



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VÝBĚR VHODNÉHO TYPU TAVIDLA PRO STROJNÍ PÁJENÍ VLNOU

FLUX SELECTION FOR WAVE SOLDERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Markéta Dyntarová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Studentka: Bc. Markéta Dyntarová

ID: 155568

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Výběr vhodného typu tavidla pro strojní pájení vlnou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou tavidel a tavidlových zbytků pro strojní pájení vlnou.

Navrhněte metodiku a proveďte teoretické porovnání tavidel dle požadavku konkrétní firmy.

Proměřte a porovnejte smáčivosti dodaných vývodů po aplikaci vybraných tavidel v bezolovnaté pájce metodou smáčecích vah.

Proveďte měření povrchového izolačního odporu tavidlových zbytků vybraných tavidel. Sledujte povrchový izolační odpor po izotermálním ohřevu.

Vyhodnoťte dosažené výsledky a diskutujte vhodnost pro firmu HC electronics a pro následné praktické zkoušky.

Navrhněte metodiku praktických testů se třemi tavidly aplikovanými v pájecí vlně k zapájení SMD a THT součástek.

Vyhodnoťte vzhled pájených spojů pájených rozdílnými tavidly, počet vad u vybraných DPS a úroveň ionizovatelných nečistot před a po čištění.

Spolupráce s firmou HC electronics Hradec Králové.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 22.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Teoretická část diplomové práce na téma „Výběr vhodného typu tavidla pro strojní pájení vlnou“ popisuje problematiku tavidel, tavidlových zbytků a strojního pájení vlnou. Seznamuje čtenáře s požadavky firmy HC electronics a s výběrem vhodných tavidel pro testování. Dále práce obsahuje teoretické porovnání vybraných tavidel a návrh metodik testování tavidel. Praktická část diplomové práce je zaměřena na výběr vhodného tavidla pro firmu HC electronics provedením praktických zkoušek dle předem navržených metodik, mezi které patří metoda smáčecích vah, měření povrchového izolačního odporu, test na měděné zrcadlo, pájení testovacích DPS a metoda ROSE.

Klíčová slova:

Tavidlo, ionizovatelné nečistoty, pájení vlnou, elektromigrace

Abstract:

The theoretical part of diploma thesis „Selection of a suitable type of flux for wave soldering”, is devoted to problematic of fluxes, flux residues and wave soldering. It introduces reader with requirements of company HC electronics and with selection of a suitable types of fluxes for testing. It also contains theoretical comparison and design of flux testing methodologies. The practical part of the diploma thesis is focused on the selection of a suitable flux for the company HC electronics by performing practical tests according to the previously proposed methodologies, which include wetting balance test method, surface insulation resistance measurement, copper mirror test, soldering test of PCB and ROSE method.

Keywords:

Flux, ionic contamination, wave soldering, electromigration

DYNTAROVÁ, M. Výběr vhodného typu tavidla pro strojní pájení vlnou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Výběr vhodného typu tavidla pro strojní pájení vlnou* jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č.140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodiku a pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

Podpis autora

Obsah

Úvod	8
1 Tavidlo.....	9
1.1 Funkce tavidla.....	9
1.2 Složení tavidla	9
1.3 Rozdělení tavidel	9
1.4 Tavidla VOC.....	11
1.5 VOC free tavidla.....	11
1.6 Tavidlové zbytky	11
1.7 No - clean tavidla.....	17
2 Strojní pájení na vlně.....	19
2.1 Nanášení tavidla	19
2.2 Předehřev	20
2.3 Pájecí vlna.....	20
2.4 Chlazení	22
2.5 Ochrana před oxidací pájky	22
2.6 Teplotní profil.....	22
2.7 Faktory ovlivňující proces pájení vlnou	23
3 Výběr tavidla	25
3.1 Požadavky firmy HC electronics	25
3.2 Porovnání vybraných tavidel	25
4 Metodika zkoušek.....	28
4.1 Metoda smáčecích vah.....	28
4.2 Měření povrchového izolačního odporu (SIR).....	31
4.3 Test na měděné zrcadlo	31
4.4 Pájení testovacích DPS.....	31
4.5 Metoda ROSE (Resistivity of Solvent Extract).....	32

5	Testování vybraných tavidel	34
5.1	Měření smáčecích křivek	34
5.2	Měření povrchového izolačního odporu	36
5.3	Test na měděné zrcadlo	38
5.4	Vyhodnocení testování tavidel	42
6	Praktické zkoušky ve firmě HC electronics	43
6.1	Pájení vybraných DPS	43
6.2	Metoda ROSE	48
6.3	Vyhodnocení DPS po pájení	54
6.4	Vyhodnocení tavidel	62
	Závěr	64
	Použitá literatura	66
	Seznam tabulek	70
	Seznam obrázků	71
	Seznam symbolů a zkratk	73

Úvod

Mezi hlavní metody pájení v sériovém provozu patří pájení vlnou a pájení přetavením, které se liší rozdílným procesem pájení. Vzhledem k vyšší zástavbové hustotě a zvýšení podílu SMD prvků oproti součástkám s vývody na DPS se pájí převážně přetavením. U pájecí vlny na rozdíl od pájení přetavením je nutno si uvědomit, že provoz je velmi náročný s ohledem na vysokou spotřebu energie a v neposlední řadě pájecí slitiny. Dále jsou kladeny velké nároky na kontrolu procesu a údržbu. I když pájecí vlna se v této době používá méně než v minulosti z důvodu vysoké ceny na provoz a technologicky limitujícího procesu při miniaturizaci komponent a použití nových typů pouzder, tak velké množství firem na vlně stále pájí.

Tato diplomová práce je zaměřena na výběr vhodného typu tavidla pro strojní pájení vlnou pro firmu HC electronics. Seznamuje s problematikou tavidel, tavidlových zbytků a strojního pájení vlnou. Obsahem je také teoretické porovnání vybraných tavidel dle požadavků firmy HC electronics, navržené metodiky pro testování těchto tavidel a vyhodnocení dosažených výsledků testování.

1 Tavidlo

1.1 Funkce tavidla

Aby byly při pájení spojované materiály dobře smáčivé, tak musí být čisté a bez oxidů. Tavidlo právě zrychluje nebo podporuje smáčení pájených povrchů, protože odstraňuje oxidy, nečistoty a zabraňuje přístupu reakčních prvků (chrání povrch proti oxidaci při procesu pájení). Dále snižuje povrchové napětí pájky a zvyšuje povrchové napětí pájeného povrchu (zajišťuje dobré roztečení pájky po povrchu) a v neposlední řadě zlepšuje přenos tepla. [1]

1.2 Složení tavidla

Tavidlo je složeno z:

- tavidlového nosiče,
- aktivátoru,
- aditiva,
- rozpouštědla. [1]

Mezi tavidlové nosiče je možné zařadit přírodní (RO) a syntetické (RE) pryskyřice a také organické kyseliny (OR). Mimo elektrotechnický průmysl jsou využívána i tavidla na bázi anorganických kyselin (IN). Aktivátory jsou na bázi organických kyselin, aminů, organických halidů nebo organických halogenidů. Rozpouštědla bývají organické (alkohol), anorganické (voda) a kombinované povahy. [1]

Vzhledem k tomu, že primární funkcí tavidla je odstraňovat oxidy a bránit reoxidaci, přičemž reakční působení tavidlového nosiče je většinou v úzkém rozsahu teplot, tak se do tavidel přidávají aktivátory, které toto reakční působení rozšiřují. Agresivnější aktivátory, mezi které patří sloučeniny na bázi kyseliny chlorovodíkové, jsou z hlediska pájení lepší, ale bohužel přispívají k tvorbě koroze. Aditiva se do tavidla přidávají například pro úpravu vlastností zadržování rozpouštědel a povrchového napětí tavidla. Rozpouštědla usnadňují nanášení tavidla na pájené povrchy. [2]

1.3 Rozdělení tavidel

Vyrábí se převážně v kapalné formě nebo jako pastovitá složka v pájecích pastách (pro pájení přetavením). Kapalná tavidla se využívají pro strojní pájení vlnou, kde se tavidlo nanese těsně před procesem pájení na spodní stranu DPS a v systému předeřevu se zasuší (odpařují se rozpouštědla) a aktivuje (začne odstraňovat oxidy). [3]

V Tab. 1-1 je přehled nejnovějšího rozdělení tavidel dle normy J-STD-004. Tavidla jsou rozdělena podle druhu tavidlového nosiče a úrovně aktivace. Úrovně aktivace jsou značeny L – nízká, M – střední a H – vysoká. Pokud je tavidlo aktivované halidy, značí se číslem 1.

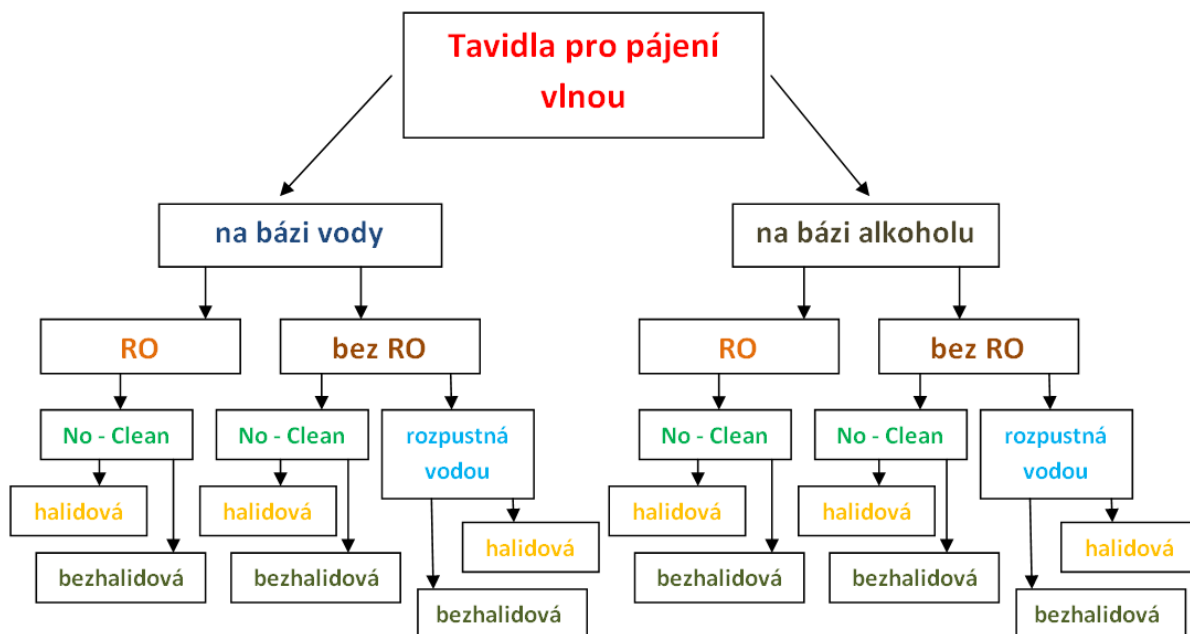
Tab. 1-1 Klasifikace tavidel dle normy J-STD-004 [4]

tavidlový nosič	aktivita	% halidů	typ	označení
ROSIN (RO)	nízká	0	L0	ROL0
		< 0,5	L1	ROL1
	střední	0	M0	ROM0
		0,5-2,0	M1	ROM1
	vysoká	0	H0	ROH0
		> 2,0	H1	ROH1
RESIN (RE)	nízká	0	L0	REL0
		< 0,5	L1	REL1
	střední	0	M0	REM0
		0,5-2,0	M1	REM1
	vysoká	0	H0	REH0
		> 2,0	H1	REH1
ORGANIC (OR)	nízká	0	L0	ORL0
		< 0,5	L1	ORL1
	střední	0	M0	ORM0
		0,5-2,0	M1	ORM1
	vysoká	0	H0	ORH0
		> 2,0	H1	ORH1
INORGANIC (IN)	nízká	0	L0	INL0
		< 0,5	L1	INL1
	střední	0	M0	INM0
		0,5-2,0	M1	INM1
	vysoká	0	H0	INH0
		> 2,0	H1	INH1

Na Obr. 1-1 je vykresleno rozdělení tavidel pro pájení vlnou. Tavidla jsou buď na bázi vody, nebo na bázi alkoholu. Voda je nehořlavá a velmi snižuje obsah emisí. Alkohol vykazuje dobré smáčení povrchu, snazší přehřev a snadněji se v něm rozpouštějí ostatní složky tavidla, avšak je hořlavý a obsahuje emise. [4]

Tavidlo s obsahem přírodní pryskyřice umožňuje větší aktivitu, ale zanechává více viditelných zbytků a znesnadňuje testování. Tavidla bez přírodní pryskyřice jsou pro ICT (vnitroobvodové) testy vhodnější, avšak potřebují velmi dobré řízení procesu. [4]

No – clean tavidla eliminují nutnost čištění, ale jsou méně aktivní. Vodou rozpustná tavidla nemají omezenou aktivitu, ale po pájení jsou korozivní a musí se důkladně čistit, což zvyšuje náklady. Halidy se často používají jako aktivátory díky jejich reaktivitě a rychlosti odstraňovat oxidy, ale mohou být příčinou vzniku koroze. Bezhalidová tavidla jsou bezpečnější, ale nejsou tak reaktivní. [4]



Obr. 1-1 Rozdělení tavidel pro pájení vlnou [4]

1.4 Tavidla VOC

Tavidla VOC (Volatile Organic Compounds) jsou na bázi alkoholu, nejčastěji izopropanolu. Jsou tedy hořlavé a tím se zvyšuje náročnost na skladování. Při procesu pájení VOC tavidla vznikají emise těkavých organických sloučenin, které jsou nebezpečné pro životní prostředí, protože podporují skleníkový efekt a mají neblahý vliv na ozon. I přesto, že VOC tavidla vykazují lepší vlastnosti při pájecím cyklu, tak vzhledem k výše zmíněným nevýhodám se začínají využívat spíše tavidla s nízkým obsahem VOC nebo tavidla VOC free. [1]

1.5 VOC free tavidla

Tavidla VOC free jsou na bázi vody a neobsahují těkavé organické sloučeniny. Výhodou je, že při procesu pájení neuvolňují žádné nebezpečné látky a jsou nehořlavé. Je ale nutné, aby se rozpouštědlo z tavidla při procesu předehřevu odpařilo. Avšak voda má oproti alkoholu vyšší bod varu a její odpaření z tavidla je zdaleka pomalejší (je vyžadována větší teplota předehřevu). Pokud se všechna voda při procesu předehřevu nevypaří, tak se při styku s roztavenou pájkou velmi rychle odpařuje, což způsobuje rozstříkávání tavidla i pájky. Výsledkem je i velké množství defektů, mezi které patří například tvorba krápníků. Při přechodu na VOC free tavidla je vyžadováno více změn v montážním procesu. Mezi změny patří zvýšení teploty předehřevu a je potřebné zařízení, které odvádí odpařující se vodu z tavidla. [5]

1.6 Tavidlové zbytky

Tavidlové zbytky jsou nečistoty, které mohou poškodit funkčnost a dlouhodobou spolehlivost a životnost pájených spojů. Zhoršují elektrické vlastnosti, způsobují korozi, elektrochemickou

migraci, zhoršují vzhled DPS, snižují hodnotu izolačního odporu a také omezují testování pomocí jehel. [3]

Kolik tavidlových zbytků zůstává na DPS po pájení záleží na procentuálním obsahu pevné složky v tavidle, metodě nanesení tavidla (kolik mg tavidla je aplikováno na plochu) i na způsobu pájení. Obsah pevné složky se pohybuje v rozmezí 2 až 35 hmotnostních %. [6]

1.6.1 Ionizovatelné nečistoty

Ionizovatelné (iontové) nečistoty jsou polární sloučeniny, tedy sloučeniny rozpustné ve vodě. Iontové nečistoty jsou obvykle uvolňovány díky degradaci pryskyřice ze zbytku tavidla, které zůstalo na DPS po procesu pájení. Pokud se DPS vystaví při skladování nebo při provozu vlhkému prostředí nebo kondenzačním stavům, může dojít k absorpci vody, ve které se iontové nečistoty rozpouští. Vzniklý elektrolyt může za přítomnosti vhodného elektropotenciálu mezi dvěma vodiči zapříčinit korozivní jevy, jako je například elektrochemická migrace (ECM), při níž vznikají vodivá anodická vlákna (CAF) nebo dendrity (viz kapitola 1.6.3). Rozdíl mezi CAF a dendrity je takový, že anodická vlákna rostou podél rozhraní epoxidu a skleněného vlákna, zato dendrity vyrůstají na povrchu DPS. Při růstu dendritů či anodických vláken se snižuje povrchový izolační odpor a nakonec může dojít až ke zkratu obvodu, což je velmi nežádoucí. [7][8]

V dnešní době se stále zmenšují detaily na DPS, některá elektronická zařízení pracují v náročnějším prostředí a jsou vyšší nároky na povrchové izolační odpory s ohledem na nižší používané úrovně signálů v obvodech. Vzhledem k těmto skutečnostem je otázkou, zda po pájení DPS ionizovatelné nečistoty čistit či nečistit a jak čisté je opravdu čisté. Na trhu jsou samozřejmě dostupná i bezoplachová tavidla, tzv. no-clean (viz kapitola 1.7), avšak s rostoucími nároky na elektroniku i taková tavidla je třeba po procesu pájení z DPS odstranit. [8]

Pokud není DPS vystavena kondenzačním stavům, které vznikají přechodem teplot, tedy při vlhkostních šocích a pokud se na ní nemůže nikdy srážet vlhkost, tak čištění po procesu pájení není nutné (stačí pohledová čistota DPS). Avšak otázkou zůstává, kdy jsou kondenzační stavy na DPS vyloučeny. Také záleží, jestli se jedná o levnější elektroniku, kde není kladen důraz na vysokou spolehlivost, či naopak, pokud jde o elektronická zařízení využívána v extrémních prostředích, nebo kde selhání zařízení může způsobit nemalé problémy (v tomto případě, bez ohledu na iontovou čistotu, jen pohledová čistota nestačí). [8]

Jak čisté je opravdu čisté? Je stanovena nějaká mez? Toto není opravdu jednoduchá otázka. Po procesu pájení je sice možné použít buď přímé, nebo nepřímé metody měření iontových nečistot, avšak vzhledem k rozdílnému postupu měření nelze srovnávat výsledky z jednotlivých přístrojů. [8]

Mezi přímé metody je možné zařadit například metodu ROSE, ionograf, omegametr, kontaminometr. Mezi nepřímé metody patří vizuální metody, korozivita tavidla, SIR testy, test elektromigrace, a další. Pomocí nepřímých metod se zjišťují účinky znečištění, a tedy

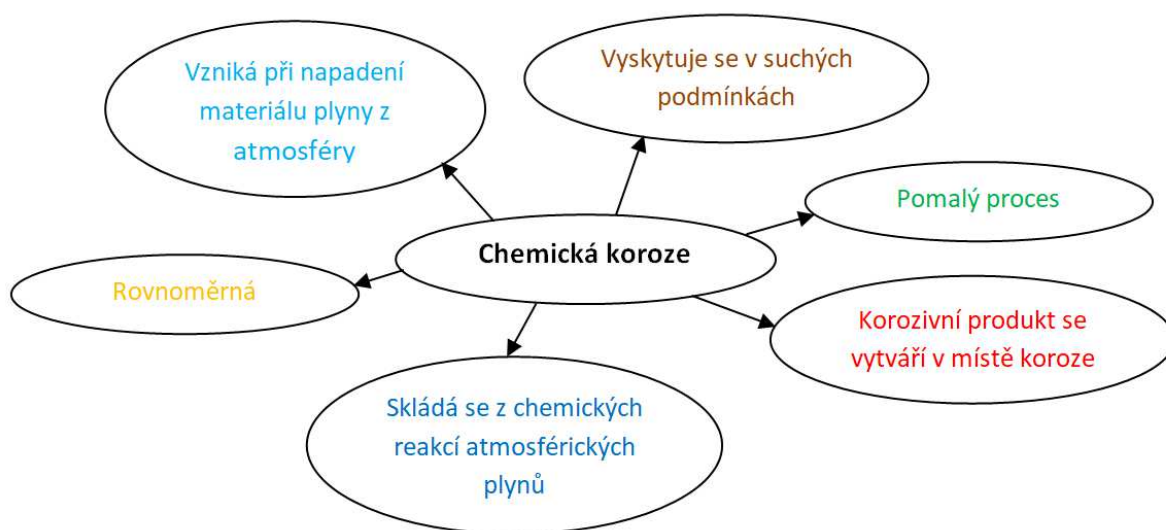
oproti přímým metodám, které měří znečištění v určitých fyzikálních jednotkách, se velmi přibližují praxi. [8]

1.6.2 Koroze

V případě desek s plošnými spoji může díky tavidlovým zbytkům docházet k tvorbě koroze. Jedná se o fyzikálně chemickou interakci mezi kovem či slitinou kovu a jeho prostředím. Tato interakce způsobuje změny vlastností kovů, což vede k jeho poškození a k následnému selhání funkce DPS. Koroze se rozděluje na:

- chemickou a elektrochemickou,
- vznikající při vysoké teplotě a při nízké teplotě,
- suchou (nepřítomnost vody při vysokých teplotách) a mokrou (za přítomnosti vody při pokojové teplotě),
- rovnoměrnou, nerovnoměrnou a strukturální. [9][10]

Během chemické koroze (viz Obr. 1-2) dochází k oxidaci kovů. Vzniká tedy oxidační vrstva na povrchu kovu. Při oxidaci ionty kovů difundují na povrch oxidační vrstvy a kyslík difunduje k povrchu kovu. Rostoucí teplota tento difuzní pohyb zrychluje, ale s větší oxidační vrstvou se zpomaluje difuze kyslíku, což oxidaci zase zpomaluje. Chemická reakce probíhá bez přítomnosti elektrolytu. [1][9]



Obr. 1-2 Hlavní charakteristika chemické koroze [11]

Elektrochemickou korozi je dále možné rozdělit na galvanickou a elektrolytickou korozi. Pokud jsou alespoň dva různé elektricky vodivé kovy vodivě spojeny a jsou ve stejném elektrolytu, tak vzniká galvanický článek (méně ušlechtilý kov tvoří anodu). Při galvanické korozi vzniká elektrický proud samovolně bez dodání vnější energie (hnacím faktorem galvanické koroze je rozdíl elektrochemických potenciálů kovů). Elektrolytická koroze od galvanické se liší tím, že je vynucena průchodem elektrického proudu. Při

propojení kovů elektrolytem dochází průchodem stejnosměrného proudu z vnějšího zdroje ke gradientu potenciálu a tím vzniká elektrolytický člunek. [1][12] [13]

Elektrochemická koroze se skládá ze dvou typů reakcí, které probíhají současně. Jedná se o reakci anodickou a katodickou. Při anodické (oxidační) reakci přecházejí kladné ionty kovu do elektrolytu a elektrony v kovu zůstávají a nabíjejí ho záporně. Při katodické reakci se uvolněné ionty redukují. Vyšší teplota reakci urychluje. [1]



Obr. 1-3 Hlavní charakteristika elektrochemické koroze [11]

U rovnoměrné koroze materiál ubývá rovnoměrně po celé ploše a můžeme ji zařadit mezi nejpříznivější. Nerovnoměrná koroze je naopak velice nebezpečná, protože může napadnout jenom část povrchu a postupovat do hloubky materiálu, což nemusí být vidět. Mezi nerovnoměrnou korozi dle poměru hloubky a plochy patří bodová, důlková a skvrnitá. Mezi typy strukturální koroze patří:

- lamelární,
- mezikrystalová,
- transkrystalová,
- selektivní,
- extrakční,
- nitkovitá. [14]

1.6.3 Elektrochemická migrace (ECM)

Pájecí slitina, která obsahuje Sn je v mikroelektronice nejvíce náchylná na ECM, což výrazně ohrožuje spolehlivost pájených spojů. V současné době roste miniaturizace elektronických zařízení, zmenšují se součástky, jsou tenčí kovové části a mezi komponenty se snižují rozestupy. Často elektronická zařízení musí pracovat i ve vlhkém či znečištěném prostředí. Všechny tyto okolnosti přispívají k tvorbě ECM, což může vést ke zkratu a následnému selhání funkce elektroniky. [15]

Elektrochemickou migraci je možné zařadit do elektrochemické koroze. Jedná se o růst kovových vláken přes nevodivou část DPS, pokud se na ní vyskytuje elektrolytický roztok za přítomnosti rozdílného potenciálu mezi vodiči. Jedná se jak o křehká vlákna zvaná dendrity, tak o vodivá anodická vlákna (CAF). Při růstu kovových vláken k sousednímu vodiči, dochází k poklesu izolačního odporu (SIR), což může vést až ke zkratování obvodu. [16]

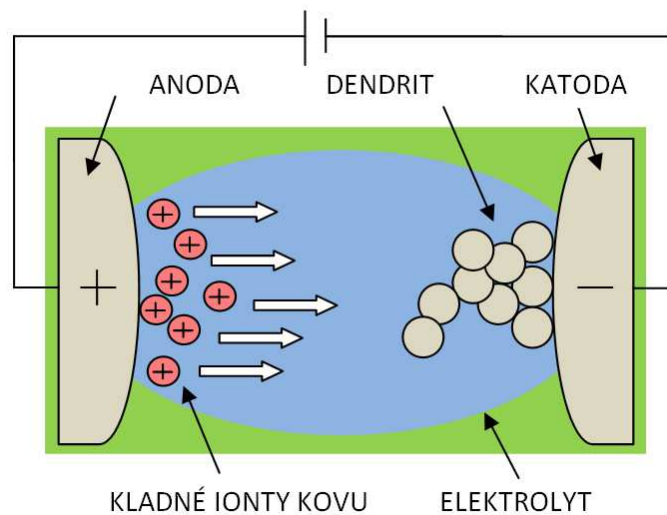
ECM je závislá na teplotě, relativní vlhkosti, materiálu vodičů, napětí, typu nečistot a na jejich množství. ECM se projevuje při stejnosměrném napětí. Pokud je mezi vodiči připojeno vysokofrekvenční napětí, tak je růst dendritů i CAF výrazněji omezen. Kontaminace DPS tavidlovými zbytky podporuje adsorpci vlhkosti na jejím povrchu. Hydrofobní izolační materiály se silně polárními skupinami mají mnohem větší citlivost k elektromigraci, než hydrofilní se slabými či žádnými polárními skupinami, protože mají menší sklon k adsorpci vlhkosti na jejich povrch. [17]

Elektrochemická migrace se vyskytuje ve vlhké, mokré a suché formě. U vlhké ECM je povrch izolačního materiálu pokryt tenkou neviditelnou vrstvou vlhkosti. Objevuje se převážně u stříbra. Mokrý ECM probíhá, pokud jsou na DPS vodivé plošky propojeny viditelnou vrstvou kondenzované vody. V tomto případě se elektrochemická migrace díky kapce vody prudce zrychlí oproti jen vysoké relativní vlhkosti. Suchá elektrochemická migrace probíhá bez přítomnosti vlhkosti, za poměrně vysoké teploty (150 – 200 °C) a při vysoké proudové hustotě ($J > 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$). Částice materiálu jsou přesunovány díky vysoké proudové hustotě a mohou vznikat například whiskery (viz Obr. 1-4). [17]



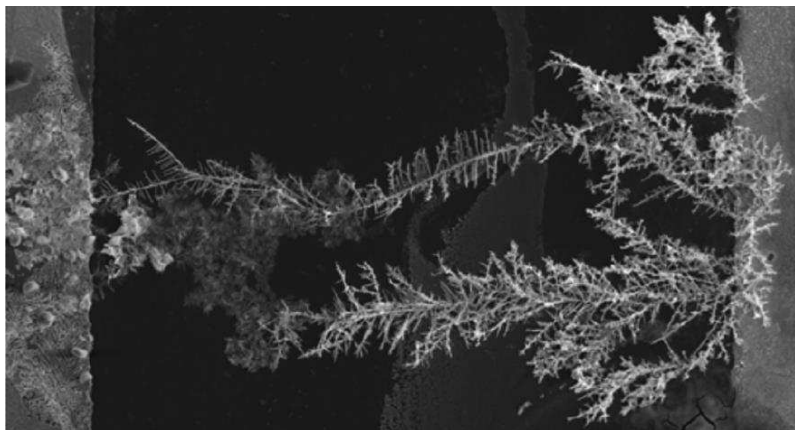
Obr. 1-4 Cínové whiskery pod skenovacím elektronovým mikroskopem [18]

Na Obr. 1-5 je nakreslen princip vzniku dendritů mezi dvěma pájenými spoji, mezi kterými je rozdílný potenciál.



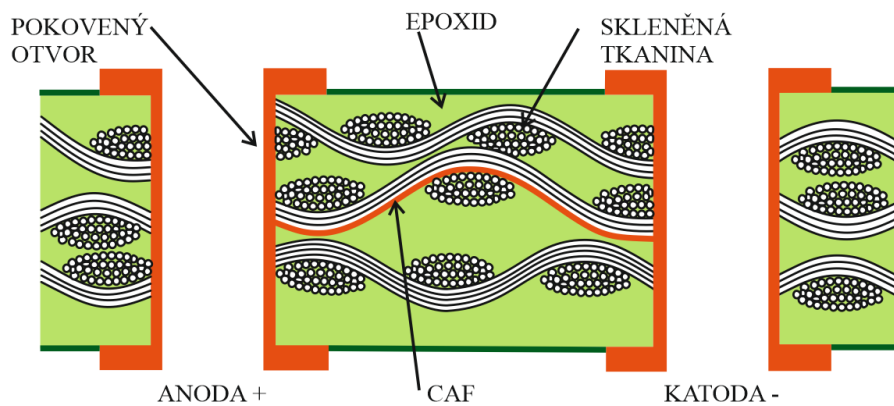
Obr. 1-5 Princip vzniku dendritu

Podmínkou pro růst dendritů je elektrolytická vrstva, která tyto dva pájené spoje propojuje. Dendrity vznikají díky anodické a katodické reakci. Při anodické reakci dochází k oxidaci, kdy se rozpouští pájený spoj s kladnějším potenciálem (anoda) a vznikají kladné ionty kovu. Tyto kladné ionty putují vlivem rozdílného elektrického potenciálu skrz elektrolyt směrem ke spoji se zápornějším elektrickým potenciálem (katoda). Katodickou reakcí jsou u katody kladné ionty redukovány a postupně se vytváří se dendrity na povrchu izolačního materiálu DPS, které mají stromečkovou strukturu, jak je názorně vidět na Obr. 1-6. [15]



Obr. 1-6 Ukázka vytvořených dendritů [15]

Vodivá anodická vlákna (CAF) jsou výsledkem elektrochemické migrace a vytváří se zejména podél rozhraní epoxidu a skleněných vláken (viz Obr. 1-7) nejčastěji mezi pokovenými otvory uvnitř osazené DPS (Hole to Hole). CAF může vznikat i mezi pokoveným otvorem a vodivou plochou (Hole to Track) nebo mezi vodivými plochami (Track to Track). Elektrická porucha vzniká obvykle propojením vodičů (anody a katody) nebo rozpadem vodiče (anody).



Obr. 1-7 CAF rostoucí podél rozhraní epoxidového skla (Hole to Hole) [19]

V dnešní době je kladen důraz na bezolovnaté technologické postupy, avšak při bezolovnatém procesu je zapotřebí větší teplota, která samozřejmě ovlivňuje jak osazené součástky, tak stabilitu laminátu pryskyřice a skleněných vláken. Degradace vazby mezi skleněnými vlákny a pryskyřicí usnadňuje průchod vlhkosti do vnitřních vrstev DPS, která umožňuje průběh elektrochemické migrace. Cestičky uvnitř DPS mohou vznikát i z jiných důvodů, a to například špatným zpracováním skla či mechanickým namáháním DPS. [20][21][22]

Prvním krokem vzniku CAF je tedy fyzikální degradace mezi epoxidem a skleněnými vlákny. Vlhkost na rozhraní epoxidu a skleněného vlákna působí jako elektrolyt, pokovené otvory jsou anodou a katodou a provozní napětí se stává hnacím potenciálem elektrochemické koroze. Protože na anodě mimo jiné vznikají kladné vodíkové ionty H^+ a na katodě záporné hydroxidové ionty OH^- , vytváří se mezi elektrodami pH gradient. pH a koroze mají mezi sebou úzký vztah. Ke korozi dochází pouze při pH menším než 7. Kladné vodíkové ionty v oblasti anody snižují pH a tedy mohou zajistit rozpouštění anody. Měděné ionty vzniklé rozpouštěním anody jsou přitahovány katodou vlivem pH gradientu a putují podél rozhraní epoxidu a skleněného vlákna. Až se měděné ionty přiblíží do oblasti s neutrálním pH, tak se ionty mědi stanou nerozpustnými a usazují se na rozhraní. [22]

Mezi faktory ovlivňující tvorbu CAF lze rozdělit na vnitřní a vnější vlivy. Mezi vnitřní vlivy patří složení materiálu DPS, metalizace a konfigurace vodičů a součástek. Vnější vlivy zahrnují výrobu (teplota při pájení, typ tavidla), skladování a používání DPS (mechanické namáhání, teplota a vlhkost prostředí). [22]

1.7 No - clean tavidla

No – clean (bezoplachová) tavidla obsahují malé množství pevné složky v rozmezí 2 až 4 hmotnostních % a tudíž po pájení vykazují pouze nepatrné množství tavidlových zbytků, které není nutno čistit. Při použití těchto tavidel se eliminuje použití čistícího zařízení, které bezprostředně následuje po pájení. Čistit tavidlové zbytky ale můžeme, vše záleží na

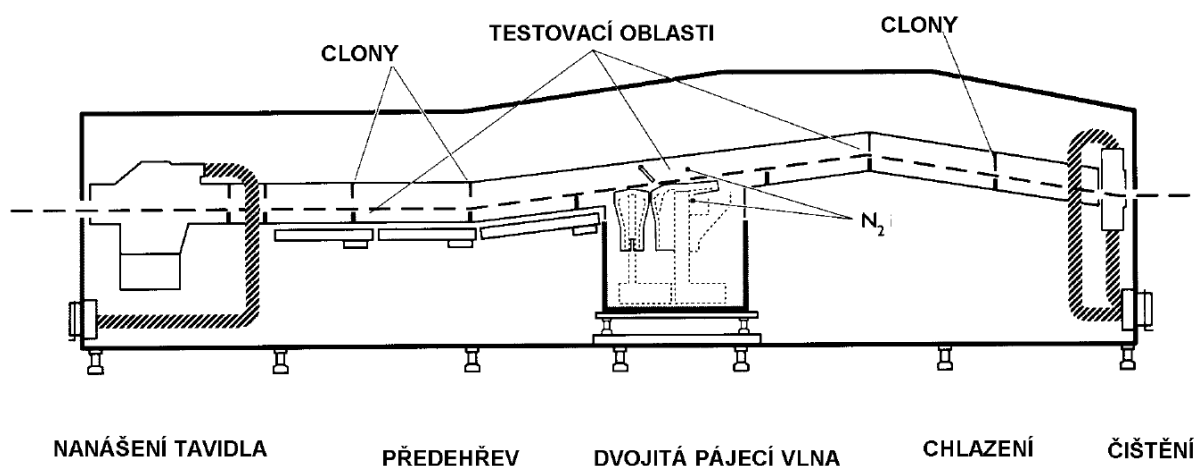
požadavcích, zkušenostech a preferencích. No-clean tavidla jsou na bázi alkoholu i na bázi vody, a vzhledem k nízkému procentu pevné složky bývají méně aktivní.[6]

Požadavky pro no – clean tavidla jsou následující:

- je hydrofobní, bezhalidový a stabilní roztok,
- málo reaktivně působí při pokojové teplotě,
- vykazuje vysokou aktivitu při pájecí teplotě (zajišťuje vynikající pájitelnost),
- nezanechává korozní a lepidivé zbytky,
- zajišťuje vysoký povrchový izolační odpor,
- nezpůsobuje elektromigraci,
- umožňuje přístup měřících jehel na testovací plošky,
- vyhovuje předpisům o ochraně zdraví a bezpečnosti.[1][23]

2 Strojní pájení na vlně

Jedná se o poměrně velké zařízení, jehož jednotlivé moduly jsou znázorněny na Obr. 2-1. Moduly na sebe navzájem navazují a patří mezi ně nanášení tavidla, předehřev, pájecí vlna, chlazení a v určitých případech i čištění. DPS s osazenými součástkami jsou usazeny na pásový dopravník, který zajistí plynulý průchod celým zařízením. Sklon dopravníku bývá od 5° do 7°. [23]



Obr. 2-1 Uspořádání jednotlivých modulů v pájecí vlně [1]

2.1 Nanášení tavidla

Na dolní stranu DPS je nejprve nanášeno tavidlo, které je pro proces pájení velice důležité, protože jeho hlavní funkcí je odstraňovat oxidy z pájených povrchů a brání reoxidaci. Je snahou zde vytvořit tenkou vrstvu tavidla se stálou hustotou a tloušťkou, která musí být aktivní po celou dobu pájení. V dnešní době se tavidlo zpravidla nanáší sprejem často s pomocí ultrazvuku, eventuálně napěněním. Po nanesení tavidla následuje vzduchová stírací tryska nebo odsávací štěrba, která slouží k odstranění přebytečného množství tavidla. [3][23][24]

Sprejový dávkovač může fungovat na různých principech, mezi které patří rozprašovací trysky, historicky se používal i dávkovač s rotujícím kartáčem či rotující bublen, jehož stěny jsou tvořeny sítím. Díky sprejovému dávkovači je umožněno jemné nastavení tloušťky tavidla a je možné 3,5x snížit množství tavidla oproti použití pěny. Další výhodou je, že se tavidlo nedostává na horní stranu DPS. Při použití ultrazvuku je možné vytvořit tenkou, dokonale souvislou vrstvu tavidla. Pěnový dávkovač tvoří keramický porézní kámen ponořený v tavidle, přes který proudí stlačený vzduch. Vznikají bublinky, které putují tryskou na povrch, kde se tavidlo ve formě homogenní pěny aplikuje na DPS. [3][23][24]

2.2 Předehřev

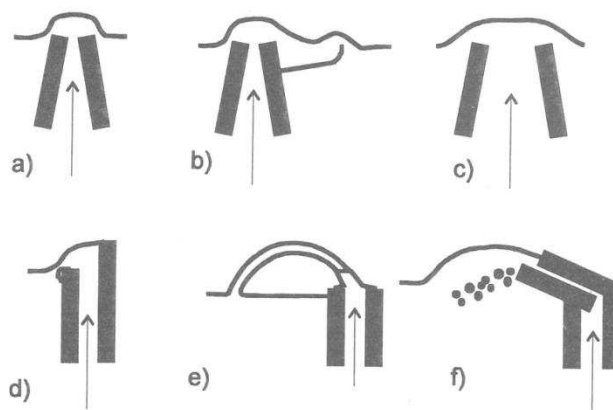
Předehřev je důležitý pro odstranění rozpouštědel z tavidla, dále pro správné zaschnutí a aktivaci tavidla, pro snížení tepelného šoku DPS a součástek. Je požadován homogenní ohřev desky, růst teploty je cca $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Teplota je měřena na horní vrstvě DPS. K předehřevu se využívají sálavé předehříváče (křemenné zářiče), topné desky (infračervené záření různých vlnových délek) nebo předehříváče foukající teplý vzduch, které jsou složeny z topných těles a ventilátoru. Teploty předehřevu se liší v závislosti na teplotě aktivace tavidla, na tepelné kapacitě DPS i součástek, na rozpouštědle v tavidle aj. [3][23][24]

2.3 Pájecí vlna

Pájecí vlna je proud roztavené pájky hnaný čerpadlem z vyhřívané vany do trysky s mřížkou, která vytváří vlnu. Skládá se z elektricky vyhřívané vany s pájecí slitinou, čerpadla, vedení proudu pájky a trysek. Pájecí vlna může být (viz Obr. 2-2):

- oboustranná,
 - a) úzká,
 - b) zdvojená,
 - c) široká,
- jednostranná (reflexní),
 - d) delta,
 - e) dutá,
 - f) turbulentní.

Reflexní vlny proudí proti pohybu DPS a tím omezují vznik krápníků. Mezi základní druhy pájecích vln patří vlna jednoduchá, dvojitá vlna a dutá vlna. [1][23]



Obr. 2-2 Základní druhy pájecích vln [23]

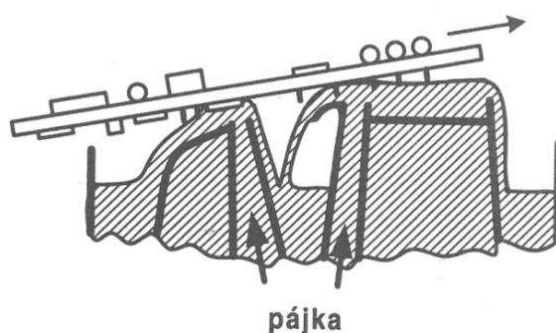
2.3.1 Jednoduchá vlna

Jednoduchou pájecí vlnou je možné pájet běžně vývodové součástky. SMT součástky lze taktéž zapájet, avšak musí být větších rozměrů s menší hustotou osazení, protože při větší

hustotě osazení vznikají stíny, které mohou bránit vniknutí pájky do všech pájecích míst. [23][24]

2.3.2 Dvojitá vlna

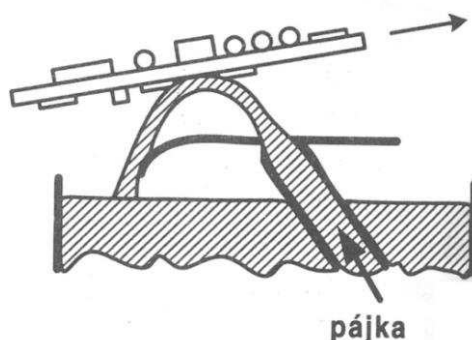
Tyto problémy řeší dvojitá vlna (viz Obr. 2-3), jejíž součástí je jedna vlna navíc. První vlna je turbulentní a proudí ve směru pohybu DPS. Zajišťuje dokonalé prohřátí a dobré zatečení pájky, tedy smočí pájkou všechny pájené plošky na DPS a všechny kontakty součástek. Doba pájení na turbulentní vlně je 0,5 – 0,8 s. Druhá vlna je široká a její proudění je laminární. Jejím klidným oboustranným prouděním upravuje množství pájky a tvar pájeného spoje. Tato vlna určuje kvalitu pájení bez zkratů. Na klidné vlně se obvykle pájí 2 – 5 s. Pokud se k pájení využívá bezolovnaté pájecí slitiny, je doporučeno umístění obou vln blízko sebe. [1][23][24]



Obr. 2-3 Dvojitá vlna [24]

2.3.3 Dutá vlna

Dutá vlna je znázorněna na Obr. 2-4. Pájecí slitina proudí proti směru pohybu DPS a je velmi rychlá ($1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Silný proud pájky táhne DPS a vývodové součástky směrem dolů, není zde nutné součástky nijak přidržovat. Velkou výhodou oproti výše zmíněným vlnám je velmi nízké tepelné zatížení SMD součástek a malá náplň pájecí slitiny. Důvodem je velmi krátký kontakt DPS s vlnou (1 – 2 s). [3][23][24]



Obr. 2-4 Dutá vlna [24]

Předehřátá osazená DPS s vrstvičkou aktivovaného tavidla se pohybuje po povrchu pájecí vlny. Pájecí vývody s DPS se ohřívají na požadovanou teplotu, při které dojde ke smočení pájkou s následným zapájením. [3][24]

2.4 Chlazení

Pájený spoj je studeným vzduchem ochlazován pozvolně na teplotu okolí tak, aby byla vytvořena požadovaná mikrostruktura pájeného spoje. Při prudkém ochlazení může docházet k poškození součástek. Při tomto procesu nesmí docházet k otřesům, protože by mohlo dojít k poruše integrity spoje. [1]

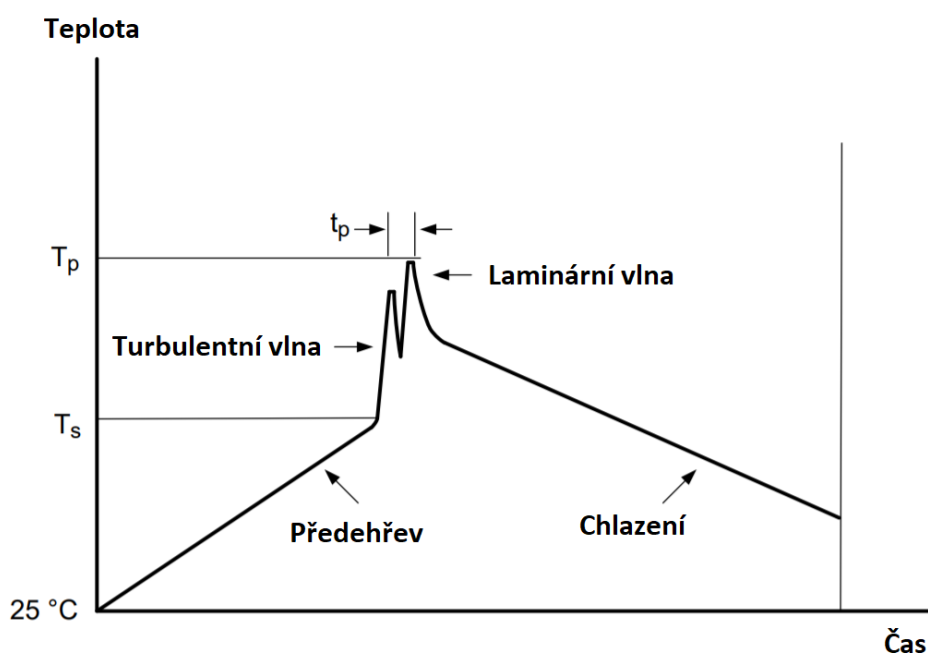
2.5 Ochrana před oxidací pájky

Aby se zabránilo tvorbě oxidů, je možné použít pájecí oleje. **Pájecí olej** může krýt pouze lázeň pájky (pájení bez oleje) nebo může být připuštěn i do vlny (pájení s olejem). Pokud je lázeň pájky pokryta pájecím olejem, tak se minimalizuje její oxidace, čímž se zlepší pájecí proces a sníží se spotřeba doplňování pájecí slitiny do lázně. Pokud však je pájecí olej připuštěn i do vlny, tak se sníží povrchové napětí pájky, což proces pájení zrychlí. Pájecí oleje jsou levnější variantou pro antioxidační ochranu, avšak je zde nutné počítat s olejovými výparry, požárním nebezpečím, olejovými zbytky na DPS apod. [23]

Tvorbě oxidů je možno předejít pájením v **dusíkové atmosféře**, která obsahuje často kolem 500 ppm kyslíku. Požadavky na koncentraci kyslíku se liší v závislosti na tom, zda se jedná o lokální dusíkový zákryt, či je přítomná dusíková atmosféra na celé vlně. Dusík minimalizuje oxidaci tavidla, pájecí slitiny, pájecích plošek, vývodů součástek i nepáživé masky. Dále redukuje množství zkratů, zmenšuje smáčecí úhel, zvyšuje povrchové napětí smáčeného povrchu a snižuje zpravidla povrchové napětí pájecí slitiny (čímž zajišťuje rychlejší proces smáčení), roztékavost, a smáčecí sílu. Při použití dusíkové atmosféry se snižuje spotřeba pájky o 30 % - 50 % a zvětšuje se procesní okno ve volbě tavidla, pájky, v nárocích na čištění tavidlových zbytků (omezení oxidace tavidla) i snížení náročnosti na údržbu stroje (odstraňování strusky z povrchu, čištění trysek i mřížek), ve smáčecích charakteristikách a v nastavení parametrů. Mezi nevýhody patří vysoké pořizovací náklady a spotřeba dusíku. Je nutné si uvědomit, že zařízení pro pájení s dusíkovou atmosférou je objemnější a složitější. [1][3]

2.6 Teplotní profil

Teplotní profil je jeden z faktorů, který ovlivňuje výslednou jakost pájeného spoje. Jeho nastavení je závislé na typu, vlastnostech pájecí slitiny, materiálu DPS, pouzder součástek, tavidla (teplota nutná pro aktivaci tavidla) a atmosféry. Dále záleží na teplotní odolnosti používaných součástek a konstrukčních prvků (zejména plastových), DPS a lepidla (pro přilepení SMT součástek). Je zde nutné zohlednit působení oxidace i samotnou konstrukci zařízení. Doporučený teplotní profil je názorně vidět na Obr. 2-5 a doporučené hodnoty pro pájení vlnou jsou zapsané v Tab. 2-1. [3]



Obr. 2-5 Doporučený teplotní profil [25]

Tab. 2-1 Doporučené hodnoty pro pájení vlnou [25]

funkce profilu	Sn63Pb37	Pb - free
nárůst teploty v přehřevu [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$]	typicky 1-2, max. 4	typicky 1-2, max. 4
maximální teplota přehřevu T_s^* [$^{\circ}\text{C}$]	90-130	110-130
maximální teplota pájecí vlny T_p [$^{\circ}\text{C}$]	245-250	255-260
max. prodleva mezi vrcholovými teplotami t_p [s]	10	10
prodleva na turbulentní vlně [s]	1-2	1-2
prodleva na laminární vlně [s]	2-4	2-4
rychlost chlazení [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$]	4-7	4-7

* měřeno na horní straně DPS

2.7 Faktory ovlivňující proces pájení vlnou

Kvalita pájení vlnou je ovlivněna mnoha faktory, mezi které patří:

- pájecí slitina,
- tavidlo,
- návrh, materiál, tloušťka, tepelná kapacita DPS,
- technologický proces,
- smáčivost vývodů součástek, pokovených otvorů a pájených ploch,
- tepelná kapacita součástek a pouzder,
- zařízení,
- zkušenost a znalosti obsluhy.

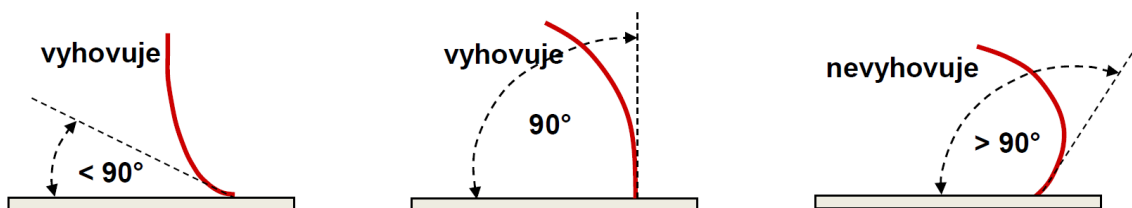
Záleží na výběru složení (olovnatá, bezolovnatá), vlastností, technologií výroby a znečištění pájecí slitiny. U tavidla je podstatné zvážit samotný typ tavidla, typ rozpouštědla a aktivátoru, množství pevné složky a požadavky na čištění. Kvalitu pájených spojů ovlivňuje povrchová úprava (HAL, OSP, ENIG), nepájivá maska a jejich kompatibilita s tavidlem, znečištění a rovinnost pájecích ploch. Dále je nutné zvolit vhodný technologický proces zahrnující:

- rychlost pohybu a sklon dopravníku,
- množství tavidla a jeho rovnoměrnost nanesení,
- teplota přehřevu,
- kontrola správného množství pájky v pájecí vlně,
- výška pájecí vlny,
- čas smáčení DPS v pájce,
- rychlost oddělení DPS od pájky,
- ochranná atmosféra/ochranný olej/bez ochrany před oxidací,
- chlazení,
- kontrola. [26]

Smáčecí úhel udává míru smáčení povrchu pájkou. Smáčení lze rozdělit na fyzikální a chemické. U fyzikálního neboli inertního smáčení dochází k adheznímu spojení, což znamená, že na rozhraní pájených povrchů nedojde ke změně chemického složení. Naopak u chemického (reaktivního) smáčení na rozhraní pájených povrchů dochází k vytvoření společné fáze. Mezi typy smáčivosti povrchu patří:

- smáčivý (pájka se roztéká po povrchu),
- částečně smáčivý (pájka pokrývá povrch nedokonale),
- nesmáčivý (pájka se neroztéká po povrchu),
- odsmáčivý (pájka se nejprve rozteče po povrchu a následně se odsmáčí). [27]

Na Obr. 2-6 je graficky znázorněno smáčení pájeného povrchu, které se hodnotí podle smáčecího úhlu. Čím je smáčecí úhel menší, tím se jedná o lepší smáčení. Tedy pokud je smáčecí úhel menší jak 90° , tak se jedná o povrch dobře smáčivý. Jestliže je smáčecí úhel větší jak 90° , tak je povrch nesmáčivý. Na rozhraní, kdy je smáčecí úhel roven 90° , je pájený povrch špatně smáčivý. Dobré smáčení podmiňuje vyšší povrchové napětí pájeného povrchu a menší povrchové napětí roztavené pájecí slitiny, což lze zajistit použitím tavidel. [26] [27]



Obr. 2-6 Smáčecí úhel [27]

3 Výběr tavidla

3.1 Požadavky firmy HC electronics

Firma HC electronics v současné době využívá pro strojní pájení na vlně tavidlo, které je v této práci označeno číslem 3. S tímto tavidlem jsou celkem spokojeni, ale protože je tavidlo už poměrně staré, tak je jejich cílem otestovat novější tavidla, s kterými by měli stejné či dokonce lepší výsledky.

Tavidla dle požadavků firmy HC electronics mají splňovat následující kritéria:

- jsou na alkoholové bázi (VOC),
- mají sušinu max. 3,5 %,
- jsou vhodné pro pájení vlnou,
- mohou se použít jak pro olovnatou, tak i bezolovnatou pájku.

3.2 Porovnání vybraných tavidel

Podle výše uvedených požadavků bylo vybráno 6 různých tavidel. V Tab. 3-1 jsou porovnány hlavní specifikace tavidel včetně tavidla, které firma používá v současnosti.

Tab. 3-1 Specifikace tavidel dle technických listů

označení tavidla	1	2	3	4	5	6	7
báze rozpouštědla	IPA	IPA	IPA	IPA	IPA	IPA	IPA
bod vzplanutí [°C]	16	16	12	Není uveden	12	13	< 10
klasifikace tavidla	ORL0	ORL0	REL0	ROL0	REL0	REL0	ORL0
obsah pevné složky [%]	1,90	4,20	2,90	2,70	2,20	2,20	1,94
hustota [g·cm ⁻³]	0,818	0,795-0,811	Není uvedena	Není uvedena	0,813	0,811	Není uveden
číslo kyselosti [mg KOH·g ⁻¹]	19,00	33,00-37,00	19,00	16,00	15,80	16,20	15,58
halidy/halogeny [%]	0	0	0	0	0	0	0

Poznámka* – Číslo kyselosti udává počet mikrogramů hydroxidu draselného nutného pro neutralizaci volných kyselin v 1 g tavidla za daných podmínek testu. Zpravidla se používá jako indikátor aktivity tavidla, ale ne vždy je to pravda. Čím větší je číslo kyselosti, tím je tavidlo agresivnější, což je z hlediska pájení lepší, ale je zde větší riziko vzniku korozivních jevů, poškození nepájkivé masky apod. Důvodem toho, že není nejlepší používat číslo kyselosti jako primární indikátor je to, že některá tavidla s vysokým číslem kyselosti nejsou tepelně stabilní a tudíž nejsou schopna být aktivní po celý proces pájení. Tavidla s nízkým číslem kyselosti, mohou mít ve složení i další složky, které zajistí jejich lepší aktivitu. [4][23]

Tavidlo číslo 1

Tavidlo číslo 1 je na bázi alkoholu s příměsí organických kyselin. Aktivátory tavidla nejsou halidové/halogenové. Jedná se o bezoplachové tavidlo, které je vhodné jak pro bezolovnaté pájení, tak i pro olovnatý proces. Má vysoké hodnoty SIR (jsou blízké hodnotám naměřeným na nezapájených testovacích DPS), nezanechává žádné viditelné tavidlové zbytky. Je vhodné pro aplikaci sprejem a pěnou. Jeho hustota musí být pravidelně kontrolována a udržována v rozmezí od 0,818 do 0,830 g·cm⁻³. [28]

Tavidlo číslo 2

Tavidlo číslo 2 je na bázi alkoholu s příměsí organických kyselin a je bez halidů/halogenů. Je vhodné jak pro olovnaté tak bezolovnaté pájení vlnou. Zajišťuje vynikající smáčení stěn pokovených otvorů a vývodů součástek a dobré navzlínání pájky na horní stranu DPS. Je kompatibilní s povrchovými úpravami jako jsou Ni/Au, HAL a OSP. Toto tavidlo je bezoplachové a je možné ho nanášet na DPS sprejem, pěnou či ponořením. [29]

Tavidlo číslo 3

Tavidlo číslo 3 je alkoholové tavidlo s přídavkem syntetické pryskyřice, které nezanechává tavidlové zbytky po pájení (bezoplachové). Toto tavidlo obsahuje speciální antioxidační aktivátory (bezhalidové/bezhalogenidové - dle normy IPC J-STD-004 z roku 2002) pro vyšší aktivitu při současně nižší kyselosti. Tavidlo je navrženo pro optimální smáčení povrchů a není agresivní vůči běžným plastům. Doporučuje se kontrolovat koncentraci tavidla pomocí hodnoty kyselosti. [30][31]

Tavidlo číslo 4

Tavidlo číslo 4 je na alkoholovou bázi s příměsí přírodní pryskyřice. Aktivátory jsou bez halidů/halogenů. Jedná se o bezoplachové tavidlo s nízkým obsahem tavidlových zbytků. Je vhodné pro strojní pájení vlnou a bodové selektivní pájení. Umožňuje rychlé smáčení se všemi olovnatými i bezolovnatými pájecími slitinami a je odolné vůči vysokým teplotám při tepelně náročných aplikacích. Toto tavidlo je určeno k aplikaci pomocí kartáče, spreje nebo ponoření. Má vysoké hodnoty SIR. [32]

Tavidlo číslo 5

Tavidlo číslo 5 je na alkoholové bázi s příměsí syntetické pryskyřice. Neobsahuje halidové/halogenidové aktivátory. Jedná se o bezoplachové tavidlo a v závislosti na druhu pájky a při správné aplikaci vykazuje téměř žádné tavidlové zbytky po pájení. Je určeno pro strojní pájení na vlně i s dusíkovou atmosférou. Je vhodné pro olovnaté i bezolovnaté pájení. Toto tavidlo bylo speciálně vyvinuto pro vyšší tepelnou zátěž, vzhledem k tomu, že jeho aktivátory jsou vysoce termicky stabilní. Proto je vhodné pro bezolovnaté pájení, kde je nutné předehtřívání na vyšší teplotu. Tavidlo je možné aplikovat pomocí pěnového či sprejového fluxeru. [33][34]

Tavidlo číslo 6

Tavidlo číslo 6 dle technického listu dodaného výrobcem obsahuje alkoholovou bázi a příměs syntetické pryskyřice. Jedná se o tavidlo s extrémně nízkým obsahem pevné složky, které vykazuje vysoký povrchový izolační odpor (SIR).

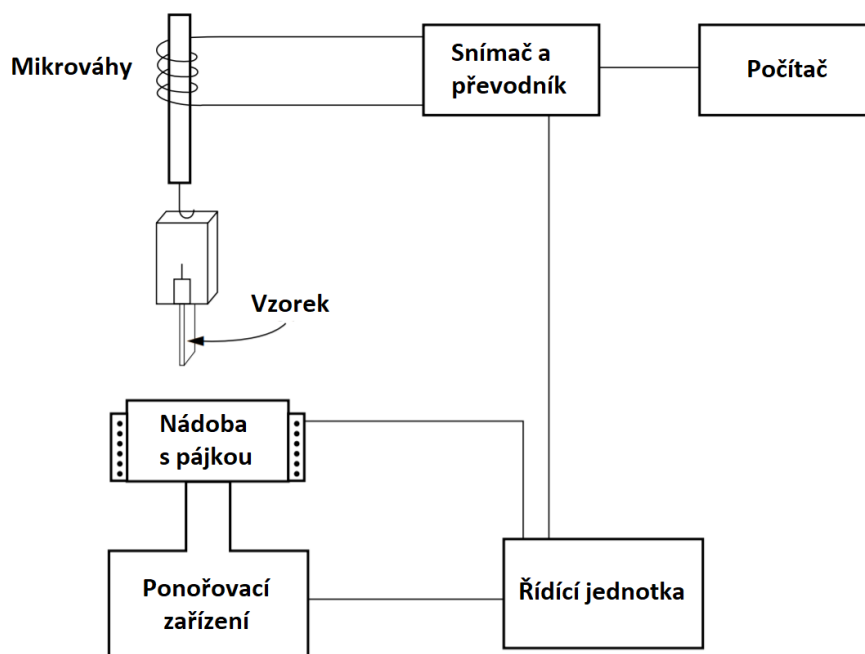
Tavidlo číslo 7

Tavidlo číslo 7 je bezoplachové tavidlo založeno na alkoholové bázi s příměsí organických kyselin. Neobsahuje halidové/halogenové aktivátory. Je vhodné pro strojní pájení na vlně a bodové selektivní pájení. Je možné ho použít jak pro olovnaté, tak pro bezolovnaté pájení, kdy zanechává nízký obsah tavidlových zbytků. Je vhodné pro aplikaci pomocí spreje, štětce, mlhy nebo ponoření. Pokud se pájí v dusíkové atmosféře, je zapotřebí zvýšit množství aplikovaného tavidla. [35]

4 Metodika zkoušek

4.1 Metoda smáčecích vah

Pomocí této metody je možné posuzovat relativní aktivitu kapalných tavidel za použití smáčecích vah. Součástí smáčecích vah je temperovaná nádoba s pájecí slitinou, mikrováhy, držák na vzorek, ponořovací systém, řídicí jednotka, snímač a převodník (viz Obr. 4-1). Naměřená data jsou zaznamenávána do počítače. [36]



Obr. 4-1 Aparatura smáčecích vah [36]

Tato metoda spočívá v tom, že se ponoří zkušební vzorek vývodu součástky nejprve do tavidla, následně se přebytečné tavidlo nechá vsáknout do čistého filtračního papíru. Takto připravený vzorek se zavěsí na citlivé mikrováhy, ponoří se do roztavené pájky a po určité době se vzorek opět vytáhne. Během tohoto procesu se měří rovnovážná smáčecí síla F (N), pro kterou platí:

$$F = F_W - F_{VZT}, \quad (4.1)$$

kde F_W je síla smáčecí (N) a F_{VZT} je síla vztlková (N). Smáčecí síla F_W se vypočítá podle vztahu:

$$F_W = \gamma \cdot p \cdot \cos \theta, \quad (4.2)$$

kde γ je povrchové napětí roztavené pájky pod tavidlem ($N \cdot m^{-1}$), p je obvod vzorku (m), θ je smáčecí úhel mezi vzorkem a pájkou ($^\circ$). Všechny hodnoty pro výpočet rovnovážné smáčecí síly jsou konstantní až na smáčecí úhel, který se mění v závislosti na smožení vzorku. Během

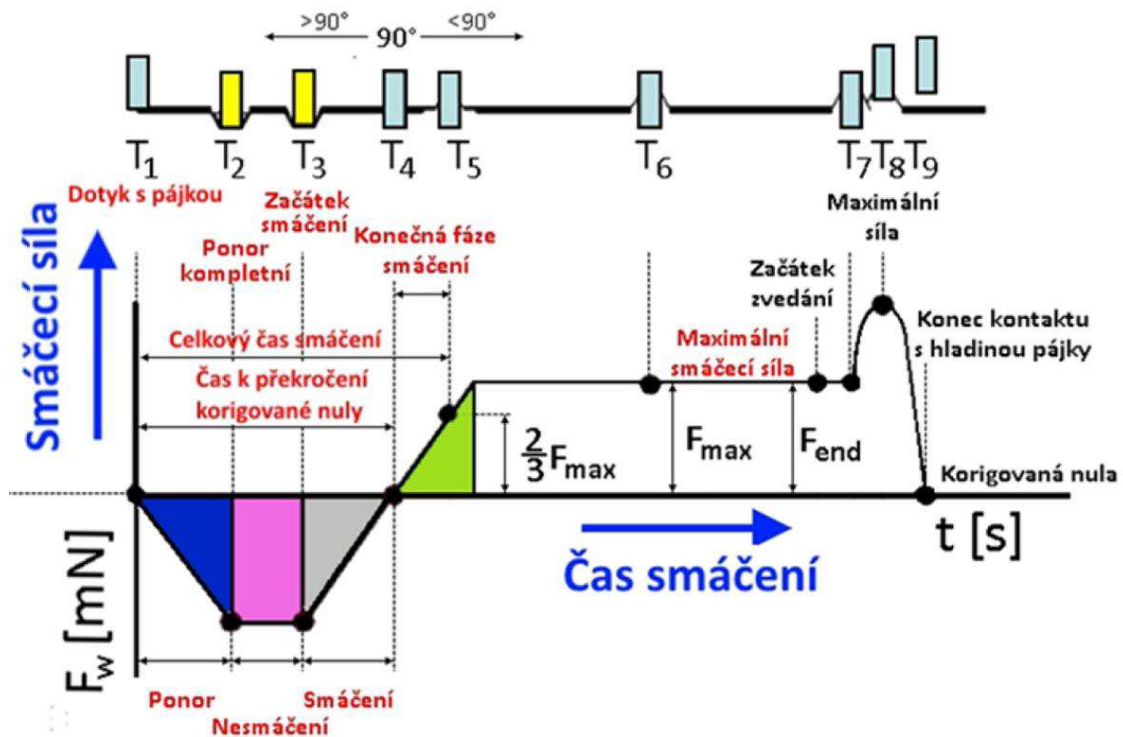
ponoření na vzorek působí vztlaková síla F_{VZT} , která vzorek z roztavené pájky vytlačuje. Pro vztlakovou sílu F_{VZT} (N) platí:

$$F_{VZT} = g \cdot \rho \cdot V, \quad (4.3)$$

kde g je gravitační zrychlení ($m \cdot s^{-2}$), ρ je hustota pájky ($kg \cdot m^{-3}$) a V je objem ponořené části vzorku (m^3). [26]

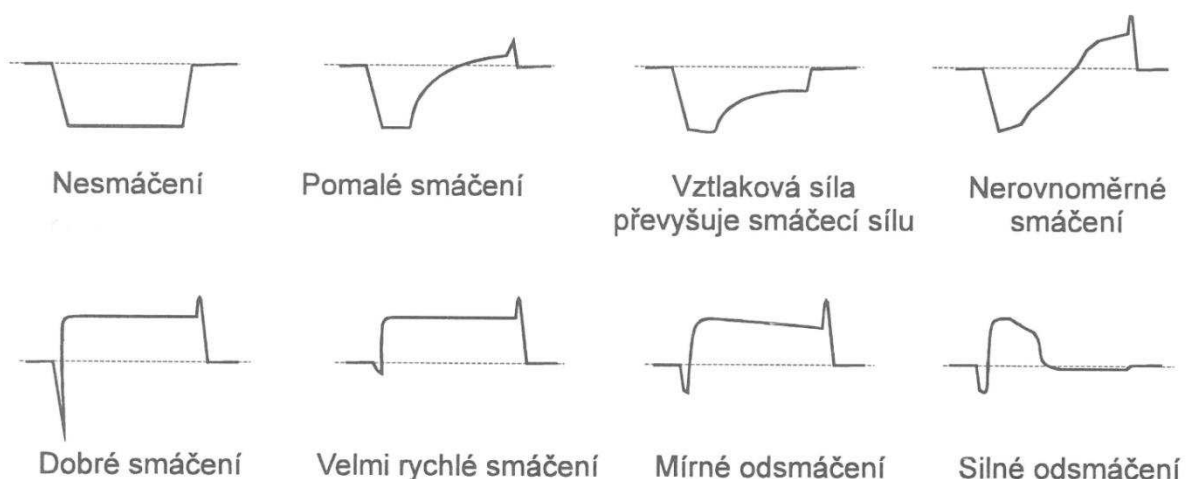
Výsledkem měření smáčecích vah je smáčecí křivka, což je závislost smáčecí síly na čase. Aby bylo možné získat z naměřených hodnot smáčecí sílu, tak je nutné k naměřené rovnovážné smáčecí síle F přičíst sílu vztlakovou F_{VZT} . Důvodem je korekce podle ponořeného objemu vzorku do pájky, protože pokud se změní hloubka ponoru, či průměr ponořeného vzorku, tak se také změní síla vytlačující vzorek z pájky. Podle normy IPC-TM-650 je nutné, aby byla vypočítaná vztlaková síla použita ke korekci nulové osy. Tato oprava je požadována pro získání správných hodnot doby smáčení a smáčecí síly. [26] [36]

Na Obr. 4-2 je znázorněná obecná křivka smáčení. Na ose y je smáčecí síla, kterou protíná v korigované nule časová osa. V bodě T1 se testovací vzorek dotkne roztavené pájky, smáčecí síla F_W je rovna nule. Následně dochází k ponoru vzorku. Zde na vzorek působí povrchové napětí pájecí slitiny a vztlaková síla F_{VZT} , která ho nadlehčuje. Bod T2 znázorňuje kompletně ponořený vzorek. Zde je smáčecí úhel stále větší než 90° a tedy nedochází ke smáčení. Začátek smáčení označuje bod T3. Časový interval mezi body T2 a T3 je dán tepelnou kapacitou vzorku ($F_W < F_{VZT}$). V bodě T4 se hladina pájky vrátila do horizontální roviny a smáčecí úhel je roven 90° . Smáčecí síla je rovna vztlakové síle ($F_W = F_{VZT}$) a tedy prochází korigovanou nulou. Dále se smáčecí úhel zmenšuje, což podmiňuje smáčení. Do bodu T5 je vykreslená poslední fáze smáčení, kdy pájka navzhlínává na testovací vzorek. V bodě T6 smáčecí síla dosahuje maxima, tedy smáčecí úhel se zmenšuje na minimum. Zde se smáčecí síla rovná maximální smáčecí síle ($F_W = F_{MAX}$). Křivka mezi body T3 a T6 odpovídá rychlosti smáčení. Čím je tato křivka strmější, tím je smáčení rychlejší. V bodě T7 je vzorek vytahován z pájky. V bodě T8 došlo k úplnému vytažení vzorku z pájky a poslední bod T9 označuje konec měření. [23][26] [36]



Obr. 4-2 Obecná smáčecí křivka [1]

Výsledky smáčivosti lze určit ze smáčecí křivky. Podstatná hodnota je maximální smáčecí síla F_{MAX} a čas, kdy smáčecí síla dosáhne dvou třetin F_{MAX} , který je označován $t_{2/3}$. Čas $t_{2/3}$ se měří od počátku kontaktu vzorku s pájkou. Čím vyšší jsou hodnoty poměru F_{MAX} a $t_{2/3}$, tím se vzorek lépe smáčí. Pro ilustraci je zde přiložen Obr. 4-3 s různými příklady smáčecích křivek. [26]



Obr. 4-3 Smáčecí křivky [23]

4.2 Měření povrchového izolačního odporu (SIR)

Tato metoda spočívá v tom, že vodivý hřebenový vzor zkušební DPS je homogenně pokryt definovaným množstvím testovaného tavidla. Vodivý obrazec je připojen na určitou hodnotu stejnosměrného napětí. Je měřen povrchový izolační odpor tavidlových zbytků po nanesení tavidla a následně po tepelném stárnutí i environmentálním působení. Dle normy IPC-TM-650 se pro měření SIR využívá testovací vzor IPC-B-24, který se skládá ze čtyř hřebenových vzorků na jednu desku. Šířka vodivých cest je 0,4 mm a vzdálenost mezi nimi je 0,5 mm. Měření probíhá při zvýšené relativní vlhkosti 85 %, teplotě 85 °C, přiloženém stejnosměrném napětí 45-50 V po dobu 168 hodin. [37]

Měření SIR je možno použít pro zjištění, jaký mají vliv tavidlové zbytky na povrchovou izolaci mezi vodivým motivem na DPS. Díky ní je možné odhalit riziko elektrochemické migrace. Čím méně bude SIR stoupat s izotermickým ohřevem, tím je možné říci, že testované tavidlo má větší sklony k možné elektrochemické korozi. Tavidla díky izotermickému ohřevu postupně degradují, a na DPS zůstávají pouze tavidlové zbytky. Čím více polárních tavidlových zbytků na desce zůstává, tím více může docházet za zvýšené vlhkosti k elektrochemické migraci. Vznikající dendrity snižují povrchový izolační odpor a nakonec může dojít ke zkratu, což je nežádoucí. [38]

4.3 Test na měděné zrcadlo

Tato zkušební metoda slouží pro zjištění agresivity testovaných tavidel a jejich roztečení. Test se provádí na sklíčku s definovanou tloušťkou vrstvičky čisté mědi, na tzv. měděném zrcadle. Test spočívá v tom, že se na měděné zrcadlo kápne testované tavidlo o definovaném objemu. Poté se měděná zrcadla dle normy IPC-TM-650 vloží ve vodorovné poloze do klimatické komory na 24 hodin při 23 a 50% relativní vlhkosti. Posledním krokem je vyhodnocení. Měděná zrcadla se položí na svítící podklad a sleduje se, zda testovaná tavidla svou agresivitou odstranila v nějaké části kapky měď. [39]

Mimo test na měděné zrcadlo je možné změřit průměr rozteklé kapky, podle kterého je možné porovnat rozdíl v povrchovém napětí testovaných tavidel. Tedy lze porovnat, které tavidlo se lépe rozprostře po povrchu. Podle Youngovy rovnice se tavidlo rozprostře lépe s menším povrchovým napětím. [1]

4.4 Pájení testovacích DPS

Pájením testovacích DPS je možné porovnat tři testovaná tavidla přímo ve firmě HC electronics. Nejprve se nanese lepidlo a osadí se testovací DPS součástkami SMD. Následuje vytvrzování lepidla. Před samotným pájením se testovací DPS osadí také THT součástkami. Osazené testovací DPS se pájí pomocí třech různých tavidel.

Po zapájení DPS je měřena úroveň ionizovatelných nečistot konduktometrickou metodou ROSE (Resistivity of Solvent Extract), přičemž polovina zapájených testovacích DPS je před měřením očištěna v mycím zařízení. Dále se vyhodnotí vzhled zapájených DPS

a spojů. Nakonec probíhá kontrola defektů pájených spojů, mezi které můžeme v tomto případě zařadit např. počet nezapájených spojů, počet zkratů a navzlínání pájkové výplně do pokovených otvorů.

4.5 Metoda ROSE (Resistivity of Solvent Extract)

Díky metodě ROSE je možné změřit množství ionizovatelných nečistot, které jsou přítomny na povrchu DPS. Tato metoda spočívá v tom, že DPS je vložena do nádoby s přesně definovaným množstvím cirkulujícího roztoku deionizované vody a izopropylalkoholu (IPA). Cirkulace roztoku zajišťuje omývání DPS, přičemž se do něho postupně uvolňují iontové nečistoty z povrchu DPS. Rozpuštěné ionizovatelné nečistoty zvyšují měrnou vodivost testovacího roztoku a jsou obvykle vyjádřeny ekvivalentem chloridu sodného ($\mu\text{g NaCl Eq}\cdot\text{cm}^{-2}$). [8][40]

Koncentrace testovacího roztoku musí být dle normy IPC-TM-650 buď 75 hmotnostních % izopropylalkoholu a 25 hmotnostních % deionizované vody, nebo 50 hmotnostních % izopropylalkoholu a 50 hmotnostních % deionizované vody. Testovací roztok musí být před samotnou kalibrací deionizován na hodnotu měrné vodivosti stejnou nebo nižší než $0,0625 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, avšak běžně může být dosaženo měrné vodivosti $0,04 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. [40]

Kalibrace zařízení se provádí pomocí standardního NaCl roztoku o koncentraci $60 \text{ mg NaCl}\cdot\text{l}^{-1}$. Kalibrační roztok se postupně přidává po dávkách 5, 10, 15 a 20 ml do testovacího roztoku. Po homogenizaci každé dávky kalibračního roztoku v testovacím roztoku je změřena měrná vodivost testovacího roztoku. Následně je sestavena kalibrační křivka (závislost koncentrace NaCl v testovacím roztoku na měrné vodivosti testovacího roztoku), díky které je možné vyjádřit úroveň iontových nečistot ekvivalentem chloridu sodného (vodivostní faktor). Vzhledem k tomu, že 5 ml kalibračního roztoku je rovno $300 \mu\text{g NaCl}$ a je znám i objem testovacího roztoku, lze koncentraci NaCl v testovacím roztoku jednoduše vypočítat. Pro výpočet koncentrace NaCl v testovacím roztoku při kalibraci C_{TR} ($\mu\text{g NaCl}\cdot\text{l}^{-1}$) platí:

$$C_{TR} = \frac{C_{KR} \cdot V_{KR}}{V_{TR} + V_{KR}}, \quad (4.4)$$

kde C_{KR} je koncentrace kalibračního roztoku ($\mu\text{g NaCl}\cdot\text{l}^{-1}$), V_{KR} je celkový objem kalibračního roztoku přidaného do testovacího roztoku (l), V_{TR} je objem počáteční hodnoty objemu testovacího roztoku, ke které jsou následně přičítány hodnoty objemu přidaného kalibračního roztoku (l). [40]

Po vytvoření kalibrační křivky následuje samotné měření měrné vodivosti testovacího roztoku. Měrná vodivost se nejprve převede pomocí kalibrační křivky na koncentraci NaCl testovacího roztoku C_{TR} tak, že se dosadí hodnota změřené měrné vodivosti do kalibrační křivky. [40]

Vodivostní faktor $\mu\text{g NaCl Eq.}\cdot\text{cm}^{-2}$ lze získat tak, že je vypočítaná koncentrace NaCl testovacího roztoku nejprve vynásobena hodnotou celkového objemu roztoku a následně vydělena celkovou plochou sestavy DPS. Doporučený výpočet plochy S (cm^2) neosazené desky dle normy IPC-TM-650 je následující [40]:

$$S = l \cdot h \cdot 2, \quad (4.5)$$

kde l je délka DPS (cm), h je šířka DPS (cm). Pro výpočet plochy osazené desky S_0 (cm^2) platí:

$$S_0 = l \cdot h \cdot 2 \cdot 1,5. \quad (4.6)$$

Výpočet ekvivalentu chloridu sodného na jednotku plochy vzorku C_{TREQ} ($\mu\text{g NaCl Eq.}\cdot\text{cm}^{-2}$) je následující:

$$C_{TREQ} = \frac{C_{TR} \cdot (V_{TR} + V_{KR})}{S_{SESTAVA}}, \quad (4.7)$$

kde $S_{SESTAVA}$ je celková plocha sestavy DPS (cm^2), které jsou vloženy do testovacího roztoku a C_{TRM} je koncentrace NaCl testovacího roztoku při měření kontaminace ionizovatelnými nečistotami, která je vypočtena dle rovnice regrese z kalibrační křivky ($\mu\text{g NaCl}\cdot\text{l}^{-1}$). [40]

Metoda ROSE může měřit kontaminaci DPS ionizovatelnými nečistotami jak ve statickém, tak i dynamickém režimu. Statický režim spočívá v tom, že se po kalibraci měří měrná vodivost testovacího roztoku. Během měření měrná vodivost obvykle roste, což je dáno postupným uvolňováním iontových nečistot do testovacího roztoku. Test je ukončen ustálením hodnot měrné vodivosti, kdy už na desce nejsou žádné iontové nečistoty, které by se mohly uvolnit. Dynamický režim se od statického režimu liší tím, že testovací roztok cirkuluje mezi testovací nádobou, vodivostní jednotkou a pryskyřičnou deionizační kolonou. Vodivostní jednotka nepřetržitě měří měrnou vodivost, která se dynamicky mění. Je to dáno tím, že postupně se uvolňující iontové nečistoty do testovacího vzorku jsou následně v deionizační koloně odstraněny a deionizovaný roztok se vrátí zpět do testovací nádoby. Výhodou je, že se z povrchu DPS uvolní více nečistot do testovacího roztoku [40].

5 Testování vybraných tavidel

5.1 Měření smáčecích křivek

Měření smáčecích křivek bylo provedeno na testovacích vzorcích nejpoužívanějších nemagnetických kontaktů součástek ve firmě HC electronics. Vzorek měl válcovitý tvar o poloměru $r = 0,35 \cdot 10^{-3}$ m. Pájecí slitina byla použita SN100C od firmy Balver Zinn z důvodu testování v podobných materiálových podmínkách jako na pájecí vlně v HC electronics (viz Obr. 5-1).



Obr. 5-1 Pájecí slitina SN100C od firmy Balver Zinn

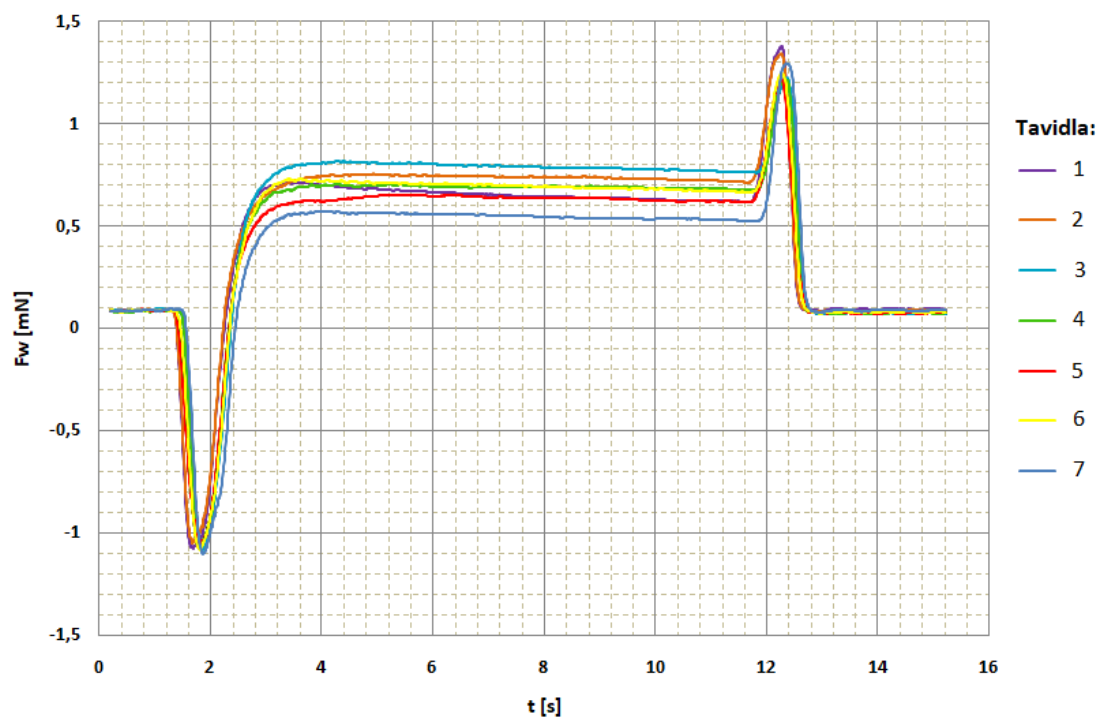
Hustota pájecí slitiny při teplotě 250 °C byla $\rho = 7400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Bylo měřeno sedm tavidel, o kterých pojednává 4. kapitola (viz Obr. 5-2). Do pájecí slitiny udržované na 250 °C byl ponořován vzorek do hloubky 3 mm, rychlostí $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro každé tavidlo bylo naměřeno 12 smáčecích křivek (závislost rovnovážné smáčecí síly F na čase), protože vícenásobné měření smáčivosti pro každý typ tavidla vede k objektivnějším výsledkům a to tak, že se následně zprůměrují v jednu výslednou smáčecí křivku.



Obr. 5-2 Vzorky testovaných tavidel

Dle normy IPC-TM-650 u každé výsledné smáčecí křivky byla provedena korekce nulové osy (k rovnovážné smáčecí síle byla připočtena síla vztlaková). Konečným výsledkem měření je závislost smáčecí síly na čase pro jednotlivá tavidla, která je znázorněna na Obr. 5-3. Z grafu byly také odečteny maximální smáčecí síly F_{MAX} a čas $t_{2/3}$, kdy smáčecí síla dosáhla dvou třetin F_{MAX} . Následně byl vypočítán poměr $F_{MAX}/t_{2/3}$, který udává kvalitu smáčení. Odečtené hodnoty z grafu a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5-1.

Graf závislosti smáčecí síly na čase



Obr. 5-3 Výsledné smáčecí křivky

Výpočet objemu ponořené části vzorku do pájky:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot v = \pi \cdot 0,00035^2 \cdot 0,003 = 1,155 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3. \quad (5.1)$$

Výpočet vztlakové síly:

$$F_{VZT} = g \cdot \rho \cdot V = 9,81 \cdot 7400 \cdot 1,155 \cdot 10^{-9} = 8,385 \cdot 10^{-5} \text{ N}. \quad (5.2)$$

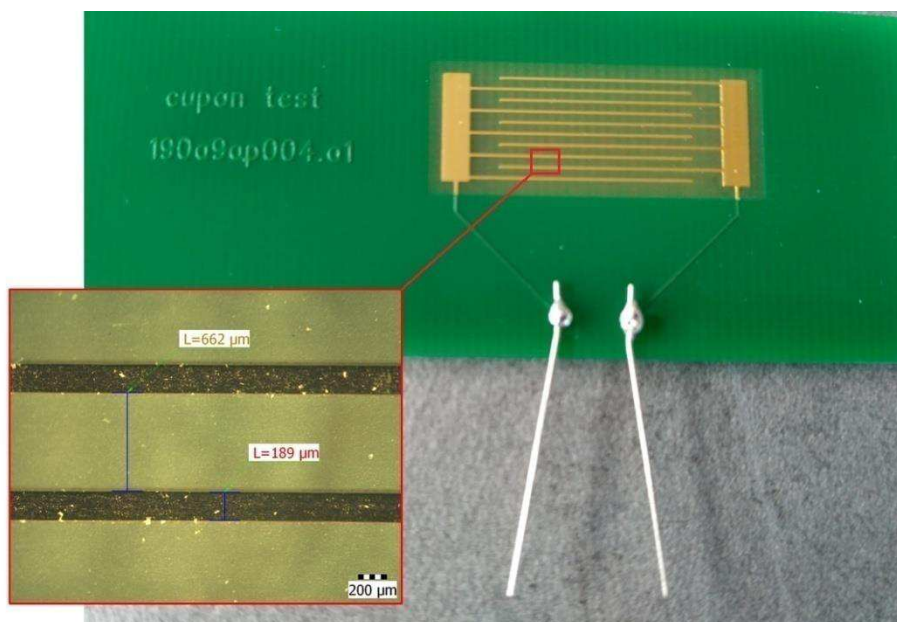
Tab. 5-1 Odečtené hodnoty ze smáčecích křivek a vypočítané hodnoty

tavidlo	F_{MAX} [mN]	$t_{2/3}$ [s]	$F_{MAX}/t_{2/3}$ [mN·s ⁻¹]
1	0,70	1,14	0,614
2	0,75	1,25	0,600
3	0,80	1,32	0,606
4	0,69	1,00	0,690
5	0,65	1,30	0,500
6	0,71	1,25	0,568
7	0,58	1,30	0,446

Největší smáčecí sílu F_{MAX} vykázala tavidla 2, 3 a 6. Dle vypočítaných hodnot poměru $F_{MAX}/t_{2/3}$ tavidla 1, 3 a 4 zajistila nejlepší smáčení.

5.2 Měření povrchového izolačního odporu

Měření povrchového izolačního odporu bylo provedeno na zkušebních kupónech dodaných firmou HC electronics, z nichž jeden je znázorněn na Obr. 5-4. Na tomto obrázku je také zobrazen výřez vodivých cest pomocí optického mikroskopu se zvětšením 60x. Vodivé cesty mají orientačně změřené rozměry - šířku 189 μm a jsou od sebe vzdálené 662 μm (tento vodivý motiv neodpovídá normě IPC-TM-650 pro měření SIR). Pro jedno tavidlo proběhlo měření na dvou deskách, bylo tedy k měření použito 14 stejných testovacích desek.

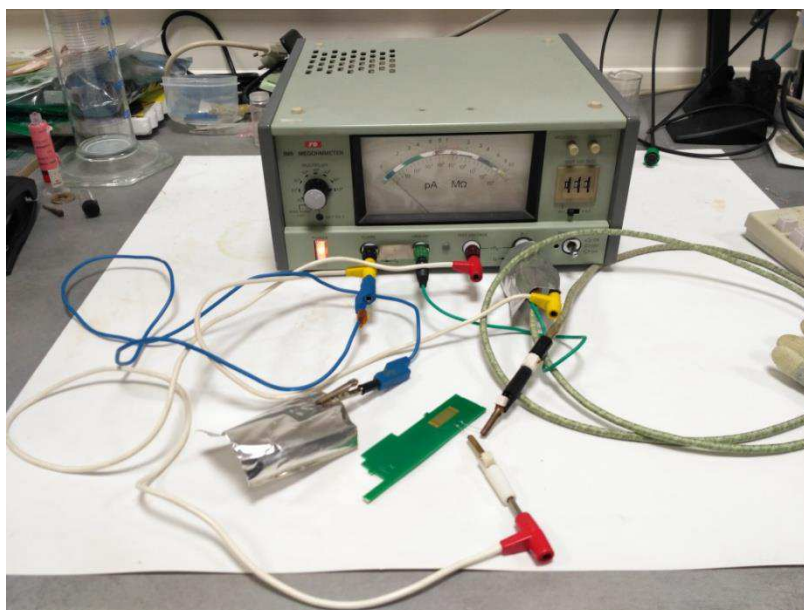


Obr. 5-4 Testovací DPS

Měření proběhlo pomocí megohmmetru IM6 s rozsahem hodnot od 10^1 do $10^8 \text{ M}\Omega$, který je vidět na Obr. 5-5. Tento přístroj má interní zdroj napětí, který je možný nastavit v rozsahu od 0 do 999 V. Vzhledem k jeho velké citlivosti bylo nutno měřicí kabely stínit.

Před měřením byly desky opláchnuty izopropylalkoholem a vysušeny. Následně byl změřen povrchový izolační odpor, který přesahoval u všech testovacích desek rozsah použitého megohmmetru, tedy SIR byl větší jak $1 \cdot 10^9 \text{ M}\Omega$. Na každý z motivů byla pipetou nanесena a rozetřena kapka tavidla (2 μl). Po aplikaci tavidla byl změřen opět povrchový izolační odpor a poté byly desky vloženy do sušičky s teplotou 60 $^{\circ}\text{C}$ na 2 hodiny. Následovalo další měření SIR. Nakonec byly desky vloženy do sušičky, která měla nastavenou teplotu na 125 $^{\circ}\text{C}$ a po jedné hodině byly vyndány a naměřeny poslední hodnoty SIR. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 5-2.

Poznámka – Vodivý obrazec byl při měření SIR vždy připojen na stejnosměrné napětí 100 V. Hodnoty SIR po izotermickém ohřevu byly odečteny vždy po jedné a třech minutách. V Tab. 5-2 jsou uvedeny průměrné hodnoty SIR pro dané tavidlo.



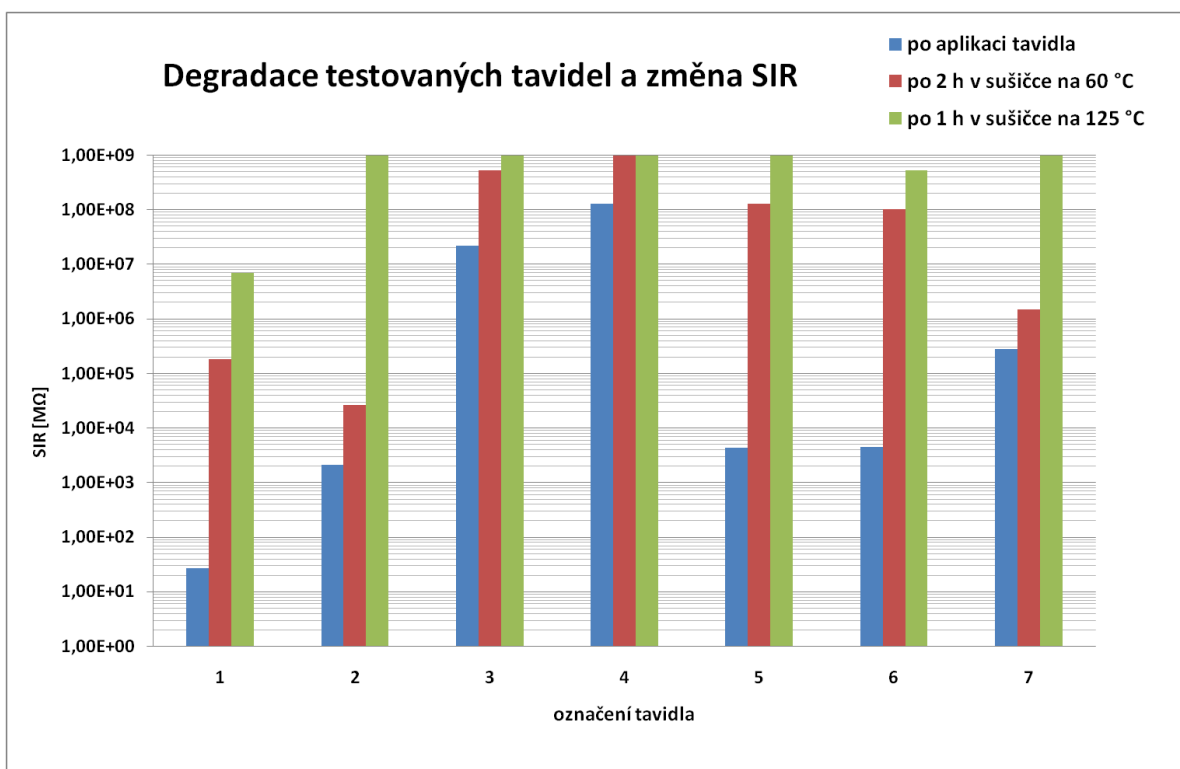
Obr. 5-5 Měřící pracoviště

Tab. 5-2 Naměřené hodnoty SIR

měřeno vzorky tavidel	SIR [$M\Omega$]					
	po aplikaci tavidla		po 2 h v sušičce na 60 °C		po 1 h v sušičce na 125 °C	
	po 4 min	po 6 min	po 1 min	po 3 min	po 1 min	po 3 min
1	2,65E+01	3,80E+01	1,85E+05	2,38E+05	7,10E+06	1,16E+07
2	2,13E+03	2,13E+03	2,65E+04	4,15E+04	>1,00E+09	>1,00E+09
3	2,25E+07	2,25E+07	5,33E+08	5,60E+08	>1,00E+09	>1,00E+09
4	1,30E+08	1,53E+08	>1,00E+09	>1,00E+09	>1,00E+09	>1,00E+09
5	4,30E+03	6,75E+03	1,30E+08	1,00E+08	>1,00E+09	>1,00E+09
6	4,50E+03	8,50E+03	1,05E+08	2,50E+08	5,30E+08	5,75E+08
7	2,80E+05	3,15E+05	1,50E+06	2,05E+06	>1,00E+09	>1,00E+09

Poznámka – Jedná se pouze o orientační měření z důvodu použití testovacích desek s motivem, který nepodléhá žádné normě pro měření povrchového izolačního odporu. Měření proběhlo při 23,3 °C a relativní vlhkosti 24,2 %

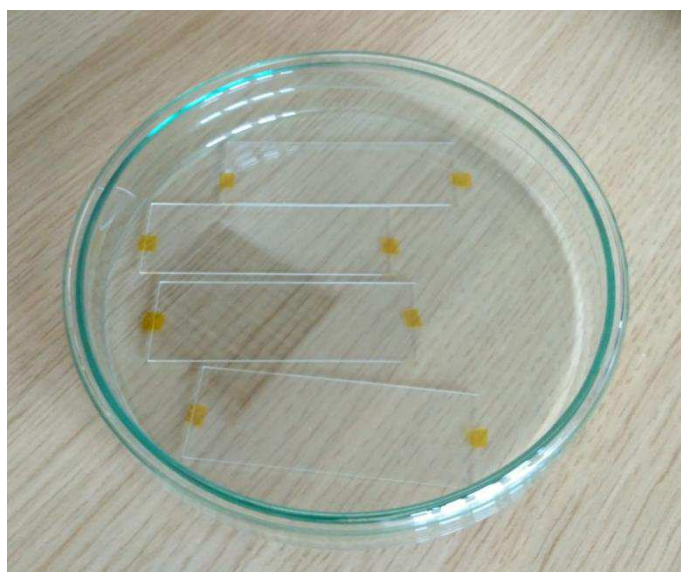
Po aplikaci tavidla mělo nejvyšší hodnotu SIR tavidlo 4. Po izotermickém ohřevu při teplotě 60 °C, který trval 2 hodiny, má tavidlo 4 opět nejvyšší SIR. Nakonec po 1 hodině izotermického ohřevu na 125 °C přesáhla hodnota SIR $1 \cdot 10^9 M\Omega$ u tavidel 2, 3, 4, 5 a 7 (viz Obr. 5-6).



Obr. 5-6 Degradace testovaných tavidel a změna SIR

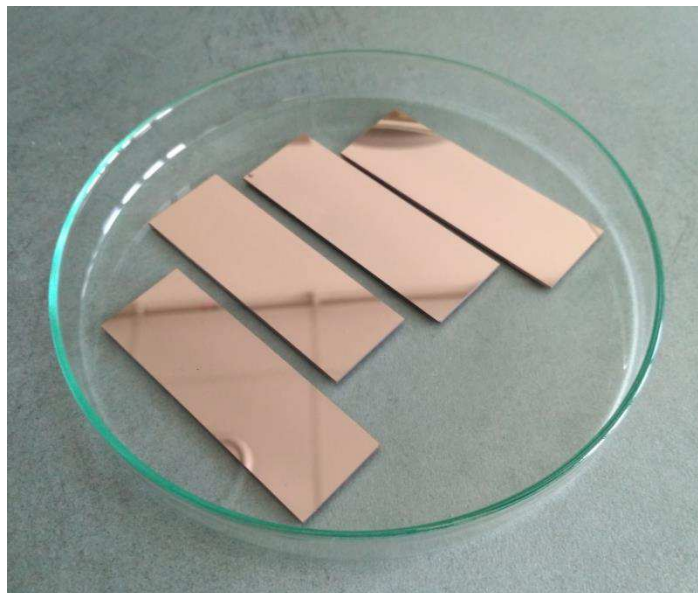
5.3 Test na měděné zrcadlo

Před samotným testem byla ponořena mikroskopická sklíčka do kádinky s 3% roztokem uhličitanu sodného, která byla vložena na 10 minut do ultrazvuku. Následovalo opláchnutí sklíček deionizovanou vodou a sušení pomocí tlakového dusíku. Dále byla sklíčka vložena do Petriho misek (viz Obr. 5-7), v kterých byla vložena do NANO O₂ plazmy. Čištění probíhalo 15 minut při tlaku 0,1 mbar, který byl řízen průtokem plynu. Maximální výkon byl nastaven na 600 W.



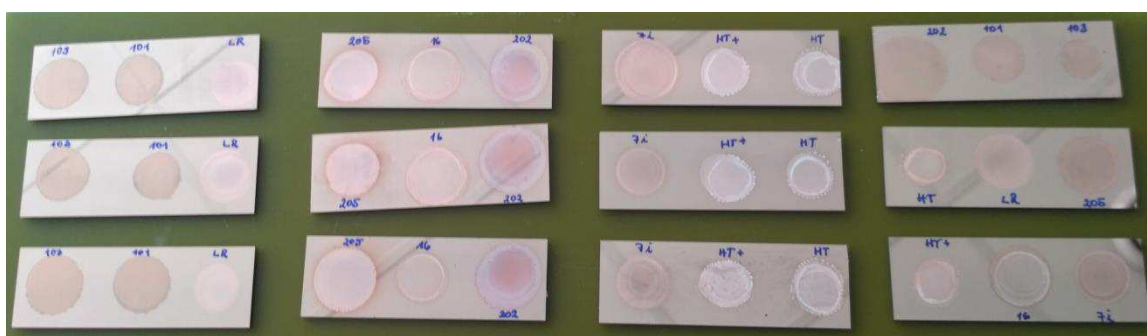
Obr. 5-7 Očištěná mikroskopická sklíčka

Po důkladném očištění byla sklíčka vložena do magnetronového naprašovače NP – 12 firmy KWS CZ s.r.o. v laboratořích Ústavu elektrotechnologie. Naprášení 50 nm čisté mědi proběhlo v argonové atmosféře při tlaku 3 Pa a průtoku 50 cm³. Nominální naprašovací výkon byl nastaven na 2,1 kW. Tloušťka naprášené vrstvy byla měřena pomocí QCM vah typ: 02/5M rovněž od firmy KWS CZ s.r.o. Na Obr. 5-8 je ukázka hotových měděných zrcadel.



Obr. 5-8 Mikroskopická sklíčka s naprášenou 50nm vrstvou mědi

Samotný test na měděné zrcadlo probíhal na 12 sklíčkách s naprášenou 50nm vrstvou mědi. Na každé sklíčko byly kápnuty tři kapky tavidel vedle sebe, aniž by se dotýkaly. V tomto testu byly použity ještě navíc dvě tavidla referenční (tavidlo 8 a 9). Tavidel bylo tedy testováno 9, a proto pro každé tavidlo byl proveden test 4x, aby se snížila chyba měření. Každá kapka tavidla o objemu 1 μ l se roztekla v závislosti na jejím povrchovém napětí (viz Obr. 5-9).



Obr. 5-9 Kapky tavidel nanesené na měděném skle

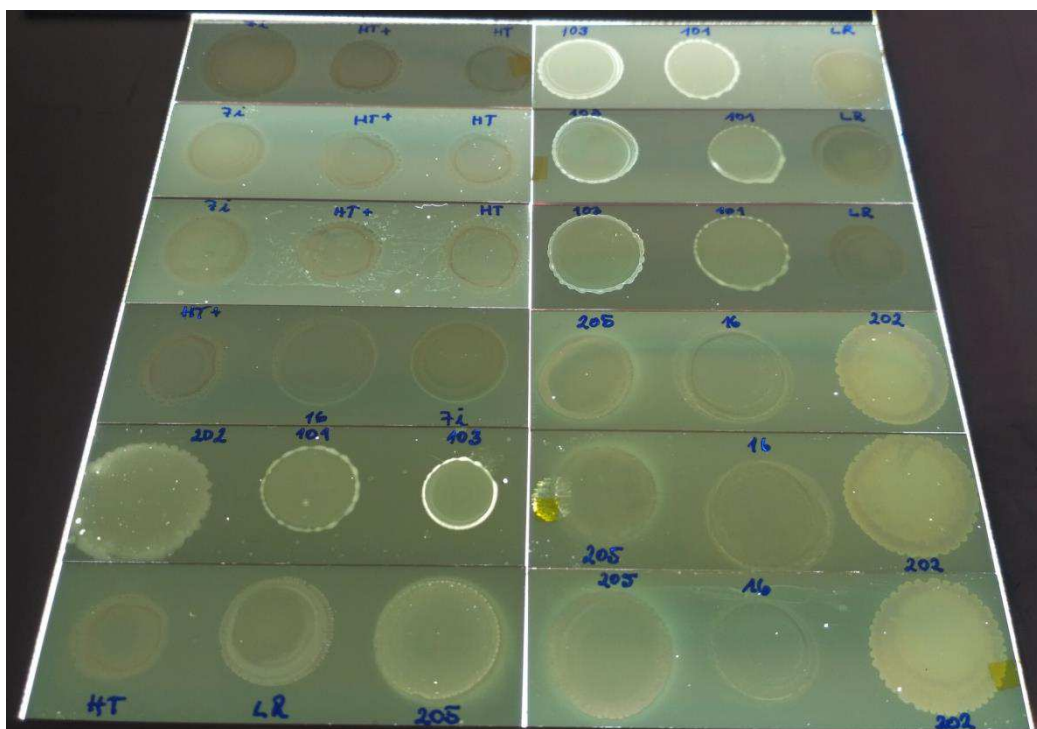
Po ustálení byly změřeny průměry d roztečených kapek, kdy u jednotlivých tavidel se vypočítal průměr. Průměry jsou zapsány v Tab. 5-3. Tavidla, která mají průměr mezi nejvyššími, tak se lépe rozprostírají na povrchu pájených ploch. Mezi dvě nejlepší tavidla s ohledem na jejich roztečení patří tavidla 1 a 4.

Tab. 5-3 Průměry roztečených kapek tavidel

tavidlo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d [mm]	21,0	17,6	17,3	18,3	13,0	15,6	15,3	16,3	17,6

Po porovnání tavidel z hlediska jejich povrchového napětí byla měděná skla vložena ve vodorovné poloze do klimatické komory na 24 hodin při 23 °C a 50% relativní vlhkosti. Po 6 hodinách v klimatické komoře byla zkontrolována a vyhodnocena agresivita tavidel.

Měděná zrcadla byla položena na svítící podklad (viz Obr. 5-10), díky kterému bylo perfektně vidět, zda tavidla nějak reagovala s vrstvičkou mědi.



Obr. 5-10 Měděná zrcadla položená na svítícím podkladu po 6 hodinách v klimatické komoře

Už po takto krátké době lze pozorovat částečné odstranění mědi skoro u všech testovaných tavidel. Avšak intenzita a místo, kde chyběla měď, je u každého testovaného tavidla trochu jiná. Bylo zvoleno hodnocení od 0 (tavidlo bez agresivity) do 5 (výrazná agresivita tavidla). V Tab. 5-4 je vyhodnocena agresivita testovaných tavidel.

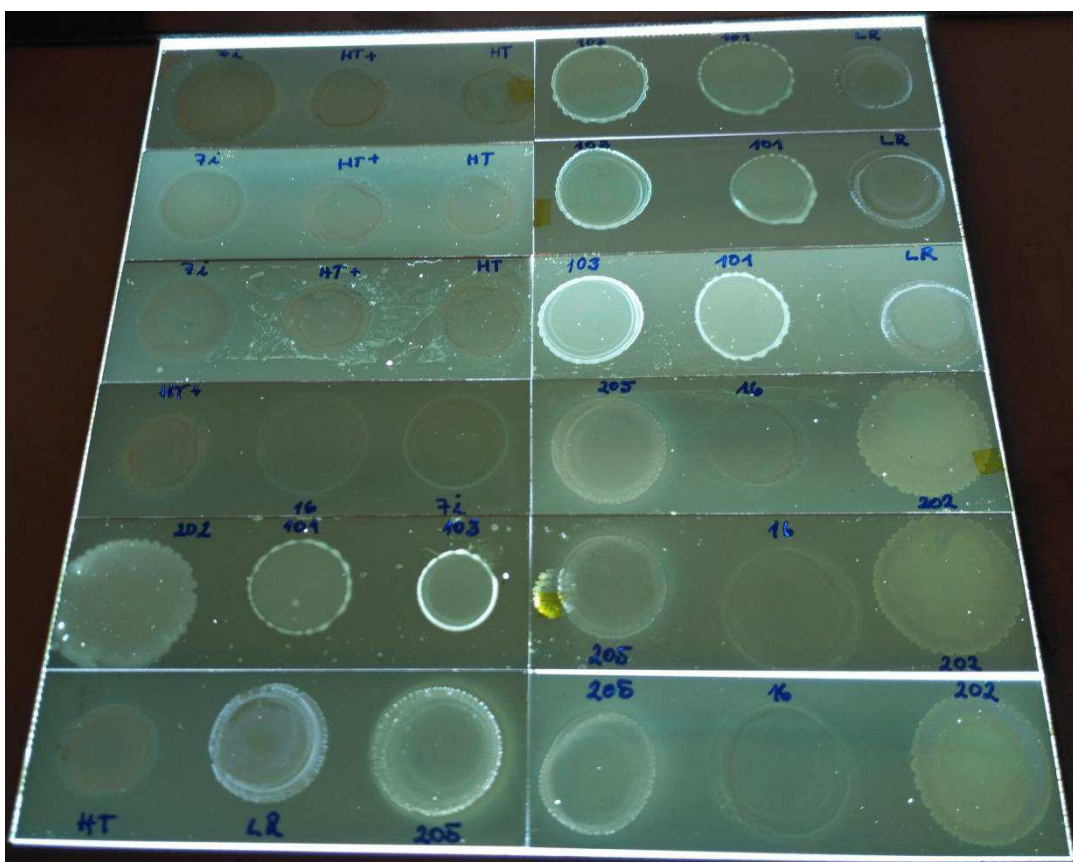
Tab. 5-4 Hodnocení agresivity testovaných tavidel po 6 hodinách v klimatické komoře

tavidlo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
agresivita	3,00	2,00	1,50	0,05	0,50	0,50	1,75	3,50	4,00

Tavidlo 9 v největší míře reaguje s mědí. U tohoto vzorku je vidět skrz měděné sklo v celé ploše kapky a na okrajích kapky se měď rozpustila úplně. U tavidla 8 je reakce podobná, avšak v menší míře. U tavidla 1 je možné pozorovat částečné rozpuštění mědi v celé ploše kapky tavidla. Kapka tavidla 2 způsobila mírnější reakci s mědí na okrajích kapky

a částečně i v jejím okolí. U tavidla 7 je měď rozpuštěná v širším pásu okraje kapky, ale okolí bylo bez reakce. Kapka tavidla 3 reagovala naopak jen ve svém okolí. U kapky tavidla 4 je jen slabý světlý proužek na jejím okraji. V nejmenší míře reagovala s mědí tavidla 5 a 6, kde je vidět jen světlejší okolí kapky.

Po vyhodnocení byla měděná zrcadla opět vrácena do klimatické komory pro dokončení testu. Po 24 hodinách bylo provedeno opět vyhodnocení stejným způsobem (viz Obr. 5-11). Výsledky se však už moc nelišily. Jen dle subjektivního hodnocení lze usoudit, že tavidla 3, 4, 5 a 6 reagovala s mědí na stejné úrovni. Tavidla 4 a 3 zapříčinila vznik světlounkého okraje, a u tavidel 5 a 6 je vidět jemné světlejší okolí kapky. Tato čtyři tavidla byla ohodnocena číslem 1, tedy jejich reakce byla menší, než co způsobila ostatní testovaná tavidla. V Tab. 5-5 jsou testovaná tavidla obodována.



Obr. 5-11 Měděná zrcadla položená na svítícím podkladu po 24 hodinách v klimatické komoře

Tab. 5-5 Hodnocení agresivity testovaných tavidel po 24 hodinách v klimatické komoře

tavidlo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
agresivita	3,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	3,5	4,0

5.4 Vyhodnocení testování tavidel

Měření smáčecích křivek bylo provedeno pomocí smáčecích vah. Výsledné smáčecí křivky jsou znázorněny v grafu na Obr. 5-3 Výsledné smáčecí křivky. Největší smáčecí sílu F_{MAX} měla tavidla 2, 3, 6 (nejlepší bylo tavidlo 3). Z vypočítaného poměru $F_{MAX}/t_{2/3}$, který je uveden v Tab. 5-1, tavidla 1, 3, 4 zajistila nejlepší smáčení (nejlepší bylo tavidlo 4).

Měření povrchového izolačního odporu tavidlových zbytků vybraných tavidel probíhalo při pokojové teplotě i po izotermickém ohřevu. Před aplikací testovaných tavidel povrchový izolační odpor přesahoval u všech testovacích desek rozsah použitého megohmmetru, SIR byl větší jak $1 \cdot 10^9 \text{ M}\Omega$. Naměřené hodnoty SIR po aplikaci tavidla i po izotermickém ohřevu jsou uvedeny jak v Tab. 5-2, tak jsou graficky vykresleny v grafu na Obr. 5-6. Po aplikaci tavidla mělo nejvyšší hodnotu SIR tavidlo 4. Po izotermickém ohřevu po dobu 2 hodin na $60 \text{ }^\circ\text{C}$ je nejlepší opět tavidlo 4. Nakonec po 1 hodině izotermického ohřevu na $125 \text{ }^\circ\text{C}$ přesáhla hodnota SIR $1 \cdot 10^9 \text{ M}\Omega$ u tavidel 2, 3, 4, 5 a 7. Mezi tři nejlepší tavidla z hlediska měření povrchového izolačního odporu je možné zařadit 3, 4, a 5.

Test na měděné zrcadlo probíhal v klimatické komoře na 24 hodin při $23 \text{ }^\circ\text{C}$ a 50% relativní vlhkosti. Hodnocení agresivity testovaných tavidel je v Tab. 5-5. Dle subjektivního hodnocení bylo usouzeno, že tavidla 3, 4, 5 a 6 reagovala s mědí nejméně (na stejné úrovni).

Porovnání tavidel z hlediska jejich povrchového napětí je vyhodnoceno v Tab. 5-3. Mezi dvě nejlepší tavidla s ohledem na jejich povrchové napětí patří tavidla 1 a 4.

Podle výše uvedených výsledků byla navržena tři tavidla, která byla následně testována ve firmě HC electronics. Tavidlo 3 bylo vybráno proto, že je nyní využíváno při pájení ve firmě HC electronics a bude sloužit k porovnání s dalšími vybranými tavidly, která by mohla mít stejné či dokonce lepší výsledky. Dle všech předešlých výsledků testování tavidel vyhrává jednoznačně tavidlo 4, proto bylo také vybráno pro další testování. Tavidlo 6 bylo vybráno z důvodu vykazování vysoké smáčecí síly a nízké agresivity.

6 Praktické zkoušky ve firmě HC electronics

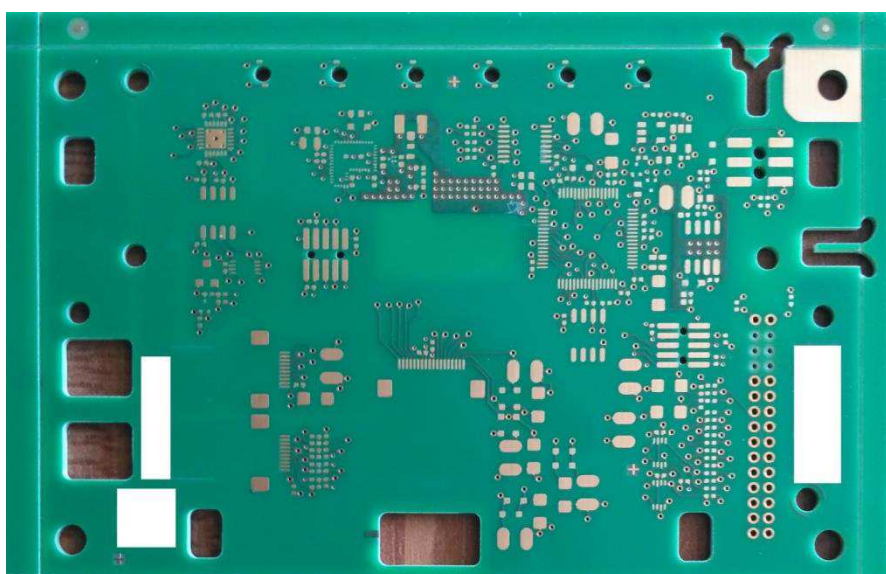
Ve firmě HC electronics byla testována tavidla označená číslem 3, 4 a 6. Praktické zkoušky vybraných tavidel probíhaly na vlně PowerWave od firmy SEHO, která má lokální ochrannou dusíkovou atmosféru (viz Obr. 6-1).



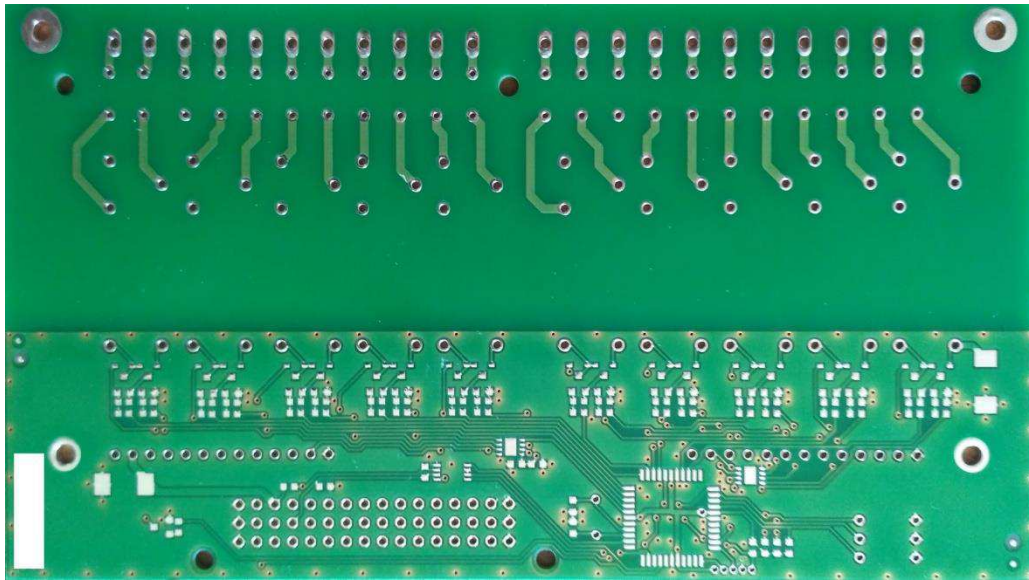
Obr. 6-1 Vlna SEHO PowerWave

6.1 Pájení vybraných DPS

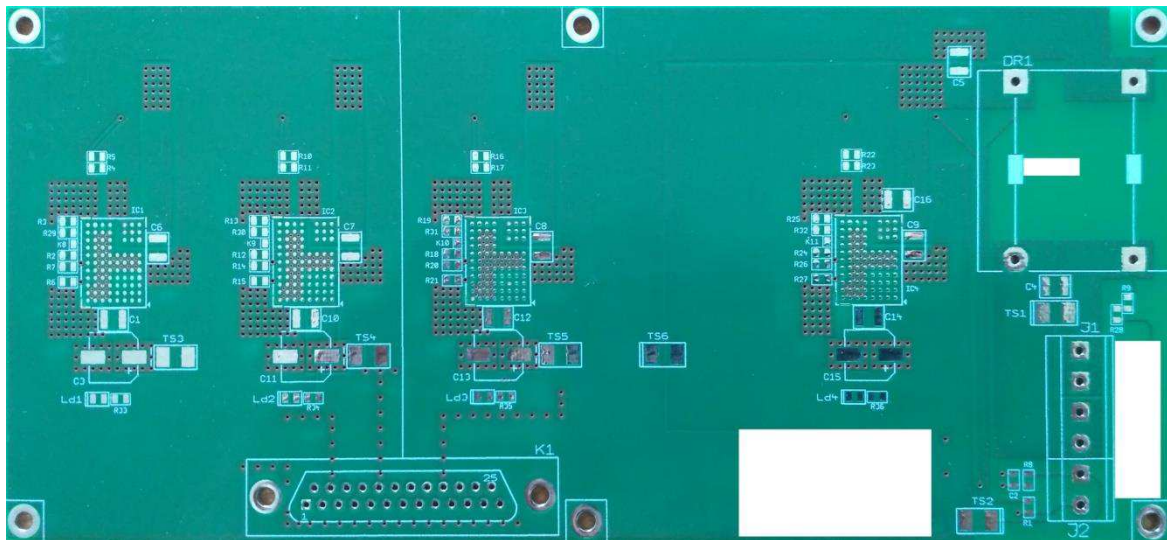
Pro testování byly vybrány čtyři druhy vyřazených nepoužitých DPS (viz Obr. 6-2, Obr. 6-3, Obr. 6-4, a Obr. 6-5), celkový počet testovacích DPS bylo 126. V Tab. 6-1 jsou zapsány jejich rozměry a celkový počet kusů přířezů.



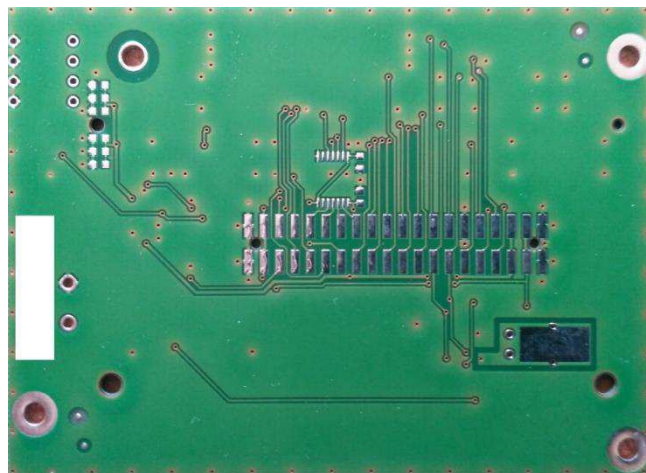
Obr. 6-2 Neosazená spodní strana DPS 1



Obr. 6-3 Neosazená spodní strana DPS 2



Obr. 6-4 Neosazená spodní strana DPS 3



Obr. 6-5 Neosazená spodní strana DPS 4

Tab. 6-1 Testovací DPS

označení	přířez [cm]	rozměr DPS [cm]	počet přířezů [ks]
DPS 1	15,0 x 11,8	2 x (10,8 x 7,0)	18
DPS 2	32,0 x 19,5	4 x (14,5 x 8,0)	12
DPS 3	20,0 x 9,0	1 x (20,0 x 9,0)	12
DPS 4	32,6 x 18,7	10 x (8,3 x 6,0)	3

Desky byly nejprve omyty mycím zařízením SWASH od firmy PBT Works (viz Obr. 6-6). Program čištění DPS je znázorněn v Tab. 6-2. Po čištění byly DPS vloženy na 14 dní do sušící skříně, ve které byla nastavena teplota na 40 °C a relativní vlhkost na 1 %.

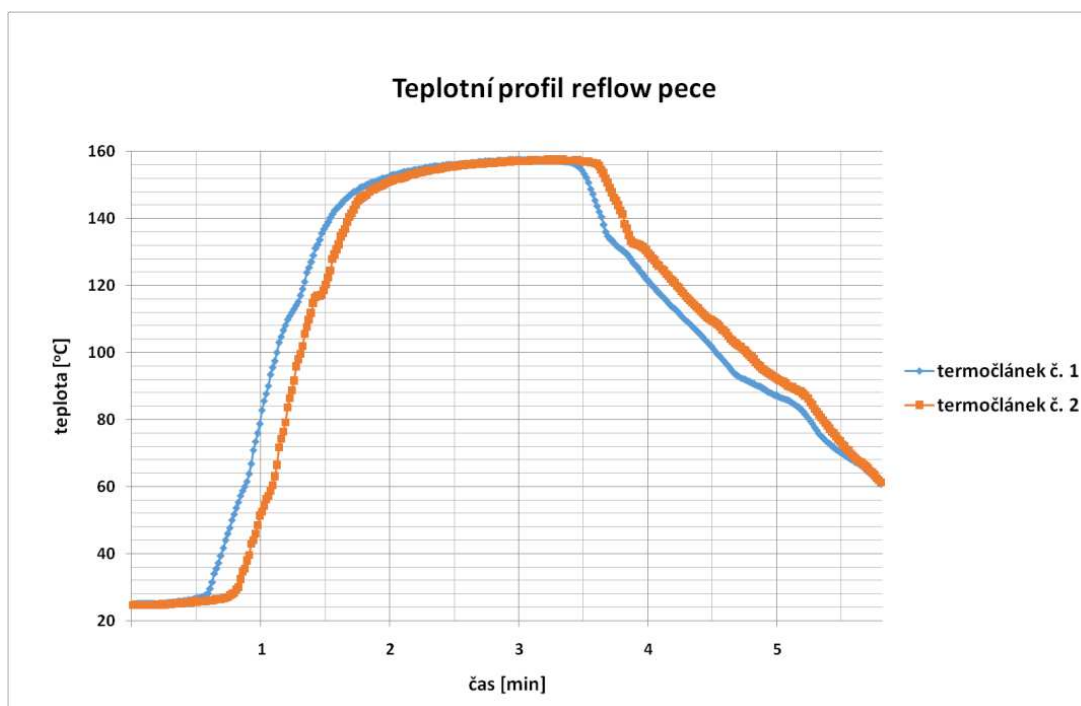
Tab. 6-2 Program myčky Super SWASH

program	čas [min]	teplota [°C]
mytí	23	50
oplach č. 1	7	40
oplach č. 2	6	40
sušení	19	110



Obr. 6-6 Super SWASH od firmy PBT Works [41]

Po vyndání desek ze sušící skříně byly DPS nejprve ručně osazeny SMD součástkami. Poté následovalo vytvrzování předem ručně naneseného lepidla, které probíhalo v reflow pájecí peci Heller 1809 MARKIII. Tato pájecí pec má 9 topných a 2 chladicí zóny s konvekcí vzduchu. Rychlost dopravníku byla nastavena na 85 cm·min⁻¹. Teplotní profil (viz Obr. 6-7) reflow pece byl změřen profiloměrem SuperM.O.L.E. Gold 2 od firmy Electronic Controls Design Inc. (viz Obr. 6-8), přičemž termočláanky byly přiloženy na horní stranu DPS. Termočlánek č. 1 byl položen a zakápnut teplovodivou pastou na čistý materiál FR4 bez vodivých ploch (modrá křivka), naopak termočlánek č. 2 byl přichycen na pájecí plošce DPS (oranžová křivka). Pro vytvrzení lepidla je dle technického listu potřebná teplota nad 150 °C po dobu min. 90-120 sekund. U termočláanky č. 1 byla teplota nad 150 °C po dobu 102 sekund a u termočláanky č. 2 po dobu 104 sekund, což je tedy dostačující.



Obr. 6-7 Teplotní profil při vytvrzování lepidla



Obr. 6-8 Profiloměr SuperM.O.L.E. Gold 2 od firmy Electronic Controls Design Inc. (ECD)

Před pájením byly desky také ručně osazeny vývodovými součástkami. Počet součástek na testovacích DPS byl následující:

- Přířez s DPS 1:
 - SMD 40x 2 typy součástek (2x SOT 23, 38x R1206),
 - THT 2x 1 typ součástky (2x kolíková lámací lišta, 2 řady po 15 vývodech, s roztečí 2 mm).
- Přířez s DPS 2:
 - SMD 40x 1 typ součástky (40x SOT 23),
 - THT 96x 3 typy součástek (4x kolíková lámací lišta, 2 řady x 16 vývodech s roztečí 2,57 mm, 36x rezistor 0207, 48x kondenzátor série R82).
- Přířez s DPS 3:
 - SMD 33x 2 typy součástek (5x dioda, 28x R0805).
- Přířez s DPS 4
 - SMD 10x 1 typ součástky (SOIC 16).

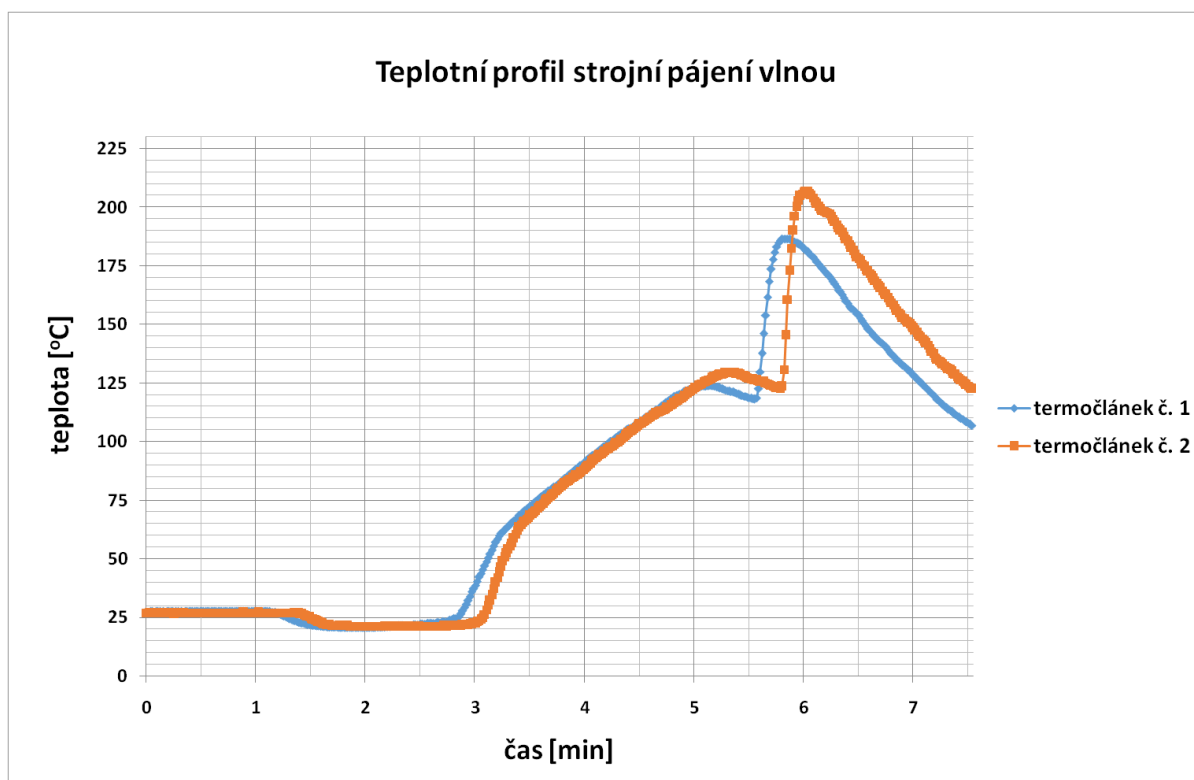
Dalším krokem bylo pájení osazených DPS na vlně PowerWave. Pomocí testovaného tavidla byla zapájena 1/3 z každého druhu testovacích osazených DPS. Parametry pájecí vlny byly následující:

- rychlost dopravníku:
 - nanášení tavidla: $65 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$,
 - předehřev: $75 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$,
 - pájení: $70 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$,
- množství tavidla: $35 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$,
- výška vlny: 63 % výkonu čerpadla,
- teploty zón předehřevu:
 - vzduchová tryska: $180 \text{ }^\circ\text{C}$,
 - infrazářič 1: $200 \text{ }^\circ\text{C}$,
 - infrazářič 2: $210 \text{ }^\circ\text{C}$,
 - infrazářič 3: $220 \text{ }^\circ\text{C}$,
 - infrazářič 4: $230 \text{ }^\circ\text{C}$,
 - infrazářič 5: $240 \text{ }^\circ\text{C}$,
- pájecí slitina: SN100C od firmy Balver Zinn,
- teplota pájecí slitiny: $269 - 271 \text{ }^\circ\text{C}$,
- dusíková atmosféra: dusíkový zákryt vany s pájecí slitinou.

Teplotní profil (viz Obr. 6-9) pájecí vlny byl změřen stejným způsobem jako při vytvrzování lepidla. Z teplotního profilu je patrný po první minutě pokles teploty, který je způsoben nanášením tavidla na DPS (první minuta znázorňuje teplotu od spuštění měření do začátku nanášení tavidla). Po nanesení tavidla DPS prochází předehřevem, přičemž mezi pátou a šestou minutou je v grafu vidět mírný pokles teploty způsobený přechodem DPS mezi předehřevem a samotnou pájecí vlnou. Další část teplotního profilu zobrazuje prudce rostoucí teplotu při průchodu DPS vlnou a poslední části dochází k chlazení DPS. V následující tabulce (viz Tab. 6-3) jsou popsány nejdůležitější informace o teplotním profilu při pájení vlnou.

Tab. 6-3 Teplotní profil při pájení vlnou

část teplotního profilu	termočlánek č. 1	termočlánek č. 2
nárůst teploty v předehřevu [$^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$]	0,6	0,7
maximální teplota předehřevu [$^\circ\text{C}$]	123	129
prodleva na pájecí vlně [s]	3	3
rychlost chlazení [$^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$]	0,9	1,0



Obr. 6-9 Teplotní profil pájecí vlny (měřeno na horní straně DPS)

Po zapájení všech testovacích DPS testovanými tavidly byl vyhodnocen vzhled a defekty pájených spojů (nezapájené spoje, zkraty a navzlínání pájkové výplně do prokovených otvorů) a vzhled pájených DPS (viz kapitola 6.3). DPS 1 a DPS 3 byly rozděleny na polovinu. U první poloviny těchto desek byla měřena kontaminace iontovými nečistotami před čištěním a u druhé poloviny po čištění zapájených testovacích DPS (viz kapitola 6.2). Čištěny byly tedy pouze 3 ks testovacích DPS 1 a 2 ks testovacích DPS 3 ve stejné myčce, která byla použita na začátku procesu i se stejným mycím programem (viz Tab. 6-2).

6.2 Metoda ROSE

Úroveň kontaminace iontovými nečistotami byla měřena před a po čištění zapájených testovacích DPS. Vzhledem k testování třech tavidel proběhlo měření celkem 6x (pro každé tavidlo před a po čištění). Do každého měření byly zařazeny:

- 3 ks testovacích DPS 1,
- 2 ks testovacích DPS 3.

V nádobě je testovací roztok 75 hmotnostních % izopropylalkoholu a 25 hmotnostních % deionizované vody o objemu 1,3 l. Pro kalibraci zařízení sloužil kalibrační roztok, standardní NaCl roztok o koncentraci $60 \text{ mg NaCl} \cdot \text{l}^{-1}$ (5 ml tohoto roztoku je rovno $300 \text{ } \mu\text{g NaCl}$).

Nejprve byl deionizován testovací roztok na hodnotu $0,05 \text{ } \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. Následná kalibrace probíhala postupným přidáváním kalibračního roztoku (5, 10, 15 a 20 ml) do testovacího

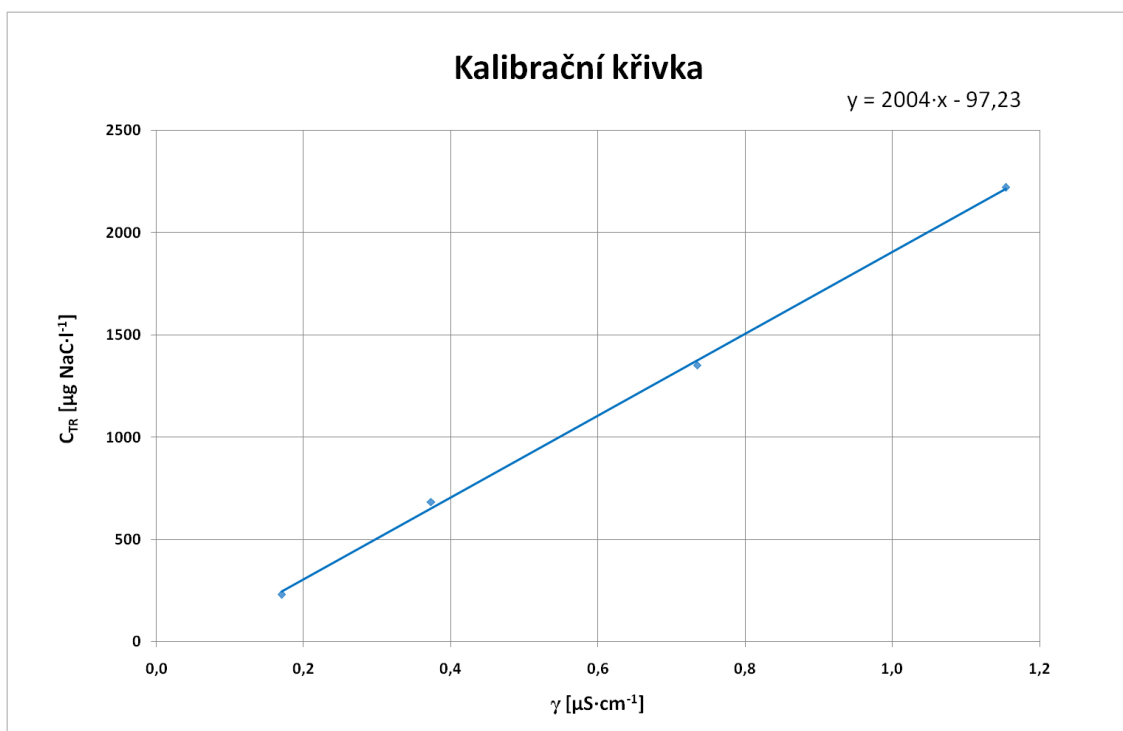
roztoku. Celkový přidáný objem kalibračního roztoku tedy činil 50 ml. Vždy po ustálení hodnot byla změřena měrná vodivost testovacího roztoku (viz Tab. 6-4). Po naměření hodnot měrné vodivosti byly vypočítány hodnoty koncentrace NaCl testovacího roztoku C_{TR} po přidávání kalibračního roztoku. Výsledkem kalibrace je kalibrační křivka, což je závislost koncentrace NaCl testovacího roztoku C_{TR} na měrné vodivosti testovacího roztoku γ (viz Obr. 6-10).

Příklad výpočtu koncentrace NaCl v testovacím roztoku C_{TR} pro druhý řádek Tab. 6-4:

$$C_{TR} = \frac{60 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{1,3 + 0,005} = 230 \mu\text{g NaCl} \cdot \text{l}^{-1} \quad (6.1)$$

Tab. 6-4 Naměřené a vypočítané hodnoty při kalibraci

V_{KR} [ml]	C_{TR} [$\mu\text{g NaCl} \cdot \text{l}^{-1}$]	γ [$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$]
0	0	0,050
5	230	0,170
15	684	0,373
30	1353	0,735
50	2222	1,154



Obr. 6-10 Kalibrační křivka metody ROSE

Poznámka - kalibrace testovacího roztoku byla provedena pouze jednou. Před každým měřením byl roztok vyčištěn na hodnotu $0,05 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Následovalo samotné měření kontaminace iontovými nečistotami statickou metodou. Přístrojem byla změřena závislost měrné vodivosti testovacího roztoku na čase (přístroj má teplotně kompenzovanou vodivostní jednotku). Vzhledem k tomu, že jsou iontové nečistoty obvykle vyjádřeny ekvivalentem chloridu sodného na jednotku plochy vzorku, bylo nejprve nutné vypočítat celkovou plochu sestavy DPS. Následoval přepočítání hodnot měrné vodivosti pomocí rovnice regrese z kalibrační křivky (viz Obr. 6-10) na koncentraci NaCl testovacího roztoku C_{TR} . Posledním výpočtem byl samotný ekvivalent chloridu sodného na jednotku plochy sestavy DPS.

Výpočet celkové plochy testovací DPS 1:

$$S_{DPS1} = (15 \cdot 11,8) \cdot 2 = 354 \text{ cm}^2. \quad (6.2)$$

Výpočet celkové plochy testovací DPS 3:

$$S_{DPS3} = (20 \cdot 9) \cdot 2 = 360 \text{ cm}^2. \quad (6.3)$$

Výpočet celkové plochy sestavy DPS:

$$S_{SESTAVA} = (3 \cdot 354 + 2 \cdot 360) \cdot 1,5 = 2673 \text{ cm}^2. \quad (6.4)$$

Poznámka - v tomto případě byly měřeny tři DPS 1 o rozměrech 15 x 11,8 cm a dvě DPS 3 o rozměrech 20 x 9 cm, přičemž byly do obsahu započítány obě strany DPS. Také byla celková plocha všech pěti měřených DPS vynásobena 1,5 z důvodu toho, že desky byly osazeny součástkami (dle normy IPC-TM-650).

Ukázka přepočtu naměřených hodnot měrné vodivosti testovacího roztoku γ z kalibrační křivky na koncentraci NaCl testovacího roztoku C_{TR} (po čištění zapájených DPS pro tavidlo 3):

- měrná vodivost testovacího roztoku $\gamma = 0,22 \text{ } \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (v čase $t = 20 \text{ min.}$),
- rovnice regrese z grafu (viz obr. 6-10): $C_{TR} = 2004 \cdot \gamma - 97,23$,

$$C_{TR} = 2004 \cdot 0,22 - 97,23 = 343,65 \text{ } \mu\text{g NaCl} \cdot \text{l}^{-1}. \quad (6.5)$$

Ukázka výpočtu ekvivalentu chloridu sodného na jednotku plochy vzorku C_{TREQ} z předem vypočítané koncentrace NaCl v testovacím roztoku C_{TR} (po čištění zapájených DPS pro tavidlo 3):

$$C_{TREQ} = \frac{343,65 \cdot 1,35}{2673} = 0,17 \text{ } \mu\text{g NaCl Eq.} \cdot \text{cm}^{-2}. \quad (6.6)$$

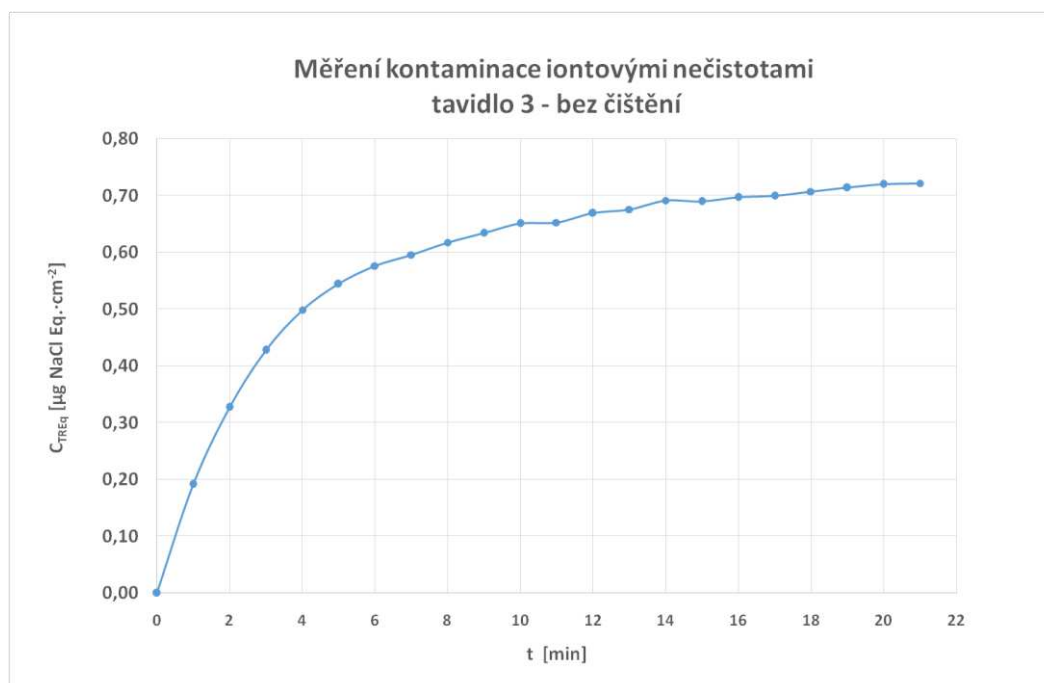
Poznámka - koncentrace NaCl v testovacím roztoku, která byla vypočítána dle kalibrační křivky pomocí naměřené hodnoty měrné vodivosti byla vynásobena hodnotou celkového objemu roztoku a vydělena celkovou plochou sestavy DPS.

Výsledné závislosti jsou znázorněny v následujících šesti grafech (viz Obr. 6-11, Obr. 6-12, Obr. 6-13, Obr. 6-14, Obr. 6-15, Obr. 6-16). Jak je z grafů názorně vidět, hodnota měrné vodivosti, resp. koncentrace NaCl v testovacím roztoku postupně stoupá. To je dáno uvolňováním ionizovatelných nečistot z povrchu DPS do testovacího roztoku. Pokud už jsou v testovacím roztoku rozpuštěny všechny nečistoty, měly by se hodnoty koncentrace ustálit, avšak z grafů je patrné, že hodnoty se stále zvyšují, byť už jenom nepatrně. To může být způsobeno rozpouštěním iontů ze vzduchu (testovacím roztokem neproublával dusík) či ze základního materiálu DPS nebo z testovací nádoby. Z grafů je také patrné, že pokud nebyly desky čištěny, jsou špinavější, a tedy mají více ionizovatelných nečistot.

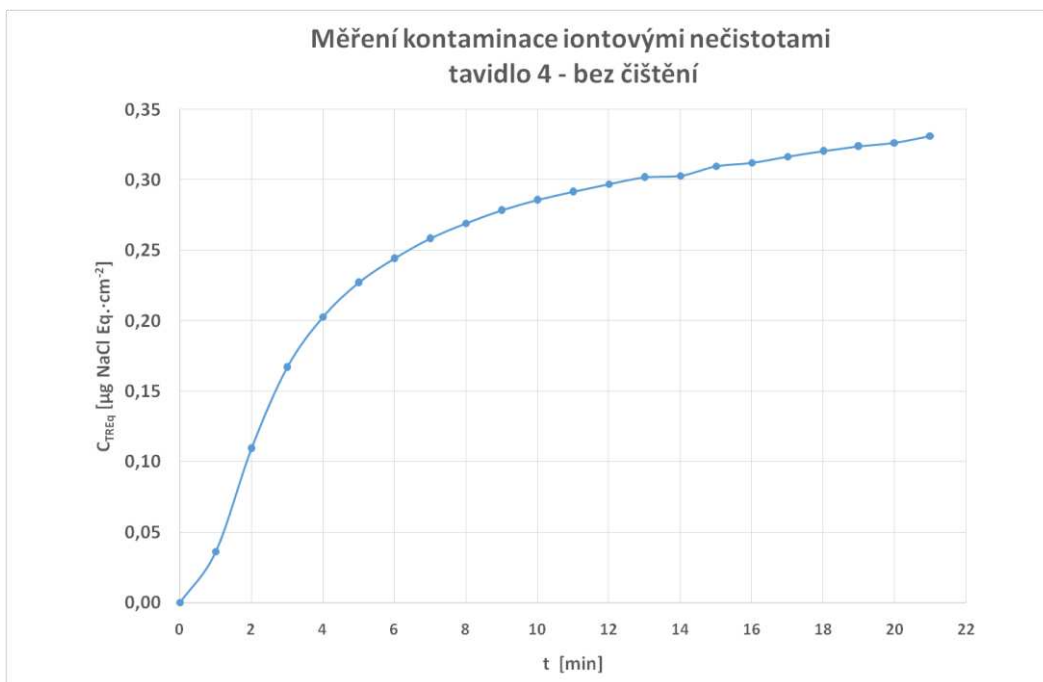
V tabulce (viz Tab. 6-5) jsou porovnány hodnoty koncentrace NaCl v testovacím roztoku v čase $t = 20$ min, kdy už jsou hodnoty koncentrace téměř ustáleny. Podle hodnot v tabulce lze usoudit, že tavidlo 6 zajistí nejnižší úroveň kontaminace iontovými nečistotami, jak bez čištění, tak po čištění DPS.

Tab. 6-5 Porovnání hodnot koncentrace NaCl v testovacím roztoku v čase $t = 20$ min.

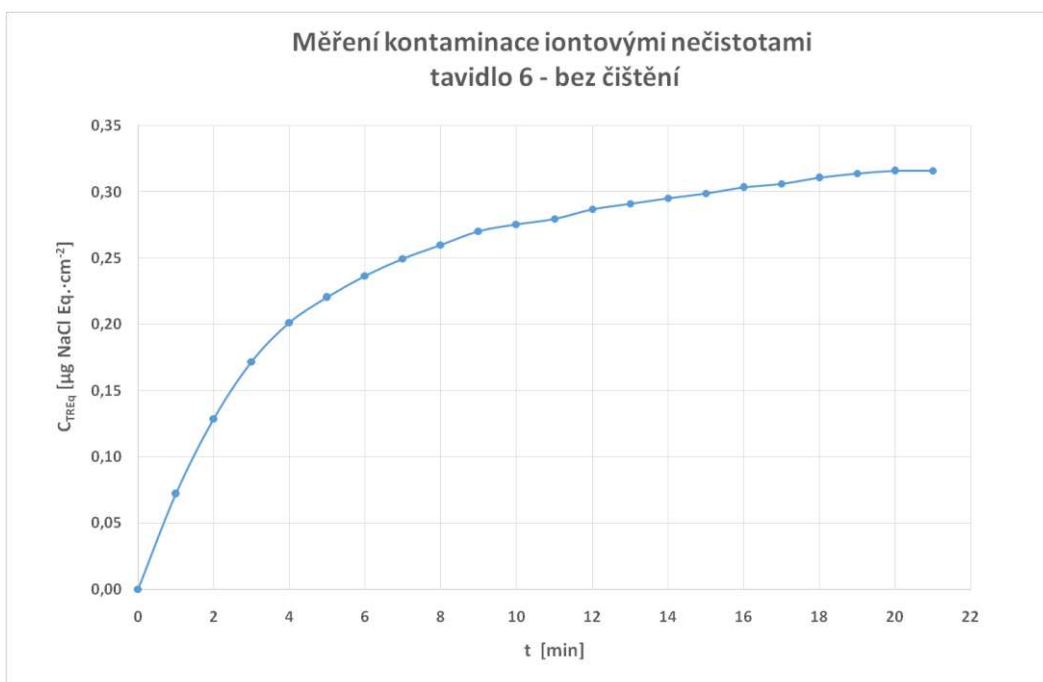
tavidlo	C_{TR} [$\mu\text{g NaCl Eq}\cdot\text{cm}^{-2}$]	
	bez čištění	po čištění
3	0,720	0,172
4	0,326	0,164
6	0,315	0,149



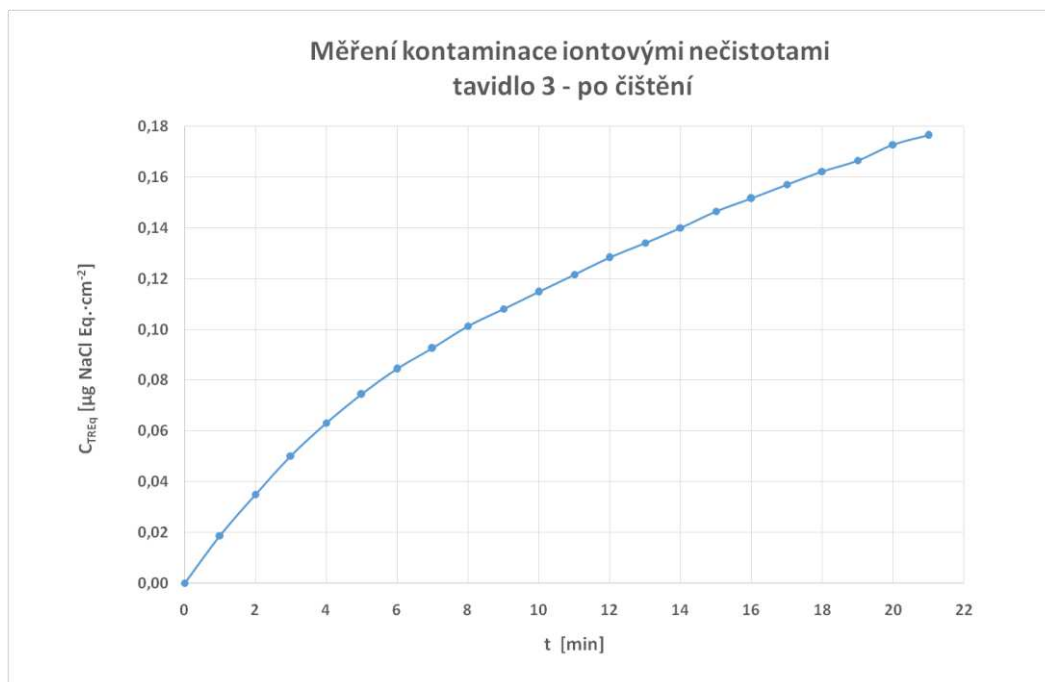
Obr. 6-11 Graf závislosti C_{TREq} na čase (tavidlo 3 – bez čištění DPS)



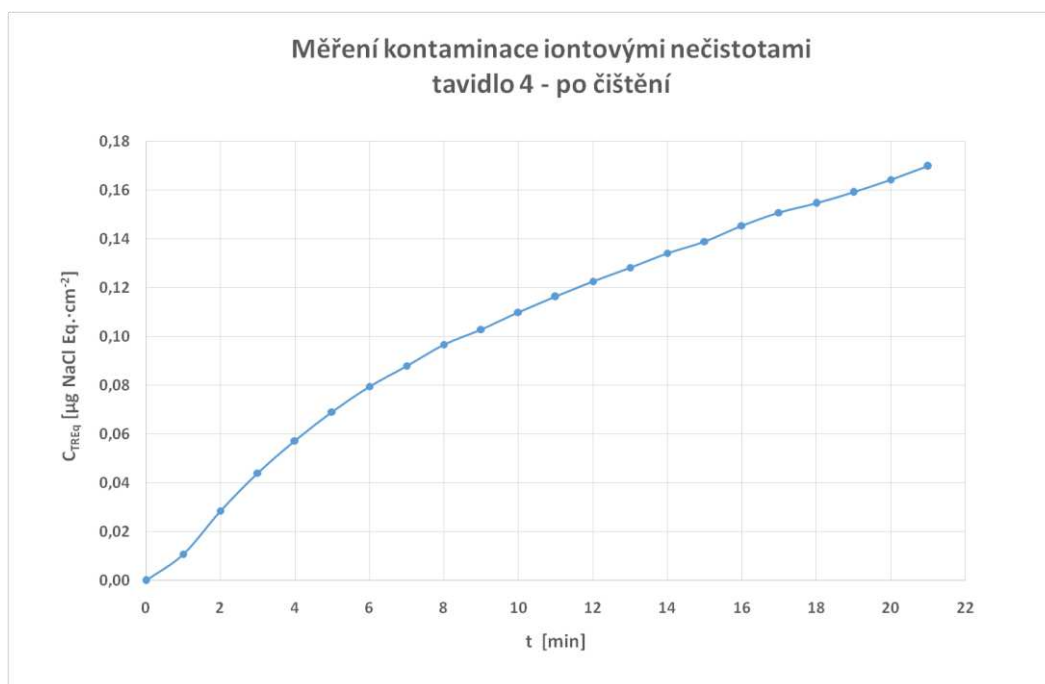
Obr. 6-12 Graf závislosti C_{TREq} na čase (tavidlo 4 – bez čištění DPS)



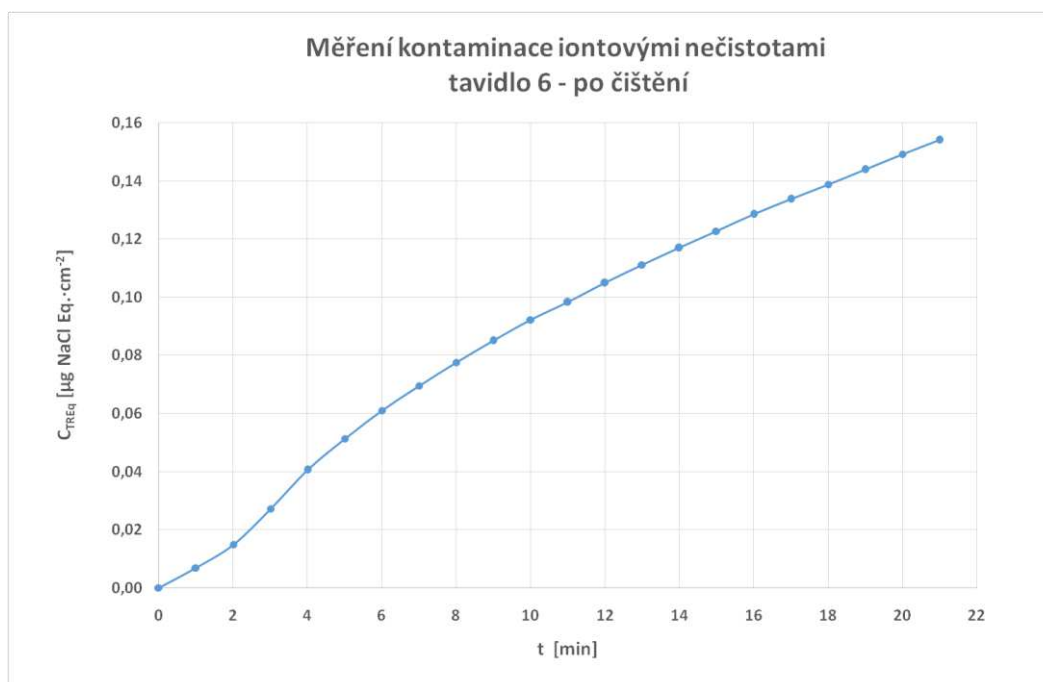
Obr. 6-13 Graf závislosti C_{TREq} na čase (tavidlo 6 – bez čištění DPS)



Obr. 6-14 Graf závislosti C_{TREq} na čase (tavidlo 3 – po čištění DPS)



Obr. 6-15 Graf závislosti C_{TREq} na čase (tavidlo 4 – po čištění DPS)



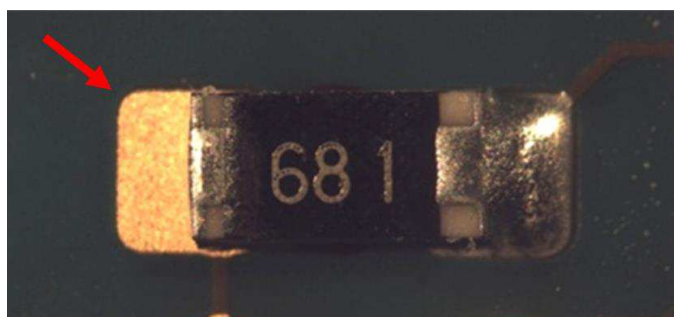
Obr. 6-16 Graf závislosti C_{TREq} na čase (tavidlo 6 – po čištění DPS)

6.3 Vyhodnocení DPS po pájení

Po zapájení všech testovacích DPS různými tavidly byl vyhodnocen vzhled a defekty pájených spojů (nezapájené spoje, zkraty a navzhlínání pájkové výplně do pokovených otvorů) a vzhled pájených DPS.

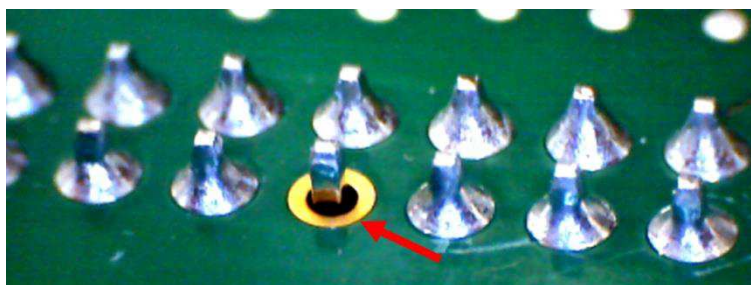
Příklady pozorovaných defektů

Mezi pozorované defekty je možné zařadit dle normy IPC-A-610 verze F (5.2.4 Nonwetting) nezapájený spoj u rezistoru, v tomto případě se jedná o rezistor s pouzdrem 1206 z DPS 1 (viz Obr. 6-17). Tento defekt se vyskytoval u všech testovaných tavidel.

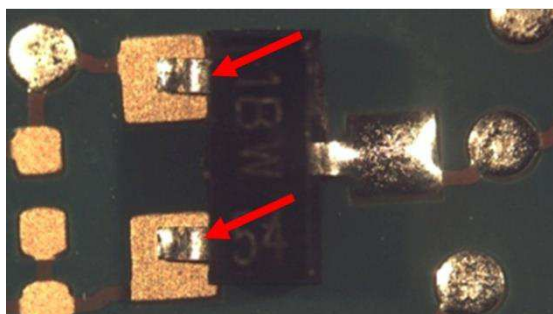


Obr. 6-17 Nezapájený spoj u rezistoru velikosti 1206

Na DPS 1 byl taktěž pozorován nezapájený spoj u kolíkové lámací lišty (viz Obr. 6-18), který se vyskytoval u tavidla 6 a nezapájené spoje u součástky s pouzdrem SOT 23 u všech tavidel (viz Obr. 6-19).

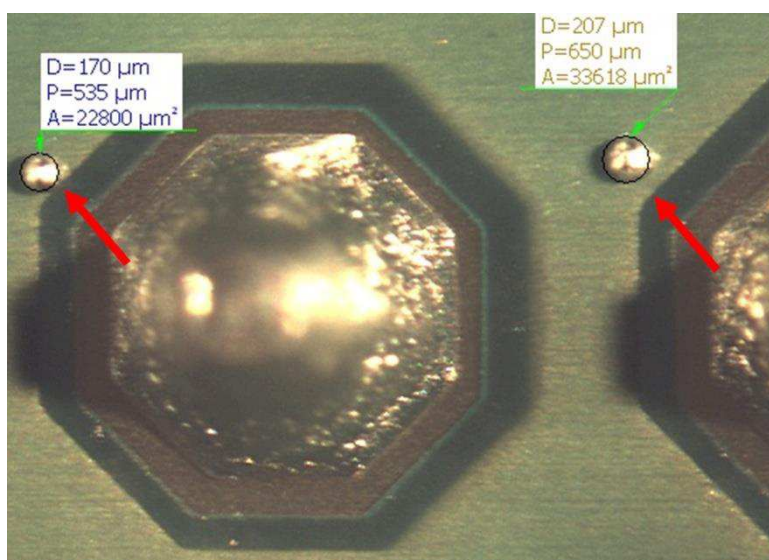


Obr. 6-18 Nezapájený spoj u kolíkové lámací lišty

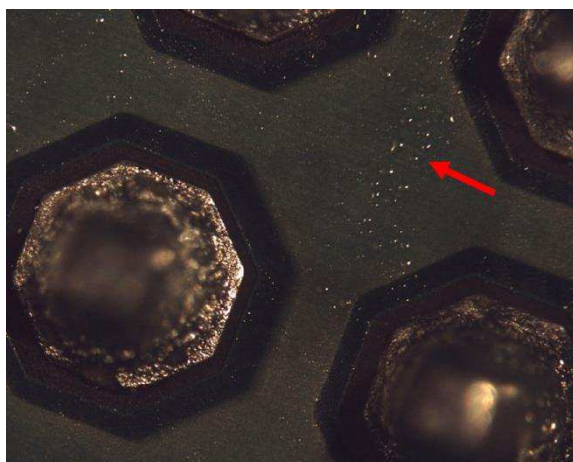


Obr. 6-19 Dva nezapájené spoje u součástky s pouzdem SOT 23

Na DPS 2 se vyskytoval defekt dle normy IPC-A-610 verze F (5.2.7.1 Solder balls) mezi vývody kolíkové lámací lišty na nepájivé masce, a to konkrétně kuličky pájky (viz Obr. 6-20). Průměr kuliček pájecí slitiny se pohyboval mezi 130 až 250 μm . Tento defekt byl pozorován u všech tavidel, avšak v jiném množství. Taktéž se mezi vývody na nepájivé masce objevovaly kapičky tavidla, v největším množství u tavidla 3 (viz Obr. 6-21).

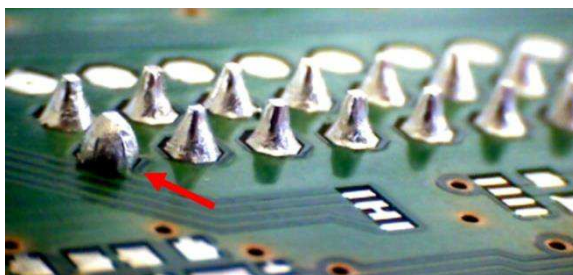


Obr. 6-20 Kuličky pájecí slitiny

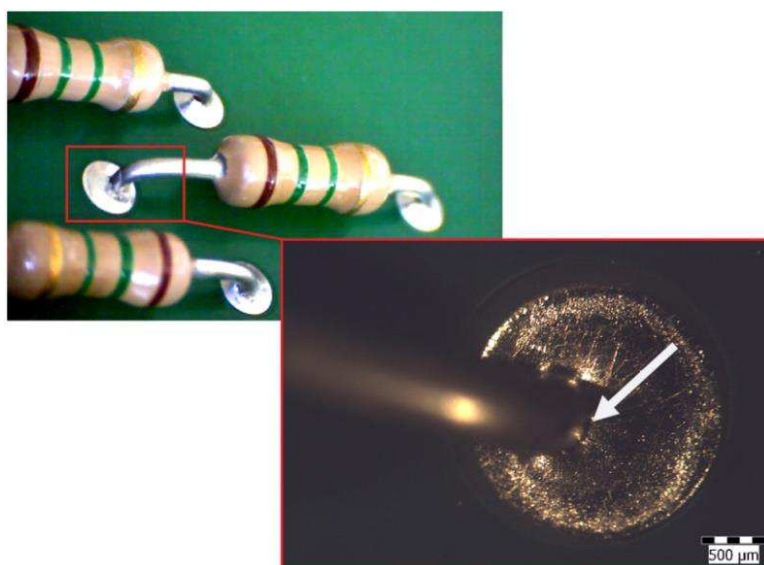


Obr. 6-21 Kapičky tavidla

Dalším defektem na DPS 2 byl špatný smáčecí úhel pájecí slitiny, jak je názorně vidět na Obr. 6-22 na označeném vývodu kolíkové pájecí lišty. Z obrázku je názorně vidět, že smáčecí úhel je větší jak 90° , což dle normy IPC-A-610 verze F (5.1 Solder Source Side -Contact Angle) neodpovídá dostatečně zapájenému spoji. Tento defekt se vyskytoval u tavidla 3.



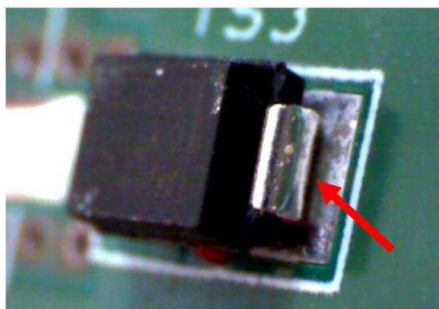
Obr. 6-22 špatný smáčecí úhel pájecí slitiny



Obr. 6-23 Nedostatečné navzlinání pájky na vývod součástky

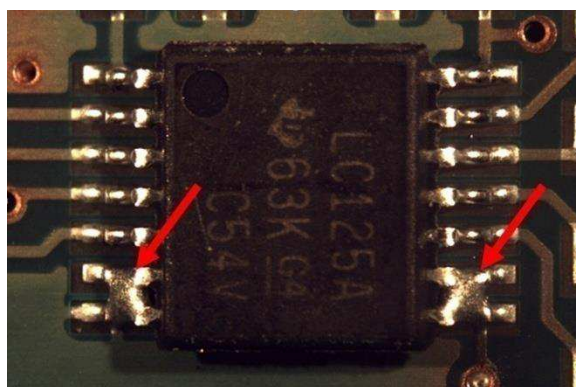
Na DPS 2 se nacházel také defekt, který nesplňuje požadavky dle normy IPC-A-610 verze F. Jedná se o nedostatečné nasmáčení pájky na vývod rezistoru na horní straně DPS. Dle kritéria 7.3.5.2, obvodové smáčení vývodu bylo menší než 180 stupňů, tedy nevyhovuje ani pro třídu 2. Na Obr. 6-23 se nachází vyfocený rezistor s detailem na defekt pájeného spoje. Tento defekt byl pozorován u tavidla 4.

Na DPS 3 se vyskytoval defekt u tavidla 6, který je názorně vidět na Obr. 6-24. Jedná se o nezapájený spoj u diody, opět dle normy IPC-A-610 verze F (5.2.4 Nonwetting).



Obr. 6-24 Nezapájený spoj u diody

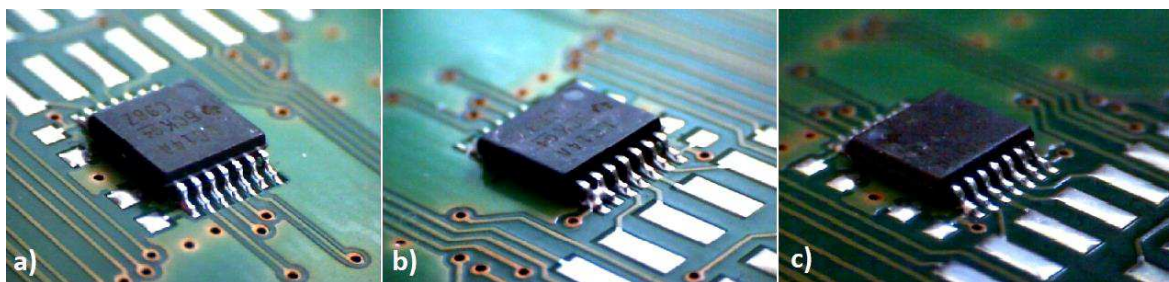
Na DPS 4 se vyskytovaly zkratky u integrovaného obvodu v pouzdře SOIC 16 dle normy IPC-A-610 verze F (5.2.7.2 Solder Bridging). Tento defekt se objevoval u všech tavidel a je zobrazen na Obr. 6-25.



Obr. 6-25 Zkratky vývodů pouzdra SOIC 16

Vzhled pájených spojů

Na Obr. 6-26 a Obr. 6-27 je znázorněn vzhled pájených spojů u SMD a THT součástek při pájení různými tavidly. Vzhled a tvar pájených spojů je bez větších rozdílů. Tavidlové zbytky na pájených spojích nejsou viditelné. Nepájjivá maska v okolí pájených spojů byla vizuálně bez barevných změn.



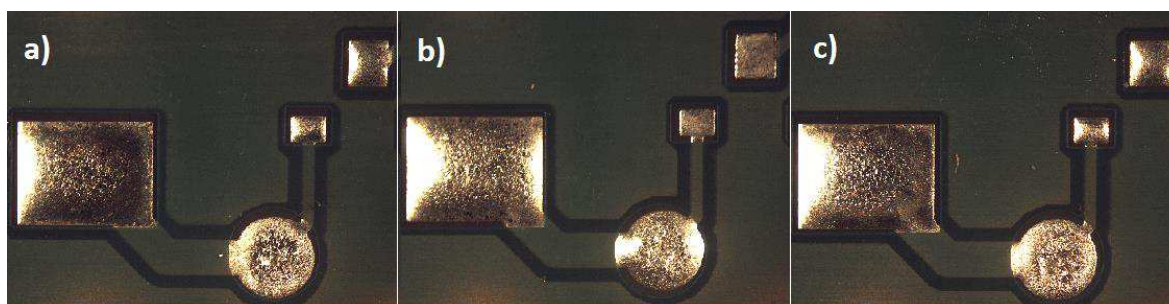
Obr. 6-26 Vzhled pájených spojů u SMD součástek, a) tavidlo 3, b) tavidlo 4, c) tavidlo 6



Obr. 6-27 Vzhled pájených spojů u THT součástek, a) tavidlo 3, b) tavidlo 4, c) tavidlo 6

V okolí pájených spojů se tavidlové zbytky nejvíce nacházejí u DPS pájených s tavidlem 6. Naopak při pájení s tavidlem 3 tavidlové zbytky v okolí pájeného spoje viditelné nejsou, avšak pod mikroskopem je vidět v okolí pájených spojů kolíkové lámací lišty velké množství kapiček tavidla, které jsou čiré (viz Obr. 6-21). U pájení s tavidlem 6 se čiré kapičky tavidla nacházejí v menším množství. Tavidlo 4 sice zanechává trošku viditelných tavidlových zbytků, avšak nezůstávají kolem pájených spojů čiré kapičky tavidla.

Na Obr. 6-28 je vidět vzhled zapájené pájecí plošky bez součástky při pájení různými tavidly pro názornost případného rozdílu. Není však moc velký rozdíl viditelný.

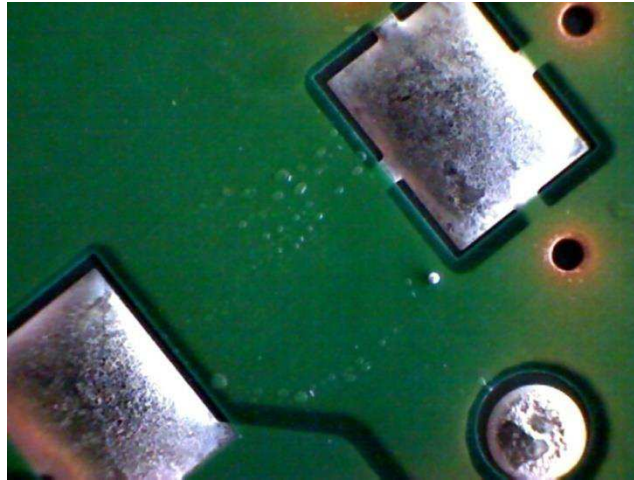


Obr. 6-28 Vzhled pájecí slitiny, a) tavidlo 3, b) tavidlo 4, c) tavidlo 6

Vzhled testovacích DPS po pájení (viz Obr. 6-29)

- Tavidlo 3:
 - vizuálně bez tavidlových zbytků,
 - vizuálně pod mikroskopem bylo pozorováno velké množství čirých kapiček tavidla.
- Tavidlo 4:
 - vizuálně bylo pozorováno malé množství tavidlových zbytků,

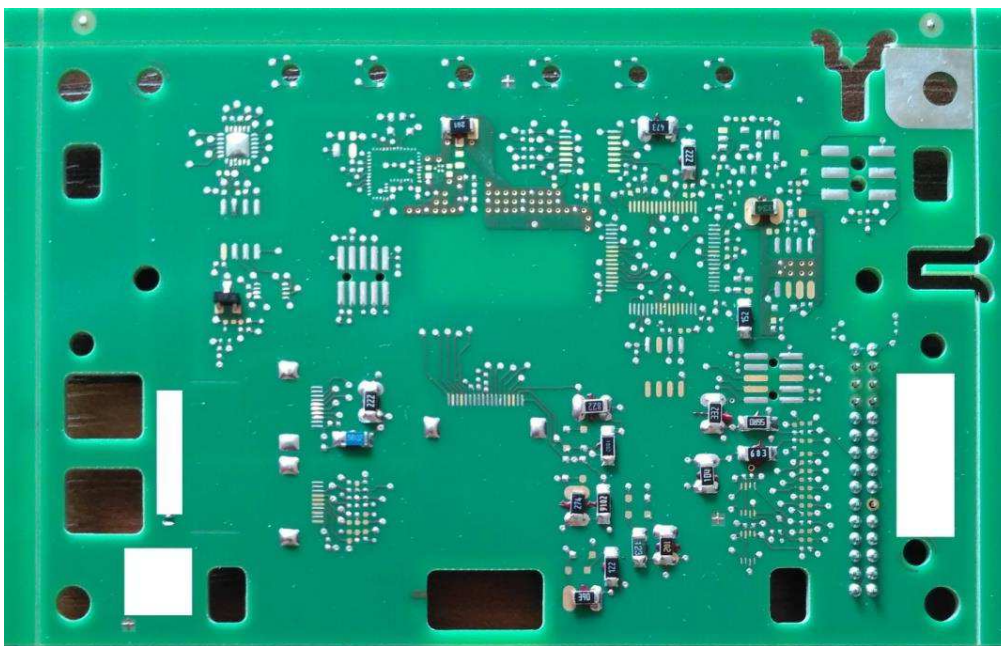
- vizuálně pod mikroskopem bez čirých kapiček tavidla.
- Tavidlo 6:
 - vizuálně bylo pozorováno velké množství tavidlových zbytků,
 - vizuálně pod mikroskopem bylo sledováno malé množství čirých kapiček tavidla.



Obr. 6-29 Kapky tavidla mezi pájecími ploškami (tavidlo 3)

Vyhodnocení defektů na DPS 1

Ukázka zapájené testovací DPS 1 se nachází na Obr. 6-30.



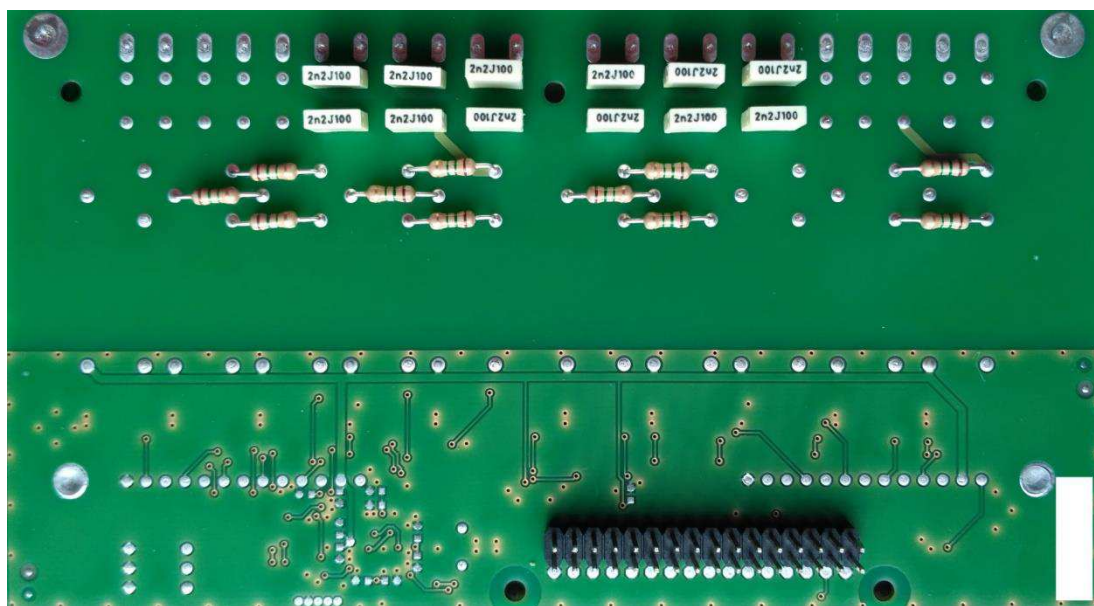
Obr. 6-30 Zapájená DPS 1

- Tavidlo 3:
 - 13x nezapájený spoj u součástky SOT 23,
 - 38x nezapájený spoj u rezistoru 1206,
 - 2x „kulovitý“ tvar pájeného spoje u kolíkové lámací lišty (smáčecí úhel byl menší jak 90 °).

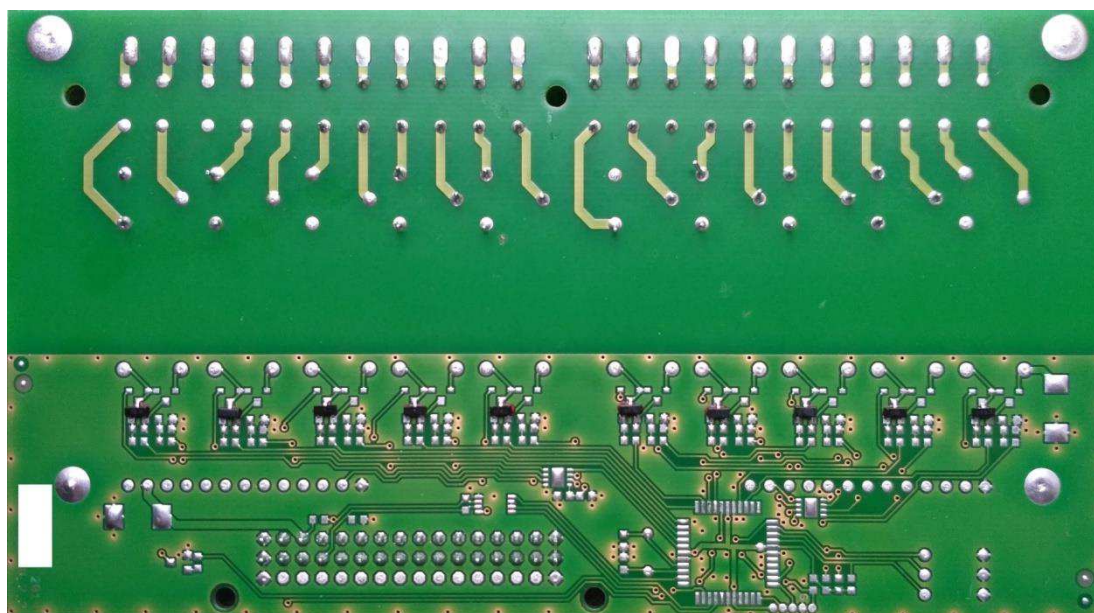
- Tavidlo 4:
 - 15x nezapájený spoj u součástky SOT 23,
 - 41x nezapájený spoj u rezistoru 1206.
- Tavidlo 6:
 - 10x nezapájený spoj u součástky SOT 23,
 - 42x nezapájený spoj u rezistoru 1206,
 - 1x „kulovitý“ tvar pájeného spoje u kolíkové lámací lišty (smáčecí úhel byl menší jak 90 °).
 - 3x nezapájený spoj u kolíkové lámací lišty.

Vyhodnocení defektů na DPS 2

Ukázka zapájené testovací DPS 2 je na Obr. 6-31 a Obr. 6-32.



Obr. 6-31 Zapájená horní strana DPS 2

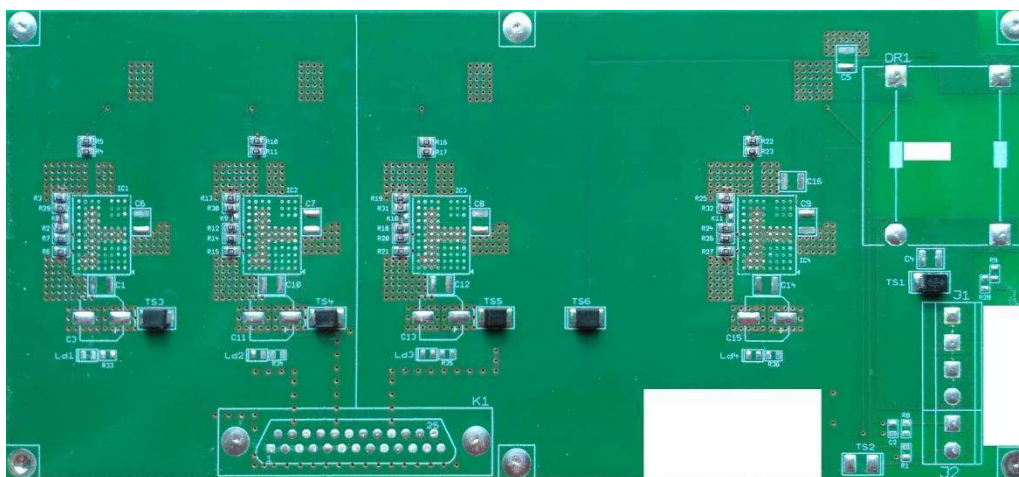


Obr. 6-32 Zapájená spodní strana DPS 2

- Tavidlo 3:
 - velké množství kuliček pájky mezi vývody kolíkové lámací lišty,
 - 1x nezapájený vývod kolíkové lámací lišty (smáčecí úhel byl větší jak 90 °, konec vývodu není zřetelný),
 - 129x nezapájený spoj u součástky SOT 23.
- Tavidlo 4:
 - minimum kuliček pájky mezi vývody kolíkové lámací lišty,
 - 2x špatné smáčení vývodů THT součástek,
 - 187x nezapájený spoj u součástky SOT 23.
- Tavidlo 6:
 - velké množství kuliček pájky mezi vývody kolíkové lámací lišty,
 - 178x nezapájený spoj u součástky SOT 23.

Vyhodnocení defektů na DPS 3

Ukázka zapájené testovací DPS 3 je na Obr. 6-33.



Obr. 6-33 Zapájená horní strana DPS 3

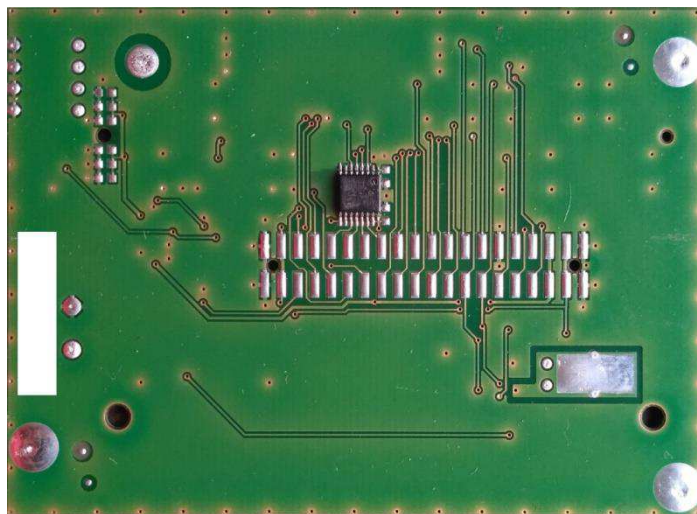
- Tavidlo 3:
 - 78x nezapájený spoj u rezistoru 0805.
- Tavidlo 4:
 - 96x nezapájený spoj u rezistoru 0805.
- Tavidlo 6:
 - 103x nezapájený spoj u rezistoru 0805,
 - 3x nezapájený spoj u diody.

Vyhodnocení defektů na DPS 4

Ukázka zapájené testovací DPS 4 je na Obr. 6-34.

- Tavidlo 3:
 - 5x zkrat u součástek SOIC 16,
 - 9x nezapájený spoj u součástek SOIC 16,
 - přítomnost kuliček pájky kolem pájených spojů.
- Tavidlo 4:
 - 8x zkrat u součástek SOIC 16,
 - 13x nezapájený spoj u součástek SOIC 16,

- přítomnost kuliček pájky kolem pájených spojů.
- Tavidlo 6:
 - 3x zkrat u součástek SOIC 16,
 - 19x nezapájený spoj u součástek SOIC 16,
 - přítomnost kuliček pájky kolem pájených spojů.



Obr. 6-34 Zapájená horní strana DPS 4

Úroveň ionizovatelných nečistot (viz kapitola 6.2)

Pomocí metody ROSE bylo zjištěno, že jak bez čištění, tak po čištění DPS, tavidlo 3 zanechalo nejvyšší úroveň ionizovatelných nečistot. Naopak tavidlo 6 disponuje nejnižší úrovní ionizovatelných nečistot (viz Tab. 6-5).

6.4 Vyhodnocení tavidel

Dle výše popsaného hodnocení defektů na jednotlivých DPS a dalších jak už důležitých či alespoň vypovídajících známkách o kvalitě testovaných tavidel byla vytvořena tabulka, ve které jsou testovaná tavidla obodována (viz Tab. 6-6). Bylo zvoleno bodování takové, že 1 bod znamená nejhorší výsledek, naopak 3 body vykazují výsledek nejlepší.

Tab. 6-6 Bodové ohodnocení testovaných tavidel

	tavidlo 3	tavidlo 4	tavidlo 6
tavidlové zbytky	3b	2b	1b
čiré kapičky tavidla	1b	3b	2b
kuličky pájky	1b	3b	1b
nezapájené spoje u THT součástek	2b	2b	1b
nezapájené spoje u SMD součástek	3b	2b	1b
zkraty	2b	1b	3b
vzhled pájených spojů	3b	3b	3b
úroveň ionizovatelných nečistot	1b	3b	3b
barevné změny či defekty nepáživé masky po pájení	3b	3b	3b
vzlínání pájky do pokovených signálových otvorů	3b	2b	1b
součet bodů	22b	24b	19b

Tavidlové zbytky, které jsou na zapájené DPS vidět na první pohled bez pomoci mikroskopu, jsou podle firmy HC electronics nepřijatelné z hlediska kritérií většiny zákazníků. Avšak záleží na konkrétní zakázce a také znalosti zákazníků. Pokud je DPS vizuálně čistá nemusí znamenat, že na ní nejsou žádné tavidlové zbytky, protože číré kapičky tavidla bez mikroskopu vidět nejsou. Je sice možné DPS po pájení umýt v mycím zařízení, avšak zvyšují se tím celkové náklady na výrobu zakázky, což může zákazníka odradit. Při praktických zkouškách desky pájené s tavidlem 3 byly vizuálně čisté, avšak plné čířích kapiček tavidla. Není řečeno, že tavidlové zbytky, které jsou vidět na první pohled, ničemu nevadí, ale číré kapičky tavidla nemusí být úplně zreagované a mohou tedy zrychlit negativní dopad na spolehlivost zařízení. Při pájení s tavidlem 4 byly na desce zbytky tavidla i číré kapičky tavidla v malém množství. Nejvíce pozorovaných tavidlových zbytků bylo na DPS s použitím tavidla 6, čířích kapiček tavidla bylo menší množství.

Kuličky pájky se nejvíce nacházely mezi vývody kolíkové lámací lišty a také mezi vývody pouzdra SOIC 16. Nejvíce kuliček bylo na deskách po pájení s použitím tavidla 3 a tavidla 6. Příčina vzniku by mohla být nedostatečný přehřev tavidla, protože pokud se rozpouštědlo v tavidle před samotným pájením nevysuší, tak při styku s roztavenou pájecí slitinou dochází k jejímu rozstříknutí a následnému vzniku kuliček pájky na nepáživé masce.

Dle výsledků v celkovém počtu zapájených spojů vyhrává jednoznačně tavidlo 3 a nejmenší počet zkratů bylo po pájení s tavidlem 6. Vzhled a tvar pájených spojů byl bez větších rozdílů (mírně porézní a našedlý vzhled pájecí slitiny). Bez čištění, tak i po čištění DPS tavidlo 3 zanechalo mnohem vyšší úroveň ionizovatelných nečistot, než vykazala ostatní tavidla. Barevné změny či defekty nepáživé masky po pájení nebyly pozorovány.

Sledování vzlínání pájky do pokovených signálových otvorů, může sloužit také jako měřítko kvality tavidla. Nejvíce signálových otvorů, v kterých dobře navzlínala pájka bylo při pájení s tavidlem 3, nejméně s tavidlem 6.

Pro firmu HC electronics je největším kritériem vizuální čistota DPS a co nejnižší úroveň ionizovatelných nečistot. Vizuálně DPS po pájení s tavidlem 3 byly čisté, u tavidla 4 bylo vidět trochu tavidlových zbytků, avšak DPS s tavidlem 6 byly nepřijatelně špinavé. Tavidlo 3 vykazovalo bez čištění DPS největší úroveň ionizovatelných nečistot. U tavidel 4 a 6 byla naměřena úroveň ionizovatelných nečistot méně než poloviční. Dalším důležitým měřítkem je počet vad při pájení (nezapájené spoje a zkraty). Bezkonkurenčně nejnižší množství vad oproti ostatním testovaným tavidlům zajistilo dle testových zkoušek tavidlo 3.

Po celkovém součtu bodů i dle výše uvedených kritérií je možné firmě HC electronics doporučit tavidlo 4.

Závěr

Cílem této diplomové práce byl výběr vhodného tavidla pro strojní pájení vlnou konkrétně pro firmu HC electronics z Hradce Králové. První kapitola této diplomové práce se soustředí na problematiku tavidel a tavidlových zbytků pro strojní pájení vlnou. Druhá kapitola seznamuje čtenáře se strojním pájením vlnou a faktory které jej ovlivňují.

Třetí kapitola je zaměřena na výběr a porovnání tavidel dle požadavků firmy HC electronics. Bylo vybráno 6 různých tavidel, které splňují zadané požadavky, včetně tavidla, které používá firma HC electronics nyní (tavidlo 3). K výběru bylo zařazeno ještě jedno tavidlo, které má vyšší obsah pevné složky, než bylo požadováno.

Čtvrtá kapitola pojednává o návrhu metodik pro testování vybraných tavidel, mezi které patří metoda smáčecích vah, měření povrchového izolačního odporu, test na měděné zrcadlo, pájení testovacích DPS a konduktometrická metoda ROSE.

Pátá kapitola podrobně popisuje dosažené výsledky měření z úvodu praktické části diplomové práce, jejímž cílem je vybrat tři nejlepší tavidla pro následné praktické zkoušky ve firmě HC electronics. Úvod praktické části zahrnoval měření smáčivosti pomocí smáčecích vah, měření povrchového izolačního odporu a test na měděné zrcadlo (realizace na ústavu elektrotechnologie). Dle vyhodnocení dosažených výsledků testování tavidel v podkapitole 5.4 byla vybrána tavidla 3, 4 a 6. Tavidlo 3 při testování vynikalo největší smáčecí silou a zajistilo jedno z nejlepších smáčení. Patřilo také mezi nejlepší tavidla při měření SIR a při testu na měděné zrcadlo. Dalším důvodem výběru tavidla 3 bylo následné porovnání výsledků s dalšími vybranými tavidly, která by mohla mít stejné či dokonce lepší výsledky u praktických testů ve firmě HC electronics. Tavidlo 4 bylo vybráno pro další testování, protože dle všech výsledků testování tavidel v první praktické části jednoznačně vyhrává. Tavidlo 6 bylo vybráno z důvodu vykazování vysoké smáčecí síly a nízké agresivity.

Poslední šestá kapitola je věnována praktickým zkouškám ve firmě HC electronics. Tato kapitola nejprve seznamuje s vlnou PowerWave od firmy SEHO, na které se pájí ve firmě HC electronics. Podkapitola 6.1 se soustředí na pájení SMD a THT součástek na testovacích DPS se třemi vybranými tavidly. Podkapitola 6.2 je zaměřena na měření úrovně ionizovatelných nečistot před a po čištění DPS. Podkapitola 6.3 je věnována vyhodnocení praktických zkoušek, tedy hodnotí vzhled pájených spojů a DPS (tavidlové zbytky, kuličky pájky na nepájivé masce) pájených rozdílnými tavidly, počet vad u vybraných DPS, úroveň ionizovatelných nečistot před a po čištění, barevné změny či defekty nepájivé masky a vzlínání pájky do pokovených signálových otvorů. V poslední části šesté kapitoly je diskutováno o výběru vhodného tavidla dle hodnocení praktických zkoušek pro firmu HC electronics.

Pro firmu HC electronics je největším kritériem vizuální čistota DPS a co nejnižší úroveň ionizovatelných nečistot. Vizuálně DPS po pájení s tavidlem 3 byly čisté, u tavidla 4 bylo vidět trochu tavidlových zbytků, avšak DPS s tavidlem 6 byly nepříjemně špinavé.

Tavidlo 3 vykázalo bez čištění DPS největší úroveň ionizovatelných nečistot. U tavidel 4 a 6 byla naměřena úroveň ionizovatelných nečistot méně než poloviční. Kompromisem by mohlo být tavidlo 4, protože úroveň ionizovatelných nečistot vykazuje jen o trošku vyšší, než tavidlo 6 a vizuálně je někde mezi testovanými tavidly.

Dalším kritériem je počet vad při pájení (nezapájené spoje a zkraty), protože počet defektů prodlužuje výrobu a je nutná jejich oprava. Bezkonkurenčně nejnižší množství vad oproti ostatním testovaným tavidlům zajistilo dle testových zkoušek tavidlo 3. Nejvíce defektů vykázalo tavidlo 6.

Dle defektů na jednotlivých DPS a dalších důležitých vypovídajících známkách o kvalitě testovaných tavidel byla vytvořena tabulka, ve které jsou testovaná tavidla obodována (viz tab. 6-6). Po celkovém součtu bodů i dle výše uvedených kritérií je možné firmě HC electronics doporučit tavidlo 4.

Použitá literatura

- [1] STARÝ, Jiří a Miroslav ZATLOUKAL. Montážní a propojovací technologie. Verze 1.1. Brno, 2014.
- [2] Performing Flux-Technology for Pb-Free SN100C Solders. In: BALVER ZINN [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: https://www.balverzinn.com/374.html?file=tl_files/balverzinn/downloads/dokumente/en/Performing%20Flux-Technology%20for%20Pb-free%20SN100C%20Solders.pdf.
- [3] SZENDIUCH, Ivan. Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-3292-6.
- [4] Selecting Fluxes for Lead-Free Wave Soldering. In: SHEA: ENGINEERING SERVICES [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.sheaengineering.com/media/pdfs/lf-flux-selection-presentation-final.pdf>
- [5] MANUFACTURING CONSIDERATIONS WHEN IMPLEMENTING VOC-FREE FLUX TECHNOLOGY. In: Kester [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: https://www.kester.com/Portals/0/Documents/Knowledge%20Base/VOC-Free_Wave_Soldering.pdf
- [6] HUMPSTON, Giles. a David M. JACOBSON. Principles of soldering [online]. Materials Park, Ohio: ASM International, c2004 [cit. 2017-12-13]. ISBN 0-87170-792-6. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=cQ6khQScBF4C&pg=PA116&dq=solder+flux+rosin&hl=cs#v=onepage&q&f=true>
- [7] DPS Elektronika od A do Z: ElektroMigrace v elektronice – Terminologie [online]. ©2018 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:42463/elektromigrace-v-elektronice-terminologie>
- [8] SÍTKO, Vladimír. Jak čisté je čisté (a jak čistého dosáhnout). DPS Elektronika od A do Z [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:10035/jak-ciste-je-ciste-a-jak-cisteho-dosahnout->
- [9] Corrosion handbook. In: HILTI [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: https://www.hilti.pt/medias/sys_master/h34/h30/9157274632222/Hilti_Corrosion-Handbook_EN.pdf
- [10] Corrosion: Introduction – Definitions and Types. In: NPTEL [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://nptel.ac.in/courses/113108051/module1/lecture1.pdf>
- [11] Differences Between: Chemical Corrosion Vs Electrochemical Corrosion [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://differenco.blogspot.cz/2017/01/chemical-corrosion-vs-electrochemical.html>

- [12] Druhy koroze kovů. In: Katedra materiálu [online]. ©2010 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KPU/koroze%20druhy%20vscht.PDF
- [13] Koroze. In: SlidePlayer [online]. ©2018 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/11195820/>
- [14] MÁCA, Josef. Koroze [online]. [cit. 2017-12-13].
- [15] Electrochemical migration of Sn and Sn solder alloys: a review. ResearchGate [online]. ©2008-2017 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317243726_Electrochemical_migration_of_Sn_and_Sn_solder_alloys_A_review
- [16] BUMILLER, Elissa a Craig HILLMAN. White Paper: Due to Metallic Migration Mechanisms. In: DfR Solutions [online]. ©2017 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: http://www.dfrsolutions.com/hubfs/DfR_Solutions_Website/Resources-Archived/White-Papers/Reliability/Review-of-Models-for-Time-to-Failure-Due-to-Metallic-Migration-Mechanisms.pdf
- [17] Metallic Electromigration Phenomena. In: TE Connectivity [online]. ©2017 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.te.com/documentation/whitepapers/pdf/p313-89.pdf>
- [18] Tin whiskers on printed circuit boards. IFA: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.dguv.de/ifa/praxishilfen/practical-solutions-machine-safety/zinnwhisker-auf-leiterplatten/index.jsp>
- [19] Emerdax corporation: Electronic / Material [online]. ©2017 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.emerdax.com/cht/electornic/products_ccl/e_ccl_caf_index.htm#00
- [20] How to Avoid Conductive Anodic Filaments (CAF). In: NPL [online]. 22.1.2013 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.npl.co.uk/upload/pdf/20130122_caf_avoid_failure.pdf
- [21] The effect of epoxy/glass interfaces on CAF failures in printed circuit boards. In: ScienceDirect [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271417305036>
- [22] Conductive Anodic Filament Failure: A Materials Perspective. In: Cite Seer X [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.515.1379&rep=rep1&type=pdf>

- [23] ABEL, Martin. SMT Technologie povrchové montáže. Pardubice: Platan, 2000. ISBN 80-902-7331-9.
- [24] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2392-3.
- [25] Recommended Wave Soldering Profile. In: NXP [online]. ©2006-2017 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: https://www.nxp.com/docs/en/supporting-information/Wave_Soldering_Profile.pdf
- [26] STARÝ, Jiří a Petr DVOŘÁK. MMOT: Laboratorní cvičení. Verze 1.1.
- [27] STARÝ, Jiří. PLOŠNÉ SPOJE A POVRCHOVÁ MONTÁŽ [online]. [cit. 2017-12-13].
- [28] Technický list tavidla ECOFREC 202. In: INVENTEC [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.inventec.dehon.com/documents/pdf/131c4876687b38075cffc0bc477d3892.pdf>
- [29] Technický list tavidla ECOFREC 205. In: INVENTEC: PERFORMANCE CHEMICALS [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.inventecusa.com/assets/ecofrec-205.pdf>
- [30] Technický list tavidla X33S-07i. In: OEM ELECTRONICS [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://media.oem.se/Archive/FilesArchive/106752.PDF>
- [31] Henkel Tavidla na bázi alkoholu. OEM AUTOMATIC [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: http://www.oemautomatic.cz/Products/Electronics/Materialy/Tavidla/Henkel_Tavidla_na_bazi_alkoholu/2156124-2158231.html
- [32] Technický list tavidla FX16. In: AIM: Global Solder Solutions [online]. ©2017 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/fx16_liquid_flux_tds.pdf
- [33] Cobar wave soldering flux 390-RX-HT. BALVER ZINN [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.balverzinn.com/flux-390-rx-ht.html>
- [34] Cobar 390-RX-HT. Pbt: technologická zařízení a materiály pro elektrotechniku [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.pbt.cz/detail/cobar-390-rx-ht/124/?path=produkty/dodavatel/balver-zinn-cobar/4/>
- [35] Technický list tavidla NC265LR. In: AIM: Global Solder Solutions [online]. ©2017 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/nc265lr_liquid_flux_tds.pdf

- [36] IPC-TM-650: TEST METHODS MANUAL, Liquid Flux Activity, Wetting Balance Method. In: IPC: Association Connecting Electronics Industries [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2.4.14.2A.pdf>
- [37] IPC-TM-650: TEST METHODS MANUAL, Surface Insulation Resistance. In: IPC [online]. ©2017 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2.6.3.3b.pdf>
- [38] IPC-TM-650: TEST METHODS MANUAL, Surface Insulation Resistance. In: IPC [online]. ©2017 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2-6-3-7.pdf>
- [39] IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL: Flux Induced Corrosion (Copper Mirror Method). IPC: Association Connecting Electronics Industries [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2.3.32D.pdf>
- [40] IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL: Detection and Measurement of Ionizable Surface Contaminants by Resistivity of Solvent Extract (ROSE). IPC: Association Connecting Electronics Industries [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://www.ipc.org/TM/2-3_2-3-25d.pdf
- [41] SuperSWASH. PBT Rožnov p.R., s.r.o. [online]. ©2017 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/produkty/myti-a-lakovani/myci-zarizeni/super-swash>
- [42] Norma IPC-A-610: Acceptability of Electronic Assemblies. Revision F. 2014. ISBN #978-1-61193-154-9.

Seznam tabulek

TAB. 1-1 KLASIFIKACE TAVIDEL DLE NORMY J-STD-004 [4].....	10
TAB. 2-1 DOPORUČENÉ HODNOTY PRO PÁJENÍ VLNOU [25].....	23
TAB. 3-1 SPECIFIKACE TAVIDEL DLE TECHNICKÝCH LISTŮ.....	25
TAB. 5-1 ODEČTENÉ HODNOTY ZE SMÁČECÍCH KŘIVEK A VYPOČÍTANÉ HODNOTY	35
TAB. 5-2 NAMĚŘENÉ HODNOTY SIR.....	37
TAB. 5-3 PRŮMĚRY ROZTEČENÝCH KAPEK TAVIDEL.....	40
TAB. 5-4 HODNOCENÍ AGRESIVITY TESTOVANÝCH TAVIDEL PO 6 HODINÁCH V KLIMATICKÉ KOMOŘE	40
TAB. 5-5 HODNOCENÍ AGRESIVITY TESTOVANÝCH TAVIDEL PO 24 HODINÁCH V KLIMATICKÉ KOMOŘE	41
TAB. 6-1 TESTOVACÍ DPS.....	45
TAB. 6-2 PROGRAM MYČKY SUPER SWASH	45
TAB. 6-3 TEPLOTNÍ PROFIL PŘI PÁJENÍ VLNOU	47
TAB. 6-4 NAMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY PŘI KALIBRACI	49
TAB. 6-5 POROVNÁNÍ HODNOT KONCENTRACE NaCl V TESTOVACÍM ROZTOKU V ČASE T = 20 MIN.....	51
TAB. 6-6 BODOVÉ OHODNOCENÍ TESTOVANÝCH TAVIDEL.....	62

Seznam obrázků

OBR. 1-1 ROZDĚLENÍ TAVIDEL PRO PÁJENÍ VLNOU [4]	11
OBR. 1-2 HLAVNÍ CHARAKTERISTIKA CHEMICKÉ KOROZE [11]	13
OBR. 1-3 HLAVNÍ CHARAKTERISTIKA ELEKTROCHEMICKÉ KOROZE [11]	14
OBR. 1-4 CÍNOVÉ WHISKERY POD SKENOVACÍM ELEKTRONOVÝM MIKROSKOPEM [18]	15
OBR. 1-5 PRINCIP VZNIKU DENDRITU	16
OBR. 1-6 UKÁZKA VYTVOŘENÝCH DENDRITŮ [15]	16
OBR. 1-7 CAF ROSTOUCÍ PODÉL ROZHRANÍ EPOXIDOVÉHO SKLA (HOLE TO HOLE) [19]	17
OBR. 2-1 USPOŘÁDÁNÍ JEDNOTLIVÝCH MODULŮ V PÁJECÍ VLNĚ [1]	19
OBR. 2-2 ZÁKLADNÍ DRUHY PÁJECÍCH VLN [23]	20
OBR. 2-3 DVOJITÁ VLNA [24]	21
OBR. 2-4 DUTÁ VLNA [24]	21
OBR. 2-5 DOPORUČENÝ TEPLOTNÍ PROFIL [25]	23
OBR. 2-6 SMÁČECÍ ÚHEL [27]	24
OBR. 4-1 APARATURA SMÁČECÍCH VAH [36]	28
OBR. 4-2 OBECNÁ SMÁČECÍ KŘIVKA [1]	30
OBR. 4-3 SMÁČECÍ KŘIVKY [23]	30
OBR. 5-1 PÁJECÍ SLITINA SN100C OD FIRMY BALVER ZINN	34
OBR. 5-2 VZORKY TESTOVANÝCH TAVIDEL	34
OBR. 5-3 VÝSLEDNÉ SMÁČECÍ KŘIVKY	35
OBR. 5-4 TESTOVACÍ DPS	36
OBR. 5-5 MĚŘÍCÍ PRACOVIŠTĚ	37
OBR. 5-6 DEGRADACE TESTOVANÝCH TAVIDEL A ZMĚNA SIR	38
OBR. 5-7 OČIŠTĚNÁ MIKROSKOPICKÁ SKLÍČKA	38
OBR. 5-8 MIKROSKOPICKÁ SKLÍČKA S NAPRÁŠENOU 50NM VRSTVOU MĚDI	39
OBR. 5-9 KAPKY TAVIDEL NANESENÉ NA MĚDĚNÉM SKLE	39
OBR. 5-10 MĚDĚNÁ ZRCADLA POLOŽENÁ NA SVÍTÍCÍM PODKLADU PO 6 HODINÁCH V KLIMATICKÉ KOMOŘE ..	40
OBR. 5-11 MĚDĚNÁ ZRCADLA POLOŽENÁ NA SVÍTÍCÍM PODKLADU PO 24 HODINÁCH V KLIMATICKÉ KOMOŘE	41
OBR. 6-1 VLNA SEHO POWERWAVE	43
OBR. 6-2 NEOSAZENÁ SPODNÍ STRANA DPS 1	43
OBR. 6-3 NEOSAZENÁ SPODNÍ STRANA DPS 2	44
OBR. 6-4 NEOSAZENÁ SPODNÍ STRANA DPS 3	44
OBR. 6-5 NEOSAZENÁ SPODNÍ STRANA DPS 4	44
OBR. 6-6 SUPER SWASH OD FIRMY PBT WORKS [41]	45
OBR. 6-7 TEPLOTNÍ PROFIL PŘI VYTVRZOVÁNÍ LEPIDLA	46
OBR. 6-8 PROFILOMĚR SUPERM.O.I.E. GOLD 2 OD FIRMY ELECTRONIC CONTROLS DESIGN INC. (ECD)	46
OBR. 6-9 TEPLOTNÍ PROFIL PÁJECÍ VLNY (MĚŘENO NA HORNÍ STRANĚ DPS)	48
OBR. 6-10 KALIBRAČNÍ KŘIVKA METODY ROSE	49
OBR. 6-11 GRAF ZÁVISLOSTI C_{TREQ} NA ČASE (TAVIDLO 3 – BEZ ČIŠTĚNÍ DPS)	51
OBR. 6-12 GRAF ZÁVISLOSTI C_{TREQ} NA ČASE (TAVIDLO 4 – BEZ ČIŠTĚNÍ DPS)	52
OBR. 6-13 GRAF ZÁVISLOSTI C_{TREQ} NA ČASE (TAVIDLO 6 – BEZ ČIŠTĚNÍ DPS)	52
OBR. 6-14 GRAF ZÁVISLOSTI C_{TREQ} NA ČASE (TAVIDLO 3 – PO ČIŠTĚNÍ DPS)	53
OBR. 6-15 GRAF ZÁVISLOSTI C_{TREQ} NA ČASE (TAVIDLO 4 – PO ČIŠTĚNÍ DPS)	53
OBR. 6-16 GRAF ZÁVISLOSTI C_{TREQ} NA ČASE (TAVIDLO 6 – PO ČIŠTĚNÍ DPS)	54
OBR. 6-17 NEZAPÁJENÝ SPOJ U REZISTORU VELIKOSTI 1206	54
OBR. 6-18 NEZAPÁJENÝ SPOJ U KOLÍKOVÉ LÁMACÍ LIŠTY	55
OBR. 6-19 DVA NEZAPÁJENÉ SPOJE U SOUČÁSTKY S POUZDREM SOT 23	55

OBR. 6-20 KULIČKY PÁJECÍ SLITINY.....	55
OBR. 6-21 KAPÍČKY TAVIDLA	56
OBR. 6-22 ŠPATNÝ SMÁČECÍ ÚHEL PÁJECÍ SLITINY	56
OBR. 6-23 NEDOSTATEČNÉ NAVZLÍNÁNÍ PÁJKY NA VÝVOD SOUČÁSTKY.....	56
OBR. 6-24 NEZAPÁJENÝ SPOJ U DIODY	57
OBR. 6-25 ZKRATY VÝVODŮ POUZDRA SOIC 16.....	57
OBR. 6-26 VZHLED PÁJENÝCH SPOJŮ U SMD SOUČÁSTEK, A) TAVIDLO 3, B) TAVIDLO 4, C) TAVIDLO 6	58
OBR. 6-27 VZHLED PÁJENÝCH SPOJŮ U THT SOUČÁSTEK, A) TAVIDLO 3, B) TAVIDLO 4, C) TAVIDLO 6	58
OBR. 6-28 VZHLED PÁJECÍ SLITINY, A) TAVIDLO 3, B) TAVIDLO 4, C) TAVIDLO 6	58
OBR. 6-29 KAPKY TAVIDLA MEZI PÁJECÍMI PLOŠKAMI (TAVIDLO 3).....	59
OBR. 6-30 ZAPÁJENÁ DPS 1.....	59
OBR. 6-31 ZAPÁJENÁ HORNÍ STRANA DPS 2	60
OBR. 6-32 ZAPÁJENÁ SPODNÍ STRANA DPS 2	60
OBR. 6-33 ZAPÁJENÁ HORNÍ STRANA DPS 3	61
OBR. 6-34 ZAPÁJENÁ HORNÍ STRANA DPS 4	62

Seznam symbolů a zkratek

Symbol/Zkratka	Název	Jednotka
<i>SIR</i>	povrchový izolační odpor	-
<i>RO</i>	přírodní pryskyřice	-
<i>RE</i>	syntetická pryskyřice	-
<i>OR</i>	organická kyselina	-
<i>IN</i>	anorganická kyselina	-
<i>DPS</i>	deska s plošnými spoji	-
<i>VOC</i>	těkavá organická látka	-
<i>CAF</i>	vodivá anodická vlákna	-
<i>ECM</i>	elektrochemická migrace	-
<i>SMT</i>	povrchová montáž	-
<i>SMD</i>	součástky pro povrchovou montáž	-
<i>THT</i>	vývodové součástky	-
<i>HAL</i>	Hot Air Levelling	-
<i>OSP</i>	Organic Solder Preservatives	-
<i>ENIG</i>	Electroless Nickel Immersion Gold	-
<i>T_P</i>	maximální teplota pájecí vlny	°C
<i>T_S</i>	maximální teplota předehřevu	°C
<i>t_P</i>	prodleva mezi vrcholovými teplotami	s
<i>F</i>	rovnovážná smáčecí síla	N
<i>F_W</i>	smáčecí síla	N
<i>F_{VZT}</i>	vztlaková síla	N
<i>F_{MAX}</i>	maximální smáčecí síla	N
<i>γ</i>	povrchové napětí roztavené pájky pod tavidlem	N·m ⁻¹
<i>p</i>	obvod vzorku	m
<i>θ</i>	smáčecí úhel	°
<i>g</i>	gravitační zrychlení	m·s ⁻²
<i>V</i>	objem ponořené části vzorku	m ³
<i>ρ</i>	hustota pájky	kg·m ⁻³
<i>IPA</i>	izopropylalkohol	-

Symbol/Zkratka	Název	Jednotka
<i>ICT</i>	vnitroobvodový test	-
<i>QCM</i>	kmitající křemenný krystal	-
<i>C_{TR}</i>	koncentrace NaCl v testovacím roztoku	<i>kg·l⁻¹</i>
<i>C_{KR}</i>	koncentrace NaCl v kalibračním roztoku	<i>kg·l⁻¹</i>
<i>V_{KR}</i>	celkový objem kalibračního roztoku	<i>l</i>
<i>V_{TR}</i>	objem testovacího roztoku bez kalibračního roztoku	<i>l</i>
<i>r</i>	poloměr	<i>m</i>
<i>d</i>	průměr	<i>m</i>
<i>γ</i>	měrná vodivost	<i>S·m⁻¹</i>
<i>S</i>	plocha neosazené DPS	<i>m²</i>
<i>S_O</i>	plocha osazené DPS	<i>m²</i>
<i>S_{SESTAVA}</i>	celková plocha sestavy DPS	<i>m²</i>
<i>C_{TREq}</i>	ekvivalent NaCl na jednotku plochy vzorku	<i>g NaCl Eq.·cm⁻²</i>
<i>SOIC</i>	integrovaný obvod v pouzdru pro povrchovou montáž	-
<i>SOT</i>	pouzdro pro tranzistory pro povrchovou montáž	-