máčením, natíráním nebo poléváním. Lak se vytvrzuje při pokojové teplotě. Použití katalyzátoru dovoluje urychlené vytvrzování za tepla.

#### **4.2.5 Silikonový kaučuk typ Sylgard 527 Dow Corning**

**Popis:** Dvousložkový silikonový dielektrický gel s nízkou viskozitou. Systém navržený pro zachování elektrických vlastností elektronických obvodů. Vhodný pro aplikace, kde se vyžaduje dlouhotrvající odolnost proti vlhkosti. Odolný vůči náhlým změnám teploty a mechanickým rázům a vibracím. Vytvrzený materiál má výbornou adhezi na většinu materiálů používaných v elektronice, gel vzhledem připomíná želé.

**Použití:** Používaný na desky plošných spojů se součástkami SMT. Systém je vhodný při těsnění proti vodě a ochraně citlivých elektronických obvodů

#### **4.2.6 Silikonový kaučuk typ Sylgard 170 A& B**

**Popis:** Dvousložkový nízko viskózní kapalný silikonový kaučuk, který byl vyvinut pro všeobecné zalévání a pro zapouzdřování elektrických a elektronických

přístrojů. Rychlé vytvrzení při pokojové teplotě. Výborná spolehlivost a odolnost. Použitelný v rozsahu teplot -60 C až +200 C.

Použití: Systém je vhodný k zapouzdření modulů, relé, elektrických zdrojů, zesilovačů, transformátorů, feritových jader a konektorů, také se používá pro zalévání a zapouzdřování automobilových elektronických jednotek nebo TV transformátorů.

Aplikace: Části A a B jsou smíchány ve shodném poměru (1:1).



*obr.4 - Silikonový kaučuk typ Sylgard 170 A&B [6]*

#### **4.2.7 Silikonový kaučuk typ Sylgard Q3-3600**

Popis: Sylgard Q3-3600 Thermally Conductive Encapsulant je nízko viskózní teplotně vodivý silikonový elastomer. Systém má k většině povrchů dobré adhezivní vlastnosti, včetně keramiky a kovů jako je hliník, měď, nikl a nerez ocel. Je pružný, přizpůsobuje se velkým změnám teploty bez zatěžování citlivých součástek vysokým mechanickým napětím.



Použití: Vhodný pro aplikace v elektronice a ve strojírenství, kde je zvláště důležitý přenos tepla. Mezi typické aplikace patří zalévání senzorů, vysokonapěťových transformátorů nebo chladičů. Použitelný v rozsahu teplot -40 C až 200 C.

Aplikace: Systém lze aplikovat bez použití základního nátěru (primeru).



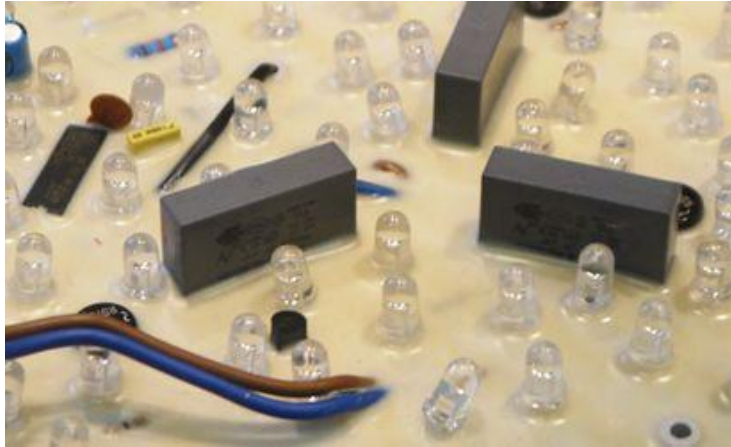
*obr. 5 - příklad použití Sylgard Q3-3600 [6]*

#### **4.2.8 Polyuretanová pryskyřice typ PU430-PH30**

Popis: Dvousložková plněná elastomerická polyuretanová pryskyřice. Systém má velmi dobré elektrické vlastnosti. Neobsahuje rozpouštědla a má dobrou adhezi ke sklu, keramice, plastům a kovům.

Použití: Vhodný pro zapouzdřování elektrických a elektronických komponent, desek plošných spojů, snímačů a senzorů komponent citlivých na termo-mechanické namáhání.

Aplikace: Vytvrzování při pokojové teplotě. Je doporučeno před zaléváním vysušit či předehřát příslušnou sestavu. Úplná stabilizace vlastností vytvrzeného materiálu je dosažena až po několika dnech, pokud je vytvrzení prováděno při pokojové teplotě (4 až 5 dní).



*obr.6 - příklad použití PU430/PH30*

#### **4.2.9 Polyuretanová pryskyřice typ PU515/PH27**

**Popis:** Dvousložkový polyuretanový systém pryskyřice PU515 a tvrdidlo PH27. Neobsahující abrazivní plniva, samozhášivý UL-94 V0. Vytvrzený materiál je pružný a má dobré elektrické a mechanické vlastnosti. Vysoká rozměrová stabilita po tepelném stárnutí při vysokých teplotách. Maximální doporučená pracovní teplota je 130°C.

**Použití:** Zalévání a zapouzdřování transformátorů, kondenzátorů a ponorných pump. Utěšňování elektrických a elektronických komponent.

**Aplikace:** Vhodná pro ruční zalévání nebo zalévání ve vakuu. Vytvrzování při pokojové teplotě.



*obr.7 - příklad použití PU515/PH27*

### **4.3 Porovnání parametrů zalévacích hmot**

#### **4.3.1 Dynamická viskozita**

Tabulka (tab.1.) porovnává hodnotu dynamické viskozity systému před zaléváním sestavy. Je důležitý parametr z hlediska aplikace zalévacích hmot. Tento parametr pro většinu aplikací není až tak důležitý při výběru zalévací hmoty, jako spíše je podstatný k určení správného postupu při zapouzdřování sestavy. Parametr je důležitý při výběru zalévací hmoty pro zalévání desek plošných spojů (DPS), kde je vyžadováno, aby zalévací hmota vyplnila mezeru mezi deskou a součástí. (Např.: dynamická viskozita  $\eta$  vody při 20 °C je 1,02 mPa.s a glycerínu při 20 °C je 1480 mPa.s).

Tab.1. Porovnání viskozity zalévacích hmot [6]

typ	název	norma	Viskozita $\eta$ (mPa.s)		
			při 25°C	při 40°C	při 60°C
EP	MC62/W360	IO-10-50	1500 - 2500	500 - 1000	
EP	MC 622/W342	IO-10-50	-	1200 - 1800	
EP	EC570/W363	IO-10-50	<b>300 – 400</b>	<b>100 - 200</b>	
Si	DC 1-2577	CTM 0050	1000		
Si	Sylgard 527 DC	CTM 0050	330		
Si	Sylgard 170 A&B	ASTM D 455	4000/1500*		
Si	Sylgard Q3-3600	ASTM D 455	<b>6000</b>		
PUR	PU430/PH30	IO-10-50	2500 - 4000		
PUR	PU515/PH27	IO-10-50	1000 - 1400	800 - 1000	250 - 350

\* část A / část B

V tabulce Tab.1. jsou, pro přehlednost, zvýrazněny tučným písmem extrémní hodnoty. Pro zalévání dataloggeru a DPS je důležité, aby viskozita byla co nejmenší. Proto pro tyto dvě aplikace jsou vhodné zalévací hmoty, které mají (dle mého názoru) viskozitu menší než 1000 mPa.s, jsou to tyto zalévací hmoty: EC570/W363, MC62/W360 (předehřátá na 40 °C), Sylgard 527 DC, DC 1-2577 a PU515/PH27 (předehřátá minimálně na 40 °C).

#### 4.3.2 Maximální doporučený rozsah teplot

Tabulka (tab.2.) porovnává zalévací hmoty s ohledem na zachování jejich vlastností při daném teplotním rozsahu, případně maximální přípustné teploty.

Tab.2. Porovnání povolených doporučených teplot zalévacích hmot [6]

typ	název	norma	Teplota (°C)		
			od	do	max
EP	MC62/W360	IEC 85			155
EP	MC 622/W342	IEC 85			180
EP	EC570/W363	IEC 85			155
Si	Dow Corning DC 1-2577		-65	200	
Si	Sylgard 527 Dow Corning		-50	200	
Si	Sylgard 170 A&B		-60	200	
Si	Sylgard Q3-3600		<b>-40</b>	200	
PUR	PU430/PH30	IEC 85			130
PUR	PU515/PH27	IEC 85			130

Vzhledem k tomu jaké mají tyto zalévací hmoty povolené provozní teploty a naším požadavkem jsou teploty od -40 °C do 100 °C, jsou všechny zalévací hmoty vyhovující. Pouze silikonová zalévací hmota Sylgard Q3-3600 má spodní hranici provozní teploty shodnou s naším požadavkem, což tuto zalévací hmotu nevylučuje.

### 4.3.3 Absorpce vody (hygroskopičnost)

Tabulka (tab.3.) porovnává hodnoty absorpce vody za daných podmínek. Tento parametr je pro naše aplikace důležitým z několika důvodů (vymrzání, degradace elektroizolačních a mechanických vlastností).

Tab.3. Porovnání hodnot absorpce vody zalévacích hmot [6]

typ	název	norma	Absorpce vody (%)	
			24 hod. při 23 ± 2 °C	2 hod. při 100 °C
EP	MC62/W360	ASTM D570	0,1 - 0,15	0,65 - 0,75
EP	MC 622/W342	ASTM D570	0,1 - 0,15	0,9 - 1,0
EP	EC570/W363	ASTM D570	0,15 - 0,30	1,70 - 2,0
Si	DC 1-2577	CTM 0248/76 *	0,1	0,3
Si	Sylgard 527	-	hydrofóbní	
Si	Sylgard 170 A&B	ponoření 7 dní při 25 °C	0,1	
Si	Sylgard Q3-3600	-	-	-
PUR	PU430/PH30	ASTM D570	0,15 - 0,35	0,55 - 0,75
PUR	PU515/PH27	ASTM D570	0,15 - 0,25	0,7 - 0,9

\* CTM 0248 100 hodin při 25 °C

\* CTM 0276 100 hodin při 105° C a 98% RH

Silikonové pryskyřice lze obecně považovat za hydrofobní (používají se např. pro výrobu hydrofobizačních nátěrů ve stavebnictví). Vzhledem k hodnotám nasákavosti, které tyto zalévací hmoty mají, bych vyřadil pouze jednu epoxidovou pryskyřici EC570/W363 a obě polyuretanová pryskyřice. Ostatní zalévací hmoty jsou přibližně na stejné úrovni, ovšem nejlepší hodnoty mají zalévací hmoty na bázi silikonu.

#### 4.3.4 Tepelná vodivost

Tabulka (tab.4.) porovnává hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Toto porovnání je důležité pro správný výběr zalévací hmoty, která bude použita pro snímač teploty. (Např.: tepelná vodivost  $\lambda$  mědi je  $386 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , skla je  $1,35 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  a dřeva je  $0,18 - 0,49 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).

Tab.4. Porovnání součinitele tepelné vodivosti zalévacích hmot [6]

typ	název	norma	$\lambda \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$
EP	MC62/W360	ASTM C518	0,85-0,95
EP	MC 622/W342	ASTM C518	<b>1,2 – 1,3</b>
Si	Dow Corning DC 1-2577	CTM 0224	0.12
Si	Sylgard Q3-3600		<b>1.4</b>
PUR	PU430/PH30	ASTM C518	0,30 – 0,35
PUR	PU515/PH27	IO-10-87	0,55 – 0,65

V tabulce (Tab.4.) jsou pouze zalévací hmoty u kterých výrobce uvádí tepelnou vodivost. (U ostatních zalévacích hmot se mi je nepodařilo dohledat). Tudíž pro aplikaci zapouzdření snímače budeme vybírat pouze z těchto 6 zalévacích hmot. Bohužel zalévací hmoty, jakožto plasty jsou izolanty, můžeme tedy vybrat jen ty s nejvyšší hodnotou tepelné vodivosti. Ty mají epoxidová pryskyřice MC 622/W342 a silikonový kaučuk Sylgard Q3-3600. Sylgard Q3-3600 je výrobcem přímo vyvinutý pro aplikace zalévání snímačů teploty.

#### 4.3.5 Součinitel teplotní roztažnosti

Tabulka (tab.5.) porovnává závislost (objemové nebo délkové) roztažnosti zalévací hmoty na teplotě. Např.: součinitel teplotní délkové roztažnosti některých prvků - hliník  $\alpha = 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , železo  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , měď  $\alpha = 17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Tab.5. Porovnání součinitele teplotní roztažnosti zalévacích hmot [6]

typ	název	norma	Tg -10 K	Tg +10 K	$\beta$	Tg	aprox. $\alpha$
			[ $10^{-6} \cdot K^{-1}$ ]	[ $10^{-6} \cdot K^{-1}$ ]	[ $10^{-4} \cdot K^{-1}$ ]	[°C]	[ $10^{-6}/K$ ]
EP	MC62/W360	ASTM E831	30 - 40	120 - 130		60	35
EP	MC 622/W342	ASTM E831	38 - 46	105 - 112		97	<b>42</b>
EP	EC570/W363	-	-	-	-	-	-
Si	DC 1-2577	CTM 0420			6,6		220
Si	Sylgard 527 DC	CTM 0432			9,9		330
Si	Sylgard 170 A&B				8,0		267
Si	Sylgard Q3-3600				6,0		200
PUR	PU430/PH30	ASTM E831	-	195 - 210		-40	200
PUR	PU515/PH27	ASTM E831	44 - 52	133 - 153		10	143

Tg - teplota skelného přechodu

$3\alpha \approx \beta$

V tabulce jsou hodnoty pro epoxidové a polyuretanové pryskyřice uváděny jako koeficient délkové roztažnosti  $\alpha$  a pro silikony jako koeficient objemové roztažnosti  $\beta$ . Hodnoty objemové roztažnosti jsem přepočítal (podle triviálního vzorce  $3\alpha \approx \beta$ ) na délkovou roztažnost. Hodnoty délkové roztažnosti jsem aproximoval v závislosti na teplotě skelného přechodu.

Hliníkové pouzdro, ze kterého bude snímač teploty, má mnohem menší délkovou teplotní roztažnost, než vybrané zalévací hmoty, proto vybereme zalévací hmotu s nejmenší hodnotou. Nejmenší délkovou teplotní roztažnost, vzhledem teplotě skelného přechodu, má epoxidová pryskyřice MC622/W342, ale pokud by byla provozní teplota do 60 °C, pak je možné použít epoxidovou pryskyřici MC62/W360.

#### 4.3.6 Elektrická pevnost

Tabulka (tab.6.) porovnává hodnoty elektrické pevnosti. Určuje jak velkým napětím se mohou zatížit zalévací hmoty mezi dvěma místy (elektrodami) s různým elektrickým potenciálem v dané vzdálenosti. Např.: elektrická pevnost  $E_p$  vzduchu je 3 kV/mm, křemene je 8 kV/mm, papíru je 16 kV/mm a teflonu je 60 kV/mm.

Tab.6. Porovnání hodnot elektrické pevnosti zalévacích hmot [6]

typ	název	norma	$E_p$ (kV.mm <sup>-1</sup> )
EP	MC62/W360	ASTM D149	20 - 22
EP	MC 622/W342	ASTM D149	21 - 23
EP	EC570/W363	ASTM D149	26 - 28
Si	Dow Corning DC 1-2577	CTM 0114	43
Si	Sylgard 527 Dow Corning	CTM 0114	15 - 20
Si	Sylgard 170 A&B	ASTM D 149	18
Si	Sylgard Q3-3600	ASTM D 149	27
PUR	PU430/PH30	ASTM D 149	16 - 18
PUR	PU515/PH27	ASTM D 149	19 - 22

Vzhledem k hodnotám elektrické pevnosti, jaké mají tyto zalévací hmoty, není pro naše aplikace toto až tak směrodatný parametr. Naše aplikace budou provozovány při nízkém napětí (do 1000 V), případně při malém bezpečném napětí.

Hodnoty elektrické pevnosti jsou relativně stejné a dostačující, s jedinou odchylkou a to u silikonové pryskyřice DC 1-2577, která má dvojnásobnou hodnotu elektrické pevnosti než ostatní zalévací hmoty.

#### 4.3.7 Měrný elektrický odpor (rezistivita)

Tabulka (Tab.7.) porovnává hodnoty rezistivity. Tento parametr určuje jakou má zalévací hmota hodnotu měrného el. odpor mezi dvěma elektrodami s různým potenciálem napětí. Např. hodnoty rezistivity pro některé materiály (prvky) jsou: měď 16,9  $\mu\Omega$ .mm, křemík 2,3  $\Omega$ .mm a polypropylen 10 P $\Omega$ .mm ( $10^{16}$   $\Omega$ .mm).



Tab.7. Porovnání hodnot rezistivity zalévacích hmot [6]

typ	název	norma	$\rho$ ( $\Omega$ .mm)
EP	MC62/W360	ASTM D257	$0,4 - 0,7 \cdot 10^{14}$
EP	MC 622/W342	ASTM D257	$0,3 - 0,5 \cdot 10^{14}$
EP	EC570/W363	ASTM D257	$40 \cdot 10^{14}$
Si	Dow Corning DC 1-2577	CTM 0249	$0,1 \cdot 10^{14}$
Si	Sylgard 527 Dow Corning	CTM 0272	$2,33 \cdot 10^{14}$
Si	Sylgard 170 A&B	ASTL D 150	$0,023 \cdot 10^{14}$
Si	Sylgard Q3-3600	ASTM D257	$1,0 \cdot 10^{14}$
PUR	PU430/PH30	ASTM D257	$1-5 \cdot 10^{14}$
PUR	PU515/PH27	ASTM D257	$4,5-7 \cdot 10^{14}$

Obecně se materiály s hodnotou rezistivity rovnou nebo vyšší  $10^9 \Omega$ .mm (1 G $\Omega$ .mm) považují za izolanty. Vzhledem k tomu, jaké mají tyto zalévací hmoty hodnoty rezistivity, je lze bezpečně považovat za izolanty. Nejnižší hodnotu rezistivity má silikonová pryskyřice Sylgard 170 A&B, která je  $\rho = 2,3 \cdot 10^{12} \Omega$ .mm (2,3 T $\Omega$ .mm), i tato nejnižší hodnota je 2300krát větší než požadované minimum pro izolant. Přesto, že tento parametr nevylučuje žádnou zalévací hmotu z výběru, je vhodné pro aplikace, kde je požadována značná rezistivita, vybrat zalévací hmotu s vyšší hodnotou rezistivity.

#### 4.3.8 Dielektrická konstanta (relativní permitivita)

Tabulka (tab.8.) porovnává hodnotu relativní permitivity. Relativní permitivita  $\epsilon_r$  (-) je látková konstanta a bezrozměrná veličina. Čím větší má hodnotu, tím větší je kapacita materiálu, jakožto kondenzátoru (udrží větší elektrický náboj). Tento parametr je pro nás důležitý z důvodu ochrany systému před elektrostatickým nábojem. Např. hodnoty relativní permitivity některých materiálů jsou:  $\epsilon_r$  vzduchu je 1,00054,  $\epsilon_r$  polystyrenu je 2,6,  $\epsilon_{rSi}$  křemíku je 12 a  $\epsilon_r$  keramického dielektrika je  $2,4 \cdot 10^3$ .

Tab.8. Porovnání relativní permitivity zalévacích hmot [6]

typ	název	norma	$\epsilon_r (-)$		
			n.a.	při 100 Hz	při 100 kHz
EP	MC62/W360	ASTM D150	4,5 – 5,0		
EP	MC 622/W342	ASTM D150	4,3 – 4,8		
EP	EC570/W363	ASTM D150	3,5 - 4,0		
Si	DC 1-2577	CTM 0112		2,68	2,71
Si	Sylgard 527 DC	CTM 0112		2,95	2,95
Si	Sylgard 170 A&B	CTM 0112		3,15	3,10
Si	Sylgard Q3-3600	ASTM D150	4,4 (při 1 Mhz)		
PUR	PU430/PH30	ASTM D150	3,40		
PUR	PU515/PH27	ASTM D150	4,5 – 4,9		

Vzhledem k hodnotám relativní permitivity, jaké mají tyto zalévací hmoty, není pro naše aplikace toto až tak směrodatný parametr. Hodnoty relativní permitivity jsou přibližně shodné a dostačující, s jedinou odchylkou a to u silikonových pryskyřic, které mají menší hodnoty relativní permitivity než ostatní zalévací hmoty, jsou tedy vhodnější pro naše aplikace.

#### 4.3.9 Mez pevnosti v tahu

Tabulka (tab.9.) porovnává hodnoty meze pevnosti v tahu  $\sigma_{Pt}$  (MPa) nebo (N/mm<sup>2</sup>). Toto porovnání je důležité pro správný výběr zalévacích hmot, které jsou odolnější vůči mechanickému (teplotně-mechanickému) namáhání.

Tab.9. Porovnání hodnot meze pevnosti v tahu zalévacích hmot [6]

typ	název	norma	Mez pevnosti v tahu
			$\sigma_{Pt}$ (MPa) (N/mm <sup>2</sup> )
EP	MC62/W360	ASTM D 638	<b>35,00</b>
EP	MC 622/W342	ASTM D 638	<b>25 - 35</b>
EP	EC570/W363	ASTM D 638	<b>45 - 55</b>
Si	Dow Corning DC 1-2577	CTM 0137A	3,50
Si	Sylgard 527 Dow Corning	-	-
Si	Sylgard 170 A&B	ASTM D 412	3,50
Si	Sylgard Q3-3600	ASTM D 412	6,50
PUR	PU430/PH30	ASTM D 638	0,8 - 1,5
PUR	PU515/PH27	ASTM D 638	<b>19 - 23</b>

Např. meze pevnosti v tahu některých materiálů jsou: pro ocel 11 500  $\sigma_{Pt} = 500$  MPa, pro šedou litinu 42 2420  $\sigma_{Pt} = 200$  MPa a pro polypropylen  $\sigma_{Pt} = 30$  MPa.

Vzhledem k hodnotám meze pevnosti v tahu, jaké mají zalévací hmoty, jsou pro naše aplikace (zalévání DPS, sondy a konektorů) nejvhodnější epoxidové pryskyřice a polyuretanová pryskyřice PU515/PH27. Zalévací hmoty na bázi silikonu mají malou pevnost v tahu, naopak jsou pružnější než ostatní zalévací hmoty (EP a PUR).

#### 4.3.10 Cena zalévacích hmot

Tabulka (Tab.10.) porovnává ceny zalévacích hmot v závislosti na velikosti balení (sad), aby bylo možné ceny snadno porovnat, jsou ceny převedeny na jednotkovou cenu. Ceny jsou uvedeny bez DPH a platné k 15.3.2017.

Tab.10. Porovnání cen zalévacích hmot [6]

typ	název	cena za balení (sadu)	velikost balení	cena za jednotku
		[Kč]	[kg]	[Kč/kg]
EP	MC62/W360	530,00 Kč	1,13	469,03
EP	MC 622/W342	508,00 Kč	1,09	466,06
EP	EC570/W363	672,00 Kč	1,32	509,09
Si	Dow Corning DC 1-2577	2 635,50 Kč	0,5	<b>5271,00</b>
Si	Sylgard 527 Dow Corning	3 980,00 Kč	2	1990,00
Si	Sylgard 170 A&B	3 717,00 Kč	2	1858,50
Si	Sylgard Q3-3600	1 669,50 Kč	0,4	4173,75
PUR	PU430/PH30	430,00 Kč	1,1	390,91
PUR	PU515/PH27	513,00 Kč	1,73	<b>296,53</b>

Na první pohled je patrné, že silikonové zalévací hmoty patří k těm dražším, jsou i 10krát dražší než epoxidové a polyuretanové zalévací hmoty. Vzhledem k tomu, by musela mít kterákoliv silikonová zalévací hmota výrazně lepší parametry než EP nebo PUR abychom ji vybraly pro některou z aplikací.

Z ekonomického hlediska, jsou silikonové zalévací hmoty nevhodné.

## 5 Závěry a doporučení pro praxi

V této závěrečné kapitole jsou zhodnoceny a vybrány zalévací hmoty vhodné pro jednotlivé aplikace podle zadaných parametrů.

### 5.1 Výběr zalévací hmoty pro jednotlivé aplikace

V každé podkapitole je jedna aplikace s popisem provozních podmínek a požadovaných parametrů zalévacích hmot pro daný systém. Podle kterých bude vybrána právě jedna zalévací hmota s ohledem na ekonomické zhodnocení.

#### 5.1.1 Snímač teploty

V této aplikaci se jedná o zapouzdření snímače teploty pro venkovní použití. Pouzdro snímače bude hliníková trubička. Jako snímač bude použito odporové čidlo teploty Pt100-1020, jeho cena je 90 Kč (74,40 Kč bez DPH). Takovéto zapouzdřené čidlo (zpravidla v hliníkovém pouzdře zalitém silikonem) je možno koupit, ale jeho cena se pohybuje od 500 Kč a výše. Proto je podstatné brát v potaz cenu vybrané zalévací hmoty.



*obr.8 - odporové čidlo teploty Pt100-1020 [13]*

Provozní parametry a požadavky systému jsou:

- Vysoká tepelná vodivost (čím větší je teplotní vodivost, tím je menší zpoždění měření při změně teploty).
- Malý součinitel teplotní roztažnosti, nejlépe stejný jako má hliníkové pouzdro  $\alpha_{Al} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .
- Nízká absorpce vody (méně než 0,2 %).
- Systém bude provozován v teplotním rozsahu -40 °C až 100 °C.

Tab.11. Porovnání parametrů zalévacích hmot pro snímač teploty

typ	Název - označení zalévací hmoty	Tepelná vodivost	Součinitel teplotní roztažnosti	Absorpce vody	Rozsah provozních teplot	cena [Kč/kg]
EP	MC62/W360	N	v	V	V	469,0
EP	<b>MC 622/W342</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>466,1</b>
EP	EC570/W363	-	-	N	V	509,1
Si	Dow Corning DC 1-2577	N	N	V	V	5271,0
Si	Sylgard 527 Dow Corning	-	N	V	V	1990,0
Si	Sylgard 170 A&B	-	N	V	V	1858,5
Si	Sylgard Q3-3600	V	v	V	V	4173,8
PUR	PU430/PH30	N	v	N	V	390,9
PUR	PU515/PH27	N	v	N	V	296,5

V - vyhovuje  
v - méně vyhovující  
N - nevyhovuje

Z hlediska požadovaných parametrů vyhovují dvě zalévací hmoty Sylgard Q3-3600 a MC622/W342, ale Sylgard Q3-3600 má příliš vysokou cenu (9krát vyšší než

MC622/W342) a vzhledem k tomu jak jsou parametry obou podobné vybereme levnější variantu a to epoxidovou pryskyřici **MC622/W342**.

### 5.1.2 Datalogger

Datalogger je zařízení pro sběr informací, v našem případě je určen pro odečítání teplot ze snímače teploty, který je popsán výše. Jedná se o desku plošných spojů, která bude zapouzdřena zalévací hmotou, tak aby byl datalogger ochráněn před vnějšími vlivy a bylo možné uložit data do PC a dobít baterii pomocí USB portu.

Provozní parametry a požadavky systému jsou:

- nízká viskozita (z důvodu zatečení zalévací hmoty do všech mezer)
- vysoká rezistivita (elektroizolační vlastnost zalévací hmoty) min. 1 G $\Omega$ .mm
- nízká absorpce vody (méně než 0,2 %)
- systém bude provozován v teplotním rozsahu -40 °C až 100 °C
- nízká relativní permitivita  $\epsilon_r \leq 5$  (odolnost před elektrostatickým nábojem)



Obr.9 - Datalogger s externí sondou CEM DT-171T [14]

Na obr.9 je datalogger běžné konstrukce se sondou na měření teploty, jeho cena je 1590 Kč s DPH.

Tab.12. Porovnání parametrů zalévacích hmot pro datalogger

typ	Název - označení zalévací hmoty	Viskozita	Měr. El.odpor - rezistivita	Absorpce vody	Rozsah provozních teplot	Elektrická pevnost	Relativní permitivita	cena [Kč/kg]
EP	MC62/W360	V	v	V	V	V	v	469,0
EP	MC 622/W342	N	v	V	V	V	v	466,1
EP	EC570/W363	V	V	N	V	V	V	509,1
Si	Dow Corning DC 1-2577	V	v	V	V	V	V	5271,0
Si	Sylgard 527 Dow Corning	V	V	V	V	v	V	1990,0
Si	Sylgard 170 A&B	N	v	V	V	V	V	1858,5
Si	Sylgard Q3-3600	N	V	V	V	V	V	4173,8
PUR	PU430/PH30	N	V	N	V	v	v	390,9
PUR	PU515/PH27	V	V	N	V	v	v	296,5

V - vyhovuje

v - méně vyhovující

N - nevyhovuje

Podle požadavků na parametry zalévacích hmot vyhovuje několik zalévacích hmot, ale pokud zohledníme i ekonomické hledisko vyhovuje nám jen jedna epoxidová pryskyřice **MC62/W360**.

### 5.1.3 DPS s mikroprocesorem

Osazená deska plošných spojů bude složit jako přípravek pro programování a testování aplikací s mikroprocesory. Zalévací hmota bude sloužit především jako ochrana součástek a DPS před mechanickým poškozením při časté manipulaci s ní. DPS bude zalita z obou stran tenkou vrstvou (2-5 mm) zalévací hmoty, tak aby desku ochránila, ale byl přístup ke všem funkčním prvkům (patice pro výměnu  $\mu$ -procesoru, konektory, tlačítka a přepínače). Hotová zalitá deska plošných spojů by měla vypadat přibližně stejně jako je tomu na obr.6 - příklad použití PU430/PH30.

Provozní parametry a požadavky systému jsou:

- nízká viskozita (z důvodu zatečení zalévací hmoty do všech mezer)
- vysoká rezistivita (elektroizolační vlastnosti zalévacích hmot)  
min. 1 GΩ.mm
- mez pevnosti v tahu (ochrana před mechanickým a teplotně-mechanickým namáháním)
- nízká relativní permitivita  $\epsilon_r \leq 5$  (odolnost před elektrostatickým nábojem)

Tab.13. Porovnání parametrů zalévacích hmot pro DPS s  $\mu$ -procesorem

typ	Název - označení zalévací hmoty	Viskozita	Měr. El.odpor - rezistivita	Mez pevnost v tahu	Relativní permitivita	cena [Kč/kg]
EP	MC62/W360	V	v	V	v	469,0
EP	MC622/W342	N	v	V	v	466,1
EP	<b>EC570/W363</b>	V	V	V	V	<b>509,1</b>
Si	Dow Corning DC 1-2577	V	v	n	V	5271,0
Si	Sylgard 527 Dow Corning	V	V	-	V	1990,0
Si	Sylgard 170 A&B	N	v	n	V	1858,5
Si	Sylgard Q3-3600	N	V	v	v	4173,8
PUR	PU430/PH30	N	V	n	V	390,9
PUR	<b>PU515/PH27</b>	V	V	v	v	<b>296,5</b>

V - vyhovuje

v - méně vyhovující

N - nevyhovuje

Vhodné parametry pro tuto aplikaci má několik zalévacích hmot, ale vzhledem k požadovaným parametrům, je na tom nejlépe epoxidová pryskyřice EC570/W363. Z ekonomického hlediska je vhodnější použít polyuretanovou pryskyřici PU515/PH27. Pro ochranu vrstvu DPS tedy použijeme polyuretanovou pryskyřici **PU515/PH27**.



### 5.1.4 Speciální konektory

V této aplikaci se jedná o výrobu speciálních konektorů pro použití v geologii a geofyzice. Speciální konektory jsou finančně náročné, protože se komerčně nevyrábějí, pouze na zakázku. Jedná se o kusovou výrobu. Parametry pro výběr vhodné zalévací hmoty jsem určil podle obecných požadavků kladených na konektory.

Provozní parametry a požadavky systému jsou:

- mez pevnosti v tahu (ochrana před mechanickým namáháním)
- vysoká rezistivita (elektroizolační vlastnosti zalévacích hmot)  
min. 1 G $\Omega$ .mm
- nízká absorpce vody (méně než 0,2 %)
- nízká relativní permitivita  $\epsilon_r \leq 5$  (odolnost před elektrostatickým nábojem)



*Obr.10 - Speciální konektory - pro karotážní (geofyzikální) sondy odlité z epoxidové pryskyřice*

Tab.14. Porovnání parametrů zalévacích hmot pro konektory

typ	Název - označení zalévací hmoty	Mez pevnost v tahu	Měr. El.odpor - rezistivita	Absorpce vody	Relativní permitivita	cena [Kč/kg]
EP	MC62/W360	V	v	V	v	469,0
EP	MC622/W342	V	v	V	v	466,1
EP	EC570/W363	V	V	N	V	509,1
Si	Dow Corning DC 1-2577	N	v	V	V	5271,0
Si	Sylgard 527 Dow Corning	-	V	V	V	1990,0
Si	Sylgard 170 A&B	N	v	V	V	1858,5
Si	Sylgard Q3-3600	v	V	V	V	4173,8
PUR	PU430/PH30	N	V	N	v	390,9
PUR	PU515/PH27	v	V	N	v	296,5

V - vyhovuje

v - méně vyhovující

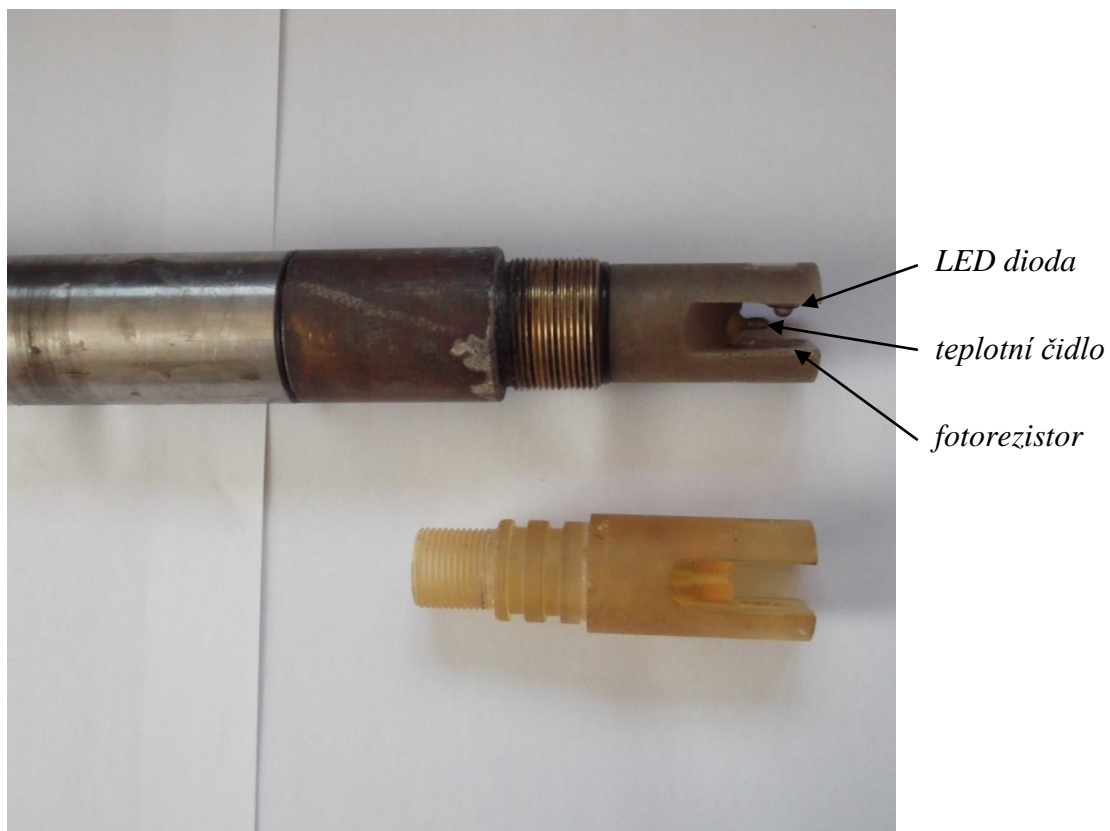
N - nevyhovuje

Nejvhodnější zalévací hmoty pro výrobu konektorů jsou epoxidové pryskyřice, protože mají větší pevnost než ostatní zalévací hmoty (silikonové ZH jsou spíše pružné než pevné). EC570/W363 a polyuretanové pryskyřice nevyhovují ohledně parametru hygroskopičnosti. Podle parametrů (i ceny) je možný volný výběr mezi MC62/W360 a MC622/W342. Osobně zvolím epoxidovou pryskyřici **MC622/W342**.

### 5.1.5 Sonda čirosti kapalin

V této aplikaci se jedná o výrobu sondy. Sonda je určena pro karotážní měření teploty a čirosti kapalin (hlavně vody). Jedná se o kusovou výrobu, která je levnější variantou než komerční produkty, protože cena takovéto sondy je řádově 50 až 60 tis.Kč. Originální sonda je vyrobena z plexiskla. Sonda pracuje na principu běžného odporového čidla pro měření teplot a na principu LED diody a fotorezistoru pro měření

čirosti, vše je zobrazeno na obr.11. Fotorezistor je celý zalitý v epoxidu, přesně proti LED diodě, která je jasně vidět na obrázku.



*Obr.11 - Sonda na měření čirosti a teploty vody*

Provozní parametry a požadavky systému jsou:

- nízká absorpce vody (méně než 0,2 %)
- mez pevnosti v tahu (ochrana před mechanickým a teplotně-mechanickým namáháním)
- vysoká rezistivita (elektroizolační vlastnosti zalévacích hmot) min. 1 G $\Omega$ .mm
- odolnost vůči slané vodě

Tab.15. Porovnání parametrů zalévacích hmot pro sondu

typ	Název - označení zalévací hmoty	Absorpce vody	Mez pevnost v tahu	Měr. El.odpor - rezistivita	cena [Kč/kg]
EP	MC62/W360	V	V	v	469,0
EP	<b>MC622/W342</b>	V	V	v	<b>466,1</b>
EP	EC570/W363	N	V	V	509,1
Si	Dow Corning DC 1-2577	V	N	v	5271,0
Si	Sylgard 527 Dow Corning	V		V	1990,0
Si	Sylgard 170 A&B	V	N	v	1858,5
Si	Sylgard Q3-3600	V	N	V	4173,8
PUR	PU430/PH30	N	N	V	390,9
PUR	PU515/PH27	N	V	V	296,5

V - vyhovuje

N - nevyhovuje

Bohužel nemám možnost určit odolnost zalévacích hmot vůči slané vodě, takové parametry výrobce neuvádí, musíme se tedy spolehnout pouze na ostatní parametry. Vzhledem k hodnotám hygroskopičnosti jsou nejvhodnější silikonové zalévací hmoty, ale jsou příliš pružné a méně pevné, oproti epoxidovým pryskyřicím. Pro tuto aplikaci vybereme epoxidovou pryskyřici **MC622/W342**, která má i výborné hodnoty tepelné vodivosti, je tedy vhodnější než MC62/W360.

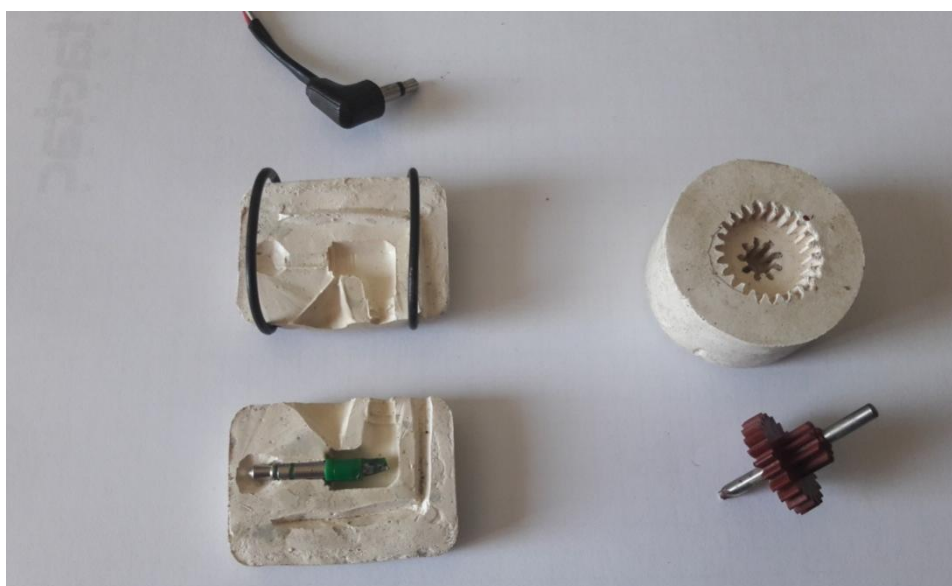
## 6 Závěr

Podle provozních podmínek a parametrů systémů, byly nejčastěji vybírány epoxidové pryskyřice. Jednoznačně jsou z ekonomického hlediska výhodnější než silikonové zalévací hmoty.

Pro jednotlivé aplikace byly vybrány tyto zalévací hmoty:

- snímač teploty - epoxidová pryskyřice **MC622/W342**
- datalogger - epoxidová pryskyřice **MC62/W360**
- DPS s mikroprocesorem - polyuretanová pryskyřice **PU515/PH27**
- speciální konektory - epoxidová pryskyřice **MC622/W342**
- sonda čírosti a teploty vody - epoxidová pryskyřice **MC622/W342**

Pro všechny tyto systémy je možné použít jednu, dalo by se říct univerzální, zalévací hmotu, a to epoxidovou pryskyřici **MC622/W342**. Vzhledem k tomu jaké má tato zalévací hmota parametry, v porovnání s ostatními zalévacími hmotami (dobrá tepelná vodivost, značná elektrická pevnost, nízká relativní permitivita, použitelnost do 180 °C, relativně malý součinitel délkové teplotní roztažnosti, nízká hygroskopičnost, vysoké rezistivita a vysoká mez pevnosti v tahu) je vskutku MC622/W342 univerzální zalévací hmotou a z ekonomického hlediska je také jednou z těch dostupnější na trhu.



*Obr.12 - Formy z lukoprenu pro přesné odlévání. Vlevo - dvoudílná forma na stereo jack, vpravo - jednodílná forma na převod pro RC modely.*

MC622/W342 je vhodná i pro amatérské konstruktéry. Tedy vhodná pro ruční zalévání, jen je doporučeno po zalití sestavy odsát přebytečný vzduch, který se dostal do odlitku při míchání epoxidu s tvrdidlem. Pro odsávání přebytečného vzduchu z odlitku doma používám zavařovací sklenici s víčkem, které je napojeno na starý kompresor od lednice.

Při výrobě odlitků z epoxidových pryskyřic (např. konektory, již zmíněná sonda čírosti apod.) je nutné použít takový materiál formy, který je dostatečně pružný. Například silikonový kaučuk Lukopren, ze kterého jsou formy na obr.12.

## 7 Seznam odborné literatury

- [1] PECINA, Pavel. Materiály a technologie - plasty. 1.vydání Brno: Masarykova univerzita, 2006. 54 s. ISBN 80-210-4100-5
- [2] MLEZIVA, Josef. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. Praha: nakladatelství Sobotáles, 1993. 528 s. ISBN 80-901570-4-1
- [3] SKEŘÍK, Jan. Plasty v elektrotechnice a elektronice. Praha : SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1991. 516 s. ISBN 80-03-00657-0
- [4] LIDAŘÍK, Miloslav, et al. *Epoxidové pryskyřice*. Praha : SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1983. 732 s.
- [5] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 235 s. ISBN 80-7300-189-6
- [6] ELCHEMCo s.r.o. *Materiály pro elektroniku a elektrotechniku* [online]. 1992 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.elchemco.cz/>
- [7] ASTM D570. *Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*. USA: ASTM International, 2010. dostupné z: <http://www.astm.org/Standards/D570.htm>
- [8] FUKÁTKO, T., FUKÁTKO, J. *Teplo a chlazení v elektronice*. 1.vydání Praha: BEN - technická literatura, 1997. 30 s. ISBN 80-86056-24-4
- [9] Wikipedia - *Thermal shock* [online]. [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_shock](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_shock)
- [10] ULRYCH, E., POLÁK, M., *Hydromechanika*. 3.vydání Praha: Česká zemědělská univerzita, 2009. 152 s. ISBN 978-80-213-1925-7

- [11] BARTOVSKÁ, L., ŠIŠKOVÁ, M., *Tixotropie* [online] Praha: VŠCHT, 2005 [cit. 2014-03-05] Dostupné z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/hesla/tixotropie.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/tixotropie.html)
- [12] Wikipedia - *UL 94* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/UL\\_94](https://en.wikipedia.org/wiki/UL_94)
- [13] TME Czech Republic s.r.o. *Distributor elektronických a elektrotechnických součástek* [online]. 1990 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/>
- [14] GM electronic, spol. s.r.o. *Distributor elektronických a elektrotechnických součástek a materiálů* [online]. 1990 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/cz>