

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



Studie elektrochemické migrace na povrchu desek plošných spojů

Study of Electrochemical Migration on Surface of Printed Circuit Boards

Diplomová práce

2022

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

Vedoucí práce: Ing. Petr Veselý, Ph.D.

Bc. Markéta Klimtová

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Klimtová** Jméno: **Markéta** Osobní číslo: **474589**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Studie elektrochemické migrace na povrchu desek plošných spojů

Název diplomové práce anglicky:

Study of Electrochemical Migration on Surface of Printed Circuit Boards

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši na tematiku chyb a problémů v povrchové montáži, zaměřte se na problematiku elektrochemické migrace – příčina, možné vlivy, dosavadní vědecké poznatky.
2. Navrhněte a proveďte experiment pro ověření vlivu nepájivé masky a designu pájecích plošek na výskyt elektrochemické migrace. K testování využijte některou/některé z běžně používaných metod evaluace elektrochemické migrace.
3. Výsledky experimentu vyhodnoťte. Uveďte závěry do praxe.

Seznam doporučené literatury:

- [1] PIETRIKOVÁ, Alena, ĎURIŠIN, Juraj a MACH, Pavel. Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike. 1. vyd. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [2] PUTTLITZ, K. J. a STALTER, K. A. Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies. CRC Press, 2004. ISBN 978-0824748708
- [3] ZHONG, Ziankang a další. Electrochemical migration of Sn and Sn solder alloys: a review. RSC Advances, roč. 7, č. 45, květen 2017. ISSN: 2046-2069. DOI: 10.1039/C7RA04368F

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Veselý, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **26.01.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

Ing. Petr Veselý, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

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

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Petrovi Veselému, PhD. za trpělivost, podporu a cenné rady při jejím zpracování. Poděkování patří samozřejmě i mé rodině, která při mně během celého studia stála.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá elektrochemickou migrací na deskách plošných spojů, konkrétně na vlivu nepájivé masky na elektrochemickou migraci. V této práci byly testovány dva různé návrhy desky plošných spojů s povrchovou úpravou HASL lišící se v návrhu vodivých cest (definované mědí, definované nepájivou maskou) a tři typy nepájivých masek lišící se v drsnosti povrchu spolu s deskou plošných spojů bez masky. Dále se vzorky lišily i v tom, zda na nich je nebo není aplikována pájecí pasta SAC s tavidlem ROL0. Zmíněné vzorky prošly dvěma testy na sledování elektrochemické migrace, water drop testem a teplotně vlhkostním testem. Dendrity byly následně opticky pozorovány na konfokálním a elektronovém mikroskopu, kde byla provedena i EDX analýza. Ukázalo se, že nejodolnější vůči migraci ze všech testovaných nepájivých masek byla černá maska. U návrhu desky definované mědí byly naměřeny celkově delší časy do poruchy a zároveň i nižší hodnoty zkratových proudů. Práce byla rozšířena i o kapitolu vlivu nedostatečně vytvrzené nepájivé masky, která, jak se ukázalo, má negativní vliv na elektrochemickou migraci a zvyšuje pravděpodobnost jejího výskytu.

Klíčová slova

elektrochemická migrace, dendrity, nepájivá maska, water drop test, teplotně vlhkostní test

Abstract

The master thesis focuses on the evaluation of electrochemical migration on the printed circuit board, specifically on the influence of the solder mask on electrochemical migration. Two printed circuit board designs with the HASL surface finish differing in the type of solder pad (solder mask-defined and copper-defined) and three types of solder masks with various surface roughness were tested. The boards were divided into two groups, one where the lead-free SAC solder paste with ROL0 flux was applied and one where it was not. These boards were subjected to Water Drop test and Thermal Humidity Bias test to evaluate electrochemical migration. Subsequently, dendrites were observed by confocal and scanning electron microscope, where EDX analysis was performed. The black solder mask with the roughest surface turned out to be the least prone to the electrochemical migration of all the tested solder masks. For the copper-defined pads, the longest overall times to failure and, at the same time, the lowest values of short-circuit currents were measured. The work was further extended by a chapter on the effect of insufficiently applied solder mask, which turned out to negatively affect electrochemical migration and increase the probability of its occurrence.

Key words

electrochemical migration, dendrites, solder mask, water drop test, thermal humidity bias test

OBSAH

ÚVOD.....	7
TEORETICKÁ ČÁST	8
1.1 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ	8
1.1.1 Výroba DPS.....	9
1.1.1.1 Základní materiál.....	9
1.1.1.2 Vodivé cesty	10
1.1.1.3 Nepájivá maska	10
1.1.1.4 Povrchová úprava mědi	12
1.2 POVRCHOVÁ MONTÁŽ.....	13
1.2.1 Chyby a problémy v povrchové montáži.....	14
1.2.1.1 Chyby vzniklé vlivem špatného návrhu a výroby	14
1.2.1.1.1 Nesmáčení	14
1.2.1.1.2 Odsmačení.....	14
1.2.1.1.3 Solder balls.....	15
1.2.1.1.4 Solder beading.....	16
1.2.1.1.5 Tombstoning.....	17
1.2.1.1.6 Voids.....	18
1.2.1.1.7 Solder bridging.....	19
1.2.1.2 Chyby vzniklé po čase působením okolního prostředí.....	20
1.2.1.2.1 Whiskery	20
1.2.1.2.2 Dendrity.....	21
1.3 ELEKTROCHEMICKÁ MIGRACE	22
1.3.1 Dendrity.....	23
1.3.2 Faktory ovlivňující ECM.....	26
1.3.3 Testovací metody	27
1.3.4 Vodivá anodická vlákna	28
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
1.4 MOTIVACE PRÁCE	30
1.5 POPIS EXPERIMENTU	30
1.5.1 Návrh a typy desek	30
1.5.1.1 Drsnost masek	32
1.5.1.2 Vzorky s pájecí pastou.....	34
1.5.2 Testovací program v LabVIEW.....	35
1.5.3 Experimenty.....	36
1.5.3.1 Water drop test	36

1.5.3.2	Teplotně vlhkostní test	37
1.5.4	Optické vyhodnocení, SEM a EDX analýza	38
1.6	VÝSLEDKY	39
1.6.1	Výsledky WD testu	39
1.6.2	Výsledky THB testu.....	41
1.6.3	Výsledky optické a SEM analýzy	49
1.7	DESKY S NESPRÁVNĚ APLIKOVANOU MASKOU.....	54
1.7.1	Výsledky WD a THB testu	55
1.7.2	EDX analýza.....	59
1.8	DISKUZE NAD VÝSLEDKY	62
	ZÁVĚR.....	64
	Seznam obrázků	65
	Seznam grafů.....	67
	Seznam tabulek	68
	Seznam použité literatury.....	69

ÚVOD

Miniaturizace elektronických zařízení s sebou nese nevýhody jako je větší možnost výskytu chyb a jejich různorodost. K těm nemusí dojít pouze během procesu pájení, který se s miniaturizací stává komplikovanější, ale i během samotného života zařízení. Vlivem působení tepla, vlhkosti, UV záření, elektrického proudu či dalších faktorů dochází k degradaci, která se pak může projevovat změnami v materiálu. V současnosti se v elektronické výrobě používá velice široké spektrum materiálů, u kterých je potřeba znát jejich chování v závislosti na čase. Obzvlášť pokud jde o kombinaci více materiálů, jelikož se degradace pro různé kombinace materiálů a různé podmínky může projevovat jinak. Tyto změny mohou mít za následek snížení účinnosti funkce zařízení, které pak omezuje i jeho spolehlivost a životnost.

Tato diplomová práce se zabývá tématem elektrochemické migrace na povrchu desek plošných spojů. Vzhledem k miniaturizaci elektronických zařízení a k rozšíření oblasti jejich působení je problém elektronické migrace čím dál tím aktuálnější. Je proto důležité z hlediska zvýšení spolehlivosti daných elektronických zařízení zjistit, při jakých podmínkách dojde k elektrochemické migraci pravděpodobněji a zároveň jak je možné ji omezit. Z toho důvodu jsem provedla studii na zkoumání vlivu závislosti elektrochemické migrace na druhu nepájivé masky lišící se drsností povrchu a na návrhu nepájivé masky z hlediska kontaktu masky s vodivými cestami. Ačkoliv existují mnohé studie zaměřené na různé faktory ovlivňující elektrochemickou migraci, vliv nepájivé masky není zatím důkladně prozkoumán.

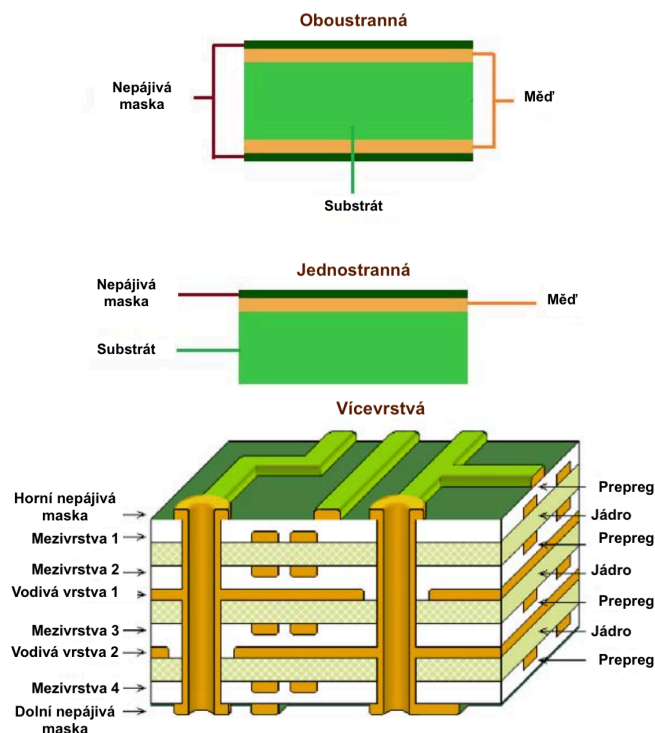
Práce je rozdělena do dvou částí, teoretické a experimentální. V teoretické části je přiblížena výroba desky plošných spojů. Najdeme zde i kapitolu týkající se povrchové montáže a chyb v ní se vyskytujících. V neposlední řadě je zde podrobně vysvětlena problematika elektrochemické migrace. Experimentální část pak popisuje přípravu, průběh a výsledky testování navrženého pro zkoumání elektrochemické migrace.

TEORETICKÁ ČÁST

1.1 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ

Desku plošných spojů (DPS) najdeme téměř v každé běžné elektronice, u počítačů, telefonů ale i například v hodinkách či kalkulačkách. DPS slouží jako mechanická podpora elektrických součástek na ní napájených. Její druhou funkcí je vodivé spojení těchto součástek bez použití kabelů, a to pomocí „natištěného“ obvodu na desce. V poslední řadě slouží i jako identifikátor těchto součástek, pomocí legendy, která je na desce vytištěna a použité součástky jsou v ní zmíněny [1–3].

DPS je možné dělit podle konstrukce na ohebné a neohebné, nebo podle typu vodivých cest na jednostranné, oboustranné a vícevrstvé. Co se týče použití, tak neohebné desky jsou běžnější a jsou to ty desky, se kterými se setkáváme na denní bázi. Jak z názvu druhého rozdělení vyplývá, jednostranné desky mají osazené součástky pouze z jedné strany. U oboustranných desek jsou vodivé cesty z obou stran. Následné vzájemné propojení obou stran se zhotovuje pomocí pokovených otvorů (dírami navrtanými skrz desku, které mají pokovený povrch). Posledním typem jsou vícevrstvé desky, které se skládají z více vrstev pokovených desek, kromě krajních horních a dolních jako je u oboustranných desek. Vodivé cesty těchto vrstev jsou také propojené pokovenými otvory [1, 2].



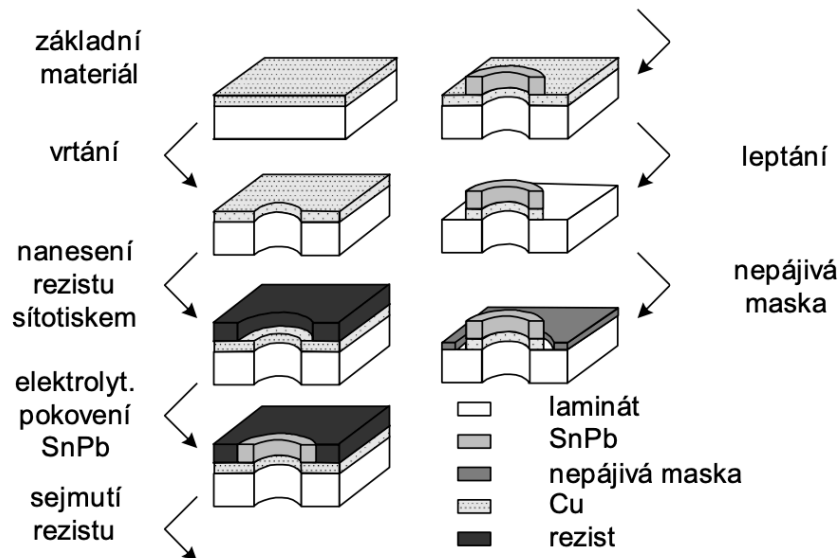
Obrázek 1: Typy DPS. Převzato z [4]

Vzhledem k tomu, že se tato práce nezaměřuje na technologické vlastnosti DPS, tak se pro zjednodušení při popisu DPS a její výroby zaměřím pouze na neohebné jednostranné desky.

1.1.1 Výroba DPS

Výroba DPS je komplikovaný proces s mnoha mezikroky a faktory, které mohou ovlivnit jejich finální kvalitu a spolehlivost [5].

Deska plošných spojů se skládá ze základního materiálu, na němž jsou vytvořeny měděné vodivé cesty. Základní materiál je navíc v místech, kde se nepředpokládá připevňování součástek, pokryt nepáživou maskou. Tam, kde jsou vodivé cesty nechráněny nepáživou maskou, se používá často jiný druh povrchové ochrany, která chrání měděný povrch pájecích plošek proti degradaci [6].



Obrázek 2: Schéma výroby DPS. Převzato z [7]

1.1.1.1 Základní materiál

Základní materiál (substrát) má především nosnou funkci. Materiálů pro substráty je mnoho a volí se podle jejich funkce, provozního prostředí a ceny. Z funkčního hlediska závisí především na mechanických a elektrických vlastnostech a hořlavosti. Co se týče provozního prostředí, tak tam se desky vybírají podle vlhkostní, teplotní a mechanické odolnosti [2].

Jedno z možných dělení materiálů podle složení na organické a anorganické látky. Mezi organické látky patří například různé pryskyřice (epoxidová, fenolformaldehydová, polyesterová), PTFE (Polytetrafluoretylen) nebo polyimid. Mezi anorganické materiály spadá keramika, korundová nebo beryliová. Organické materiály bývají oproti anorganickým vyztužené například skleněnými vlákny nebo tvrzeným papírem [6, 8, 9].

Nejpoužívanějším základním materiálem pro desky plošných spojů je v této době epoxidová pryskyřice vyztužená skleněnou tkaninou (sklotextit) s označením FR4 (Flame Retardant – ohnivzdorné). Nevytvrzenému impregnovanému sklotextitu epoxidovou pryskyřicí se říká prepreg. Finální FR4 pak vzniká vysušením a tepelným slisováním více prepregů tak, aby bylo dosaženo potřebné tloušťky substrátu. FR4 se volí kvůli dobrým mechanickým, elektrickým vlastnostem, chemické odolnosti a výborné přilnavosti jak mezi jednotlivými prepregy, tak i k měděné vodivé vrstvě [1, 2, 9].

1.1.1.2 Vodivé cesty

Nanesení vodivých cest neboli motivu plošných spojů se provádí buď aditivní nebo subtraktivní metodou. Zdaleka nejčastějším materiálem vodivých cest je měď, ale můžeme se výjimečně setkat i se stříbrem, hliníkem, zlatem nebo mosazí [2].

Subtraktivní metoda spočívá v odleptávání mědi v místech, kde vodivé cesty nechceme. Na základní materiál se nalisuje měděný plát, který bude selektivně odleptáván tak, že zůstane pouze motiv plošných spojů. Touto metodou lze vytvořit desky plošných spojů všech typů. Nejdřív se na desku nanese vrstva fotorezistu, která bude přes masku kopírující motiv plošných spojů následně osvětlena UV zářením. Poté se rozpustitelný fotorezist omyje a zbyde pod ním pouze čistá měď. V případě pozitivního fotorezistu se po osvětlení stane ozářená část fotorezistu omyvatelná. U negativního fotorezistu je rozpustitelná neosvětlená část. Poté se deska namočí do leptací lázně a v místech, kde není chráněná vyvolaným fotorezistem, se odleptá. Po zbavení se přebytečné mědi je odstraněn i zbytek fotorezistu, který chránil měď a zbyde pouze požadovaný motiv plošných spojů [1, 2, 6].

Aditivní metoda není tolik běžná jak subtraktivní metoda vzhledem ke své ceně. Její použití ale eliminuje chyby způsobené subtraktivní metodou jako jsou například podleptání spojů a zkratky zapříčiněné zbytky neodleptané mědi. Zároveň se touto metodou dají prokovit otvory a vytvořit detailnější motivy. Aditivní metoda spočívá v pokovování substrátu mědí nanášenou chemickou cestou bez přítomnosti elektrického proudu [2, 6, 8].

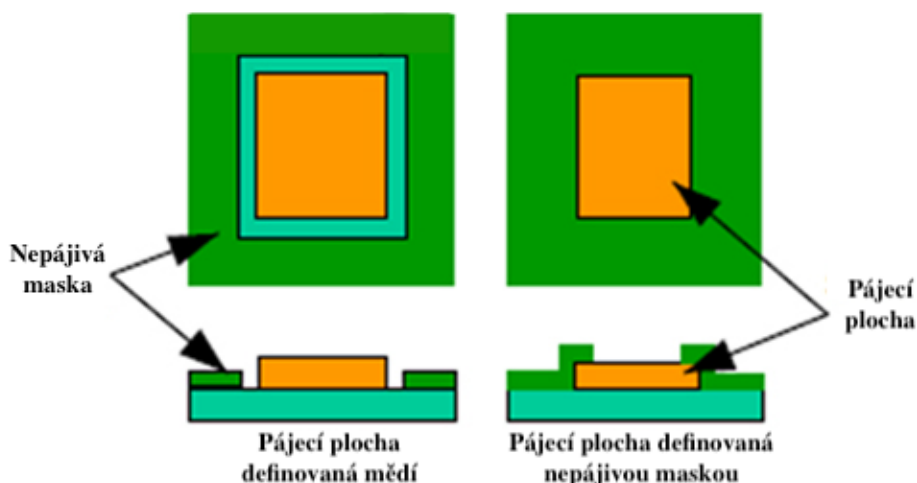
1.1.1.3 Nepájivá maska

Nepájivá maska se nanáší všude na desku kromě míst, kde se předpokládá připájení součástek či kontaktování. Její primární funkcí je zabránění smáčení mědi mimo pájecí plošky. Jak už vypovídá z názvu, povrch nepájivé masky nesmáčí, a pájka se tedy drží pouze na daných pájecích ploškách. S tím souvisí i další funkce masky, kdy slouží jako elektrická izolace, například mezi dvěma blízkými vodivými částmi obvodu. Dalším důvodem použití nepájivé masky je její ochranná funkce. Zvyšuje mechanickou pevnost desky a chrání měď před provozním prostředím. Tím se myslí především ochrana před oxidací a vlhkostí, ale i mechanickým

poškozením. Nepájivé masky jsou tvořeny většinou epoxidovými materiály. Mohou se od sebe navzájem lišit v různých parametrech (barva, lesk, tloušťka atd). Většinou mají masky barvu zelenou, jsou ale k dostání i v ostatních barvách (žlutá, černá, bílá, modrá, červená, atd). Nepájivé masky se od sebe mohou lišit i svou úrovní lesku (lesklé, pololesklé, polomatné, matné), od čehož se odvíjí například odrazivost světla či drsnost povrchu [1, 5, 6, 10, 11].

Aplikace masky může probíhat různě, záleží na její podstatě. Nepájivé masky mohou být fotocitlivé, kdy se nanáší pomocí fotolitografie nebo mohou být nanášeny přímo. V případě aplikace fotocitlivé masky probíhá nanášení podobně jako u fotorezistu, kdy se nanese nepájivá maska na celý povrch desky, kde následně dojde k vytvrzení potřebných míst a vytvoření požadovaného designu. Nanesení tekuté masky na desku může probíhat například sítotiskem, sprejováním či clonováním. V případě tuhé masky se nanese na desku laminací fólie, které se přes masku osvítlí UV zářením. Nevytvrzená část masky se pak omyje. V případě nepájivých masek, které se nanášejí přímo, se musí maska nanést přesně a pouze na požadovaná místa, jelikož je maska neomyvatelná. To lze provést například technologií InkJet, kdy dochází k přímému tisku masky na požadovaná místa tiskovou hlavicí a zároveň i k jejímu vytvrzení [11, 12].

Při návrhu desky plošných spojů je důležité dbát i na design nepájivé masky. Často se mezi pájecí plošky dává nepájivá maska, aby se předešlo případným poruchám vzniklým přemostěním pájky. Vložení nepájivé masky mezi plošky se nazývá tzv. *Solder dam*, kde dam znamená anglicky přehrada. V případě nesprávného nanesení pájky (velké množství, nepřesně nanesené na plošky) slouží nepájivá maska mezi plošky jako dělicí prvek, který zvyšuje spolehlivost DPS. Je ale možné, že je deska navržena tak, že mezi ploškami není dostatek místa na aplikaci nepájivé masky. V tom případě lze nanést nepájivou masku i přes část vodivé plošky. Oproti předchozímu případu, kdy byly rozměry vodivé plošky definovány velikostí mědi, je v tomto případě velikost plošky definována rozměry nepájivé masky [11].



Obrázek 3: Design nepájivé masky. Převzato z[13]

1.1.1.4 Povrchová úprava mědi

Stejně jako nepájivá maska slouží k ochraně vodivých cest před provozním prostředím v místech, kde nebudou připájeny součástky, tak povrchová úprava slouží k ochraně odhalené mědi v místech, kde se počítá s připájením součástek. Provádí se až po nanesení nepájivé masky. Před procesem pájení chrání vodivá vrstva měď před oxidací a ostatními vlivy provozního prostředí, což uchovává měď pájitelnou [1, 11].

Existuje více druhů povrchových úprav lišící se materiálem, technologií a výslednými vlastnostmi. HASL (Hot Air Solder Leveling) patří mezi základní povrchovou úpravu a spočívá v ponoření desky plošných spojů do roztavené slitiny, kde je zbytek pak odstraněn horkovzdušným nožem. Slitina může být z cínu a olova. Dnes ale existují převážně bezolovnaté aplikace, které obsahují kromě původního cínu například měď, nebo měď se stříbrem nebo niklem. Výhodou této úpravy je nízká cena, výborná skladovatelnost a dostupnost a také možnost opravy. Nevýhoda spočívá v nerovnoměrném povrchu vrstvy a ve vyšší pravděpodobnosti výskytu můstků a intermetalických vrstev [5, 11, 14, 15].

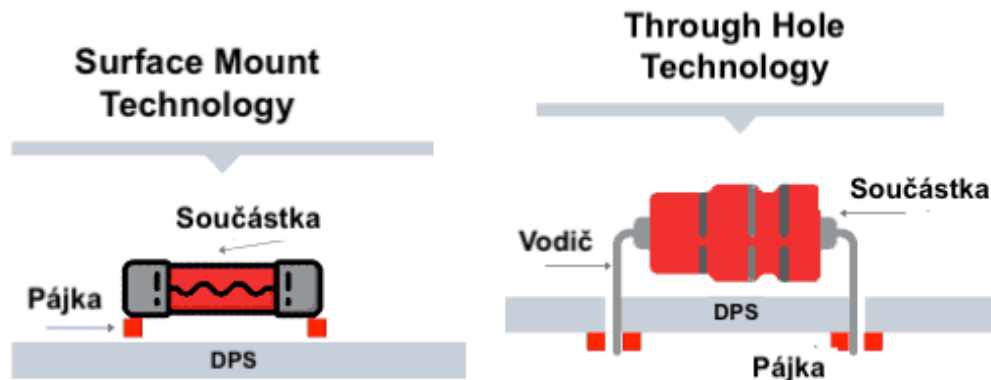
OSP (Organic Surface Protection) je povrchová úprava organického složení na vodní bázi, na měď se váže pomocí Van der Waalsových sil. Jedná se o levnou technologii s dobrými vlastnostmi (smáčitelnost, rovnoměrnost povrchu, tepelná a vlhkostní odolnost). Jedním ze zásadních mínusů této úpravy je nízká skladovatelnost [5, 11, 14, 15].

ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold) spočívá v pokovení vodivých cest imerzním zlatem. Jde o technologii chemického bezproudového pokovování. Zlato má výborné povrchové vlastnosti (dobrá smáčitelnost, neoxiduje), pokud by ale přišlo do přímého kontaktu s mědí, začalo by s ní reagovat. Z tohoto důvodu se mezi měď a zlato vkládá vrstva niklu. Vrstva niklu tedy zabraňuje tvoření intermetalických sloučenin a vrstva zlata pak naopak chrání nikl před oxidací. Typická tloušťka vrstvy niklu se pohybuje řádově v jednotkách mikrometrů (3 – 5 μm), u zlata bývá vrstva tlustá od setin až po desetiny mikrometrů (0,05 – 0,15 μm). Vzhledem k použití zlata se tato povrchová úprava vyznačuje vysokou cenou. Její výhodou je dobrá rovinnost povrchu, která umožňuje pájení BGA pouzder či dalších drobných součástek [11, 12, 14, 15].

Poslední zmíněnou povrchovou úpravou je chemické pokovení imerzním cínem. V tomto případě je cín a měď v přímém kontaktu, a proto zde hrozí pravděpodobný vznik intermetalických sloučenin. Výhodou této technologie je ale nízká cena a rovnoměrný povrch [14, 15].

1.2 POVRCHOVÁ MONTÁŽ

Povrchová montáž, anglicky Surface Mount Technology (odtud široce používaná zkratka SMT), představuje v dnešní době nejvýznamnější technologii montáže součástek. Na rozdíl od technologie prokovených otvorů (Through Hole Technology – THT) se součástky montují na povrch desek plošných spojů, nikoliv skrz desku. Tělo součástky a její kontakty jsou tedy na stejné straně desky [16].



Obrázek 4: SMT vs. THT. Převzato z [17]

Celá montáž musí být velice přesná, proto se pro usazování součástek využívá osazovacích zařízení. Před procesem přetavení, který je dominantním pájecím procesem u povrchové montáže, a usazením součástek se na pájecí plošky nanese pájecí pasta. Pájecí pasta obsahuje složky tavidla a pájky a její nanášení probíhá většinou sítotiskem, kdy se přes šablonu pomocí tlaku stěrky protlačí na potřebná místa pájecí pasta. Následuje usazení součástek na dané pájecí plošky s pájecí pastou a proces přetavení pájecí pasty a vytvoření pájených spojů. V sériové výrobě se využívá pájení přetavením nebo laserem. V případě pájení vlnou je nutné navíc součástky před procesem na desku přilepit vodivým lepidlem (deska se při pájení otočí vzhůru nohama). Vzhledem k tomu, že pájení probíhá na stejné straně jako jsou součástky, musí být odolné vysokým teplotám (neplatí v případě pájení laserem, tam je teplotní namáhání minimalizováno) [8, 16].

Povrchová montáž má oproti THT nespočet výhod. Součástky, resp. deska plošných spojů, mají menší rozměry a hmotnost. SMT zároveň umožňuje oboustranné osazování a vyšší hustotu součástek a obvodů na desce. Výrobky jsou pak odolnější proti otřesu, vibracím a práci při vysokých frekvencích. Proces SMT je vzhledem k vysokému stupni automatizace a nepotřebnosti zasouvat dlouhé vývody skrz desku rychlejší. Dochází k menšímu množství chyb při osazování, náklady na výrobu jsou nižší a celková spolehlivost desek vyšší. Kvůli krátkým nebo žádným vývodům jsou parazitní kapacity a indukčnosti nižší než u THT součástek. SMT se ale nehodí pro všechny aplikace vzhledem k tomu, že ne všechny typy součástek jsou pro tuto

technologii dostupné (např. velké elektrolytické kondenzátory, konektory, apod.). V tom případě je možná kombinace těchto dvou technologií [8, 16, 18, 19].

1.2.1 Chyby a problémy v povrchové montáži

V této kapitole se budeme věnovat vybraným problémům v povrchové montáži. Kvůli zákazu používání pájek obsahující olovo v běžných aplikacích a zmenšování rozměrů součástek a vzdáleností mezi nimi se stává SMT čím dál více složitější [12, 19]. Chyby jsem rozdělila do podkapitol podle typu jejich vzniku – zda k nim dochází už přímo při montáži, nebo se projeví až za určitou dobu provozu.

1.2.1.1 Chyby vzniklé vlivem špatného návrhu a výroby

1.2.1.1.1 Nesmáčení

Nesmáčení lze poznat tak, že pájka nesmáčí část nebo celý pájený povrch (pájecí plošku nebo vývody). Nedojde ke kontaktu pájky po celé ploše pájeného povrchu, a je tedy viditelný pájený kov, který bychom správně vidět neměli. Nesmáčení může být způsobeno nečistotami na pájeném povrchu z předchozích technologických procesů, oxidací, či mastnotou, která zabrání kontaktu tavidla a pájené plošky. Další příčinou může být špatně zvolené tavidlo nebo teplotní profil, kdy se při procesu pájení deska dostatečně neprohřeje a tavidlo se neaktivuje. Špatně provedená nepájjivá maska může také ovlivnit nesmáčení povrchu. Například mezi problémy nedostatečně vytvrzené masky spadá vysoká iontová kontaminace, která snižuje smáčení povrchu. Jako poslední příčinu zde uvedu nedostatečnou smáčivost základního materiálu. Například bezolovnaté pájky smáčí holou měď oproti olovnatým pájkám hůře, a proto se používá povrchových úprav [10, 11, 16, 20–22].

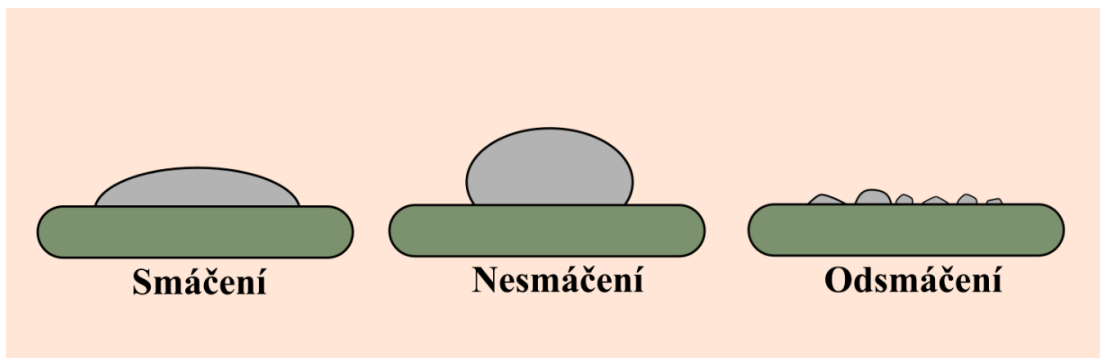
Jako řešení problému nesmáčení se uvádí důraz na dostatečnou čistotu pájeného povrchu a změnu teplotního profilu podle doporučení výrobce tak, aby došlo k aktivaci tavidla. Dalším možným řešením je volba jiného vhodnějšího tavidla a nanesení povrchové úpravy [12, 21, 22].

1.2.1.1.2 Odsmačení

Odsmačení je stav, kdy se pájka začíná stahovat z povrchu, který dříve plně smáčela. Na místech, odkud se pájka stahuje vlivem nízké přilnavosti, zůstává stále tenká vrstvička pájky, a tedy pořád pokrývá celý pájený povrch na rozdíl od nesmáčení. Tam, kam se ale stáhl zbytek pájky, vznikají nepravidelné tlusté výstupky [10, 16].

Odsmačení může být způsobeno znečištěním povrchu (oxidací) nebo špatným výběrem pájecí pasty, tavidla nebo povrchové úpravy. Delší zahřívání desky může vést ke vzniku

intermetalických vrstev (Cu_3Sn), která není smáčivá. Zároveň se tím změní složení pájecí slitiny, například snížení podílu cínu, zvýšení podílu olova, což také vede k odsmáčení. Je tedy důležité se ujistit, že před pájením je povrch zbaven všech oxidů. Bude-li proudit dusík v peci během procesu přetavení, zabrání se tvorbě oxidů při vysokých teplotách a sníží se pravděpodobnost odsmáčení. Pokud bychom se rozhodli odsmáčený povrch (při pájení vlnou) znovu zapájet, většinou se problém nevyřeší [10, 20, 23].



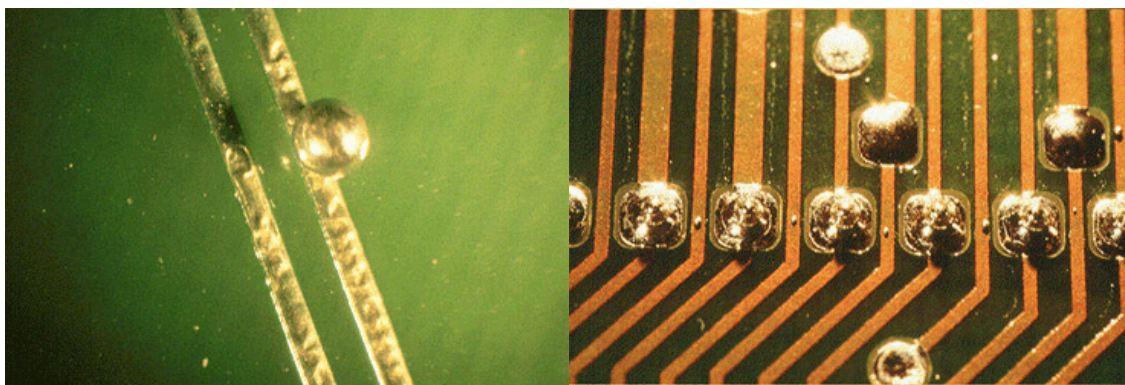
Obrázek 5: Smáčení, nesmáčení a odsmáčení

1.2.1.1.3 Solder balls

Jak už z anglického názvu vypovídá, solder balls čili kuličky pájky, jsou velmi malé kuličky pájky, které vzniknou oddělením z hlavního pájeného spoje. Nachází se tedy v jeho blízkosti, ale ke zpětnému spojení s hlavním spojením nedojde. Mohou ohrozit elektrický obvod tím, že přemostí (zkratují) opačně orientované elektrody. Problém se týká hlavně použití pájecích past, které obsahují bezoplachová (no-clean) tavidla. V případě past s oplachovými tavidly jsou totiž při čištění kuličky většinou odstraněny [21, 22].

Mezi příčiny vzniku pájecích kuliček patří chybné nanášení pájecí pasty, jako je například špatný tlak stěrky, přítomnost pájecí pasty nebo zbytku mycího roztoku na spodní straně šablony anebo špatné zarovnání šablony, které vede k nanášení pasty na nepájivou masku místo na pájecí plošky. Na vině může být i vadná pájecí pasta, kdy její prášková složka obsahuje příliš oxidů anebo byla vystavena vlhkému prostředí a během procesu přetavení dochází k rozstříku pájky do blízkého okolí. K rozstříku pájky do okolí dochází i vlivem nevhodného teplotního profilu, kdy přehřívání probíhá tak rychle, že se tavidlo nestačí odpařit postupně. Poslední zde zmíněnou příčinou pájecích kuliček je nevytvrzená nepájivá maska, resp. laminát [21, 22, 24].

Abychom zabránili tvorbě pájecích kuliček, je nutné před tiskem zkontrolovat čistotu a správné zarovnání šablony. Zároveň bychom neměli vystavovat pájecí pastu vlhkému prostředí a měli bychom zvolit správný teplotní profil podle doporučení výrobce. Pájecí kuličky je také možné v některých případech odstranit znovu přepájením desky [21, 22, 24].



Obrázek 6: Solder balls. Převzato z [25]

1.2.1.1.4 Solder beading

Solder beading, v překladu pájecí korálky, je vada podobná pájecím kuličkám. Dochází k tvorbě větších pájecích kuliček, které se nachází v blízkosti součástek. Na rozdíl od pájecích kuliček přilnou spíše k diskretní součástce než k vícevývodovým součástkám. Přítomnost korálek snižuje spolehlivost zařízení, jelikož se kvůli nim snižují vzdálenosti mezi součástkami a zároveň může dojít k jejich uvolnění, kdy hrozí i zkratování obvodu. Naštěstí je tato chyba snadno detekovatelná optickými zařízeními. K tomuto problému může docházet v případě, kdy se pasta nanese na desku v nadměrném množství, pokud se nanese mimo pájecí plošky, anebo když je usazovaná součástka příliš natlačena na pastu. V prvním a posledním případě může totiž dojít k vytlačení pasty mimo pájecí plošku, která se může dostat i pod tělo součástky. Dalším možným důvodem je nevhodně zvolený teplotní profil, kdy může dojít během aktivace tavidla k jeho odplyňování vedoucí k tvorbě korálek. Pasta ve všech případech není schopná se zpátky připojit k hlavnímu pájenému spoji a vytváří tedy určité riziko pro spolehlivý chod obvodu [20–23].

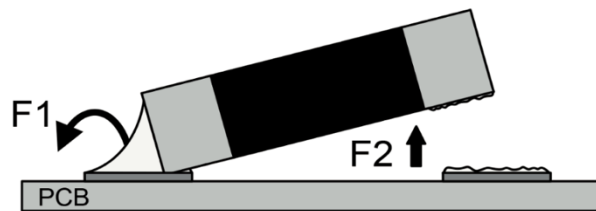


Obrázek 7: Solder beading. Převzato z [26]

Vhodným řešením je v tomto případě snížení množství aplikované pasty. To se může provést buď snížením tloušťky šablony nebo zmenšením otvorů v šabloně. Zpravidla by mělo stačit zmenšit otvor o 10 % jeho velikosti na straně, kde dochází ke tvorbě korálek. Zároveň se doporučuje snížení přítlačné síly při usazování součástky a změna teplotního profilu [22, 24].

1.2.1.1.5 Tombstoning

Tombstoning představuje problém, při kterém dojde ke zdvihnutí jedné strany součástky z pájecí plošky. Týká se to především malých, dvou vývodových součástek. Součástka se zvedne tak, že na jedné straně je pořád připájena, ale druhá strana je ve vzduchu a není už v kontaktu s ploškou (došlo tedy k přerušení vodivého spojení). Těto poruše se také říká efekt náhrobního kamene, the Manhattan effect, the Stonehenge effect nebo i drawbridging. Tombstoning je způsoben nerovnoměrným povrchovým napětím pájky při procesu přetavení. V ideálním případě se smáčí obě plošky najednou, pokud ale dojde ke smáčení na jedné straně dříve než na druhé, nebude na plošky působit stejná síla. Pájka na straně, která smáčí dříve, k sobě může součástku přitáhnout, čímž může dojít k jejímu posunutí z ideální polohy a nazdvihnutí [12, 21–23].



Obrázek 8: Tombstoning. Převzato z [20]

To, že se jednotlivé strany smáčí v jinou dobu, může být způsobeno rozdílem teploty mezi jednotlivými stranami. K rozdílnému zahřívání může dojít vlivem nerovnoměrného rozložení teploty v pájecí peci, odlišných velikostí pájecích plošek a různého množství aplikované pájky. Mezi další příčiny tombstoningu patří špatné usazení součástky, kdy na jedné straně není součástka dostatečně v kontaktu s pájkou anebo manipulace s osazenou deskou během nebo těsně po procesu pájení, který vede k posunutí součástky. Pájka v těchto případech nevykazuje dostatečnou sílu, aby součástku udržela. Tato síla se snižuje i v případě, když je pájka vystavena vlhkosti či vyšší teplotě. Ke zdvihnutí součástky také může dojít při aktivaci tavidla, kdy výpary vytlačí součástku vzhůru [12, 20–23].

Abychom se vyhnuli této chybě, je důležité dávat pozor na správné usazení součástek, resp. na dostatečnou pájecí sílu. Doporučuje se, aby součástka pokrývala na každé straně alespoň 50 % pájecí plošky. Zároveň by se měla zajistit stálá výška nanesené pasty a vyhnout se manipulaci během a po procesu pájení a extrémním provozním podmínkám. Prodloužení a zvýšení teploty předehřívání (podle doporučení výrobce) při procesu přetavení by mělo vést k rovnoměrnějšímu ohřátí, a tedy minimalizaci teplotního rozdílu [12, 21, 22].

1.2.1.1.6 Voidy

Voidy představují dutiny v pájených spojkách. Bývají většinou prázdné, ale můžou se v nich objevit zbytky tavidla. Voidy vznikají především během pájení vlivem vypařování tavidla a jejich přítomnost představuje určité spolehlivostní riziko. Jsou nevodivé, zvyšují proto odpor spoje a mění jeho vodivou (elektrickou, tepelnou) cestu, což může vést k teplotnímu namáhání. Použití bezolovnatých pájek je z tohoto hlediska méně spolehlivé, jelikož vykazují vyšší množství voidů. Existuje více druhů voidů a dělí se na následující: makrovoidy, mikrovoidy, shrinkage voidy, mikrovia voidy, kirkendallové voidy a pinhole voidy [12, 20].

Makrovoidy se objevují nejčastěji ze všech voidů. Vznikají na rozhraní pájky a substrátu kvůli vypařování tavidla, ale časem se mohou dostat kamkoliv v objemu pájky. Průměr makrovoidů se pohybuje v rozmezí od 100 do 300 μm . Jejich vliv může být jak negativní, kdy má vliv na mechanické vlastnosti spoje, tak i pozitivní, kdy void zabrání dalšímu rozšiřování prasklinek ve spoji. Vznik makrovoidů je ovlivněn hlavně vlastnostmi pájecí pasty a zvoleným teplotním profilem [12, 20].

Mikrovoidy vznikají v jedné rovině na rozhraní pájky a substrátu nad intermetalickou vrstvou. S velkým množstvím klesá výrazně mechanická pevnost, a to má na pájený spoj negativní účinky. Příčina vzniku ještě není známá, ale ví se, že se mikrovoidy objevují u povrchových úprav ENIG, OSP a úprav obsahující stříbro. Průměr mikrovoidů je menší než 50 μm [12, 20].

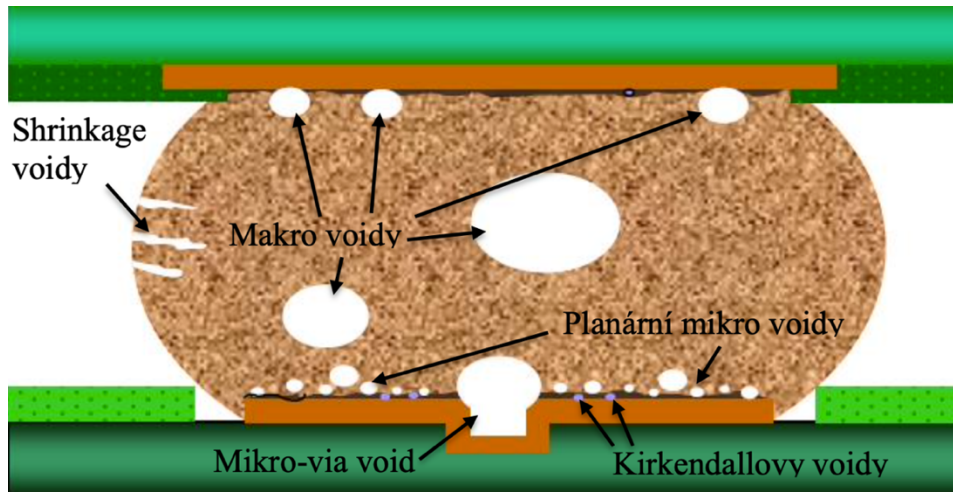
Shrinkage voidy (v překladu shrinkage znamená srážení) vznikají při tuhnutí (smršťování) pájky během jejího chlazení. Vyskytují se na povrchu spoje a vypadají jako malé prasklinky, které směřují do jeho středu. Tvorba shrinkage voidů je typická u SAC pájecích slitin. Tyto voidy by neměly mít špatný vliv na kvalitu spoje, resp. žádný vliv nebyl dokázán. Pokud bychom jim ale chtěli předejít, je to možné pomocí kontrolovaného chlazení pájky [12, 20].

Mikro-via voidy vznikají vlivem unikajícího plynu z pokoveného otvoru vodivě spojující různé vrstvy DPS (mikro-via). K úniku plynu dochází během pájecího procesu a může jít například o zbytky tavidla či uzavřený vzduch. Příčinou těchto voidů je nízká smáčitelnost pájky v oblasti mikro-via, kde pájka není schopná smáčet povrch otvorů. Vzhledem k negativnímu vlivu těchto voidů na mechanickou spolehlivost spoje je na ně nutné brát při návrhu DPS ohled, a neumísťovat pájené spoje přímo nad mikro-via [12, 20].

Kirkendallové voidy vznikají na rozhraní mědi a intermetalické vrstvy, která tam vzniká. Většinou k těmto voidům dochází při spojení mědi a cínu. Vlivem rozdílných difúzních koeficientů (cín má nižší hodnotu) dochází k tomu, že cín proniká do mědi pomaleji, než měď

do cínu a ve volných místech vznikají voidy. Není to tedy vada, ke které dojde během pájecího procesu, ale projeví se až časem a po vystavení vyšším teplotám [12, 20].

Pinhole voidy (pinhole v překladu znamená dírka) dosahují velice malých rozměrů, průměr okolo 1 až 3 μm . Vyskytují se v intermetalické vrstvě nebo, stejně jako Kirkendallové voidy, mezi intermetalickou vrstvou a mědí. Na jejich vznik mají vliv předcházející procesy výroby desky plošných spojů a látky použité během těchto procesů. Zbytky látek, které na desce po výrobě zůstaly, se při pájení uvolní z desky ve formě plynů a tvoří pinhole voidy [12, 20].



Obrázek 9: Různé druhy voidů. Převzato z [27]

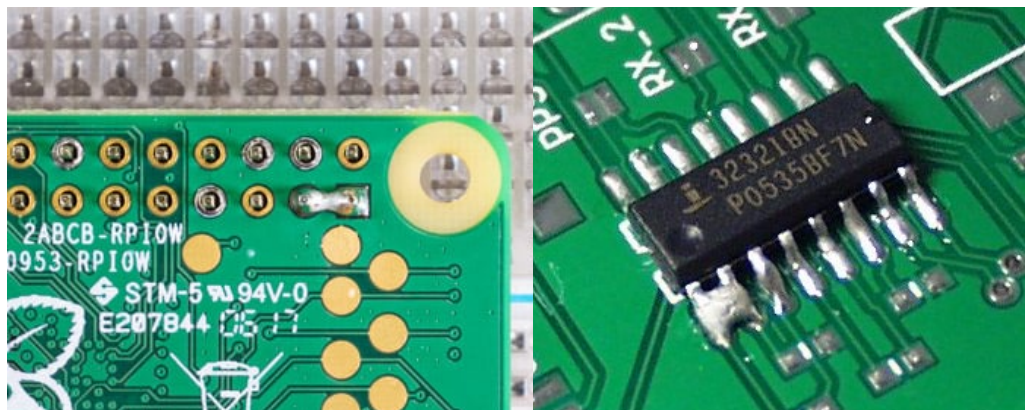
1.2.1.1.7 Solder bridging

Solder bridging (pájecí můstek) je významný problém, který vede ke zkratu obvodu a nelze ho tedy ignorovat. Při této chybě dojde k přemostění dvou původně vodivě oddělených částí pájkou. K tomu dochází mezi kontakty sousedních součástek, mezi kontakty stejné dvouvývodové součástky a nebo i mezi sousedními piny BGA [10, 12, 21, 22].

K solder bridging dochází většinou kvůli špatně nastavenému tisku pasty, ať už se jedná o nezarovnání šablony s deskou a nanesení pasty mimo pájecí plošky anebo o nanesení velkého množství pasty. Na vině je i špatný návrh desky plošných spojů, kdy se plošky nachází ve velké blízkosti anebo je použita velká přitlačná síla při usazování součástky. Další příčinou je nevhodný teplotní profil, kde fáze předehřívání je příliš pomalá a dojde k poklesu pájky, resp. roztečení. Tento jev se ve člancích nazývá slump (v překladu propad) a dochází k němu, pokud má pájka špatný hmotnostní poměr tavidla a vodivé složky [12, 21, 22].

Aby nedošlo k solder bridging, je tedy důležité dávat pozor na správné zarovnání šablony při tisku a přesné umístění součástky na pájecí plošku s vhodnou silou, aby nedošlo k vytlačení pasty zpod součástky. Zároveň by se mohl upravit teplotní profil, zvolit jiný druh pasty

(s vhodným poměrem vodivé složky a tavidla) a nebo zmenšit tloušťka šablony tak, aby došlo s aplikaci menšího množství pasty [21, 22].



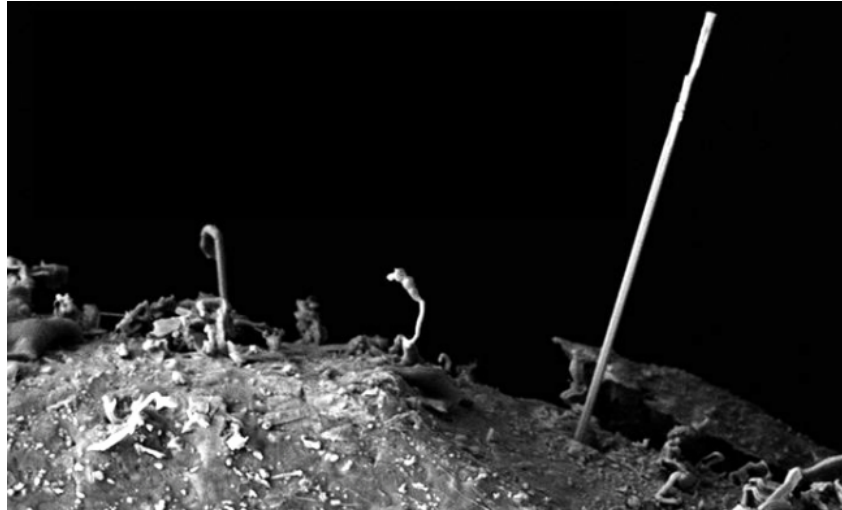
Obrázek 10: Solder bridging. Převzato z [28]

1.2.1.2 Chyby vzniklé po čase působením okolního prostředí

1.2.1.2.1 Whiskery

Whiskery jsou vláskovité krystalické výběžky, které vznikají z kovů a mohou růst do prostoru. Jejich průměr je velice malý, v rozmezí od 1 do 10 μm . Jejich délka ale může dosahovat od 100 μm i do několika milimetrů (výjimečně i do 1 cm). Vzhledem k jejich délce a vodivosti je možné, že přesáhnou vzdálenost mezi dvěma vodivými místy na desce a dojde ke zkratu. Nejčastěji, resp. nejrychleji, rostou whiskery z cínového povrchu (pájky, povrchové úpravy, součástky). Vznikají ale i u jiných kovů, jako je například bismut, kadmium nebo zinek. Whiskery mohou nabírat jakýkoliv tvaru (rovný, zkroucený, zatočený, zalomený) a bývají mechanicky odolné. Jejich růst je nepředvídatelný, není možný ho replikovat a celkově nejsou jasné přesné okolnosti jejich vzniku [11, 12, 20].

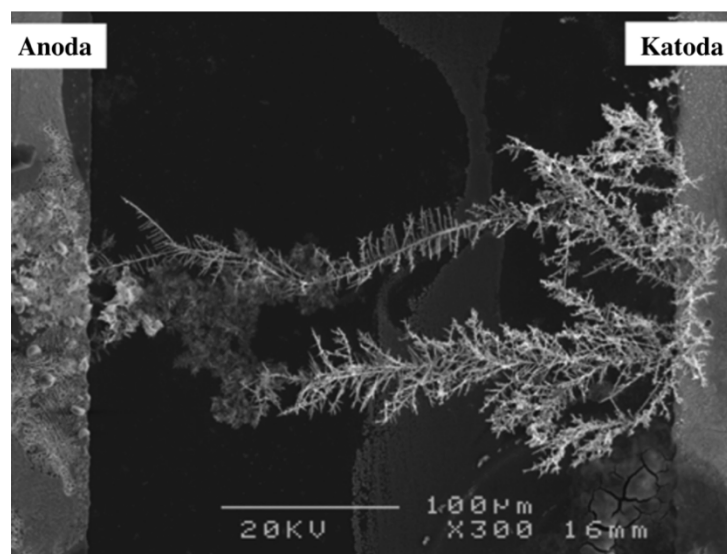
Vliv na růst whiskerů mají například škrábance na povrchu, velikost zrn v pájecí pastě, typ povrchové úpravy a mechanické namáhání. Whiskery z povrchu rostou kvůli tomu, že se z cínu uvolňuje napětí, které tam vzniklo růstem intermetalické vrstvy na rozmezí cínu a mědi. Vlhké a teplé prostředí napomáhá růstu whiskerů. U olovnatých pájek docházelo k růstu whiskerů výjimečně, a proto se do cínových pájek pro snížení růstu přidávalo olovo. V dnešní době se do pájky přidávají spíše jiné kovy, jako je například stříbro, bismut nebo indium. Provádí se také tepelné žíhání cínu, během kterého by mělo dojít ke snížení napětí, a tedy omezení růstu whiskerů. Dalším řešením je niklová bariéra, relaxační procesy měnící mikrostrukturu pájeného spoje a nebo snaha o minimalizaci intermetalické vrstvy [11, 12].



Obrázek 11: Cínové whiskery na povrchu DPS. Převzato z [29]

1.2.1.2.2 Dendrity

Dendrity jsou stromovité kovové výběžky, které vznikají na povrchu desky jevem zvaným elektrochemická migrace. Důležitou podmínkou vzniku dendritů je přítomnost elektrického napětí a vodivého prostředí (elektrolytu). V elektrolytu dochází k rozpouštění kovových iontů na anodě, které jsou vlivem působícího napětí transportovány ke katodě. Ionty postupně vytvářejí stromovitou strukturu (dendrit) a snaží se propojit anodu s katodou. V případě, kdy k tomuto propojení dojde, naroste hodnota protékajícího proudu a dendrit se buď přepálí anebo způsobí na obvodu zkratové spojení. Růst dendritů je ovlivnitelný okolní teplotou a vlhkostí, vzdáleností mezi anodou a katodou, velikostí napětí (resp. jeho rozdílem), materiálem a množstvím kontaminace. Dendrity mohou být častější při použití no-clean tavidel, jelikož neomyté tavidlo může sloužit jako elektrolyt. Více k dendritům si řekneme v další kapitole pod názvem Elektrochemická migrace [11, 12, 20].



Obrázek 12: Dendrity. Převzato z [30]

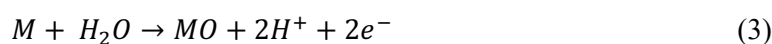
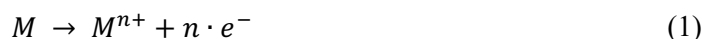
1.3 ELEKTROCHEMICKÁ MIGRACE

Elektrochemická migrace (ECM) je korozní jev, jehož přítomnost výrazně ovlivňuje izolační vlastnosti elektronických zařízení a snižuje jejich spolehlivost. Tento jev se nejčastěji vyskytuje na povrchu desek plošných spojů, je ale možné, že se objeví i na povrchu elektronických součástek. K výskytu elektrochemické migrace v poslední době negativně přispívá miniaturizace elektronických zařízení a zvyšování hustoty osazovaných součástek. To vede ke snížení jejich vzájemné vzdálenosti, a tedy i vyšší intenzitě elektrického pole. Na spolehlivost elektronických zařízení z hlediska elektrochemické migrace má vliv i jejich čím dál širší využití, kdy mohou být snadno vystaveny i znečištěnému a vlhkému prostředí. V takovém provozním prostředí je náchylnost k ECM vyšší [30–32].

Elektrochemická migrace představuje jev, kdy dochází k transportu kovových iontů z jedné elektrody na opačnou vlivem přítomnosti elektrolytu (vlhkého prostředí) a elektrického pole. Dojde k vytvoření usazenin kovů nebo jejich chemických sloučenin. Tyto usazeniny mohou tvořit takové struktury, které snižují izolační odpor mezi dvěma elektrodami. Při propojení elektrod může dojít až ke zkratu, naopak v případě, kdy se z určitého místa elektrody přesunou všechny kovové ionty, může dojít i k méně častému jevu, a to k otevření obvodu. U elektrochemické migrace vznikají dva druhy poruch, růst dendritů anebo vodivá anodická vlákna (*angl. Conductive Anodic Filament, CAF*). U rozdělení ECM na tyto poruchy záleží na podmínkách jejich vzniku a tvaru usazenin [33–35]. V této práci se budu především zabývat růstem dendritů a růst vodivých anodických vláken jen lehce představím.

Během elektrochemické migrace může dojít k reakcím uvedeným dále. První zmíněná reakce probíhá na anodě, kde dochází především k rozpouštění kovu. U katodické reakce dochází především k usazování kovových iontů na katodě. U poslední zmíněné mezielektrodové reakce dochází k usazování kovových oxidů. Růst dendritů je popisován rovnicemi anodické a katodické reakce, kdy se kov rozpouští na anodě (kladné elektrodě), elektrolytickou vrstvou se pomocí odlišného potenciálu elektrod přesouvají kladné kovové ionty ke katodě (záporné elektrodě), kde se usazují. Podrobnější popis procesu růstu dendritů bude popsán v následující podkapitole. Růst CAF popisují anodická a mezielektrodová reakce [35, 36].

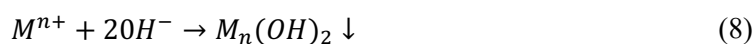
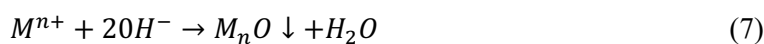
Anodické reakce:



Katodické reakce:



Mezielektrodová reakce:

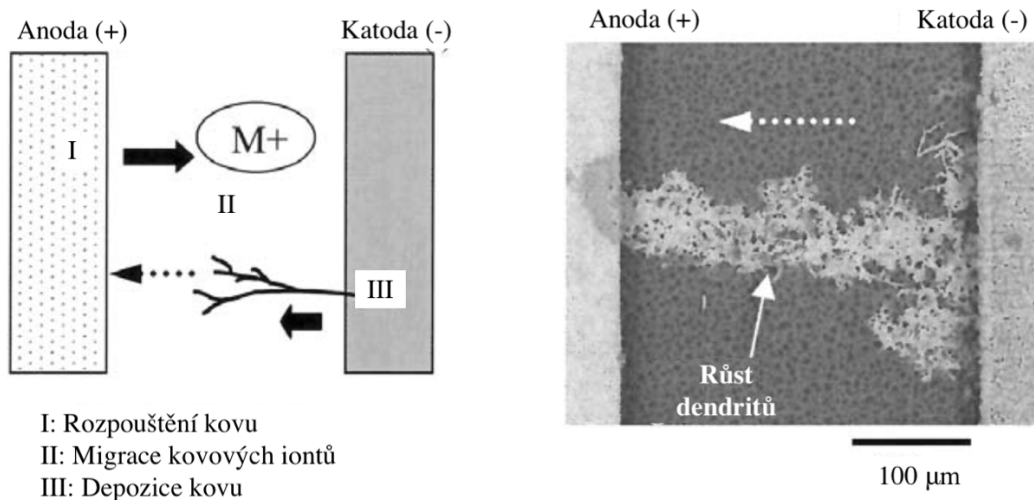


Značení „M“ v rovnicích reprezentuje kov (*angl. metal*), který vzhledem ke složení elektrod bude migrovat. Písmeno „n“ značí počet elektronů, které se účastní reakce.

1.3.1 Dendrity

Jak už bylo dříve zmíněno, dendrity vznikají migrací kovových iontů za přítomnosti elektrolytu a elektrického pole. Dendrity se vyznačují stromovitou (keřovitou) strukturou a rostou na povrchu izolace desek plošných spojů. Skládají se buď s čistého kovu nebo jeho oxidů a jejich chování závisí na druhu použitého kovu [34–36].

Proces růstu dendritů se dá rozložit do čtyř po sobě jdoucích částí, a to do vytvoření elektrolytické vrstvy, rozpouštění anody, transportu iontů a usazení kovových iontů na katodě [37].



Obrázek 13: Růst dendritů na povrchu DPS. Převzato z [35]

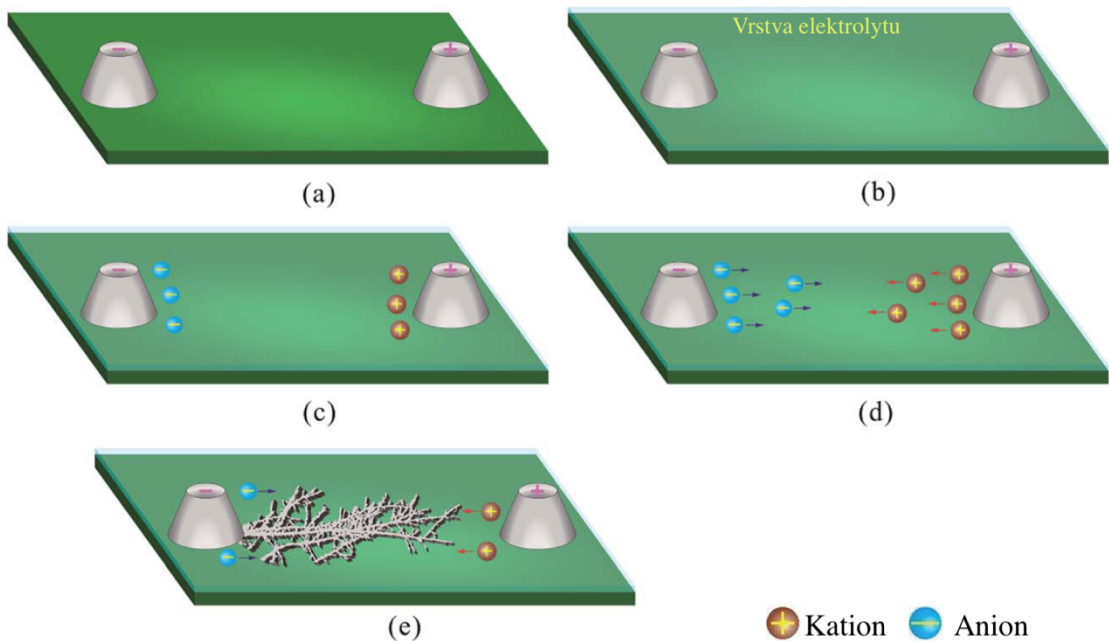
Pro elektrochemickou migraci a růst dendritů je zásadní podmínkou přítomnost souvislé elektrolytické vrstvy, která propojuje elektrody s opačnou polaritou. V této vrstvě pak dochází k migraci iontů. Elektrolytická vrstva pro elektrochemickou migraci může být jak viditelná, tak neviditelná (absorbovaná), kdy se tloušťka viditelné vrstvy může pohybovat přibližně od 1-5 μm do 1000 μm. Vytvoření elektrolytické vrstvy závisí na relativní vlhkosti a teplotě prostředí, nečistotách nebo zbytcích tavidla na povrchu či na materiálu povrchu desky. Pro daný povrch se vrstva vytvoří za určité kritické vlhkosti a teplotě. V případě, kdy se na povrchu objeví hygroskopické nečistoty, např. chloridy, tak se pro stejnou teplotu kritická vlhkost sníží, a vrstva se tedy vytvoří i při menší relativní vlhkosti. Kritická vlhkost je také ovlivněna polaritou substrátu a jeho povrchovou energií [30, 37].

Při rozpouštění kovu dochází k oxidaci anody a vzniku kladných kovových iontů (rovnice 1). Během toho dochází zároveň i k redukci kyslíku na katodě, což je popsáno v rovnici (5). Rychlost rozpouštění do určité míry ovlivňuje rychlost elektrochemické migrace, jelikož bez nich by nemohl proces pokračovat [30].

Transport iontů v elektrolytu může být proveden třemi způsoby, a to elektrickou migrací, difúzí nebo prouděním. Bude-li na ionty v elektrolytu působit elektrické pole, ionty se budou vlivem působení pole pohybovat charakteristickou rychlostí podle jejich náboje buď ke kladné, nebo záporné elektrodě. Tomuto jevu se říká elektrická migrace. Rychlost pohybu iontu závisí na součinu jeho hybnosti a intenzitě přiloženého elektrického pole. Intenzita pole závisí na vzdálenosti elektrod a velikosti napětí, kdežto hybnost závisí na vlastnostech samotného iontu (velikost, tvar, náboj) a elektrolytu (teplota, pH). Transport iontů difúzí spočívá v tom, že při ECM se produkují různé ionty na anodě i katodě, a to různou rychlostí. Vytvoří se tedy tzv. koncentrační gradient mezi anodou a katodou, který zajistí, aby se ionty pohybovaly z místa

s vyšší koncentrací do místa s koncentrací nižší. Při oxidaci anody dochází k produkci kovových kladných iontů směrem od anody. Naopak na katodě vzniká OH^- , kde je jeho koncentrace vyšší, a přesouvá se tedy elektrolytem k anodě, kde je jeho koncentrace nižší. Posledním způsobem transportu iontů je proudění. Většinou se předpokládá, že je elektrolyt nehybný nebo dostatečně tenký, aby docházelo k přirozenému proudění, a proto se tento způsob často opomíná. K proudění může ale dojít například v případě, kdy se na elektrolytu vytvoří bublinky při redukci na katodě, které následně prasknou. To způsobí pohyb kapaliny, který by mohl narušit i samotnou tvorbu dendritu [30].

Poslední částí elektrochemické migrace je usazení kovových iontů na katodě po tom, co se kovový iont dostal přes elektrolyt až ke katodě. Nejdříve musí dojít k inicializaci dendritu, k počátku růstu samotného dendritu. Tento proces trvá většinou déle, než samotný růst dendritu (propagace). Pokud je elektrolyt málo vodivý, elektrické pole je rozložené nerovnoměrně a dendrity proto mohou vyrůst pouze v některých místech, a to tam, kde je silnější elektrické pole. Usazování kovových iontů je popsáno v katodické reakci v rovnici (4). Po inicializaci následuje propagace dendritu. Dochází k postupnému snižování vzdálenosti mezi katodou a anodou, resp. k poklesu povrchového izolačního odporu. Dendrit roste až do chvíle, kdy dosáhne anody a zkratuje obvod. Zkrat může být krátkodobý, kdy se dendrit nárůstem proudu roztaví a zkrat zmizí, nebo trvalý. Růst dendritů probíhá především tak, že se nově přichodzí ionty usazují na jeho špičce. Je to kvůli silnějšímu elektrickému poli a kratší vzdálenosti od anody [30, 32].



Obrázek 14: Proces ECM. Převzato z [30]

1.3.2 Faktory ovlivňující ECM

Elektrochemickou migraci ovlivňuje mnoho faktorů. Mezi hlavní faktory patří materiál elektrod, teplota, relativní vlhkost, nečistoty, druh substrátu a napětí. Dalšími faktory ovlivňující ECM je rozpustnost elektrod, rychlost migrace kovových iontů, nasákavost desky plošných spojů, tavidlové zbytky, odpařování, vzdálenost mezi elektrodami, atd [35].

Některé kovy jsou k migraci náchylnější než jiné. Pořadí často používaných kovů na deskách plošných spojů podle tendence migrovat je následující: $Ag > Pb > Cu > Sn-Pb > Sn > Au$. Je třeba ale brát v potaz, že slitiny kovů se chovají jinak než čisté kovy. Vytvářejí chemické sloučeniny, což vede k odlišným vlastnostem, a tedy i k odlišnému chování, co se týče elektrochemické migrace. Mezi často používané slitiny v elektrotechnice patří slitiny Sn–Ag, Sn–Cu a Sn–Bi, obsahující vzácné prvky, ale i slitiny Sn–Zn nebo Sn–Pb. Slitiny obsahující cín bývají nejvíce náchylné na elektrochemickou migraci. Co se týče slitin Sn–Ag, Sn–Cu, tak i přestože stříbro a měď mají tendenci dobře migrovat, spolu s cínem vytváří chemicky stabilní sloučeniny a nejsou rozpustné v roztocích. Důvodem je vytvoření intermetalických sloučenin s cínem, kde se stříbro ani měď nerozpouští. Elektrochemická migrace je u těchto slitin dána migračními vlastnostmi cínu. Stejně to platí i pro slitinu Sn–Bi. V případě slitiny Sn–Zn dochází k rozpouštění zinku dříve než cínu. Jeho rozpustnost je však během procesu postupně potlačena tvorbou pasivní vrstvy, která může být ale vlivem prostředí i poškozena. Vzhledem k tomu, že u slitiny Sn–Pb, kde migruje především olovo, nedochází k žádné tvorbě pasivní vrstvy, rozpouští se rychleji než Sn–Zn [30, 35].

Tabulka 1: Složení pájky a migrační charakteristiky. Převzato z [35]

Složení pájky	Sn–Ag	Sn–Cu	Sn–Bi	Sn–Zn	Sn–Pb
Povrchová struktura	Sn; Ag ₃ Sn	Sn; Cu ₆ Sn ₅	Sn; Bi	Sn; Zn	Sn; Pb
Pasivní vrstva na povrchu	SnO ₂	SnO ₂	SnO ₂	ZnO; Zn(OH) ₂ ; SnO ₂	Pb _x O _x ; SnO ₂
Depozity kovu	Sn	Sn	Sn	Zn, Sn	Pb, Sn

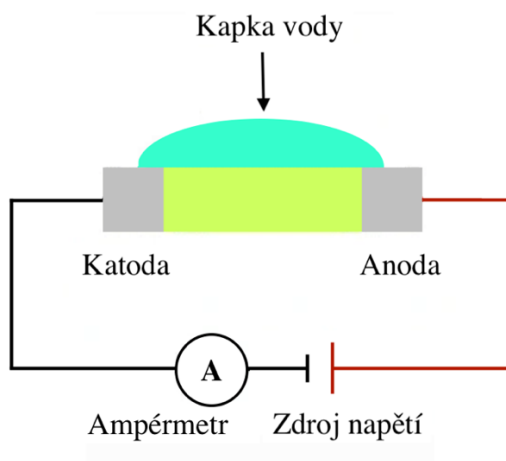
Vlivem zvýšení teploty dochází k urychlení reakcí elektrochemické migrace. To stejné platí s relativní vlhkostí. Co se týče vlivu nečistot (halogeny Cl, Br), tak pokud dojde k jejich rozpuštění v elektrolytu, může vést ke zvýšení jeho vodivosti a opět k urychlení reakce. Zároveň i přítomnost zbytků tavidla může zvyšovat pravděpodobnost ECM. Jejich hygroskopická povaha podporuje kondenzaci a zároveň i zvyšuje vodivost elektrolytu. Co se týče velikosti napětí, tak se zvýšením napětí se snižuje čas do poruchy, urychluje rozpouštění a transport iontů. Pro výskyt

elektrochemické migrace je ale potřeba minimální kritická hodnota napětí, při které dojde ke rozpuštění kovů. V případě, kdy je hodnota napětí naopak moc vysoká, nastane pravděpodobně dříve jiná porucha než elektrochemická migrace [30, 34, 35].

1.3.3 Testovací metody

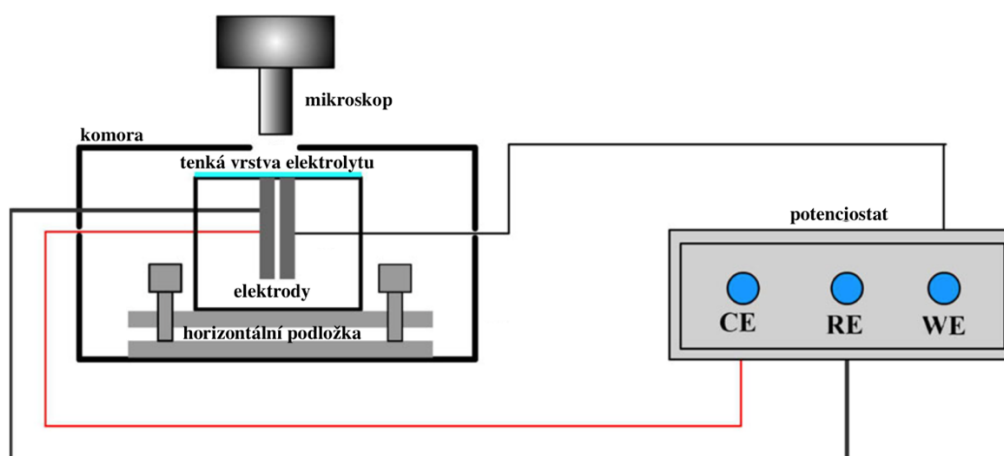
Pro testování elektrochemické migrace existují tři hlavní metody, a to test s kapkou vody (Water Drop test – WD), teplotně vlhkostní test (Thermal Humidity Bias test – THB) a test s tenkou vrstvou elektrolytu (Thin Electrolyte layer – TEL). Výsledkem testů bývá nejčastěji čas do poruchy (Mean Time to Failure – MTF), což je doba od kápnutí vody na vzorek pod napětím do zkratu obvodu. Měří se často i změna izolačního odporu, napětí nebo proudu. Všechna tato měření bývají doprovázena i optickou kontrolou, ať už během zkoušky, kdy se sleduje růst dendritů, či po zkoušce, kdy se sleduje jejich četnost, rozměry nebo i složení [37].

Nezákladnější testovací metodou je water drop test, který spočívá v kápnutí destilované vody na desku tak, aby kapka přemostovala elektrody s opačnou polaritou, zatímco jsou pod napětím. Při testu se nemusí použít pouze destilovaná voda, ale může se kápnout i jiný dobře definovaný roztok, jako je například NaCl nebo KBr. Vzhledem k tomu, že i tloušťka elektrolytu má vliv na elektrochemickou migraci, musí se dbát na jeho množství. V žádné normě však není přesně definované, jaký objem by měla kapka vody mít. Čas do poruchy u této zkoušky bývá velice krátký, a to v rámci několik sekund až minut, jde tedy o relativně rychlou zkoušku. Výhodou této zkoušky je možnost změřit množství elektrolytu a jeho umístění. Zároveň ale nejde přesně zopakovat měření, jelikož kapku vody není možné vždy umístit přesně na stejné místo i proto, že většinou mění tvar i během měření. Vždy se bude tedy kapka dotýkat elektrod trochu jinak. Tato zkouška je vhodná na porovnání relativních migračních charakteristik, ale ne přímo na posouzení celého procesu elektrochemické migrace, jelikož v tomto případě se úplně přeskočí krok tvorby elektrolytické vrstvy [35, 37].



Obrázek 15: Schéma WD testu. Převzato z [37]

Další laboratorní zkouškou je metoda s tenkou vrstvou elektrolytu (TEL). Tato zkouška je podobná WD test, ale jak už z názvu vypovídá, místo kapky vody, je na celém vzorku souvislá tenká vrstva elektrolytu. To se docílí tím, že je vzorek vložen do komory, ve které je položen na horizontální podložku. Tu lze posouvat nahoru a dolů, čímž lze nastavit požadovanou tloušťku elektrolytu. Oproti WD testu se tedy odstranil problém s nestejným umístěním elektrolytu, jelikož v tomto případě se vrstva elektrolytu nachází na celém povrchu. Opět ale tato zkouška nesimuluje tvorbu vrstvy elektrolytu. TEL je navíc limitován drsností povrchu, jelikož na hladkém povrchu vzniká souvislá tenká vrstva velice špatně. V tomto případě je použití této metody nevyhovující [30, 37].

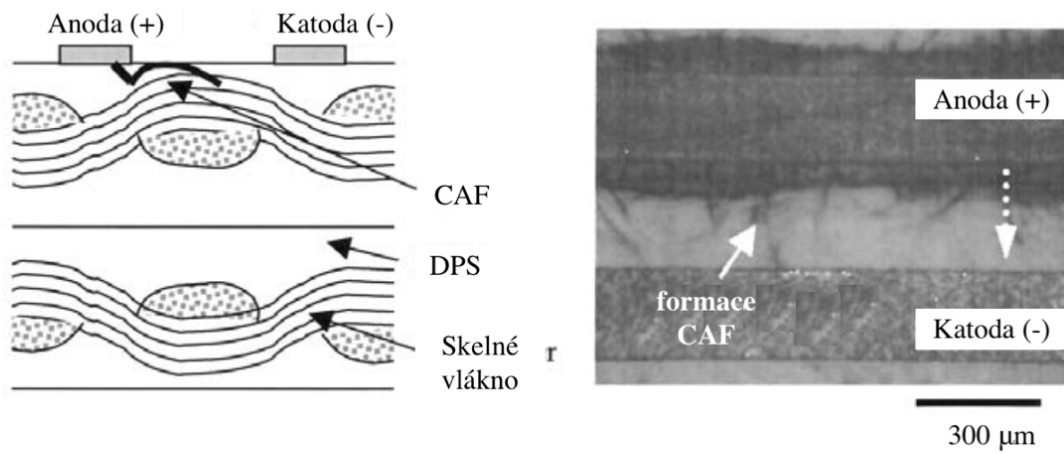


Obrázek 16: Schéma TEL. Převzato z [37]

Poslední zmíněnou metodou je teplotně vlhkostní test (THB), kdy se vzorek pod napětím zavře do komory, kde se drží definovaná teplota a relativní vlhkost. Jde o zkoušku, která umí simulovat všechny kroky elektrochemické migrace, a to buď za normálních provozních podmínek, nebo i zrychlených laboratorních, kdy jsou hodnoty teploty a vlhkosti vyšší. Trvání této zkoušky se může různit od několika minut po několik (tisíc) hodin. Nevýhodou této zkoušky je její kvantitativní vyhodnocení, jelikož neznáme tloušťku a umístění elektrolytické vrstvy. Zároveň se špatně opticky pozoruje její průběh [30, 37].

1.3.4 Vodivá anodická vlákna

Jak už bylo výše zmíněno, projevem elektrochemické migrace mohou být i vodivá anodická vlákna (Conductive Anodic Filament – CAF). Jde o tenká vlákna z kovů nebo jejich oxidů, která se tvoří podél skleněných vláken uvnitř desek plošných spojů. K jejich růstu dochází opět za vlhkého prostředí a pod napětím. Vlákno, nejčastěji z mědi, roste od anody ke katodě, kde při přemostění zkratuje obvod. Jeho detekce je náročná, a proto se na něj přijde většinou až při poruše vedoucí k vypařování pryskyřice, lokálnímu hoření či zničení skelných vláken [31, 34].



Obrázek 17: CAF uvnitř DPS. Převzato z [35]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1.4 MOTIVACE PRÁCE

Cílem této práce je posouzení vlivu nepájivé masky na elektrochemickou migraci. Tématem vlivu nepájivé masky na elektrochemickou migraci se zabývali i vědci z University of Maryland [38], kde sledovali migraci na desce bez masky a s maskou. Zároveň porovnávali i vliv použité pájecí slitiny, eutektické Sn-37Pb a Sn-0,3Ag-0,5Cu. Testování probíhalo ve vlhkostní komoře, kde testovací vzorky následně prošly ještě kontrolou na optickém i elektronovém mikroskopu a měřením iontové kontaminace. Výsledkem experimentu se ukázal pozitivní vliv masky na elektrochemickou migraci, kdy přítomnost masky zvýšila izolační povrchový odpor a snížila pravděpodobnost poruchy vlivem ECM. Toto tvrzení potvrzují i jiné výzkumy [39, 40], které se zaměřily i na vliv povrchové úpravy na elektrochemickou migraci.

V mé práci se pozoroval navíc i vliv designu masky, a také různý typ nepájivé masky. Co se týče ostatních výzkumů ohledně vlivu nepájivých masek na elektrochemickou migraci, tak jich aktuálně není příliš mnoho. Výzkumy týkající se elektrochemické migrace se zaměřují více na vliv vzdálenosti a tvaru elektrod, typ povrchové úpravy a použitou pájecí slitiny, nebo kontaminaci desky. Je nicméně důležité se zabývat i tématem vlivu nepájivé masky, jelikož i ta může zásadně ovlivnit proces elektrochemické migrace, neboť nepájivé masky mohou být v různých provedeních, které se mohou lišit například drsností povrchu. Drsnost může ovlivnit jak proces kondenzace a vznik elektrolytické vrstvy, tak i transport iontů a růst dendritů celkově. Také různé designy nepájivé masky (v tomto případě zda je vodivá cesta definována mědí, nebo nepájivou maskou), mohou mít vliv na elektrochemickou migraci. Vliv odlišného designu je očekáván při prvotní fázi růstu dendritů a poté i v prvkovém složení dendritu. Tato práce je dále rozšířena o vliv pájecí pasty, resp. zbytku tavidla na elektrochemickou migraci. Některé studie tvrdí, že přítomnost zbytků tavidla by měla urychlovat elektrochemickou migraci, jiné studie naopak toto tvrzení vyvrací [30].

1.5 POPIS EXPERIMENTU

1.5.1 Návrh a typy desek

Pro experimenty byly použity FR4 desky s různým designem pájecí plošky a typem nepájivé masky, ale také desky bez nepájivé masky. Zároveň jsem sledovala elektrochemickou migraci na deskách bez pájecí pasty a s ní.

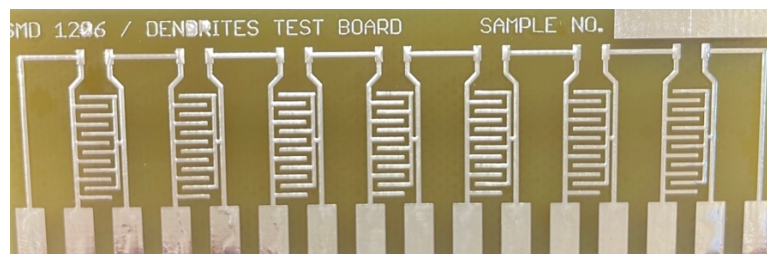
Testovacím vzorkem byla deska plošných spojů navržena o rozměrech 25,5 x 80,5 mm a o tloušťce 1,5 mm. Šlo o jednostrannou nevrtanou desku s tloušťkou mědi 18 μ m, na které byla

nanesena povrchová úprava HASL, která byla zvolena jakožto jedna z nejpoužívanějších úprav především pro low-cost aplikace. Vodivé cesty byly navrženy podle mezinárodní normy IPC-TM-650 (2.6.3.3) ve tvaru hřebínků, mezi kterými se sledovaly rostoucí dendrity. Šířka vodivé cesty byla 0,4 mm, izolační mezera pak 0,5 mm.

Ať už šlo o jakýkoliv typ nepájivé masky, pro každý druh masky byly vyrobeny vzorky s dvěma odlišnými designy masek. První design (copper-defined), typ U, má mezi měděnou ploškou a nepájivou maskou malou mezeru (0,1 mm) tvořící „příkop“ (proto označení U). U druhého designu (solder mask-defined), typu R, je měděná ploška rozšířená (proto označení R) a nepájivá maska měď překrývá tak, aby byla přístupná stejná šířka plošky jako v předchozím případě.

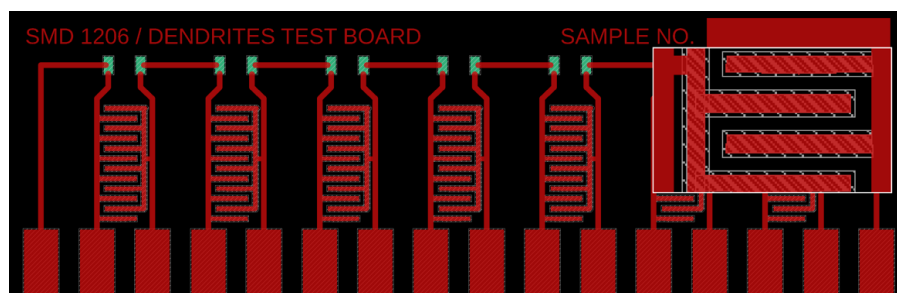


Obrázek 18: Druhy designů nepájivých masek. Převzato z [12]

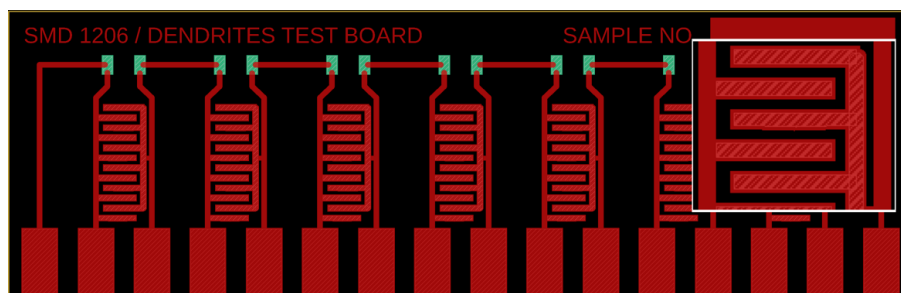


Obrázek 19: Návrh testovací desky – bez masky

Design desek byl navržen v programu EAGLE. Snímky z programu jsou vidět níže. Červené cesty označují měď a jednoduchá šrafování označují místa, kde není nanesena nepájivá maska. V místech, kde je šrafování intenzivnější, bude nanesena v některých případech pájecí pasta.

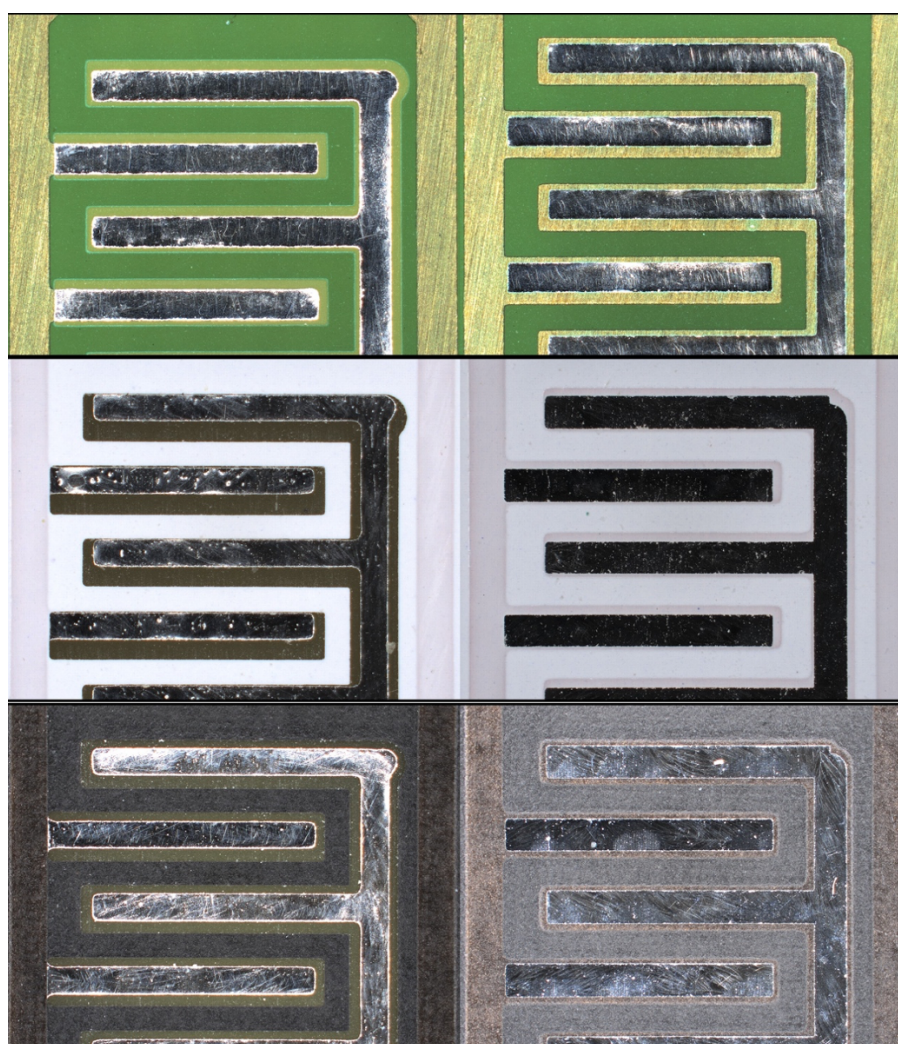


Obrázek 20: Typ U – návrh v programu Eagle (vpravo detail na provedení vodivých cest a nepájivé masky)



Obrázek 21: Typ R – návrh v programu Eagle (vpravo detail na provedení vodičových cest a nepájivé masky)

Kromě designu se nepájivé masky liší i v jejím celkovém typu, konkrétně řečeno v její barvě a drsnosti povrchu. Vyrobeny byly tři druhy masek, zelená (klasická), bílá (lesklá) a černá (matná). Všechny byly vyrobeny pomocí síťotisku a litografického procesu.



Obrázek 22: Různé druhy desek. Typ U vlevo, typ R vpravo

1.5.1.1 Drsnost masek

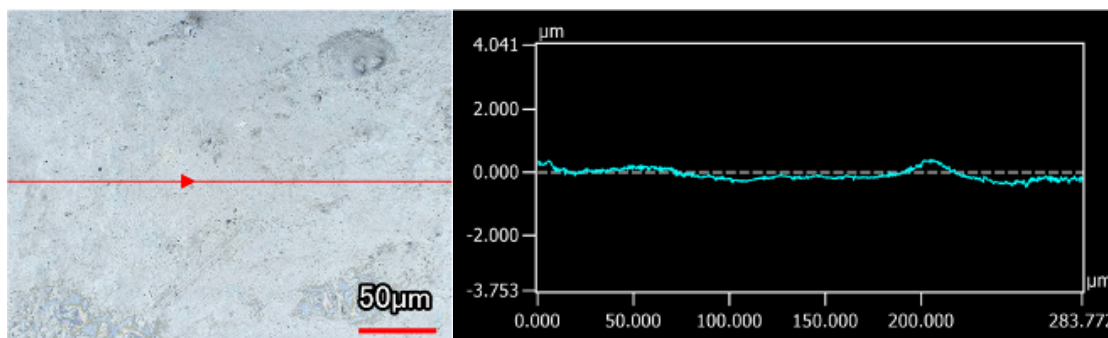
Pro bližší určení masek a jejich rozdílu jsem měřila drsnost povrchu. Měření probíhalo dvěma způsoby na konfokálním mikroskopu. Drsnost se měřila jak v řezu (parametry „R“),

tak v určité zvolené oblasti (parametry „S“). Parametr Ra, resp. Sa, popisuje aritmetický průměr absolutních hodnot výšek povrchu odchylek od střední hodnoty v dané měřené délce, resp. oblasti. Parametr Rz, resp. Sz, určuje rozpětí od maximální výšky do maximální hloubky profilu po celé měřené délce, resp. oblasti. Hodnota Str (Texture aspect ratio) se pohybuje mezi 0 a 1. Vyjadřuje míru izotropie textury povrchu. V případě, kdy jsou nerovnosti v povrchu náhodné a nezávislé na směru, hodnota Str se bude blížit jedné, v opačném (anizotropním) případě se hodnoty budou blížit nule [41, 42].

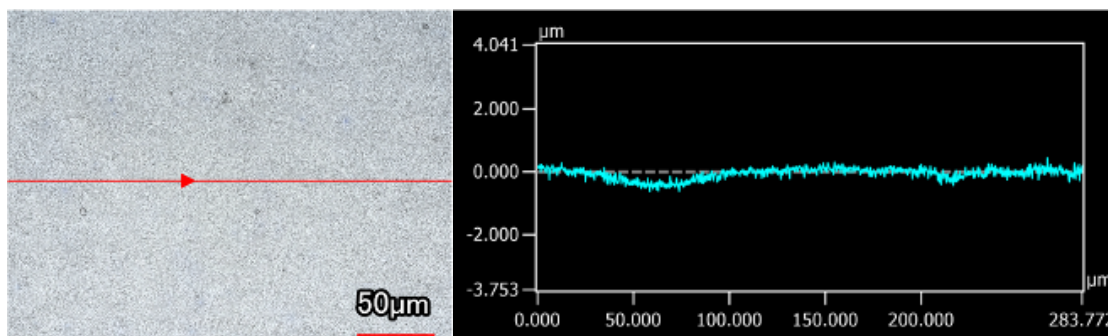
V následující tabulce jsou výsledné hodnoty pro zmíněné parametry drsnosti. Ve všech případech vyšla černá maska s nejvyšší drsností. Všechny parametry vyšly až několikanásobně vyšší oproti hodnotám u bílé nebo zelené masky. Hodnoty parametrů u bílé a zelené masky byly dost podobné až na parametr Sz, kde povrch zelené masky vychází s vyšší drsností než u bílé masky. Pod tabulkou č.2 jsou snímky z konfokálního mikroskopu povrchů masek a zároveň i jejich profil v místě, které je vyznačeno červenou šipkou. Je zde vidět očividný rozdíl černé masky od masky bílé a zelené.

Tabulka 2: Parametry drsnosti použitých masek

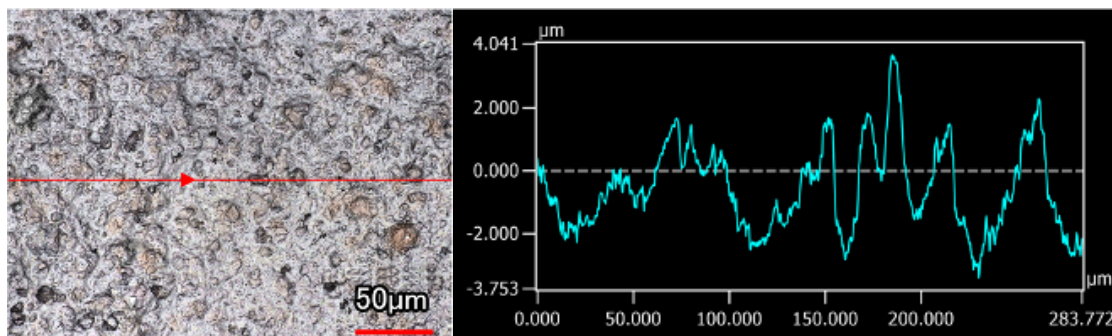
Maska	Ra [μm]	Rz [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Str [-]
Bílá	0,15	1,20	0,17	4,98	0,52
Černá	0,93	5,20	0,99	11,68	0,61
Zelená	0,16	1,07	0,17	7,40	0,72



Obrázek 23: Měření drsnosti – profil zelené masky



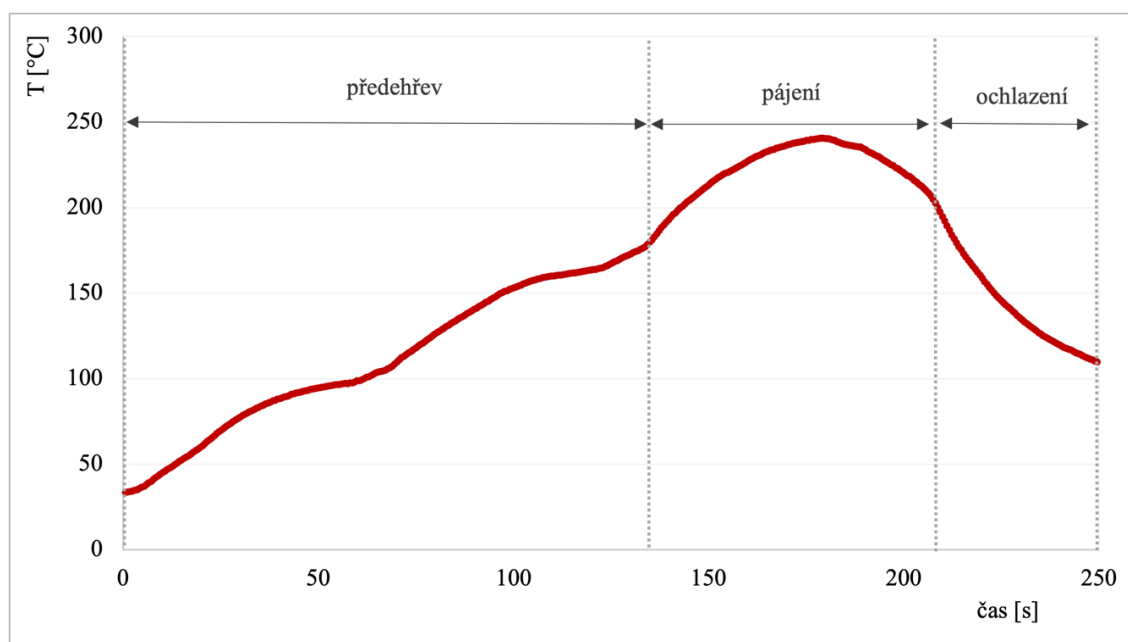
Obrázek 24: Měření drsnosti – profil bílé masky



Obrázek 25: Měření drsnosti – profil černé masky

1.5.1.2 Vzorky s pájecí pastou

Elektrochemická migrace se u všech variant vzorků testovala pro případ, kdy na mědi byla pouze povrchová úprava HASL, ale také kdy se na vzorky navíc nanasla pájecí pasta (Sn 95,75 - Ag 3,5 - Cu 0,75) obsahující no-clean tavidlo ROL0-J-STD-004. Použitá pájecí pasta byla nanasena na destičku přes šablonu a následně byla vložena do konvekční pece Mistral 260 (Spidé Company, Nizozemsko), kde došlo k jejímu přetavení. Teplotní profil je vidět na následujícím obrázku. Rychlost pohyblivého pásu pece byla 21 cm/min.



Obrázek 26: Teplotní profil přetavení

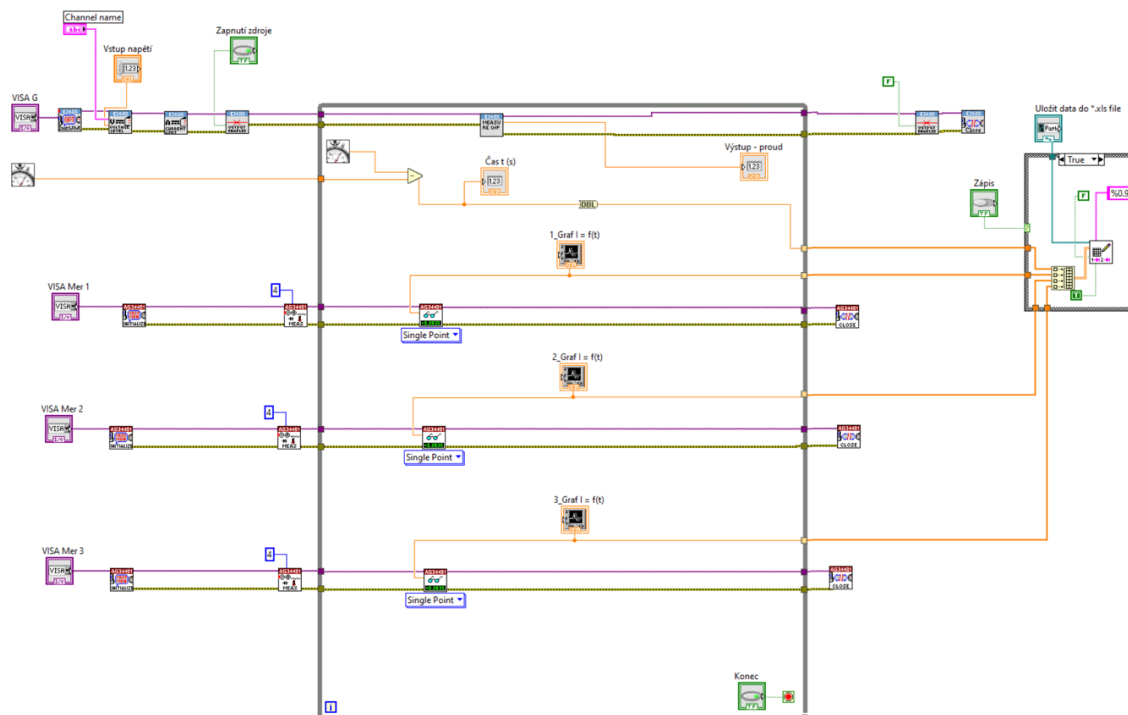
Po přetavení jsou na destičce vidět zbytky no-clean tavidla, které svou přítomností mohou ovlivňovat elektrochemickou migraci.



Obrázek 27: Typ U s bílou maskou, s pájecí pastou a zbytky tavidla

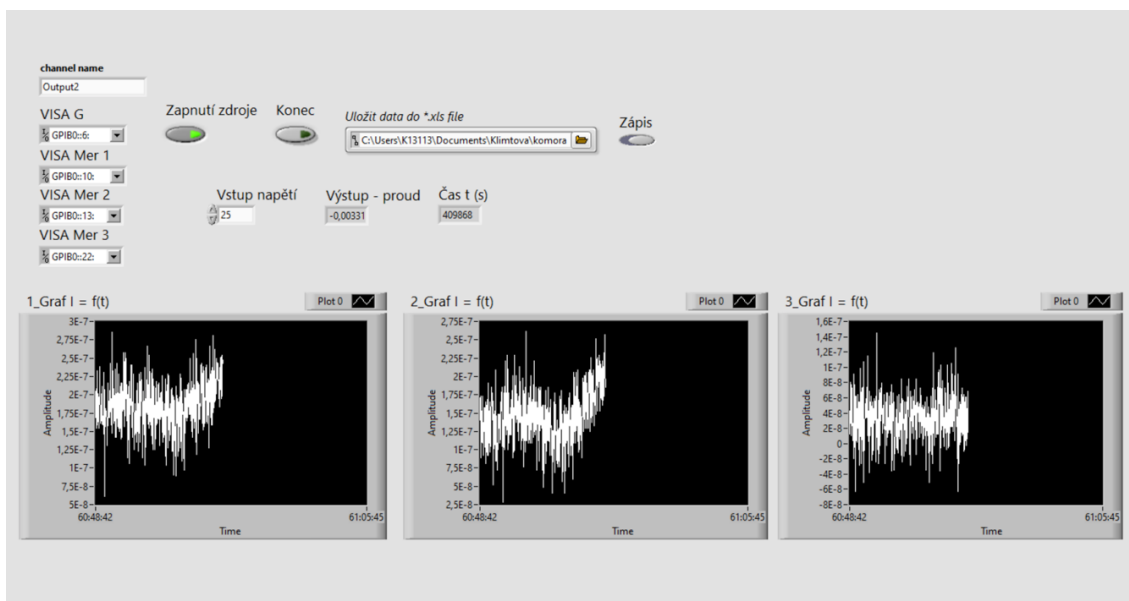
1.5.2 Testovací program v LabVIEW

Během experimentu jak ve vlhkostní komoře, tak při water drop testu se sledoval časový průběh proudu, ze kterého se zpětně určila doba poruchy (zkrat). Pro jeho zápis jsem vytvořila program v LabVIEW. Na obrázku níže je vidět program pro testování ve vlhkostní komoře, kde se testovaly tři vzorky zároveň. V horním „řádku“ je ovládání zdroje napětí spolu s měřením času. Následující tři „řádky“ ovládají a sbírají data z měřicích přístrojů. Pro water drop test je schéma obdobné, avšak nejsou tam nezbytné další dva měřicí přístroje a stačí pouze jeden. V pravé části je pak zajištěno zapisování dat a jeho uložení do souboru.



Obrázek 28: Testovací program – schéma pro testování ve vlhkostní komoře

Po vytvoření programu se jeho ovládání provádí z ovládacího okna (obrázek dole). V tomto okně se propojí zapnuté přístroje (zdroj i měřicí) k programu, nastaví se velikost napětí v kolonce „Vstup napětí“ a zároveň se vybere cílové úložiště měřených dat. V grafech je pak možnost sledovat aktuální průběh proudu. Pro zapnutí měření se musí zapnout tlačítko „Zapnutí zdroje“ a poté celkové tlačítko zapnutí programu (na obrázku není vidět). Pro ukončení měření stačí stisknout tlačítko „Konec“. Tlačítko zápis slouží k zapisování dat do zvoleného souboru. Pokud je tlačítko v poloze jako na obrázku, hodnoty se zapisují do excelového souboru.



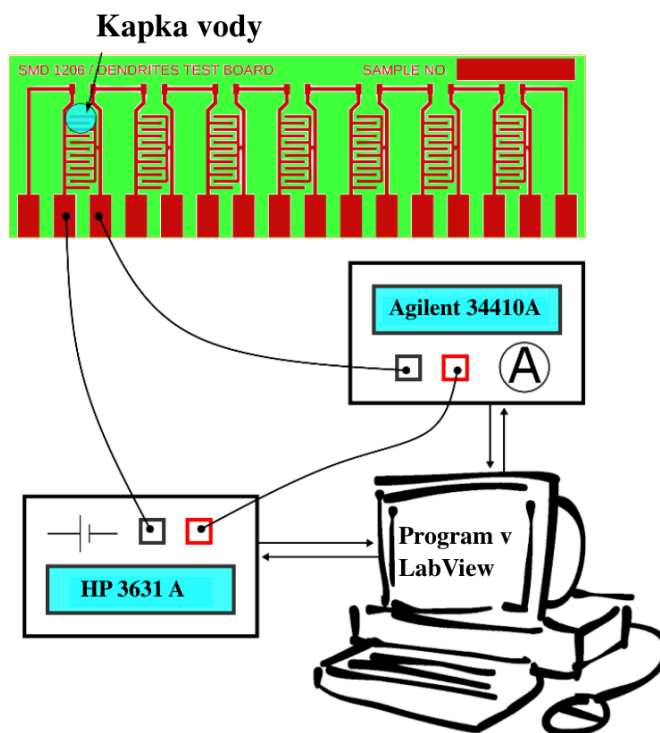
Obrázek 29: Testovací program – ovládání pro testování ve vlhkostní komoře

1.5.3 Experimenty

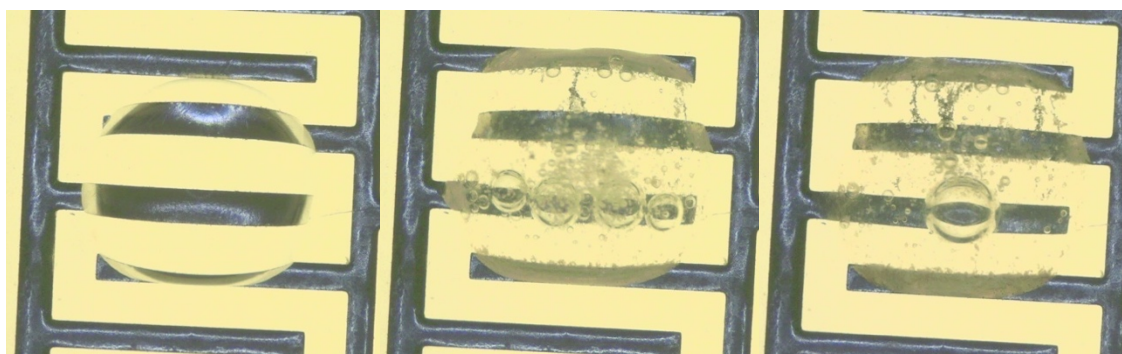
Podstata water drop testu (WD) a teplotně vlhkostního testu (THB) je vysvětlena v kapitole Elektrochemická migrace. V této podkapitole proto popíšu jen konkrétní parametry měření. Pro oba experimenty byl použit zdroj typu 3631A (HP Inc., USA) a pro měření proudu byly použity tři multimetry typu 34410A (Agilent, USA).

1.5.3.1 Water drop test

Měření probíhalo tak, že se vždy na jeden hřebínek káplu definované množství destilované vody a následně na něj bylo přivedeno napětí o velikosti 10 V. Vzhledem k tomu, že žádná norma přímo nedefinuje, jaký objem má kapka vody mít, nanášela jsem dávkovačem mnou zvolený objem kapky přibližně 5,7 μl . Takové množství vody při roztečení na povrchu destičky přemostilo sousedící hřebínky vždy tak, že alespoň dva hřebínky s opačnou polaritou byly propojeny souvislou vrstvou vody. Růst dendritů byl během měření sledován i na optickém mikroskopu SMART (dodavatel HotAir.cz).



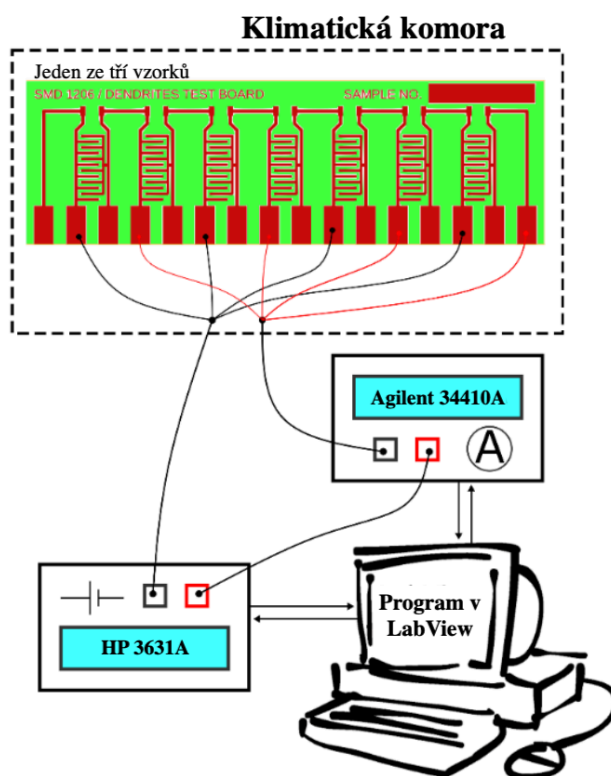
Obrázek 30: Zapojení WD testu



Obrázek 31: Průběh WD testu

1.5.3.2 Teplotně vlhkostní test

Co se týče teplotně vlhkostního testu (THBT) v klimatické komoře, tak pro měření byla použita komora typu CT-40/200 (CTS CmbH, Německo). Parametry měření byly dány normou IPC-TM-650 (2.6.14D). Vzorky v komoře byly vystaveny teplotě 85 °C a relativní vlhkosti 90 % po dobu 168 hodin. Pro jistý výskyt dendritů jsem přiloženou hodnotu napětí pro vlhkostní test v komoře zvýšila z 10 V (daných v normě) na 25 V, jelikož při prvním měření s 10 V žádné dendrity nevyrostly.



Obrázek 32: Zapojení THB testu

1.5.4 Optické vyhodnocení, SEM a EDX analýza

Dendrity byly pozorovány i opticky, a to na laserovém konfokálním mikroskopu VK-X1000 (Keyence, Japonsko) a na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM) Phenom ProX (ThermoFisher Scientific, USA). Na elektronovém mikroskopu pak byla provedena i energeticky-disperzní rentgenová spektroskopie (EDX), která umožňuje zjistit, z kterých prvků se daný dendrit skládá, a tím pádem určit migrující kov.

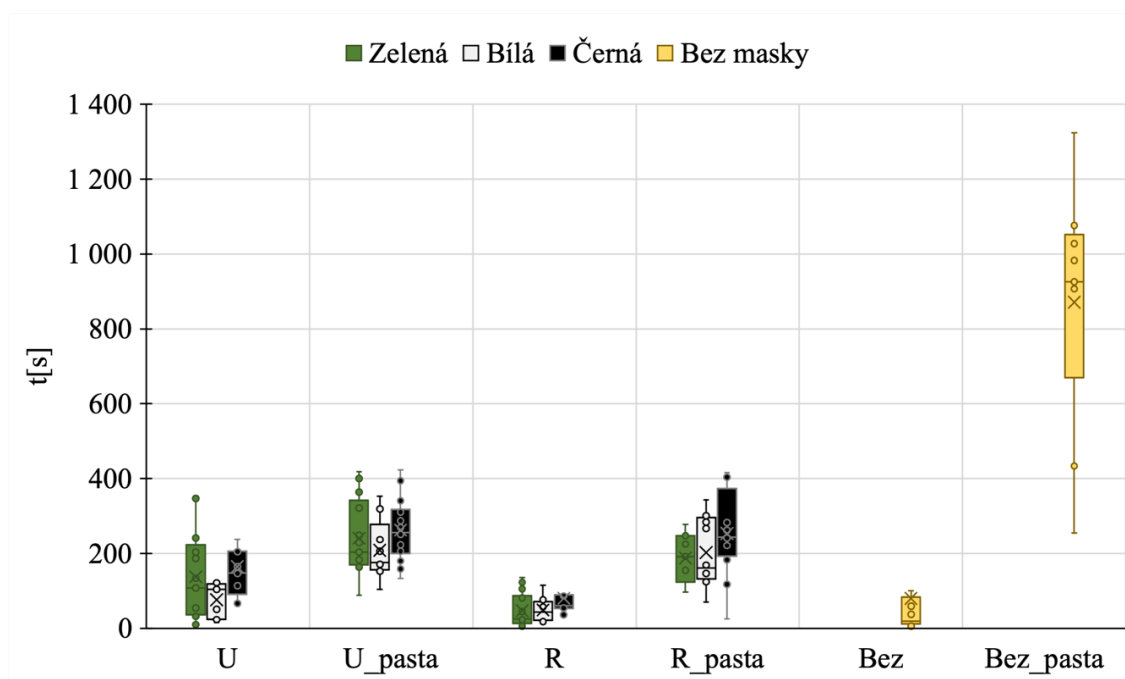


Obrázek 33: Elektronový mikroskop Phenom ProX. Převzato z [43]

1.6 VÝSLEDKY

1.6.1 Výsledky WD testu

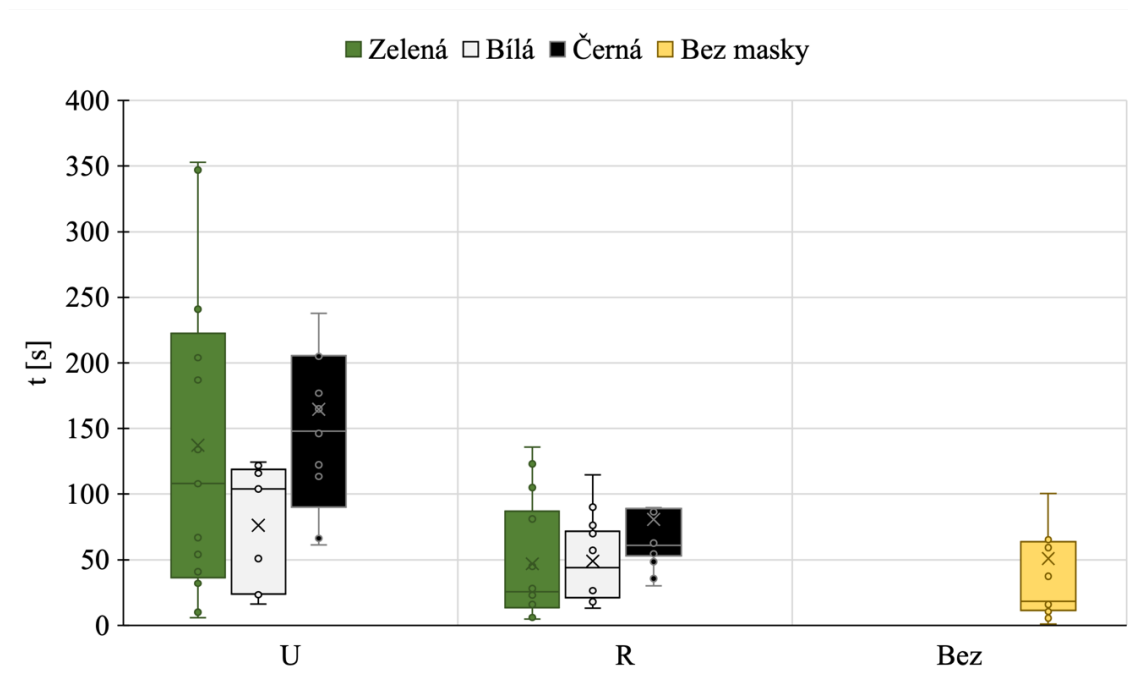
Pro každou variantu byl proveden water drop test s minimálně deseti opakováními. Cílem zkoušky bylo změření času do poruchy, tedy kdy dojde ke zkratu. Hodnoty pro všechny varianty jsou k porovnání v následujícím grafu. Na první pohled je vidět, že vzorky, na které byla nanášena pájecí pasta a jsou na nich tedy i tavidlové zbytky, se jeví odolnější oproti elektrochemické migraci. V tomto případě přítomnost tavidla zabraňuje růstu dendritů. Z pozorování během měření jsem došla k závěru, že zbytky tavidla tvoří jakousi bariéru, skrz kterou se dendrity musí nejdříve prodrat, a tedy zpomaluje celkový jejich růst. Zároveň je zajímavé, že vzorky bez masky s pájecí pastou vycházejí ze všech variant nejlépe, a to navíc s mnohonásobně vyšším časem do poruchy. V některých měřeních dokonce nedošlo ke zkratu vůbec a měření se muselo přerušit, jelikož se nanášená kapka vody vypařila dříve, než nastal zkrat. Měření delší než 25 minut nebylo možné.



Graf 1: Čas do poruchy – všechny varianty vzorků

Výsledné časy do poruchy pro vzorky bez pájecí pasty jsou zaznamenány v následujícím grafu. Vzorek bez nepájivé masky bez pájecí pasty nevykazuje takovou odolnost vůči elektrochemické migraci, jako vzorek s nepájivou maskou. Vzorky bez masky mají dokonce nejnížší časy do poruchy oproti ostatním variantám s maskami. Rozmezí, ve kterém se pohybují jeho časy, je však velice podobné rozmezí časů u varianty R. Nedá se tedy z tohoto hlediska říct, že by přítomnost masky s designem R nějak výrazně zabraňovala elektrochemické migraci. U desek s maskou s typem U je však toto tvrzení na místě, jelikož časy do poruchy jsou u masky

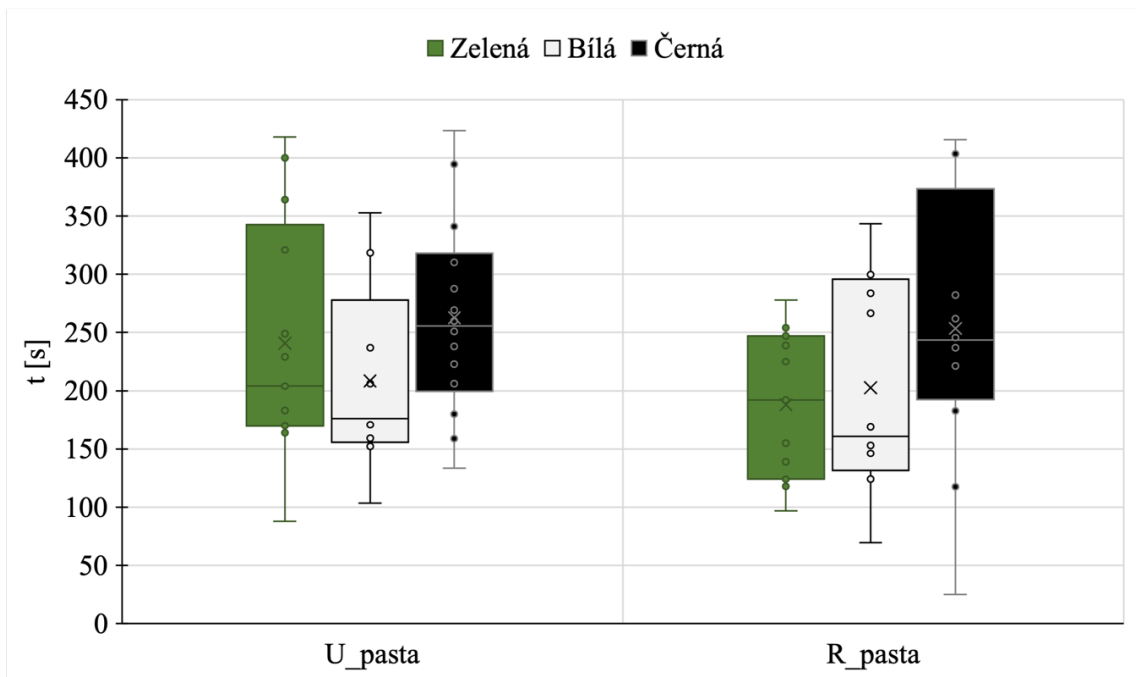
typu U nejvyšší. Zároveň se ale hodnoty varianty U oproti deskám s R nepájivou maskou či deskám bez masky pohybují ve výrazně širším intervalu.



Graf 2: Čas do poruchy – vzorky bez pasty

Vezmeme-li průměrné hodnoty, seřazení podle časů do poruchy je pro vzorky s pastou a bez pasty shodné. Varianta U vykazuje nejnižší časy do poruchy u bílé masky, tu následuje zelená nepájivá maska. Nejdélší časy do poruchy se objevují u černé masky. Co se týče vzorků typu R, tak tam jsou nejnižší hodnoty u zelené masky a až potom u bílé. Rozdíl mezi těmito hodnotami je však minimální. Pokud bychom vzali hodnoty jejich mediánů, pořadí by se otočilo. Nejdélší hodnoty času do poruchy jsou opět u černé masky.

Podíváme-li se na vliv designu masky, tak tam nejsou výsledky tak jasně vypovídající, jak v případě vzorků bez pasty. Přítomnost zbytků tavidla snižuje rozdíl mezi časy do poruchy a vliv designu zde není tak zásadní jak v předchozím případě. Každopádně, porovnáme-li střední hodnoty či mediány naměřených časů do poruchy, vyjde, že nepájivé masky všech barev typu R jsou opět náchylnější na elektrochemickou migraci než typ U.

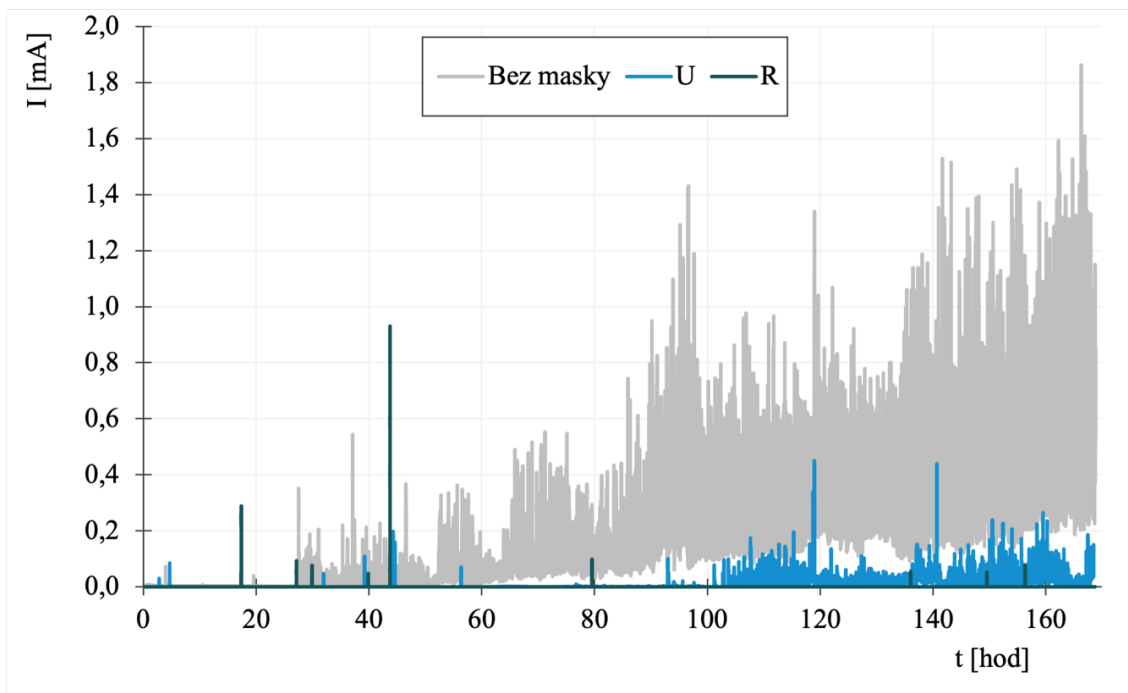


Graf 3: Čas do poruchy – vzorky s pastou

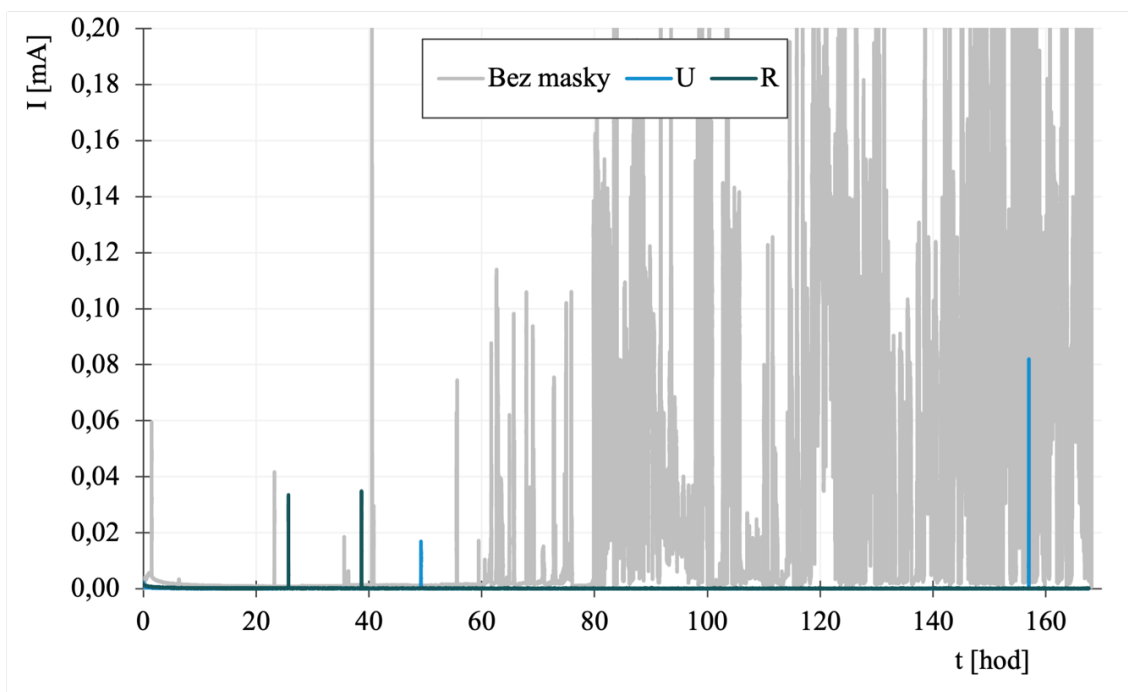
1.6.2 Výsledky THB testu

Výsledkem teplotně vlhkostního testu v klimatické komoře byly opět průběhy proudu, podle kterého se dá zjistit přítomnost a četnost zkratů způsobená dendrity. Na následujících grafech je vidět tento průběh pro všechny druhy masek (zelená, bílá, černá) v porovnání s typem designu masky (U, R, bez masky). Průběhy jasně ukazují, že vzorky bez nepájivé masky mají výrazně větší četnost zkratů, kdy jde od určité doby o trvalý zkrat. Zároveň i hodnoty zkratového proudu jsou mnohonásobně vyšší.

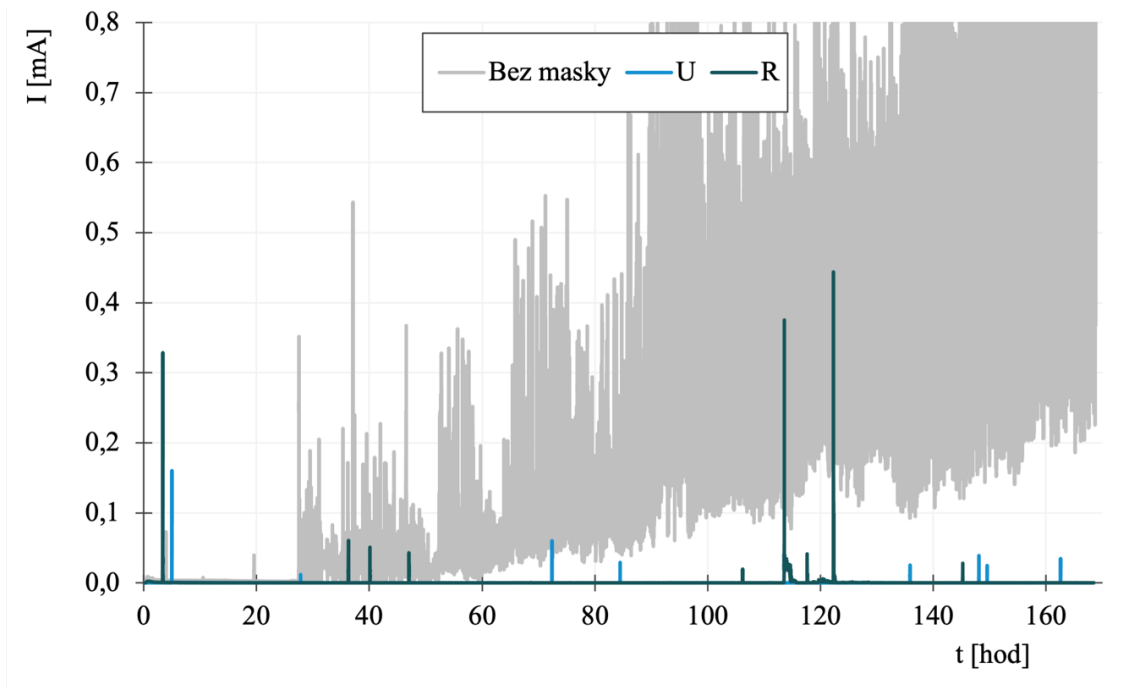
Vzhledem k tomu, že z water drop testu vycházelo, že tavidlové zbytky omezují elektrochemickou migraci, dala by se předpokládat u vzorků s pájecí pastou i nižší četnost výskytu zkratů. To ale neplatí. Vzhledem k tomu, že vzorky se zelenou maskou bez pájecí pasty mají četnost výskytu zkratů vyšší než s pastou, u bílé masky je četnost přibližně stejná a u černých masek je naopak vyšší u vzorcích s pastou, nelze v tomto případě vliv tavidla generalizovat. Podle četnosti výskytu zkratu ani nelze zobecnit vliv designu nebo typu masky na elektrochemickou migraci.



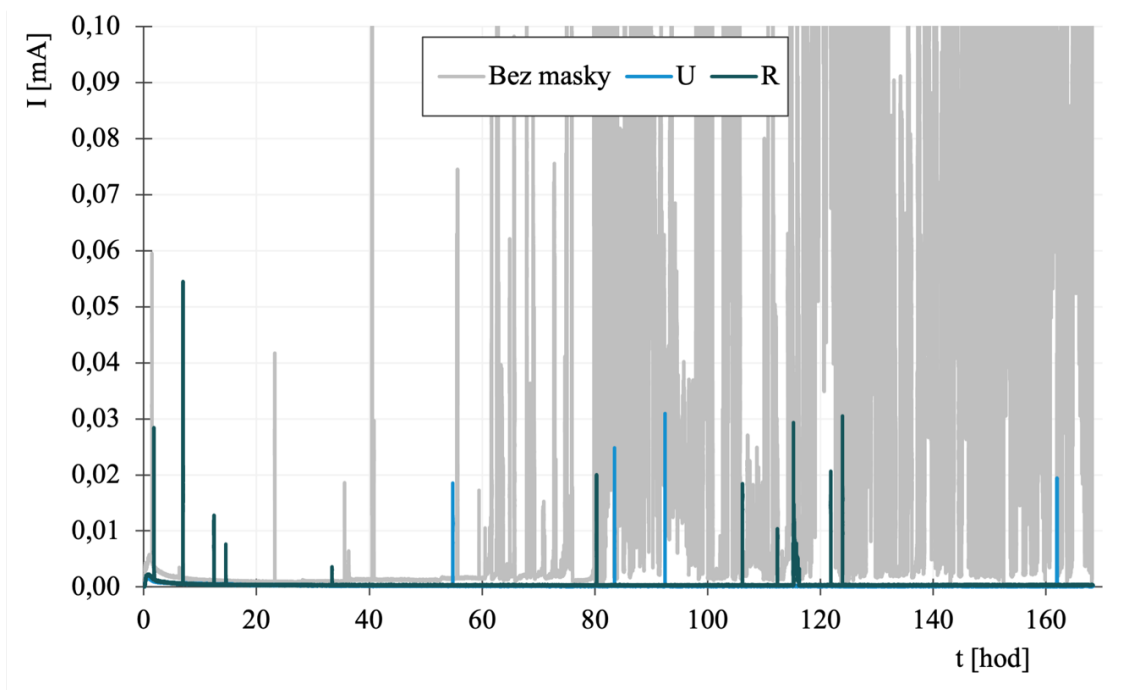
Graf 4: Průběh proudu (THBT) – Zelená maska



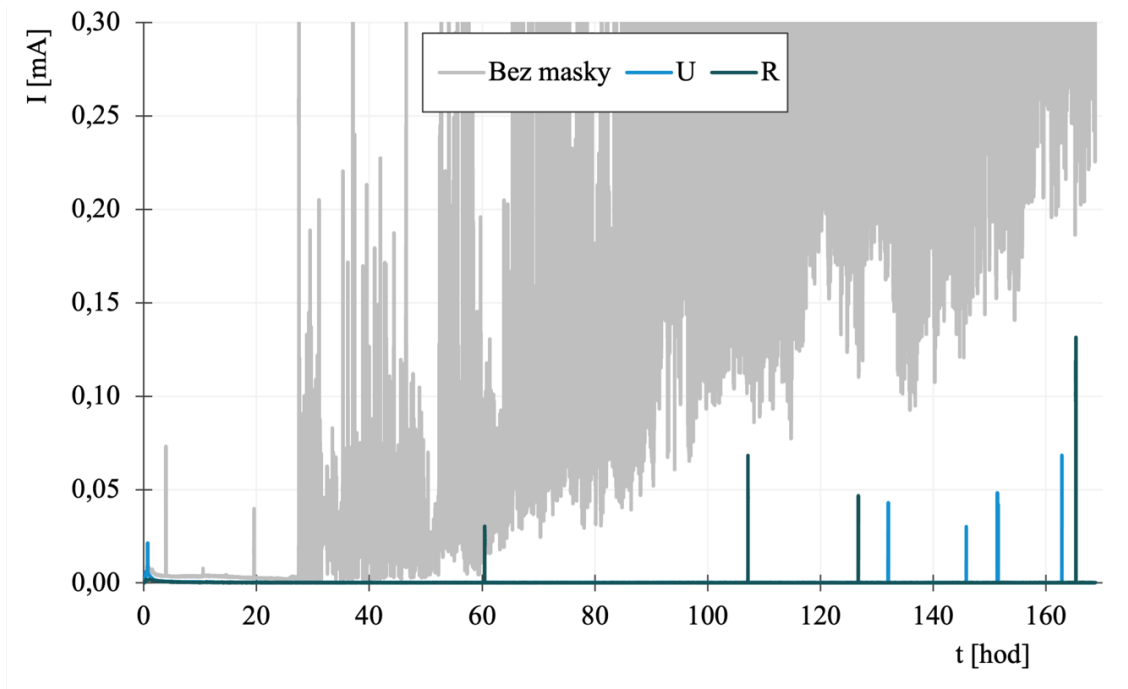
Graf 5: Průběh proudu (THBT) – Zelená maska – vzorky s pastou



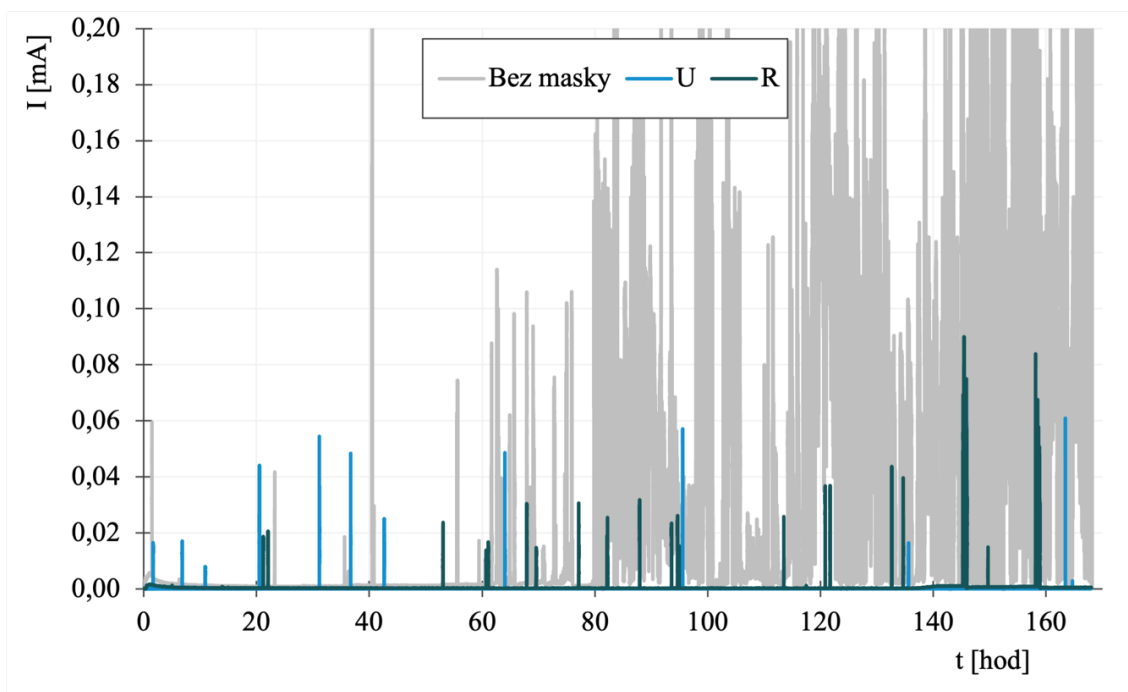
Graf 6: Průběh proudu (THBT) – Bílá maska



Graf 7: Průběh proudu (THBT) – Bílá maska – vzorky s pastou



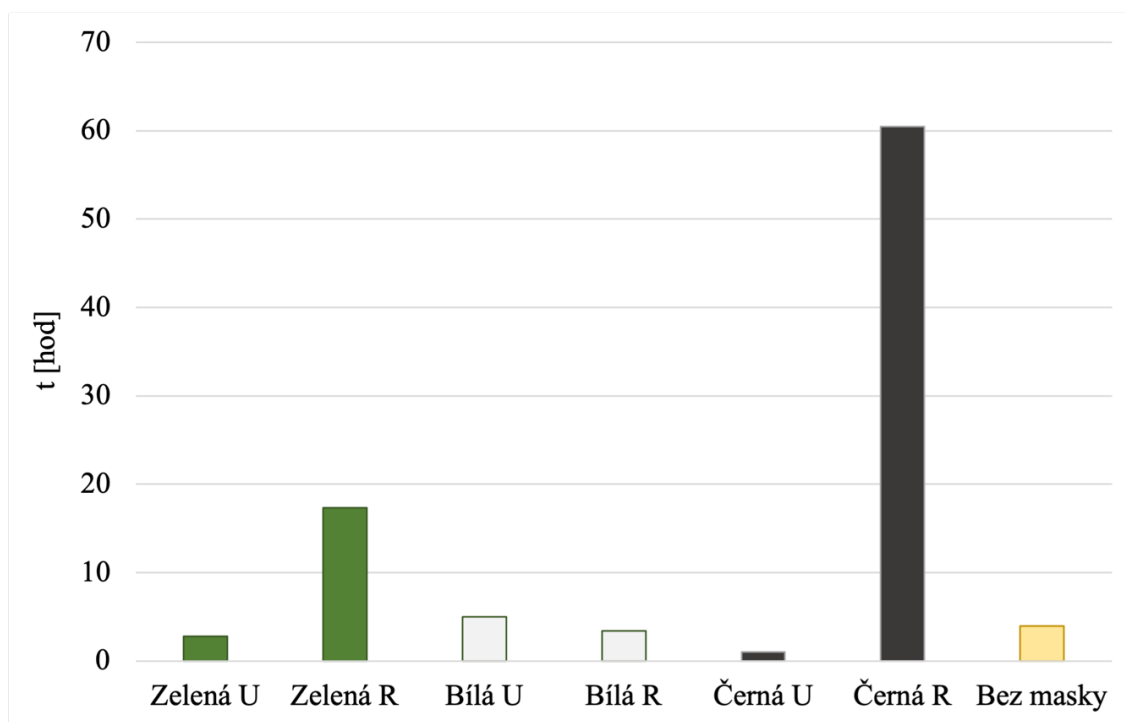
Graf 8: Průběh proudu (THBT) – Černá maska



Graf 9: Průběh proudu (THBT) – Černá maska – vzorky s pastou

Z výsledných hodnot časů do poruchy nelze jednotně určit vliv designu nepájivé masky na elektrochemickou migraci. Pro zelenou a černou masku vychází nejlépe (s nejdelším časem do poruchy) design typu R. Naopak u bílé masky to je typ U. Zároveň nelze jasně určit, která maska je proti elektrochemické migraci nejodolnější. Například u černé masky je nejkratší doba do poruchy ze všech typů U a zároveň nejdelší čas do poruchy ze všech typů R. Vzorky bez nepájivé masky mají výrazně vyšší četnost zkratů, dochází dokonce k trvalému zkratu a výraznému růstu dendritů oproti variantám s maskou. Doba do poruchy je ale pro vzorky bez masky porovnatelná se vzorky, které masku mají, v některém případě dokonce delší (zelená U, bílá R a černá U).

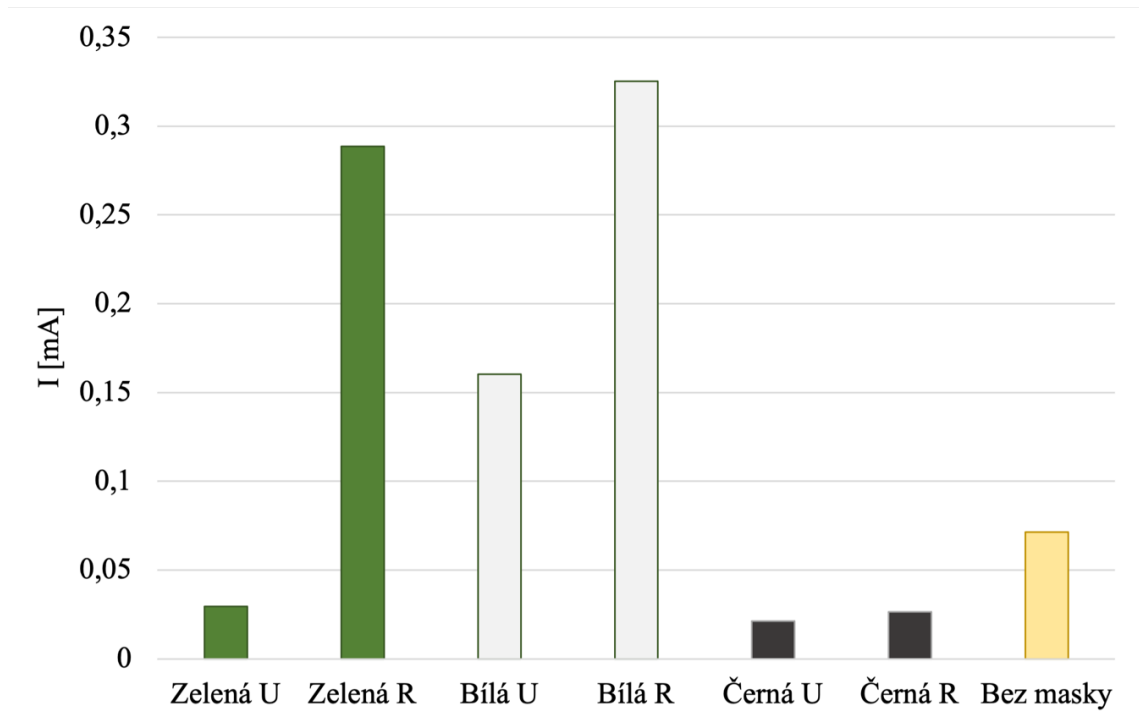
Z výsledků WD vychází, že co se týče času do poruchy, je na tom varianta bez masky podobně jako masky typu R. Výsledky z měření v klimatické komoře však ukazují, že v případě, kdy se začnou tvořit na desce dendrity, dochází k trvalému a výraznému růstu oproti variantám s maskou, kde je výskyt dendritů, resp. zkratu, ojedinělá a krátkodobá záležitost.



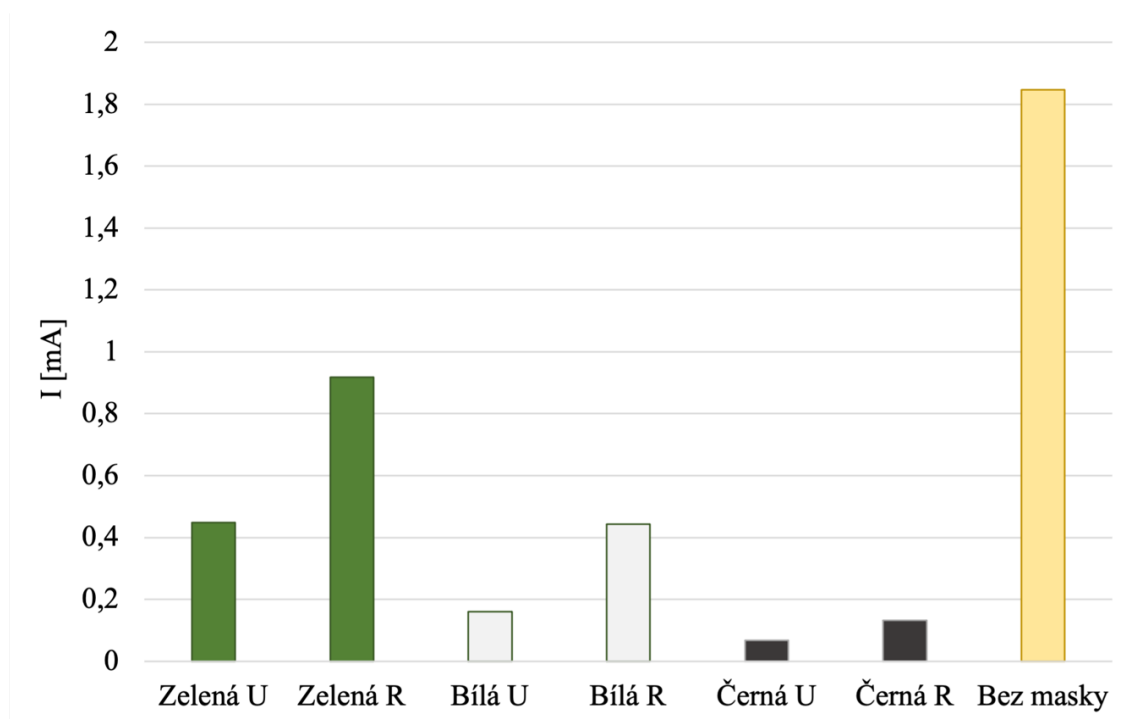
Graf 10: Čas do poruchy – vzorky bez pasty

I přestože vliv masky na elektrochemickou migraci z hlediska času do poruchy nelze dobře zobecnit, podíváme-li se na hodnoty zkratového proudu, vidíme zde určitý trend. U vzorků bez pájecí pasty jsou hodnoty proudů, ať už se jedná o hodnotu proudu při prvním zkratu nebo maximální hodnotu, u všech druhů masek nižší, když byl použit design masky typu U. V případě vzorků bez nepájivé masky hodnota proudu při prvním zkratu, či čas do poruchy nepoukazují na to, že by mohla být varianta více náchylná na elektrochemickou migraci. Přesto se však podle

četnosti výskytu zkratů a několikanásobné hodnoty maximálního proudu oproti ostatním variantám s maskou ukazuje, že varianta bez masky je nejméně odolná migraci.



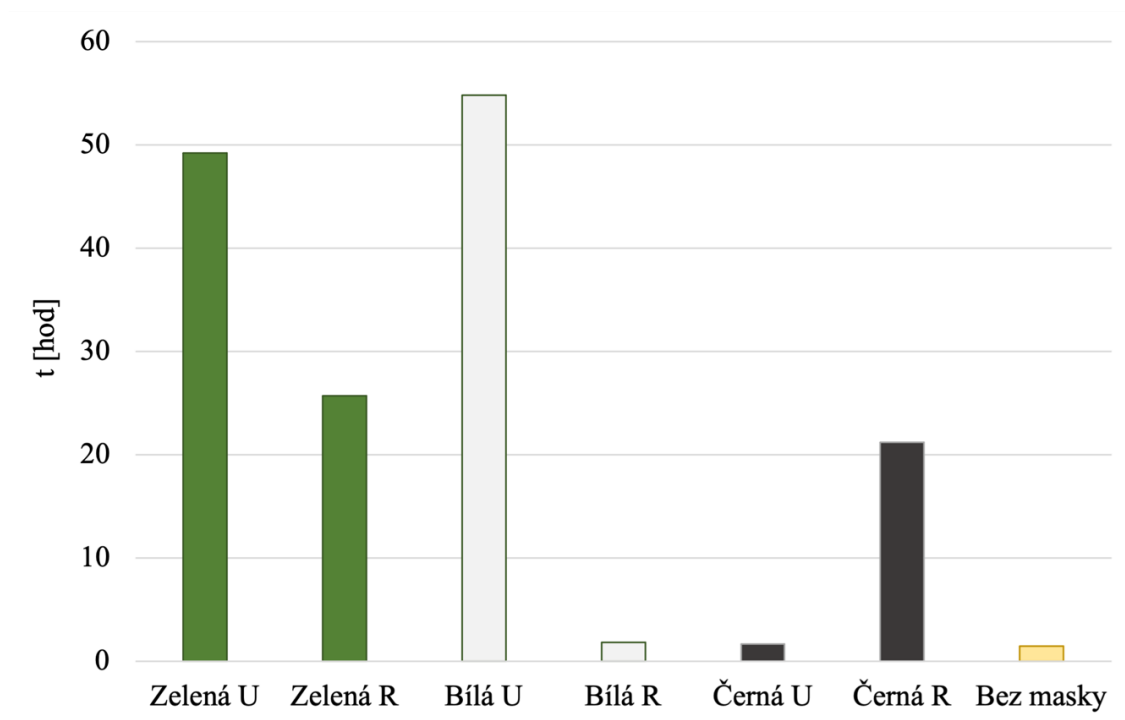
Graf 11: Hodnota proudu během prvního zkratu – vzorky bez pasty



Graf 12: Maximální hodnota zkratového proudu – vzorky bez pasty

Nejnižší hodnoty proudů (první zkratový i maximální) byly naměřeny na vzorku s černou maskou. Dále platí (kromě u prvního zkratového proudu u varianty U), že druhé nejnižší hodnoty proudů byly naměřeny u bílé masky, nejvyšší u zelené.

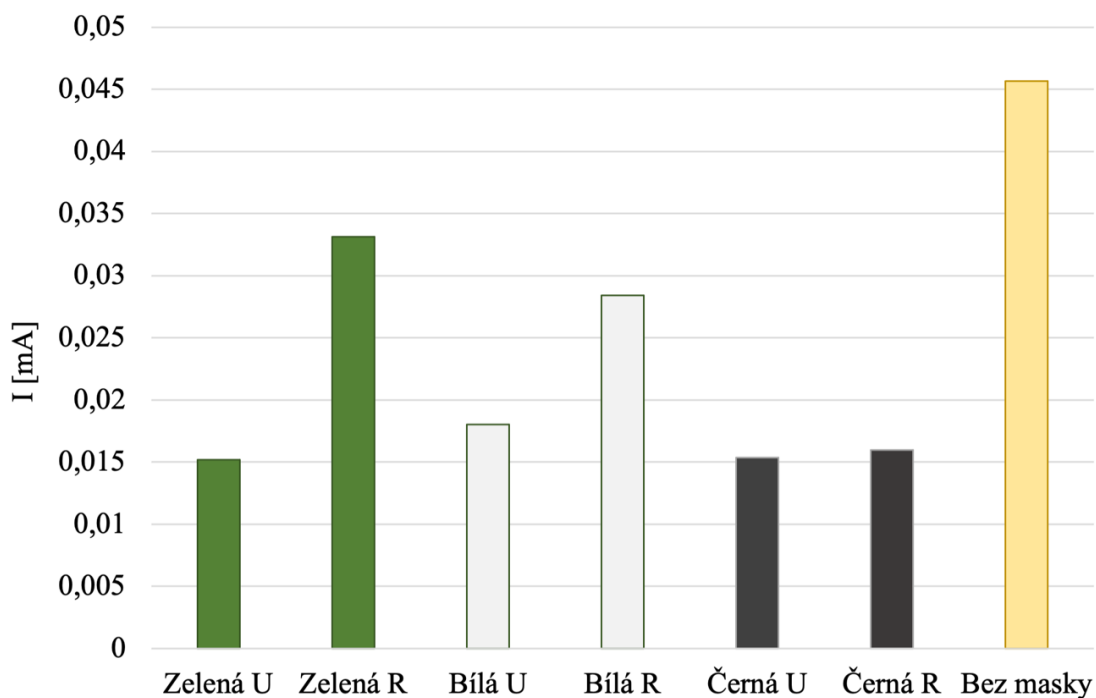
Ani v případě, kdy byla použita pájecí pasta, není vidět jasnou souvislost mezi designem masky a elektrochemickou migrací. Pro zelenou a bílou masku jsou vyšší časy do poruchy u typu U, kdežto u černé masky je to u typu R. Varianta bez nepájivé masky měla nejkratší čas do poruchy. Porovnáme-li však hodnoty časů i s variantou bez pájecí pasty, vyjde, že pro bílou masku je designu typu R náchylnější na ECM, pro černou masku je to naopak typ U. U zelené masky se pořadí použitím pájecí pasty prohodilo a není teda pro obě varianty stejné.



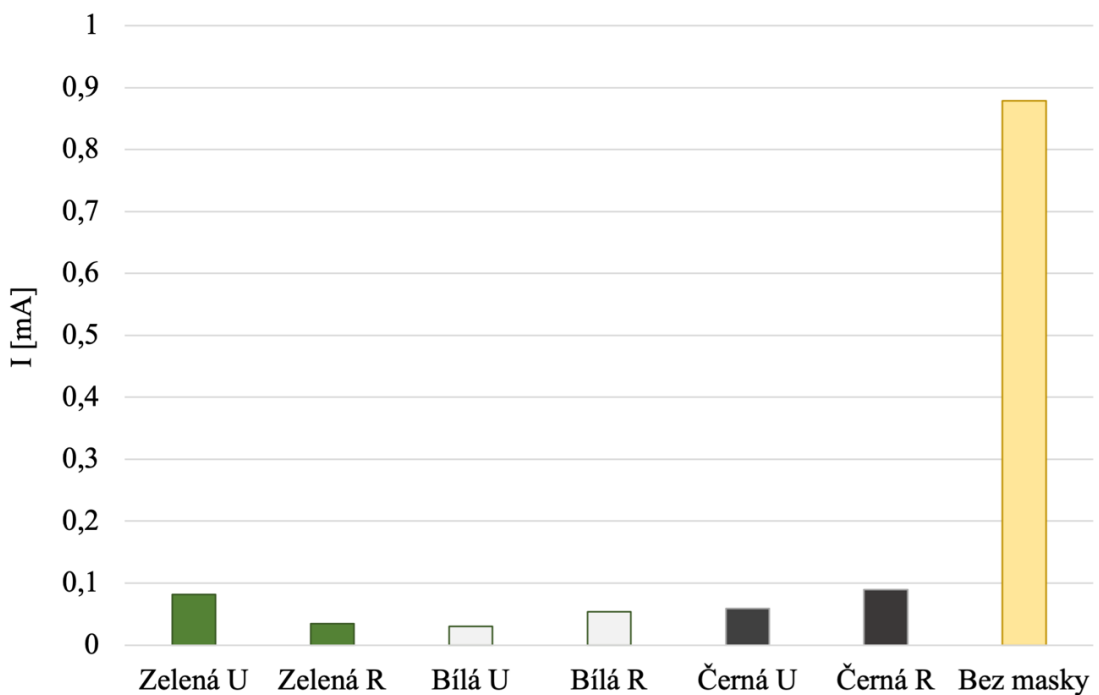
Graf 13: Čas do poruchy – vzorky s pastou

Co se týče hodnot zkratového proudu, tak i tam jsou hodnoty proudu při prvním zkratu nižší u designu typu U. Stejně tak to platí i pro hodnoty maximálního proudu u bílé a černé masky. Pouze v případě, kdy byla použita zelená maska, je proud nižší u varianty R. Hodnoty proudů u vzorků s pájecí pastou jsou nižší než u variant bez pájecí pasty, v některém případě až o jeden řád. To se týká jak prvního zkratového proudu, tak i maximální hodnoty proudu. Maximální hodnoty proudu u vzorků s pájecí pastou jsou všechny, nepočítáme-li variantu bez masky, menší jak 0,1 mA. Kdežto u vzorků bez pájecí pasty je pouze jedna varianta (černá U), která nepřesáhla hranici 0,1 mA. U zelené masky typu R maximální zkratový proud dokonce dosahuje téměř 1 mA. Zkratový proud je v tomto případě i vyšší než u varianty bez masky s pájecí

pastou. Lze tedy říct, že pokud je nanese na pájecí pasta, snižuje to v našem případě velikost proudu při zkratu způsobenému dendrity.



Graf 14: Hodnota proudu během prvního zkratu – vzorky s pastou



Graf 15: Maximální hodnota zkratového proudu – vzorky s pastou

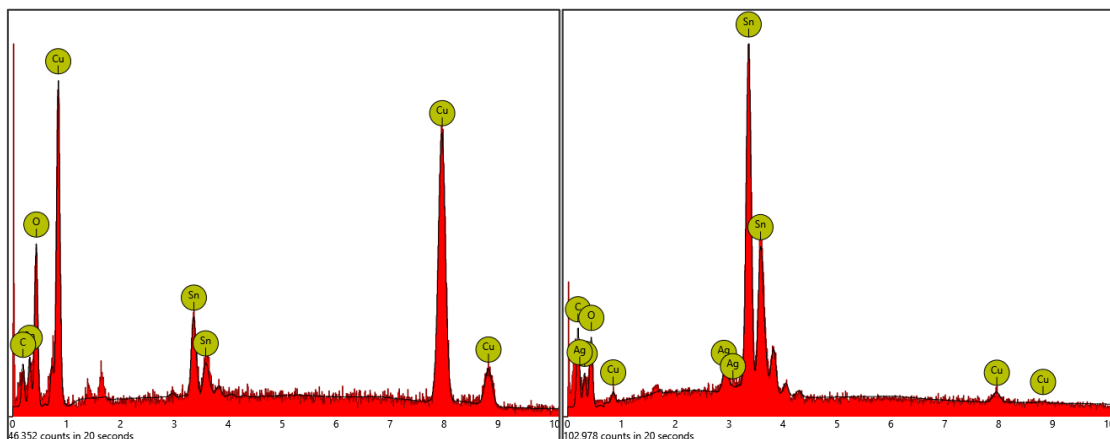
1.6.3 Výsledky optické a SEM analýzy

Po každé zkoušce byly desky a vzniklé dendrity opticky zkoumány. Zároveň byla u každé varianty provedena EXD analýza. Výsledky z ní jsou vidět v následující tabulce (Tabulka 3), která popisuje pro danou variantu druh migrujícího kovu. V každém případě šlo, jak se předpokládalo, o migraci cínu. Ve dvou případech (bílá U, černá R) došlo při water drop testu i k migraci mědi. U vzorku R s černou maskou se však měď objevila pouze na jednom ze tří testovaných míst, a to ještě v minimálním množství. Migrace mědi už však u teplotně vlhkostního testu není nijak ojedinělá, jelikož k ní došlo, spolu s cínem, ve většině případů. Může za to pravděpodobně delší trvání zkoušky, během kterého došlo nejdříve ke rozpouštění cínu a až poté i k rozpouštění a migraci mědi. U černé masky typu R a desky bez masky s pájecí pastou se dokonce mezi migrujícími kovy objevilo stříbro. Samotné stříbro má sice vysokou tendenci migrovat, ale vzhledem k tomu, že bylo součástí pájecí pasty, a navíc s takovým nízkým obsahem, nebyla jeho migrace předpokládána, a i v tomto případě se spíše jedná o ojedinělý jev.

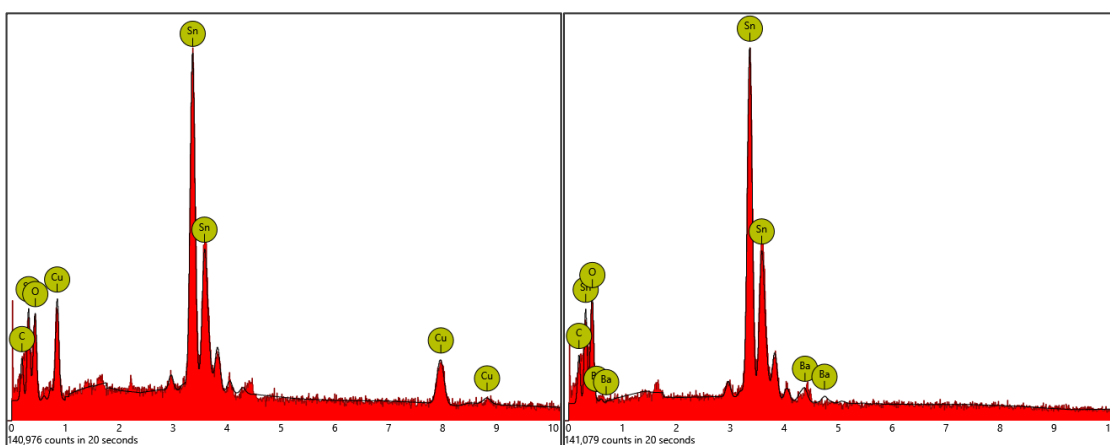
Tabulka 3: Složení dendritů – druh migrujícího kovu

Typ zkoušky		WDT	THBT
Bez masky	bez pasty	Sn	Sn, Cu
	pasta	Sn	Sn, Cu, Ag
Zelená	U	Sn	Sn, Cu
	R	Sn	Sn, Cu
	U_pasta	Sn	Sn, Cu
	R_pasta	Sn	Sn, Cu
Bílá	U	Sn, Cu	Sn, Cu
	R	Sn	Sn
	U_pasta	Sn	Sn, Cu
	R_pasta	Sn	Sn
Černá	U	Sn	Sn, Cu
	R	Sn, Cu	Sn, Cu
	U_pasta	Sn	Sn
	R_pasta	Sn	Sn, Ag

Na následujících obrázcích lze vidět průběhy z EDX analýzy, kde i přes lehký šum je přítomnost zmíněných kovů zřejmá. Jsou zde vidět i organické zbytky (kyslík, uhlík), které se nachází na každém vzorku a mohou pocházet například ze zaschlého elektrolytu nebo ze zbytku tavidla. Během analýz se často mezi složením dendritů objevovaly i prvky jako je například brom či křemík. Je to dáno zbytky prachu, které se na desku dostaly během řezání a které nešly dokonale odstranit ani ofouknutím čistým dusíkem.

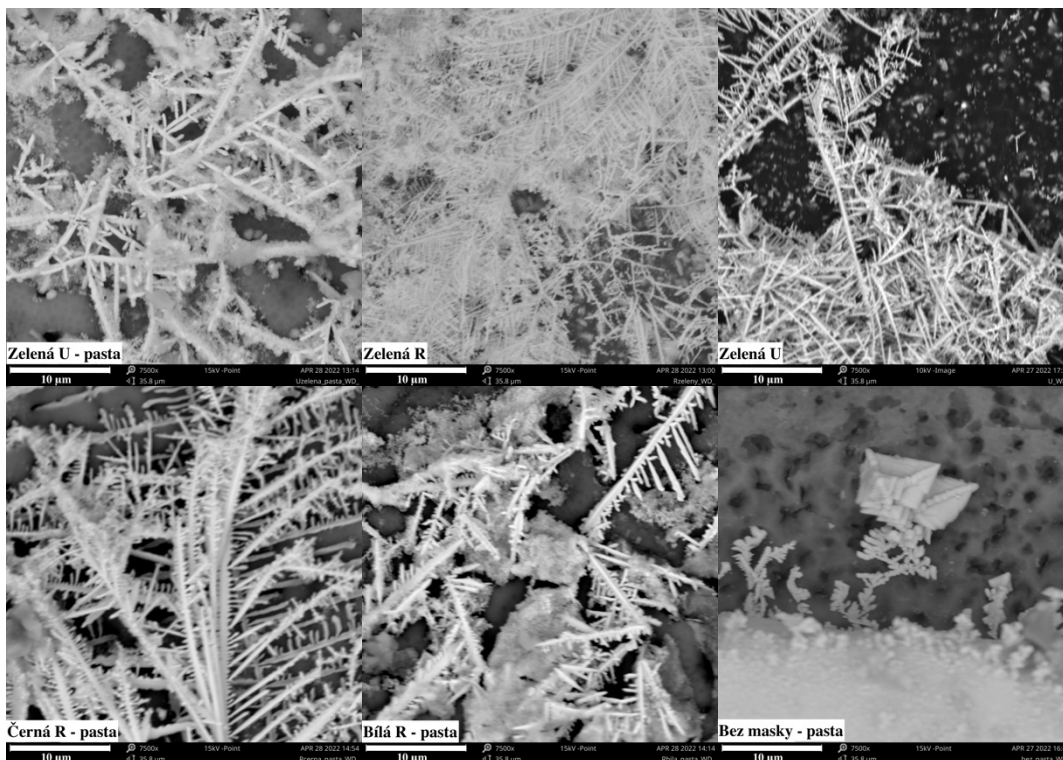


Obrázek 34: Vzorek bez masky – THBT. Zleva: bez pasty, s pastou

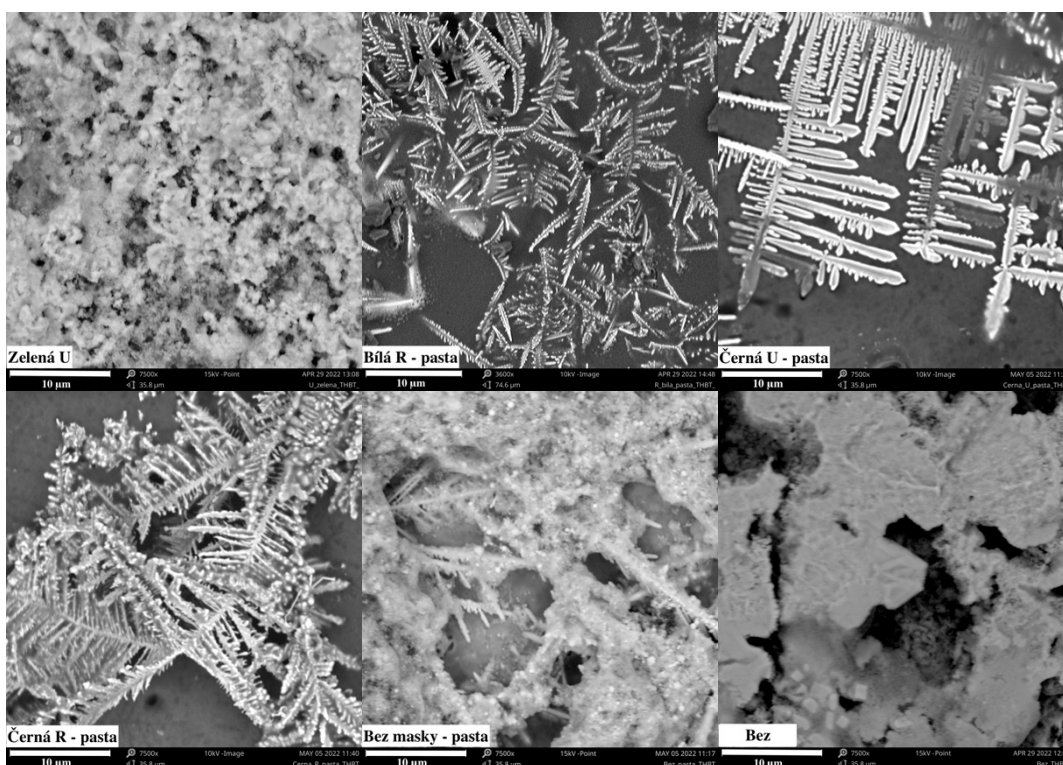


Obrázek 35: Vzorek s bílou maskou, bez pasty – WD. Zleva: U, R

Následující snímky byly pořízeny na elektronovém mikroskopu pro 7500x zvětšení pro vzorky po water drop testu a po teplotně vlhkostrním testu. Struktury dendritů se od sebe liší, tloušťkou jednotlivého dendritu, či směrem jeho růstu. V některých případech dokonce ztratily i typickou stromovitou strukturu. Například u vzorku bez masky s pájecí pastou po WD testu vznikly na koncích dendritu jakési jehlanové struktury. Naopak po THB testu u zelené masky typu U nebo u vzorku bez masky nelze poznat, že jde vůbec o dendrit. Na snímcích vzorků s pastou je možné si všimnout, že je dendrit obalený ve zbytcích tavidla.

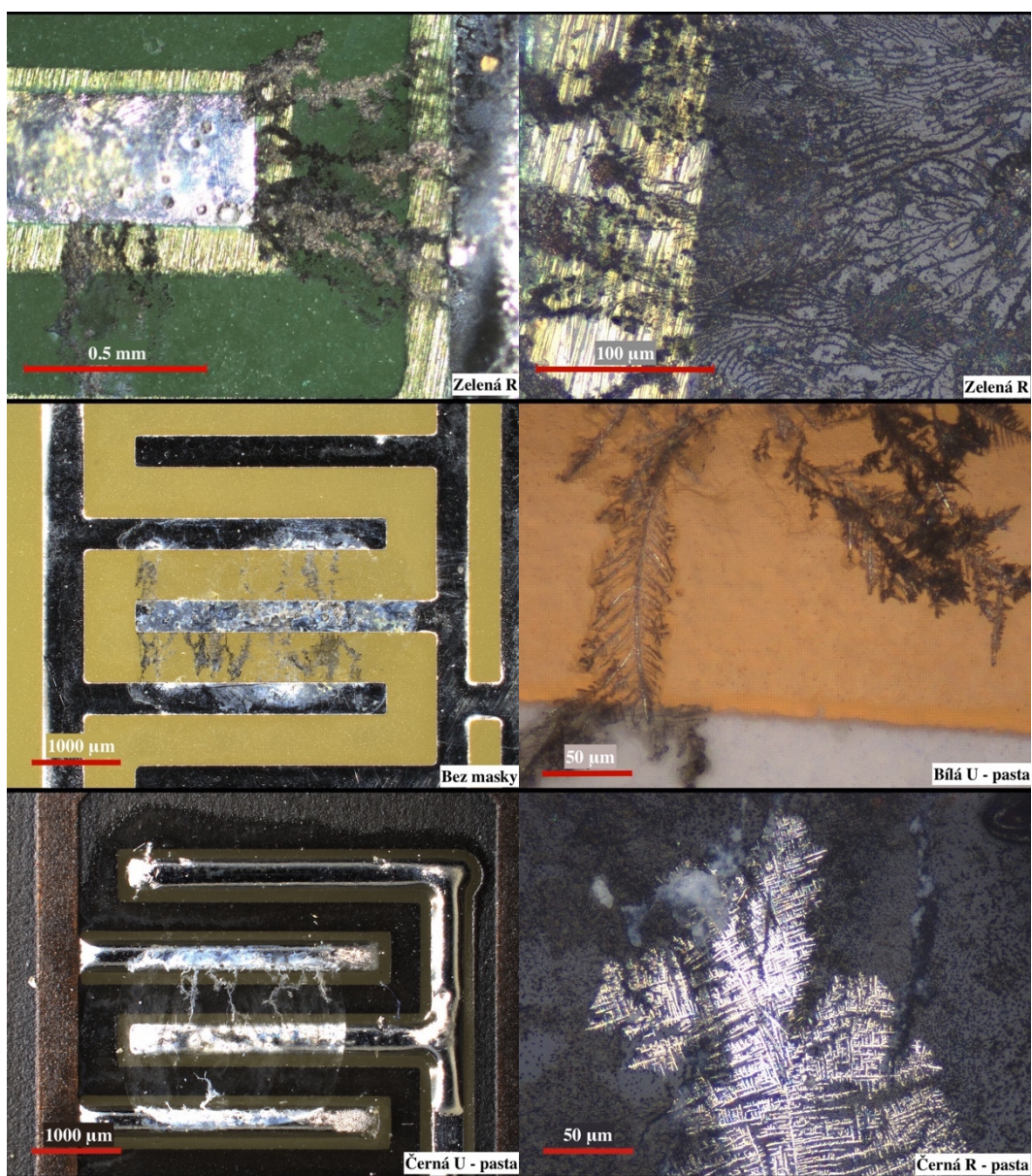


Obrázek 36: Snímky z SEM – vzorky po WD testu (měřítko se rovná 10 µm)



Obrázek 37: Snímky z SEM – vzorky po THB testu (měřítko se rovná 10 µm)

Jak je vidět z následujících obrázků dendritů po WD testu, dochází k růstu dendritů, které mají odlišné struktury. Na obrázku vpravo uprostřed je vidět růst dendritu přes rozhraní masky typu U.



Obrázek 38: Ukázka dendritů vzniklých během WD testu

Když se podíváme na vybrané obrázky dendritů vyrostlých během teplotně vlhkostního testu, lze si všimnout, že v některých případech jsou už elektrody přepálené tak, že se struktura dendritu kompletně ztratila. Při měření na bílé masce typu U (obrázek vlevo nahoře) došlo dokonce k odfouknutí vyrostlého dendritu z elektrod do prostoru testovacího vzorku. Dendrit se pak může pohybovat po desce plošných spojů, kde může způsobit další zkratky. V případě měření na vzorku bez nepájivé masky je vidět na obrázku vlevo dole migrující oranžová měď a na obrázku vpravo dole dokonce případ, kdy došlo k patrnému rozpuštění elektrody.

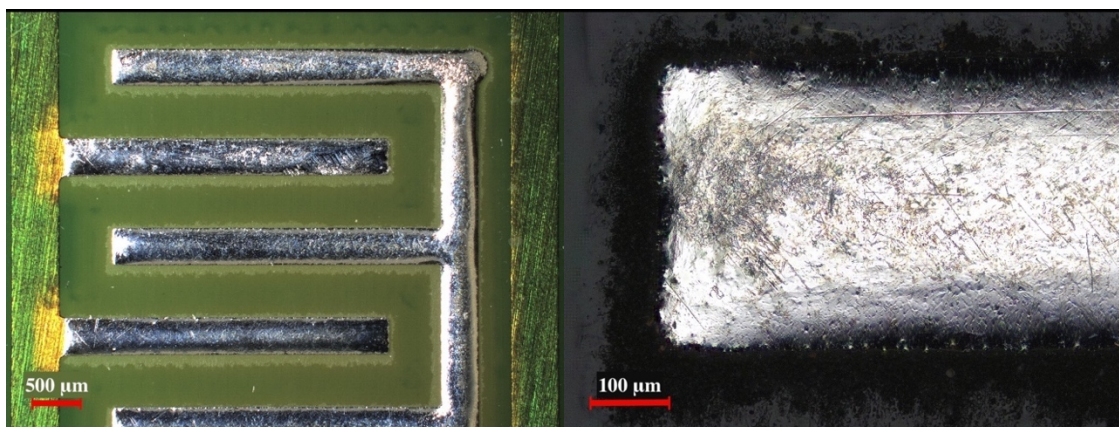


Obrázek 39: Ukázka dendritů vzniklých během THBT testu

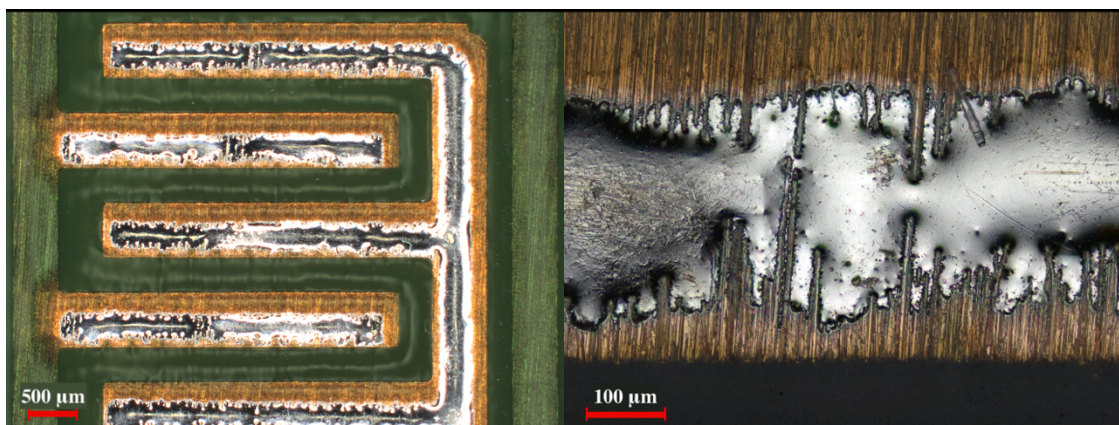
1.7 DESKY S NESPRÁVNĚ APLIKOVANOU MASKOU

Firma, u které byly objednané vzorky s klasickou zelenou maskou, dodala nejdříve vzorky vyrobené technologií Inkjet (tištěná maska), které měly špatně vytvrzenou masku. Na tento problém se přišlo až po nanesení pájecí pasty a jejím přetavení, kdy povrch téměř nebo vůbec nesmáčel. Oba typy vzorků bez pájecí pasty předtím tedy prošly jak klimatickou zkouškou, tak i water drop testem. Vzhledem k dispozici dat z měření, jsem se rozhodla experimentální část rozšířit i o krátkou kapitolu vlivu nedostatečně vytvrzené nepájecivé masky na elektrochemickou migraci. Podrobnější zdůvodnění toho, že jde o vliv špatně vytvrzené masky, je v kapitole EDX analýza.

Vzorky se špatnou maskou jsou porovnány se vzorky s klasickou zelenou maskou, která byla nanášena sítotiskem a litografickým procesem. Pro viditelné odlišení vzorků se špatnou maskou od vzorků s maskou správně aplikovanou značím špatné vzorky Ux a Rx. U vzorků typu Rx je vada v aplikaci HASLu vidět na první pohled. Naopak vzorky Ux vypadají, že jsou vyrobeny správně, i když se u nich vyskytuje stejný problém.

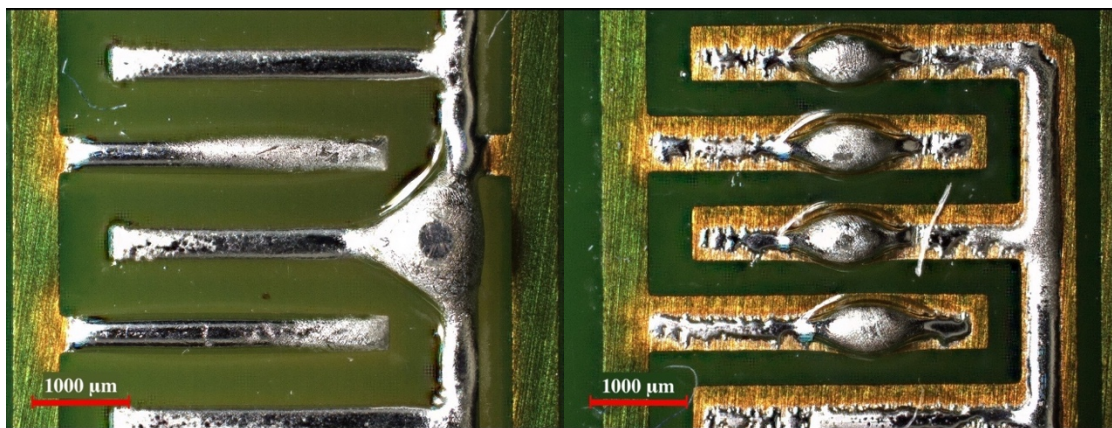


Obrázek 40: Přiblížení na aplikaci HASLu (typ Ux)



Obrázek 41: Přiblížení na aplikaci HASLu (typ Rx)

Na následujících obrázcích je vidět pokus o nanesení pájecí pasty na vzorky se špatnou maskou. Nesmáčení daných plošek je zřejmé, a to i u vzorku typu Ux, kde se povrchová úprava zdá být, na rozdíl od typu Rx, bez jakýchkoliv viditelných problémů.

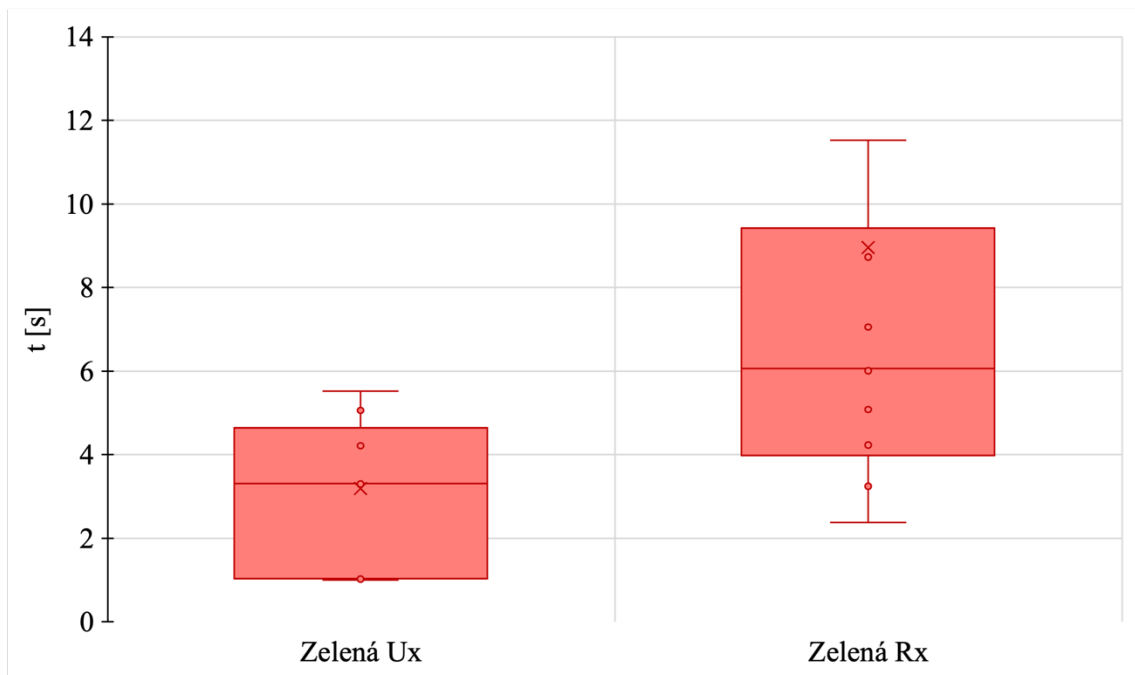


Obrázek 42: Vzorky s pastou. Zleva: Ux, Rx

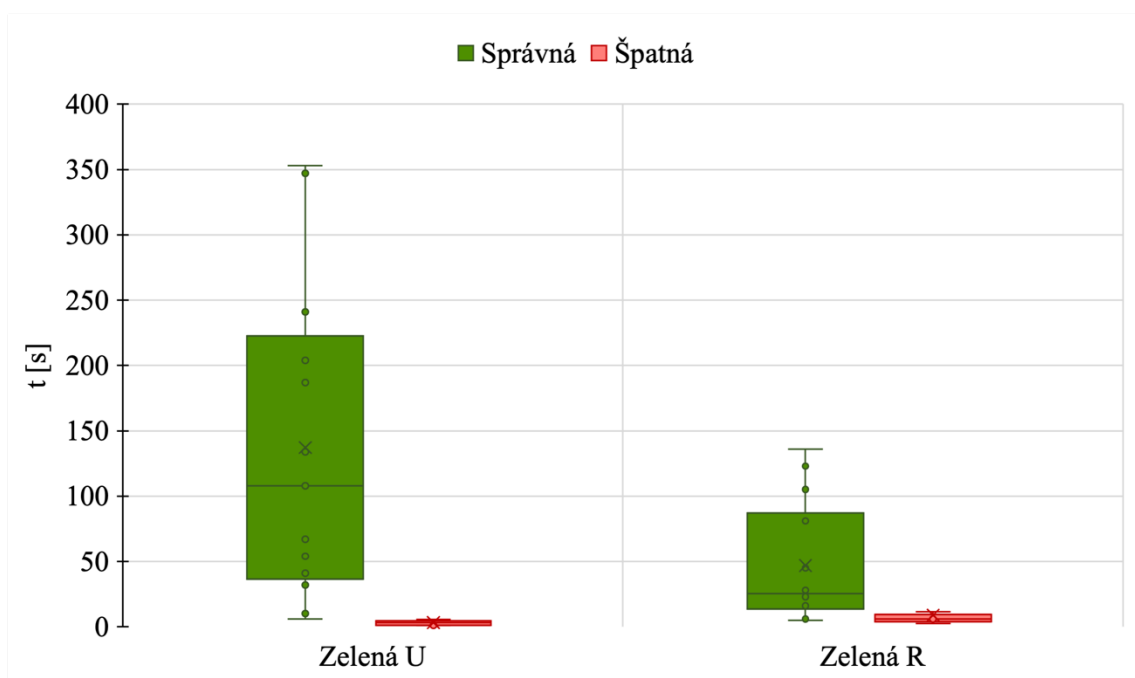
1.7.1 Výsledky WD a THB testu

V této kapitole jsou zpracovány výsledky z water drop testu a teplotně vlhkostního klimatického testu pro desky se špatně vytvrzenou maskou. Hodnoty jsou porovnány se vzorky s klasickou zelenou maskou.

Jak lze vidět z následujících grafů, čas do poruchy u water drop testu vychází opačně, než u ostatních (zelená, bílá, černá) správně vyrobených masek. Masky s variantou Ux měla větší tendenci výskytu elektrochemické migrace než varianta Rx. Pokud ale porovnáme čas do poruchy s hodnotami správné masky, lze tento rozdíl mezi variantami Rx a Ux zanedbat. Rozdíl mezi Ux a Rx je pouze pár vteřin, kdežto u správné masky jsou rozdíly mezi variantami i několik minut. Můžeme tvrdit, že dendrit vyrostou při water drop testu v obou případech téměř okamžitě.

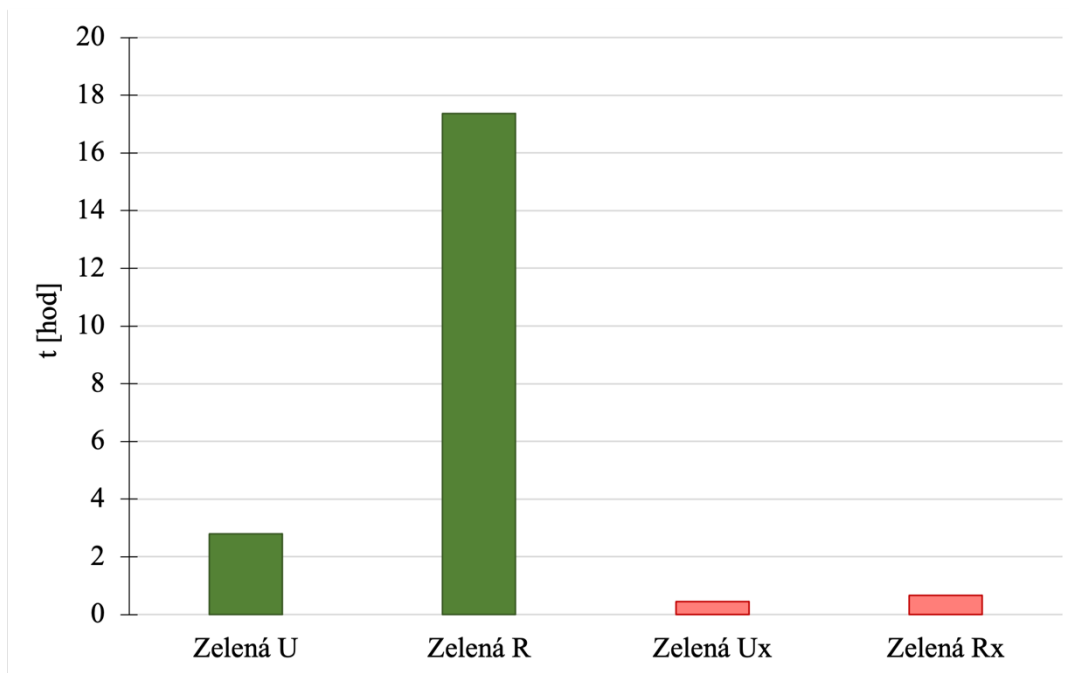


Graf 16: Čas do poruchy – WDT, špatná maska



Graf 17: Čas do poruchy – WDT, správná vs. špatná maska

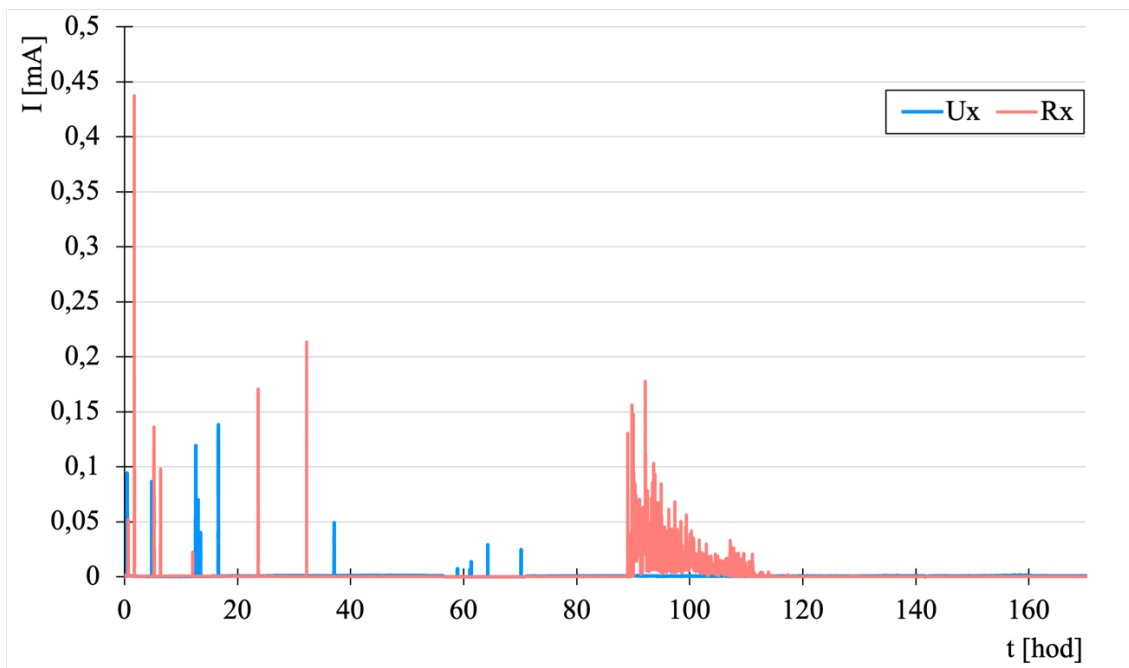
Výsledky měření v klimatické komoře potvrzují výsledky získané z water drop testu. I v tomto případě se u varianty Ux tvořily dendrity rychleji než u Rx. Na rozdíl od water drop testu, zde ale pořadí odpovídá i výsledkům správně vytvořených masek.



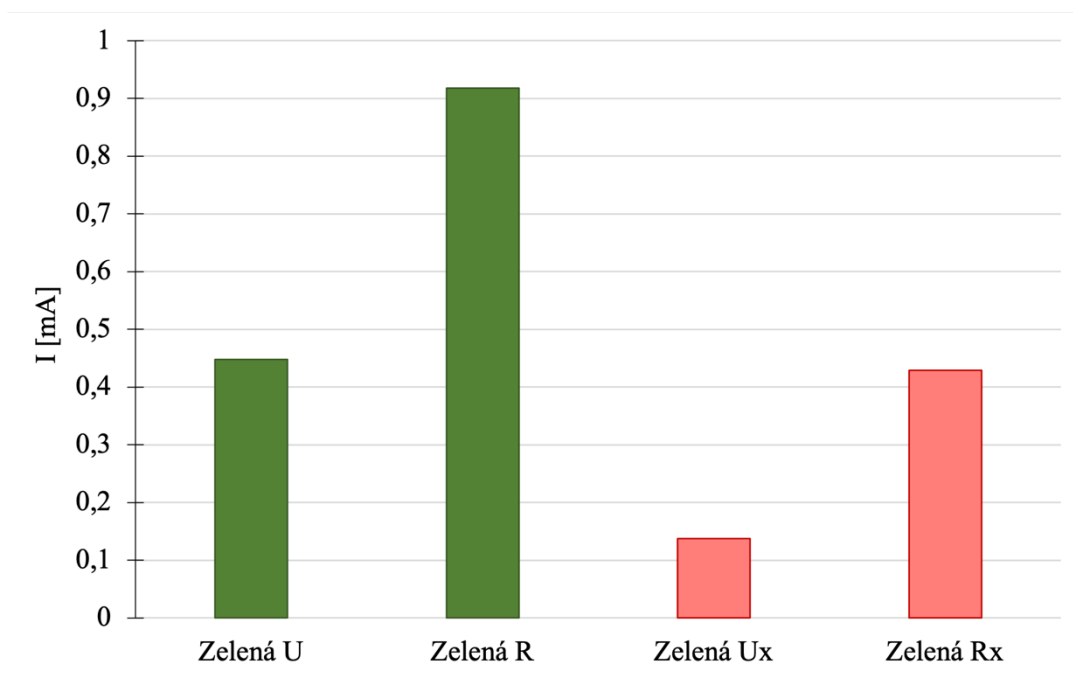
Graf 18: Čas do poruchy – THBT

Z obou testů (WD, THB) vychází, že v případě špatně vyrobené masky, varianta Ux má kratší čas do poruchy. To i přesto, že kvalita desek s designem Rx vypadá na první pohled více ovlivněna nesprávnou aplikací masky. V tomto případě by bylo možné očekávat i vyšší výskyt nečistot u Rx vzhledem k výrazně horší aplikaci HASLu a pájecí pasty, a tedy i vyšší náchylnost k migraci. Zřejmé je ale výrazné urychlení elektrochemické migrace u desek se špatnou maskou.

Co se týče hodnot proudů způsobených zkratováním obvodu dendrity během teplotně vlhkostního testu, tak u něj vychází, jak pro správně i špatně vyrobenou masku, nejvyšší hodnoty u varianty R, resp. Rx. Maximální hodnota proudu u varianty Ux, resp. U, je násobně nižší jak u varianty Rx. Zároveň si lze všimnout i toho, že i přes kontaminaci špatně vyrobené masky, hodnoty proudů jsou u ní nižší než v případě správně vyrobené masky. I přestože Ux má kratší čas do poruchy, četnost dendritů je vyšší u varianty Rx. Od 89. do 104. hodiny dokonce došlo k trvalému zkratu. Ostatní zkraty byly přerušeny hned potom, co dendrit přemostil elektrody.

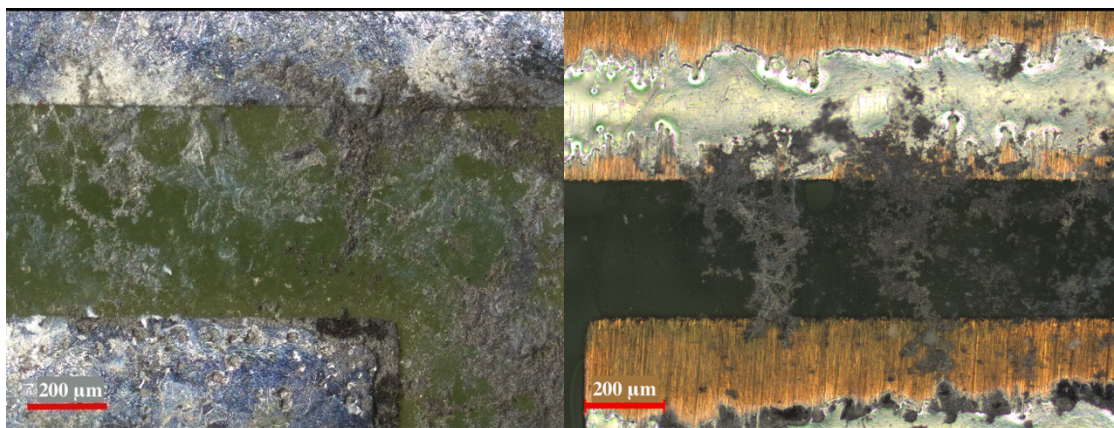


Graf 19: Průběh proudů – THBT



Graf 20: Maximální hodnota proudů – THBT

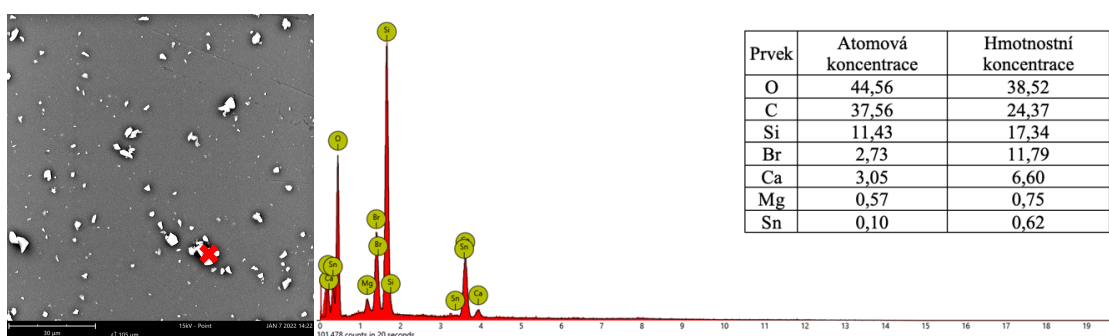
Na následujícím obrázku lze vidět příklad dendritů vyrostlých na DPS pro obě varianty masky po water drop testu. Lze vidět, že dendrity rostou především z povrchové úpravy HASL, což může být možným důvodem delšího času do poruchy u varianty Rx. Jelikož je aplikace HASLu nerovnoměrná a nepravidelná, vzdálenost mezi opačnými polaritami je větší než v případě Ux. K propojení elektrod dendrity dojde tedy později, jelikož musí přemostit větší vzdálenost a intenzita elektrického pole je nižší.



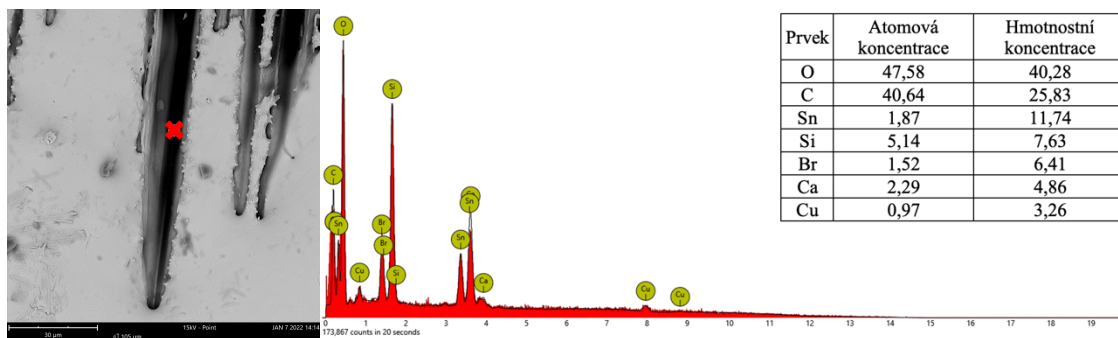
Obrázek 43: Dendrity na špatné desce typu WDT. Zleva: Ux, Rx

1.7.2 EDX analýza

I pro vzorky se špatnou maskou byla vypracována EDX analýza. Nejdříve byla provedena na samotném povrchu masky a vodivé cesty, aby se potvrdil vliv špatné aplikace masky na nesmáčení. Poté byla analýza provedena na samotném dendritu, aby se určily migrující prvky. Na následujících obrázcích lze vidět jednotlivé prvky, které se nachází na povrchu masky a vodivé cesty. Kromě očekávaných prvků (kyslík, uhlík, cín, měď) se na vodivých ploškách objevují prvky jako jsou křemík, brom, vápník. Tyto prvky můžeme ale vidět i ve složení masky. Lze tedy předpokládat, že příčinou špatné aplikace povrchové úpravy HASL a nesmáčení vodivých plošek byla chyba v procesu nanesení nepájivé masky, kterou bylo pravděpodobně nedostatečné vytvrzení nepájivé masky, které vede ke kontaminaci desky plošných spojů a snižuje její smáčení [11].

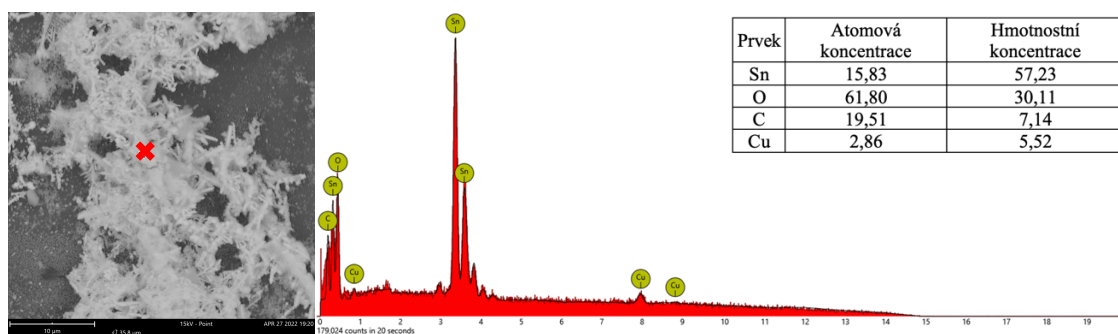


Obrázek 44: EDX analýza – povrch masky

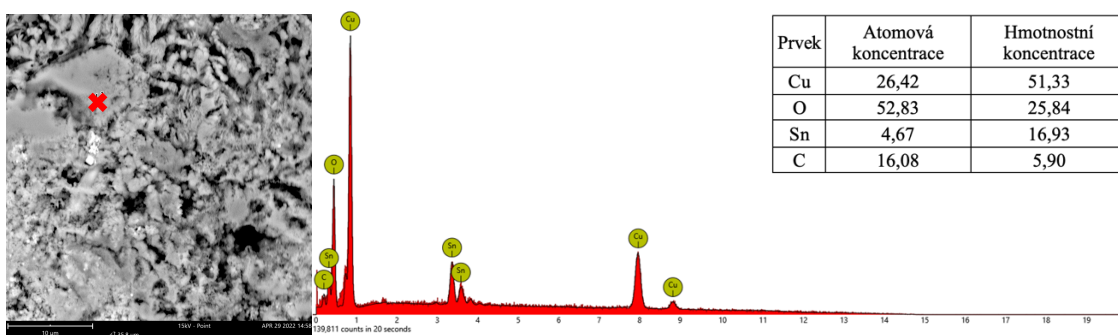


Obrázek 45: EDX analýza – vodivá cesta

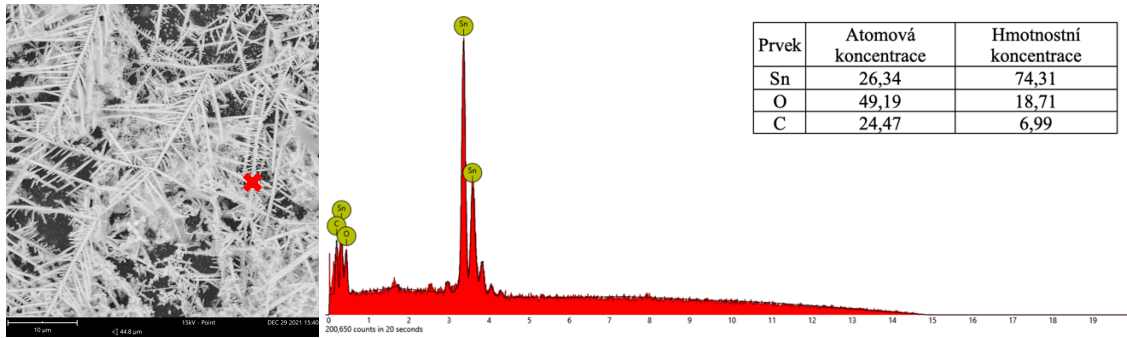
Dále byly provedeny EDX analýzy samotných dendritů pro oba typy vzorků (Ux a Rx) a pro obě zkoušky (WDT a THBT). Z výsledků vyplývá, že u water drop testů migruje především cín, i když se u varianty Ux objevuje v malém množství i měď. U dendritů vzniklých při testu v klimatické komoře už není složení tak shodné. U varianty Ux se opět objevila měď, tentokrát ale ve výrazně větším množství, než bylo cínu. U varianty Rx naopak měď nebyla součástí dendritů vůbec a dendrity tedy vznikaly pouze z povrchové úpravy HASL.



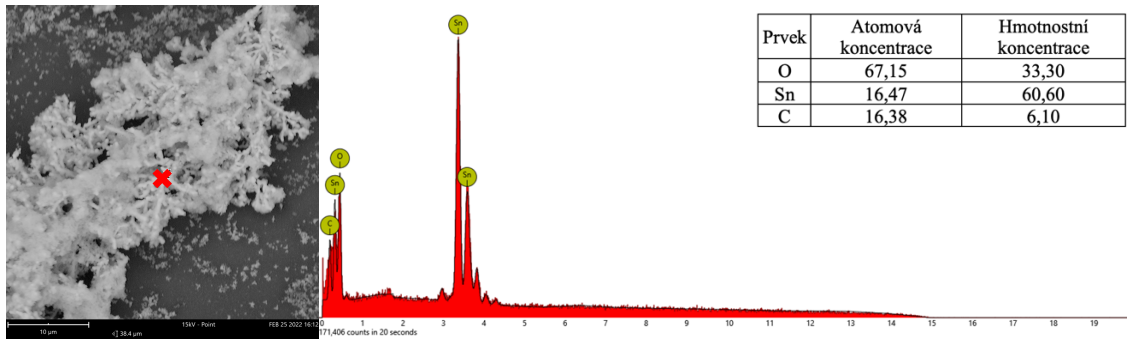
Obrázek 46: Vzorek typu Ux – po WD testu



Obrázek 47: Vzorek typu Ux – po THB testu



Obrázek 48: Vzorek typu Rx – po WD testu



Obrázek 49: Vzorek typu Rx – po THB testu

1.8 DISKUZE NAD VÝSLEDKY

Pro zjištění vlivu designu (typ U, R) a druhu masky (zelená, bílá, černá) byl proveden statistický Studentův t-test. Hladina významnosti byla zvolena $\alpha = 0,05$. T-test byl proveden pro hodnoty časů do poruchy naměřených při water drop testu. Vzhledem k tomu, že desky bez nepájivé masky vyšly jako nejméně vhodné pro omezení elektrochemické migrace, byly během tohoto vyhodnocení opomenuty.

Zaměříme-li se na design masky, je pro všechny vzorky bez pájecí pasty rozdíl mezi typem U a typem R statisticky významný. V tom případě se jeví varianta U jako vhodnější, chceme-li omezit elektrochemickou migraci. Co se týče vzorků s pájecí pastou, tak tam je rozdíl v designu statisticky nevýznamný, u bílé a černé masky p hodnoty ze statistického testu dokonce překročily 80 %.

Delší doby do poruchy u vzorků typu U bez pájecí pasty mohou být způsobeny „příkopem“ mezi vodivou cestou a maskou, který musí dendrit přemostit. Oproti tomu u typu R je přechod mezi vodivou cestou a maskou téměř plynulý. U vzorků s pájecí pastou mohly zbytky tavidla tento „příkop“ vyplnit a rozdíl mezi oběma typy se zmenšil. Dalším možným scénářem je, že zbytky tavidla a jimi vytvořená bariéra, která zpomalovala růst dendritů, měla na rychlost růst dendritů výrazně větší vliv, než byl design nepájivé masky, který byl v tomto případě zanedbatelný.

Tabulka 4: Výsledek T-testu – závislost typu U a R

	Zelená	Bílá	Černá
Bez pasty	0,02	0,02	0,01
S pastou	0,15	0,96	0,82

Studentův t-test byl proveden i pro zjištění závislosti mezi druhy masek pro oba typy designu. Ve většině případů vyšlo, že vliv druhu masky je statisticky nevýznamný, ať už se jedná o vzorky s pájecí pastou nebo bez ní. Staticky významný vyšel rozdíl mezi černou a bílou maskou pro typ U, jak pro vzorky s pájecí pastou, tak i bez pasty. Pokud bychom zvýšili, vzhledem k vysokým výsledným hodnotám testu, hladinu významnosti na přibližně 10 %, byl by pro typ R významný i rozdíl mezi černou a bílou maskou a mezi černou a zelenou maskou. Z toho vyplývá, že drsnost povrchu masek může hrát určitou roli při procesu elektrochemické migrace, kdy vyšší drsnost povrchu zpomaluje samotný růst dendritu. Zbytky tavidla na desce mohou rozdíly v drsnosti snižovat.

Tabulka 5: Výsledek T-testu – závislost různých druhů masek

	Bez pasty		S pastou	
	typ U	typ R	typ U	typ R
Zelená / Bílá	0,19	0,89	0,27	0,66
Zelená / Černá	0,53	0,09	0,55	0,12
Černá / Bílá	0,02	0,07	0,05	0,24

Vzorky s pájecí pastou nemají jen delší časy do poruchy, ale přítomnost tavidla pravděpodobně i snižuje velikost průchozího zkratového proudu. Je však otázkou, jak se bude chovat a jaký bude mít vliv z dlouhodobého hlediska. Z optického pozorování totiž vyšlo najevo, že se na zbytky tavidla snadno vážou nečistoty, které mohou časem snižovat spolehlivost zařízení.

Co se týče desek bez nepájivé masky, tak přestože se podle některých hledisek tato varianta jevila jako méně problémová, celkové výsledky (především z THB testu) jasně ukazují na vyšší riziko výskytu elektrochemické migrace. Navíc se u desek bez masky může ECM snadno vyskytnout v takovém měřítku, kdy může dojít k úplnému zničení zařízení bez možnosti opravy.

Odlišnosti ve výsledcích získaných z water drop testu a teplotně vlhkostního testu mohou spočívat v první fázi procesu elektrochemické migrace, a to ve tvorbě elektrolytické vrstvy, kdy při water drop testu je tento krok úplně přeskočen. Zároveň v případě water drop testu je tloušťka elektrolytu relativně vysoká a dendrit může růst (proplouvat) skrz i bez kontaktu s povrchem desky. V případě teplotně vlhkostního testu se během testování tvořil na desce pouze tenký film, kde se předpokládá růst dendritu přímo po povrchu desky.

ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na problém elektrochemické migrace a vliv nepájivé masky na ni. Elektrochemická migrace byla sledována na třech druzích nepájivých masek, které se lišily v barvě, resp. drsnosti povrchu, a na deskách plošných spojů bez nepájivé masky. Tyto vzorky byly navíc rozděleny podle druhu návrhu nepájivé masky z hlediska kontaktu masky s vodivými cestami a zároveň podle toho, zda byla na vodivé cesty nanášena pájecí pasta či ne.

Z provedených zkoušek vyplývá, že nejodolnější druh masky proti elektrochemické migraci je černá maska (s nejvyšší povrchovou drsností), u které vyšly při water drop testu nejdelší časy do poruchy a u teplotně vlhkostního testu naopak nejnižší hodnoty zkratového proudu. Zároveň se potvrdil předpoklad, že použitím nepájivé masky se výrazně snižuje riziko elektrochemické migrace (srovnám-li desky bez a s nepájivou maskou). Co se týče vlivu designu masky, tak tam vyšla nejlépe varianta U, kdy není mezi maskou a vodivou cestou přímý kontakt, ale malý odstup. Takto zobecněné výsledky by však chtělo pro dané návrhy desek plošných spojů ověřit detailněji s výsledky dalších měření.

Měření také potvrdilo teoretické předpoklady, kdy nejaktivnějším kovem během migrace byl cín. K jeho migraci došlo ve všech případech. Při delším trvání zkoušky (THB testu) začala migrovat téměř ve všech případech i měď, jen ojediněle se po aplikaci pájecí pasty SAC objevila i migrace stříbra.

Dále se ukázalo, že kontaminací vodivých cest nečistotami z nepájivé masky došlo k elektrochemické migraci mnohonásobně rychleji než u správně vyrobených vzorků. V případě, kdy na desce nemusela vznikat elektrolytická vrstva, došlo ke zkratu v rámci pár sekund, nezávisle na designu nepájivé masky. V budoucím výzkumu bych se proto ráda zaměřila na iontovou kontaminaci desek plošných spojů a její vliv na elektrochemickou migraci.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Typy DPS. Převzato z [4].....	8
Obrázek 2: Schéma výroby DPS. Převzato z [7].....	9
Obrázek 3: Design nepájivé masky. Převzato z [13].....	11
Obrázek 4: SMT vs. THT. Převzato z [17].....	13
Obrázek 5: Smáčení, nesmáčení a odsmáčení	15
Obrázek 6: Solder balls. Převzato z [25].....	16
Obrázek 7: Solder beading. Převzato z [26]	16
Obrázek 8: Tombstoning. Převzato z [20]	17
Obrázek 9: Různé druhy voidů. Převzato z [27].....	19
Obrázek 10: Solder bridging. Převzato z [28].....	20
Obrázek 11: Cínové whiskery na povrchu DPS. Převzato z [29]	21
Obrázek 12: Dendrity. Převzato z [30]	21
Obrázek 13: Růst dendritů na povrchu DPS. Převzato z [35].....	24
Obrázek 14: Proces ECM. Převzato z [30]	25
Obrázek 15: Schéma WD testu. Převzato z [37].....	27
Obrázek 16: Schéma TEL. Převzato z [37].....	28
Obrázek 17: CAF uvnitř DPS. Převzato z [35].....	29
Obrázek 18: Druhy designů nepájivých masek. Převzato z [12]	31
Obrázek 19: Návrh testovací desky – bez masky	31
Obrázek 20: Typ U – návrh v programu Eagle (vpravo detail na provedení vodivých cest a nepájivé masky)	31
Obrázek 21: Typ R – návrh v programu Eagle (vpravo detail na provedení vodivých cest a nepájivé masky)	32
Obrázek 22: Různé druhy desek. Typ U vlevo, typ R vpravo	32
Obrázek 23: Měření drsnosti – profil zelené masky	33
Obrázek 24: Měření drsnosti – profil bílé masky	33
Obrázek 25: Měření drsnosti – profil černé masky.....	34
Obrázek 26: Teplotní profil přetavení.....	34

Obrázek 27: Typ U s bílou maskou, s pájecí pastou a zbytky tavidla	35
Obrázek 28: Testovací program – schéma pro testování ve vlhkostní komoře	35
Obrázek 29: Testovací program – ovládání pro testování ve vlhkostní komoře	36
Obrázek 30: Zapojení WD testu.....	37
Obrázek 31: Průběh WD testu	37
Obrázek 32: Zapojení THB testu	38
Obrázek 33: Elektronový mikroskop Phenom ProX. Převzato z [43]	38
Obrázek 34: Vzorek bez masky – THBT. Zleva: bez pasty, s pastou.....	50
Obrázek 35: Vzorek s bílou maskou, bez pasty – WD. Zleva: U, R.....	50
Obrázek 36: Snímky z SEM – vzorky po WD testu (měřítko se rovná 10 μm)	51
Obrázek 37: Snímky z SEM – vzorky po THB testu (měřítko se rovná 10 μm)	51
Obrázek 38: Ukázka dendritů vzniklých během WD testu.....	52
Obrázek 39: Ukázka dendritů vzniklých během THBT testu	53
Obrázek 40: Přiblížení na aplikaci HASLu (typ Ux).....	54
Obrázek 41: Přiblížení na aplikaci HASLu (typ Rx)	54
Obrázek 42: Vzorky s pastou. Zleva: Ux, Rx	55
Obrázek 43: Dendrity na špatné desce typu WDT. Zleva: Ux, Rx.....	59
Obrázek 44: EDX analýza – povrch masky	59
Obrázek 45: EDX analýza – vodivá cesta.....	60
Obrázek 46: Vzorek typu Ux – po WD testu	60
Obrázek 47: Vzorek typu Ux – po THB testu.....	60
Obrázek 48: Vzorek typu Rx – po WD testu	61
Obrázek 49: Vzorek typu Rx – po THB testu.....	61

Seznam grafů

Graf 1: Čas do poruchy – všechny varianty vzorků.....	39
Graf 2: Čas do poruchy – vzorky bez pasty	40
Graf 3: Čas do poruchy – vzorky s pastou	41
Graf 4: Průběh proudu (THBT) – Zelená maska	42
Graf 5: Průběh proudu (THBT) – Zelená maska – vzorky s pastou	42
Graf 6: Průběh proudu (THBT) – Bílá maska.....	43
Graf 7: Průběh proudu (THBT) – Bílá maska – vzorky s pastou	43
Graf 8: Průběh proudu (THBT) – Černá maska.....	44
Graf 9: Průběh proudu (THBT) – Černá maska – vzorky s pastou.....	44
Graf 10: Čas do poruchy – vzorky bez pasty	45
Graf 11: Hodnota proudu během prvního zkratu – vzorky bez pasty	46
Graf 12: Maximální hodnota zkratového proudu – vzorky bez pasty.....	46
Graf 13: Čas do poruchy – vzorky s pastou	47
Graf 14: Hodnota proudu během prvního zkratu – vzorky s pastou.....	48
Graf 15: Maximální hodnota zkratového proudu – vzorky s pastou.....	48
Graf 16: Čas do poruchy – WDT, špatná maska.....	56
Graf 17: Čas do poruchy – WDT, správná vs. špatná maska.....	56
Graf 18: Čas do poruchy – THBT.....	57
Graf 19: Průběh proudů – THBT	58
Graf 20: Maximální hodnota proudu – THBT	58

Seznam tabulek

Tabulka 1: Složení pájky a migrační charakteristiky. Převzato z [35]	26
Tabulka 2: Parametry drsnosti použitých masek	33
Tabulka 3: Složení dendritů – druh migrujícího kovu	49
Tabulka 4: Výsledek T-testu – závislost typu U a R.....	62
Tabulka 5: Výsledek T-testu – závislost různých druhů masek.....	63

Seznam použité literatury

- [1] SOOD, Bhanu a Michael PECHT. Printed Circuit Board Laminates. In: *Wiley Encyclopedia of Composites* [online]. B.m.: American Cancer Society, 2011 [vid. 2021-11-07], s. 1–11. ISBN 978-1-118-09729-8. Dostupné z: doi:10.1002/9781118097298.weoc197
- [2] K. M. GUPTA a NISHU GUPTA. *Advanced Electrical and Electronics Materials*. B.m.: Scrivener Publishing LLC, 2015. ISBN 978-1-118-99835-9.
- [3] *PCB Manufacturing Process – A Step by Step Guide | PCBCart* [online]. [vid. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.pcbcart.com/article/content/PCB-manufacturing-process.html>
- [4] Printed Circuit Boards - Single Vs Double Vs Multi-layer. *Circuits DIY* [online]. 1. duben 2021 [vid. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://circuits-diy.com/printed-circuit-boards-single-vs-double-vs-multi-layer/>
- [5] KALTMAYER JAN. *Technologie pro výrobu desek plošných spojů* [online]. Praha, 2018 [vid. 2021-10-19]. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/76500>
- [6] STARÝ, Jiří a Petr KAHLE. *Plošné spoje a povrchová montáž*. B.m.: Vysoké učení technické v Brně. 2003
- [7] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [8] KLAUS TKOTZ A KOLEKTIV. *Průručka pro elektrotechnika*. B.m.: Europa - Sobotáles, 2006. ISBN 978-3-8085-3034-4.
- [9] SMTCENTRUM. *Základní materiály pro výrobu desek plošných spojů* [online]. 28. červen 2017 [vid. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.smtcentrum.cz/vyroba-desek-plosnych-spoju/zakladni-materialy-pro-vyrobu-desek-plosnych-spoju/>
- [10] KHANDPUR, R. S. *Printed Circuit Boards: Design, Fabrication, Assembly and Testing*. B.m.: Tata McGraw-Hill Education, 2005. ISBN 978-0-07-058814-1.
- [11] COOMBS, Clyde. *Coombs' Printed Circuits Handbook*. B.m.: McGraw Hill Professional, 2001. ISBN 978-0-07-150026-5.
- [12] PETR VESELÝ. *Vliv tavidla na kvalitu povrchové montáže*. Praha, 2021. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [13] What Purpose does Solder Mask Serve? *PCBPOWER* [online]. 20. únor 2019 [vid. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://pcbpower393636103.wordpress.com/2019/02/20/what-purpose-does-solder-mask-serve/>
- [14] *Povrchové úpravy desek plošných spojů* [online]. [vid. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:59606/z-aktualniho-vydani-povrchove-upravy-desek-plosnych-spoju>
- [15] AL WRIGHT. *Printed Circuit Board Surface Finishes - Advantages and Disadvantages* [online]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/articles/pcb-surface-finish-advantages->

and-disadvantages.html

- [16] ALENA PIETRIKOVÁ, JURAJ ĎURIŠIN, a PAVEL MACH. *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. 1. B.m.: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [17] EULISES QUINTERO. SMD vs SMT vs THT: What Technology Works Best for Manufacturing? | Titoma. *Titoma* [online]. 25. listopad 2019 [vid. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://titoma.com/blog/smt-smd-bga-tht-meaning>
- [18] PRASAD, Ray. *Surface Mount Technology: Principles and Practice*. B.m.: Springer Science & Business Media, 2013. ISBN 978-1-4615-4084-7.
- [19] DERVAES, Robert. *SMT Assembly Challenges and Proven Solutions for Improving Yields*. 2017, 6.
- [20] KAREL DUŠEK, DAVID BUŠEK a PETR VESELÝ. Overview of Selected Issues Related to Soldering | IntechOpen [online]. 2020 [vid. 2021-11-28]. Dostupné z: [doi:10.5772/intechopen.91023](https://doi.org/10.5772/intechopen.91023)
- [21] VENUGOPAL, Yadav. 8 Common Errors in Surface Mount Technology (SMT). *Sierra Circuits* [online]. 10. září 2020 [vid. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.protoexpress.com/blog/common-errors-surface-mount-technology-smt/>
- [22] RAJEWSKI, K. SMT process recommendations. Defect minimization methods for a no-clean SMT process. *IEEE Technical Applications Conference and Workshops. Northcon/95. Conference Record* [online]. 1995 [vid. 2021-11-28]. Dostupné z: https://www.academia.edu/36783913/SMT_Process_Recommendations_Defect_Minimization_Methods_for_a_No_Clean_SMT_Process
- [23] ZACHARIAH PETERSON. Common SMT Process Defects to Avoid During Soldering. *Altium* [online]. 2020 [vid. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://resources.altium.com/p/common-smt-process-defects-to-avoid-during-soldering>
- [24] SANTOSH DAS. SMT Troubleshooting (SMT / SMD Problem and Solution) - Guide. *Electronics Tutorial | The Best Electronics Tutorial Website* [online]. 2019 [vid. 2021-10-19]. Dostupné z: <http://www.electronicandyou.com/blog/smt-troubleshooting-smt-smd-problem-and-solution.html>
- [25] *Solder Balls or Solder Balling on a PCB - Wave Soldering Defects* [online]. [vid. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/pcb/wave-soldering-defects/solder-balls.html>
- [26] *What are Mid-Chip Solder Balls? - PCB Directory* [online]. [vid. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.pcbdirectory.com/community/what-are-mid-chip-solder-balls>
- [27] ASPANDIAR, Raiyo. Voids in Solder Joints. 2018, SMTA Boise Expo and Tech Forum, 55.
- [28] *A (Solder) Bridge To Nowhere: What Is a Solder Bridge and How to Avoid Them in PCB Design - Technical Articles* [online]. [vid. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/a-solder-bridge-to-nowhere-what-is-a-solder-bridge-how-to-prevent/>

- [29] *What are Tin Whiskers? - PCB Directory* [online]. [vid. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.pcbdirectory.com/community/what-are-tin-whiskers>
- [30] ZHONG, Xiankang, Longjun CHEN, Bálint MEDGYES, Zhi ZHANG, Shujun GAO a László JAKAB. Electrochemical migration of Sn and Sn solder alloys: a review. *RSC Advances* [online]. 2017, 7(45), 28186–28206 [vid. 2022-03-27]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C7RA04368F
- [31] DUNN, Barrie D. Failure Analysis of Electrical Interconnections and Recommended Processes. In: Barrie D. DUNN, ed. *Materials and Processes: for Spacecraft and High Reliability Applications* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016 [vid. 2022-03-27], Springer Praxis Books, s. 329–459. ISBN 978-3-319-23362-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-23362-8_6
- [32] MINZARI, Daniel, Morten S. JELLESEN, Per MØLLER a Rajan AMBAT. On the electrochemical migration mechanism of tin in electronics. *Corrosion Science* [online]. 2011, 53(10), 3366–3379 [vid. 2022-03-27]. ISSN 0010-938X. Dostupné z: doi:10.1016/j.corsci.2011.06.015
- [33] YI, Pan, Kui XIAO, Kangkang DING, Chaofang DONG a Xiaogang LI. Electrochemical Migration Behavior of Copper-Clad Laminate and Electroless Nickel/Immersion Gold Printed Circuit Boards under Thin Electrolyte Layers. *Materials* [online]. 2017, 10, 137. Dostupné z: doi:10.3390/ma10020137
- [34] SHANGGUAN, Dongkai. *Lead-Free Solder Interconnect Reliability*. B.m.: ASM International, 2005. ISBN 978-1-61503-093-4.
- [35] SUGANUMA, Katsuaki. *Lead-Free Soldering in Electronics: Science, Technology, and Environmental Impact* [online]. Boca Raton: CRC Press, 2003. ISBN 978-0-429-21611-4. Dostupné z: doi:10.1201/9780203025772
- [36] MARKÉTA DYNAROVÁ. *Výběr vhodného typu tavidla pro strojní pájení vlnou* [online]. Brno, 2018 [vid. 2022-03-27]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/112265>
- [37] ZHONG, Xiankang, Siyu YU, Longjun CHEN, Junying HU a Zhi ZHANG. Test methods for electrochemical migration: a review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [online]. 2017, 28. Dostupné z: doi:10.1007/s10854-016-5713-9
- [38] HE, Xiaofei, Michael H AZARIAN a Michael G PECHT. Effects of Solder Mask on Electrochemical Migration of Tin-Lead and Lead-Free Boards. 2010, 14.
- [39] BUŠEK, David, Karel DUŠEK a Jan KULHAVÝ. Dendritic Growth and its Dependence on Various Conditions. In: *2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE): 2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* [online]. 2018, s. 1–5. ISSN 2161-2536. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE.2018.8443654
- [40] ILLÉS, Balázs, Bálint MEDGYES a Andárs HORVÁTH. Electrochemical migration behaviour of surface finishes after vapour phase reflow soldering. In: *2014 IEEE 20th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME): 2014 IEEE 20th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)* [online]. 2014, s. 253–257. Dostupné z: doi:10.1109/SIITME.2014.6967039

- [41] *Sa (Arithmetical Mean Height) | Area Roughness Parameters | Introduction To Roughness* | KEYENCE America [online]. [vid. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/parameters.jsp>
- [42] *Arithmetical mean height (Ra, Pa, Wa) | Surface Roughness Parameters | What is line roughness? | Solving the questions about profile and surface roughness measurements! Introduction to „Roughness“ | KEYENCE International Belgium* [online]. [vid. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/line/parameters.jsp>
- [43] *Phenom ProX. Prolab Systems* [online]. [vid. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://prolabsystems.com/wp/product/phenom-prox/>