

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Ochrana desek plošných spojů před vlivy prostředí

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin FRIDRICHOVSKÝ**
Osobní číslo: **E15N0012P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Ochrana desek plošných spojů před vlivy prostředí**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou ochrany desek plošných spojů proti vlivům prostředí a proveďte rešerši použitelných materiálů a v praxi využívaných metod nanášení.
2. Zpracujte přehled způsobů ochrany desek plošných spojů a použitelných materiálů.
3. Navrhněte experiment pomocí něhož ověříte vhodnost vybraných materiálů a způsobů ochrany desek plošných spojů před vlivy prostředí. V rámci experimentu ověřte také vliv materiálových a procesních parametrů.
4. Navržený experiment realizujte a vyhodnoťte jeho výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

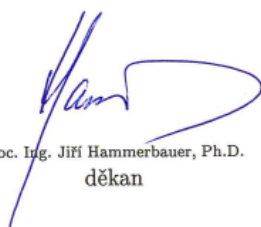
Seznam odborné literatury:

1. Coombs, Clyde F. Printed circuits handbook
2. Klein Wassink, R. J. Soldering in Electronics
3. Hwang, J. Environment-Friendly Electronics: Lead-free Technology
4. Internet

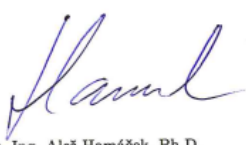
Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




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

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na ochranu desek plošných spojů před vlivy prostředí. V práci jsou popsány vlivy působící na osazené desky plošných spojů v jejich provozních podmínkách a možnosti jejich ochrany, zejména konformní povlaky. Dále práce obsahuje popis technologie konformních povlaků a poruchy s nimi spojené. Poslední empirická kapitola referuje o hlavním cíli práce, kterým je porovnání vhodnosti pěti vybraných povlaků proti účinkům solné mlhy, vlhkého tepla a teplotního šoku.

Klíčová slova

Deska plošného spoje, konformní povlak, vlivy, nanášení, vytvrzení, vlhkost, solná mlha, teplota.

Abstract

This diploma thesis is focused on protection of printed circuit boards against environmental influences. The thesis is describing influences on assembled printed circuit boards in their operational conditions and the possible ways to protect them, especially the conformal coatings. Furthermore, the thesis contains a description of conformal coating technology and defects associated to them. The last empirical chapter refers to the main aim of the work, which is to compare the suitability of five selected coatings against the effects of salt mist, moisture and thermal shock.

Key words

Printed circuit board, conformal coating, influences, deposition, curing, moisture, salt mist, temperature.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 16.5.2017

Bc. Martin Fridrichovský

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Františku Steinerovi, Ph.D. za profesionální rady, metodické vedení práce a rychlé řešení všech záležitostí spojených s praktickou částí. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Čengery, Ph.D. za navržení zkušebních vzorků dle normovaného motivu. Tato diplomová práce vznikla s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu RICE – Nové technologie a koncepce pro inteligentní systémy, číslo projektu LO1607.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
OCHRANA PŘED VLIVY PROSTŘEDÍ	11
1.1 VLIVY PROSTŘEDÍ	12
1.2 KONFORMNÍ POVLAKY	14
1.2.1 Funkce KP.....	15
1.2.2 Rozdělení KP	16
1.2.3 Složení konformních povlaků.....	17
1.2.4 Materiály KP a jejich vlastnosti	19
1.3 NANO POVLAKY	23
1.4 ZALÉVACÍ HMOTY	27
1.4.1 Materiály ZH	28
1.4.2 Kritéria spolehlivosti	29
1.4.3 Kaučuky a tmely.....	29
1.5 STÍNĚNÍ.....	30
2 TECHNOLOGIE KONFORMNÍCH POVLAKŮ	31
2.1 PŘÍPRAVA POVRCHŮ.....	31
2.1.1 Čištění.....	31
2.1.2 Možnosti ochrany	32
2.1.3 Penetrace povrchu.....	32
2.1.4 Maskování.....	32
2.2 NANÁŠENÍ	33
2.3 VYTVRZENÍ	35
3 PORUCHY KONFORMNÍCH POVLAKŮ	37
3.1 PUCHÝŘE.....	37
3.2 POVRCHOVÉ ZBĚLENÍ.....	38
3.3 BUBLINY, DÍRKY A PĚNA	38
3.4 ODTAŽENÍ	39
3.5 KOROZE	39
3.6 POPRASKÁNÍ.....	40
3.7 DELAMINACE	40
3.8 NESMÁČIVOST.....	41
3.9 POMERANČOVÁ KÚRA	42
3.10 STÍNOVÁNÍ	42
3.11 NEROVNOMĚRNOST.....	43
4 EXPERIMENT	44
4.1 VYBRANÉ POVLAKY	44
4.2 ZKUŠEBNÍ VZORKY.....	44
4.3 IZOLAČNÍ ODPOR - SIR	46
4.4 SOLNÁ MLHA.....	48
4.5 VLHKÉ TEPLLO.....	52
4.6 TEPLTNÍ ŠOK	56
5 ZÁVĚR	59
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	61
PŘÍLOHY	1

Úvod

Téma ochrany desek plošných spojů bylo vybráno vzhledem k obrovskému a neustále rostoucímu rozsahu využití elektronických zařízení. Globalizace trhu a technologií s sebou přináší i nutnost tato elektronická zařízení, jejichž srdcem jsou desky plošných spojů, dokázat ochránit před náročnějšími vlivy prostředí dnešního světa. Desky plošných spojů nalézají využití v aplikacích pro domácnosti, automobilový průmysl, telekomunikace, armádu, letectví a zejména v posledním desetiletí u nositelné elektroniky. V minulosti byly používány jednostranné desky, se širokými cestami vodivého motivu a izolačními vzdálenostmi, osazené THT součástkami. Dnešek patří oboustranným vícevrstevným deskám plošných spojů s jemným motivem. DPS jsou osazovány povrchovou technologií a zároveň se neustále zvyšuje integrita součástek. Současně se i očekává, že elektronika bude fungovat ve všech prostředích. Forma ochrany může být provedena konformními povlaky nebo v náročnějších podmínkách zalévacími hmotami. Osazené sestavy je důležité ochránit i stíněním před vlivem elektromagnetického rušení. Trendy současnosti vyzdvihují hydrofobní povlaky jako účinnou ochranu nositelné elektroniky před všemi formami vody.

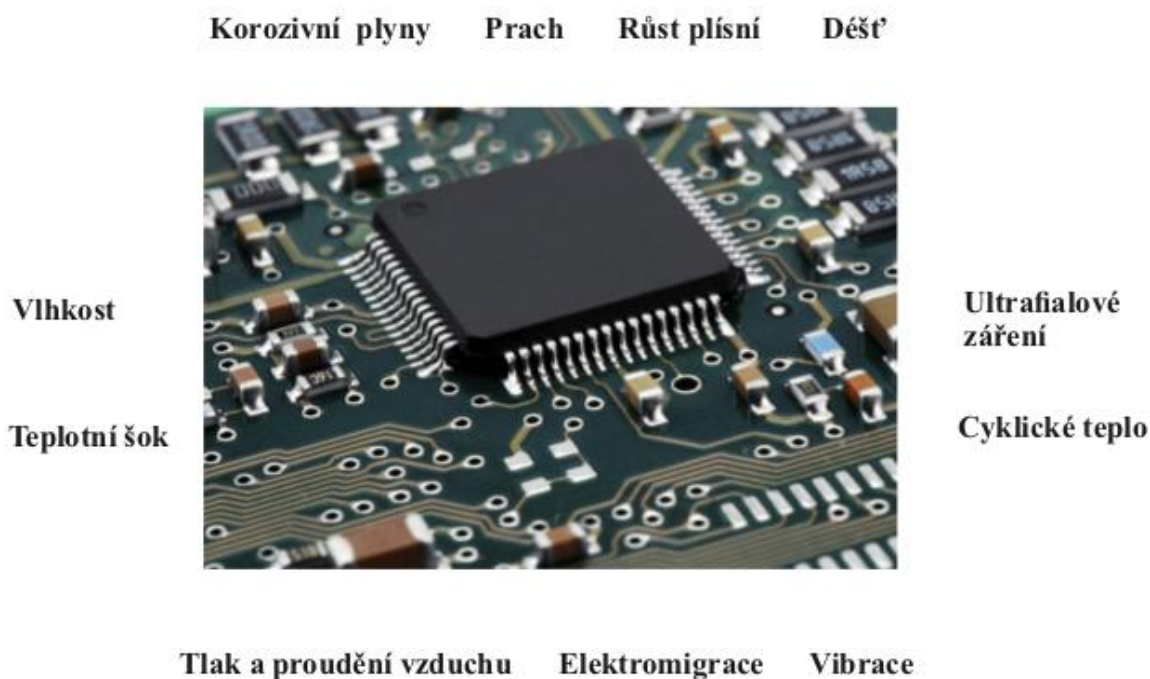
Historie dokazuje, že osazené desky plošných spojů ochráněné konformními povlaky mohli vykazovat naopak větší poruchovost. V takových případech povlak uzamkne nečistoty na povrchu a může podpořit vývoj poruch, čímž se stane nežádoucím. Proto je u konformních povlaků nanejvýš důležité se věnovat přípravě povrchů a technologiím nanášení. Vytvrzený povlak je vystaven degradaci a sledují se změny jeho vlastností. Empirická část referuje o hlavním cíli práce, kterým je porovnání pěti vybraných povlaků proti účinkům solné mlhy, vlhkého tepla a teplotního šoku. Izolační odpor je vhodný nástroj pro posuzování degradace izolačních vlastností vlivem solné mlhy nebo vlhkosti. Kvalita uniformního povlaku je ovlivněna i výskytem poruch objevujících se vlivem chybné technologie nanášení nebo degradací v čase. Objevit a urychlit vývoj těchto poruch umožňuje zkouška teplotním šokem, při které je povlak zatížen rychlou změnou hraničních teplot.

Seznam symbolů a zkratk

DPS	Deska plošného spoje
UV	Ultrafialové
CVD	Chemical Vapour Deposition
KP	Konformní povlak
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
MTBF	Middle Time Between Failures
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
VOC	Volatile Organic Compound
AR	Acrylic Resin
ER	Epoxid Resin
UR	Urethane Resin
SR	Silicone Resin
XY	Parylen
ZH	Zalévací hmota
SIR	Surface Insulation Resistance
DWV	Dielectric Withstanding Voltage
IPC	Institute of Printed Circuits
RICE	Regional Innovation Centre for Electrical engineering
MIL	United States Military Standard
EMI	Electromagnetic Interference
BGA	Ball Grid Array
COB	Chip on Board
PGA	Pin Grid Array
PTFE	Polytetrafluorethylen
FR-4	Flame Retardant
T_g	Teplota skelného přechodu
pH	Vodíkový exponent
Ω	Ohm
nm	Nanometr
μm	Mikrometr
kV	Kilovolt

Ochrana před vlivy prostředí

Pro zajištění spolehlivosti zařízení je nezbytné zaručit ochranu DPS a předejít omezení provozuschopnosti nebo hůř úplnému zničení zařízení. Z pohledu výrobce jsou zásadní náklady na poruchovost produktu a konkurenceschopnost při poskytování nejvyšší možné spolehlivosti. Široká škála aplikací elektroniky znamená mnoho nejrůznějších vlivů vnějšího prostředí, které mohou způsobit zhoršení dielektrických vlastností například vlivem absorpce atmosférické vlhkosti, elektrostatickou přitažlivostí prachu, růstem kovových dendrit, whiskerů nebo mechanickým namáháním ve formě šoku, abraze či vibrací. Více vlivů prostředí působících na osazené sestavy DPS je uvedeno na *Obr. 1.1*.



Obr. 1.1 Vlivy prostředí působící na moderní osazené sestavy [1]

S přechodem na bezolovnaté pájení jsou ze strany zákazníků vysoké nároky na spolehlivost DPS i s vědomím, že není možné dosáhnout stejné úrovně pájeného spoje jako s olovnatými pájkami. Bezolovnaté pájecí pasty jsou často dotovány stříbrem, jež je náchylné k elektrochemické korozi a je důležité jeho povrch ochránit. Za rozvojem ochrany DPS je snaha o prodloužení střední doby mezi výskytem poruch (MTBF), jež nám přináší vyšší spolehlivost a bezpečnost z elektrického, chemického, mechanického i ekologického

hlediska. Tato ochrana může být provedena ve formě konformních povlaků, nano povlaků, zalévacích hmot, tmelů nebo mechanickým vyztužením. [1], [2], [7], [26]

1.1 Vlivy prostředí

Dnes se elektronická zařízení používají za provozních podmínek, které byly dříve nemyslitelné. Zejména spotřební elektronika je jedno z odvětví, kde je uživatelské prostředí velmi proměnné. Níže je uvedeno několik základních nepřátel elektrotechnického průmyslu.

- **UV záření**

Ultrafialové záření je elektromagnetické vlnění obsaženo zejména ve slunečním záření. UV záření má vlnovou délku od 10 do 400 nm. Tento vliv prostředí je problémem hlavně u venkovních aplikací. V atmosféře je UV záření zastoupeno ve větší míře než viditelné, a tak jsou vlastnosti DPS jeho účinky degradovány i bez přímého vystavení slunečním paprskům. UV záření způsobuje degradaci polymerů, vyblednutí povrchu, ztrátu pevnosti plastů až popraskání. [5]

- **Vlhkost**

Vlhkost je typickým vlivem prostředí, výrazně se lišícím dle očekávané oblasti využití. Vlhkost vzduchu napomáhá ke zvýšení povrchové vodivosti. Elektronické produkty jsou rozděleny do tříd dle vystavení úrovně relativní vlhkosti. Až ve dvou třetinách klimaticky teplých oblastí, dosahuje relativní vlhkost při 0 °C až 80 %. V tropických oblastech dosahuje vlhkost vyšších hodnot. Spolu s vlhkostí úzce souvisí hydrolytická stabilita a odolnost proti korozi, jež je funkcí míry propustnosti povlaku. Při osazování a lakování DPS je ideální relativní vlhkost mezi 40 až 60 %. Spodní hranice je pro zmírnění výskytu elektrostatických výbojů, zatímco horní hranice je určena polovodičovými součástkami, které jsou citlivé na vlhkost. [5], [17]

- **Znečišťující plyny**

Pod tímto pojmem jsou myšleny plyny s typickým obsahem oxidu dusíku a síry, jež znečišťují naši atmosféru. Tyto plyny jsou vedlejšími produkty spalování fosilních paliv a generují kyseliny a velké množství ionizujících a hygroskopických sloučenin, které absorbují vlhkost, reagují mezi sebou a vytváří korozivní páry na povrchu povlaku. [5]

- **Ozón (O₃)**

Problém s ozónem je jeho reaktivnost. Pokud přijde do kontaktu s vlhkostí, dalšími reaktivními plyny a organickými polymery, nevyjímaje konformní povlaky, mohou nastat nežádoucí chemické reakce. Nejméně žádané reakce jsou schopny způsobit rozpad polymerních řetězců a zhoršit dielektrické vlastnosti. Většina konformních povlaků obsahuje aditiva k omezení degradace vlivem ozónu. [5], [16]

- **Kyselý déšť**

Kyselý déšť jsou srážky s pH nižším než 5,6. Je to vedlejší produkt spalování fosilních paliv, oxidů dusíku z automobilů, oxidů síry ze sopečné činnosti a těkavých organických látek. Množství kyselých dešťů je úměrné vystavení UV záření, teplotě a relativní vlhkosti. Dalšími zdroji je mlha a mrholení. Životnost plošných spojů je ohrožena kombinací vlhkosti se znečišťujícími plyny. To má za následek odlupování, ztrátu barvy, tvorbu puchýřů a ve výsledku delaminaci povlaku. Pokud se u osazených DPS, bez napětí, dostane vlhkost a znečišťující plyny k povrchu substrátu, povlak se v místech styku s vodivým motivem bude odlupovat a vodivý motiv zoxiduje, započne koroze. U obvodů pod napětím je problémem elektromigrace a s ní spojený růst dendrit. [5], [16]

- **Zvýšená teplota**

Na osazené DPS působí zvýšená teplota ze součástek a okolního prostředí. Některé aplikace mohou být vystaveny extrémním nebo často se měnícím teplotám. Spolu se změnou teplot je třeba brát v potaz například i změny vlhkosti a tlaku. Krátkodobé teplotní namáhání KP způsobuje změknutí a snížení dielektrických vlastností. U aplikací vystavených dlouhodobě zvýšeným teplotám se vyskytují praskliny, změny barvy, zkřehnutí a zhoršení dielektrických parametrů.

- **Prach**

Částice prachu o velikosti 1 μm jsou nabitý kladným nábojem, zatímco povrch DPS má záporný potenciál, částice jsou přitahovány a akumulují se. U povlakem ochráněných osazených sestav je hlavní problém, s narůstající vrstvou prachu, se zvyšuje teplota polovodičových součástek. U polovodiče se na rozdíl od kovů s rostoucí teplotou snižuje elektrický odpor a obvod se dále ohřívá. To má za následek větší příkon a urychlené stárnutí materiálů za cenu ztráty dielektrických vlastností a možnosti vzniku

zkratů nebo požáru. Pro nechráněné DPS je problémem jakýkoliv vodivý (kovový) prach, jehož zdrojem jsou například motory, výrobní a konstrukční procesy. Prach je hlavní složkou takzvaného vnitřního znečištění, které dosahuje 2 až 5 násobku venkovního znečištění. [17]

- **Vibrace**

Z fyzického hlediska jsou nepřáteli osazených DPS: mechanický šok, náhodné vibrace a ohýbání. Mechanické namáhání představuje největší hrozbu při nižších teplotách. KP slouží jako mechanická podpora malých součástek, ale proti mechanickému namáhání jsou nejlepší volbou zalévací hmoty k tlumení vibrací. U elektronických sestav určených do prostředí se zvýšenými vibracemi, je vhodné součástky k DPS, chladičům nebo jiným pevným komponentům přilepit lepidly. Materiály pro ochranu těchto aplikací vyžadují nízký modul pružnosti a koeficient teplotní roztažnosti shodný se substrátem a osazenými součástkami. [5]

1.2 Konformní povlaky

Jedná se o tenký, elektricky nevodivý film, který je aplikován na osazenou a od tavidel očištěnou DPS, za účelem ochránit ji před nepříznivými vlivy okolního prostředí. Povlaky mají výborné dielektrické vlastnosti a jsou důležitým článkem elektrické izolace elektrotechnických zařízení. Zvyšují elektrickou pevnost, tepelnou vodivost a stabilizují elektroizolační parametry. Rovněž mají za cíl omezit projevy stárnutí materiálů použitých při výrobě a osazování DPS, které mohou způsobit omezení i ztrátu funkčnosti celé sestavy. Konformní povlak musí mít stejnou barvu, konzistenci, být průhledný a rovnoměrně pokrývat DPS a její součásti. Aby byly tyto podmínky splněny je zapotřebí vybrat vhodnou technologii nanášení. KP jsou využívány i pro aplikace vysokého napětí jako jsou generátory, transformátory, jističe a osazené sestavy k motorům. Časté jsou i povlaky splňující armádní normy (MIL), nehořlavost či ohebnost 90° bez popraskání a delaminace. Při nanášení je stěžejní kompatibilita povlaku s povrchem součástek, vodičů a nepájivé masky, k dosažení dostatečné adheze je vhodné povrchy impregnovat nátěrem pro lepší přilnavost. Povrch tedy musí být po očištění přilnavý a vysušený. Po aplikování KP na povrch DPS filmotvorné látky vytvoří ucelený, zpravidla zřetelně lesklý povrch. [3], [7], [8], [23], [26]

1.2.1 Funkce KP

KP byly využívány k ochraně osazených DPS před korozivními plyny, prachem a vlhkostí. V současnosti se u KP spoléhá i na snížení rizika vzniku elektrických zkratů způsobených růstem vlasových vláken ze slitin cínu. Výběr vhodného KP je klíčový pro splnění funkčních požadavků od spotřebitele. S technickým rozvojem se elektronická zařízení dostávají do prostředí, nad kterými se před několika desetiletími neuvažovalo a tak výrobce musí brát zřetel především na prostředí, jemuž bude elektronické zařízení vystaveno, extrémnější rozsahy teplot, koncentrace kapalin a plynů. Dále se zvažuje předpokládaná životnost zařízení, případné následky poruch, používané frekvenční pásma i další formy ochrany daného zařízení. Mimo již výše uvedené funkce mají konformní povlaky několik dalších úkolů v závislosti na typu aplikace. Primární úkoly zahrnují: [4], [5], [6], [26]

- *Potlačení šíření plazivých proudů a tvorbě zkratů vlivem vlhkosti a znečištění z provozního prostředí*
- *Potlačení vzniku jiskření a koróny*
- *Ochrana proti různým formám vody*
- *Ochrana před kyselinami a plyny, jež způsobují vznik koroze*
- *Bariéra zabráňující kontaktu cizích objektů s povrchem substrátů*
- *Prokazatelně zmírňují růst whiskerů do délky*

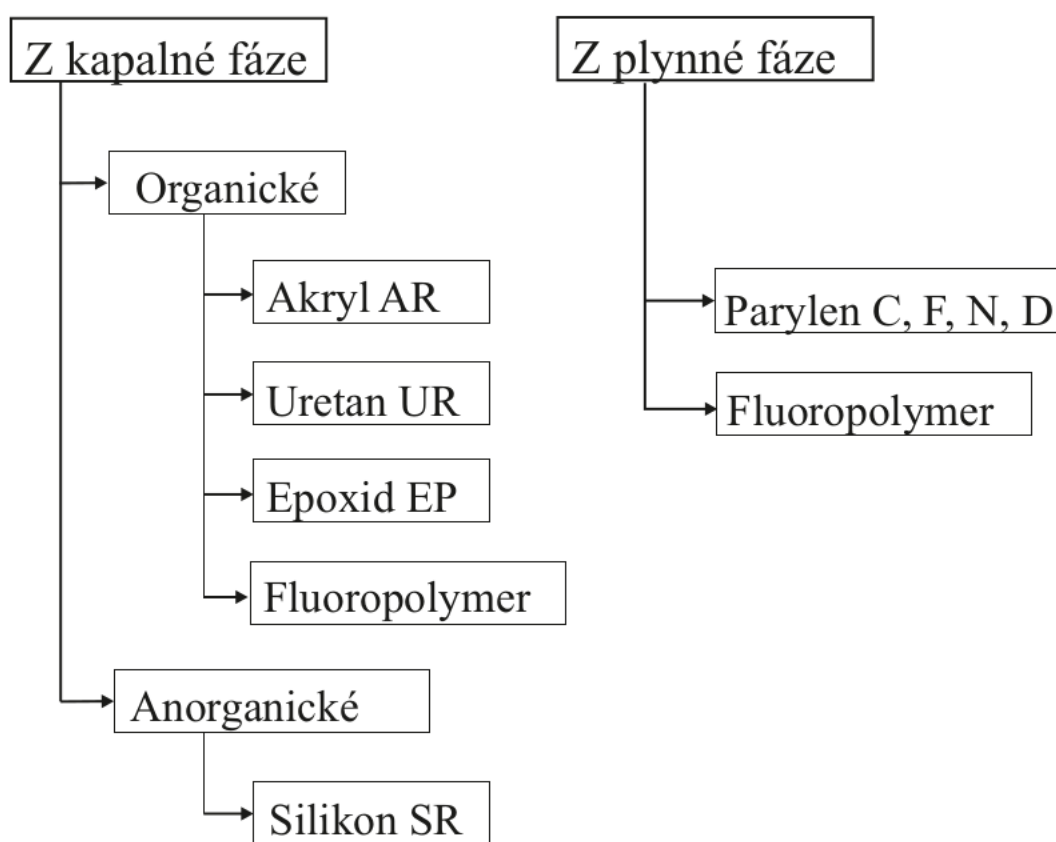
Mezi druhotné funkce KP patří:

- *Zlepšení životnosti bezolovnatých pájených spojů vůči cyklickému teplu*
- *Podpoření mechanické výztuže malých částí DPS, aby se snížily účinky nárazů a vibrací*
- *Odolnost vůči růstu plísní*
- *Zvyšují samozhášivost součástek*

Laky jsou využívány i pro ochranu před solnou mlhou, extrémními teplotami a ultrafialovým zářením. Klasické KP nejsou schopny zcela zamezit výskytu vlhkosti a mají velmi malý vliv na mechanické namáhání pájeného spoje. [6]

1.2.2 Rozdělení KP

Ochranné laky je možné rozdělit dle několika faktorů, jako jsou druh pryskyřice, mechanismus vytvrzení nebo obsah ředidel. Nicméně hlavním kritériem jsou dva základní způsoby, jak vytvořit tenký ochranný film pevného skupenství. Nejvíce konformních povlaků vzniká přechodem z kapalného skupenství, tyto můžeme rozdělit dle chemické podstaty na organické a anorganické. Dále se organické povlaky tradičně dělí na akrylové, epoxidové, polyuretanové a fluoropolymerní modifikátory povrchu. Druhým způsobem nanášení povlaku je vakuová depozice z plynné fáze, při které se plyny smísí ve vakuu a polymerizací se nanášejí na povrch DPS.



Obr. 1.2 Dělení KP dle skupenství v průběhu nanášení [3]

V 60. letech minulého století byl začátek KP ve znamení dvousložkových povlaků. O dvě desetiletí později přešli výrobci vlivem automatizace na jednosložkové. Dnes se výrobci snaží vypořádat s nevýhodami, jako jsou krátká životnost, doba nutná k vytvrzení, přilnavost a odolnost proti teplotnímu cyklování. Obecně dvousložkové povlaky mohou nabídnout lepší vlastnosti. KP mohou být jednosložkové, dvousložkové nebo kompletně bez rozpouštědel. Ve výrobě jsou nejrozšířenější následující druhy KP. [5], [13]

- *Akrylové AR*
 - Jednosložkové – pryskyřice v rozpouštědle
- *Uretanové UR*
 - Jednosložkové – uretanová pryskyřice v rozpouštědle
 - Dvousložkové – 1. Složka pryskyřice, 2. Složka tvrdidlo / katalyzátor
- *Epoxidové ER*
 - Dvousložkové – 1. Složka pryskyřice, 2. Složka tvrdidlo / katalyzátor
- *Silikonové SR*
 - Jednosložkové – silikonová pryskyřice v rozpouštědle (nosič)
 - Jednosložkové – 100% bez rozpouštědel (film má stejnou tloušťku po zaschnutí jako při nanesení)
 - Dvousložkové – 1. Složka pryskyřice, 2. Složka Tvrdidlo / katalyzátor
- *Parylen XY*
 - Jednosložkový – prášek zahřátý na vysokou teplotu pro polymeraci

Vztah mezi materiály KP a technologiemi vytvoření ochranného povlaku přibližuje Tab. 1. K tradičnímu rozdělení materiálů na akrylové (AR), epoxidové (ER), silikonové (SR) a uretanové (UR) byl přidán hybridní materiál ARUR.

Tab. 1 Rozdělení KP dle obsahu rozpouštědel a technologie vytvrzení [5]

Obsahující rozpouštědla		Bez rozpouštědel	
<i>Technologie vytvrzení</i>	<i>Materiál</i>	<i>Technologie vytvrzení</i>	<i>Materiál</i>
Tepelné	AR, ER, UR, SR	Tepelné	AR, ER, UR, ARUR, SR
UV	AR, ER, UR, SR	UV	AR, ER, UR, ARUR, SR
Katalytické (přídavné)	ER, UR, SR	Katalytické (přídavné)	AR, ER, UR, ARUR, SR
Vlhkostí	SR	Vlhkostí	UR, ARUR, SR
Vulkanizace	SR	Vulkanizace	SR
Odpařením rozpouštědla	AR, ER, UR, SR	-	-

1.2.3 Složení konformních povlaků

U tekutých povlaků je z technologického hlediska důležitý obsah aktivních filmotvorných látek, neaktivních rozpouštědel a ředidel, struktura a molekulární hmotnosti, které dohromady udávají viskozitu daného laku. Laky mohou být bez obsahu ředidel,

rozpustné ve vodě i 100% aktivní kdy dochází ke kompletní přeměně tekutiny na pevný povrch. Dále laky obsahují odpěňovací činidla, plniva a smácedla. Ke zkrácení doby schnutí nebo vypalování jsou do laků přidávány v malém množství z pozice katalyzátorů sušidla. Jejich hlavní složkou jsou kovy například kobalt, mangan nebo olovo, jež 6 až 10krát urychlí proces schnutí. Většina laků obsahuje fluorescenční barvivo, které reaguje na UV záření. [3], [5]

- **Syntetické pryskyřice**

Přírodní pryskyřice ve formě tekutiny ze stromů, byly vědci replikovány a nazývají se právě syntetickými. Syntetické pryskyřice mají velmi podobné vlastnosti jako přírodní a zachovaly si i nejdůležitější schopnost vytvrzení za působení tepla, tlaku či obojí. Syntetické pryskyřice jsou díky polymerům více stabilní, homogenní a samozřejmě levnější. Obecně jsou syntetické pryskyřice rozděleny do dvou skupin: termoplastické a reaktoplastické. Z pohledu KP jsou vhodné termoplastické, které se při vytvrzení chemicky nemění. Pro jejich přípravu se používají polyreakce, jako jsou polykondenzace, polymerace, polyadice a kopolymerace. U KP tvoří syntetické pryskyřice základní filmotvornou složku a jsou dobře rozpustné v chlorovaných uhlovodících, ketonech nebo éterech. [14]

- **Rozpouštědla a ředidla**

Tyto látky se do laků přidávají pro rozpuštění filmotvorných látek a rovnoměrnému naředění kapaliny, aby získala vlastnosti vhodné pro nanášení na povrch substrátu. Než se začal klást důraz na životní prostředí, byly všechny KP kromě Parylenu na bázi rozpouštědel. Za úspěšnou snahou omezit obsah rozpouštědel v KP je emise jejich těkavých organických látek (VOC). Úkolem rozpouštědla, jakožto součásti KP je schopnost se po nanesení povlaku vypařit a zanechat za sebou filmotvorné látky k vytvrzení. U rozpouštědel jsou určující charakteristiky stability, toxicity, rozpustnosti, barvy a hořlavosti. [5]

- **Těkavé organické látky – VOC**

VOC jsou regulované sloučeniny obsahující uhlík, které se uvolňují z těkavých rozpouštědel. Lakování DPS musí probíhat v odvětrávaných prostorech a tím se látky dostávají do ovzduší. Některé těkavé organické sloučeniny se po vystavení slunečnímu

záření ukázaly jako zdroj „špatného“ troposférického ozonu, který je součástí smogu. Tím, že ne všechny těkavé organické sloučeniny podporují tvorbu ozonu, se u povlaků stále můžeme setkat s látkami, jimž byla udělena výjimka. Použití KP s obsahem VOC je omezeno množstvím na den, týden a rok. V současnosti tedy výrobci používají laky bez nebo s velmi nízkým obsahem těkavých látek. [5], [16]

1.2.4 Materiály KP a jejich vlastnosti

Až 80% procent trhu konformních povlaků zastupují akryláty. Výběr KP vyžaduje analýzu jejich fyzikálních, mechanických, tepelných, elektrických a optických vlastností. Fyzikální vlastnosti zahrnují viskozitu, schopnost vyplňovat mezery a přilnavost. Mechanické vlastnosti reprezentuje pevnost v tahu a poměrné prodloužení. Elektrické vlastnosti jsou určeny elektrickým odporem, elektrickou pevností či permitivitou. Důležité jsou i tepelné vlastnosti například rozsah teplot, tepelná vodivost a koeficient tepelné roztažnosti. Pro úspěšný výběr materiálu je zásadní uvažovat nejen složení a vlastnosti, ale i technologii nanášení. Tab. 2 uvádí doporučené tloušťky KP podle standardu IPC. Následující vlastnosti se u jednotlivých materiálů mohou výrazně lišit dle obsahu ředidel a technologie vytvrzení povlaku. [23]

Tab. 2 Doporučené standardní tloušťky KP [26]

Materiál	Tloušťka [mm]
AR	0,03 - 0,13
ER	0,03 - 0,13
UR	0,03 - 0,13
SR	0,05 - 0,21
XY	0,01 - 0,05

- **Akryláty**

U akrylových povlaků, jako jediných nedochází po nanesení na lakovaný povrch k polymerizaci, proto je zavádějících o nich mluvit jako o „vytvrditelných“. Povlak je vytvořen schnoucím roztokem, již obsahujícím akrylové polymerní řetězce. KP na bázi akrylové pryskyřice jsou rychleschnoucí termoplasty, které DPS výborně ochrání před vlhkostí a růstem plísní. Jsou oblíbené pro jednoduchou technologii nanášení, minimální tepelné účinky při schnutí, dlouhou životnost a lehce upravitelnou viskozitu. Navíc se po odpaření rozpouštědla dále již nesmršťují a kryjí stejný povrch jako po nanesení. Pokud je třeba opravit pájený spoj nebo vyměnit součástku, je možné je po vytvrzení snadno odstranit ředidly. To je bohužel zapříčiněno nízkou chemickou odolností povlaku.

Akrylové povlaky vykazují nízkou teplotu skelného přechodu T_g , po jejímž překročení může nastat roztažení povlaku a případné poškození. Podstatnou nevýhodou je vysoký koeficient teplotní roztažnosti (CTE). Aby nedošlo k poničení osazených součástek, musí být vybrán povlak s podobným koeficientem CTE. Lehká rozpustitelnost v organických rozpouštědlech, je důvodem pro výrobu většiny akrylových povlaků na bázi ředidel. S povlaky vytvrzenými odpařením rozpouštědel jsou spojeny nežádoucí vlastnosti: obsah těkavých organických látek, obtížně udržitelná viskozita, hořlavost a pravděpodobnost reverze (povrchové poruchy KP připomínající zkapalnění například v podobě změkčení, lepkavosti a zblednutí) působením zvýšené teploty a vlhkosti. U povlaků vytvrzených zvýšeným teplem je třeba brát v potaz tloušťku filmu, velikost osazených součástek, možnost smrštění filmu až o 10% a náchylnost k inhibici. Inhibice je jev, při kterém určité chemické látky i v jejich stopovém množství kontaminují katalyzátor tepelného procesu a v dané oblasti zablokují přeměnu povlaku na pevný film. Při technologii vytvrzení UV záření může nastat nedokonalé vytvrzení v zastíněných oblastech, při vysokých teplotách povlak může zkřehnout, být náročnější na opravu a objevuje se štiplavý zápach s vedlejším účinkem podráždění pokožky. [3], [5]

- ***Uretany***

Zatímco jednosložkové polyuretanové povlaky mají dlouhou životnost a jsou jednoduše aplikovatelné, vyžadují delší čas pro vytvrzení. V některých případech se proces vytvrzování urychluje cíleným působením tepla od 60 °C. Dvousložkové povlaky jsou vytvrditelné za využití tepla do tří hodin, ale mají kratší životnost. Ať již jednosložkové či vícesložkové, polyuretanové povlaky poskytují výbornou ochranu proti vlhkosti a chemickým vlivům. Uretanové KP jsou po vytvrzení méně náchylné k abrazi a reverzi na kapalný stav. Zároveň jsou schopny nejlépe udržet dielektrické vlastnosti filmu při stresu vlivem prostředí. U vytvrzení odpařením rozpouštědel je třeba se vyvarovat zvýšené vlhkosti, která negativně ovlivní rychlost procesu a žádané vlastnosti. Dále je třeba uvažovat ochranu zdraví a bezpečnost, přičemž kompletní vytvrzení může trvat až 30 dní. Vytvrzení teplem a UV zářením má shodné problémy jako akrylové KP. Odolnost proti rozpouštědlům může mít stejně jako u epoxidových laků za následek prodražení případných oprav na již vytvrzených sestavách. V praxi je možné se setkat se směsí akrylu a polyuretanu pod označením ARUR. [5]

- ***Epoxidy***

Povlaky se základem epoxidových pryskyřic jsou obvykle použity ve dvousložkových variantách, přičemž mají dobré dielektrické vlastnosti. Mohou být použity do 150 °C s výhodným koeficientem teplotní roztažnosti blízkým epoxidovým substrátům a vyšší hodnotou teploty skelného přechodu. Dále poskytují dobrou odolnost proti mechanickému poškození ve smyslu škrábanců a oděrek. Jsou odolné proti vlhkosti a chemickým vlivům prostředí. To znamená, že jsou téměř chemicky neodstranitelné pro případné opravy na sestavě. Pokud je oprava sestavy opravdu nezbytná, musí být lak porušen mechanicky. Před nanášením je vhodné aplikovat ochranný materiál na křehké součástky, aby nedošlo k jejich poškození při smršťování objemu povlaku během vytvrzování. Intenzivní proces odpařování rozpouštědel je náročný na stanovení poměrů látek a udržení viskozity. Vzniká zde hrozba reverze a nadměrného stresu na film během teplotního cyklování a vlhkosti. Problémy spojené s vytvrzením filmu zvýšeným teplem a UV záření jsou opět shodné s výše uvedenými u akrylových povlaků.[5]

- **Silikony**

Silikonové povlaky nalézají využití v aplikacích, kde elektronické sestavy musí vydržet extrémní teploty a je zde zapotřebí vysoká dielektrická pevnost izolantů. KP na bázi silikonových pryskyřic jsou pružné, odolné proti vlhkosti a UV záření ze slunce. Díky jejich flexibilitě jsou schopny lépe utlumit mechanické nárazy. Nejběžněji uváděný rozsah pro cyklické teplo je od - 55° C do + 200 °C. Díky výborné teplotní odolnosti jsou silikonové povlaky vhodné pro automobilový průmysl a všeobecně na elektronické sestavy, které potřebují odvádět hodně tepla. Mají skvělou adhezi k běžně používaným substrátům, vydrží hodně opotřebení, netrpí na smršťování a mohou i výborně propouštět světlo. Silikonové povlaky se vyznačují nižším povrchovým napětím, které je přibližuje k hydrofobním materiálům a pomáhá povlaku se lépe rozložit pod osazené součástky DPS. Silikony vytvrzené vulkanizací vyžadují při pokojové teplotě minimálně 20 % relativní vlhkost. Jsou znevýhodněny zkráceným časem k manipulaci před vytvrzením a proti mechanickému namáhání formou abraze. Silikonové povlaky mohou být nanášeny dle viskozity v tloušťkách od 45 μm do 200 μm. [5]

- **Parylen**

Průmyslový název Parylen je odvozen od Para-xylylen polymerů. Pro ochranu DPS se využívají jeho odvozené variace Parylen C, D, N a nejnovější komerčně využívaný HT

(High Temperature). Parylen HT vzniká z Parylenu N nahrazením atomu hydrokarbonu v makromolekule N právě fluorokarbonem, tento materiál se také nazývá fluorinovaný Parylen. Jeho unikátnost oproti ostatním konformním povlakům tkví v technologii nanášení nazývané Chemical Vapour Deposition (CVD) neboli depozice z plynné fáze. Tato technologie polymerizace vytváří povlak o konzistentní tloušťce s výbornou přilnavostí, bez děr a bublinek. CVD technologie zajišťuje kompletně konformní nepromokavý povlak, který je hluboko penetrován do povrchu substrátu. Pro uskutečnění polymerizace nejsou vyžadovány rozpouštědla ani katalyzátory. Parylen si nejlépe vede proti chemickým vlivům prostředí a vlhkosti. Dále se vyznačuje výbornými dielektrickými vlastnostmi, mechanickou odolností a nízkým koeficientem teplotní roztažnosti. Tyto vlastnosti předurčují Parylen pro ochranu DPS v drsných podmínkách například proti agresivním rozpouštědlům, solné mlze, krátkodobému ponoření do vody a látkám znečišťujícím životní prostředí. Parylen nalézá využití v automobilovém odvětví, ale vzhledem k možnostem tvorby ostrých hran selektivního povlaku je využíván zejména pro aplikace, kde se netolerují poruchy povlaků například v biomedicině, vojenském, leteckém odvětví a aplikacích vysokého napětí. Za nevýhody Parylenu a technologie CVD patří nutnost vakuově maskovat nelakované oblasti, technologicky náročnější odstranění a opravy, nemožnost in-line nanášení, omezená odolnost vůči UV záření a provozní teplota kolem 120 °C. Novější Parylen HT je však navržen pro provozní teploty až do 350 °C (krátkodobé teploty až 450°C), dlouhodobé vystavení UV záření, nízký koeficient tření a relativní permitivity. Všechny KP mají své výhody a nevýhody, jež určují jejich využití. V níže uvedené tabulce *Tab. 2* jsou pro přehlednost obecně porovnány důležité vlastnosti základních druhů KP. [5], [12], [15], [18], [19]

Tab. 3 Porovnání vlastností konformních povlaků [6]

Druh KP Vlastnosti	Akryláty s rozpouštědly	Akryláty na bázi vody	Uretany	Silikony	Epoxidy	Parylen
Těkavé látky		V				V
Opravitelnost	V					
Cena	V					
Životnost		V				
Teplotní odolnost						V
Chemická odolnost						V
Mechanická odolnost						V
Odolnost vůči solím						V
Voděodolnost				V		V
Depozice	V					
Hořlavost				V		V
Fluorescence	V					
Zdraví a bezpečnost						

Poznámka: Symbol V označuje oblast, ve které daný KP dosahuje výborných hodnot. Zelená barva značí kladné ohodnocení, zatímco červená barva symbolizuje negativní.

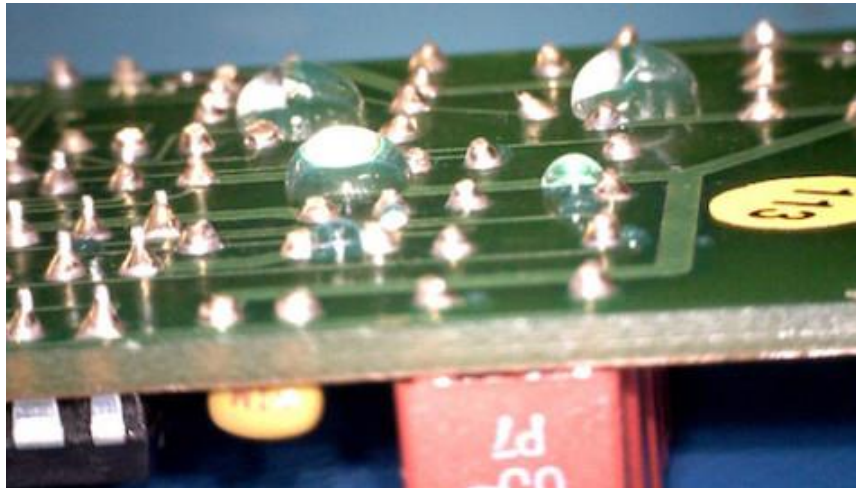
- **Hybridní povlaky – Kopolymer**

Kopolymery jsou dalším směrem pro ochranu osazených DPS, jsou to systémy obsahující více než jeden druh základních pryskyřic. Makromolekula kopolymerů je tvořena z alespoň dvou monomerů o odlišné struktuře. Vhodnou kombinací monomerů lze dosáhnout výjimečných vlastností „ušitých na míru“ dle požadovaných charakteristik. Obsahují zanedbatelné množství rozpouštědel, což je činí vhodnými vzhledem k regulaci uvolňujících se těkavých látek. V současnosti se lze setkat se základními uretanovými pryskyřicemi upravenými skrze silikonové pryskyřice pro zvýšení teplotní odolnosti celého systému. Je zde snaha o získání benefitů z obou základů a zároveň odstranit problémy standardně spojené s druhem pryskyřice jako je u silikonů kontaminace povrchů způsobující nesmáčivost a špatnou adhezi. Dalším průmyslově využívaným hybridním povlakem je ARUR. Jak již zkratka napovídá, jde o kombinaci akrylových a uretanových pryskyřic, za účelem zlepšení chemické odolnosti a flexibility akrylových povlaků. Dalším příkladem hybridních povlaků jsou laky vytvrzitelné UV zářením, které obsahují záložní systém pro vytvrzení oblastí pokrytých stíny od větších součástí DPS. [13]

1.3 Nano povlaky

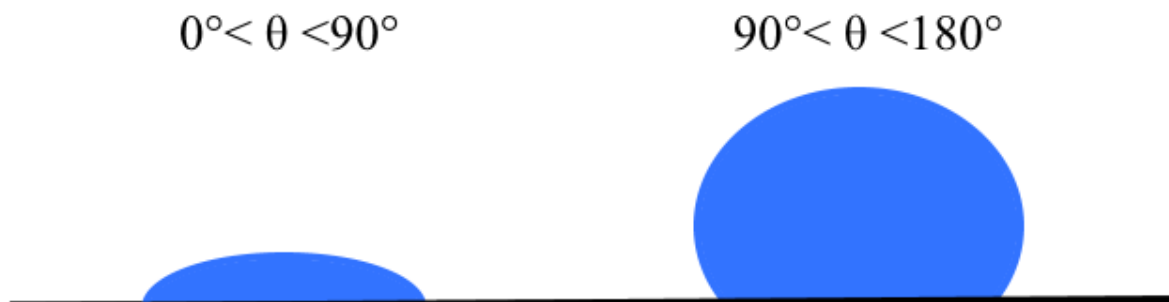
Nano inženýrství umožňuje kombinace jednotlivých atomů do účelově efektivních molekul. Současný elektrotechnický průmysl má ve stále větší oblibě skupinu materiálů

označovaných jako fluoropolymerní povrchové modifikátory. To jsou látky složené z molekul uhlovodíku, ve kterých bylo několik atomů vodíku zaměněno za atomy fluoru. Typicky se fluoropolymery vkládají do fluorokarbonových rozpouštědel, oproti hydrokarbonovým u klasických KP. Povlaky jsou nanášené samostatně o mnohem menší tloušťce v řádech několika mikrometrů. Na rozdíl od KP efektivně mění energii povrchu substrátu. Tyto změny energie ztěžují kapalinám, jako je voda a olej, smáčet chráněný povrch a způsobit korozi.



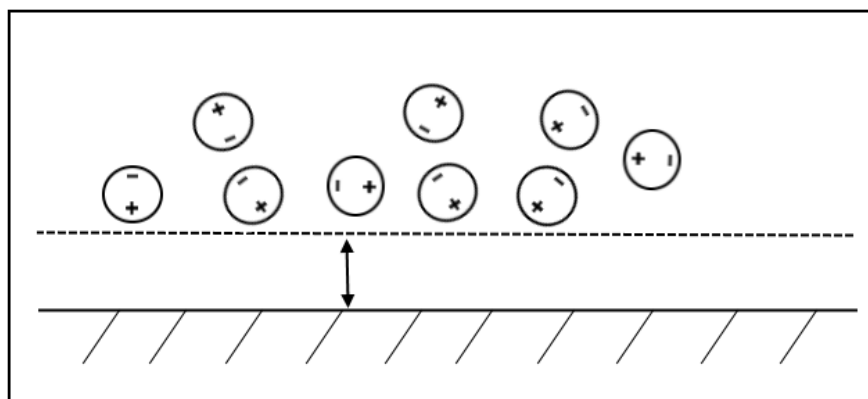
Obr. 1.3 Povrch chráněný hydrofobním nano povlakem. Převzato z [3]

Během vystavení těmto faktorům si dokáží udržet dielektrické vlastnosti. Výhody fluorovaných polymerů pramení z vlastností atomů fluoru a velmi silné vazby uhlík – fluor znázorněné na Obr. 1.6. Vyznačují se nízkou relativní permitivitou a vysokou teplotou skelného přechodu. Z hlediska pomalého stárnutí je výhodná jejich dlouhá životnost. Atomy flóru je činí vysoce odolnými vůči většině hydrokarbonových rozpouštědel. Fluorované nanočástice mají nízké povrchové napětí, jež po depozici umožňuje jejich pohyb k povrchu naneseného laku a snížení celkové energie jeho povrchu. Pokud povlak snižuje energii daného povrchu, nazýváme jej hydrofobním a naopak materiály zvyšující povrchovou energii jsou označovány jako hydrofilní (tj. lehce smáčitelné). Mírou smáčivosti materiálu je úhel theta mezi povrchem substrátu a tečnou vedenou z bodu dotyku s povrchem. Na Obr. 1.4 je znázorněn vztah mezi úhlem smáčivosti a tvarem kapky vody na ochráněném povrchu. [4], [10], [15]



Obr. 1.4 Úhel smáčivosti theta u lehce a těžce smáčitelného povrchu [9]

V porovnání s KP je pro výrobce hlavní výhodou použití velmi tenkých povrchových modifikátorů odpadající nutnost maskovat konektory. Fluoropolymery po nanesení nevytvoří zřetelný lesklý povlak a díky jejich tenkosti se vlivem mechanického namáhání lehce odstraní, při zapojování konektorů do sebe. [4]



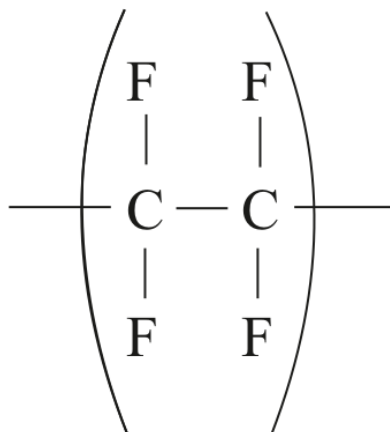
Obr. 1.5 Uspořádání molekul při smáčení hydrofobního povrchu [9]

Na Obr. 1.5 je zobrazen vliv kohezních sil na orientaci molekul vody. U hydrofobních látek převažují soudržné síly mezi molekulami nad přílnými k povrchu. Molekuly se neorientují k povrchu polárně, ale shlukují se ve větší vzdálenosti od povrchu substrátů (0,3 – 0,4 nm). [5], [9]

- **Amorfní fluoropolymer - PTFE**

Nejstarší člen z rodiny fluoropolymerů je polytetrafluoroethylen (PTFE), odvozený z fluorovaného ethylenu, materiál známý pod obchodním názvem Teflon. Kopolymer PTFE má velmi malou energii povrchu a tím odpuzuje téměř vše, zejména vodu, alkoholy a kyseliny. KP se základem fluoropolymerních pryskyřic mají mimořádnou odolnost vůči vysokým teplotám, korozi, chemickým reakcím a mechanickému namáhání. Nové

technologie umožňují použití PTFE povlaků bez rozpouštědel, prvotních nátěrů zvyšujících adhezi nebo nutnosti dodatečného vytvrzení. Odolnost vůči UV záření činí PTFE povlak vhodný pro venkovní aplikace, ale může ztrácet dielektrické vlastnosti vlivem gama záření. Fluoropolymery jsou aplikovatelné jako kapaliny i depozicí z plynné fáze. U tekutých povlaků, je preferováno namáčení, ale mohou být i natírány štětcem nebo nastříkány sprejem. Tloušťka povlaku je určena limitovanou rozpustností. Nejčastěji bývají vloženy do fluorovaných rozpouštědel, které jsou nehořlavé a neobsahují těkavé látky.



Obr. 1.6 Monomer z molekuly syntetického fluoropolymeru PTFE

Při depozici z plynné fáze se monomery plynu v komoře spojí kovalentními vazbami s volnými částicemi v dlouhé řetězce polymerů a na čistém povrchu vytvoří hydrofobní vrstvu. Je zde kladen důraz na nejčistší možný povrch pro dosažení požadované přilnavosti. Nanášení touto technologií s sebou nese snížení odolnosti proti některým kyselinám, zásadám a povrchovému mechanickému namáhání. Jakožto nano povlak je oproti KP vhodnější pro ochranu MEMS a nano aplikací. Hodnota povrchového napětí PTFE v porovnání s dalšími materiály je uvedena v Tab. 3. [5], [12]

Tab. 4 Hodnoty povrchového napětí povlaků [11]

Materiál	Povrchové napětí [N/m]
Akryl	0,040
Uretan	0,040
Epoxid	0,040
Silikon	0,024
Parylen	0,0196
PTFE	0,018 – 0,020
Fluorokarbon akryl	0,011 – 0,014

- **Tloušťka a výkon**

Zásadní vlastnost pro fluoropolymery je jejich voděodolnost. Elektronické zařízení mohou být vystaveny vodě, olejům a dalším kapalinám ve formě vlhkosti, zkondenzovaných kapek, cákanců, deště nebo ponoření. Pro výrobu jsou voděodolné povlaky rozděleny do úrovní s jakou dokáží zařízení ochránit. Výkonnost povlaku je funkcí jeho tloušťky, se kterou se na povrch nanáší. Aplikacím potýkajícím se pouze s potem, zkondenzovanými a kolmo dopadajícími kapkami stačí tloušťky do 3 μm . Povlaky nanášené o tloušťce v rozmezí 5 až 10 μm jsou odolné proti vodě cákající pod větším vertikálním úhlem, sprše i proudu dešťové vody. To je činí vhodné pro elektronické zařízení vystavené soustavným venkovním podmínkám, například elektronika připevněná na domech, hodinky a naslouchátka. Aby se zařízení dalo kompletně ponořit do vody, jsou nutné povlaky o tloušťkách 50 až 100 μm . Využívány jsou zejména u mobilních a chytrých telefonů, jejichž majitelům umožňují je do vody ponořit až na 30 minut. Přestože tyto zařízení nebývají celé hermeticky uzavřeny, poškození jim nehrozí, pokud jsou osazené DPS ochráněny nano povlaky. [20]

1.4 Zalévací hmoty

Pokud cílové prostředí vyžaduje mnohem vyšší nároky na ochranu elektronických zařízení, měly by být místo KP aplikovány zalévací hmoty (ZH) procesem pouzdření. ZH pro elektroniku mohou ochránit jednotlivé součástky, části elektronických bloků, utěšňovat konektory a drobné mezery i zakonzervovat celou osazenou sestavu. Pojem pouzdření v tomto odvětví představuje technologii nanesení ZH v tekuté či pastovité konzistenci před jejich následným vytvrzením. Zalévací hmoty mají společné funkce s KP jako jsou: zamezení kontaminace povrchu a koroze, u vysoko napěťových aplikací zamezení jiskření a korony, zlepšení životnosti bezolovnatého pájeného spoje a omezení důsledků mechanického namáhání. Avšak liší se výrazně větší tloušťkou, většinou neprůhledností a velmi omezenou možností opravitelnosti. S neustálým zmenšováním velikostí součástek, roztečí vývodů, tloušťky substrátů DPS a nárůstem frekvence signálů jsou stále častější požadavky na ochranu osazených sestav před vlhkostí, elektromigrací, růstem dendrit a jiskřením. Spolu s vysokým stupněm izolace pomohou i znehybnit součástky na povrchu DPS. [5], [6], [22]

1.4.1 Materiály ZH

Kromě akrylátů jsou všechny pryskyřice vytvrzeny nevratnou polymerizací s různým stupněm příčných vazeb mezi molekulami reaktoplastů. ZH se dělí na roztékavé a neroztékavé tixotropní, které jsou vhodné pro zalévání malých elektronických součástek a modulů. Pro vývoj a malosériovou výrobu jsou nyní na trhu k dispozici bezrozpouštědlové tavné pryskyřice, jež mohou být roztaveny a použity opakovaně. Pro ZH se používají akrylové, epoxidové, uretanové a silikonové pryskyřice, jejichž charakteristické vlastnosti jsou shodné s již vypsányými v kapitole o KP 1.2.4. U ZH nanášených v řádech několika milimetrů bývají materiály průhledné. Vzhledem k nízké odolnosti akrylátů vůči rozpouštědlům je případná průhlednost výhodou pro ZH a jejich vynucené opravy.

Tab. 5 Požadavky na vlastnosti ZH [21]

Parametr	Požadovaná hodnota	Jednotka
CTE	$10^{-4} - 10^{-6}$	$[K^{-1}]$
Tepelná vodivost	0,1 - 1,2	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
Hustota	1000 - 2000	$[kg \cdot m^{-3}]$
Permitivita	2,1 - 6	[-]
Dielektrická pevnost	10 - 80	$[kV \cdot m^{-3}]$
Doba pro vytvrzení	0,1 - 24	[hod]
Povrchová rezistivita	$10^{12} - 10^{16}$	[ohm]
Viskozita	100 - 300 000	[mPa·s]

Permitivita je významná u vysokofrekvenčních obvodů. Z hlediska hmotnosti, míchání směsi a dávkování jednotlivých složek je důležitá viskozita a hustota ZH. U vyšších hodnot viskozity se ZH prezentují horší roztékavostí do zalévané soustavy. Klíčová je i nutnost maskování, minimální a maximální tloušťka vrstvy, samozhášivost, barva, přilnavost a uvolňování těkavých látek při vytvrzení. Doba, za kterou se ZH vytvrdí je též nazývána doba použitelnosti, po jejím uplynutí se zhruba zdvojnásobí viskozita ochranné vrstvy. K základním druhům pryskyřic je přidáván oxid křemičitý ke zlepšení tepelné vodivosti, viskozity a přiblížení se koeficientu teplotní roztažnosti osazených sestav. [6], [21], [22]

1.4.2 Kritéria spolehlivosti

Spolehlivost je definována jako schopnost produktu fungovat za daných podmínek po určitou dobu. Před samotným výběrem materiálu a technologie ZH, jsou pro výrobce klíčové požadavky zákazníka na spolehlivost, životnost a předpokládané prostředí výrobku. Hlavní faktory ovlivňující výběr materiálů a výslednou úroveň ochrany jsou:

- *Druh substrátu DPS*
- *Konečné povrchové úpravy DPS*
- *Provedení vývodů součástek a vzdálenosti mezi nimi (BGA, PGA, COB)*
- *Izolační vzdálenosti*
- *Integrované obvody*
- *Vlastnosti pájeného spoje*
- *Mechanická konstrukce sestavy*

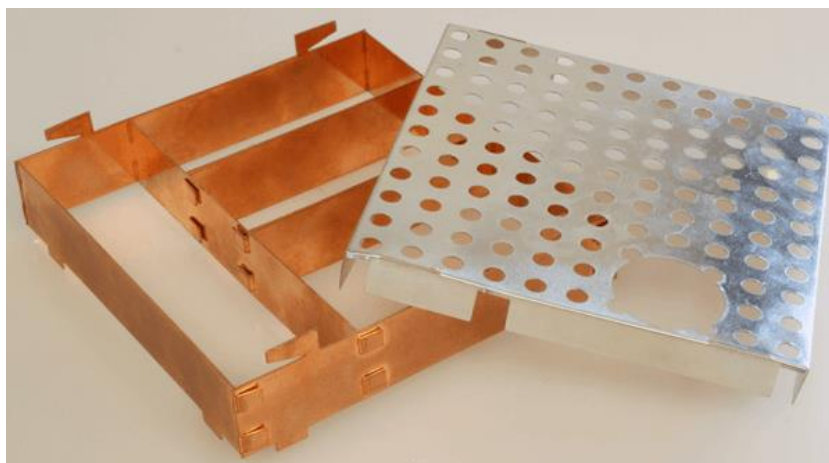
Výrobce musí brát v potaz i materiály použitých součástek (plasty, keramika, kovy, sklo) spolu s jejich lineárními či objemovými koeficienty CTE, modulem pružnosti ve smyku a smáčivostí. Z pohledu změny dielektrické konstanty obvodu jsou ZH nevhodné pro obvody pracující se signály v mikrovlnném frekvenčním pásmu, vysokorychlostní číslicové obvody a s řízenou impedancí. Na druhou stranu jsou téměř nezbytné pro aplikace vysokého napětí a proudu, kvůli poskytnutí lepší izolace mezi vysokonapěťovými vývody než může tvořit vzduch. U obvodů pro velké proudy musí mít ZH dobrou tepelnou vodivost, vysoký bod tavení a teplotu skelného přechodu. Problém nastává u zařízení spojených s vysokým napětím i proudy, protože dobře izolující materiály nebývají dobré tepelné vodiče. [6], [22]

1.4.3 Kaucuky a tmely

U aplikací vyžadujících těsnící materiál disponující měkkostí a pružností jsou vhodné elastomery ve formě tmelů a kaučuků. Pružnost je u těchto materiálů limitována rozsahem teplot. Sestavy ochrání zejména před korozí, vodou, mechanickým a teplotním namáháním. Jejich zástupci na trhu jsou nejčastěji silikony vyznačující se pevností v trhu, dobrými dielektrickými vlastnostmi, samozacelovatelností a přilnavostí k plastům.

1.5 Stínění

Osazené sestavy musí být chráněny i před elektromagnetickým rušením (EMI). EMI elektronických zařízení je způsobeno průnikem vlastního a cizího elektromagnetického pole, jež může omezit normální provoz zařízení. EMI se vyskytuje v umělé i přírodní formě a na zařízení může působit z vnějšího prostředí, navzájem mezi zařízeními i vznikající přímo v samotném zařízení. Dále je třeba brát v úvahu polohu rušení v kmitočtovém spektru, rozeznat úzkopásmové či širokopásmové a nízkofrekvenční do 10 kHz od vysokofrekvenčního do 400 GHz. Zdroji EMI jsou výkonové zařízení produkující vyšší harmonické, elektrické přístroje nízkého napětí (stykače, měniče, spínané napájecí zdroje), zářivky, rozhlasové a televizní vysílače, signály mobilního přenosu GSM, bluetooth a další. Proto je nutné ochránit náchylné části osazených sestav stíněním. Jako stínění či štít před EMI se tradičně používá elektricky vodivá klec z hliníku, oceli, niklu nebo slitin niklu a železa poskytující bariéru schopnou odrazit či absorbovat rušící signály.



Obr 1.7 Ukázka stínění s ventilací. Převzato z [25]

U stínění částí sestav se zvýšeným tepelným zářením je běžná jejich proděravěná variace s ventilací viz *Obr 1.7*. Na obrázku je též vidět zahloubení do stínění, aby se zabránilo zkratům s vodivým motivem. Stínění lze provést ze svrchu odnímatelného i nerozebíratelné provedení, s otvory pro vývody i částečně otevřené. Hlavní nevýhodou takto provedeného stínění je jeho váha, která má výrazný vliv na hmotnost celé sestavy. Další možnost ochrany před EMI naskýtají termoplasty s vodivou vrstvou vytvořenou buď pokovením, nebo vysoce vodivými povlaky. Plasty jsou technologicky jednodušší a rychlejší na výrobu. Cena a dopady na životní prostředí jasně upřednostňují vodivé povlaky, výrazně dotované kovovými částicemi na bázi epoxidových pryskyřic. [24], [25]

2 Technologie konformních povlaků

Prvním krokem je určit před čím má být elektronika chráněna a zda sestava může být lakována. Po výběru materiálu se definují nelakované oblasti, kritéria přijatelnosti a požadovaná tloušťka povlaku. Dalším krokem je navržnutí samotného procesu nanášení a vytvrzení. Vhodné povrchy pro lakování musí být důkladně vyčištěny, zatímco nevhodné povrchy zamaskovány. Povlak se nanese, přičemž se odmaskovává před nebo po vytvrzení a na závěr následuje inspekce povlaku převážně pod UV světlem či případné opravy. [31]

2.1 Příprava povrchů

Klíčem k úspěšnému nanesení povlaku je mít čistý a suchý povrch. Spolu se zvyšujícím se používáním KP se projevil i významným vliv na míru poruchovosti jimi ochráněných elektronických obvodů. V začátcích sedmdesátých let vše vyvrcholilo fatálními poruchami armádní techniky, což vedlo ke kladení důrazu na pochopení chování KP a zlepšení čistících procesů. Příprava povrchů před nanášením je kritická pro dobrou smáčitelnost, přilnavost, výkon KP a následnou spolehlivost celé sestavy. Prioritou je povrch očistit od různých druhů tavidlových zbytků po pájení, prachu, vodivých částic a uvolňovacích činidel z osazených součástek. Zvážit se musí i vlastnosti použité nepájivé masky. Pod přípravu povrchů spadá i skladování a vysušení osazených sestav před samotným lakováním, kdy jsou běžně vystaveny 100 °C po dobu 1 hodiny nebo alespoň skladovány v suchém prostředí pro zamezení výskytu vlhkosti. [30]

2.1.1 Čištění

Proces čištění musí být schopný odstranit elektricky vodivé i nevodivé znečištění a zároveň nesmí svojí agresivitou poničit součástky, pájený spoj a značky na DPS. Nejpodstatnějším zdrojem znečištění je proces pájení a proto je důležité znát druh tavidel obsažených v pájce. Existuje mnoho druhů tavidel a jejich zbytky po pájení vyžadují odlišné technologie pro odstranění. Tavidlové zbytky mohou být na základě kalafuny (pryskyřice), syntetických pryskyřic či vodě rozpustných sloučenin. Čištění je zásadní i z pohledu růstu měděných dendrit mezi vodivými cestami, které jsou ovlivněny přiloženým napětím, vlhkostí a nečistotami. Jelikož manuální čištění například štětcem vždy zanechá nečistoty na povrchu nebo pod komponenty sestavy, je v praxi nutné pro čištění využívat automatické linky. Osazené sestavy jsou v dávkách postupně vystaveny

fázím mytí, oplachování a schnutí, uspořádané v řadě nebo odstředivě dokola. Tato čistící zařízení mohou využívat pouze vodu, částečně vodné roztoky nebo rozpouštědla dle předpokládaných nečistot. Pro čištění bez olovnatých sestav je běžný cyklus mytí 8 minut při 62 °C, 8 opláchnutí a schnutí po dobu 12 minut při 66 °C. [32]

2.1.2 Možnosti ochrany

Pokryty by měly být všechny vodivé motivy na DPS, všechny dostupné pájené spoje a vývody součástek. Není nutné povlak nanášet na prázdné oblasti, kde povlak má pouze kosmetický důvod. Na druhou stranu výčet oblastí, kde by povlak obecně neměl být nanesen je zajímavější. Lakování by neměly být elektromechanické součástky vyžadující ke své funkci pohyb nebo doladování, například potenciometry a nastavitelné kondenzátory. Kapacita KP přidaná jeho nanesením má neblahý vliv na frekvenční filtry. Silné vrstvy KP vadí i patičím, pinům, konektorům a místům vyžadujících následný přístup k vodičům (testovací body, zemnicí body). Až na výborně průhledný Parylen jsou KP nepřáteli i pro optoelektroniku. Lakování by se měly vyhnout i baterie a neuzavřené součástky, jako jsou přepínače a relé. Na závěr je důležité nenanášet povlak na součástky s příliš rozdílným koeficientem CTE. [5]

2.1.3 Penetrace povrchu

Přilnavost povlaků se obecně vyvíjí spolu s časem od tří dnů až po několik měsíců. Další možností jak zlepšit přilnavost a smáčivost povrchu je ho po čištění penetrovat prvotním nátěrem nazývaným „Primer“. Dobré přilnavosti je dosaženo pouze, pokud je povrch dostatečně silný k udržení vazeb. U těchto nátěrů platí čím tenčí vrstva, tím lepší přilnavost. Tloušťky vytvrzených prvotních nátěrů se pohybují od 1 do 10 μm, přičemž nejlepší přilnavost vykazují při 1 μm. Prvotní nátěry se používají u silikonových povlaků a zejména Parylenu. Pro zlepšení smáčivosti může být povrch upraven i plazmou, kdy jsou odhalené povrchy upraveny ve vakuové komoře pomocí plynné plazmy. Tato technologie je rychlý způsob jak bez dopadů na životní prostředí povrch upravit a tím snížit jeho povrchovou energii. Plazma je využívána i k čištění. [5]

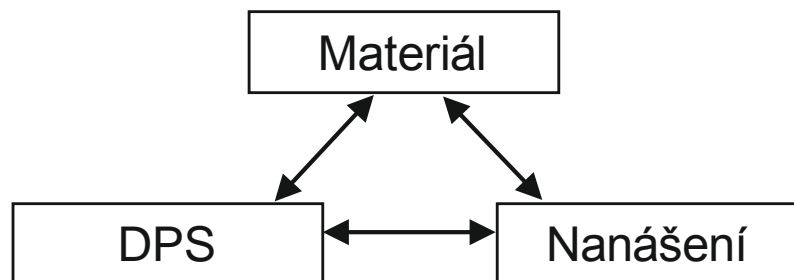
2.1.4 Maskování

Posledním krokem jak připravit povrchy, jež nesmějí být pokryty, je před nanášením povlaků jejich maskování. Většina maskování probíhá manuálně od operátorů, i

když existují linky pro aplikování kapalných masek. U KP nanášených sprejováním je maskování provedeno ve formě štítu, jež pod sebou kryje nelakovaný povrch. Sestavy, které jsou ponořovány do lázně, vyžadují maskování ve formě zapouzdrnění. Maskování pro vakuovou depozici musí být vzduchotěsné a přežít ve vakuu. Maskování může být provedeno ve formě pásky, nasouvacích krytů a vytvrditelných kapalin. Při odmaskování je třeba dbát na nepoškození KP, součástek a DPS. [5]

2.2 Nanášení

Technologie nanášení musí být zvážena již při výběru materiálu. Povlaky mohou být na DPS aplikovány mnoha způsoby a vhodnost těchto metod se liší podle: kompatibility s KP, technické konstrukce DPS, množství lakovaných sestav, ručního či automatického procesu a úrovně spolehlivosti. Celkový přístup ke zpracování KP uvažuje materiál, proces nanášení a DPS jako celek. Při hledání optimálního procesu KP musí být tyto jeho tři části v rovnováze pro nalezení nejvhodnějšího kompromisu.



Obr. 2.1 Vazby procesu KP

Toto uvažování zabrání nesouladu v údajích spolehlivosti mezi testovacím a výrobním provozem. Každá metoda má své výhody a nevýhody, jež jsou popsány níže. [34]

- **Ruční postřik**

Tato neselektivní technika se používá u lakování malých výrobních objemů. Proces nanášení povlaků ručním postřikem může být proveden ve formě aerosolu nebo ruční stříkací pistole se stlačeným vzduchem. Technika je úzce spjata s dovednostmi operátora, jež ovlivňují výslednou uniformitu povlaku. Přes nízké počáteční náklady je zde využití materiálu pouze 25 až 40 % vlivem nadměrných vrstev a lakování i maskovaných oblastí. Obě techniky se provádějí v horizontální pozici ve 4 krocích, kdy se deska otáčí po 90°. Výhodou ručních stříkacích pistolí je možnost nanášet povlaky s vyšší viskozitou i bez obsahu ředidel. Ruční postřik je hodnocen jako vysoce kvalitní z pohledu dobrého pokrytí

hran. Z hlediska financí hraje nejpodstatnější roli množství lakovaných sestav. U ručního postřiku je nutné maskovat a mít dobře odvětrávané prostory spolu s vysoce kvalifikovaným operátorem. [6], [34]

- ***Máčení***

Osazená sestava se zcela či částečně ponořuje do nádrže s tekutým povlakem. Sestava může být ponořena pod jakýmkoliv úhlem ručně nebo automaticky a po vyjmutí z nádrže odkape nadbytečný materiál. O kvalitě povrchu povlaku rozhoduje rychlost ponoru, doba setrvání v nádrži a rychlost vyjmutí. Tyto parametry spolu s viskozitou určují kvalitu a náklady na proces. Technika je vhodná pro lakování velkého množství sestav. Za výhody lze uvést rychlost procesu, možnost ponořit vícero desek najednou, oboustranné nanesení a nenáročný proces pro operátora. Máčení vyžaduje maskovat a nedoporučuje se u KP vytvrzených vlhkostí a UV zářením. [6], [34]

- ***Natírání***

Manuální nanesení povlaku štětcem je náročné na operátora a je limitováno malým množstvím natíraných desek. Tento způsob aplikace se nejčastěji používá při opravách, neboť je obtížné dosáhnout rovnoměrného povlaku přes celou sestavu. Výhodou je odpadající nutnost maskovat a nízké pořizovací náklady.

- ***Selektivní lakování***

Selektivně nanášený povlak skrze automatizovaný robotický systém je v současnosti vedoucí technologií využívající rozprašovací ventily či dávkovací jehly. Přínos technologie selektivního lakování tkví ve zredukování maskování. Selektivní proces záměrně nenanáší povlak na oblasti, které běžně vyžadují maskování, jako jsou například mechanicky namáhané konektory. Jehlové ventily mohou nanášet tečky či kuličky k doplnění kolem maskovaných ploch. Úroveň pohybu robota se může lišit v závislosti na počtu os pohybu. Osy mohou být i naklápěcí a s jejich počtem roste i flexibilita procesu. Některé linky mají tři, čtyři, pět nebo dokonce až šest os pohybu s rozstříkovacími ventily. Je zde velmi důležité přiřadit k vybranému materiálu správný typ rozstříkovacího ventilu. Robotické linky vyžadují odborníky pro nastavení viskozity KP, sladění ventilů a naprogramování. Technologie je určena pro výrobu s velkým objemem, kde uplatní svoji rychlost a jednoduchost již zaběhnutého procesu. I přes vysoké počáteční investice je zde velký prostor pro jejich návrat. [34]

- **Chemická depozice z plynné fáze - CVD**

Depozice z plynné fáze je na rozdíl od ostatních „kapalných“ technologií, suchý proces. Technologie CVD je neselektivní finančně náročná volba výhradně spjata s Parylenem a fluoropolymery. Po vytvrzení prvotního nátěru je původně bílý prášek na osazenou sestavu nanášen ve vakuové komoře polymerizací z plynné fáze. Plynný proces umožňuje povlaku proniknout do všech odhalených zákoutí a vytvoření velmi tenké vrstvy. Je to vhodná volba pro kompletně pokryté sestavy, vyžadující ten nejlepší možný stupeň ochrany od KP. Povrch takto naneseného povlaku má nejlepší uniformitu, výborné dielektrické vlastnosti, velmi nízkou propustnost povrchu a dlouhodobou stabilitu. Parylen je i velmi odolný proti rozpouštědlům a solné mlze. Díky průhlednosti umožňuje pokrývat i optoelektronické součástky. Vlivem časové náročnosti je CVD obecně nízká objemová technologie a vyžaduje nejvyšší úroveň maskování. [5], [6], [34]

2.3 Vytvrzení

Pro vytvoření ochranného filmu musí dojít k odstranění rozpouštědel a ředidel ze struktury povlaku. Ve druhé fázi přeměny změní filmotvorné látky svoji chemickou strukturu za pomoci polyimidačních, polykondenzačních, polyadičních pochodů a oxidací. Poté dojde na povrchu k vytvoření pevné a pružné vrstvy. Z pohledu spolehlivosti je důležité si neplést uschnutý a vytvrzený povrch. Za uschnutý je povrch považovaný již po několika minutách či hodinách, kdy s ním mohou operátoři manipulovat. Schnutí je velmi důležité u akrylových povlaků, které nepolymerizují, nýbrž pouze vyschnou. Proces schnutí je ovlivněn rychlostí odpaření rozpouštědel, teplotou a vlhkostí okolí, tloušťkou povlaku a prouděním vzduchu kolem povrchu. Povrch je považován za vytvrzený, pokud dosáhl optimálních elektrických a mechanických parametrů. Existuje řada různých mechanismů vytvrzování. Patří mezi ně: [33]

- **Pokožovou teplotou**

Vytvrzení při pokojové teplotě je relativně pomalý proces. Povlak se vytvrdí při běžných podmínkách okolního prostředí. Jedná se o druh povlaků, které dosáhnou svých vyžadovaných vlastností i bez vnějšího vlivu. Pro zacházení tedy stačí, aby povlak byl uschnutý a časem sám získal optimální parametry. [5]

- **Teplem**

Konformní povlaky, které se vytvrzují při zvýšených teplotách. Za normálních teplotních podmínek se povlaky nezačnou vytvrzovat, pokud se nevystaví požadované teplotě. Jsou obvykle mnohem rychleji vytvrzené než povlaky schnoucí při pokojové teplotě. Některé povlaky teplo vyžadují, zatímco jiné jej využívají jako prostředek k urychlení procesu. Jako zdroje tepla jsou využívány infračervené lampy nebo pece. [5]

- **Vlhkostí**

KP reagují s vlhkostí obsaženou v okolním prostředí a vytvrzují se postupně zvenku do hloubky. Objem vlhkosti ve vzduchu má přímý vliv na rychlost iniciace začátku a průběh vytvrzování. U těchto povlaků je možné proces podpořit dodatečným teplem do 65 °C či zvýšenou vlhkostí. [6], [33]

- **UV zářením**

Mechanismus vytvrzovací reakce využívá jako spouštěč ultrafialové záření. Povlaky s tímto mechanismem mají většinou druhý záložní mechanismus pro pokračování vytvrzování i v zastíněných oblastech. Započetí a účinnost vytvrzení jsou ovlivněny vlnovou délkou a intenzitou UV záření. Záložním mechanismem může být vlhkostní nebo katalytický systém. [5], [33]

- **Katalytické**

Dvousložkové povlaky, u kterých započne vytvrzování, jakmile jsou jeho složky ve vzájemném kontaktu. Tužidlo obsažené v katalyzovaných povlacích chemicky reaguje s druhou složkou a povlak začne schnout. Obvykle je do těchto materiálů začleněný i primární mechanismus spouštěný UV zářením nebo teplotou k urychlení procesu. Katalytické vytvrzení je časté u bezrozpouštědlových povlaků. To s sebou přináší výhody, kdy se skrze povrch povlaku nedere odpařující se rozpouštědlo a nevznikají poruchy. [5]

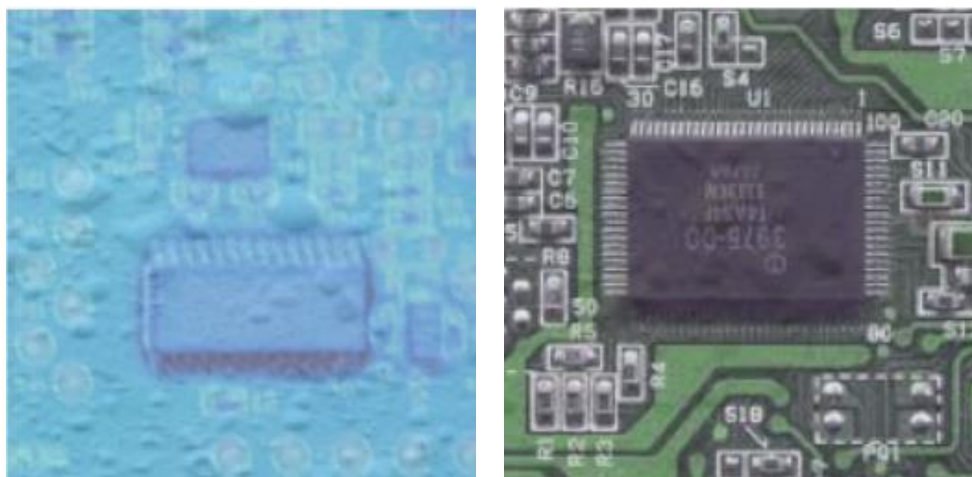
3 Poruchy konformních povlaků

Poruchy KP jsou spojeny s technologií jejich zpracování nebo se spolehlivostí produktu z krátkodobého, střednědobého či dlouhodobého hlediska. Časově závislá spolehlivost osazené sestavy je ovlivněna mnoha faktory nesouvisejícími s KP, a proto je tato kapitola zaměřena na poruchy spojené s procesem zpracování. Ideálně vytvrzený uniformní povlak by měl být beze ztráty přilnavosti, děr, bublin, uvězněných cizích předmětů, ztráty barvy či průhlednosti, prasklin a dalších níže vypsanych poruch KP. Poruchy zpracování povlaků lze obecně rozdělit do tří skupin. [29]

- *Poruchy způsobené nesprávným výběrem materiálů*
- *Poruchy způsobené chybným maskováním v průběhu výroby*
- *Poruchy spojené s procesem zpracování povlaků*

3.1 Puchýře

Tato porucha způsobuje oválné, či kruhové formace v povlaku. Oblasti s hustým výskytem puchýřků mohou vyvolat formu delaminace nazývanou v angličtině „Mealing“. Puchýřky mohou vznikat jak v samotném povlaku, tak na jeho rozhraní s chráněným povrchem, přičemž jsou puchýřky tlačeny od povrchu ven. Puchýře mohou být způsobeny špatnou přilnavostí povlaku vlivem nečistot, odlišných povrchových energií, vlhkostí na rozhraní povlak a chráněný povrch nebo nesprávnou intenzitou vytvrzení povlaku.



Obr. 3.1 Ukázka puchýřků pod UV inspekcí a delaminace „Mealing“. Převzato z [29]

Pokud se vlhkost dostane pod povlak, vznikne změnou teploty tlak, který povlak nadzvedne od povrchu. Pro snížení rizika výskytu puchýřků je důležité zlepšit čistotu povrchů, zvolit vlhkost nepropustný povlak, snížit teplotu v průběhu vytvrzení nebo

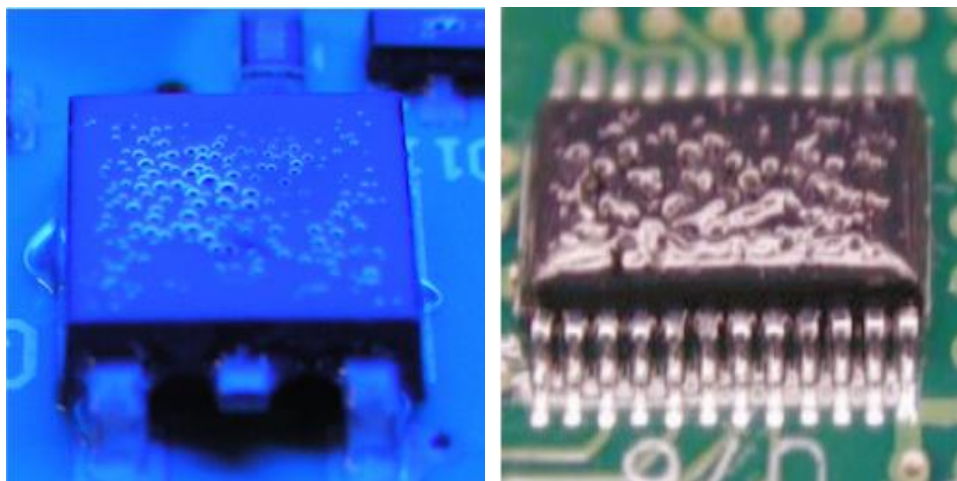
zmenšit tloušťku povlaku. Změnou konečných úprav povrchu nepájivé masky a laminátu, lze přizpůsobit povrchové energie a použitím základového nátěru zlepšit přilnavost povlaku. [5], [29], [30]

3.2 Povrchové zbělení

U povlaků vytvrzených při vysoké relativní vlhkosti (~80 %) nebo nízkých okolních teplotách se vyskytují flekaté, mléčné či „zatažené“ oblasti. Odpařující se rozpouštědlo snižuje teplotu povlaku a způsobí zkondenzování vlhkosti na povrchu filmu. Na tomto jevu se také podílí absorpce vody a uhlíku. Mezi další doprovodné poruchy lze uvést: povrchovou lepivost, mastnotu, ztrátu zbarvení, lesku a přilnavosti. Vhodným protiopatřením je udržovat relativní vlhkost při zpracovávání povlaku na 40 – 60 % a zamezit kolísání teplot. [29], [35]

3.3 Bubliny, dírky a pěna

Všechny tři poruchy jsou svým způsobem vzniku spolu propojené. Zatímco bublina je uvězněná kapsa v povlaku, dírky jsou bubliny, které se prodraly až k povrchu a pěna je případ extrémního výskytu bublin.

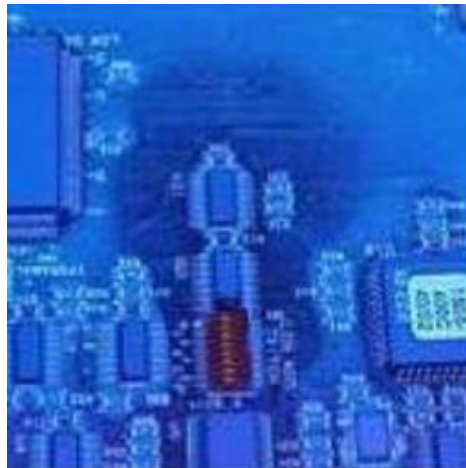


Obr. 3.2 Ukázka pěny pod UV inspekcí a děr v povlaku. Převzato z [26], [29]

Za hlavní příčinu tohoto jevu lze považovat zachycení rozpouštědla pod povrchem uschnutého filmu. Důvodem může být příliš rychlé schnutí a nanášení vícero vrstev rychle na sebe. Další příčinou bývá vzduch uvězněný pod součástkami, jež je při vytvrzování vytlačován k povrchu. Bubliny vznikají i u nadměrně viskózních povlaků nanášených štětcem a při sprejování pod velkým tlakem. U nanášení povlaku ponořem je vhodnější sestavu ponořovat pomaleji a prodloužit setrvání v ponoru. [5], [26], [29]

3.4 Odtážení

V angličtině „Capillary flow“ je pojem popisující oblast povlaku, kde se povlak stáhl pryč nebo pod blízké komponenty DPS. Povlak se stáhne do příznivějších oblastí, což zanechává nerovnoměrně ochráněný povrch.



Obr. 3.3 Odtážení povlaku pod UV inspekcí. Převzato z [29]

Odtážení je častější jev u povlaků s příliš malou viskozitou, kdy povlak pronikne mnohem snadněji pod součástky. Příčinou mohou být i problémy s nadbytečným množstvím nevytvrzeného povlaku, nečistotami na povrchu a velkým povrchovým napětím. Obrana proti tomuto jevu je zahřátí lakované desky, aby povlak uschl rychleji a omezila se jeho pohyblivost. [28], [29]

3.5 Koroze

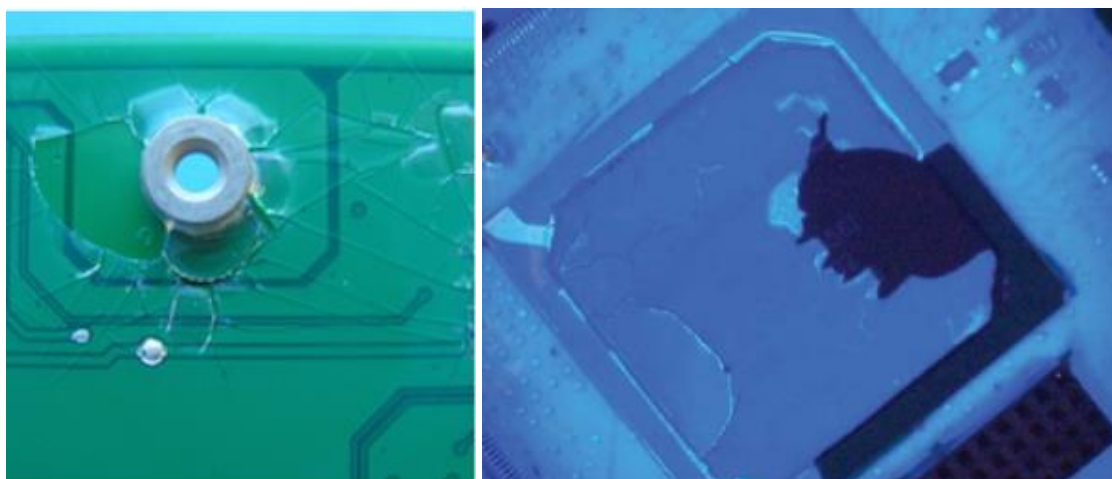
V elektrotechnice je koroze chemická nebo elektrochemická reakce mezi kovy a jejich prostředím, způsobující znehodnocení materiálu. Nejčastěji se lze setkat s galvanickou korozí a elektrochemickou migrací. Prakticky všechny kovové materiály použité na osazených sestavách jsou ve vlhkém prostředí, bohatém na agresivní ionty, náchylné ke vzniku koroze. Hlavními činiteli koroze jsou atmosférický kyslík, kontaminace nečistotami a kyseliny. Zdroje kontaminace jsou:

- *Z výroby substrátu*
- *Z osazených součástek*
- *Zbytky tavidel z procesu pájení*
- *Ze špatného čištění a znečištěním od operátora*

Povlaky mají za úkol zamezit nebo zpomalit vznik koroze. Před jejich nanesením je kritické zlepšit procesy čištění sestav a vybrat správné materiály s minimálním obsahem tavidel.

3.6 Popraskání

Praskliny jsou poruchy v místech, kde je hladký povrch povlaku rozlámáný do sekcí. Popraskání může nastat v krátkodobém, střednědobém i dlouhodobém horizontu. Praskliny v povlaku v jejich místě výskytu umožňují proniknutí případné kontaminace skrz povlak na neochráněný povrch. Tím mají voda, vlhkost a nečistoty volnou cestu ke způsobení dalších poruch povlaků jako je koroze.



Obr. 3.4 Ukázka popraskání povlaku. Převzato z [5], [29]

Popraskání se vyskytuje působením teplotního stresu šokem u obvodů pracujících při příliš vysoké či nízké teplotě. Z pohledu zpracování KP je důvodem vzniku příliš velká tloušťka povlaku a zvýšená teplota pro urychlení vytvrzení, kdy svrchní vrstva povlaku uschne dříve než zbytek a dojde k popraskání. Je tedy vhodné před zvýšeným teplem povlak vystavit pokojové teplotě. [5], [26], [29]

3.7 Delaminace

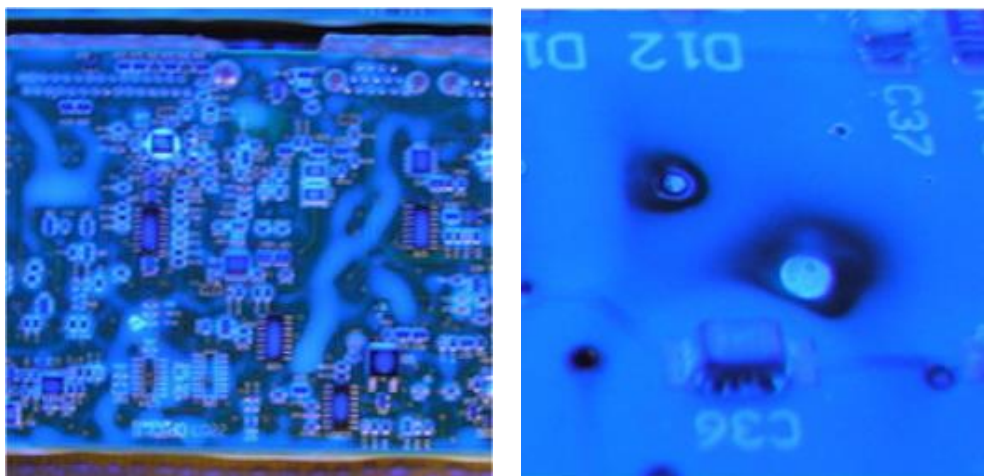
Delaminace KP je projevem jeho nadzvednutí nad povrch substrátu. Hlavními spouštěči odlamování povlaku je jeho nedokonalá přilnavost a nesmáčivost vyvolaná nečistotami z prostředí, ve kterých se sestavy nacházely před samotným lakováním. A dále odlišnými povrchovými energiemi, velkou tloušťkou povlaku a vysokou propustností pro vlhkost. Jako prevence delaminace je vhodné odmaskovat součástky ještě před úplným uschnutím povlaku. [27], [28]



Obr. 3.5 Delaminace špatně přilnutého povlaku po zkoušce řezem. Převzato z [5]

3.8 Nesmáčivost

Porucha se vyskytuje u rovnoměrně nanesených povlaků, ale povlak zde odmítne smáčet povrch a utvoří se kaluže. Porucha bývá vlivem kontaminace spíše lokální povahy, ale při velkém znečištění může být problém přes celou desku.

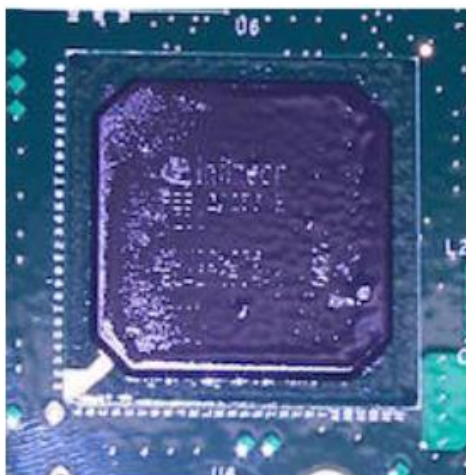


Obr. 3.6 Nesmáčivost ve formě kaluží a rybích ok pod UV inspekci. Převzato z [29]

Za faktory spouštějící poruchu smáčivosti se uvádějí silikonové oleje z lepidel, činidla uvolňující se ze součástek, silikonové částice z nepájivé masky, některé čisticí rozpouštědla a nečistoty z pájení nebo výroby DPS. Opět je tedy stěžejní kontrola čistoty laminátu a součástek, plus je nutné zkontrolovat kompatibilitu nepájivé masky s ochranným povlakem. V místě poruchy se ještě v průběhu zpracování povlak lokálně odstraní a nanese správně znovu. Další formou nesmáčivosti jsou lokální poruchy připomínající rybí oka, jež vznikají při přelakování silikonových částic. [28], [29]

3.9 Pomerančová kůra

Tato porucha se projevuje nerovnoměrnou strukturou na povrchu povlaku. Povrch struktury je často matný a podobá se povrchu kůry pomeranče či povrchu golfového míčku. Pomerančová kůra je často způsobena špatnou technologií nanášení. Porucha vzniká při sprejování z moc velké vzdálenosti (malý tlak vzduchu), kdy povlak dopadá na povrch již částečně uschnutý a nedokáže se vyrovnat. Dále u příliš tlustých vrstev povlaku, vysoké viskozity a nadměrných vytvrzovacích teplot způsobujících moc rychlé odpařování rozpouštědel.



Obr. 3.7 Ukázka pomerančové kůry. Převzato z [29]

Pro hladký a rovný povrch povlaku musí mít rozprašovací tryska či jehla dostatečný výkon a být kompatibilní s použitým povlakem. Zároveň je vhodné prodloužit čas poskytnutý k odpaření rozpouštědel před zvýšením teploty k urychlenému vytvrzení povlaku. U povlaků nanášených aerosolem se požadované úrovně tloušťky dosahuje opakovaným nanášením. [29]

3.10 Stínování

U sprejování sestav s velkými nebo vystouplými součástkami se objevuje porucha stínování. Projevuje se v místech, kde je nanášení povlaku zablokováno jinou součástí obvodu osazené DPS a nevznikne zde souvislá vrstva. Výskyt je pravděpodobnější u sestav s objemnějšími chladiči, kapacitory a THT součástkami. Jako protiopatření je nejlepší nanášet povlak postřikem pod úhlem 45°, nanášet tenkou vrstvou a otáčet desku po 90° s opakovaným postřikem. [29]

3.11 Nerovnoměrnost

Za nerovnoměrný je povrch povlaku považovaný, pokud je v daném místě jeho tloušťka mimo rozsah požadovaných hodnot. V oblastech kde je povlak příliš tenký není schopen poskytnout očekávanou úroveň ochrany, zatímco moc tlusté vrstvy mohou vést k již výše popsaným poruchám, jako jsou bubliny, popraskání či delaminace. Vzlínáním se povlak může vytáhnout pod součástky a vyplnit prostor pod nimi velmi tlustou vrstvou, zatímco vzniknou místa bez povlaku. Nerovnoměrnosti jsou způsobeny i vlivem gravitace, povrchového napětí, chybným opětovným přelakováním či povlakem uvězněným v kapsulích po lakování ponorem. [29]

4 Experiment

Úkolem praktické části bylo navrhnout experiment, který vystaví vybrané KP umělému zestárnutí definovanými zkušebními metodami a porovná jejich vlastnosti. Při experimentu byly provedeny tři vybrané zkušební metody dle standardů IPC (Institute of Printed Circuits) a české technické normy. Jednalo se o zkoušku solnou mlhou, vlhkým teplem cyklickým a teplotním šokem. V průběhu návrhu experimentu jsem určil faktory, jež mají největší vliv na měřitelné výstupy.

- **druh substrátu DPS**
- **druh povlaku**
- **zda byla DPS před zkouškou očištěna**
- **forma zestárnutí**

Zkoušky byly provedeny v klimatických komorách na půdě regionálního inovačního centra elektrotechniky. Laboratoře RICE jsou vybaveny klimatickými a tepelnými komorami pro ověření funkčnosti a vlastností elektrických zařízení za působení simulovaných podmínek vlivů prostředí. Tepelné komory jsou schopné nasimulovat relativní vlhkost 10 až 98 % a teploty v rozsahu -70 až 2200 °C.

4.1 Vybrané povlaky

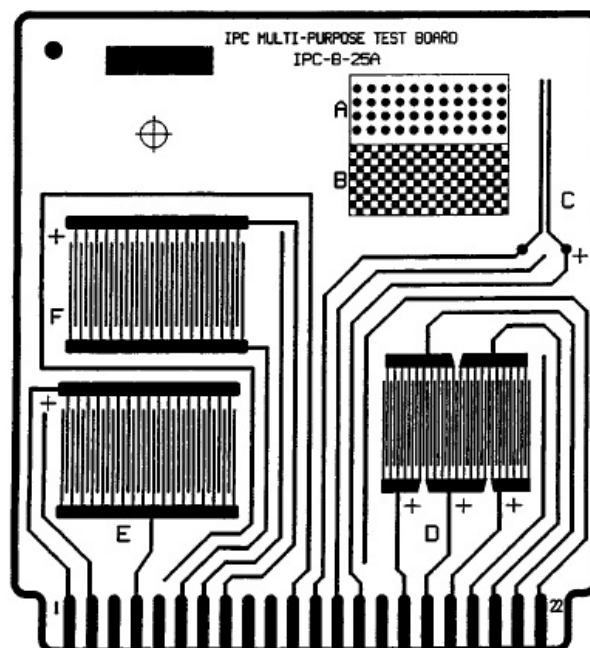
Pro experiment byly pořízeny 4 KP ve formě aerosolového rozprašovače a nano povlak Novec 1700 v láhvi od společnosti 3M. KP byly zastoupeny povlaky Plastic UV (AR), Urethane Clear (UR), Plastic Seal 60 (SL1) a Isotemp (SL2). Pátým povlakem byl nano povlak 3M Novec 1700, fluoropolymerní modifikátor povrchové energie, založený na fluorované akrylové pryskyřici rozpuštěné v hydrofluoroéterovém rozpouštědle.

Tab. 6 Od výrobců uvedené vlastnosti zkoušených povlaků

Parametr	Plastic UV	Urethane Clear	Plastic Seal	Isotemp	Novec	Jednotka
Dielekt. pevnost	21	82,9	20	110	-	[kV/mm]
Teplotní rozsah	-70 až 120	-40 až 130	do 250	-45 až 300	-	[°C]
Izolační odpor	$1 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{15}$	$7,5 \cdot 10^{16}$	-	[ohm]
Viskozita	12	12	-	220	-	[-]
Vzhled	Bezbarvý	Bezbarvý	Bezbarvý	Bezbarvý	Bezbarvý	[-]
Hustota	0,88	0,93	0,82	1,04	-	[g/cm ³]
Permitivita	-	2	-	3,09	3,1	[-]

4.2 Zkušební vzorky

Pro zkoušky byly použity DPS s jednostranným motivem dle standardu IPC. Jedná se o víceúčelový motiv s označením IPC-B-25A. Na desce lze najít tři normované motivy (E, F, D) pro měření izolačního odporu a jeden motiv s označením C pro měření elektrické pevnosti. Vzorky byly navrženy jako věrné kopie na katedře technologií a měření ZČU a vyrobeny společností PCB Benešov. Vodivé motivy svými parametry odpovídají i zkušebním metodám dle české technické normy.



Obr. 4.1 Vzor pro zkušební vzorky IPC B-25A

Vyrobeno bylo sto kusů DPS se substrátem FR-4 a padesát s flexibilním substrátem Kapton. Rozměry DPS byly 10x11,4 cm, vodivý motiv byl z holé mědi bez nepájivé masky. Vzorky se substrátem FR-4 byly jednovrstvé o celkové tloušťce 1,6 mm a teplotou skelného přechodu 175 °C. Kontakty pro měření byly vyvedeny na dolní hraně s roztečí 4 mm. Před nanášením povlaků bylo 50 vzorků z FR-4 a Kaptonu očištěno v roztoku isopropylalkoholu a destilované vody v poměru 1:1. Vzorky se ponořovaly do lázně v čističce po 5 minutách a poté byly před nanášením povlaků přemístěny na 24 hodin do odvětrávané pece s nastavenou teplotou 50 °C. Následně byly na vzorky dle uvedených pokynů postřikem aerosolu nanášeny vybrané KP a štětcem natřeny nano povlak Novec 1700. Vzorky se opět vložily do pece při 50 °C a nechaly dostatečně vyschnout a vytvrdit. Rozdělení zkušebních vzorků dle vstupních faktorů je zřehledněno viz Tab. 7.

Tab. 7 Plán experimentu

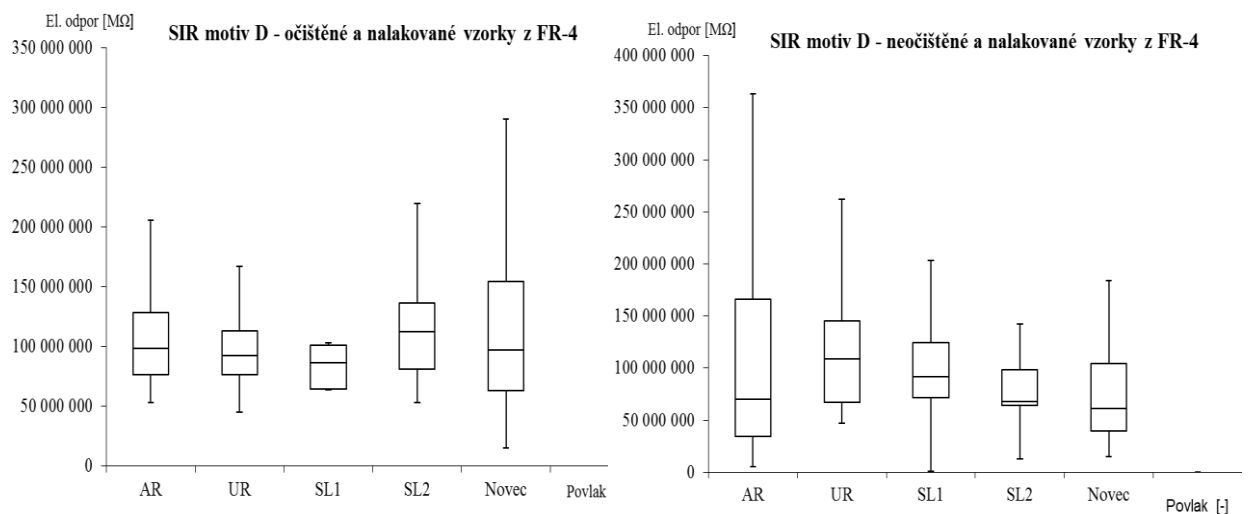
Stárnutí	Substrát	Povlak	Očištěných	Neočištěných	Cíl
Solná mlha	FR-4	AR	5	5	SIR
Solná mlha	FR-4	UR	5	5	SIR
Solná mlha	FR-4	SI1	5	5	SIR
Solná mlha	FR-4	SI2	5	5	SIR
Solná mlha	FR-4	Novec	5	5	SIR
Solná mlha	FR-4	Nelakovaná	1	-	SIR
Solná mlha	Kapton	AR	4	-	SIR
Solná mlha	Kapton	UR	4	-	SIR
Solná mlha	Kapton	SI1	4	-	SIR
Solná mlha	Kapton	SI2	4	-	SIR
Solná mlha	Kapton	Novec	5	-	SIR
Solná mlha	Kapton	Nelakovaná	1	-	SIR
Vlhké teplo	FR-4	AR	5	5	SIR/DWV
Vlhké teplo	FR-4	UR	5	5	SIR/DWV
Vlhké teplo	FR-4	SL1	5	5	SIR/DWV
Vlhké teplo	FR-4	SL2	5	5	SIR/DWV
Vlhké teplo	FR-4	Novec	4	5	SIR/DWV
Vlhké teplo	FR-4	Nelakovaná	1	-	SIR/DWV
Teplotní šok	Kapton	AR	6	-	Vzhled
Teplotní šok	Kapton	UR	6	-	Vzhled
Teplotní šok	Kapton	SL1	6	-	Vzhled
Teplotní šok	Kapton	SL2	6	-	Vzhled
Teplotní šok	Kapton	Novec	5	-	Vzhled
Teplotní šok	FR-4	AR	5	-	Vzhled
Teplotní šok	FR-4	UR	5	-	Vzhled
Teplotní šok	FR-4	SL1	5	-	Vzhled
Teplotní šok	FR-4	SL2	5	-	Vzhled
Teplotní šok	FR-4	Novec	6	-	Vzhled

Dále byly pro zkoušku teplotním šokem použity přířezy z čisté FR-4 bez jakéhokoliv vyleptaného motivu, očištěny a nalakovány shodně s předchozími vzorky.

4.3 Izolační odpor - SIR

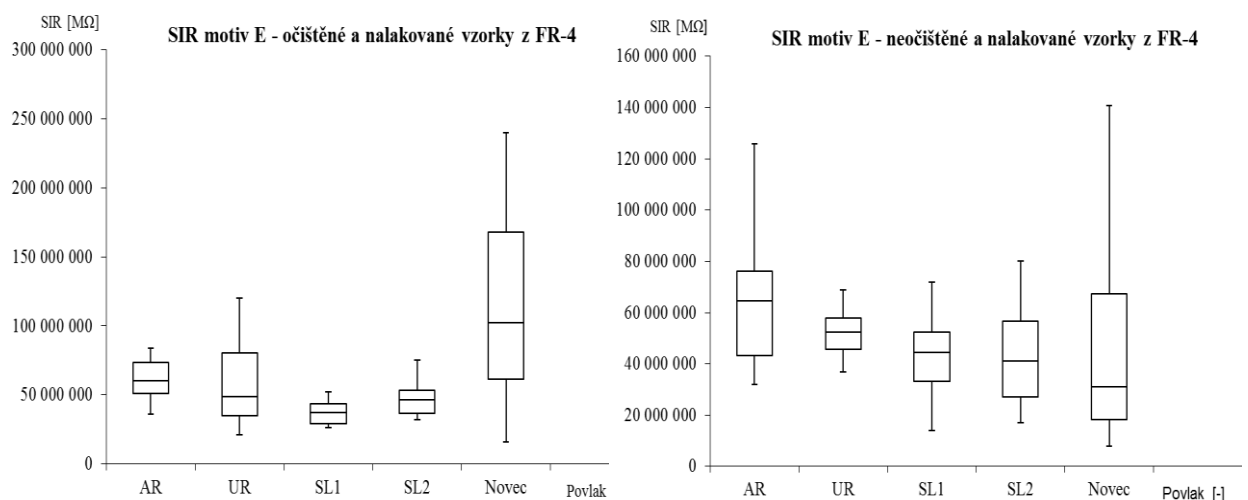
Izolační odpor je důležitý pro stanovení dlouhodobé spolehlivosti dielektrických materiálů. Měření SIR se používá i jako standardní cesta pro určení úrovně kontaminace povrchů. Tím pomáhá pochopit dopad vodivých a korozivních nečistot na stálost dielektrických vlastností izolačních vzdáleností. Motivы navržené pro měření této veličiny poté ukáží, změny hodnot vlivem uměle vyvolaného zestárnutí. Jako nejvhodnější technika čištění se z pohledu SIR jeví manuální otření štětcem po dobu 30 sekund,

opláchnutí destilovanou vodou a následné sušení po dobu 2 hodin při 50 °C. Izolační odpor byl změřen elektrometrem Keithley 6517A – High resistance meter. Na měřicím přístroji bylo nastaveno stejnosměrné napětí 100 V, automatické přepínání rozsahů a filtr pro odečtení přesnější hodnoty. Elektrometr zná nastavenou hodnotu napětí, přičemž změří proud a dopočítá hodnotu odporu. Hodnoty byly dle normy z displeje odečítány po jedné minutě a zkušební vzorky se vkládaly do elektricky stíněného boxu. Elektrometr se ke zkušebním deskám připojoval přes konektor Card Edge. SIR byl měřen na motivech E, F a dle normy IPC na motivu D.



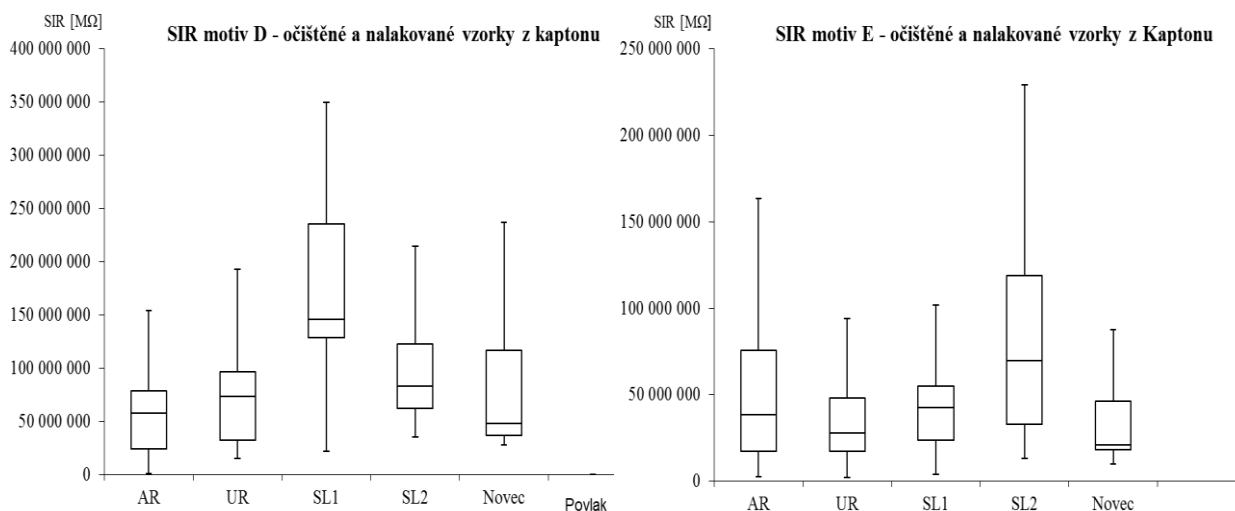
Obr. 4.2 Porovnání naměřených hodnot SIR motivu D dle povlaků a čistoty

Na Obr. 4.2 a 4.3 jsou k porovnání vlivu faktoru očištění vyneseny naměřené hodnoty SIR, rozdělené dle očištění a měřeného zkušebního motivu. Výchozí hodnoty SIR jsou u motivu D v řádech 10^{13} až 10^{14} Ω . K prezentování výsledků je použit diagram typu boxplot, jež umožňuje znázornit u neočištěných vzorků větší rozptyl naměřených hodnot.



Obr. 4.3 Porovnání naměřených hodnot SIR motivu E dle povlaků a čistoty

U motivu E substrátu FR-4 jsou naměřené hodnoty převážně v řádu $10^{13} \Omega$. Největšího rozptylu naměřených hodnot dosahují vzorky s povlakem Novec. Následující grafy na Obr. 4.4 ukazují naměřené hodnoty SIR dle povlaků na motivu E a D flexibilního substrátu Kapton. Několik hodnot v jednotkách $T\Omega$ bylo naměřeno u vzorků s akrylovým povlakem.



Obr. 4.4 Porovnání naměřených hodnot motivů D a E

Výchozí hodnoty SIR jsou u vzorků ze substrátu Kapton v řádech 10^{13} až $10^{14} \Omega$. Hodnoty naměřené po provedených zkouškách stárnutí jsou vyhodnoceny dále v kapitolách podle příslušných metod.

4.4 Solná mlha

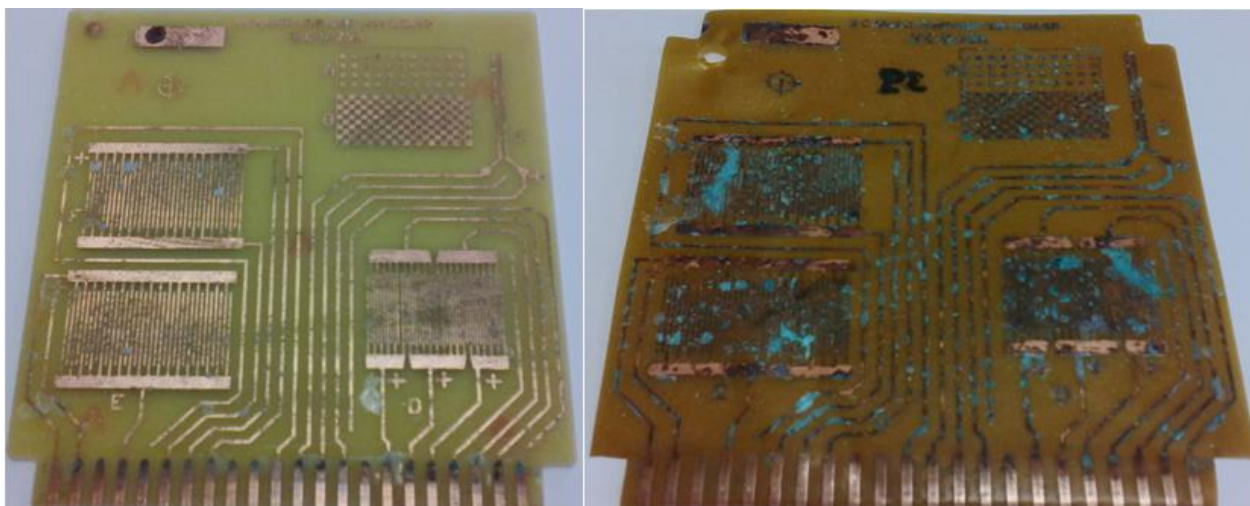
Zkouška solnou mlhou byla provedena dle ČSN 60 068-2-52 u zkušebních vzorků s motivem IPC-B-25A. Testu bylo podrobena 50 desek ze substrátu FR-4 a 20 ze substrátu Kapton. Účelem stárnutí zkušebních vzorků solnou mlhou bylo zkoumat schopnost povlaků zamezit šíření koroze a sledovat zhoršení dielektrických vlastností izolačních vzdáleností. Pro průběh zkoušky byl vybrán stupeň přísnosti 3, podle něhož celá zkouška zabere 7 dní a sestává se ze 4 cyklů. Jeden zkušební cyklus se skládá z uložení vzorků na 2 hodiny do solné komory a poté 22 hodin v klimatické komoře. V solné komoře byla teplota v rozmezí 15 až 35 °C a solná mlha vytvořená komorou z 5 % roztoku NaCl. V klimatické komoře byly vzorky vystaveny 40 °C a relativní vlhkosti 90 %. Po čtyřech cyklech byly uloženy v pokojových podmínkách na tři dny a následně změřeny. Vzorky musely být mezi komorami přenášeny v souladu s normou ČSN, vzhledem k možnostem klimatických komor RICE. Dle normy nesmějí zkondenzované kapky přímo dopadat na

povrch zkušebních vzorků, a tak se vzorky z FR-4 uložily ve vertikální poloze v pořadníku, zatímco flexibilní substráty byly zavěšeny na provázku, s co největší snahou o jejich jednotlivé oddělení viz *Obr. 4.5*.



Obr. 4.5 Foto zkušebních vzorků vložených do zkušební komory pro solnou mlhu

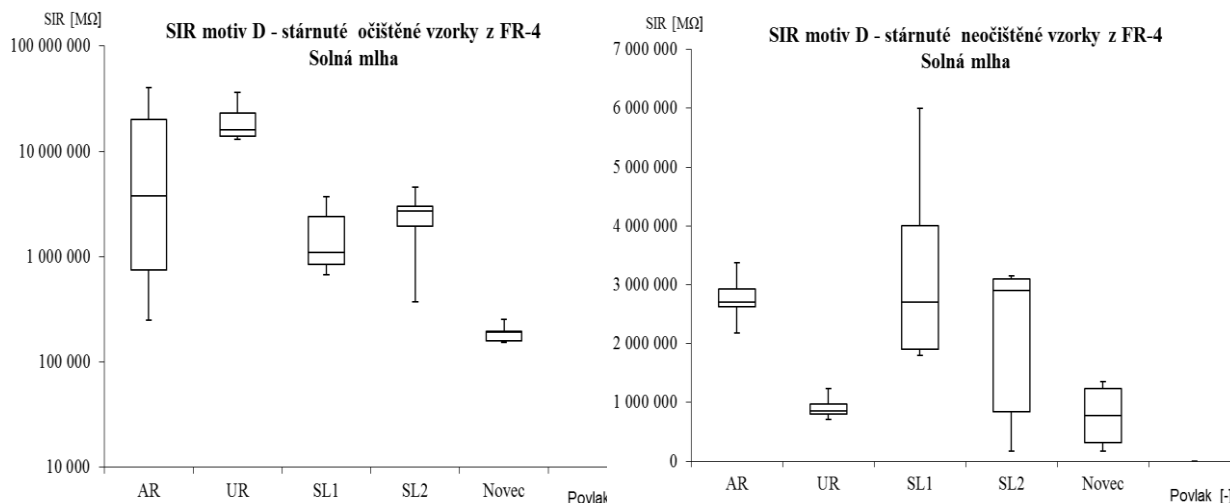
Po dokončení zkoušky se vzorky nechaly aklimatizovat po dobu 24 hodin a změřil se SIR. Už při posuzování vzhledu byl patrný větší dopad zkoušky na flexibilní substráty. U Kaptonu se ve větší míře rozvinula koroze vodivého motivu. Až na vzorky s akrylovým povlakem, jež vykazaly zčernalou korozi, byla koroze zelená, viz *Obr. 4.6*.



Obr. 4.6 Porovnání šíření koroze u FR-4 s povlakem Urethane Clear a Kapton s povlakem Isotemp

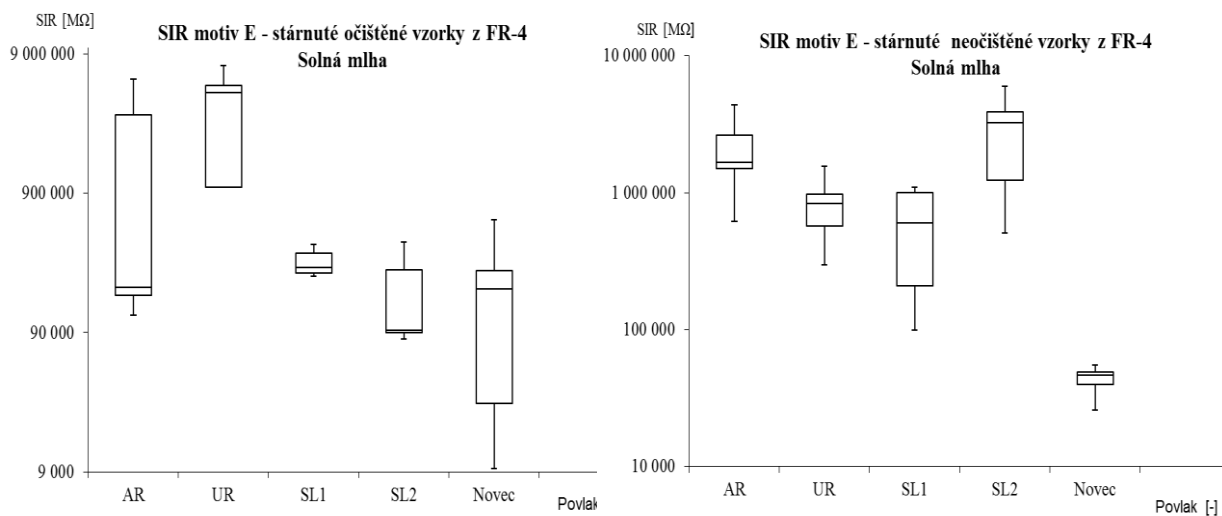
Zkouška solnou mlhou měla významný dopad na naměřené hodnoty izolačního odporu. U neočištěných desek byly naměřeny často o řád nižší hodnoty i větší rozptyl hodnot. Rozdíl v čistotě je patrný z grafů na *Obr. 4.7* kdy hodnoty motivu D pro uretanový

povlak neklesly pod $1 \cdot 10^{13} \Omega$. Zatímco u neočištěných byl v několika případech zaznamenán výrazný pokles.



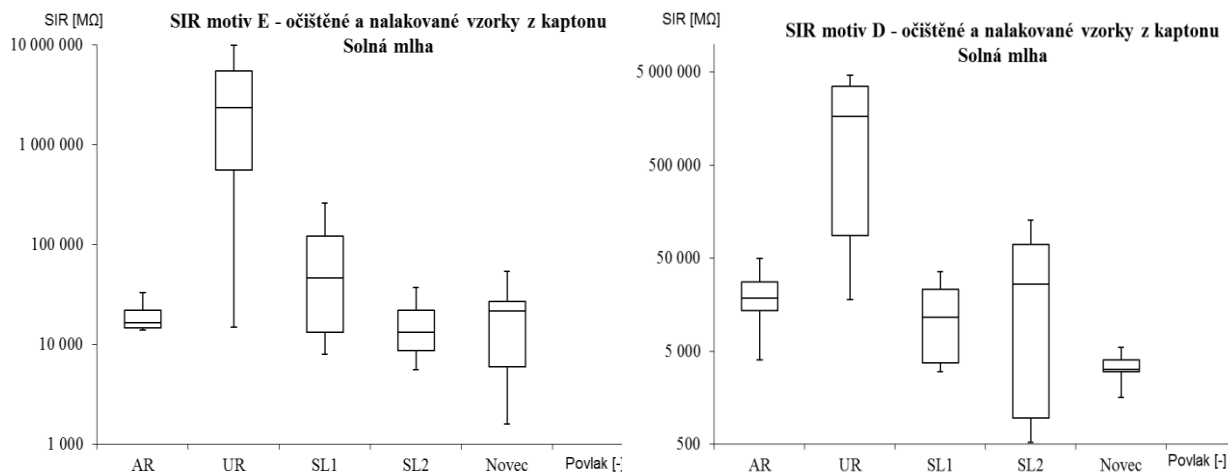
Obr. 4.7 Porovnání naměřených hodnot SIR po zkoušce solnou mlhou u motivu D (FR-4)

Při měření motivu E klesly některé hodnoty SIR i na $10^{10} \Omega$. I přes to všechny vzorky splnily limit alespoň $5 \cdot 10^9 \Omega$ dle IPC a $1 \cdot 10^{10} \Omega$ dle ČSN.



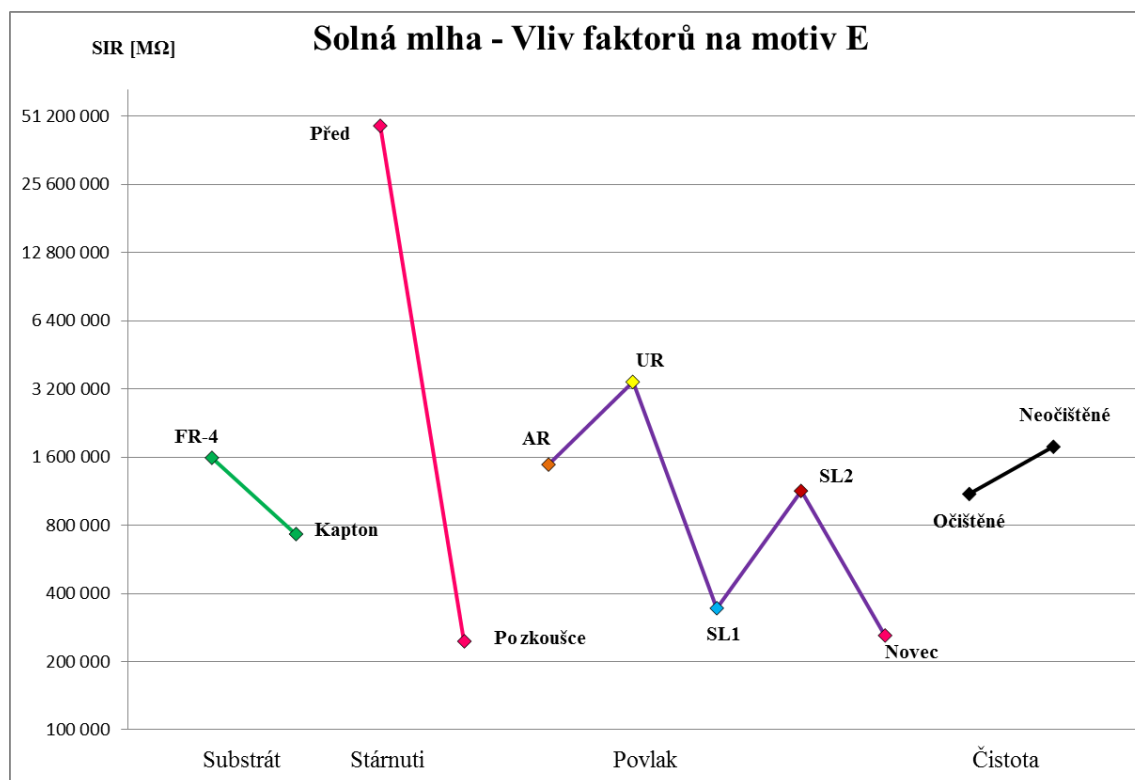
Obr. 4.8 Porovnání naměřených hodnot SIR po zkoušce solnou mlhou u motivu E (FR-4)

Hůře již vyšly naměřené hodnoty pro substrát Kapton. Koroze se nejvíce rozvinula u silikonových povlaků a fluoropolymeru. Tyto vzorky vykázaly hodnoty v řádech 10^8 až $10^{10} \Omega$ a zkouškou neprošly. I přes vzhledově poměrně rozvinutou korozi dosáhl akrylový povlak dostačujících hodnot $10^9 - 10^{10} \Omega$. Tato zkouška naplno ukázala silnou stránku uretanového povlaku, kterou je chemická odolnost. Povlak Urethane Clear je dle výsledků měření vhodný nástroj pro ochranu před solnou mlhou i pro oba druhy substrátů.



Obr. 4.9 Porovnání naměřených hodnot SIR po zkoušce solnou mlhou dle motivů (Kapton)

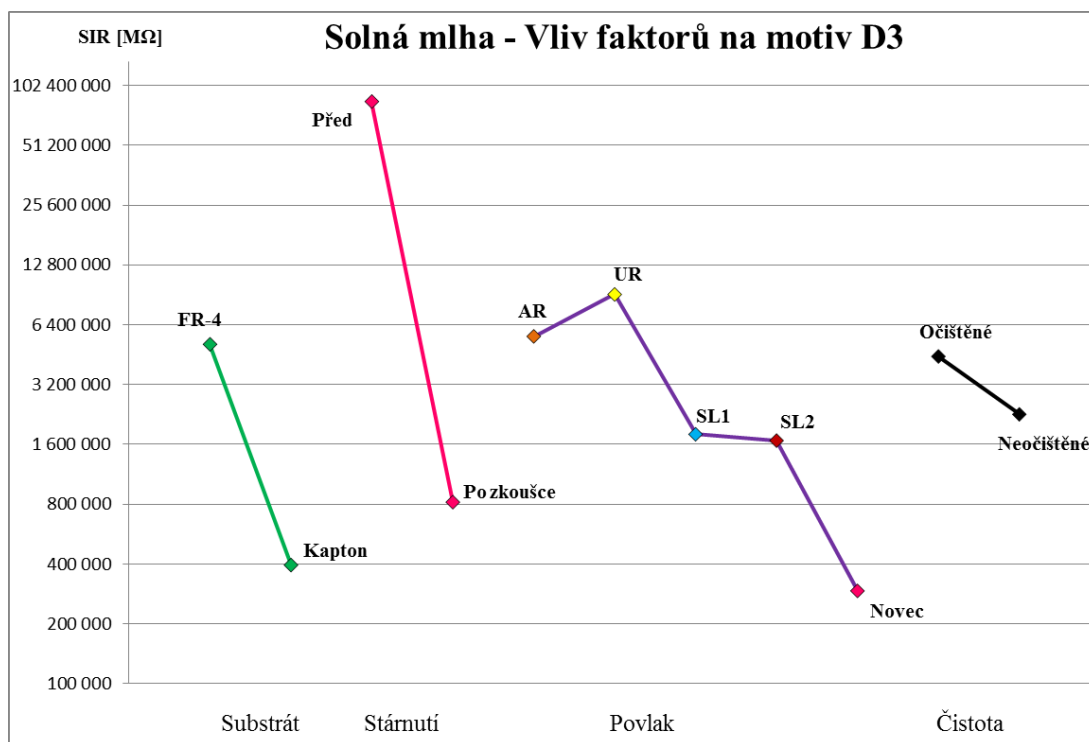
Z faktorové analýzy na Obr. 4.10 a 4.11 rozdělené dle měřených motivů vyplývá větší dopad zkoušky na vzorky z Kaptonu. Dále analýza interpretuje převyšující hodnoty povlaku Urethane Clear, selhávající hydrofobní nano povlak Novec 1700, Plastic Seal a Isotemp. Největší dopad na výstup experimentu měla zvolená forma stárnutí. Medián z naměřených hodnot SIR po zkoušce solnou mlhou vykázal pro motiv D 819 GΩ a 246 GΩ pro motiv E.



Obr. 4.10 Faktorová analýza zkoušky solnou mlhou motivu E

Z faktorové analýzy nelze přesně vyhodnotit vliv faktoru očištění povrchu před nanášením povlaku. Interpretované hodnoty pro motiv E vykazují zanedbatelně vyšší

hodnoty SIR u neočištěných vzorků, zatímco u motivu D byl medián naměřených hodnot pro vzorky s neočištěným povrchem dle očekávání nižší. Faktor čistoty ovlivňuje riziko snížení izolačního odporu vlivem kontaminace povrchu před depozicí a tím zvětšuje rozptyl naměřených hodnot. Právě druh a úroveň této kontaminace jsou klíčové pro dopad tohoto faktoru. V průběhu experimentu nebyly vzorky vystaveny elektricky vodivým nečistotám z pájení.



Obr. 4.11 Faktorová analýza zkoušky solnou mlhou motivu D

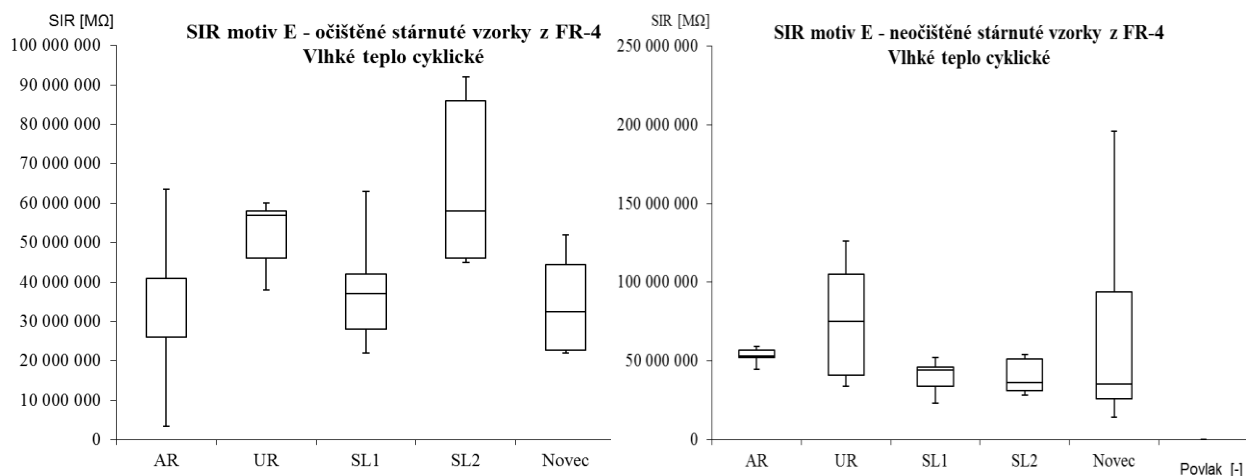
4.5 Vlhké teplo

Zkouška vlhký teplem je nástroj pro určení odolnosti povlaků vůči vlhkosti. Hodnotí se změna izolačního odporu SIR vlivem působení předepsané vlhkosti a teplotních změn. Zkušební norma je součástí IPC TM 650 s označením „Moisture and Insulation Resistance – Conformal Coating“. Izolační odpor byl měřen na motivech E, F, D a součástí normy byla i zkouška elektrické pevnosti motivu C. Ke zkoušce bylo použito 50 zkušebních vzorků IPC-B-25A z materiálu FR-4, rozdělených dle pěti různých povlaků a očištění. Každý povlak reprezentovalo 5 očištěných a 5 neočištěných vzorků. Specifický pro tuto zkoušku byl požadavek na zatížení vzorků v průběhu stárnutí v klimatické komoře stejnosměrným napětím 50 voltů. Zkušební vzorky byly umístěny do dvou pořadníků pro splnění podmínky vertikální polohy vzorků a následně k sobě paralelně připájeny zkušební motivy viz Obr. 4.12. [35]



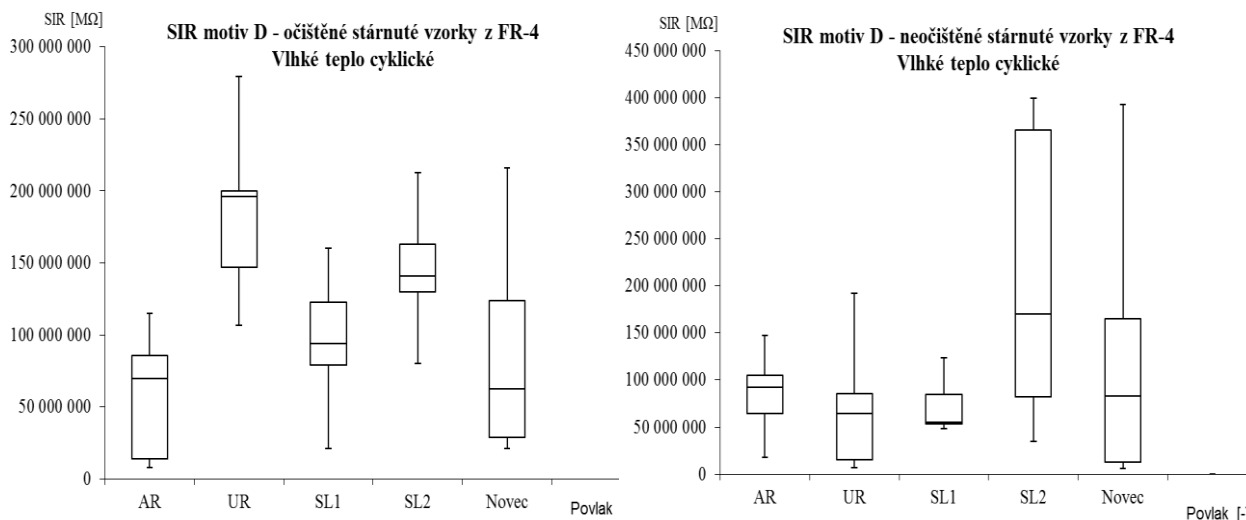
Obr. 4.12 Pořadník se zapájenými zkušebními vzorky pro zkoušku vlhkým teplem

Ke zkoušce, jež zabrala šest dní, byla využita klimatická komora nacházející se v RICE. Zkouška vlhkým teplem vyžadovala 100 cyklů, přičemž jeden cyklus zahrnoval začátek na teplotě 25 °C, následný náběh na 65 °C za 105 minut, kde vzorky setrvaly 180 minut a opět snížení teploty na 25 °C za 105 minut bez zpoždění mezi jednotlivými cykly. V průběhu zkoušky byly vzorky vystaveny relativní vlhkosti 90 %. Po proběhnutí zkoušky a aklimatizaci vzorků byl změřen SIR a elektrická pevnost.



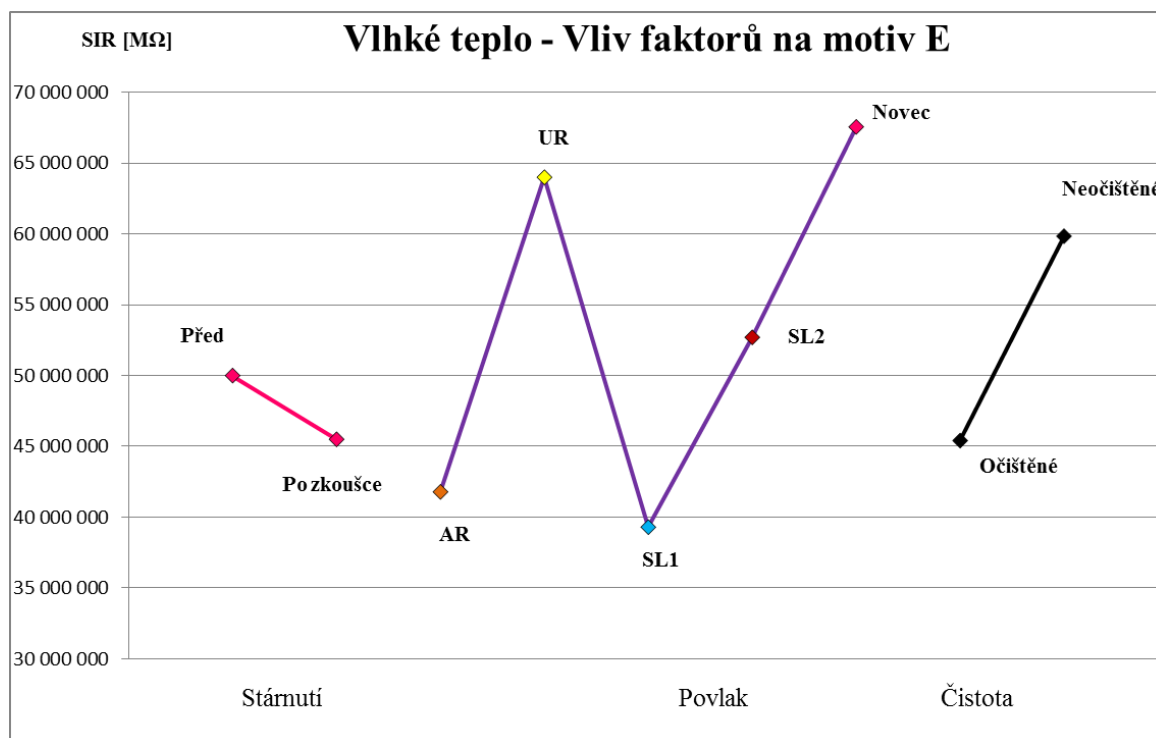
Obr. 4.13 Porovnání naměřených hodnot SIR po zkoušce vlhkým teplem u motivu E

Zkušební vzor IPC-B-25A obsahuje dva shodné motivy E a F, jejichž naměřené hodnoty se shodují a v práci je reprezentuje pouze motiv E. Z diagramů boxplot vnesených na Obr. 4.13 je patrné, že naměřené hodnoty jsou stále v řádech desítek TΩ. Aby daný povlak prošel touto zkouškou, nesmí naměřené hodnoty SIR klesnout pod $5 \cdot 10^9 \Omega$. Zkouška tedy neměla žádný dopad na naměřené hodnoty izolačního odporu motivu E.



Obr. 4.14 Porovnání naměřených hodnot SIR po zkoušce vlhkým teplem u motivu D

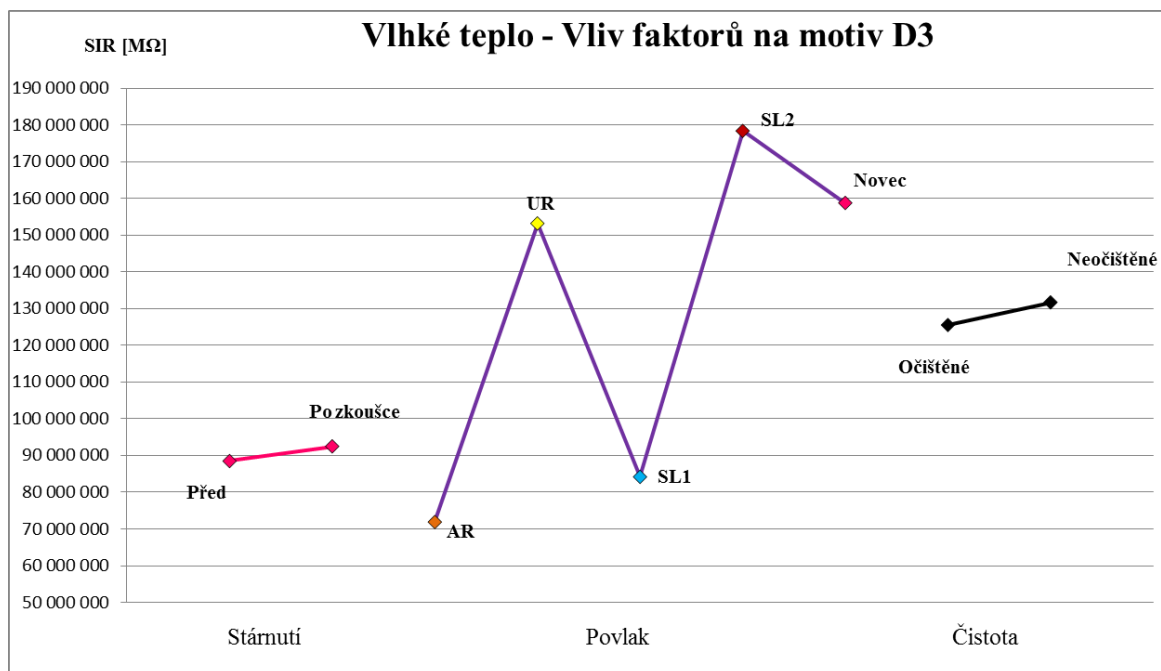
Zkouškou se nesnížil ani izolační odpor motivu D, který je pro tuto zkoušku vhodnější a dosahuje vyšších hodnot. V testu vlhkým teplem obstály všechny povlaky. Jeden z důvodů proč nedošlo ke změně naměřených hodnot SIR, může být větší množství testovaných vzorků. V tomto případě byly vzorky v pořadnicích po 25 kusech, dle normy by měly být pouze po 5 kusech.



Obr. 4.15 Faktová analýza zkoušky vlhkým teplem motivu E

Očekávaný dopad na výsledky měření neměl faktor čistoty. Z analýzy dokonce vyplývá v řádu desítek TΩ nepatrná výhoda pro neočištěné vzorky. Tento stav se dá vysvětlit faktem, že zkušební vzorky neprošly procesem pájení a byly tak vystaveny pouze

kontaminaci z výroby a uskladnění. Dobrý vliv na zkoušku mohl mít dostatečný čas pro vytvrzení povlaků, kdy je důležité si uvědomit rozdíl mezi uschnutým a vytvrzeným povrchem. Na Obr. 4.15 a 4.16 jsou zobrazeny vlivy faktorů na naměřené hodnoty SIR dle motivů. Lehce podprůměrných hodnot dosáhl akrylový povlak Plastik UV a silikonový Plastic Seal (SL1).



Obr. 4.16 Faktorová analýza zkoušky vlhkým teplem motivu D

V další části zkoušky vlhkým teplem byly od každého povlaku vybrány dva zkušební vzorky pro zkoušku elektrické pevnosti. Tato zkouška pomáhá určit vhodnost povlaku pro aplikace vysokého napětí. V normě nebyla uvedena kritická hodnota, kterou musí povlaky vydržet, pouze pokyn zaznamenat hodnotu při elektrickém průrazu. Z naměřených hodnot viz Tab. 8 vychází nejlépe silikonový povlak Plastic Seal (SL1), zatímco nejnižších hodnot nabyl fluoropolymer Novac 1700.

Tab. 8 Naměřené hodnoty elektrické pevnosti motivu C

Vzorek	El. Pevnost [kV]	Povlak
1	1,7	Novec
2	2	
3	2,018	UR
4	2,29	
5	2,444	SL2
6	1,905	
7	3,064	SL1
8	2,617	
9	2,141	AR
10	2,351	

4.6 Teplotní šok

Touto zkušební metodou dle normovaného standardu IPC TM 650 lze stanovit fyzickou odolnost povlaků vůči náhlým změnám teplot. Velké výkyvy teplot mají za následek fyzickou únavu materiálů, jež umožňuje objevit či urychlit vývoj poruch spojených ať již s procesem nanášení nebo nedostatečných provozních parametrů vytvrzeného povlaku. Pro experiment byla vybrána třída přesnosti 3, která nabízí minimální teplotu $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ a maximální $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zkušební vzorky setrvaly v těchto mezních teplotách 15 minut s dobou náběhu pouhé 2 minuty. Jedna zkouška se sestává ze 100 cyklů. Nalakované vzorky byly vystaveny 3×100 cyklů, kdy se po 100 cyklech zkontroloval a zdokumentoval jejich stav. Ke zkoušce byla využita programovatelná klimatická komora v areálu RICE. Pro zkoušku teplotním šokem bylo vyrobeno 26 přířezů ze substrátu FR-4. Vzorky byly očištěny a nalakovány stejným způsobem jako předešlé IPC-B-25A. Dále bylo testováno od každého povlaku 6 vzorků substrátu Kapton. KP byly zastoupeny pěti vzorky a fluoropolymer Novec šesti. Před započítáním zkoušek byl povrch povlaků uniformovaný bez jakýchkoliv defektů.



Obr. 4.17 Ukázka nalakovaného přířezu z FR-4 před zkouškou

I vzhledem k teplotním rozsahům vybraných povlaků se na čtyřech z pěti objevily poruchy. Na Obr. 4.18 je zachycena porucha odtažení na substrátu s akrylovým povlakem

Plastic UV. Porucha mohla být způsobena vlivem kontaminace lakovaného povrchu či maximální provozní teplotou 120 °C, přičemž zkušební teploty dosahovaly 125 °C.



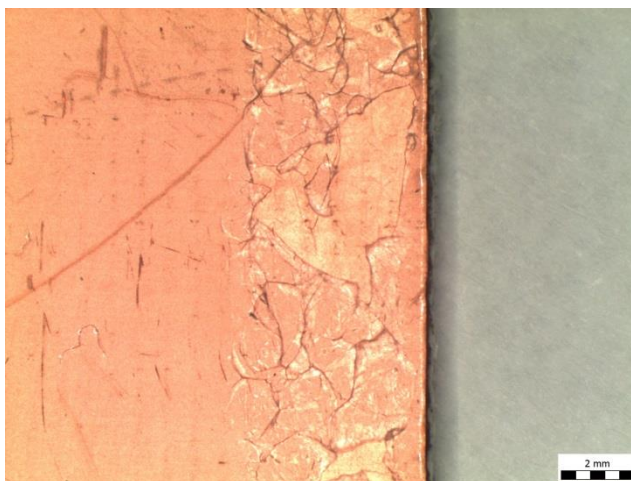
Obr. 4.18 Odtážení akrylového povlaku

KP Urethane Clear vykázal po zkoušce pouze kosmetickou vadu, jež se projevila ztmavnutím bezbarvého filmu na oranžovo hnědý odstín, viz Obr. 4.19.



Obr. 4.19 Porovnání čistě průhledného a teplotním šokem ztmavlého povlaku (vpravo)

Největší dopad zkouška dosáhla u silikonového povlaku Isotemp, jehož povrch výrazně popraskal směrem od hran vzorku a s postupem času se v těchto oblastech oddrolil. Na Obr. 4.20 jsou mikroskopem praskliny zdokumentovány.



Obr. 4.20 Detail na popraskaný povrch povlaku Isotemp (SL2)

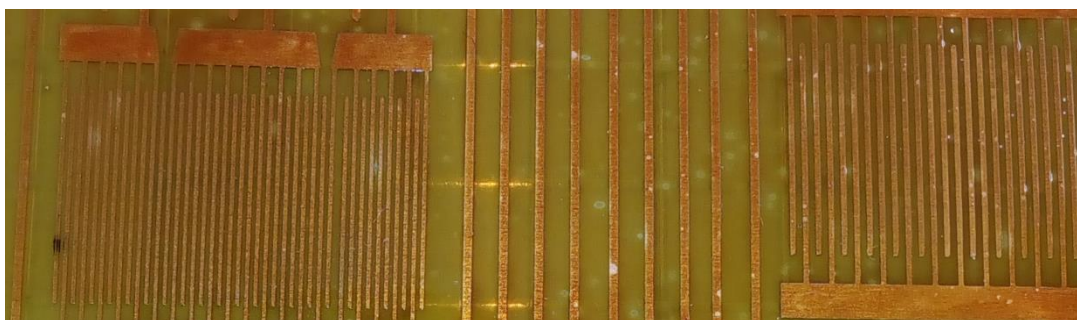
K okrajovému popraskání u silikonu došlo zřejmě jeho minimální teplotou -45 °C nebo rozdílnými koeficienty CTE substrátu a povlaku. Povlak by mohl být otestován pro nižší stupeň přísnosti 2, který vystavuje vzorky pouze -40 °C. Poslední zjištěnou poruchou

vlivem teplotního šoku je kosmetická vada povrchu nano povlaku Novoc. Povrch se zdá být mléčný a na pohled lepkavý. Tato porucha je v literatuře popisována pospolu se „zbělením“. Vada se u povlaku Novoc neobjevila ve spojitosti s dalšími zkušebními metodami a je tedy zřejmě vyvolána teplotním šokem, nežli procesem nanášení. U kapaliny Novoc bohužel nejsou známy její provozní teplotní rozsahy. Ve zkoušce teplotním šokem nejlépe obstál silikonový povlak Plastic Seal, u kterého nebyly nalezeny poruchy spojené s posuzováním vzhledu.



Obr. 4.21 Mléčný povrch substrátu FR-4 s fluoropolymerem Novoc

Flexibilní substráty byly vystaveny taktéž 300 cyklům se stejnými teplotními podmínkami. U akrylového a uretanového KP se objevily poruchy uniformity povlaku zřejmě související se špatnou technologií nanášení. Povrch povlaku na bázi akrylových pryskyřic vykazoval bubliny a díry. Porucha mohla být způsobena rozdílnými koeficienty CTE, či zachyceným rozpouštědlem v průběhu schnutí povrchu povlaku. Poruchy mohly být způsobeny i neideálními vlhkostními podmínkami při nanášení povlaků. U vzorků s uretanovým povlakem se objevila porucha jen u tří vzorků ze šesti. U zbylých byl povrch uniformní. Porucha odtažením povlaku znázorněna na Obr. 4.23 je pravděpodobně spojena s vlivem kontaminace nebo nedostatečné vrstvy povlaku.



Obr. 4.22 Detail motivu E s poruchami odtažení povlaku Urethane Clear

Vzorky z Kaptonu ve zkoušce teplotním šokem obstály i z důvodu vyšších teplotních požadavků na zkoušky materiálů z polyimidu. V normě bylo doporučeno nastavit horní teplotní limit až na 200 °C.

5 Závěr

Práce obsahuje ucelený přehled možností ochrany osazených desek plošných spojů před vlivy prostředí. Popisuje technologie konformních povlaků a obsahuje rešerši poruch uniformity konformních povlaků, způsobených chybnou technologií. Hlavním úkolem závěrečné práce bylo navrhnout, provést a vyhodnotit experiment, který bude porovnávat vlastnosti vybraných ochranných povlaků.

Empirická část se sestává ze tří normovaných zkoušek. V první části byl testován dopad solné mlhy na degradaci izolačních vlastností normovaného motivu. Bylo zde použito pět povlaků a dva druhy substrátů. Součástí zkoušky byl i faktor čistoty vzorků, kdy polovina vzorků z FR-4 substrátu nebyla před lakováním očištěna. Po stárnutí vzorků v klimatické komoře bylo dosaženo snížení naměřených hodnot izolačního odporu u obou substrátů. Vzorky se substrátem FR-4 ve zkoušce obstály u všech druhů povlaků. Větší dopad zkouška měla na vzorky s flexibilním substrátem Kapton, kdy naměřené hodnoty u silikonových povlaků a fluoropolymeru klesly pod normou stanovenou mez. Ve zkoušce pro oba substráty uspěl nejlépe dle očekávání povlak na bázi uretanové pryskyřice, jež se vyznačuje výbornou chemickou odolností. Zkouškou prošel u obou substrátů i komerčně nejvyužívanější druh povlaku na bázi akrylové pryskyřice. Vliv očištění vzorků před lakováním se projevil pouze u uretanem ochráněných desek, kdy neočištěné vzorky vykazaly v několika případech pokles naměřených hodnot. Nepatrný dopad faktoru očištění, lze zdůvodnit testováním neosazených desek plošných spojů, které neprošly procesem pájení, tudíž nebyly vystaveny významné kontaminaci vodivých částic.

Další formou zestárnutí zkušebních vzorků se stejnými ochrannými povlaky bylo vlhké teplo. Experiment byl proveden na substrátech FR-4 rozdělených na očištěné a neočištěné. Po zkoušce byl opět změřen izolační odpor normovaných motivů a porovnán s hodnotami naměřenými před zestárnutím. Výsledné hodnoty izolačního odporu ukázaly, že zkouška vlhkým teplem provedená dle standardu IPC neměla vliv na hodnoty naměřené po zestárnutí. Ve zkoušce tedy obstály a potvrdily odolnost vůči vlhkosti všechny použité povlaky. Pod zkoušku vlhkým teplem spadal i test elektrické pevnosti, kdy nejlepších hodnot dosáhl silikonový konformní povlak Isotemp.

Posledním provedeným testem byla zkouška teplotním šokem. K experimentu byly použity čisté přířezy z materiálu FR-4 a zkušební vzorky s flexibilním Kaptonem, ochráněné stejnými povlaky jako v předchozích testech. Zatímco vzorky ze substrátu Kapton nevykázaly poruchy spojené s teplotním šokem, u substrátu FR-4 se objevily poruchy změny barvy, zbělení, popraskání i odtažení povlaku. Nejlépe zkouškou pro vzorky z FR-4 prošel silikonový povlak Plastic Seal, na kterém nebyly zpozorovány viditelné poruchy.

V případných dalších pracích na toto téma by bylo vhodné otestovat technologicky náročnější povlaky z Parylenu nebo voděodolné vlastnosti nových hydrofobních modifikátorů povrchu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Industrial Controls Electronics* [online]. [cit. 2016-10-02]. Dostupné z: <http://www.humiseal.com/markets/industrial-controls-conformal-coatings/>
- [2] BRIDGES, Jade. *Conformal Coating vs. Encapsulation - Protecting Electronic Devices, Which Do I Choose?: Provide protection in the form of a conformal coating or potting and encapsulation resins*. [online]. 1 [cit. 2016-10-02]. Dostupné z: <http://www.electrolube.com/technical-articles/>
- [3] HITCHENS, Dr Lee. *What is a conformal coating?* [online]. [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: <http://www.conformalcoatinghelp.com/>
- [4] Conformal Coatings: Enhanced protection for enhanced PCB performance. *Http://www.electrolube.com* [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://www.electrolube.com.au/pdf/conformal-coatings-brochure-electrolube.pdf>
- [5] A STANDARD DEVELOPED BY IPC. *IPC-HDBK-830: Guidelines for Design, Selection and Application of Conformal Coatings*. Bannockburn, Illinois, USA, 2013.
- [6] A STANDARD DEVELOPED BY IPC. *IPC-AJ-820A: Assembly and Joining Handbook*. Bannockburn, Illinois, USA, 2012.
- [7] *SELEKTIVNÍ KONFORMNÍ POVLAKY ELEKTRICKÝCH SESTAV* [online]. PBT Rožnov p. R., 2014 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:2215/selektivni-konformni-povlaky-elektrickych-sestav>
- [8] *Printed Circuit Board (PCB) and Flexible Printed Circuit (FPC): Conformal Coating* [online]. [cit. 2016-12-06]. Dostupné z: <http://tangentindinc.com/applications/printed-circuit-board-pcb-and-flexible-printed-circuit-fpc-conformal-coating.html>
- [9] *DOBROVODSKÁ, Lenka a Jitka Podjuklová PODJUKLOVÁ. VÝVOJOVÉ TRENDY V POUŽITÍ OCHRANNÝCH POVLAKŮ* [online]. In: 2009, s. 6 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: http://nanocon2014.tanger.cz/files/proceedings/nanocon_09/Lists/Papers/089.pdf
- [10] *Contact angle: Background* [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <https://www.kruss.de/services/education-theory/glossary/contact-angle/>
- [11] HENLY, Steve. *New Generation Fluoropolymer Coatings for Electronic Applications* [online]. In: . [cit. 2017-02-23].
- [12] HORN, Sean. *Liquid Teflon vs Parylene* [online]. 2016 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://blog.paryleneconformalcoating.com/blog/liquid-teflon-vs-parylene>
- [13] *Conformal Coating Materials: Selective conformal coating systems supported by Nordson ASYMTEK's world-leading process knowledge provide advantages at every level of production* [online]. [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: <http://www.nordson.com/en/divisions/asymtek/your-process/fluid-types/conformal-coating-materials>
- [14] *What is Synthetic Resin? Industry* [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.wisageek.com/what-is-synthetic-resin.htm>
- [15] HORN, Sean. *Nano Coating and Conformal Coating: A Functional Comparison* [online]. 2017 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://blog.paryleneconformalcoating.com/blog/nano-coating-and-conformal-coating>
- [16] DRESDNER, Michael. *WHAT ARE VOC AND HAP AND WHAT DO THEY MEAN FOR GREEN WOODWORKING* [online]. 2009 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.rockler.com/how-to/voc-hap-care/>
- [17] *Design for dust: DUST AND WATER VAPOR on electronic components can pose risks to product users, so design your products to resist the shorts and shocks that can result from buildup*. [online]. In: LOHBECK, David. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: ftp://ftp.ni.com/pub/gdc/tut/design_for_dust.pdf
- [18] KUMAR, Rakesh, et al. A high temperature vapor phase conformal coating for improving reliability of harsh environment electronics. In: *Electronics Technology (ISSE), 2016 39th International Spring Seminar on*. IEEE, 2016. p. 128-133.
- [19] TAN, Christine P.; CRAIGHEAD, Harold G. Surface engineering and patterning using parylene for biological applications. *Materials*, 2010, 3.3: 1803-1832.
- [20] *Nanoproof Series Improved IP-X7 Waterproof Technology: WEBINAR November 2016* [online]. [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.aculon.com/pdfs/NanoProof%20Nov%202016%20Webinar%20Final.pdf>

- [21] KOZELKA, Pavel. *Zalévací hmoty pro elektroniku: Požadavky na zalévací hmoty* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:5326/zalevací-hmoty-pro-elektroniku>
- [22] *IPC-HDBK-850 (5-33F): Guidelines for Design, Selection and Application of Potting Materials and encapsulation Processes Used for Electronics Printed Circuit Board Assembly*. 2012.
- [23] The Pros of Conformal Coatings: Choosing the right coating to preserve and protect electronics in harsh environments. *Garret.com* [online]. 2006 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: http://opensat.cc/wiki/_media/assembly:conformalcoating.pdf
- [24] FORNES, Tim. *New Techniques in Shielding for EMI: EMI Shielding Methods* [online]. 2013 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <https://interferencetechnology.com/new-techniques-shielding-emi/>
- [25] *EMI/RFI shielding and screening cans/covers for printed circuit boards: Design tips for PCB shielding cans* [online]. [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://hollandshielding.com/245-Clip%20on%20EMI%20shielding%20cans%20for%20PCBs>
- [26] A STANDARD DEVELOPED BY IPC. *IPC-A-610D: Acceptability of Electronic Assemblies*. Supersedes A-610C. Bannockburn, 2004.
- [27] STUMM, Brian. *PREVENTING DELAMINATION OF CONFORMAL COATING ON PRINTED CIRCUIT BOARDS* [online]. [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/preventing-delamination-conformal-coating-printed-circuit-brian-stumm>
- [28] *What is conformal coating de-wetting and why does it occur?* [online]. 2014 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <https://conformalcoating.wordpress.com/tag/defect/>
- [29] HITCHENS, Lee. *Solving conformal coating problems in the application process* [online]. Nexus, 2016 [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://www.conformalcoatinghelp.com/wp-content/uploads/2016/02/Solving-conformal-coating-problems-in-the-application-process.pdf>
- [30] TAUTSCHER, C. J. (1993). CONTAMINATION EFFECTS ON ELECTRONIC PRODUCTS. [online]. [cit. 2017-03-28]
- [31] *Conformal Coating 101: General Overview, Process Development, and Control Methods* [online]. BTW, Inc. Confidential, 2012 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: http://www.smta.org/chapters/files/UpperMidwest_BTW_Conformal_Coating_June_27th_2012.pdf
- [32] WILLIS, Bob. *Cleaning Printed Circuit Assemblies: Design and Process Control* [online]. In: . s. 45 [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.smartgroup.org/wp-content/uploads/2013/04/web13Nov2012.pdf>
- [33] HITCHENS, Lee. *Drying and Curing: What is the difference in drying and curing? The first point to realise is that the* [online]. Nexus [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.conformalcoatinghelp.com/index.php/ebook/production/drying-and-curing/>
- [34] HITCHENS, Lee, Bob WILLIS a Jason DELANEY. *Conformal coating application: The holistic approach to the application methods* [online]. Nexus, 2016 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.conformalcoatinghelp.com/index.php/ebook/application/>
- [35] Medgyes, Balint Karoly, and Gabor Ripka. "Qualifying methods of conformal coatings used on assembled printed circuit boards." *Electronics Technology, 30th International Spring Seminar on*. IEEE, 2007.

Přílohy

Příloha A Hodnoty naměřené před stárnutím

Tab. A- 1 Hodnoty SIR naměřené před stárnutím na substrátu FR-4

vzorek	E	F	D3	vzorek	E	F	D3	jednotka
0	63 000 000	95 000 000	87 000 000	39	200 000 000	50 000 000	93 000 000	MΩ
1	36 000 000	30 000 000	53 000 000	40	36 000 000	51 000 000	295 000 000	MΩ
2	50 000 000	54 000 000	91 000 000	41	75 000 000	60 000 000	59 000 000	MΩ
3	84 000 000	19 000 000	73 000 000	42	51 000 000	32 000 000	127 000 000	MΩ
4	83 000 000	75 000 000	130 000 000	43	38 000 000	65 000 000	113 000 000	MΩ
5	50 000 000	51 000 000	123 000 000	44	33 000 000	59 000 000	80 000 000	MΩ
6	64 000 000	38 000 000	57 000 000	45	47 000 000	22 000 000	53 000 000	MΩ
7	58 000 000	45 000 000	250 000 000	46	32 000 000	32 000 000	86 000 000	MΩ
8	54 000 000	127 000 000	139 000 000	47	54 000 000	43 000 000	140 000 000	MΩ
9	77 000 000	51 000 000	106 000 000	48	46 000 000	75 000 000	216 000 000	MΩ
10	21 000 000	25 000 000	125 000 000	49	58 000 000	160 000 000	112 000 000	MΩ
11	34 000 000	28 000 000	88 000 000	50	47 000 000	32 000 000	60 000 000	MΩ
12	70 000 000	8 000 000	200 000 000	51	21 000 000	40 000 000	78 000 000	MΩ
13	120 000 000	51 000 000	92 000 000	52	42 000 000	85 000 000	79 000 000	MΩ
14	54 000 000	65 000 000	73 000 000	53	33 000 000	41 000 000	120 000 000	MΩ
15	84 000 000	67 000 000	113 000 000	54	51 000 000	60 000 000	1 200 000	MΩ
16	37 000 000	43 000 000	45 000 000	55	58 000 000	1 090 000	70 000 000	MΩ
17	101 000 000	68 000 000	57 000 000	56	72 000 000	53 000 000	126 000 000	MΩ
18	44 000 000	63 000 000	93 000 000	57	34 000 000	61 000 000	170 000 000	MΩ
19	33 000 000	50 000 000	113 000 000	58	53 000 000	31 000 000	105 000 000	MΩ
20	52 000 000	35 000 000	64 000 000	59	14 000 000	318 000	210 000 000	MΩ
21	26 000 000	35 000 000	64 000 000	60	25 000 000	42 000 000	71 000 000	MΩ
22	26 000 000	35 000 000	98 000 000	61	17 000 000	9 000 000	37 000 000	MΩ
23	35 000 000	17 000 000	67 000 000	62	20 000 000	41 000 000	108 000 000	MΩ
24	29 000 000	24 000 000	64 000 000	63	34 000 000	23 000 000	64 000 000	MΩ
25	29 000 000	50 000 000	102 000 000	64	72 000 000	42 000 000	142 000 000	MΩ
26	43 000 000	33 000 000	84 000 000	65	58 000 000	49 000 000	2 256	MΩ
27	45 000 000	39 000 000	103 000 000	66	45 000 000	44 000 000	70 000 000	MΩ
28	44 000 000	50 000 000	89 000 000	67	53 000 000	300 000 000	140 000 000	MΩ
29	40 000 000	44 000 000	102 000 000	68	80 000 000	62 000 000	66 000 000	MΩ
30	185 000 000	36 000 000	183 000 000	69	37 000 000	27 000 000	66 000 000	MΩ
31	58 000 000	81 000 000	700 000 000	70	32 000 000	26 000 000	72 000 000	MΩ
32	71 000 000	52 000 000	155 000 000	71	28 000 000	16 000 000	37 000 000	MΩ
33	240 000 000	46 000 000	15 000 000	72	30 000 000	8 900 000	24 000 000	MΩ
34	90 000 000	25 000 000	42 000 000	73	38 000 000	19 000 000	184 000 000	MΩ
35	116 000 000	43 000 000	55 000 000	74	77 000 000	56 000 000	15 000 000	MΩ
36	16 000 000	78 000 000	88 000 000	75	2 000 000 000	21 800 000	118 000 000	MΩ
37	115 000 000	32 000 000	101 000 000	76	15 000 000	56 000 000	115 000 000	MΩ
38	53 000 000	69 000 000	152 000 000	77	15 000 000	13 000 000	71 000 000	MΩ

vzorek	E	F	D3	jednotka
78	159 000 000	16 000 000	51 000 000	MΩ
79	8 000 000	21 000 000	49 000 000	MΩ
80	37 000 000	1 680 000	52 000 000	MΩ
81	45 000 000	29 000 000	405 000 000	MΩ
82	66 000 000	115 000 000	150 000 000	MΩ
83	69 000 000	22 000 000	70 000 000	MΩ
84	58 000 000	47 000 000	115 000 000	MΩ
85	57 000 000	115 000 000	300 000 000	MΩ
86	55 000 000	170 000 000	130 000 000	MΩ
87	50 000 000	170 000	102 000 000	MΩ
88	42 000 000	9 500 000	47 000 000	MΩ
89	48 000 000	68 000 000	66 000 000	MΩ
90	32 000 000	21 000 000	25 000 000	MΩ
91	43 000 000	71 000 000	500 000 000	MΩ
92	150 000 000	8 600 000	5 800 000	MΩ
93	68 000 000	16 000 000	217 000 000	MΩ
94	79 000 000	250 000 000	61 000 000	MΩ
95	64 000 000	59 000 000	51 000 000	MΩ
96	44 000 000	42 000 000	29 000 000	MΩ
97	41 000 000	33 000 000	80 000 000	MΩ
98	65 000 000	37 000 000	185 000 000	MΩ
99	327 000 000	73 000 000	109 000 000	MΩ

Tab. A- 2 Hodnoty SIR naměřené před stárnutím na substrátu Kapton

vzorek	E	F	D3	jednotky
1	53 000 000	170 000 000	66 000 000	MΩ
2	17 000 000	52 000 000	108 000 000	MΩ
3	116 000 000	132 000 000	7 000 000	MΩ
4	80 000 000	51 000 000	63 000 000	MΩ
5	63 000 000	114 000 000	154 000 000	MΩ
6	14 000 000	19 000 000	1 000 000	MΩ
7	18 000 000	20 000 000	83 000 000	MΩ
8	2 400 000	43 000 000	22 000 000	MΩ
9	170 000 000	58 000 000	52 000 000	MΩ
10	24 000 000	33 000 000	31 000 000	MΩ
11	140 000 000	83 000 000	88 000 000	MΩ
12	21 000 000	18 000 000	74 000 000	MΩ
13	51 000 000	9 000 000	294 000 000	MΩ
14	9 000 000	58 000 000	30 000 000	MΩ
15	33 000 000	44 000 000	19 000 000	MΩ
16	2 000 000	30 000 000	15 000 000	MΩ
17	16 000 000	28 000 000	99 000 000	MΩ
18	283 000 000	40 000 000	38 000 000	MΩ

19	23 000 000	94 000 000	104 000 000	MΩ
20	39 000 000	48 000 000	72 000 000	MΩ
21	19 000 000	61 000 000	256 000 000	MΩ
22	104 000 000	16 000 000	139 000 000	MΩ
23	4 000 000	43 000 000	153 000 000	MΩ
24	51 000 000	32 000 000	127 000 000	MΩ
25	37 000 000	160 000 000	22 000 000	MΩ
26	45 000 000	6 000 000	26 000 000	MΩ
27	230 000 000	1 050 000	270 000 000	MΩ
28	56 000 000	31 000 000	173 000 000	MΩ
29	14 000 000	13 000 000	350 000 000	MΩ
30	40 000 000	107 000 000	135 000 000	MΩ
31	53 000 000	36 000 000	140 000 000	MΩ
32	23 000 000	26 000 000	120 000 000	MΩ
33	130 000 000	244 000 000	311 000 000	MΩ
34	107 000 000	135 000 000	92 000 000	MΩ
35	26 000 000	16 000 000	35 000 000	MΩ
36	123 000 000	450 000 000	68 000 000	MΩ
37	13 000 000	40 000 000	60 000 000	MΩ
38	78 000 000	77 000 000	124 000 000	MΩ
39	61 000 000	68 000 000	37 000 000	MΩ
40	229 000 000	300 000 000	74 000 000	MΩ
41	12 000 000	47 000 000	49 000 000	MΩ
42	18 000 000	32 000 000	47 000 000	MΩ
43	64 000 000	340 000 000	80 000 000	MΩ
44	21 000 000	95 000 000	129 000 000	MΩ
45	10 000 000	10 000 000	36 000 000	MΩ
46	21 000 000	42 000 000	227 000 000	MΩ
47	208 000 000	36 000 000	28 000 000	MΩ
48	19 000 000	10 000 000	36 000 000	MΩ
49	28 000 007	43 000 000	250 000 000	MΩ
50	52 000 000	183 000 000	38 000 000	MΩ
51	34 000 000	130 000 000	50 000 000	MΩ
52	10 000 000	17 000 000	78 000 000	MΩ

Příloha B – Naměřené hodnoty po stárnutí*Tab. B- 1 Hodnoty SIR naměřené na substrátu FR-4 po zkoušce vlhký teplem*

vzorek	motiv E	motiv F	motiv D3	jednotka
0	77 000 000	20 000 000	115 000 000	MΩ
1	26 000 000	29 000 000	14 000 000	MΩ
2	41 000 000	33 000 000	86 000 000	MΩ
3	888 000	10 000 000	8 000 000	MΩ
4	26 000 000	22 000 000	70 000 000	MΩ
10	38 000 000	71 000 000	147 000 000	MΩ
11	60 000 000	31 000 000	107 000 000	MΩ
12	46 000 000	84 000 000	200 000 000	MΩ
13	58 000 000	68 000 000	500 000 000	MΩ
14	57 000 000	117 000 000	196 000 000	MΩ
20	22 000 000	14 000 000	21 000 000	MΩ
21	42 000 000	20 000 000	160 000 000	MΩ
22	65 000 000	24 000 000	79 000 000	MΩ
23	28 000 000	8 000 000	94 000 000	MΩ
24	37 000 000	74 000 000	123 000 000	MΩ
30	23 000 000	28 000 000	93 000 000	MΩ
31	42 000 000	139 000 000	21 000 000	MΩ
33	52 000 000	28 000 000	32 000 000	MΩ
34	22 000 000	26 000 000	216 000 000	MΩ
39	68 000 000	91 000 000	346 000 000	MΩ
40	58 000 000	13 000 000	33 000 000	MΩ
41	92 000 000	29 000 000	141 000 000	MΩ
42	46 000 000	83 000 000	264 000 000	MΩ
43	45 000 000	18 000 000	163 000 000	MΩ
44	86 000 000	17 000 000	130 000 000	MΩ
50	46 000 000	4 000 000	48 000 000	MΩ
51	34 000 000	13 000 000	124 000 000	MΩ
52	44 000 000	21 000 000	55 000 000	MΩ
53	23 000 000	21 000 000	85 000 000	MΩ
54	52 000 000	18 000 000	53 000 000	MΩ
60	51 000 000	56 000 000	82 000 000	MΩ
61	36 000 000	58 000 000	400 000 000	MΩ
62	31 000 000	49 000 000	170 000 000	MΩ
63	54 000 000	8 000 000	35 000 000	MΩ
64	28 000 000	31 000 000	366 000 000	MΩ
70	300 000 000	19 000 000	800 000 000	MΩ
71	14 000 000	8 000 000	13 000 000	MΩ
72	94 000 000	13 000 000	165 000 000	MΩ
73	35 000 000	21 000 000	83 000 000	MΩ
74	26 000 000	6 000 000	6 000 000	MΩ
80	41 000 000	8 000 000	7 000 000	MΩ

81	105 000 000	41 000 000	15 000 000	MΩ
82	34 000 000	22 000 000	210 000 000	MΩ
83	126 000 000	91 000 000	86 000 000	MΩ
84	75 000 000	37 000 000	64 000 000	MΩ
90	26 000 000	28 000 000	147 000 000	MΩ
91	53 000 000	48 000 000	105 000 000	MΩ
92	57 000 000	9 500 000	18 000 000	MΩ
93	59 000 000	24 000 000	64 000 000	MΩ
94	52 000 000	1 000 000	92 000 000	MΩ

Tab. B- 2 Hodnoty SIR naměřené na substrátu FR-4 po solné mlze

vzorek	motiv E	motiv F	motiv D3	jednotka
5	120 000	201 000	3 800 000	MΩ
6	190 000	1 200 000	250 000	MΩ
7	3 300 000	655 000	40 000 000	MΩ
8	168 000	274 000	750 000	MΩ
9	6 000 000	4 000 000	20 000 000	MΩ
15	1 000 000	9 000 000	13 000 000	MΩ
16	7 500 000	11 600 000	23 000 000	MΩ
17	5 400 000	9 000 000	14 000 000	MΩ
18	4 800 000	3 400 000	16 000 000	MΩ
19	1 000 000	20 000 000	42 000 000	MΩ
25	242 000	280 000	678 000	MΩ
26	387 000	514 000	842 000	MΩ
27	228 000	1 350 000	3 700 000	MΩ
28	264 000	568 000	1 100 000	MΩ
29	333 000	1 300 000	2 400 000	MΩ
32	9 500	30 000	159 000	MΩ
35	250 000	195 000	282 000	MΩ
36	28 000	90 000	197 000	MΩ
37	186 000	109 000	153 000	MΩ
38	2 900 000	88 000	191 000	MΩ
45	404 000	2 000 000	5 150 000	MΩ
46	81 000	2 000 000	3 000 000	MΩ
47	94 000	58 000	262 000	MΩ
48	90 000	564 000	2 700 000	MΩ
49	253 000	708 000	1 950 000	MΩ
55	1 100 000	75 000	1 800 000	MΩ
56	1 000 000	1 000 000	2 700 000	MΩ
57	99 000	1 800 000	4 000 000	MΩ
58	600 000	260 000	6 000 000	MΩ
59	208 000	38 000	1 900 000	MΩ
65	1 240 000	443 000	3 150 000	MΩ
66	506 000	2 800 000	843 000	MΩ
67	3 900 000	4 000 000	2 900 000	MΩ

68	6 000 000	5 000 000	3 100 000	MΩ
69	3 250 000	366 000	170 000	MΩ
75	46 000	87 000	1 350 000	MΩ
76	21 000	9 500	1 200 000	MΩ
77	47 000	66 000	177 000	MΩ
78	55 000	30 000	362 000	MΩ
79	72 000	205 000	215 000	MΩ
85	971 000	309 000	705 000	MΩ
86	11 000 000	17 000 000	8 000 000	MΩ
87	832 000	291 000	971 000	MΩ
88	574 000	662 000	797 000	MΩ
89	296 000	2 000 000	856 000	MΩ
95	1 660 000	1 680 000	2 630 000	MΩ
96	4 500 000	12 000 000	2 930 000	MΩ
97	1500000	107 000	4 800 000	MΩ
98	615 000	686 000	2 700 000	MΩ
99	2 640 000	3 600 000	339 000	MΩ

Tab. B- 3 Hodnoty SIR naměřené na substrátu Kapton po solné mlze

vzorek	motiv E	motiv F	motiv D3	jednotka
6	34 000	11 000	17 000	MΩ
7	14 000	15 000	20 000	MΩ
8	15 000	8 000	52 000	MΩ
9	18 000	14 500	4 000	MΩ
16	736 000	1 300 000	3 200 000	MΩ
17	4 000 000	492 000	4 600 000	MΩ
18	15 000	663 000	18 000	MΩ
19	10 000 000	4 000 000	111 000	MΩ
26	77 000	1 300	19 000	MΩ
27	15 000	391	3 000	MΩ
28	260 000	70 000	4 000	MΩ
29	8 000	42 000	36 000	MΩ
36	37 000	45 000	520	MΩ
37	5 600	8 200	129 000	MΩ
38	9 600	1 100	51 000	MΩ
39	17 000	9 000	1 100	MΩ
46	6 000	20 000	21 000	MΩ
47	27 000	58 000	3 200	MΩ
48	54 000	580	4 000	MΩ
49	1 600	1 200	3 000	MΩ
50	21 500	1 900	1 600	MΩ
51	14 000	11 500	15 000	MΩ