

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studie růstu dendritů na deskách plošných spojů
Study of dendritic growth on printed circuit board

Autor práce: Jan Kulhavý
Vedoucí práce: Ing. Karel Dušek, Ph.D.
Studijní obor: Elektronika, energetika a management – Aplikovaná elektrotechnika
Akademický rok: 2016/2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kulhavý** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **434959**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Studie růstu dendritů na deskách plošných spojů

Název bakalářské práce anglicky:

Study of dendritic growth on printed circuit board

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s chybami, které se mohou na desce plošného spoje vyskytnout. Pozornost věnujte růstu dendritů.
- 2) Připravte si vzorky pro růst dendritů s rozdílnými povrchovými úpravami pájecích plošek.
- 3) Pokuste se na vzorcích růstu dendritů docílit.
- 4) Výsledky experimentů vyhodnotte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005, ISBN 80-903597-0-1
[2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
[3] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Karel Dušek Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Jan Kulhavý

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za jeho pomoc a rady, za vedení mé práce a za inspiraci po dobu studia.

Také bych rád poděkoval mé rodině a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia a vkládali do mě plnou důvěru.

Anotace:

Cílem této bakalářské práce je seznámit čtenáře s chybami, které se mohou vyskytnout na desce plošného spoje.

Teoretická část pojednává o teorii pájení, vysvětluje základní vlastnosti pájeného spoje, různé technologie pájení a popisuje chyby, které se na DPS mohou objevit. Druhá část pak řeší elektrochemickou migraci a růst dendritů.

Praktická část je zaměřena na zkoumání různých vlivů, především typu použité povrchové úpravy a existenci tavidla na desce plošných spojů, na růst dendritů.

Klíčová slova:

Růst dendritů, elektrochemická migrace, pájení, DPS (deska plošného spoje)

Abstract:

A goal of this bachelor thesis is to introduce the reader defects that can appear on printed circuit board.

The theoretical part deals with soldering theory, it explains basic attributes of soldered joint, different soldering technologies and it describes defects that can appear on PCB. Second part solves electrochemic migration and dendritic growth.

The practical part is focused on examination of various factors, the type of surface finishes and existence of flux on dendritic growth on printed circuit board.

Key words:

Dendritic growth, electrochemical migration, soldering, PCB (printed circuit board)

Obsah

Obsah.....	6
1. Úvod.....	9
2. Pájení.....	10
2.1 Základní pojmy u pájených spojů.....	10
2.1.1 Přetavení	10
2.1.2 Difuze.....	10
2.1.3 Smáčivost.....	11
2.1.4 Vrstva intermetalické sloučeniny.....	12
2.2 Kvalita pájených spojů	12
2.2.1 Faktory ovlivňující kvalitu spoje	12
2.2.2 Chyby a vady vstupních veličin.....	13
2.2.3 Chyby a vady vzniklé při pájení spojů.....	15
2.3 Technologie pájení	20
2.3.1 Pájení vlnou	20
2.3.2 Pájení ponorem	21
2.3.3 Pájení vlečením.....	21
2.3.4 Ruční pájení	22
2.3.5 Pájení přetavením.....	22
2.4 Typy povrchových úprav.....	24
2.4.1 HAL	25
2.4.2 ENIG	25
2.4.3 OSP	25
2.4.4 Imerzní Sn.....	26
2.4.5 Imerzní Ni/Au	26
2.4.6 Ponor do Ag	26
2.5 Tavidla	27

2.5.1 Typy tavidel.....	27
2.5.2 Funkce tavidla	28
2.5.3 Aktivátory.....	28
2.5.4 Rozpouštědla	28
2.5.5 Aditiva	28
2.6 Nepájivá maska	29
2.6.1 Snímatelná nepájivá maska	29
2.6.2 Permanentní nepájivá maska	29
3. Elektromigrace a dendrity.....	30
3.1 Elektromigrace	30
3.1.1 Suchá elektromigrace	30
3.1.2 Iontová elektromigrace	30
3.2 Faktory ovlivňující elektrochemickou migraci	32
3.3 Dendrity.....	34
4. Příprava experimentální části.....	36
4.1 Použité přístroje	36
4.2 Použitá pájecí pasta	38
4.3 Postup přípravy experimentální části	38
4.4 Celkový počet zkoumaných vzorků	42
5. Experimentální část.....	43
5.1 Naměřené výsledky	43
5.2 Vliv masky	51
5.3 Vliv vzdálenosti elektrod	52
5.4 Vliv tavidlových zbytků.....	52
5.5 Vliv povrchové úpravy.....	53
5.6 Výsledky z elektronového mikroskopu.....	53
6. Závěr	56

7. Zdroje	58
Seznam obrázků	62
Seznam použitých zkratek.....	64
Přílohy	65

1. Úvod

V dnešní době není v elektrotechnickém průmyslu obor, ve kterém by se nevyužívalo pájení. Tento technologický proces, při kterém se za vysoké teploty spojují kovové materiály, prošel poslední dobou mnoha změnami. Rozšířila se možnost samotných technologií pájení, množství typů tavidel, povrchových úprav pájecích ploch i celých desek plošného spoje. V poslední době prošla velkou reformou i volba samotného materiálu pájek. Spousta dříve běžných materiálů k pájení v sobě obsahovalo množství látek, které měly negativní vliv na životní prostředí a lidské zdraví. Se změnou materiálů ale přišla otázka, jak a čím nahradit stávající materiály, aby nedošlo ke zhoršení kvality spojů.

Kvalita spojů je při pájení tím nejzásadnějším ukazatelem. Pájený spoj je v provozu namáhán mechanicky i elektricky a velký vliv má i prostředí, ve kterém je spoj provozován, ať už se jedná o teplotu, vlhkost nebo velikost napětí. Nové materiály a technologie tedy musí být dostatečně kvalitní na to, aby se nezvýšila produkce chyb a nesnížila kvalita spojů.

Již delší dobu je velkým trendem miniaturizace. To se na deskách plošných spojů projeví vyšší hustotou součástek a menšími vzdálenostmi mezi vodiči. To sebou přináší další problémy, spojené především s elektrochemickou migrací a následným růstem dendritů, který může způsobit až zkrat celého systému. Ve své práci se budu věnovat právě těmto chybám.

V teoretickém úvodu se budu nejprve obecně zabývat pájením, popíšu základní technologie, podmínky působící na kvalitu spojů a nejčastější chyby vzniklé při pájení. Následně zpracuji teorii o elektrochemické migraci a růstu dendritů.

V praktické části si připravím desky plošných spojů s různými povrchovými úpravami pájecích ploch – jedná se o čistou měď, ENIG, HAL a OSP a popíšu, jak se použité úpravy projeví na elektrochemické migraci a případném růstu dendritů.

2. Pájení

Tato kapitola se zabývá samotným pájením. Popíšu zde nejčastější metody pájení, vlastnosti a nejčastější chyby, které mohou při pájení nastat.

Pájení je jednou z nejstarších možností spojování dvou kovů. Během doby došlo k mnoha rozšířením a úpravám možností pájení. Jednou z významných změn je dnešní převaha strojního pájení, které je přesnější a rychlejší nežli ruční pájení. Další z významných změn je pak nahrazování olovnatých pájek z důvodu silné toxicity olova. [1] [7]

Rozlišujeme dva druhy pájení – pájení měkké a tvrdé. Tvrdé pájení se vyznačuje teplotou přetavení vyšší než 400°C a používá se především ke spojování mechanických částí, jako jsou např. masivní doteky na kontaktní pružiny, přístrojové skříně, apod. Měkké pájení se naopak definuje teplotou přetavení do 450°C a je naprosto převažujícím způsobem při montáži elektronických zařízení. [1] [7]

2.1 Základní pojmy u pájených spojů

V následující kapitole stručně shrnu základní vlastnosti pájených spojů.

2.1.1 Přetavení

Přetavení je proces, který můžeme rozdělit na několik etap. Nejprve dodáme určité množství tepelné energie, která se projeví rozpadem krystalické mřížky a následně celé struktury a dochází tak k roztavení materiálu. Dochází ke smáčení a vznikají intermetalické sloučeniny. Následuje etapa, kdy se vyrovnává teplota s okolním prostředím a spoj začíná chladnout. Tím se spustí proces tuhnutí, který se vyznačuje obnovou struktury a opětovnou krystalizací mřížky materiálu. Výsledná kvalita pájeného spoje je velmi ovlivněna správným způsobem tuhnutí. [7]

2.1.2 Difuze

Difuze je proces, při kterém se atomy materiálu náhodně pohybují v prostoru, kde se nakonec ustálí tak, aby vyrovnaly svou koncentraci.

U kovů jsou elektrony nejprve vázány v krystalové mřížce, ale s rostoucí teplotou získávají větší kinetickou energii, což vede k jejich samovolnému pohybu po náhodných drahách po celém prostoru. Tento jev má využití právě při pájení. Po zkapalnění pájky se její atomy dostanou i do pájeného povrchu, souběžně s tím

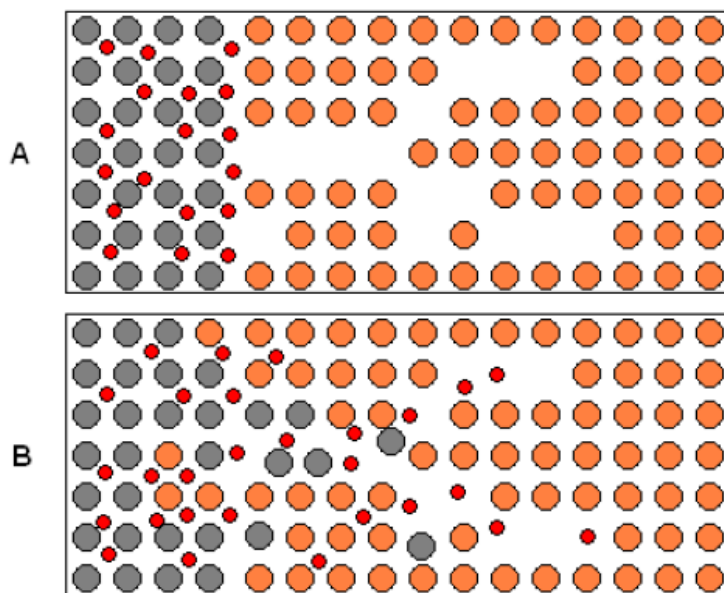
atomy pájeného povrchu proniknou do pájky. Vzhledem k rozdílným velikostem různých druhů atomů mohou některé menší atomy proniknout i do větší hloubky pájených povrchů. [7]

Velikost difuze můžeme poznat pomocí difúzního koeficientu. Ten vyjadřuje počet molů látky, které za jednu sekundu projdou průřezem o velikosti 1 m^2 při koncentračním gradientu 1 mol/m . Vztah pro difúzní koeficient v závislosti na teplotě vypadá takto:

$$D(J) = D_0 \cdot e^{\frac{Q}{R \cdot T}}, \quad (1)$$

kde	D(J)	difúzní koeficient jako funkce teploty
	D_0	difúzní koeficient konkrétního materiálu
	R	univerzální plynová konstanta [J/mol.K]
	T	teplota [K]
	Q	aktivační energie [J/mol]

[9] [10]



Obr. 1 Vliv teploty na difúzi. A) Pájka při pokojové teplotě B) Pájka při teplotě vyšší než bod tavení [9]

2.1.3 Smáčivost

Smáčivost je vlastnost pájeného povrchu, která má velký vliv na výslednou kvalitu spoje. Pokud máme povrch s dobrou smáčivostí, pak se pájka rozteče na tenkou, souvislou vrstvu materiálu. Naopak, pokud povrch nemá dobrou smáčivost, pájka se

kvalitně nerozteče a zůstane vypouklá. Podle velikosti smáčecího úhlu, který je reprezentován úhlem mezi vodorovnou osou a pomyslnou tečnou hrany kapky pájky, pak můžeme rozlišit kvalitu smáčivosti pájených povrchů. Pro zlepšení smáčivosti se při pájení používají tavidla. [7]

2.1.4 Vrstva intermetalické sloučeniny

Při pájení dochází k tání kovu na povrchu desky plošného spoje, který pak reaguje s pájkou. Výsledkem této reakce je intermetalická sloučenina. Ta narůstá do nepravidelného tvaru po celé ploše pájecí plošky. Vznik intermetalické sloučeniny je podmíněn difúzí, která probíhá velmi rychle na začátku procesu, kdy se pájka začíná tavit, a postupně se zpomaluje. [21]

Vytvoření intermetalické sloučeniny je podmínkou dobrého smáčení a kvalitního spoje, problém nastává až při nadměrném růstu této vrstvy. Ten má za následek snížení odolnosti spoje proti degradaci, zvýšení křehkosti a zvýšení rezistivity přechodu. [21]

Aby se zabránilo nadměrnému růstu intermetalické vrstvy, nanáší se někdy na povrch mědi (či zlata) vrstva difúzní bariéry, většinou tvořené niklem. Nikl reaguje s cínem obsaženým v pájce za vzniku sloučeniny Ni_3Sn_4 , která roste o mnoho pomaleji, než intermetalická vrstva Cu_6Sn_5 . [21]

2.2 Kvalita pájených spojů

Pájený spoj je během provozu namáhán tepelně, mechanicky i elektricky. Z toho důvodu je požadována jeho vysoká spolehlivost. Na tu má vliv velké množství faktorů, např. použité materiály, vybraný proces pájení, druh použitého tavidla a samozřejmě i podmínky, ve kterých je spoj provozován.

2.2.1 Faktory ovlivňující kvalitu spoje

Faktorů ovlivňujících výslednou kvalitu spoje je mnoho, zde uvedu pouze ty nejdůležitější.

Pájka a její složení

Složení pájky, popř. pájecí pasty, určuje teplotu tání a tuhnutí, smáčivost pájky a její viskozitu. Různé složení pájky se může projevit i různým množstvím nečistot a oxidů, či povrchovým napětím. Z těchto důvodů je správný výběr pájky podle potřeby aplikace jedním z nejdůležitějších faktorů. [7]

Použití tavidla

Tavidlo se používá především pro očištění povrchu od oxidů a nečistot a pro zlepšení smáčivosti povrchu. Je součástí pájecích past, při selektivním pájení může být obsaženo v pájce, pokud je pájka dodána ve formě dutých trubiček. Při pájení v tekuté pájce je tavidlo součástí pájky v kontejneru – při pájení vlnou se ovšem tavidlo musí nanést již před ponořením do roztavené pájecí slitiny. Nevýhodou použití tavidla je potřeba delšího času pro pájení spojů. [7]

Průběh pájení

Špatně zvolená technologie pájení, teplota a teplotní profil může mít za následek nekvalitně provedený pájený spoj či vznik chyb, jako např. tombstoning (efekt náhrobního kamene), rozstříkávání tavidla či pájecí pasty apod. [7]

2.2.2 Chyby a vady vstupních veličin

Zde popíšu chyby, které sice nesouvisí přímo s pájecím procesem, nicméně ovlivňují výslednou kvalitu spoje. Jedná se o chyby vzniklé při výrobě DPS, při jejich transportu a při dalších manipulacích s nimi.

Nečistoty na DPS

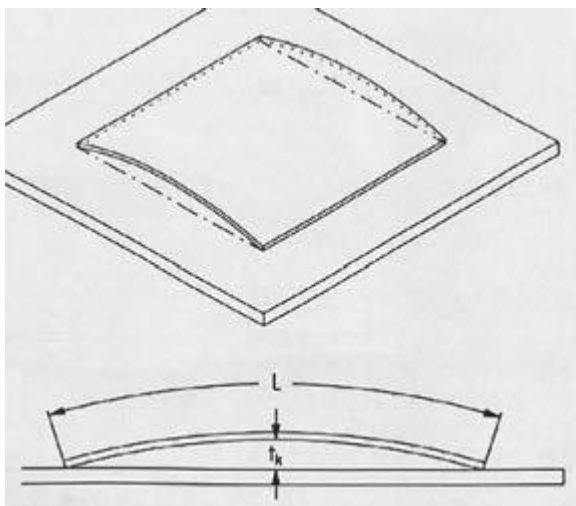
Při nesprávné manipulaci či při nevhodném skladování se různé nečistoty mohou usadit na desce plošných spojů a tím způsobit problémy při pájení. Nečistoty na desce totiž snižují smáčivost pájky a také podporují růst dendritů. [11]

Prohnutí a zkroucení DPS

Kvůli rozdílné teplotní roztažnosti materiálů, ze kterých je deska plošných spojů tvořena, dochází k prohnutí či ke zkroucení desky. U vícevrstvých desek je tato náchylnost vyšší než u jednovrstvých desek. Prohnutí je charakterizováno ohybem celé desky do tzv. luku, zkroucení je dáno ohybem pouze části desky. [11] [22]

Míra prohnutí je procentuální vyjádření podílu hodnoty prohnutí k délce hrany:

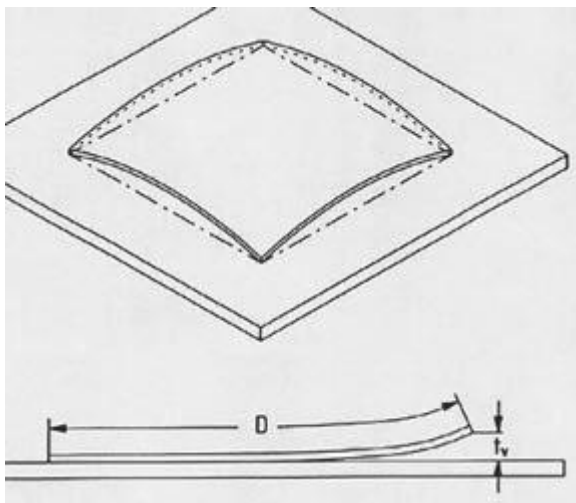
$$B = (t_k/L) * 100 \quad (2)$$



Obr. 2 Prohnutí a měření DPS [22]

Míra zkroucení je procentuální vyjádření podílu výšky rohu nad společnou rovinou tří zbývajících rohů k úhlopříčce desky:

$$T = (t_v/D) * 100 \quad (3)$$

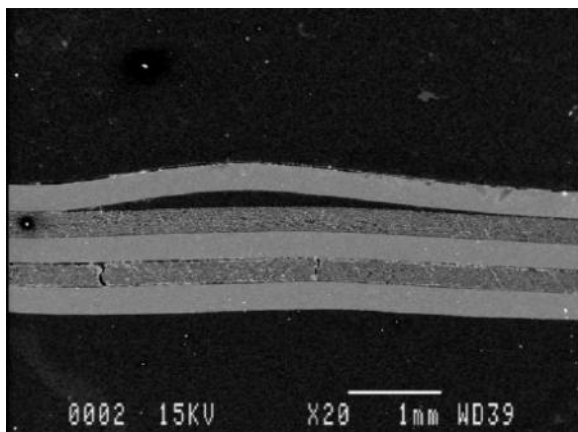


Obr. 3 Zkroucení a měření zkroucení DPS [22]

Maximální povolené prohnutí/zkroucení je 1,5%, pro desky pro SMD je maximum 0,75%. [22]

Delaminace

Delaminace znamená, že mezi jednotlivými vrstvami DPS vznikne dutina obsahující vlhkost, což při vysokém teplotním zatížení desky může vést až k oddělení jednotlivých vrstev. [23]



Obr. 4 Delaminace DPS [24]

Vady na vodičích

Vinou nekvalitního základního materiálu nebo velmi agresivní úpravy povrchu mědi může dojít k různým chybám na samotných vodičích na desce, například k tzv. vykousnutí nebo až k přerušení vodiče. Tato chyba se dá opravit tzv. přeplátováním tenkým měděným proužkem. [24]



Obr. 5 Vada na vodiči (vykousnutí) [24]

2.2.3 Chyby a vady vzniklé při pájení spojů

Při tvoření pájených spojů může vzniknout mnoho chyb, a proto by se celý proces měl pečlivě monitorovat. Zde uvedu nejčastější chyby, které mohou vzniknout při samotném pájení.

Můstek

Můstek je velmi častá chyba, která je zapříčiněná špatným nanášením pasty. Použijeme-li špatně navrženou šablonu či nevhodný tlak na těrku, může se stát, že pasta propojí dvě pájecí plošky, neboli pady, což v podstatě vytvoří zkrat. Někdy je možné

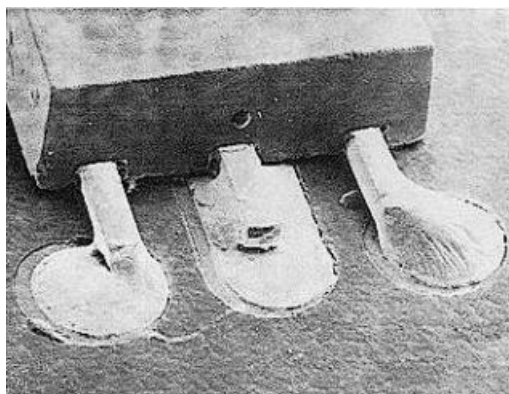
tuto chybu zaregistrovat pouhým okem, ale pokud máme DPS o velkých plochách nebo s malými mezerami mezi pájecími ploškami, je dobré použít vhodnou optickou kontrolu, např. SPI (Solder Paste Inspection) ihned po nanesení pájecí pasty nebo automatickou optickou kontrolu po zapájení. [7] [11]



Obr. 6 Místek [12]

Chybějící spoj

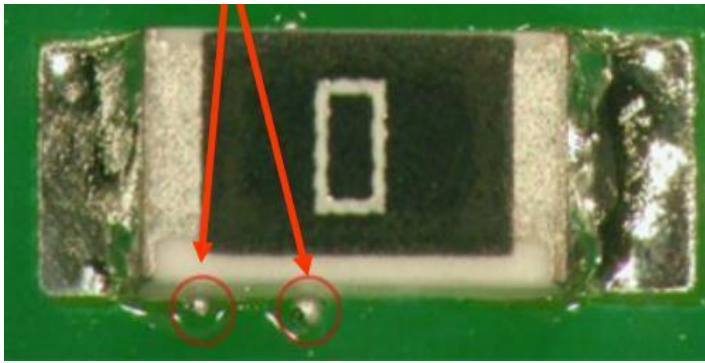
Chybějící spoj je opakem místku. Jedná se o chybu, kdy spoj zůstane otevřený, či nekvalitně spojený a součástka nedosedá správně na pad. Tato chyba může být zapříčiněna mnoha faktory, jako jsou nevhodně zvolené tavidlo, nedostatečná smáčivost, špatné vysušení nebo částečně ucpaná šablona. [7] [11]



Obr. 7 Chybějící spoj [13]

Kulička pájky vedle součástky

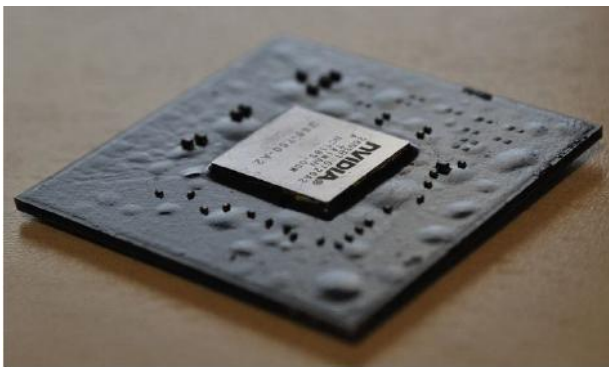
Kulička pájky vedle součástky se vytvoří, pokud pastu dáme mimo pájecí plošku nebo mimo vývod součástky a přetavíme ji. Většinou je tato chyba způsobena nadměrným množstvím užití pájecí pasty, která je součástkou vytlačena vedle jejího pouzdra. [7] [11]



Obr. 8 Kulička pájky vedle součástky [13]

Popcorn efekt

Tato chyba se vyskytuje pouze u zapouzdřených součástek. Je-li zapouzdřená součástka skladována v nevhodných podmínkách, může absorbovat vlhkost. Tato vlhkost se pak při vyšších teplotách při přetavování rozpíná a na pouzdru poté vznikají vyvýšeniny a boule. [7] [11]



Obr. 9 Popcorn efekt [7]

Tombstoning

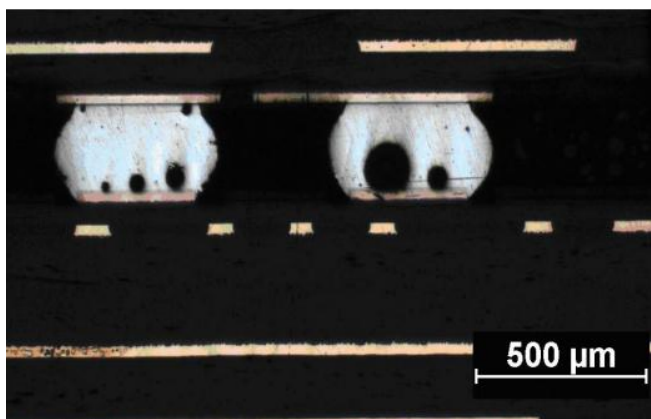
Jedná se o chybu, kdy se součástka postaví na jednu hranu, je připájená pouze na jedné straně – proto se tato chyba někdy nazývá efekt náhrobního kamene. Tento jev je způsoben rozdílným povrchovým napětím na padech, kde je součástka připájena. To může být způsobeno nerovnoměrně nanesenou pájecí pastou, nepřesným osazením součástky, rozdílnými rozměry padů nebo jejich rozdílnou tepelnou kapacitou. [7] [11]



Obr. 10 Tombstoning [11]

Voidy

Voidy jsou dutinky vzniklé uvnitř nebo na povrchu pájeného spoje. Voidy zhoršují elektrické, tepelné i mechanické vlastnosti spoje. Mohou vzniknout například během odpařování plynů tavidla během přetavení nebo při příliš rychlém tuhnutí pájky. [7] [11]



Obr. 11 Voidy [13]

Whiskery

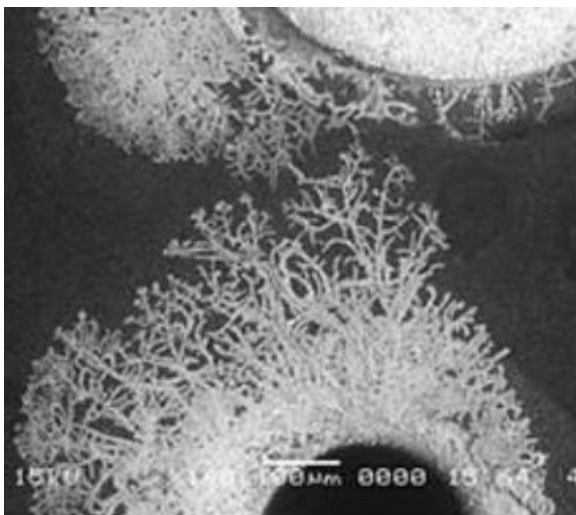
Whiskery jsou vláskové kovové výrůstky na povrchu materiálu. Tvoří se většinou u bezolovnatého pájení z důvodu vyšší koncentrace cínu v bezolovnatých slitinách. Průměr whiskerů je 3-10 μm , jeho délka je většinou v řádech jednotek milimetrů, ale může dosáhnout až jednoho centimetru. Whiskery rostou jen vzácně a pomalu, ale v krajních případech mohou způsobit zkrat. Hlavní příčinou jejich vzniku je vnější a vnitřní tlakové napětí. Vnější tlakové napětí je způsobeno mechanickým namáháním, vnitřní je ovlivněno typem povrchové úpravy padů, velikostí zrn pájky a koeficientem teplotní roztažnosti substrátu a pájky. [7] [11]



Obr. 12 Whiskery [13]

Dendrity

Dendrity jsou stromovité kovové výběžky, které propojují blízké pájecí plošky o rozdílných potenciálech. Růst dendritů je v dnešní době stále více probíraným tématem, protože se jejich výskyt zvyšuje s potřebou miniaturizace a zmenšováním prostoru mezi ploškami s elektrickým potenciálem na deskách plošných spojů. Na růst dendritu má vliv mimo jiné vlhkost, teplota, typ použité povrchové úpravy pájecích plošek a již zmíněná vzdálenost mezi vodiči. Více se tomuto tématu budu věnovat v kapitole 3.



Obr. 13 Dendrity [13]

2.3 Technologie pájení

K připájení součástek je možné použít více možných technologií, z nichž každá má své výhody a nevýhody. Nejpoužívanějšími způsoby pájení v elektrotechnickém průmyslu jsou pájení vlnou, pájení přetavením a ruční pájení. Velkou výhodou pájení vlnou a přetavením je přetavení více spojů najednou a umožnění hromadné výroby, zatímco selektivní pájení se používá při drobných opravách, například při výměně poškozených součástek.

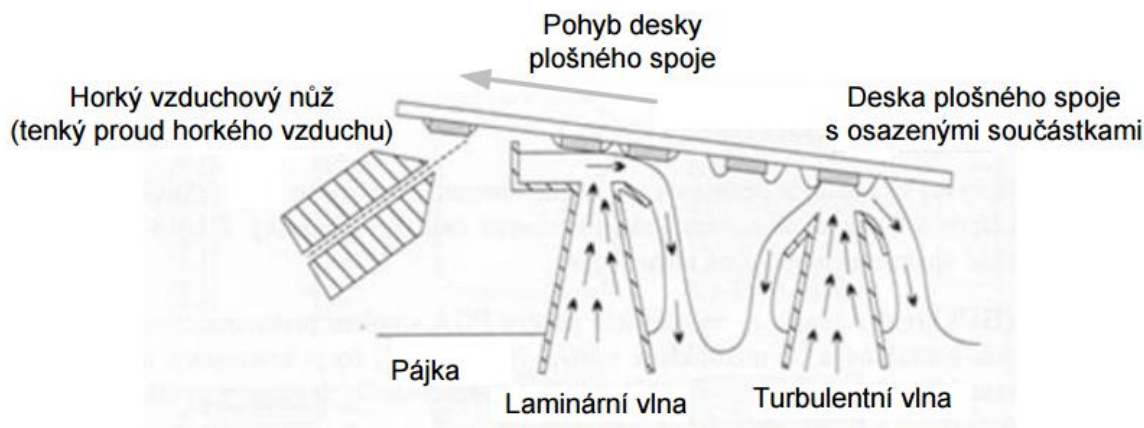
2.3.1 Pájení vlnou

Pájení vlnou je jedna z nejvíce užívaných metod při povrchové montáži. Při pájení se deska plošného spoje pronese nad kontejnerem s roztavenou pájkou. V ní jsou tvořeny vlny, které smáčí její povrch. Plochy, které jsou určeny k pájení, jsou smočeny roztavenou pájecí slitinou; ostatní plochy, kam pájku nanést nechceme, jsou opatřené ochrannou nepájivou maskou.

Před samotným procesem se musí pájené součástky k desce plošného spoje nejprve připevnit. K tomuto účelu se používá lepidel, která mají charakteristické vlastnosti. Mezi ně patří malá roztékavost a dobrá adheze k desce a součástce. Použité lepidlo také musí zajišťovat dostatečnou pevnost spoje, nesmí být toxické a elektricky vodivé a nesmí měknout s teplotou a ani chemicky ovlivňovat desku nebo součástku.

Při pájení vlnou se zpravidla používá dvou typů vln. První vlnou je vlna turbulentní, která podporuje funkci tavidla a zdokonaluje čištění povrchu desky. Druhým typem je vlna laminární, která způsobuje homogenní vytvoření spoje. Poté, co deska projde těmito vlnami, se může dostat pod tzv. horký nůž, což je proud horkého vzduchu (kolem 380°C), který odstraní zbytky přebytečné pájky.

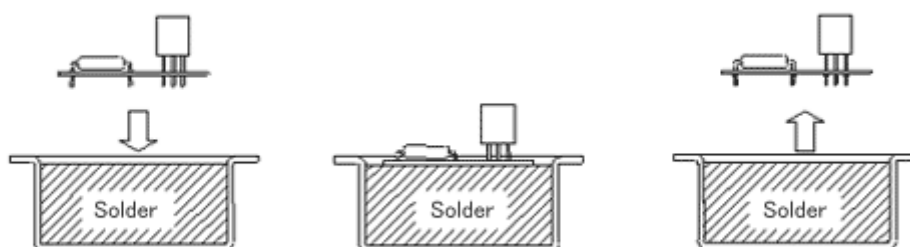
Je nutné si ale uvědomit, že teplota roztavené pájky v kontejneru dosahuje teploty až 260°C (záleží na typu pájky). Součástky, upevněné na spodní straně pájené desky se do vlny ponoří až na několik sekund, což by mohlo vést k poškození některých součástek (polovodiče, elektrolytické kondenzátory, apod.). Z toho důvodu se tak součástky, které by se mohly poškodit, připájí až dodatečně jinou technologií. [6] [26]



Obr. 14 Pájení vlnou

2.3.2 Pájení ponorem

Pájení ponorem je velmi podobné pájení vlnou. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že pájení ponorem je ruční proces a nikoliv automatizovaný a používá se jen pokud chceme připájet součástky na malé množství desek. Princip je takový, že se deska osazená součástkami ponoří na 2 až 12 sekund do lázně s roztavenou pájkou, která smočí místa nechráněná nepájivou maskou. Držák obrobku je navržen tak, aby byl jeho sklon mezi 3 až 5° a pájka tak mola volně stékat, což zajistí hladký povrch spojů. [2]



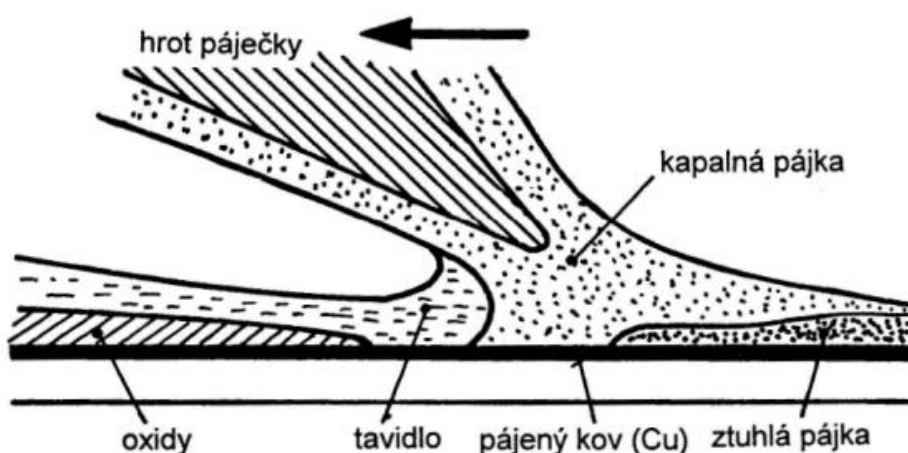
Obr. 15 Pájení ponorem [8]

2.3.3 Pájení vlečením

Pájení vlečením je posledním typem pájení tekutou pájkou. Při pájení touto technologií je deska plošných spojů upevněna do dopravníku, kterým je pak vlečena po klidné hladině pájecí slitiny. Těsně před ponorem desky do pájky setře stěrka upevněná na vozíku vrstvu oxidů z povrchu lázně – strusku. Vlna pájky má velmi pomalý tok a dopravník posouvající desku je rovnoběžně s hladinou roztavené pájky. Tento postup se, stejně jako pájení ponorem, používá spíše okrajově. [3] [5]

2.3.4 Ruční pájení

Ruční pájení je rozšířený postup pájení, používaný spíše pro drobné opravy, výměny součástek nebo dodatečné připojování součástek. Hlavními nevýhodami tohoto postupu je nemožnost pájení více spojů najednou, což zpomaluje celý proces. Tavidlo je nanášeno buď před ohřevem spoje, nebo se uvolní při samotném ohřevu z dutiny v trubičce pájky. Po nanášení tavidla ohřejeme hrot ruční páječky na požadovanou pájecí teplotu a pokryjeme ho tenkou vrstvou pájky, kterou musíme udržovat na pracovní ploše hrotu po celou dobu pájení, což zajistí dobrý přenos tepla do spoje. Spojované části musí být pomocí páječky dostatečně prohřáty, pájka se pak při dotyku taví a smáčí pájené povrchy. Na druhou stranu je nutné se vyvarovat nadměrné době zahřívání nebo nadměrné teplotě, což vede ke vzniku nekvalitního a nespolehlivého spoje a může dojít i k poškození okolních součástek. Po připájení spoje oddálíme hrot páječky a je nutné zabránit jakémukoliv pohybu pájených částí až do okamžiku ztuhnutí pájky. Pájka musí tuhnout v přirozeném prostředí, je nepřípustné, aby byl spoj ochlazován proudem vzduchu nebo kapaliny. [1]



Obr. 16 Ruční pájení [1]

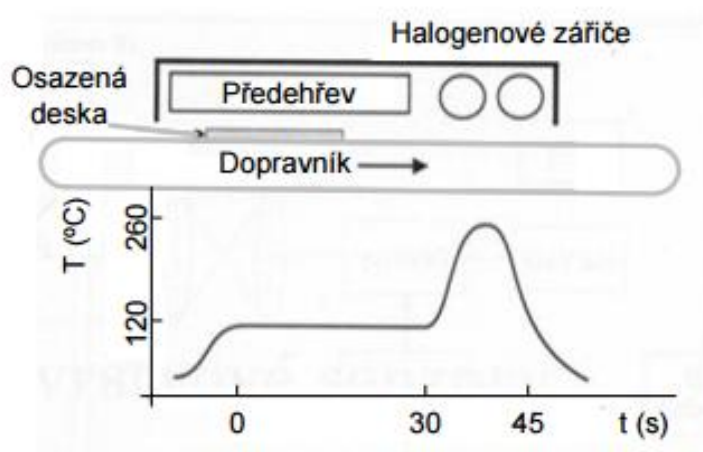
2.3.5 Pájení přetavením

Princip této metody se dá rozdělit do více etap. První etapou je nanášení pájecí pasty na místa, která mají být pájena. K tomu se nejčastěji využívá šablonového tisku, kdy přes připravenou šablonu protlačíme stěrkou přiměřené množství pájecí pasty. Také je možné použít sítotisk nebo dispenser (vytlačení přiměřeného objemu pájky dutým hrotem). Po nanášení pájecí pasty na pady se příslušná místa na desce osadí součástkami, a to buď ručně nebo osazovacím automatem. Předposlední etapa spočívá v

aktivaci tavidla, které je součástí pájecí pasty. Teplota aktivace závisí na typu tavidla, většinou se pohybuje okolo 120°C. Poslední částí je pak samotné přetavení. K tomu je možné využít různých způsobů ohřevu. [6]

Pájení ohřevem infračervenými zářiči

Ohřev se děje pomocí energie dodané infračervenými zářiči, využívá se záření o vlnové délce $\lambda=0,8 - 400 \mu\text{m}$. Část záření se od obrobků odrazí, ale část se pohltí a dojde k ohřevu. Koeficient absorpce je funkcí mnoha faktorů, jako například barvy povrchu, drsnosti, směru dopadajícího záření apod., což se projeví nerovnoměrným ohřevem povrchu. To může vést k různé kvalitě pájených spojů. [6]



Obr. 17 Pájení ohřevem IR zářiči [6]

Pájení laserem

Laserový svazek je směřován na jednotlivé pady, kde se jeho energie mění na tepelnou, což vede k ohřátí pájecí pasty, jejímu roztavení a zapájení spoje. Nevýhodou tohoto principu je rychlost. Ačkoliv přetavení jednoho spoje je časově velmi krátký proces (laserový paprsek může přepájet až 5 spojů za sekundu), pájení celých desek je neefektivní. [6]

Pájení ohřevem vedením tepla

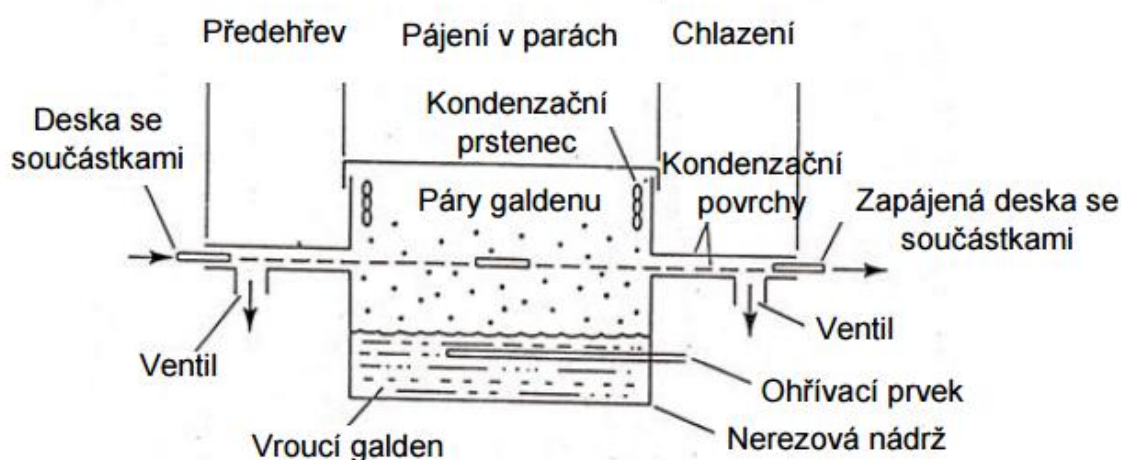
Používá se u některých typů tunelových pecí, kde jsou dílčí zóny ohřívány odporovým vinutím a sáláním a konvekcí jsou ohřívány desky plošných spojů. [6]

Pájení ohřevem horkým plynem

Spoj s nanesenou pájecí pastou je zahříván proudem horkého plynu z ohřívací hlavy. Tlak, kterým je plyn vytlačován z hlavice ven, musí být vhodně regulován, aby nedocházelo k odfukování pájených součástek. Jako plynu se nejčastěji používá vzduchu, ale pokud chceme zajistit, aby nedošlo k nežádoucí oxidaci, je možné použít i některý z inertních plynů. [6]

Pájení v parách

Pájení v parách, neboli pájení ohřevem kondenzací pár je proces, kdy je osazená deska umístěna do zařízení pro pájení v parách a nechá se na ní kondenzovat pracovní kapalina. V současné době se jako pracovní kapalina používá nejčastěji galden, tedy řada dielektrických kapalin s bodem varu od 55 do 270°C. Pracovní kapalinu přivedeme do varu, její páry kondenzují na deskách, předají energii k zapájení spojů a zkondenzované stečou zpět do výparníku, kde je znovu uvedena do varu. Hlavní výhodou této metody je rovnoměrný ohřev celé desky. [6]



Obr. 18 Pájení v parách [6]

2.4 Typy povrchových úprav

V této kapitole stručně popíšu některé typy používaných povrchových úprav. Jedná se o důležitou část teoretického rozboru, protože v praktické části budu provádět experimentální zkoušky pěstování dendritů právě v závislosti na zvoleném typu povrchové úpravy.

Povrchové úpravy se v praxi využívají pro ochranu spoje před oxidací mědi, lepší pájitelnost a k zajištění delší doby skladovatelnosti. Výsledkem použití povrchové úpravy je vysoká spolehlivost pájeného spoje. [14] [15]

Při volbě vhodné povrchové úpravy se musíme řídit různými všeobecnými požadavky. K nim patří materiálová kompatibilita (kompatibilita s nepájivou maskou, chemicko-fyzikální kompatibilita s měděným povrchem DPS), procesní kompatibilita (např. rovinnost povrchu, vhodná tloušťka vrstvy) a environmentální kompatibilita (netoxická povrchová úprava, ekologické zpracování odpadních vod a kompatibilita s environmentálními vlivy). [15]

2.4.1 HAL

HAL (hot air leveling) spočívá ve svislém ponoření desky do tekuté pájky. Dříve se používala výhradně pájka SnPb, dnes se používá například slitina SnAg. Vrstva nanesené pájky může mít tloušťku až 45 μm . Následně se přebytečná pájka odfoukne horkým nožem. Výsledný povrch je relativně rovný, ale v důsledku vlivu zemské tíže a směru působení horkého nože se může ploška zvýšit nebo vyklenout. Mezi nevýhody HALu tak patří nedostatečná rovinnost padů, teplotní šok a deformace DPS a riziko tvorby intermetalických sloučenin. Naopak mezi výhody patří výborná pájitelnost, možnost vícenásobného teplotního cyklu a minimálně 12 měsíců dlouhá skladovatelnost. [15] [21]

2.4.2 ENIG

ENIG (electroless nickel and immersion gold) je úprava, kdy se nejprve nanese chemický nikl o tloušťce 3-6 μm a následně na ní vrstva zlata o tloušťce 0,05-0,1 μm . Mezi výhody této povrchové úpravy patří vynikající odolnost proti korozi, minimálně 12 měsíců dlouhá skladovatelnost, výborná pájitelnost, možnost vícenásobného pájení a fakt, že se jedná o bezolovnatou technologii. Nevýhodou ovšem je vyšší cena a možnost výskytu chyby black pad, kdy se pájený spoj oddělí od vrstvy niklu. [15] [21]

2.4.3 OSP

OSP (organic solder preservatives) je povrchová úprava, kdy se na odhalený měděný povrch nanese organické inhibitory oxidace mědi. K tomuto účelu se používají látky na bázi benzoimidazolů. OSP se využívá především u jednostranných DPS, lze ji sice využít i na vícevrstvé desky, ale ty pak mohou projít jen dvěma procesy

pájení. Průchod pájecím procesem totiž snižuje životnost OSP. Proto je také nutné provést další pájení v co nejkratším časovém intervalu. Mezi nevýhody OSP patří krátká doba skladovatelnosti (cca 6 měsíců) a maximálně dvojnásobný teplotní cyklus. K výhodám můžeme zařadit možnost pájení za použití běžných tavidel, výbornou rovinnost povrchu, levnou metodu výroby a stejně jako u ENIGu, že se jedná o bezolovnatou povrchovou úpravu. [15]

2.4.4 Imerzní Sn

K dosažení této povrchové úpravy je třeba dvou kroků. Nejprve se provádí disperze organického kovu jako mezivrstva mezi měď a cín. Tato vrstva zabrání difúzi mědi do cínu. Druhým krokem je pak nanesení tenké, rovnoměrné vrstvy cínu o síle 0,8 μm .

Tato úprava má oproti ostatním samé výhody, jako např. minimálně 12 měsíců dlouhá doba skladovatelnosti, nižší náklady než u HALu, jedná se o bezolovnatý proces a umožňuje cínování i ohebných materiálů citlivých na tepelné zatížení. [15]

2.4.5 Imerzní Ni/Au

Imerzní Ni/Au má lepší rovinnost povrchu než HAL a proto se používá jako jeho hodnotnější náhrada. Na měď se nanese chemicky vrstva niklu o tloušťce 3-8 μm , která je sice dobře pájitelná, ale dochází k oxidaci, což pájitelnost snižuje. Pro zabránění oxidace se na vrstvu niklu nanese tenká vrstva zlata o tloušťce 0,04-0,12 μm .

Pro zabránění difúze zlata do mědi je nutné, aby se povrch mědi pokryl dostatečně silnou vrstvou kovu nebo organického povlaku. Pokud se tak nestane, vznikne intermetalická vrstva, která je nepájitelná.

Mezi výhody pak tedy patří výborná rovinnost povrchu, dobrá korozní odolnost a možnost použití v náročnějších aplikacích. Naopak k nevýhodám lze zařadit náklady a náročnost celého technologického procesu, možnost vytváření intermetalických sloučenin, difúze zlata do spoje a to, že nikl tlumí vysokofrekvenční obvody. [15]

2.4.6 Ponor do Ag

Stříbro se na povrchové úpravy začalo používat až s příchodem bezolovnatých pájek. Tato povrchová úprava skýtá spoustu výhod, mezi hlavní patří dobrá smáčivost a pájitelnost, rovnoměrná tloušťka, dále dobrou rovinnost povrchu a možnost využití i na jemné rozestupy vývodů. Problémem při užití stříbrné povrchové úpravy je fakt,

že při pájení se stříbro rozpouští a vzniká intermetalická sloučenina Ag_3Sn . Další nevýhodou jsou pak požadavky na speciální podmínky skladování kvůli oxidaci a tvorbě sirníků stříbra. Na ochranu před oxidací se někdy stříbro překryje organickou vrstvou, ta ovšem rychle stárne a DPS by se tak měly zpracovat do několika měsíců. [21]

2.5 Tavidla

Tavidlo je chemická látka, která se při pájení používá k odstranění nečistot a oxidů a ke zlepšení výsledných kvalit spoje. Je nezbytnou součástí pájecích past, kde představuje 10-15% její hmotnosti; při ručním pájení je tavidlo součástí pájky nebo se přidává zvlášť, ve formě kalafuny. [7] [21]

Součástí tavidla nesmí být žádné zdraví či životnímu prostředí nebezpečné látky; tavidlo dále musí splňovat požadavky na dostatečnou dobu skladovatelnosti, musí být chemicky stále vzhledem k teplotě pájení a tavidlové zbytky se musejí dát lehce odstranit. [21]

Jako vhodné, po ekologické stránce ideální možnost pro bezolovnaté pájky se jeví tavidla VOC-free (volatile organic compounds-free, tj. tavidla bez unikající organické složky). Neobsahují žádné nebezpečné látky, jsou méně prchavé než tavidla na bázi alkoholu a mají nulovou vznětlivost. Jako ideální aktivátor se pro ně jeví pryskyřice, která má výborné chemické a fyzikální vlastnosti. Nevýhodou je horší smáčivost oproti tavidlům na bázi alkoholu, proto se do nich přidávají aditiva podporující smáčivost. [21]

2.5.1 Typy tavidel

Tavidla se dají obecně rozdělit do tří celků – a to organická, anorganická a kalafunová tavidla.

Organická tavidla

Mají formu pasty nebo kapaliny, používají se při pájení vlnou. Tavidlové zbytky jsou snadno odstranitelné, protože se dají rozpustit pomocí rozpouštědel na bázi vody. Mají o něco lepší vlastností než kalafunová tavidla. [7] [21]

Anorganická tavidla

Existují ve formě past nebo roztoků. Příliš se nevyužívají, protože mají vysoký obsah soli a jsou tak vysoce korozivní. Jejich hlavní uplatnění spočívá v neelektrických aplikacích. [7] [21]

Kalafunová tavidla

Jsou založena na bázi přírodní pryskyřice, která je většinou rozpuštěná v rozpouštědle na alkoholové bázi. Uplatňují se u olovnatého pájení, pro které mají ideální teplotu tání okolo 170° C. Využívají se ovšem i u bezolovnatého pájení, kdy jsou přidávány aktivátory pro zvýšení účinnosti tavidla i při vyšších teplotách.

2.5.2 Funkce tavidla

Hlavním úkolem tavidla je odstranění oxidů a nečistot z povrchu pájeného kovu a zabránění jejich vzniku v průběhu pájení. Kromě toho musí tavidlo zabránit přístupu reaktivních prvků k pájenému spoji, zlepšit smáčivost a přispět k rovnoměrnému rozložení teploty po celé pájecí ploše. [21]

Tavidlo má vliv i na vlastnosti pájecí pasty, například na její viskozitu a lepivost. Při pájení navíc pomáhá dobrému roztečení pájky po pájeném povrchu. [21]

2.5.3 Aktivátory

Aktivátory jsou součástí tavidla, které slouží k odstranění oxidů z povrchu pájené plošky. Používají se různé typy aktivátorů – méně agresivní, které s oxidy reagují až při zvýšené teplotě, ale i více agresivní, které se ovšem musí důkladně umýt, protože jejich zbytky jsou vysoce korozivní. [14]

2.5.4 Rozpouštědla

Rozpouštědla mají za úkol usnadnit proces nanášení tavidla. Během předeřevu, tedy ještě před samotným pájením, se vypaří. Pokud ale nedojde k úplnému vypaření všech složek rozpouštědla, pak dochází k jejich odpařování až při procesu pájení a tím i k rozstříkávání pájky do okolí spoje. [14]

2.5.5 Aditiva

Aditiva jsou látky, které se do tavidla přidávají pro změnu jeho vlastností. Typickým aditivem jsou například tenzidy pro snížení povrchového napětí, barviva či reologické modifikátory, které upravují viskozitu pájecí pasty. [14]

2.6 Nepájivá maska

Nepájivá maska je krycí vrstva nanesená na povrch desky plošného spoje. Základní dělení nepájivé masy je na snímatelnou a permanentní. [27] [28]

2.6.1 Snímatelná nepájivá maska

Snímatelná maska působí jako přechodová krycí vrstva. Používá se především na ochranu pokovených otvorů či povrchů se speciálními povrchovými úpravami, jako je například HAL, Au nebo Ag. Po pokovení či zapájení se tato maska odstraní sloupnutím nebo vodou o definované teplotě a tlaku ostříku. Po odstranění masky následuje ruční doosazení mechanických prvků a součástek, které se dodatečně zapájí.

Na DPS se nanáší sítotiskem, eventuálně ručně. Ve většině případů má modrou barvu. [28]

2.6.2 Permanentní nepájivá maska

Ve většině případů se nanáší na DPS s měděnými vodiči. Její hlavní funkcí je ochrana odhalených měděných vodičů před vlhkostí a dalšími klimatickými vlivy, před mechanickým poškozením při opravách a manipulacích a zabraňuje tvorbě můstků a zkratů mezi pájecími ploškami DPS. Navíc umožňuje snadnější optickou kontrolu DPS. [27] [28]

Nanesená maska má tloušťku mezi 12,5 μm do 100 μm a její barva je většinou zelená. Podle typu nanesení je můžeme rozdělit na tekuté a tuhé nepájivé masky. [28]

Tekuté permanentní nepájivé masky

- a. Sítotiskové – maska se nanáší sítotiskem s motivem, je to levné řešení vhodné pro sériovou výrobu. Přesnost natisknuté masky je ovlivněna technologií tisku, protažením síta a sesazením síta z DPS.
- b. Fotocitlivé – častěji používané než sítotiskové. Motiv masky se získává naexponováním, vyvoláním a následným vytvrzením nanesené vrstvy na desce. Přesnost motivu je ovlivněna sesazením filmové matrice z DPS. [28]

Tuhé

Jsou dražší, nanáší se laminováním ve vakuovém laminátoru. [28]

3. Elektromigrace a dendrity

V této kapitole se pokusím uvést nejdůležitější poznatky o dendritech a elektromigraci, která s růstem dendritů úzce souvisí. Shrnu informace o typech elektromigrací, o faktorech, které na ní mají vliv, a v závěru kapitoly se pokusím sepsat stručnou teorii o samotných dendritech, které budou zkoumány v praktické části této práce.

3.1 Elektromigrace

Elektromigrace je transport materiálu způsobený pohybem iontů kovu ve vodiči. Jedná se o degradační proces, který má za následek jak růst dendritů, tak tvorbu dutin na anodě (elektrony tečou směrem k anodě, materiál opačným směrem). Tento proces značně ovlivňuje spolehlivost spojů. [21]

Existují dva typy elektromigrace, a to tzv. suchá a iontová elektromigrace.

3.1.1 Suchá elektromigrace

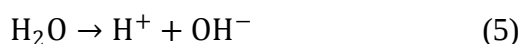
Suchá, neboli fyzikální elektromigrace probíhá pouze za teploty nad 150°C a za vysoké proudové hustoty (nad $10^4 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$). Suchá se nazývá proto, že není třeba žádné vlhkosti ke spuštění tohoto procesu. Vlivem velké proudové hustoty dochází k přesunu hmoty, ale protože vodiče jsou nehomogenní (např. zrna na hranách vodiče), není iontový tok rovnoměrný a dochází tak k hromadění materiálu na různých místech. To může mít za následek vznik děr až úplné rozpojení obvodů. Na druhou stranu nahromaděný materiál, který se ukládá v podobě hrbolků, může způsobit zkrat nebo narušit ochranné materiály, čímž podporuje korozi. [14] [18]

3.1.2 Iontová elektromigrace

Iontová, neboli elektrolytická elektromigrace, je děj, kdy působením elektrického pole dochází ve vlhkém prostředí k uvolňování a přemísťování kovu. K tomuto typu migrace dochází za běžných teplot (pod 100°C) a za nízké proudové hustoty (pod $1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$). Mechanismus elektrolytické migrace se dělí na tři etapy – rozpouštění, transport iontů a depozice. Na anodě nejprve dojde k oxidaci materiálu vodiče, ve kterém vznikají kladně nabití ionty. Ty se pak pod vlivem elektrického pole transportují po vlhkých místech ke katodě. [14] [18]

1. Rozpouštění

Stříbro pod vlivem okolního elektrického pole ionizuje, tj. z atomu stříbra se oddělí elektron a zbude kation. Voda z vlhkosti na DPS ionizuje také, za vzniku kationtu vodíku a hydroxilového aniontu.



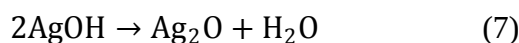
2. Transport iontů

Vodíkový kation putuje ke katodě, kde přijme volný elektron a jako plyný vodík se uvolní do okolní atmosféry. Hydroxilový ion zatím migruje k anodě, kde reaguje s kationtem stříbra za vzniku hydroxidu stříbrného.



3. Depozice

Nestabilní hydroxid stříbrný se na anodě rozloží a v jejím okolí vytvoří oxid stříbrný.



[14]

Jak vyplývá z rovnic popisujících příklad iontové elektromigrace, je nutné mít mezi elektrodami vždy dostatečnou vlhkost, aby k elektromigraci mohlo dojít.

Důsledkem iontové migrace jsou dva účinky, které vedou k poškození obvodu. Jedná se o nárůst koloidních částic, které se objevují jako tmavé oblasti okolo anody, a růst dendritů.

Elektrolytická elektromigrace se vyskytuje převážně u stejnosměrného proudu; při běžném střídavém proudu s frekvencí 50 Hz dochází jen k malé migraci a při vysokých frekvencích se prakticky již nevyskytuje. [14] [18]

Iontová elektromigrace má dva typy, vlhkou a mokrou elektromigraci.

Vlhká iontová elektromigrace

Vlhá elektromigrace (také zvaná stříbrná elektromigrace) se objevuje tam, kde není zkondenzovaná viditelná vlhkost. Stříbrná se nazývá proto, že stříbro je nejčastějším typem materiálu, kde se s touto migrací můžeme setkat, a to proto, že se

velmi dobře rozpouští. Kromě stříbra může k vlhké elektromigraci dojít v omezené míře u mědi a cínu. [14] [18]

Mokrý iontová elektromigrace

Mokrý elektromigrace se objevuje tam, kde je zkondenzovaná vlhkost již viditelná, například v podobě kapének vody. Dochází k urychlení a zesílení elektromigrace o několik řádů – zatímco u vlhké migrace dochází k přemostění dendritem až po dnech či týdnech, při mokré může dojít k růstu dendritů již po několika sekundách. [14] [18]

3.2 Faktory ovlivňující elektrochemickou migraci

Teplota

V případě, že na DPS je vodný roztok, může k elektrochemické migraci dojít v rozsahu teplot 0°C až 150 °C. Mimo tento rozsah může dojít k jiným typům migrací, ačkoliv nejsou příliš časté – jako příklad by se dala uvést migrace stříbra při teplotách okolo 150 °C. [16]

Výskyt elektrochemické migrace a s ní spojený výskyt a rychlost růstu dendritů se zvyšuje s rostoucí teplotou. Závislost elektrochemické migrace na teplotě se dá popsat pomocí Arrheniova vztahu:

$$t = A \cdot \exp\left(\frac{\Delta H}{k \cdot T}\right), \quad (8)$$

kde t = doba mezi klidem a selháním systému [s]

A = frekvenční faktor aktivační energie, tj. konstanta, která vyjadřuje pravděpodobnost, s jakou dojde k účinné srážce reagujících molekul

ΔH = aktivační energie [J/mol]

k = Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)

T = teplota [K]

[16] [17]

Z Arrheniova vztahu byl odvozen Hornungův vztah, který popisuje vztah mezi teplotou, vzdáleností mezi vodiči a velikostí přiloženého napětí a vznikem dendritů:

$$t = \frac{\alpha \cdot G}{V} \cdot \exp\left(\frac{\Delta H}{k \cdot T}\right), \quad (9)$$

kde α = konstanta úměrnosti [–]
 G = vzdálenost mezi vodiči [m]
 V = velikost přiloženého napětí [V]

[16]

Relativní vlhkost

Relativní vlhkost je hodnota, která udává poměr mezi množstvím vodní páry obsažené ve vzduchu za určité teploty a množstvím vodní páry ve vzduchu za stejné teploty, kdy by byl vzduch nasycen. Vyjadřuje se v procentech. [16]

Vzdušná vlhkost se může vysrážet na deskách plošných spojů, kde spolu s nečistotami vytvoří elektrolyt a tím přispívá k elektrochemické migraci. Množství vysrážené vody se udává v monovrstvách; kritické množství je 20 monovrstev. [16]

Vztah mezi počtem monovrstev na DPS a okolní relativní vlhkostí závisí především na absorpčních vlastnostech desky. Ty závisí na volbě použití masky a na množství a druhu nečistot, které se na desce vyskytují. Obecně platí, že s rostoucí vlhkostí vzduchu roste i pravděpodobnost výskytu elektrochemické migrace. [16]

Velmi důležitým bodem je rosný bod, tedy teplota, kdy je vzduch maximálně nasycen vodními parami. Pokud teplota klesne pod rosný bod, pára zkondenzuje a čas potřebný k vytvoření dendritů se zredukuje na jednotky sekund. V případech, kdy vlhkost nekondenzuje, se tento čas pohybuje v řádech hodin. [16]

Velikost přiloženého napětí

Ke vzniku elektrochemické migrace je nutné mít připojené napětí. Z vodivých cest pak vzniknou anody a katody, kolem kterých vznikne elektrické pole. Při dostatečně velkém rozdílu elektrických potenciálů dojde ke tvorbě kladných iontů, které pak migrují z anody na katodu.

Rozsah velikosti napětí, při kterém může dojít k migraci, se pohybuje od 2 V do 100 V. Nad touto hodnotou napětí se vyskytují spíše jiné typy poruch. Konkrétní hodnoty napětí potřebná k růstu dendritu se pak liší podle druhu kovu, použitého pro vodivé cesty. [16]

Vzdálenost mezi vodiči

Pokud budeme snižovat vzdálenost mezi dvěma opačně nabitými vodiči, bude se snižovat povrchový izolační odpor a s ním se bude zvyšovat pravděpodobnost elektrochemické migrace a výskytu dendritů. K tomu dochází ze dvou důvodů. Prvním je vznik silnějšího elektrického pole mezi bližšími vodiči o opačných potenciálech. Druhým je, že menší prostor mezi vodiči zapříčiní náročnější podmínky na čištění a k tomu se tu lépe usazují nečistoty, které mají na migraci velký vliv. [16]

Nečistoty na DPS

Množství nečistot na desce plošného spoje zásadně ovlivňuje pravděpodobnost výskytu migrace i rychlost tvorby dendritů. Některé typy nečistot mají za příčinu zvýšení absorpčních vlastností desky; jiné zvýší vodivost vzniklého elektrolytu a ionty tak mohou migrovat mnohem rychleji. Prokázalo se, že nejhorší vlastnosti mají ionty halogenidů, především pak ionty chlóru a brómu. [16]

S nečistotami souvisí i typ a chemické složení použitého tavidla. [7]

Materiál vodičů

Kov, ze kterého jsou vyrobeny elektrody, má samozřejmě také vliv na elektrochemickou migraci. Je to proto, že některé druhy kovů jsou více náchylné k oxidaci a rozpustnosti na ionty než jiné. Obecně můžeme seřadit nejběžněji používané kovy podle jejich vlivu na elektrochemickou migraci takto: Ag>Cu>Pb>SnPb>Sn>Au. [18]

3.3 Dendrity

Při elektrochemické migraci vznikají na anodě kladně nabití ionty, které se transportují ke katodě. Na ní se ukládají a redukují tak prostor mezi elektrodami, může dojít i k vodivému propojení. Tyto kovové výrůstky stromkovitého tvaru se nazývají dendrity. [18]

Tvar dendritů je důsledkem toho, že ionty mají sklon akumulovat se ve formě hrotů. Když vznikne zárodek hrotu, dojde k růstu proudové hustoty a tím se zvýší i pravděpodobnost dalšího růstu dendritů. Dochází k urychlení růstu, dendrit má pak formu černého, tenkého vlákna. Při růstu pak většinou dochází k větvení dendritu a tím ke vzniku klasické dendritické struktury. [14]

Jakmile dojde k prvnímu propojení opačně nabitých elektrod dendritem, nastane pokles povrchového izolačního odporu. Zprvu je tento pokles malý, protože dendrit má malou plochu, nicméně se zesílením dendritu, popř. s růstem dalších dendritů dochází k dalšímu poklesu odporu, což vede až ke vzniku elektrického zkratu. [14]

Tento jev se většinou vnímá jako plošný, nicméně se může jednat i o třírozměrný jev, pokud ionty proniknou i do prostoru elektroizolačního materiálu (např. materiál desek plošných spojů FR4), který je částečně porézní. V tomto případě pak již nehovoříme o růstu dendritů, ale o růstu vláken. [18]

4. Příprava experimentální části

V této kapitole rozepíšu, jak probíhala přípravná fáze experimentu, jehož cílem by mělo být vypěstování dendritů za různých podmínek. Pokusy budu provádět na deskách plošných spojů s použitím čtyř různých typů povrchových úprav pájecích plošek, s použitím masky a bez ní a s existencí tavidlových zbytků na masce a bez nich. Na druhou stranu budu všechny experimenty provádět za konstantní velikosti napětí a s jednou pájecí pastou, abych mohl vyloučit jejich vliv.

4.1 Použité přístroje

Stejnoseměrný zdroj



Obr. 19 Stejnoseměrný zdroj HM7042-5 [30]

Stejnoseměrný zdroj od firmy HAMEG Instruments jsem používal k napájení desek plošných spojů a tedy k vytvoření nezbytného rozdílu potenciálů mezi elektrodami. Použitý zdroj nese označení HM7042-5 a jedná se o regulovatelný tříkanálový zdroj, kde dva krajní kanály jsou schopné dodat napětí 0 až 32 V a proud 0 až 2 A. Prostřední kanál je schopen dodat napětí 0 až 5,5 V a proud až 5 A. [30]

Binokulární lupa



Obr. 20 Binokulární lupa HAWK DUO QC-5000 [31]

Binokulární lupu od firmy Vision Engineering jsem používal při podrobném hledání dendritů na zkoumaných DPS. Lupa pochází ze série HAWK a je dodávána společně se softwarem QC-5000, přes který můžeme zobrazovat zkoumaný objekt na monitoru počítače. Na lupě je možné díky vyměnitelným čočkám dosáhnout od desetinásobného až po tisícinásobné zvětšení. [31]

Přetavovací tunelová pec



Obr. 21 Přetavovací tunelová pec Mistral 260 [32]

Pro přetavení DPS s nanesenou pájecí pastou jsem použil třízónovou tunelovou pec Mistral 260. Pec je vybavena dotykovým displejem pro nastavení pájecího procesu, tj. nastavení teploty jednotlivých zón, rychlost dopravníku, apod. Na horní straně pece je dvojitě, tepelně izolující sklo, přes které se dá sledovat celý proces přetavení. [32]

Elektronový mikroskop

Elektronový mikroskop jsem použil pro materiálovou analýzu dendritu. Chtěl jsem pomocí něho zjistit, zda dendrity rostou z pájecí plošky či z pájecí pasty. Používal jsem mikroskop Phenom ProX, který je schopný daný vzorek opticky zvětšit v rozmezí 20x – 135x. Jako zdroj elektronů používá CeB_6 . [33]



Obr. 22 Elektronový mikroskop Phenom ProX [33]

4.2 Použitá pájecí pasta

Na všechny zkoumané desky plošných spojů jsem použil stejnou pájecí pastu, abych mohl vyloučit její vliv na růst dendritů. Použitou pastou byla bezolovnatá pájecí slitina Sn96.5Ag3Cu0.5 s označením PF-606-P30 od výrobce Shenmao Technology Inc. Pasta obsahuje 3% stříbra, 0,5% mědi a zbytek pasty tvoří cín. Teplota tání je v rozmezí 217°C – 219 °C. Pasta je z 89% tvořena kovovými částicemi o průměru 20μm – 45μm, zbylých 11% tvoří tavidlo. [29]

Tavidlo obsažené v pájecí pastě je typu ROL0. Zkratka ROL0 znamená, že materiál tavidla je rosin, tavidlové zbytky jsou neaktivní a tavidlo neobsahuje téměř žádné halidy. Zbytky po tomto tavidle jsou tedy nevodivé, nekorozivní a většinou tak můžou být ponechány na deskách. Nejsou rozpustitelné ve vodě a odstranit se tak dají pouze použitím vhodným rozpouštědlem. [29] [34]

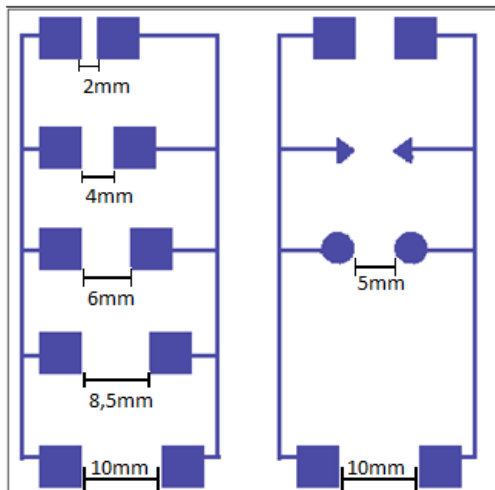
4.3 Postup přípravy experimentální části

Přípravu na výsledné experimentální pokusy jsem začal již v zimním semestru v rámci individuálního projektu. Celý postup by se dal rozdělit do několika následujících kroků: návrh DPS, určení povrchových úprav a použití nepájivé masky, objednávka DPS a šablony, nanesení pájecí pasty, přetavení pájecí pasty, čištění DPS, spojení DPS, nanesení potřebné vlhkosti a připojení ke zdroji stejnosměrného napětí.

Návrh DPS

Desku plošných spojů jsme navrhovali v programu Eagle 6.5.0. Desku jsem chtěl navrhnout tak, abych mohl pozorovat, zda na růst dendritů bude mít vliv vzdálenost mezi vodiči a dále také tvar elektrod. Proto jsem při návrhu desku rozdělil

na dvě pomyslné půlky. Na první jsou elektrody ve stejném tvaru, ale v různých vzdálenostech, nejmenší vzdálenost mezi elektrodami jsou 2 mm. Všechny vzdálenosti jsem zakreslil do obr. 23. Na druhé polovině jsou mezi elektrodami stejné vzdálenosti, ale zato mají různé tvary.



Obr. 23 Návrh DPS s rozměry

Určení povrchových úprav a nepájivé masky

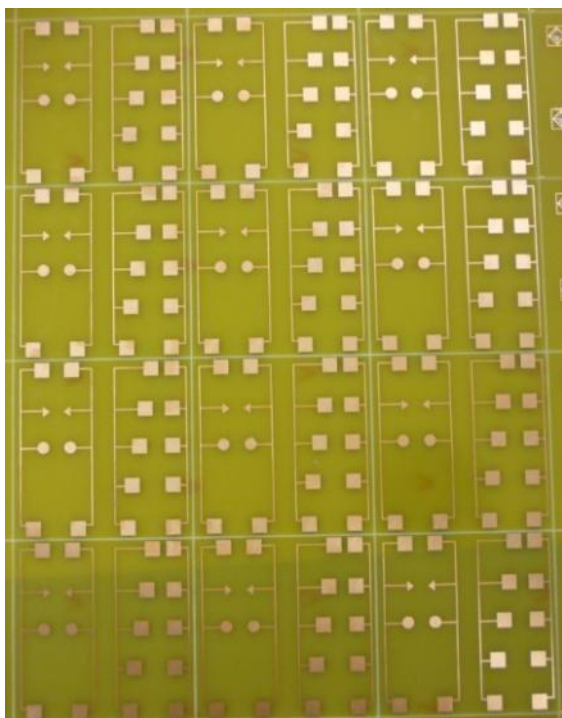
Rozhodl jsem se, že chci zkoumat, zda se na růstu dendritů může uplatnit typ použité povrchové úpravy a také použití nepájivé masky. Z toho důvodu jsem se rozhodl objednat čtyři typy povrchových úprav – HAL, ENIG, organickou OSP a čistou měď, tedy bez povrchové úpravy. Polovinu vzorků od každé z těchto povrchových úprav jsem objednal s nepájivou maskou a druhou polovinu bez masky.

Objednávka DPS a šablony

Objednali jsme 8 typů DPS, od každého typu 40 kusů, celkově jsme tedy objednali 320 kusů desek plošných spojů. Zároveň s deskami jsme objednali i šablonu na sítotisk.

Nanesení pájecí pasty

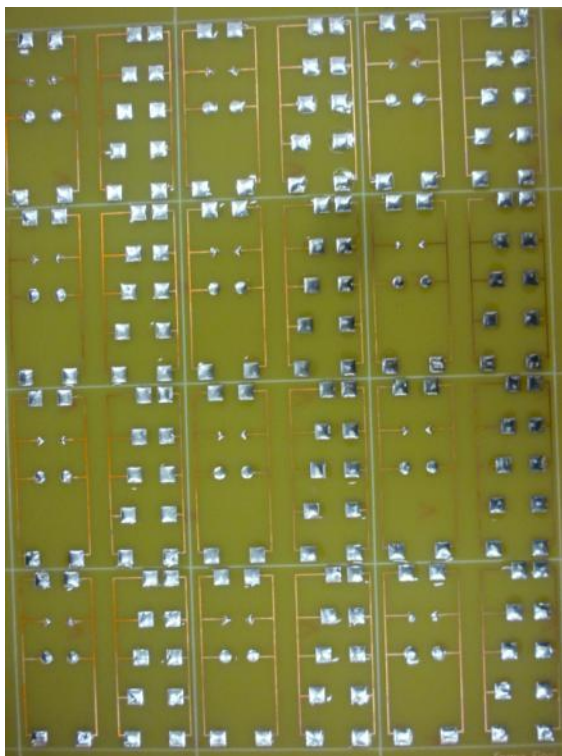
Pájecí pastu jsem nanесl pomocí šablonového tisku. Na všechny vzorky jsem použil pouze jeden typ pájecí pasty, a to Sn96.5Ag3Cu0.5.



Obr. 24 DPS před nanesením pasty

Přetavení pájecí pasty

Po nanesení pasty na pájecí plošky jsem desky vložil do tavné pece Mistral 360 s třemi teplotně nastavitelnými komorami. Teplotní profil v peci jsem nastavil dle doporučení výrobce pájecí pasty.



Obr. 25 DPS s přetavenou pájecí pastou

Očištění DPS

Jeden z vlivů, které jsem se rozhodl zkoumat, je existence tavidlových zbytků na povrchu DPS. K tomu jsem musel polovinu zkoumaných vzorků zanechat s tavidlovými zbytky a druhou polovinu jsem od těchto zbytků musel očistit. Desky jsem čistil ručně, pomocí isopropanolu.

Spojení DPS

K ušetření času v experimentální části jsme se s vedoucím práce rozhodli pospojovat více desek plošných spojů dohromady. DPS jsem pospojoval paralelně, aby na všech vzniklo stejné napětí. Vždy jsem pospojoval dohromady pět kusů DPS se stejnou kombinací zkoumaných prvků, tedy se stejnou povrchovou úpravou, s použitím nepájivé masky či bez ní a s tavidlovými zbytky na povrchu či očištěné DPS.

Nanesení potřebné vlhkosti

Jednou z podmínek, nutnou k růstu dendritů, je přítomnost vlhkosti. Rozhodl jsem se, že budu simulovat podmínky tzv. mokré iontové elektromigrace, proto jsem potřeboval, abych měl na DPS viditelnou vrstvu vlhkosti.

První metodou, co jsem zkoušel, byla umístit vzorky DPS do klimatické komory. Ta je schopná nasimulovat vysokou relativní vlhkost (až 98%) a vysoké teploty. Bohužel se mi nepodařilo docílit toho, aby na deskách plošných spojů zkondenzovala viditelná vlhkost.

Druhým nápadem bylo využít chladících desek. Ty měly zapříčinit, aby desky měly teplotu nižší než teplotu rosného bodu okolní atmosféry a kondenzovala na nich vlhkost. Bohužel chladící desky nebyly schopné udržet tak nízkou teplotu po dostatečně dlouhou dobu.

Jako poslední možnost jsem smíchal deionizovanou vodu s tenzidem. Tenzid sníží povrchové napětí vody a na desce se tak vlhkost nebude srážet do kapek vody, ale bude rovnoměrně rozložená po celé desce. Tuto směs jsem pak na desky plošných spojů nanесl pomocí štětečku.

Připojení ke zdroji stejnosměrného napětí

Paralelně spojené desky již stačilo pouze připojit ke stejnosměrnému napětí. To jsem provedl pomocí kabelů s připevněnými krokosvorkami. Jako zdroj stejnosměrného napětí jsem použil Hameg HM7042-5.

4.4 Celkový počet zkoumaných vzorků

Konečný počet připravených vzorků se ustálil na 80. Tento počet vychází z kombinací, které jsem seřadil do následující tabulky:

Tab. 1 Kombinace zkoumaných podmínek

Počet druhů pájecích past	1	Sn95.75 Ag3.5 Cu0.75
Počet úrovní vlhkosti	1	Viditelná vrstva vlhkosti
Velikost přiloženého napětí	1	32 V
Počet povrchových úprav	4	ENIG, HAL, OSP, bez povrchové úpravy
Aplikace masky	2	S maskou či bez masky
Existence tavidlových zbytků	2	S tavidlovými zbytky či očištěná DPS
Počet vzorků pro jednu kombinaci	5	
Celkový počet vzorků	80	

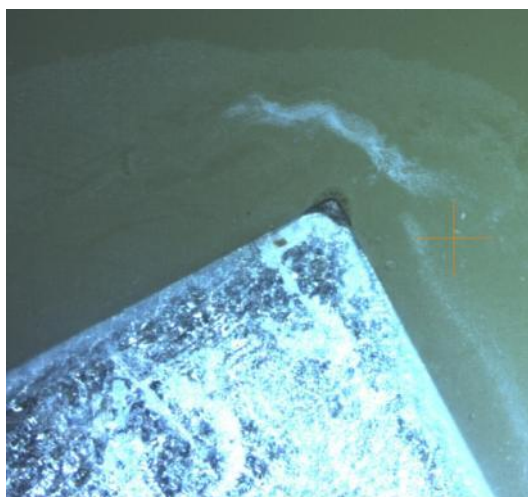
5. Experimentální část

Samotný experiment spočíval v tom, že jsem na jednu sadu vzorků přivedl napětí o velikosti 32 V a po deseti minutách jsem binokulární lupou zkontroloval, zda nedošlo k růstu dendritů. Následně jsem na zkoumané vzorky opět nanесl vlhkost a celý postup zopakoval ještě jednou. Postupně jsem takto otestoval všechny kombinace vzorků. V následující kapitole sepišu, jakých výsledků jsem dosáhl na různých vzorcích.

5.1 Naměřené výsledky

Bez povrchové úpravy, bez masky, s tavidlem

Při první optické kontrole po deseti minutách pod napětím jsem našel pouze jeden malý dendrit, který vyrůstal z rohu na vzorku č. 4 (Obr. 26), a to na elektrodách, které byly od sebe vzdáleny 8,5 mm. Po dalších deseti minutách se žádný nový dendrit neobjevil, a ani ten objevený po první zkoušce se už nijak nerozrostl.



Obr. 26 Bez povrchové úpravy, bez masky, s tavidlem, vzdálenost elektrod 8,5 mm, 10 min.

OSP, bez masky, s tavidlem

Již po prvních deseti minutách vyrostlo na této desce poměrně hodně dendritů. Na vzorku č. 1 vyrostl jeden dendrit na vzdálenosti elektrod 2 mm (Obr. 27), dále malý dendrit na rohu elektrody na vzorku č. 3 ve vzdálenosti 8,5 mm, na vzorku č. 4 vyrostly dokonce dva dendrity – jeden menší na vzdálenosti 4 mm a ve vzdálenosti 2 mm vyrostl dendrit, který spojil elektrody.

Na druhých deset minut jsem bohužel otočil napájecí napětí a dendrity, které vyrostly během prvních deseti minut, už tak neměly možnost dále pokračovat ve svém

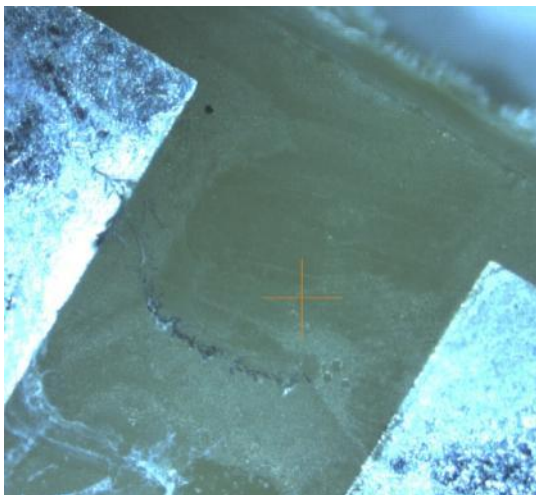
růstu. Vyrosl však nový dendrit na vzorku č. 1 ve vzdálenosti 2 mm, který tak rostl proti směru původního dendritu na tomto místě. Vyrostly i další dendrity, na vzorku č. 2 ve vzdálenostech 2 mm a 8,5 mm, na vzorku č. 3 ve vzdálenostech 6 mm a 8,5 mm, na vzorku č. 4 ve vzdálenostech 2 mm a 8,5 mm a na vzorku č. 5 ve vzdálenostech 4 mm, 6 mm a 8,5 mm. Je důležité zde upozornit, že dendrity, které se objevily na vzdálenostech větších než 2 mm, byly malého vzrůstu a soustředily se především na oblast rohů elektrod. V rozích elektrod je totiž větší proudová hustota, a tedy i lepší podmínky pro elektrochemickou migraci.



Obr. 27 OSP, bez masky, s tavidlem, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min.

ENIG, bez masky, s tavidlem

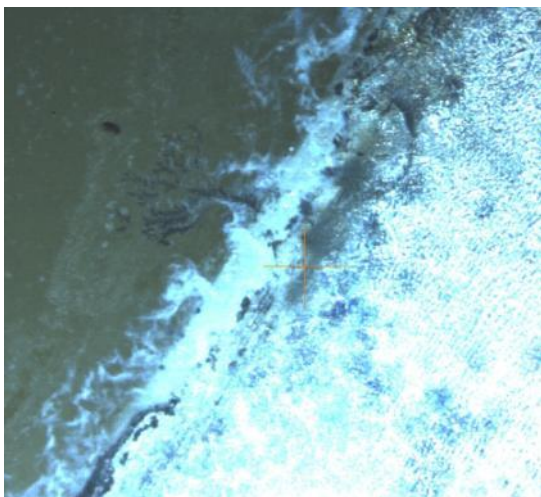
Během prvních deseti minut vyrostl pouze jeden dendrit, a to na vzorku č. 5 ve vzdálenosti elektrod 2 mm (Obr. 28). Po dalších deseti minutách jsem objevil dva malé dendrity na vzorku č. 5, a to ve vzdálenostech 6 mm a 8,5 mm. I tyto dendrity vyrostly z rohu elektrod.



Obr. 28 ENIG, bez masky, s tavidlem, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min.

HAL, bez masky, s tavidlem

Po deseti minutách jsem našel dendrity pouze na jediném vzorku č. 1, ale zato tam vyrostly na třech různých místech, ve vzdálenostech 2 mm, 4 mm a 6 mm. Po druhých deseti minutách jsem našel dendrity již na více deskách – na vzorku č. 1, kde dendrity z prvních deseti minut už sice dále nerostly, ale vyrostl jeden nový ve vzdálenosti 2 mm; dále na vzorku č. 3 na vzdálenostech 6 mm (Obr. 29) a 8,5 mm a na vzorku č. 4 ve vzdálenostech 4 mm, 6 mm a 8,5 mm.



Obr. 29 HAL, bez masky, s tavidlem, vzdálenost elektrod 6 mm, 20 min.

Bez povrchové úpravy, s maskou, s tavidlem

Po prvních deseti minutách jsem při pozorování pod binokulární lupou neobjevil žádný dendrit. Po druhých deseti minutách jsem objevil pouze jeden malý dendrit, který rostl na vzorku č. 5 ve vzdálenosti elektrod 2 mm (Obr. 30).



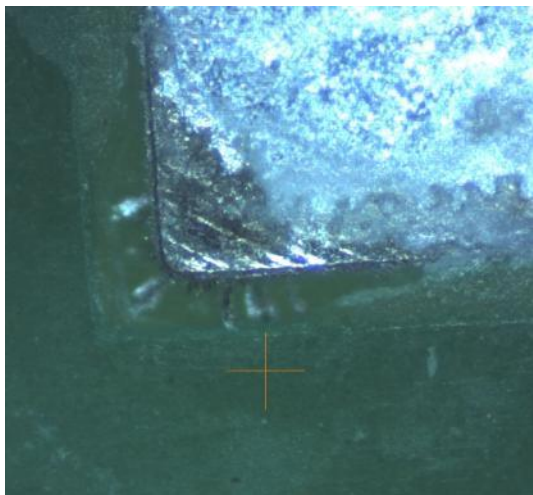
Obr. 30 Bez povrchové úpravy, s maskou, s tavidlem, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min.

OSP, s maskou, s tavidlem

Na deskách plošných spojů v této kombinaci parametrů nevyrostl žádný dendrit během prvních deseti minut ani během druhých deseti minut pod napětím.

ENIG, s maskou, s tavidlem

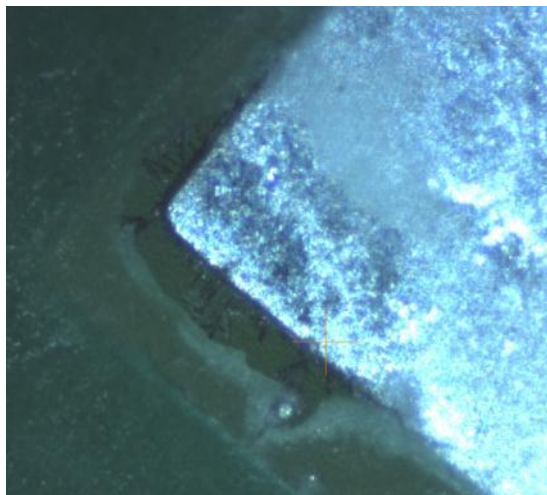
Při prvním zkoumání jsem neobjevil žádný vyrostlý dendrit, při druhém zkoumání po dvaceti minutách pod napětím jsem našel jeden malý dendrit na rohu elektrody na vzorku č. 4 ve vzdálenosti elektrod 8,5 mm (Obr. 31).



Obr. 31 ENIG, s maskou, s tavidlem, vzdálenost elektrod 8,5 mm, 20 min.

HAL, s maskou, s tavidlem

I při této kombinaci jsem objevil dendrit až při zkoumání po druhých deseti minutách pod napětím, vyrostl na rohu elektrody vzorku č. 4 ve vzdálenosti 8,5 mm (Obr. 32).

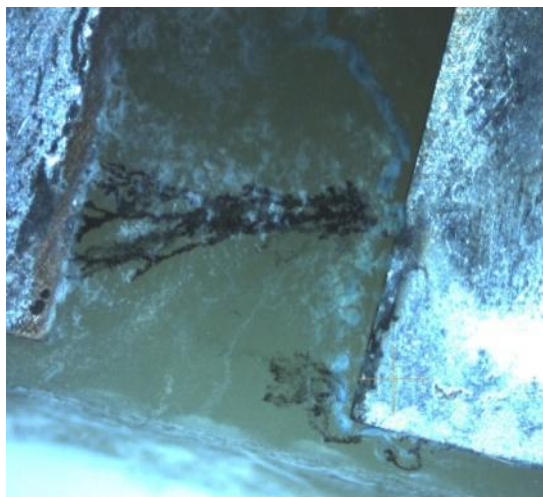


Obr. 32 HAL, s maskou, s tavidlem, vzdálenost elektrod 8,5 mm, 20 min.

Bez povrchové úpravy, bez masky, bez tavidla

Po prvních deseti minutách vyrostly tři dendrity, dva na vzorcích č. 1 a č. 2 ve vzdálenosti elektrod 2 mm a jeden malý na vzorku č. 3 také ve vzdálenosti 2 mm.

Po dalších deseti minutách se původní dendrity nezměnily, ale vyrostl jeden nový na vzorku č. 1 ve vzdálenosti 2 mm (Obr. 33).

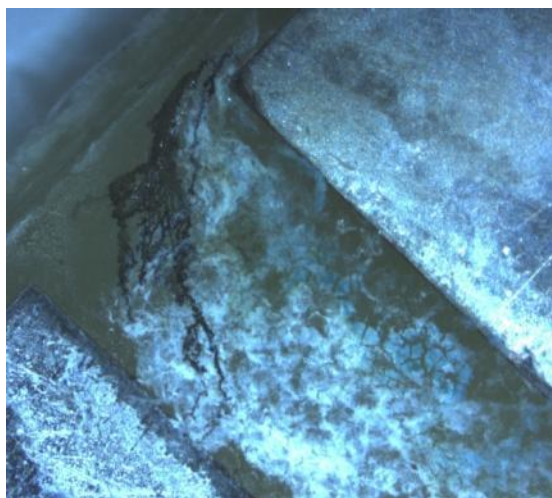


Obr. 33 Bez povrchové úpravy, bez masky, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min.

OSP, bez masky, bez tavidla

Při první kontrole jsem našel dendrit na vzorku č. 3 na vzdálenosti 2 mm mezi elektrodami a dále jeden malý na vzorku č. 1 opět ve vzdálenosti 2 mm.

Po dvaceti minutách, při druhé kontrole, jsem našel nový dendrit na vzorku č. 1 ve vzdálenosti 2 mm a také na vzorku č. 5 (Obr. 34) na stejné vzdálenosti.



Obr. 34 OSP, bez masky, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min.

ENIG, bez masky, bez tavidla

Na těchto vzorcích nevyrostly žádné dendrity.

HAL, bez masky, bez tavidla

Během prvních deseti minut vyrostly dva dendrity, jeden na vzorku č. 1 ve vzdálenosti elektrod 2 mm (Obr. 35) a druhý, menšího vzrůstu, na vzorku č. 3 ve stejné vzdálenosti elektrod.

Při dalších deseti minutách dendrit na vzorku č. 3 pokračoval ve svém růstu, až došlo k přemostění elektrod. Mimo to se objevil jeden nový malý dendrit opět na vzdálenosti 2 mm.

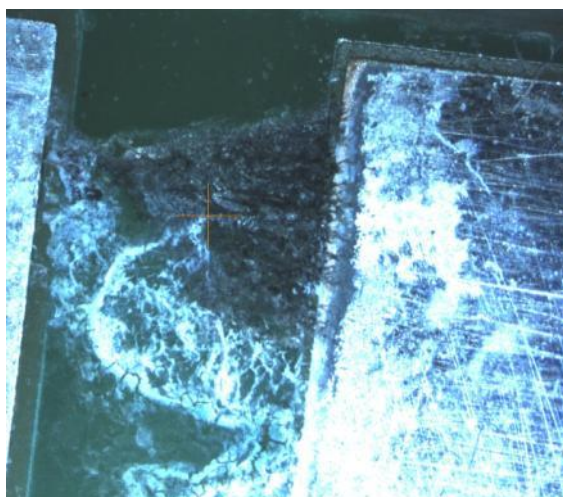


Obr. 35 HAL, bez masky, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min.

Bez povrchové úpravy, s maskou, bez tavidla

Během prvních deseti minut vyrostlo poměrně velké množství dendritů. Všechny vyrostly na stejné vzdálenosti, a to 2 mm mezi elektrodami. Dva velké dendrity jsem objevil na vzorcích č. 3 (Obr. 36) a č. 5 a jeden střední velikosti na vzorku č. 2.

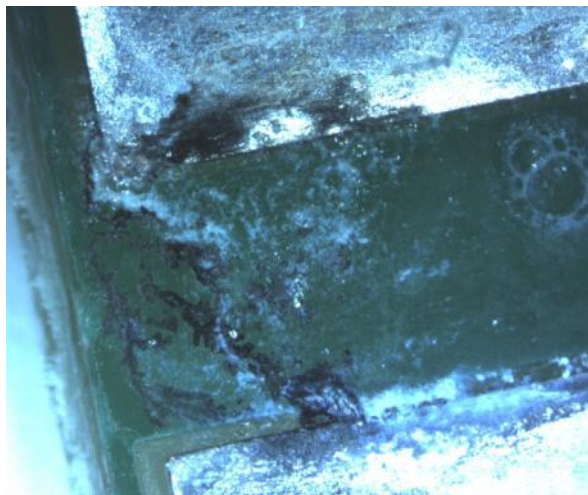
Po druhých deseti minutách došlo k nárůstu nového dendritu, na vzorku č. 1 ve vzdálenosti 2 mm mezi elektrodami. Kromě toho došlo k opětovnému růstu dendritu na vzorku č. 3, kde přibylo několik nových větví.



Obr. 36 Bez povrchové úpravy, s maskou, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min.

OSP, s maskou, bez tavidla

Během prvních deseti minut nevyrostl žádný dendrit. Během dalších deseti minut ovšem vyrostly dva dendrity, na vzorcích č. 1 (Obr. 37) a č. 5 (oba ve vzdálenosti 2 mm), které oba přemostily elektrody s rozdílnými potenciály.

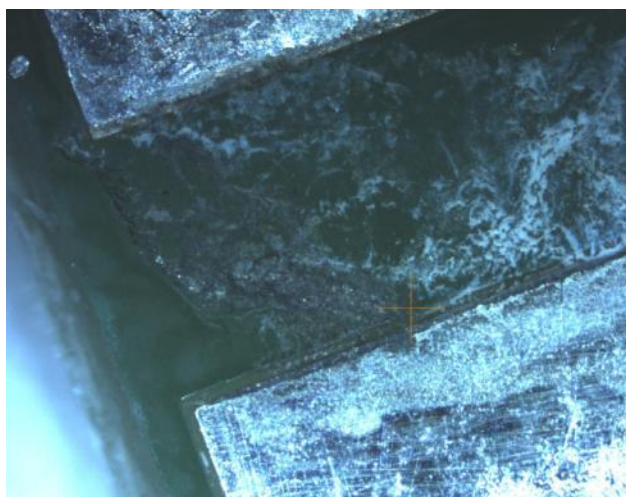


Obr. 37 OSP, s maskou, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min.

ENIG, s maskou, bez tavidla

Při prvních deseti minutách se objevil jeden dendrit, který spojil dvě elektrody s rozdílným potenciálem, mezi kterými byla vzdálenost 2 mm (Obr. 38).

Při dalších deseti minutách se ale žádný nový dendrit neobjevil, a ani ten původní se nezměnil.

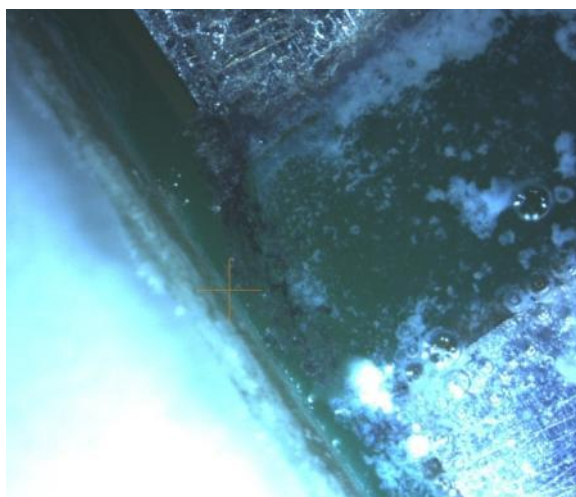


Obr. 38 ENIG, s maskou, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min.

HAL, s maskou, bez tavidla

Během prvních deseti minut vyrostl jeden dendrit na vzorku č. 3, opět ve vzdálenosti 2 mm mezi elektrodami.

Po další desítce minut pod napětím se původní dendrit již nerozrostl, nicméně přibýly dva nové dendrity na vzorcích č. 2 (Obr. 39) a č. 4, oba ve vzdálenosti elektrod 2 mm.



Obr. 39 HAL, s maskou, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min.

5.2 Vliv masky

Jeden z faktorů, u kterých jsem chtěl zkoumat jejich vliv na elektrochemickou migraci, bylo použití ochranné nepájivé masky. Z toho důvodu jsem jako polovinu vzorků použil desky plošných spojů s nepájivou maskou a druhou polovinu bez ní. Z naměřených vzorků vyplývá, že použití nepájivé masky zcela jednoznačně omezuje růst dendritů. I přesto ale k nějakému růstu došlo. Většinou se ale jednalo o velmi malé nárůstky dendritů na rozích elektrod.

V první polovině vzorků s maskou, kde jsem na deskách nechával tavidlové zbytky, docházelo k elektrochemické migraci jen velmi zřídka a ve velmi malém rozsahu; všechny dendrity byly velmi malého vzrůstu a všechny rostly na rohu elektrod. Zajímavé je, že v druhé polovině vzorků, kde jsem očistil povrch DPS od tavidlových zbytků, docházelo k elektrochemické migraci ve větší míře. Zvýšil se počet dendritů a i jejich délka, v několika případech dokonce došlo k přemostění elektrod s rozdílným potenciálem.

5.3 Vliv vzdálenosti elektrod

Dalším z faktorů, které jsem se jal zkoumat, byla vzdálenost mezi elektrodami s rozdílným potenciálem. Abych mohl tento vliv zkoumat, bylo nutné podle toho navrhnout desky plošných spojů, na kterých jsem prováděl experimenty. Na každé desce jsou tedy čtyři páry elektrod, na které je přivedeno napětí. Mezi těmito páry jsou různé vzdálenosti, nejmenší vzdálenost je 2 mm, dále 4 mm, 6 mm a největší vzdálenost je 8,5 mm.

Podařilo se mi potvrdit teoretické předpoklady, protože z naměřených vzorků vyplývá, že čím je větší vzdálenost mezi elektrodami, tím je menší pravděpodobnost elektrochemické migrace. Dendrity se tedy podle předpokladů nejčastěji objevovaly na nejmenší vzdálenosti a zároveň se jednalo o největší a nejrozvětvenější dendrity. Nejmenší vzdálenost, tedy 2 mm, byla jediná, kterou se podařilo dendritem kompletně přemostit. Na druhé největší vzdálenosti (4 mm) se dendrity také objevovaly celkem často, nicméně měly mnohem menší vzrůst a rozvětvenost. Na dvou největších vzdálenostech, tedy 6 mm a 8,5 mm, docházelo občasné také k růstu dendritů, nicméně se jednalo o velmi malé dendrity, které se až na výjimky vyskytovaly pouze na rohu elektrody.

5.4 Vliv tavidlových zbytků

Další faktor, který jsem chtěl v této práci zpracovat, byla existence tavidlových zbytků na povrchu DPS. Proto jsem po přepájení polovinu desek plošných spojů očistil isopropanolem, který tavidlové zbytky snadno rozpustil.

Vliv tavidla je dobře vidět na deskách s ochrannou nepájivou maskou, kde v přítomnosti tavidlových zbytků v okolí elektrod nedocházelo téměř k žádné elektromigraci, kromě několika ojedinělých malých dendritů na rozích elektrod. Po očištění desek od zbytků tavidla ale dendrity rostly v o mnoho větší míře a dokonce i několikrát přemostily nejmenší vzdálenost mezi elektrodami s opačným potenciálem.

Na deskách bez nepájivé masky ale dochází k opačnému efektu, k elektrochemické migraci dochází ve větší míře právě na deskách se zbytky tavidla. Pravděpodobně je to způsobené tím, že při čištění povrchu desky isopropanolem jsem odstranil i většinu nečistot, které jsou pro elektrochemickou migraci žádoucí. I přesto ale na vzorcích bez tavidlových zbytků k elektrochemické migraci a tedy i k růstu dendritů docházelo.

5.5 Vliv povrchové úpravy

Posledním faktorem, který jsem chtěl zkoumat, byl vliv použité povrchové úpravy. Pro tento účel jsem objednal DPS se čtyřmi typy povrchových úprav – OSP, ENIG, HAL a bez povrchové úpravy.

Prvním zkoumaným vzorkem byly desky bez povrchové úpravy. Na těchto vzorcích je dobře vidět vliv tavidla, protože v experimentech, kdy na deskách byly tavidlové zbytky, nevyrostly téměř žádné dendrity, a to jak na deskách s nepájivou maskou tak i bez ní. Po očištění desek od zbytků tavidla, už na deskách rostlo o poznání více dendritů.

Druhou povrchovou úpravou byla OSP. Na vzorcích s touto úpravou se většinou vyskytovalo poměrně hodně vyrostlých dendritů, výjimku tvoří pouze vzorek s nepájivou maskou a s tavidlovými zbytky, kdy k elektrochemické migraci vůbec nedošlo.

Třetím typem vzorků byly desky s povrchovou úpravou ENIG. Z naměřených dat vyplývá, že tato úprava je vůči elektrochemické migraci velmi odolná. Ve většině případů nedošlo k elektrochemické migraci vůbec, nebo vyrostly jen malé dendrity na rozích elektrod. Jediný větší dendrit vyrostl na desce s nepájivou maskou bez tavidlových zbytků, který ale dokázal přemostit 2 mm vzdálené elektrody.

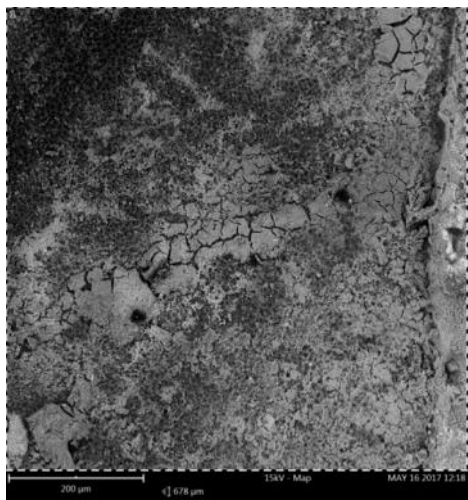
Poslední zkoumanou povrchovou úpravou byl HAL. Na deskách s touto úpravou sice nerostlo tolik dendritů jako u OSP, nicméně ani HAL neposkytuje velkou ochranu před elektrochemickou migrací. Dendrity vyrostly na všech kombinacích s touto úpravou.

5.6 Výsledky z elektronového mikroskopu

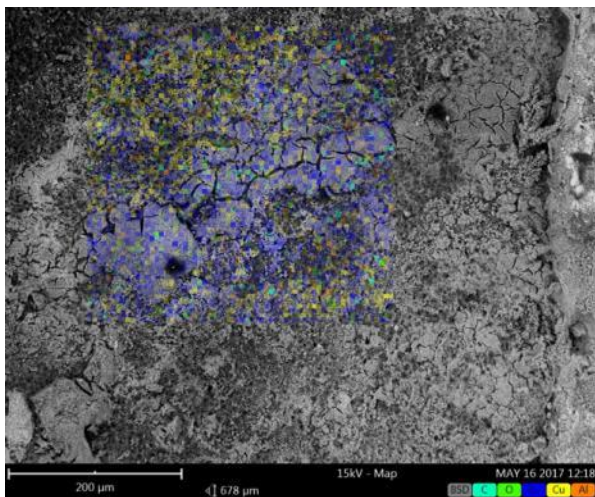
Elektronový mikroskop jsem použil k materiálové analýze dendritu. Podle chemického složení jsem chtěl určit, zda dendrity rostou z pájecí pasty či z materiálu pájecí plošky. Zkoumal jsem dva různé vzorky, oba bez masky a bez tavidla; prvním vzorkem byl dendrit vyrostlý na DPS bez povrchové úpravy, druhým vzorkem byl dendrit z DPS s OSP.

Na prvním vzorku jsme přes mikroskop našli místo, kde se objevil dendrit. Z analýzy tohoto místa bylo jasné, že dendrit, který vyrostl na desce bez povrchové úpravy, je tvořen cínem, který je součástí pájecí pasty. Dendrit tedy vyrostl přímo

z pasty a nikoli z pájecí plošky. Na Obr. 41 je zobrazena prvková analýza, modrá barva představuje cín.

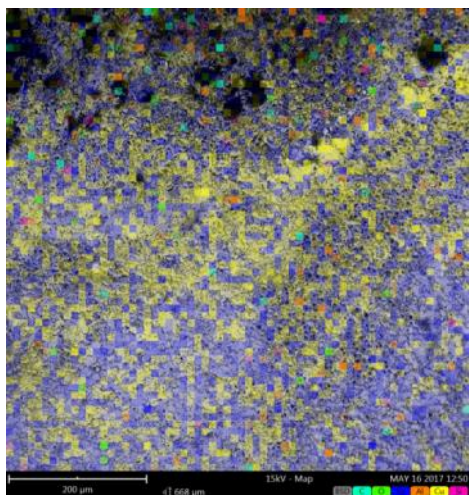


Obr. 40 Detail dendritu na elektronovém mikroskopu



Obr. 41 Rozložení prvků na dendritu na desce bez povrchové úpravy

Druhým vzorkem byl dendrit vyrostlý na desce s povrchovou úpravou OSP. Na Obr. 42 je výsledná prvková analýza, modrá barva představuje opět cín a žlutá barva reprezentuje měď.



Obr. 42 Rozložení prvků na dendritu na desce s OSP

Z analýzy tedy vyplývá, že dendrit je v tomto případě tvořen chemickou sloučeninou mědi a cínu. Možným vysvětlením je, že na desce bez povrchové úpravy měď reaguje s okolní atmosférou, zoxiduje a nemůže pak tedy chemicky reagovat s pájecí slitinou. V případě použití OSP je ale povrch mědi pokryt inhibitory, které zabraňují oxidaci mědi. Měď pak chemicky reaguje s cínem, který je obsažen v použité pájecí pastě a společně tak vytvoří sloučeninu, ze které je tvořen výsledný dendrit.

6. Závěr

V bakalářské práci jsem se zabíral problematikou možných chyb na deskách plošných spojů se zaměřením na elektrochemickou migraci a s ní spojeným růstem dendritů. Důvodem, proč jsem se zaměřil právě na elektrochemickou migraci na DPS je postupná miniaturizace desek, s tím souvisí zmenšování vzdáleností mezi elektrodami a roste potřeba se s tímto problémem zabývat.

V teoretické části jsem nejprve zpracoval pájení, tedy oblast, která s danou problematikou velmi úzce souvisí. Stručně jsem popsal základní vlastnosti a pojmy u pájených spojů, technologie pájení a chyby, které mohou při pájení vzniknout. Dále jsem zpracoval faktory, jejichž vliv na elektrochemickou migraci jsem zkoumal v praktické části této práce; jedná se o nepájivou masku, tavidla a typy povrchových úprav. Poslední kapitolu jsem pak věnoval elektrochemické migraci a růstu dendritů.

V praktické části jsem si dal za úkol ověřit některé teoretické předpoklady a zkoumat vliv různých faktorů na růst dendritů. Mezi zkoumané faktory jsem zařadil použití ochranné nepájivé masky, typ použité povrchové úpravy, existenci tavidlových zbytků na desce plošných spojů a vzdálenost mezi elektrodami. Abych mohl přesněji určit, jak velký vliv mají dané faktory na růst dendritů, zkoumal jsem každou kombinaci na pěti DPS. Na druhou stranu jsem na všechny desky použil stejnou pájecí pastu a aplikoval stejné napětí – to proto, abych mohl vyloučit jejich případný vliv.

Z naměřených výsledků bych rád vyvodil pár závěrů. Nejprve zmíním, jaký vliv mají různé použité povrchové úpravy. Zkoumal jsem desky bez povrchové úpravy, s OSP, ENIG a HAL. Podle počtu a velikosti vyrostlých dendritů můžu vyvodit, že nejmenší odolnost vůči elektrochemické migraci má OSP, dále HAL, bez povrchové úpravy a naopak největší odolnost má povrchová úprava ENIG. U vybraných vzorků dendritů jsem provedl vzorkovou analýzu na elektronovém mikroskopu. Z hodnot, které jsem takto získal, mohu říci, že dendrity nerostou přímo z materiálu pájecích plošek, ale z pájecí pasty. Dle mého názoru tedy použitá povrchová úprava nemá přímý vliv na růst dendritů. Spíše by se dalo usuzovat, že povrchová úprava má vliv na tvorbu chemických sloučenin mezi materiálem pájecí pasty a materiálem samotné povrchové úpravy. Tyto sloučeniny pak mohou být více či méně náchylné k elektrochemické migraci.

Dalším faktorem byl vliv vzdálenosti elektrod. Tento vliv je celkem snadno pozorovatelný; u nejmenší vzdálenosti, tedy 2 mm, rostlo mnohem více dendritů než na větších vzdálenostech. Je tomu tak proto, že s rostoucí vzdáleností roste i povrchový

odpor, který brání elektrochemické migraci. Pokud k elektrochemické migraci došlo u větších vzdáleností, pak většinou rostly jen malé dendrity na rozích elektrod, kde je vyšší proudová hustota.

Posledními faktory, jejichž vliv jsem zkoumal, byla existence tavidlových zbytků na povrchu DPS a použití nepájivé masky. Podle naměřených dat a podle mého názoru spolu tyto dva faktory úzce souvisí. Došel jsem k závěru, že tavidlové zbytky zabraňují růstu dendritů. U vzorků, kde byla použita maska a ponechány tavidlové zbytky, totiž nedošlo k téměř žádné elektrochemické migraci. Naopak u vzorků s maskou, kde jsem tavidlové zbytky odstranil, docházelo k růstu dendritů v relativně vysoké míře. Podle mého názoru je tento jev způsoben tím, že při použití masky je neočištěné tavidlo rozprostřeno kolem napájených plošek tak, že jsou tyto plošky v podstatě izolovány a dendrit tak nemá kudy růst. Bez použití nepájivé masky ale tavidlo není v takové výšce jako pájecí pasta a dendrity tak mají prostor k růstu. Dá se ale předpokládat, že při použití tavidla rozpustného ve vodě by tavidlové zbytky spíše podporovaly elektrochemickou migraci, protože by byly zdrojem nečistot. Tento předpoklad jsem ale ve své bakalářské práci neprozkoumal.

Věřím, že tyto poznatky by mohly přinést nové informace do problematiky elektrochemické migrace a přispět tak k dalšímu pokroku v miniaturizaci vzdáleností na deskách plošných spojů.

7. Zdroje

- [1] KOBLÍŽEK, Vilém. *Měkké pájení v elektronice* [online]. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13TEP_soubory/uloha_2.pdf
- [2] Dip Soldering. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Dip_soldering
- [3] BESHAIJOVÁ-PELIKÁNOVÁ, Ivana. *Montáž SMT a THT – Pájení* [online]. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/pajeni.pdf>
- [4] OTIPKA, Jiří. Pájení [online]. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-t2-02_pajeni.pdf
- [5] LOMBERSKÝ, Filip. *Spolehlivost pájených spojů*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Václav Wirth.
- [6] MACH, Pavel. Pájení [online]. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/44479/mod_resource/content/1/Pájení.pdf
- [7] NOVÁK, Ondřej. *Pájené spoje, růst dendritů*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [8] Flow and Reflow. *HAKKU* [online]. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <https://www.hakko.com/english/hikaru/pages/story9.html>
- [9] PÍCHA, Jan. *Studium spolehlivosti bezolovnatého pájených spojů*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ivan Szendiuch.
- [10] 1. Fickův zákon. *Wikiskripta* [online]. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/1._Fickův_zákon

[11] SLAVATA, Michal. *Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži*. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí práce Karel Dušek.

[12] Self test results. *Dangerous Prototype* [online]. [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: <http://dangerousprototypes.com/forum/viewtopic.php?f=4&t=9&start=135>

[13] SEDLÁČEK, Josef. *Pajeni_uvod* [online]. [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/53550/mod_resource/content/1/pajeni_uvod_2.pdf

[14] TYLICH, Ondřej. *Elektromigrace tavivlových zbytků na povrchu DPS*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Starý.

[15] JIČÍNSKÝ, Jiří. *Enviromentální vlivy a pážitelnost povrchových úprav desek plošných spojů*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Starý.

[16] BUMILLER, Elissa a Craig HILLMAN. *Review of Models for Time-to-Failure Due to Metallic Migration Mechanisms* [online]. [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: http://www.dfrsolutions.com/uploads/white-papers/Time-to-Failure_Metallic_Migration.pdf

[17] Reakční rychlost. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Reakční_rychlost

[18] STARÝ, Jiří a TYLICH Ondřej. *Elektromigrace na elektronických sestavách*. Brno, 2016.

[19] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Pardubice: ABE.TEC, 2005. ISBN 80-903597-0-1.

[20] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.

[21] PIETRIKOVÁ, Alena, Juraj ĎURIŠIN a Pavel MACH. *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.

[22] OBR, Vlastimil. Bow & Twist – prohnutí a zkroucení desek plošných spojů. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2014 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyvoj/id:2413/bow-twist-prohnuti-a-zkrouceni-desek-plosnych-spoju>

[23] ŠEBESTA, Jan. Skryté vady desek plošných spojů – část 2. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2011 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:6272/skryte-vady-desek-plosnych-spoju-cast-2>

[24] Delamination buckling of fibre–metal laminates. *ResearchGate* [online]. 2001 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/241312634_Delamination_buckling_of_fibre-metal_laminates

[25] ŠEBESTA, Jan. Skryté vady desek plošných spojů – část 1. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2011 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:5586/skryte-vady-desek-plosnych-spoju-cast-1>

[26] KOUŘIL, Michal. *Technologické aspekty bezolovnatého pájení v mikroelektronice*. Zlín, 2007. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Petr Neumann.

[27] RŮŽIČKA, Miroslav. *Hodnocení samozhášivých vlastností základních materiálů FR4*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Starý.

[28] STARÝ, Jiří, ZATLOUKAL, Miroslav a STEJSKAL, Petr. *Montážní a propojovací technologie*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Brno, 2015.

[29] *Lead-Free Solder Paste PF 606-P30* [online]. 2015 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: http://www.ulbrich.cz/chemical-technical-products/TDS_PF606_P30_2.pdf

[30] *Triple powersupply HM7042-5* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: https://cdn.testequity.com/documents/pdf/HM7042_5-ds.pdf

[31] *Non-contact measuring systems* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.optimaxonline.com/pdf/Optimax%20Hawk%20Family%20Brochure.pdf>

[32] *Mistral 260* [online]. [cit. 02.05.2017]. Dostupné z: http://www.memtech.co.il/files/attach/Mistral_260.pdf

[33] Phenom ProX. *PhenomWorld* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://www.phenom-world.com/microscopes/phenom-prox>

[34] Flux Type Selection. *Evertiq* [online]. 2010 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://evertiq.com/news/16783>

Seznam obrázků

Obr. 1 Vliv teploty na difúzi. A) Pájka při pokojové teplotě B) Pájka při teplotě vyšší než bod tavení [9].....	11
Obr. 2 Prohnutí a měření DPS [22]	14
Obr. 3 Zkroucení a měření zkroucení DPS [22].....	14
Obr. 4 Delaminace DPS [24].....	15
Obr. 5 Vada na vodiči (vykousnutí) [24]	15
Obr. 6 Můstek [12].....	16
Obr. 7 Chybějící spoj [13].....	16
Obr. 8 Kulička pájky vedle součástky [13]	17
Obr. 9 Popcorn efekt [7].....	17
Obr. 10 Tombstoning [11].....	18
Obr. 11 Voidy [13].....	18
Obr. 12 Whiskery [13]	19
Obr. 13 Dendrity [13].....	19
Obr. 14 Pájení vlnou.....	21
Obr. 15 Pájení ponorem [8].....	21
Obr. 16 Ruční pájení [1].....	22
Obr. 17 Pájení ohřevem IR zářiči [6]	23
Obr. 18 Pájení v parách [6]	24
Obr. 19 Stejnoseměrný zdroj HM7042-5 [30]	36
Obr. 20 Binokulární lupa HAWK DUO QC-5000 [31]	37
Obr. 21 Přetavovací tunelová pec Mistral 260 [32]	37
Obr. 22 Elektronový mikroskop Phenom ProX [33].....	38
Obr. 23 Návrh DPS s rozměry	39
Obr. 24 DPS před nanesením pasty.....	40
Obr. 25 DPS s přetavenou pájecí pastou	40
Obr. 26 Bez povrchové úpravy, bez masky, s tavidlem, vzdálenost elektrod 8,5 mm, 10 min.....	43
Obr. 27 OSP, bez masky, s tavidlem, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min.	44
Obr. 28 ENIG, bez masky, s tavidlem, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min.	45
Obr. 29 HAL, bez masky, s tavidlem, vzdálenost elektrod 6 mm, 20 min.	45

Obr. 30 Bez povrchové úpravy, s maskou, s tavidlem, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min.	46
Obr. 31 ENIG, s maskou, s tavidlem, vzdálenost elektrod 8,5 mm, 20 min.	46
Obr. 32 HAL, s maskou, s tavidlem, vzdálenost elektrod 8,5 mm, 20 min.....	47
Obr. 33 Bez povrchové úpravy, bez masky, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min.	47
Obr. 34 OSP, bez masky, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min.....	48
Obr. 35 HAL, bez masky, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min.	49
Obr. 36 Bez povrchové úpravy, s maskou, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min.	49
Obr. 37 OSP, s maskou, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min.....	50
Obr. 38 ENIG, s maskou, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min.....	50
Obr. 39 HAL, s maskou, bez tavidla, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min.....	51
Obr. 40 Detail dendritu na elektronovém mikroskopu	54
Obr. 41 Rozložení prvků na dendritu na desce bez povrchové úpravy	54
Obr. 42 Rozložení prvků na dendritu na desce s OSP	55

Seznam použitých zkratk

DPS – deska plošných spojů

SMD – surface mount technology

SPI – solder paste inspection

HAL – hot air leveling

ENIG – electroless nickel and immersion gold

OSP – organic solder preservatives

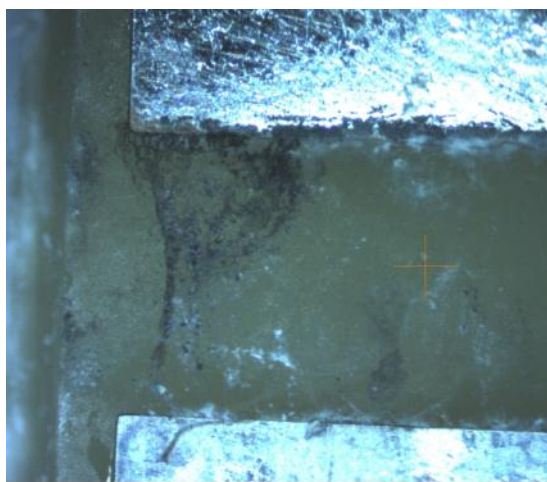
VOC-free – volatile organic compounds-free

FR4 – flame retardant 4

Přílohy



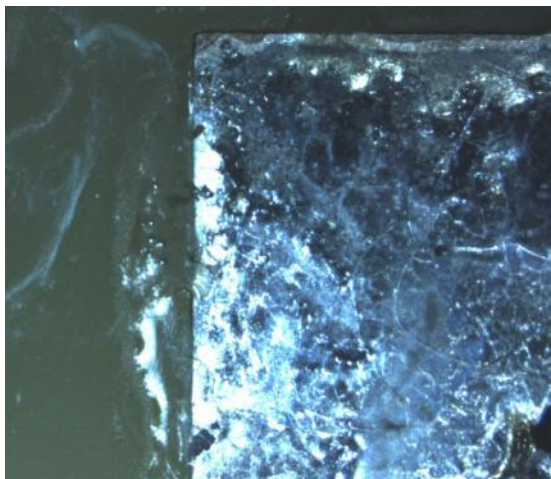
Bez povrchové úpravy, bez tavidla, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min., vzorek č. 1



Bez povrchové úpravy, bez tavidla, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min., vzorek č. 2



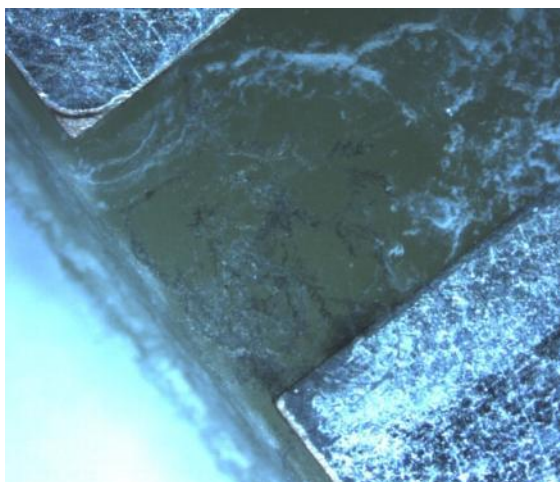
Bez povrchové úpravy, bez tavidla, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min., vzorek č. 3



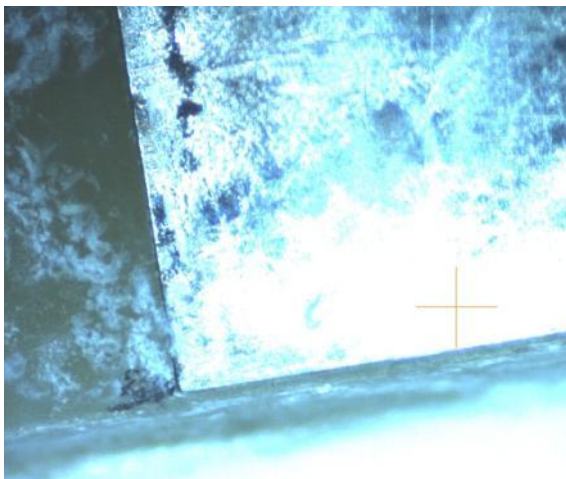
OSP, bez tavidla, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min., vzorek č. 1



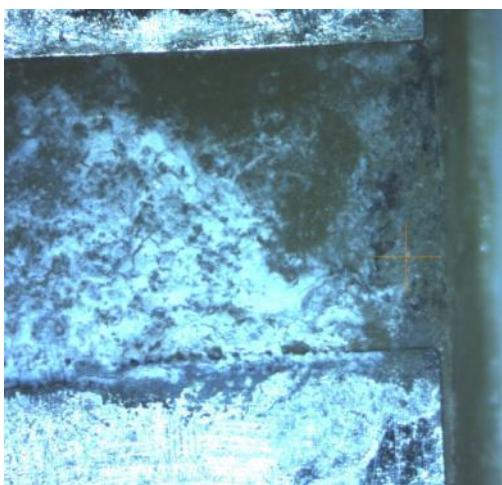
OSP, bez tavidla, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min., vzorek č. 1



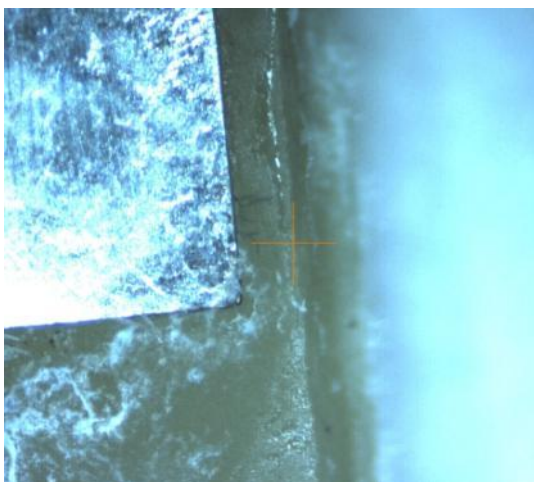
OSP, bez tavidla, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min., vzorek č. 3



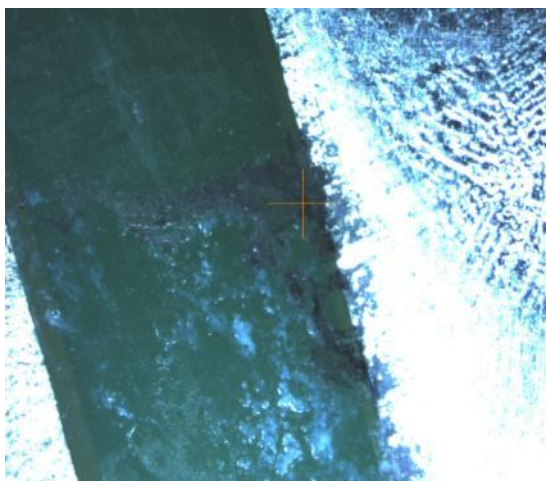
HAL, bez tavidla, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min., vzorek č. 3



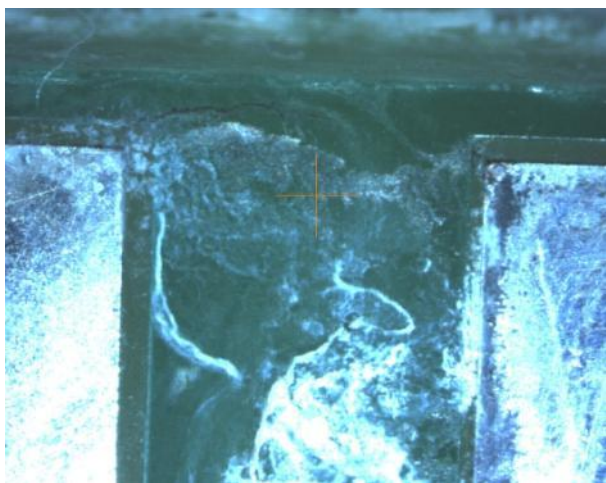
HAL, bez tavidla, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min., vzorek č. 3



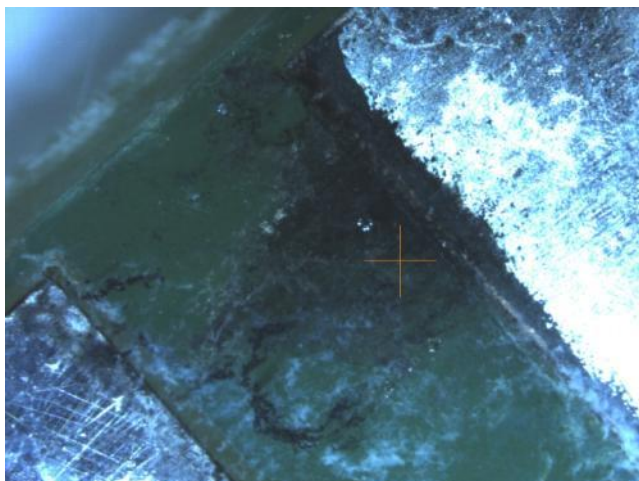
HAL, bez tavidla, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min., vzorek č. 5



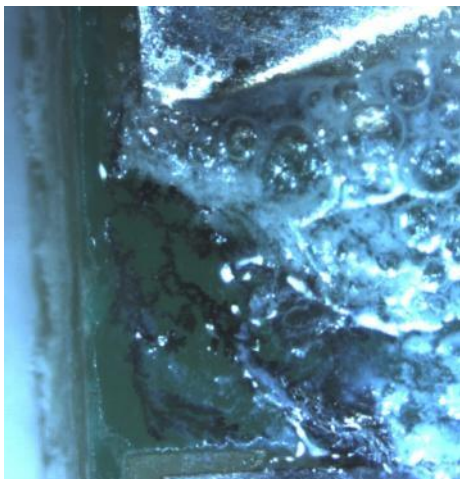
Bez povrchové úpravy, bez tavidla, s maskou, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min., vzorek č. 1



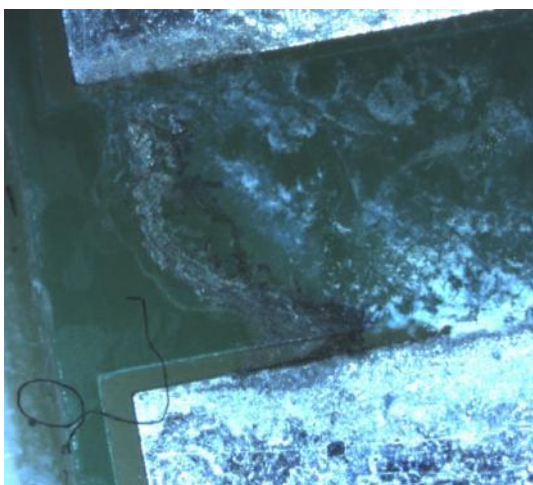
Bez povrchové úpravy, bez tavidla, s maskou, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min., vzorek č. 2



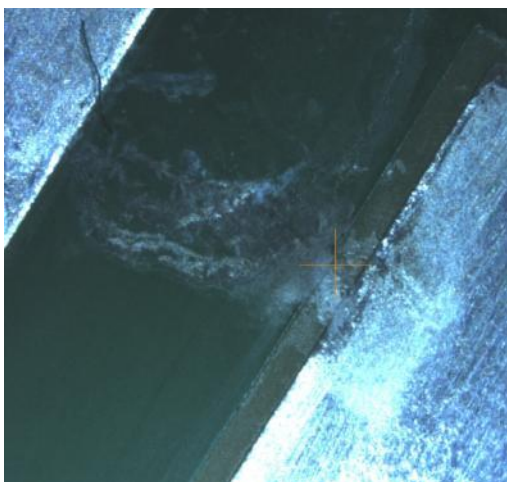
Bez povrchové úpravy, bez tavidla, s maskou, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min., vzorek č. 3



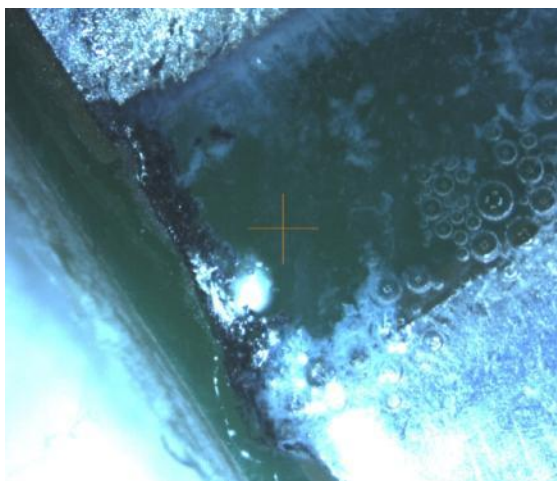
OSP, bez tavidla, s maskou, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min., vzorek č. 1



OSP, bez tavidla, s maskou, vzdálenost elektrod 2 mm, 20min., vzorek č. 5



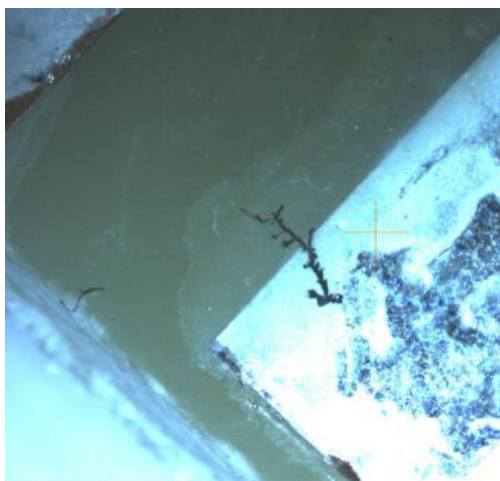
HAL, bez tavidla, s maskou, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min., vzorek č. 3



HAL, bez tavidla, s maskou, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min, vzorek č. 5



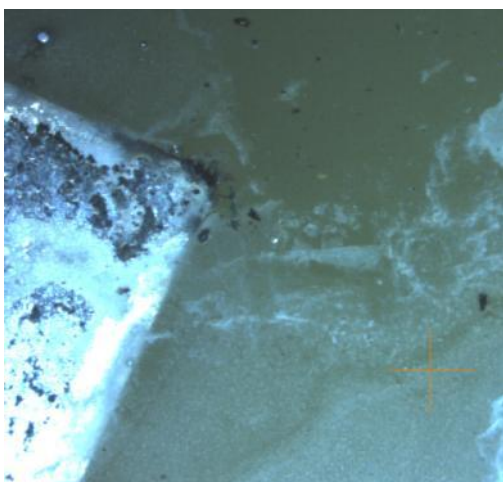
Bez povrchové úpravy, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 8,5 mm, 20 min., vzorek č. 2



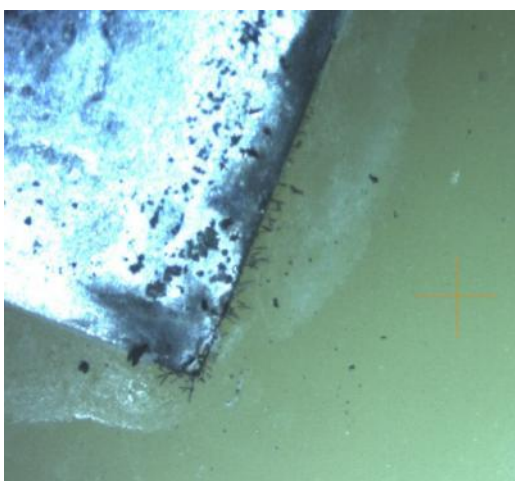
OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min., vzorek č. 1



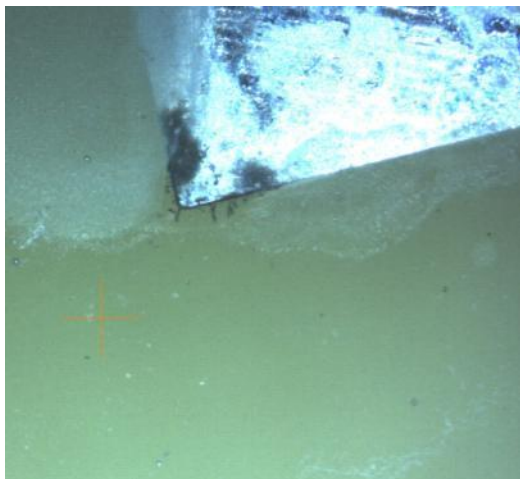
OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min., vzorek č. 1



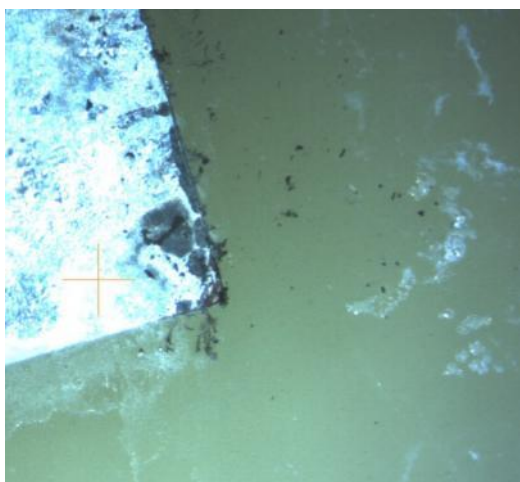
OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min., vzorek č. 2



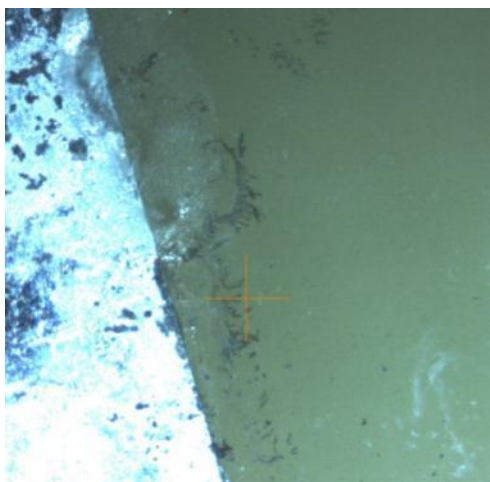
OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 8,5 mm, 20 min., vzorek č. 2



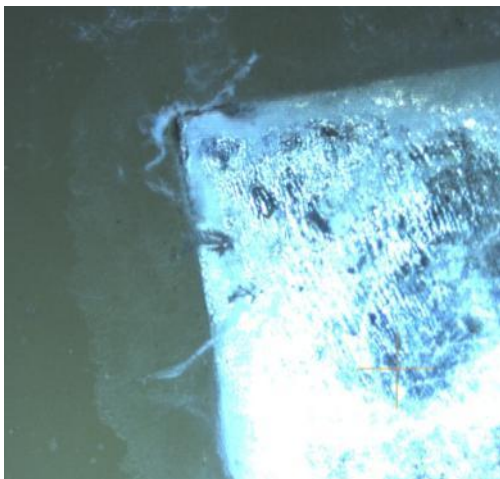
OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 8,5 mm, 10 min., vzorek č. 3



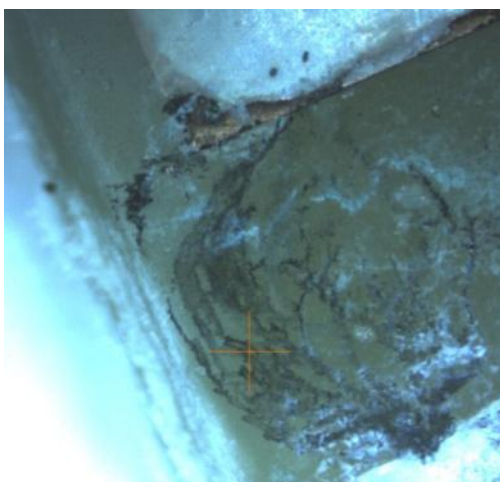
OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 6 mm, 20 min., vzorek č. 3



OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 6 mm, 20 min., vzorek č. 3



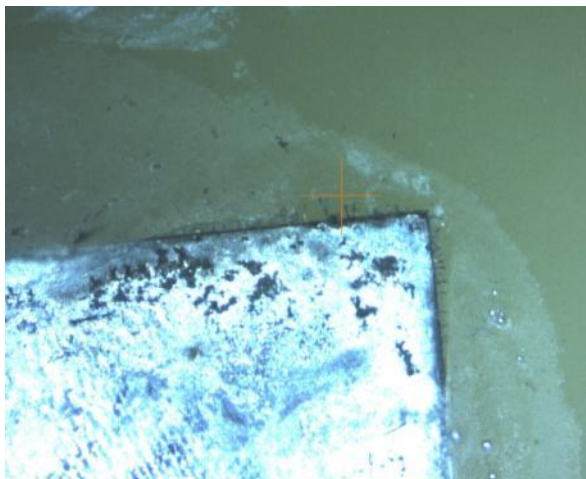
OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 4 mm, 10 min., vzorek č. 4



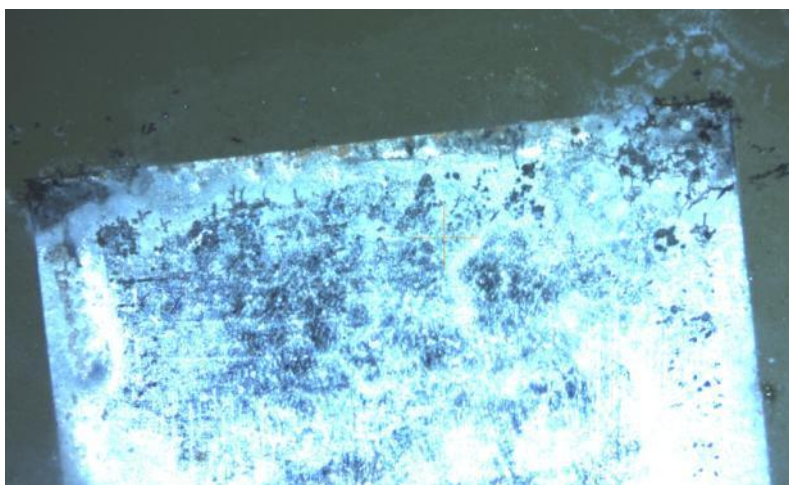
OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min., vzorek č. 4



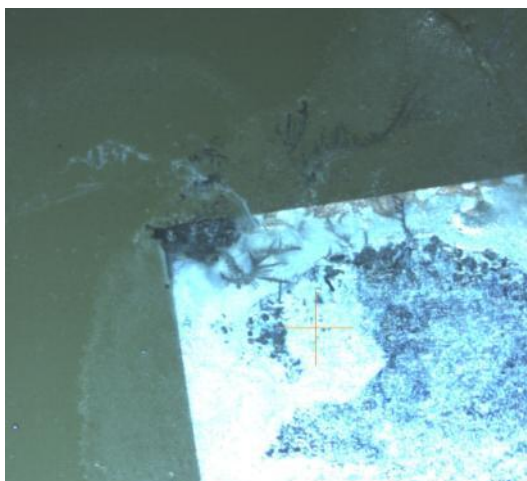
OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 8,5 mm, 20 min., vzorek č. 4



OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 4 mm, 20 min., vzorek č. 5



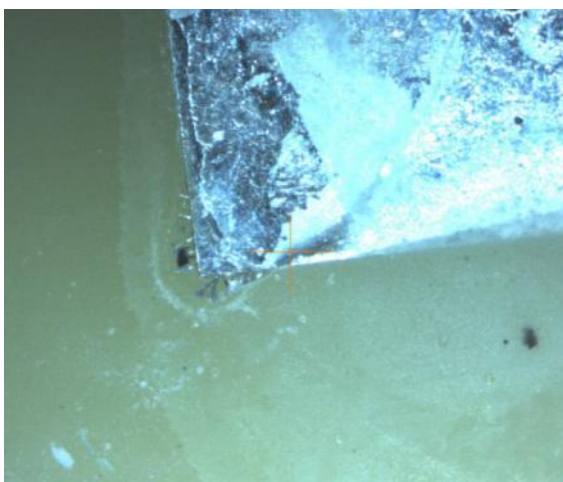
OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 6 mm, 20 min., vzorek č. 5



OSP, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 8,5 mm, 20 min., vzorek č. 5



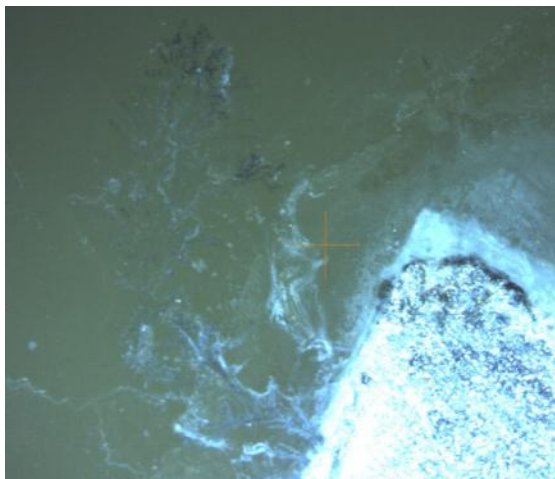
ENIG, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 6 mm, 20 min., vzorek č. 5



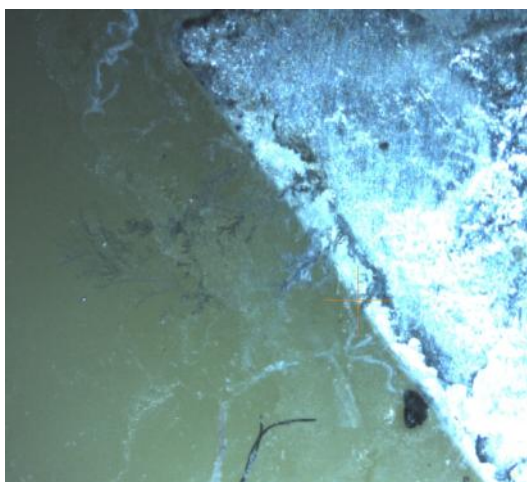
ENIG, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 8,5 mm, 20 min., vzorek č. 5



HAL, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min., vzorek č. 1



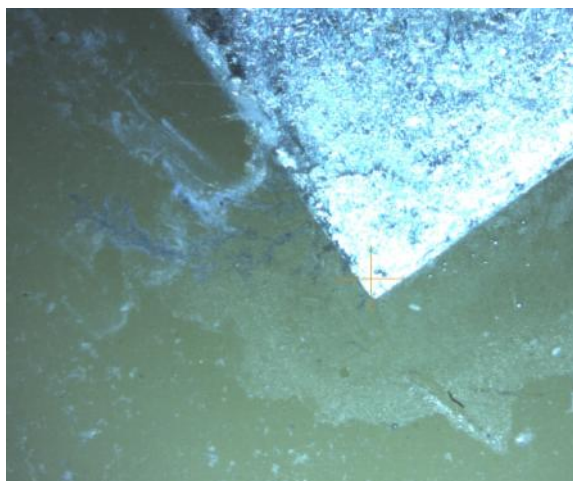
HAL, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 10 min., vzorek č. 1



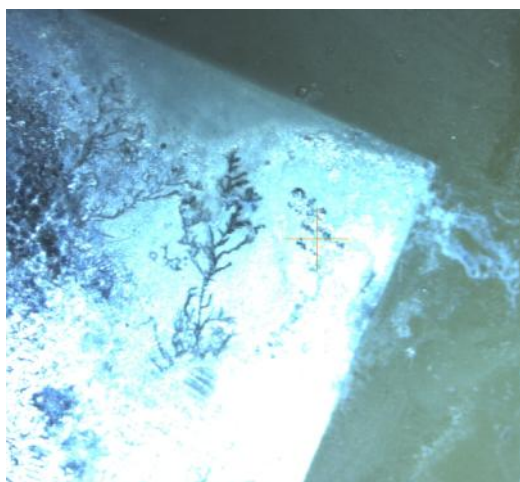
HAL, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 2 mm, 20 min., vzorek č. 1



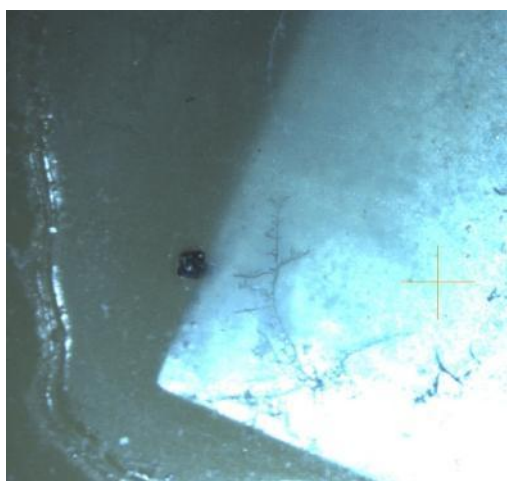
HAL, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 4 mm, 20 min., vzorek č. 1



HAL, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 6 mm, 20 min., vzorek č. 1



HAL, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 4 mm, 20 min., vzorek č. 4



HAL, s tavidlem, bez masky, vzdálenost elektrod 6 mm, 20 min., vzorek č. 4