

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



Vliv tavidla na růst intermetalických vrstev v pájeném spoji

Effect of Flux on Intermetallic Layers Growth within Solder Joint

Diplomová práce

Bc. Jan Kopáček

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

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

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kopáček** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **466237**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv tavidla na růst intermetalických vrstev v pájeném spoji

Název diplomové práce anglicky:

Effect of Flux on Intermetallic Layers Growth within Solder Joint

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši na tématiku pájení přetavením, zaměřte se na hodnocení kvality pájených spojů a problematiku tavidel. Proveďte rešerši současného stavu poznání v oblasti růstu intermetalických sloučenin v bezolovnatých pájených spojkách.
2. Navrhněte a proveďte experiment pro ověření vlivu tavidla a jeho aktivace během procesu předehřevu na kvalitu a spolehlivost pájených spojů. Analyzujte intermetalické vrstvy. 3. Výsledky experimentu vyhodnoťte. Vyvoďte 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] MACH, Pavel, SKOČIL, Vlastimil a URBÁNEK, Jan. Montáž v elektronice: pouzdrění aktivních součástek, plošné spoje. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02302-3. [3] PUTTLITZ, K. J., STALTER, K. A. Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies. CRC Press, 2004. ISBN 978-0824748708

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Veselý 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: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

Ing. Petr Veselý
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen 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 studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv tavidla na růst intermetalických vrstev v pájeném spoji vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Petra Veselého, Ph.D. a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Jan Kopáček

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Veselému, Ph.D. za velmi cenné a profesionální rady, odborné vedení a odbornou pomoc. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během studia.

Abstrakt

Diplomová práce se dělí na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou uvedeny základní informace ohledně pájení a kvality pájených spojů. Dále se věnuje pájecím slitinám a tavidlům, které se v pájecích slitinách používají. Jsou popsány způsoby přetavení pájecí slitiny a metody testování kvality pájených spojů. Na závěr teoretické části se práce zabývá intermetalickou vrstvou mezi pájkou a pájeným substrátem. Praktická část se věnuje experimentu vlivu tavidla na růst intermetalických vrstev. Pomocí výbrusu a využití elektronového mikroskopu byla změřena tloušťka intermetalických vrstev. Dále bylo provedeno měření elektrického odporu a smykové síly u pájených spojů. Na závěr byla vytvořena diskuse nad získanými výsledky.

Klíčová slova

Bezolovnaté pájení, tavidla, intermetalická vrstva, pájecí profil, pájecí pasta, pájení přetavením, Heating faktor, zrychlené stárnutí pájených spojů, mechanické zkoušky, elektrické zkoušky, kvalita pájených spojů, elektronový mikroskop

Abstract

The Master thesis is divided into the theoretical. and the practical part. The theoretical part provides basic information about soldering and quality of solder joints. It also describes solder alloys and fluxes that are in these alloys used. There are described methods of reflow soldering the solder alloy and the methods of testing the quality of solder joints. At the end, the theoretical part examines the intermetallic layer between the solder and the soldered substrate. The practical part describes the experiment of the effect of flux on the intermetallic layers' growth. The thickness of the intermetallic layers was measured by cutting and using an electron microscope. Furthermore, the measurement of electrical resistance and shear force of solder joints was performed. Finally, the summary and evaluation of obtained results are submitted.

Key words

Lead-free soldering, fluxes, intermetallic layer, soldering profile, solder paste, reflow soldering, Heating factor, accelerated aging of solder joints, mechanical tests, electrical tests, solder joints quality, electron microscope

Obsah

1	Úvod.....	13
2	Teoretická část	14
2.1	Pájení.....	14
2.2	Kvalita pájených spojů	14
2.3	Pájecí slitiny	15
2.4	Tavidla.....	16
2.4.1	Druhy tavidel	17
2.5	Pájení přetavením.....	19
2.5.1	Pájení v parách.....	20
2.5.2	Pájení pomocí laseru	20
2.5.3	Pájení infračerveným zářičem	21
2.5.4	Pájení horkým plynem	21
2.6	Teplotní profily	21
2.6.1	Zóna předehřevu	22
2.6.2	Aktivační zóna	22
2.6.3	Zóna přetavení	22
2.6.4	Zóna chladnutí	22
2.7	Heating factor.....	23
2.8	Metody testování kvality pájených spojů.....	24
2.8.1	Zrychlené stárnutí	24
2.9	Testování kvality pájených spojů.....	25
2.9.1	Elektrické zkoušky.....	25
2.9.2	Mechanické zkoušky.....	25
2.9.3	Příprava vzorků na analýzu intermetalických vrstev pomocí elektronového mikroskopu	27
2.9.4	Elektronová mikroskopie.....	29
3	Intermetalická vrstva a růst intermetalické vrstvy	30
3.1	Intermetalická vrstva mezi cínem a mědí.....	31
3.1.1	Využití Arrheniova zákona pro výpočet aktivační energie	32
3.2	Vztah mezi růstem IMC a životností pájeného spoje.....	33
3.3	Vztah mezi IMC a teplotním profilem	33
4	Praktická část	35
4.1	Úvod a příprava testovací desky	35

4.2	Použité pájecí pasty	36
4.3	Přetavení v peci Mistral 260	36
4.4	Měření mechanických vlastností	38
4.5	Měření elektrického odporu.....	38
4.6	Určování tloušťky IMC	40
4.6.1	SEM Thermo Scientific Phenom ProX – Skenovací elektronový mikroskop.....	41
4.7	Výsledky a diskuse	42
4.7.1	Výsledky růstu IMC při teplotách v klimatické komoře.....	42
4.7.2	Stárnutí v klimatické komoře při 85 °C – elektrický odpor a smyková síla.....	48
4.7.3	Stárnutí v klimatické komoře při 125 °C – elektrický odpor a smyková síla.....	52
4.7.4	Stárnutí v klimatické komoře při 150 °C – elektrický odpor a smyková síla.....	55
5	Závěr.....	59
6	Použité zdroje.....	61
	Seznam tabulek	65
	Seznam grafů.....	66
	Seznam obrázků	67

1 Úvod

Proces pájení je využíván pro vodivé a mechanické spojení elektronických součástek k deskám plošných spojů. Z důvodu negativního vlivu na zdraví člověka dochází k ústupu olovnatého pájení, které je nahrazováno pájením bezolovnatým. Přechodem na bezolovnaté pájení došlo ke zvýšení potřebné teploty pro vytvoření pájeného spoje. Velmi důležitým prvkem v tomto pájení je tavidlo, které plní několik důležitých funkcí, které souvisí s kvalitou pájených spojů.

V diplomové práci bude zkoumán vliv tavidla a pájecího profilu na tloušťku intermetalické vrstvy mezi pájeným substrátem a pájkou. Pro výzkum jsou uvažovány dvě pájecí slitiny s rozdílnými tavidly.

Práce je rozdělena na část teoretickou a část praktickou. Teoretická část se zabývá úvodem do pájení. Dále jsou popsány druhy pájecích slitin a jejich složení. Následuje popis tavidel, se kterými se lze v technické praxi setkat. Na závěr teoretické části jsou uvedeny dosavadní poznatky ohledně intermetalických vrstev.

Hlavním úkolem praktické části je zjištění vlivu tavidla na vznik a na růst intermetalických vrstev v pájeném spoji při dlouhodobém stárnutí za zvýšené teploty. Je proveden výzkum, jak pájecí profil i tavidlo ovlivňují intermetalické vrstvy. Stárnutí probíhalo při teplotách 85°C, 125 °C a 150 °C. Měření tloušťek intermetalických vrstev probíhalo pomocí elektronového mikroskopu. Pro porovnání intermetalických vrstev byl proveden výpočet aktivační energie. Jako dodatkové měření bylo provedeno měření elektrického odporu pájeného spoje pomocí čtyřbodové metody a měření smykové síly potřebné pro odtržení součástky z DPS. Pod každým měřením pro jednotlivé teploty stárnutí je provedena diskuse.

2 Teoretická část

2.1 Pájení

Pod pojmem pájení si lze představit metalurgické spojení dvou kovů pomocí třetího kovu, který je roztavený a nazýváme ho pájka. U každého procesu pájení je nutná přítomnost tavidla. Rozlišujeme dva základní typy pájení:

- měkké pájení do 450 °C,
- tvrdé pájení od 450 °C.

Při procesu pájení dochází k tomu, že roztavená pájka se dostane do kontaktu s atomy neroztaveného kovu. To způsobí, že začnou působit adhézní a kohézní síly. Také probíhá proces difuze a rozpuštění jak prvků pájky, tak i části povrchu spojovaného materiálu, tedy jak materiálu pájecí plošky, tak vývodu součástky. Pájený spoj musí vykazovat dobré mechanické a elektrické vlastnosti jak po vytvoření pájeného spoje, tak i v průběhu stárnutí [1].

2.2 Kvalita pájených spojů

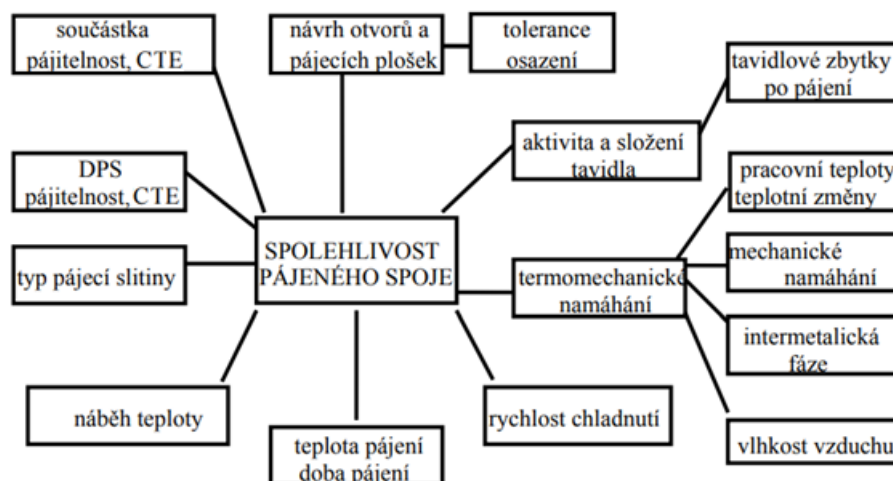
Jeden z nejdůležitějších požadavků na pájené spoje je spolehlivost. Aby pájený spoj byl kvalitní, musí splňovat několik základních bodů:

- Musí dojít k úplnému smočení.
- Kvalitní pájený spoj je hladký a lesklý.
- Musí také vzniknout konkávní pájecí kužel [1].

Na obrázku 1 jsou vidět všechny faktory, které promlouvají do kvality pájeného spoje. Pokud by nebyly dodrženy všechny podmínky pro kvalitní spoj, mohlo by dojít ke vzniku nekvalitního pájeného spoje tzv. „studeného spoje“. Také by mohl vzniknout spoj, který selže a celé zařízení se stane nefunkční. Studený spoj má velký elektrický odpor, v některých případech může být spoj dokonce úplně nevodivý. Mechanické vlastnosti jsou v porovnání s kvalitním pájeným spojem velmi špatné. Hlavním důvodem vzniku studeného spoje je, že nedošlo k difuzi. Faktory, které ovlivní neproběhnutí difuze[1]:

- Nebyl zvolen ideální pájecí proces, u pájení přetavením byly špatně zvoleny teploty v jednotlivých zónách nebo čas setrvání v jednotlivých zónách byl krátký, nebo dlouhý.

- Špatně zvolené tavidlo, tavidlo nebylo schopno zredukovat všechny oxidy.
- Na povrchu se vytvořila intermetalická fáze, došlo ke vzniku vrstvy Cu_3Sn , která je nesmáčivá [1].



Obrázek 1: Faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje [1]

2.3 Pájecí slitiny

Dříve byla nejčastěji používána olovnatá slitina SnPb. Množství cínu ve slitině bylo kolem 63 % a množství olova 37 %. Výhoda takové slitiny oproti bezolovnaté je nižší teplota tání kolem 183 °C. V současné době již existuje bezolovnatá slitina Sn-Bi s teplotou tání 139 °C. Olovnatá slitina je oproti bezolovnaté slitině levnější [1, 2].

Bezolovnaté pájecí slitiny musí splňovat několik důležitých vlastností:

- Bezolovnatá pájecí slitina musí být schopna pájitelnosti na všech vhodných pájecích substrátech všemi dostupnými pájecími metodami.
- Bezolovnaté pájecí slitiny by měly mít srovnatelné vlastnosti se slitinami olovnatými, např. slitina SAC má dobré mechanické vlastnosti, ale nedosahuje takové spolehlivosti jako slitina olovnatá [1, 2].

Všechny bezolovnaté pájecí slitiny dnes obsahují cín. Aby vznikla pájecí slitina, musí být do cínu přidány další kovy, mezi které patří: stříbro, měď, zinek, bismut a indium. V dnešní době se používá velké množství bezolovnatých slitin:

- Sn-Ag – Slitina je tvořena z 96,5 % Sn a 3,5 % Ag. Bod tání je 221 °C. Strukturu této slitiny tvoří Sn a také Ag_3Sn . Ag_3Sn je ve formě tenkých destiček. Do této slitiny je možnost přidat 1 % Zn, to způsobí

zlepšení vlastností této slitiny. Dojde ke zlepšení mikrostruktury, zinek zabrání vzniku dendritů a také způsobí, že disperze probíhá rovnoměrně [3].

- Sn-Ag-Cu – Procentuální složení slitiny je 96,5 % Sn, 3 % Ag a 0,5 % Cu. Bod tání je 217 °C. Tato slitina je jedna z nejpoužívanějších slitin v oblasti pájení. Využíváme ji do spotřební elektroniky. Nevýhoda této slitiny je velké procentuální zastoupení cínu, to způsobuje vznik a růst intermetalické vrstvy. Označení této slitiny je SAC 305, v praxi se používá dalších několik druhů například SAC 387 [4].
- Sn-Cu – Množství Cu je 0,7 %. Teplota tání je 227 °C. Kvůli velkému množství cínu je tato slitina náchylná na růst cínových vousů, přidáváním Cu se pravděpodobně omezí tento jev [3].
- Sn-Bi – Procentuální složení slitiny je 42 % Sn a 58 % Bi. Teplota tání je 139 °C. Využití je při pájení přetavením při opravárenské činnosti. Slitina je ve formě pasty. Teplota tání je nižší než u většiny pájecích slitin, nedochází tak k velkému teplotnímu šoku. To snižuje pravděpodobnost nekvalitních spojů a selhání součástek. Nevýhoda této slitiny je, že Bi zvyšuje křehkost. Při teplotním cyklování je náchylná na vznik trhlinek [5] [6].
- Sn-Bi-Ag – Teplota tání je kolem 139 °C. Přidáním Ag do slitiny dosáhneme lepší smáčivosti na měděných i hliníkových substrátech. Také se přidáním Al do slitiny zvýší pevnost ve smyku pájených spojů [5].
- Sn-In – Slitina je tvořena z 48 % Sn a z 52 % In. Bod tání je oproti ostatním slitinám malý, 117 °C. Malá teplota tání je dána indiem. Použití je u desek plošných spojů, které by nesnesly potřebné vysoké teploty v zóně přetavení, které jsou u jiných slitin potřeba [3] [7].
- Sn-Zn – Bod tání pájecí slitiny je 198 °C. Slitina obsahuje 91 % Sn a 9 % Zn. Nevýhoda této slitiny je, že zinek způsobuje oxidaci. Je nutné používat agresivnější tavidla. Tavidla musí zabránit procesu oxidace [7].

2.4 Tavidla

Kvalitu pájených spojů ovlivňuje velké množství faktorů. Jedním z důležitých je druh použitého tavidla. Úkolem tavidla je odstranit oxidy a nečistoty z povrchu plošek, na kterých se vytvoří pájený spoj. Další funkcí tavidla je zlepšení přenosu tepla, zamezení

vzniku oxidů i během pájecího procesu, zlepšení smáčitelnosti povrchu a zajištění vzniku spolehlivého a kvalitního pájeného spoje. Důležitou vlastností tavidla je, aby po pájecím procesu zbylo co nejméně nečistot. Aktivní prvky v tavidle jsou aktivátory. Pokud nedojde k použití tavidla, je možné, že se pájka nespojí s pájecí ploškou nebo dokonce odteče úplně mimo [1, 8].

Tavidlo se může vyskytovat ve třech základních stavech:

- v tekutém stavu,
- v tuhém stavu,
- tavidlo z anorganických solí.

2.4.1 Druhy tavidel

V dnešní době využíváme několik typů tavidel. Typy tavidel vychází například z české normy ČSN EN ISO 9454-1, viz tabulka 1.

Tabulka 1: Dělení tavidel podle ČSN EN ISO 9454-1 [1]

Typ tavidla	Základní složka	Aktivátor	Forma tavidla	Obsah halidů [%]
1 – Pryskyřicové	1 – Kalafuna	1 – Bez aktivátoru	Tekuté	1 → 0,01
	2 – Bez kalafuny (syntetická pryskyřice)	2 – Aktivace halogenidy	Tuhé	
		3 – Aktivace bez halogenidy	Pasta	
2 – Organické	1 – Rozpustné ve vodě	1 – Bez aktivátoru	Tekuté	2 → < 0,15
	2 – Nerozpustné ve vodě	2 – Aktivace halogenidy	Tuhé	
		3 – Aktivace bez halogenidy	Pasta	
3 – Anorganické	1 – Soli ve vodném roztoku	1 – NH ₄ Cl	Tekuté	3 → 0,15 až 2,0
	2 – Soli v organickém složení	2 – Bez NH ₄ Cl	Tuhé	
	3 – Kyseliny	1 – Kyselina fosforečná	Pasta	4 → > 2,0
	4 – Zásady	2 – Jiné kyseliny		
		3 – Aminy nebo amoniak		

Tavidla, jejichž základem je pryskyřice, značíme:

- RSA – pryskyřicové tavidlo velmi silně aktivované, nejsilnější tavidlo, které je potřeba vždy po pájecím procesu odstranit, mohlo by způsobovat korozi
- RA – pryskyřicové tavidlo s větší účinností aktivátorů, druhé nejsilnější tavidlo po RSA, využíváme na povrchy, kde typ RMA a R je nepoužitelný, po pájecím procesu je nutné tavidlo odstranit

- RMA – pryskyřicové tavidlo s aktivátory, střední aktivita, silnější než tavidlo R, použití na dobře pájitelné materiály například měď, zlato, odstranění tavidla není nutné
- R – nejslabší tavidlo, které je vhodné pouze na velmi dobře pájené materiály například zlato, zbytky po pájecím procesu není potřeba odstraňovat [1] [2]

Další rozdělení tavidel vychází z normy mezinárodní, konkrétně z normy IPC J-STD-004B. Norma je uvedena v tabulce 2 [10].

Tabulka 2: IPC J-STD-004B [10]

Základní materiál tavidla	Úroveň aktivace tavidla	Množství halidů [%]	Značení tavidla
Přírodní pryskyřice	Nízká	<0,05	ROL0
		<0,5	ROL1
	Střední	<0,05	ROM0
		0,5-2,0	ROM1
	Vysoká	<0,05	ROH0
		>2,0	ROH1
Syntetická pryskyřice	Nízká	<0,05	REL0
		<0,5	REL1
	Střední	<0,05	REM0
		0,5-2,0	REM1
	Vysoká	<0,05	REH0
		>2,0	REH1
Organická sloučenina	Nízká	<0,05	ORL0
		<0,5	ORL1
	Střední	<0,05	ORM0
		0,5-2,0	ORM1
	Vysoká	<0,05	ORH0
		>2,0	ORH1
Anorganická sloučenina	Nízká	<0,05	INL0
		<0,5	INL1
	Střední	<0,05	INM0
		0,5-2,0	INM1
	Vysoká	<0,05	INH0
		>2,0	INH1

2.5 Pájení přetavením

Pájení přetavením je způsob pájení, který je využíván v hromadné výrobě a u desek, kde je kladen důraz na velkou hustotu součástek. Pájení přetavením je

rozděleno do několika kroků. V prvním kroku je nutné nanést do požadovaných míst pájecí pastu. Ve druhém kroku se na automatizovaném pracovišti osadí součástky. Třetí krok je proces přetavení, způsoby přetavení jsou popsány níže [1] [8]:

2.5.1 Pájení v parách

Principem pájení v parách je, že deska plošného spoje s nanesenou pájecí pastou je vložena do prostoru, kde se nachází páry odpařené pracovní kapaliny. Protože deska plošného spoje má daleko menší teplotu, dochází ke kondenzaci páry a k ohřívání desky plošného spoje. Desku plošného spoje ohřívá kondenzační teplo páry nad teplotu tání a vzniká pájený spoj. Je nutné zabránit vzniklým parám, aby odcházely mimo primární zónu. Aby došlo k vytvoření páry, využívají se fluorvodíky s bodem varu 220 °C až 235 °C, nebo 250 °C až 265 °C [9].

Použitá kapalina musí mít několik důležitých vlastností:

- Tepelnou a chemickou stabilitu
- Vyšší hustotu páry než hustota páry vzduchu
- Přesně určený bod varu
- Velmi vysokou teplotu vzplanutí [9]

Mezi hlavní přednosti pájení v parách se řadí:

- Rovnoměrné a rychlé ohřívání DPS
- V zóně přetavení nedochází k oxidaci, využíváme méně agresivní tavidla.
- Lze najednou pájet součástky s různou velikostí a hmotností [9].

Nevýhody pájení v parách:

- Lze dosáhnout pouze některých teplot.
- Postupně se ztrácí kapalina [9].

2.5.2 Pájení pomocí laseru

Tato metoda se používá tam, kde je zapotřebí tepelný výkon nasměrovat přímo na konkrétní pájecí plošku nebo pájená součástka je citlivá na teplo. Přetavení v pájecí peci by ji mohlo nevratně poškodit. Nevýhodou je, že pájení probíhá postupně, jeden pájený spoj po druhém, takže pájení je pomalé. Doba ohřevu pájecího místa je kolem 5 ms [9].

2.5.3 Pájení infračerveným zářičem

Při této metodě dochází k přetavení pájecí pasty pomocí infračerveného zářiče. Množství tepla, které je absorbované deskou, závisí na koeficientu odrazivosti, tento koeficient je dán:

- vlnovou délkou,
- barvou povrchu.

Protože na desce se nachází součástky, které mají různé koeficienty, lze konstatovat, že deska se neohřívá rovnoměrně. To zhoršuje kvalitu pájecího procesu, v některých místech nemusí být teplota dostatečně velká, v některých místech může dojít k poškození součástek. Pájení probíhá v průběžných pecích, kde vzorky jsou umístěny na dopravník, který prochází všemi zónami. Infračervené zářiče mohou být umístěny z horní i dolní strany, záleží na typu konkrétní pece [1].

2.5.4 Pájení horkým plynem

Pájení horkým vzduchem je jedna z často používaných metod pro hromadné pájení. Využívají se pece s konvenčním přenosem tepla, kterými prochází dopravník a jsou rozděleny do třech částí. Teplota se v jednotlivých částech liší. V peci teplo proudí pouze jedním směrem. Je snaha eliminovat, aby teplý vzduch proudil ve směru jízdy součástek. Mohlo by totiž dojít k posunu součástek. Dále by mohlo docházet k ovlivňování jednotlivých zón navzájem. Nevýhoda tohoto typu přetavení je energetická náročnost. Proces je náchylnější na oxidaci, protože se pájí za přítomnosti vzduchu. Mezi výhody tohoto typu pájení můžeme zařadit:

- Lze přetavit desky plošných spojů s velkou hustotou součástek.
- Desky se prohřívají rovnoměrně.
- Jednodušší nastavení pájecího procesu, nastavujeme rychlost dopravníku a teploty v jednotlivých zónách [1].

2.6 Teplotní profily

Nastavení správného teplotního profilu je jedna z velmi důležitých částí pájení přetavením. Teplotní profily se zpravidla skládají ze čtyř částí: předehřev, aktivace, přetavení a chladnutí. Pro zvolenou pájecí pastu je nutno odladit teplotní profil na konkrétní pájecí lince a konkrétní DPS. Vychází se z pájecího profilu, který je uveden

v datasheetu u pájecí pasty. Pomocí termočlánků je nutné odladit přesné nastavení na konkrétní pájecí peci a pro konkrétní design DPS.

2.6.1 Zóna přehřevu

Úkolem přehřevu je postupně a rovnoměrně ohřívat desku. Nárůst teploty nesmí být příliš velký, nesmí dojít k teplotnímu šoku. Rychlost ohřevu je maximálně 3 K/s. Také zde dochází k aktivaci tavidla. Teplota se pohybuje pod 200 °C [11].

2.6.2 Aktivační zóna

Úkolem aktivační zóny je, aby tavidlo začalo aktivně reagovat. Musí také dojít k úplnému odpaření těkavých složek. To způsobí zvýšení smáčivosti neboli dojde ke zvýšení povrchové energie. Je nutné, aby v aktivační zóně nedošlo ke spotřebování všeho tavidla. Poslední zbytky tavidla musí zabránit zpětné oxidaci pájecí plošky a kontaktů elektrické součástky [11] [12].

2.6.3 Zóna přetavení

V této zóně je nastavena teplota přibližně 20 °C nad teplotou tání pájecí pasty. V zóně přetavení dojde k tomu, že roztavená pájka se rozteče po celé pájecí plošce. Po roztavení pájecí pasty vzniká intermetalická vrstva. Po dosažení teploty tání pájecí pasty je velice důležitý čas, ve kterém je pájecí pasta udržována v tekutém stavu. Tento čas nesmí být příliš krátký, nedošlo by ke správnému formování pájky a také by mohlo dojít ke špatnému smáčení povrchu. Pokud by byl čas příliš dlouhý, došlo by k růstu intermetalické vrstvy do větších rozměrů, nebo by mohlo dojít k poškození DPS. Při procesu je snaha o omezení tloušťky intermetalické vrstvy, protože čím je větší intermetalická vrstva, tím je pravděpodobnost selhání pájeného spoje větší. [12].

2.6.4 Zóna chladnutí

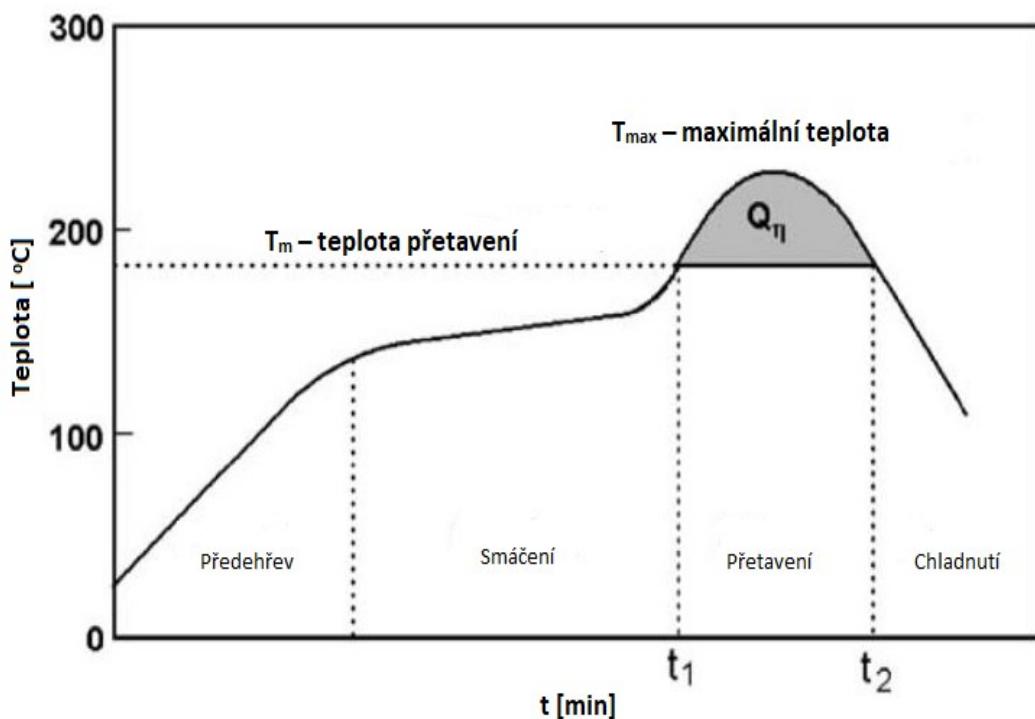
Aby vznikl kvalitní pájený spoj, je nutné řídit i poslední část teplotního profilu. Snaha je o to, aby teplota klesala co nejrychleji a pokles teploty nepřekročil určité meze. Nesmí totiž nastat teplotní šok. To by mohlo způsobit zvednutí součástky, nerovný, hrubý povrch pájeného spoje, také by mohlo dojít ke zvýšení tloušťky intermetalické vrstvy [11].

2.7 Heating factor

Heating factor se značí Q_η , jednotka je [s.K]. Tato veličina charakterizuje dva velmi důležité efekty. Prvním efektem je čas, během kterého se pájecí pasta nachází nad teplotou tání, a druhým efektem je maximální teplota, kterou dosáhneme v zóně přetavení. Experimentálně bylo zjištěno, že tloušťka intermetalické vrstvy velmi souvisí s Q_η . Vztah mezi IMC a Q_η je téměř lineární do určité hodnoty, poté již není možné popsat závislost lineárně [13].

Velikost Heating factoru lze popsat i matematicky, matematickým zápisem se myslí integrál rozdílu měřené teploty $T(t)$ a teploty tání T_m určité pájecí pasty. Spodní integrační mez t_1 je doba, kdy dojde k roztavení pájecí pasty na kapalinu, a horní t_2 mez je čas, kdy dojde ke ztuhnutí. Matematický zápis Heating factoru ukazuje rovnice 1, grafické znázornění ukazuje obrázek 2 [13]:

$$Q_\eta = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_m) dt \quad (1)$$



Obrázek 2: Příklad teplotního profilu s vyznačeným Heating factorem [13]

2.8 Metody testování kvality pájených spojů

2.8.1 Zrychlené stárnutí

Při stárnutí pájených spojů dochází k tomu, že se postupně mění vlastnosti pájených spojů. Postupem času roste tloušťka intermetalické vrstvy. Ve výrobním procesu, kde se zkoumá kvalita pájených spojů, je využíváno zrychlené stárnutí pájených spojů. V praxi jsou různé možnosti, jak urychlit proces stárnutí [6]:

- Teplotně vlhkostní komora – vzorky jsou vystaveny vyšším teplotám a relativní vlhkosti, která se udává v procentech. Zrychlené zkoušky v teplotní komoře definuje standard JESD22-A118 [8]
- Šoková komora – šoková komora je využívána pro zjištění, jak DPS budou snášet prudké změny teplot. Pájený spoj, součástka a deska plošného spoje mají rozdílnou teplotní roztažnost. Proto při náhlých a opakovaných změnách působícího tepla dochází k mechanickému napětí. Toto napětí zhoršuje mechanické vlastnosti, pájený spoj je v intermetalické vrstvě náchylnější k prasklinám. Podmínky zrychleného stárnutí definuje standard JESD22-A-104C [6] [8].
- Teplotní komora – teplotní komoru využíváme na zkoušku skladování při zvýšené teplotě. Podmínky definuje standard JESD22-A-103C [8].

2.8.1.1 Teplotní komora

V praktické části diplomové práce je využita pro zrychlené stárnutí teplotní komora. Je prováděna zkouška, kdy vzorky jsou vystaveny zvýšené teplotě po určitou dobu. Jak již bylo zmíněno výše, podmínky zkoušky vychází ze standardu JESD22-A-103C. Parametry zkoušky podle standardu JESD22-A-103C jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Standard JESD22-A-103C [8]

Druh zkoušky	Teplota [°C]
A	125
B	150
C	175
D	200
E	250
F	300
G	85

Při této zkoušce se využívají komory, které jsou schopny rovnoměrně a po celou dobu trvání zkoušky udržovat konstantní teplotu. Typ zkoušky je vybrán podle:

- typu použitých součástek – aby nedošlo k poškození pouzdra součástky,
- použité slitiny – nelze zvolit teplotu zkoušky vyšší než teplotu tání slitiny.

2.9 Testování kvality pájených spojů

Aby mohlo dojít k posouzení kvality pájených spojů, je nutné provádět řadu měření.

2.9.1 Elektrické zkoušky

2.9.1.1 Měření elektrického odporu

Pro měření elektrického odporu lze využít především dvě metody:

- čtyřbodovou metodu,
- dvoubodovou metodu.

U dvoubodové metody se do výsledného odporu započítává, kromě hodnoty elektrického odporu měřeného objektu, také:

- odpor připojovacích kabelů,
- přechodový odpor.

Může dojít k situaci, že výsledek změřený pomocí dvojbodové metody se liší od skutečné hodnoty o několik desítek procent. Při měření vyšších hodnot $k\Omega$ je tato chyba zanedbatelná. Pokud je měřeno v řádech $m\Omega$ a nižších, je zde chyba měření nezanedbatelná, protože vychází úplně jiný výsledek. Proto se pro takové měření využívá čtyřbodová metoda, která potlačuje vliv odporu přívodních vodičů a přechodový odpor. Pomocí čtyřbodové metody se měří proud procházející obvodem, to je stejné jako u metody dvoubodové. Napětí je změřeno přímo na měřeném objektu, tím je z měření vyloučen odpor přívodních vodičů [14].

2.9.2 Mechanické zkoušky

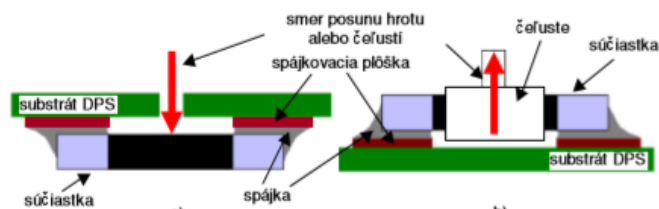
U mechanických zkoušek pájených spojů se především zkoumá maximální potřebná síla a způsob odtržení součástky od DPS. Podmínky mechanických zkoušek udávají dvě české normy:

- ČSN EN 6137–1–1. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – Část 1-1: Zkouška odolnosti proti odtržení [15]
- ČSN EN 62137–1–2. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1–2: Zkouška pevnosti ve smyku [16]

Mechanické zkoušky stříhem a tahem, které jsou popsány níže, lze využít pouze na součástky povrchové montáže. Velikost potřebné síly je závislá na velikosti pájeného spoje, na množství defektů v pájeném spoji (trhliny), na typu pájecí slitiny a na materiálu, na který se pájí například Cu nebo HASL. Při stárnutí pájených spojů by mělo docházet ke snižování potřebné síly [8].

2.9.2.1 Zkouška odolnosti proti odtržení

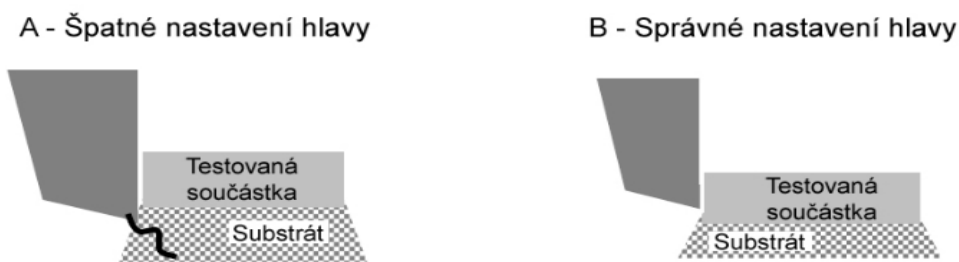
Princip je zachycen na obrázku 3. Jediný rozdíl mezi zkouškou tahem a stříhem je pouze směr působící síly, je nutné tak jako při zkoušce smykem zajistit konstantní rychlost posunu trhací hlavy. Výsledkem této zkoušky je potřebná síla k utržení součástky z DPS a způsob odtržení součástky [8].



Obrázek 3: Zkouška tahem [8]

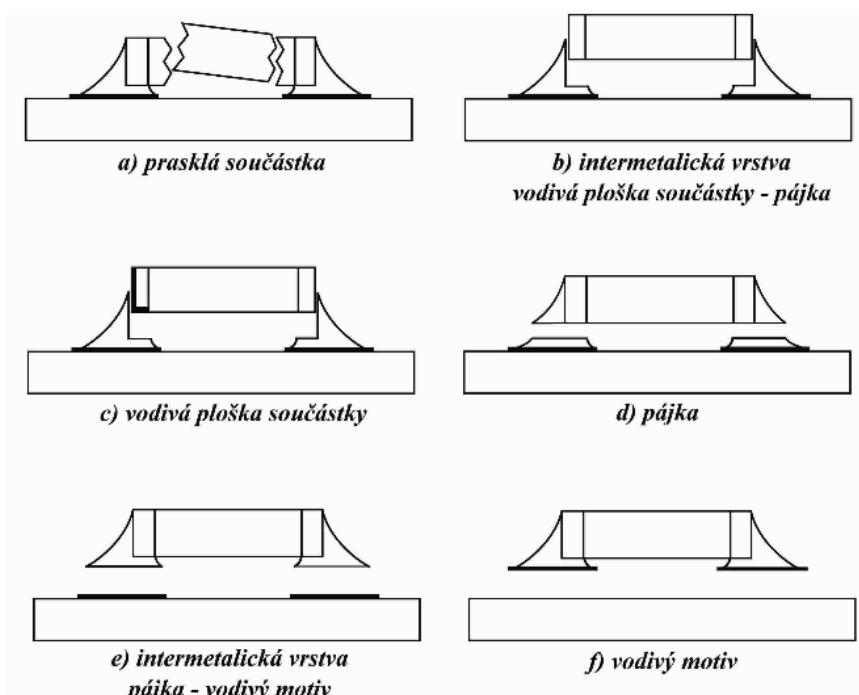
2.9.2.2 Zkouška pevnosti ve smyku

Zkouška pevnosti ve smyku je znázorněna na obrázku 4 vpravo. Velmi důležitou podmínkou, která je nutná zajistit při testu, je správné nastavení výšky trhacího nástroje, viz obrázek 4 vlevo. Trhací hlava musí tlačít na součástku, ne do substrátu. Je nutné, aby trn tlačil na střed součástky, aby byly oba pájené spoje namáhány stejně. Musí být také zajištěna konstantní rychlost posunu trhací hlavy.



Obrázek 4: Nastavení trhací hlavy [17]

Při této zkoušce se také rozlišuje způsob odtržení součástky z DPS. Všechny možnosti jsou uvedeny na obrázku 5.



Obrázek 5: Způsoby odtržení součástky z DPS [18]

2.9.3 Příprava vzorků na analýzu intermetalických vrstev pomocí elektronového mikroskopu

Pro zkoumání intermetalických vrstev jsou využívány metalografické výbrusy. Pomocí metalografických výbrusů lze zkoumat i jiné vlastnosti pájených spojů, např. tloušťku nanesené pájky.

Aby mohlo dojít k řezání, je nutné zalít nařezané desky plošných spojů do zalévacích hmot. V tomto případě byla použita vodivá zalévací hmota CEM3070 Pulver. Hmota po vytvrnutí pevně zafixuje desky plošných spojů pro další zpracování.

Existuje několik metod řezání. Jedna z možností je abrazivní řezání. Výhodou tohoto řezání je, že výsledný povrch je hladký a proces je rychlý. Další možností je využití nízkorychlostního rozbrušovacího kotouče. Při využití kotouče je nutné zajistit dostatečné chlazení a také vhodnou rychlost kotouče. Je velice důležité, aby všechny metalografické vzorky byly připraveny velmi pečlivě. Je nutné tedy dodržet několik základních bodů:

- Zabránit vytvoření škrábanců a jiných podobných nerovností.
- Zachovat i veškeré nekovové části.
- Je také nutné zabránit odštěpení části výbrusu, hlavně v okolí intermetalických vrstev.

Pokud se použije na řezání rozbrušovací kotouč, je nutné provést další operace. První operací je hrubé broušení. Zde dojde k tomu, že řezná plocha se zarovná. Broušení lze provádět jak za mokra, tak i bez přidání tekutiny neboli za sucha. Využívají se kotouče od zrnitosti 80 do zrnitosti 180. Při broušení je nutné zabránit přehřívání vzorků. V každé fázi broušení je nutné dodržet stejný úhel. Po každé části je nutné vzorek pečlivě umýt, to zabrání přenosu abrasivních částí. Pokud by nedošlo k dostatečnému umytí, došlo by ke vzniku nechtěných škrábanců a vrypů.

Další fáze je jemné broušení. V této části byly využívány brusné papíry od zrnitosti 240 do zrnitosti 600, rychlost broušení by s rostoucím číslem zrnitosti měla klesat. I v této části je nutné držet stejný úhel jako při hrubém broušení. Zde již probíhá broušení vždy za mokra, dochází k neustálému omývání vzorků a jsou odplavovány uvolněné částice. Také dochází k čistění brusného plátna.

Třetí fáze je leštění. Zde se využívá brusivo, které je namáčeno ve vodním roztoku. Nejlepší leštící metoda je využití diamantového brusiva. Nevýhodou je, že diamantové brusivo je poměrně drahé. Před začátkem leštění je nutné vzorek důkladně omýt. V této fázi může dojít k tomu, že částice, které se nachází ve vzduchu, mohou způsobit nechtěné poškrábání leštící plochy.

Čtvrtá fáze je leptání. To má za úkol zvýraznit přechody a lze identifikovat mikrostrukturální rysy. Dalším úkolem leptání je odstranění povrchové vrstvy narušeného kovu z leštění. Leptadla jsou nejčastěji kyseliny, které jsou zředěné v rozpouštědle. Leptání probíhá tak, že naředěná kyselina je nanesena na povrch vzorku na několik sekund. Je nutné nakonec veškeré leptadlo odstranit. V první fázi odstranění se vzorek opláchne pod tekoucí vodou, následně se opláchne alkoholem, a nakonec se

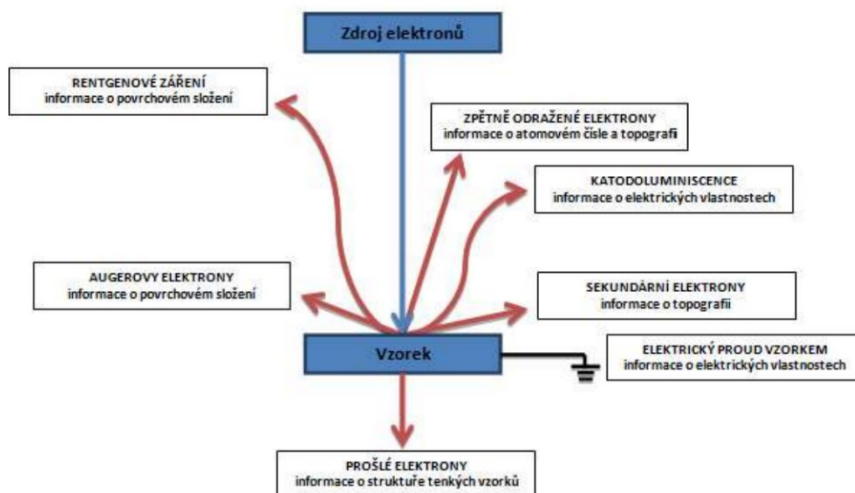
suší vzduchem. Po usušení se nesmí nikdo vzorku dotknout, ani se nesmí vzorek utírat. Takto připravený vzorek je následně vložen do mikroskopu. Může se začít se zkoumáním požadované vrstvy [17].

2.9.4 Elektronová mikroskopie

Elektronový mikroskop lze využít pro zkoumání vnitřních struktur, povrchu materiálu, chemického složení vzorků. Elektronovým mikroskopem lze zkoumat objekty do velikosti v řádu nm.

Základem je proud elektronů, který se vytváří v elektronovém děle nebo v elektronové trysce. Elektrony před dopadem na zkoumaný objekt prochází cívkami, které upraví směr elektronů. Elektronová mikroskopie má větší rozlišovací schopnost než mikroskopie optická, kde se využívají fotony. Rozlišovací schopnost lze měnit velikostí urychlovacího napětí. Urychlovací napětí je napětí mezi katodu a anodou, kdy se zvyšujícím napětím roste energie elektronů. S rostoucím urychlovacím napětím klesá vlnová délka elektronů [18].

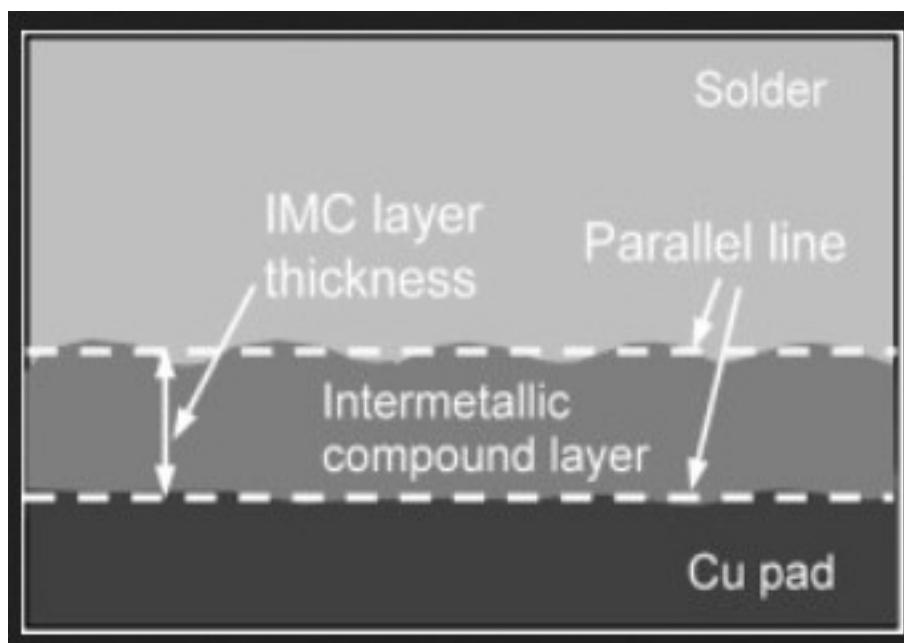
Jevy, které nastanou po dopadu, jsou zobrazeny na obrázku 6.



Obrázek 6: Jevy po dopadu elektronu na zkoumaný objekt [28]

3 Intermetalická vrstva a růst intermetalické vrstvy

Intermetalická vrstva neboli IMC vzniká z důvodu reakce roztavené pájky s pájecí ploškou nebo s vývody součástky. Intermetalická vrstva vzniká v každém pájeném spoji. Tato vrstva vzniká na rozhraní pájecí položky a tekuté pájky. IMC je polykrystalický křehký materiál, vlastnosti závisí na mikrostrukturách. IMC je zásadní pro mechanickou pevnost pájeného spoje, vykazuje malou tažnost. To má za následek, že pájený spoj praská právě v této vrstvě. IMC má také vliv na velikost elektrického odporu. S rostoucí šířkou IMC se velikost elektrického odporu mění. Změna odporu souvisí se změnou struktury krystalické mřížky. Také IMC může v pájeném spoji způsobit elektromigraci nebo výskyt voidů. Grafické znázornění intermetalické vrstvy je na obrázku 7 [19] [20].



Obrázek 7: Průřez části pájeného spoje s vyznačenou IMC [19]

V čase vrstva IMC roste, ale neroste rovnoměrně, proto je velice těžko měřitelná. Může nastat i jev, kdy IMC úplně nahradí pájku a následně spoj má úplně jiné vlastnosti. Tloušťka IMC u bezolovnatých pájecích slitin dosahuje větších šířek než pájka Sn-Pb. To je z důvodu, že u bezolovnatých pájecích slitin je dosahováno vyšší teploty v zóně přetavení, je zde daleko vyšší zastoupení cínu. Ve výrobě je nutné kontrolovat reakci mědi s roztavenou pájkou. Mít možnost korekce této operace je nutné z důvodu kontroly vytvořené IMC. Jedna z možností je přidání niklu do pájecí slitiny, který omezí reakci mezi mědí a roztavenou pájkou. Momentálně není známo, jak velká tloušťka IMC

způsobí selhání pájeného spoje. Uvádí se, že IMC do 4 μm se považuje za přijatelnou [13] [19].

3.1 Intermetalická vrstva mezi cínem a mědí

Intermetalická vrstva mezi pájkou a pájecím substrátem vzniká v každém pájeném spoji. Pokud se zkoumá intermetalická vrstva na plošce mědi při použití klasických cínových slitin, vzniká intermetalická vrstvená vrstva Cu_6Sn_5 . Při procesu stárnutí dochází k tomu, že se vytváří další vrstva. Vrstva Cu_3Sn vzniká mezi měděnou ploškou a vrstvou Cu_6Sn_5 . Pokud je pájený spoj vystaven vyšším teplotám, začne vznikat vrstva Cu_3Sn . Růst vrstev Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 lze popsat Arrheniovým zákonem kapitola 3. 1. 1 [2] [21].

Vrstvy Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 potřebují pro svůj růst určitou aktivační energii. Pro vrstvu Cu_6Sn_5 stačí aktivační energie v rozmezí 39,57 kJ/mol až 48,24 kJ/mol. Vrstva Cu_3Sn potřebuje energii v rozmezí 102,28 kJ/mol až 122,54 kJ/mol. Z důvodu zlepšení kvality pájených spojů je snaha o omezení růstu jak Cu_6Sn_5 , tak i Cu_3Sn . Pro omezení růstu Cu_6Sn_5 přidáváme rhenium [2].

Růst vrstvy Cu_3Sn způsobují vyšší teploty. Při vyšších teplotách nastává přesun atomů Cu do vrstvy Cu_6Sn_5 , zde dochází k reakci a vzniká Cu_3Sn . Cu_3Sn má pórovitou strukturu, to je dáno rozdílem molárního objemu při rozkladu Cu_6Sn_5 . Růst Cu_3Sn také ovlivňuje prostředí. Jeden z poměrně důležitých faktorů je vodní pára. Odborná studie tvrdí, že při zvýšené vlhkosti dochází k většímu růstu intermetalické vrstvy, dochází k degradaci povrchu cínu a k urychlení růstu intermetalické vrstvy. Změna tloušťky Cu_3Sn negativně ovlivňuje mechanickou pevnost pájeného spoje [22]. Dochází k tomu, že vrstvy Cu_6Sn_5 a Cu pomalu ubývají a Cu_3Sn roste v čase. Určit kritickou tloušťku Cu_3Sn obecně téměř nelze, kritická tloušťka závisí na teplotě, struktuře Cu/Sn a hlavně na velikosti pájeného spoje. Kritická tloušťka není konstantní a pro každou aplikaci je jiná. V dlouhodobém stárnutí vrstva Cu_3Sn začne dominovat. Při opravě může nastat problém, protože vrstva Cu_3Sn je nesmáčivá. V tabulce 4 lze vidět, jak se liší vlastnosti Cu, Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 [23] [24].

Tabulka 4: Vlastnosti Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn a Cu [24]

Vlastnosti	Cu_6Sn_5	Cu_3Sn	Cu
Teplota tavení [°C]	415	670	1085
Tepelná vodivost [W/m*K]	34,1	70,4	38,5
Poissonovo číslo [-]	0,309	0,299	0,34
Vickersova tvrdost [kg/mm ²]	378	343	50
Tepelná roztažnost [ppm/°C]	16,3	19	16
Hustota [g/cm ³]	8,3	8,9	8,9
Rezistivita [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]	17,5	8,93	1,7

3.1.1 Využití Arrheniova zákona pro výpočet aktivační energie

Tuto rovnici lze použít pro výpočet chemických reakcí a pro výpočet aktivační energie, která je potřeba k zahájení procesů difuze. Lze ji také využít pro popis a výpočet závislosti reakčních rychlostí. Důležitým parametrem, který ovlivňuje výslednou tloušťku IMC během procesu stárnutí, je aktivační energie Q [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$], která je vypočítána pomocí vztahů 2, 3 a 4

$$D = D_0 * e^{\frac{-Q}{R*T}} \quad (2)$$

D – difuzní koeficient jako funkce teploty [$\mu\text{m}^2/\text{s}$]

D_0 – difuzní konstanta [-]

Q – aktivační energie [J/mol]

R – plynová konstanta [$8,314 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$] [25]

T – teplota [K]

Pro určení aktivační energie je nutné znát difuzní koeficient D . Jeden koeficient D odpovídá jedné teplotě při dlouhodobém stárnutí, určuje se z lineárního prokladu změřených bodů, na osu x je nutné vynést odmocninu doby stárnutí v sekundách:

$$x = x_0 + \sqrt{Dt} \quad (3)$$

x_0 – tloušťka IMC ihned po přetavení [μm]

t – čas stárnutí [s]

x – tloušťka IMC po čase stárnutí t [μm]

Následně je upravena rovnice 2 do tvaru [21]:

$$\ln(D) = \ln(D_0) - \left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

Výsledná aktivační energie je získána tak, že je dána rovnice 4 do grafu. Z lineárního prokladu takto vynesných bodů lze určit směrnici, která je následně vynásobena plynovou konstantou, výsledkem je aktivační energie v J/mol [21].

3.2 Vztah mezi růstem IMC a životností pájeného spoje

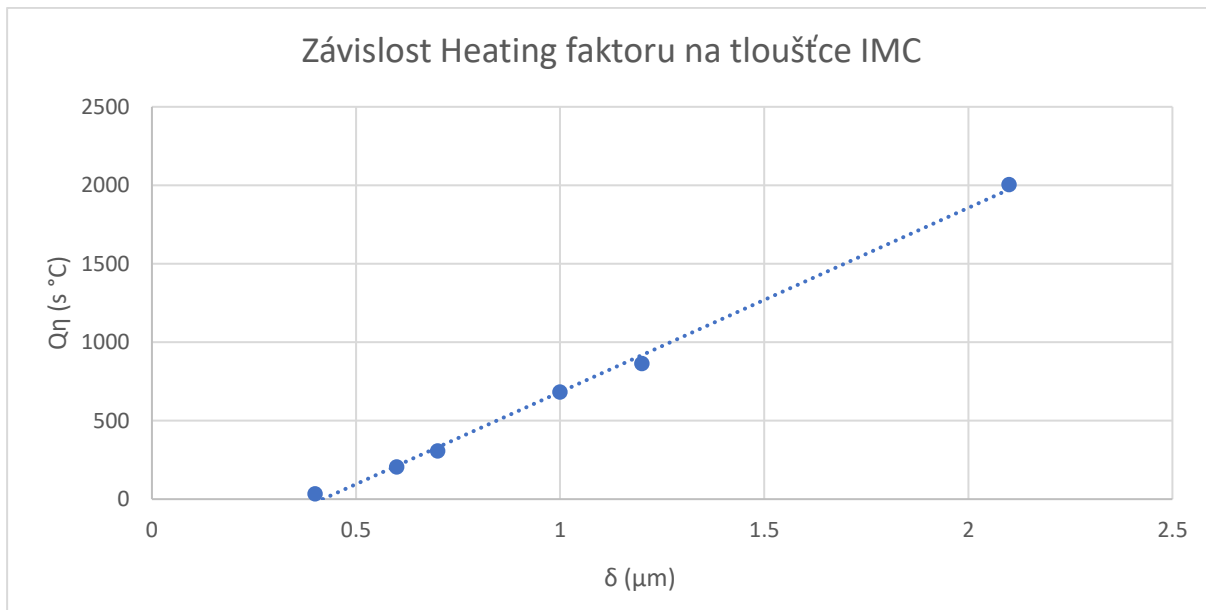
V každém pájeném spoji dochází k tomu, že IMC, která vznikla při procesu pájení, v čase roste. Rychlost růstu je dána okolními podmínkami. Proto se využívají zrychlené testy, viz kapitola 2.8.1 a 2.8.1.1. Tyto testy způsobují namáhání pájených spojů, např. u šokové komory, kde dochází k prudkým změnám teploty. Součástka a DPS mají jinou teplotní roztažnost, to způsobuje značné namáhání pájeného spoje. Z důvodu křehkosti IMC je velká pravděpodobnost, že pájený spoj praskne právě v této vrstvě. IMC vrstva ovlivňuje:

- velikost elektrického odporu,
- mechanickou pevnost pájeného spoje,
- tepelnou vodivost.

S rostoucím časem se zmíněné vlastnosti pájeného spoje stále zhoršují. U bezolovnaté pájecí slitiny SAC405 bylo z modelů určeno, že při dlouhodobém vystavení 125 °C na 6 až 8 let se mechanická pevnost sníží na nulovou hodnotu. Je ale pravděpodobné, že spoj selže dříve [24] [26].

3.3 Vztah mezi IMC a teplotním profilem

Teplotním profilem lze ovlivnit teplotu a dobu pájecí slitiny v tekuté fázi neboli Heating factor Q_η . U pájecích slitin 63Sn 37Pb byla zjištěna téměř lineární závislost mezi Q_η a tloušťkou intermetalické vrstvy. Bohužel tato závislost platí pouze do 2,5 μm . V grafu 1 lze najít, jak se mění velikost IMC pro různé Q_η . Tento experiment byl proveden na měděné podložce. Bohužel Q_η nelze stále zmenšovat. Je nutné zajistit, aby Q_η bylo tak velké, aby vznikl spolehlivý a kvalitní pájený spoj. Je snaha o nalezení optimálního nastavení, aby vznikl kvalitní pájený spoj a IMC nebyla zbytečně velká [13].



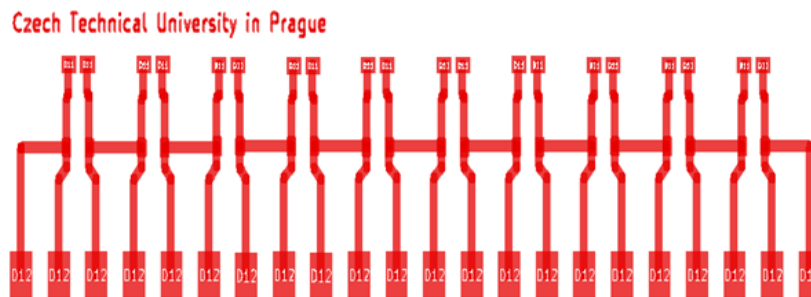
Graf 1: Grafické znázornění závislosti Q_η na δ

U bezolovnatých pájecích slitin se tloušťka IMC také zvyšuje s Q_η , ale zde není lineární závislost. Z dosavadních poznatků plyne, že IMC u bezolovnatých pájecích slitin dosahuje vyšší tloušťky než u slitin obsahující olovo [27].

4 Praktická část

4.1 Úvod a příprava testovací desky

V praktické části diplomové práce se zkoumá vliv tavidla na růst intermetalické vrstvy v pájeném spoji při dlouhodobém stárnutí v teplotní komoře. Aby bylo možné provádět testování, bylo nutné vytvořit vhodnou testovací destičku. Pro návrh byl využit program KiCAD. Při návrhu testovací desky bylo nutné dodržet rozměry, aby deska šla vložit do přípravku, který je využíván na trhačce DEFORM 02. Bylo také nutné přizpůsobit rozměry pro měření čtyřbodovou metodou, viz obrázek 8.



Obrázek 8: Testovací deska v KiCAD

Testování probíhalo v teplotních komorách při různých teplotách, viz tabulka 5. V této tabulce je uveden počet vzorků pro jednu kombinaci, a to pro kombinaci A. Celkový počet kombinací je 8.

Tabulka 5: Přehled počtu vzorků pro kombinaci A

Kombinace	Teplota v teplotní komoře [°C]	Počet vzorků 0 hodin	Počet vzorků 1008 hodin	Počet vzorků 2016 hodin	Počet vzorků 3024 hodin
A	85	2	2	2	2
	125		2	2	2
	150		2	2	-

Před vložením do komor proběhlo na dvou náhodně vybraných vzorcích u všech kombinací změření elektrického odporu. U jedné z desek byly provedeny mechanické zkoušky. Druhá deska se použila na rozbor růstu intermetalických vrstev pomocí metalografických výbrusů. Pro teploty stárnutí 85 °C a 125 °C byla provedena měření pro 0 hodin, 1008 hodin, 2016 hodin a 3024 hodin. U teploty stárnutí 150 °C nebylo provedeno měření pro 3024 hodin, a to z důvodu velké časové náročnosti dlouhodobých testů. Bohužel nebylo možné spustit všechny tři teploty stárnutí najednou. To bylo z toho

důvodu, že byly k dispozici pouze dvě teplotní komory. Došlo tedy k vložení do teplot 85 °C a 125 °C a po uplynutí této doby byly vloženy vzorky do teploty 150 °C. Z důvodu velké časové náročnosti budou tyto vzorky dostupné až po termínu odevzdání diplomové práce.

4.2 Použité pájecí pasty

V praktické části diplomové práce byly využity dvě pájecí pasty od výrobce AIM Solder:

- SAC305 M8 – Tato slitina obsahuje 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Teplota tání této slitiny je 217 °C. V této pájecí pastě je obsaženo tavidlo ROL1.
- REL 61 M8 – Zde se nachází stejná pájecí slitina jako v prvním případě, jen je zde rozdíl v použitém tavidlu. Zde je tavidlo REL1.

4.3 Přetavení v peci Mistral 260

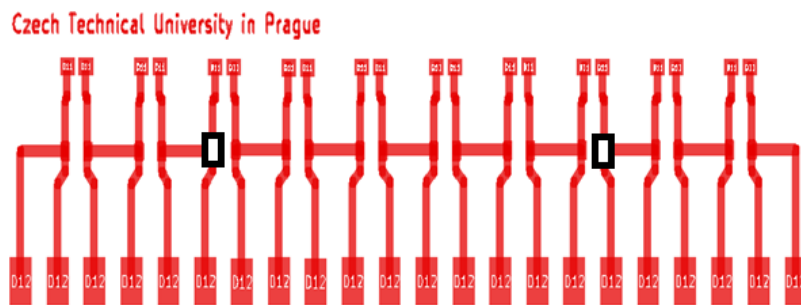
Testovací desky byly rozděleny do osmi skupin označené písmenem A až H. U vzorků A až D byla použita pájecí pasta SAC 305 M8, skupiny se lišily velikostí teplot v zóně předehřevu, aktivační zóně a v zóně přetavení. U zbylé části vzorků byla použita pájecí pasta REL 61 M8 a také byly rozdíly v teplotách v jednotlivých zónách pece, viz tabulka 6.

Tabulka 6: Přehled kombinací pro testování a jednotlivé teploty v zónách pájecí pece

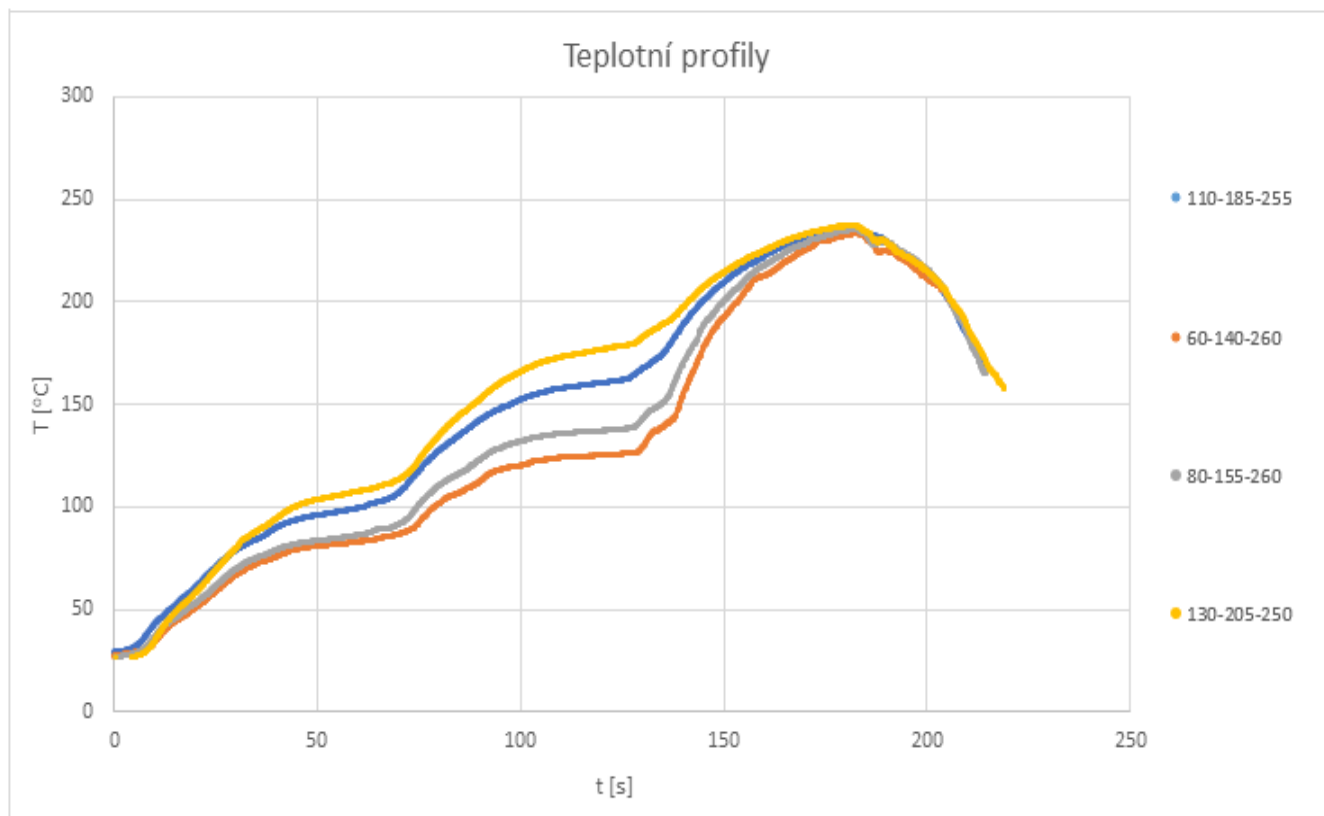
Nastavení pájecí pece [°C]			Značení	Typ pájecí pasty	Typ tavidla
130	205	250	A	SAC 305	ROL1
110	185	255	B		
80	155	260	C		
60	140	260	D		
130	205	250	E	REL 61 M8	REL1
110	185	255	F		
80	155	260	G		
60	140	260	H		
t ₁ [°C]	t ₂ [°C]	t ₃ [°C]			

Aby došlo k přetavení vzorků v peci Mistral 260, je nutné nastavit vhodný pájecí profil. Nastavení pájecího profilu vychází z datasheetu. Při použití průběžné pájecí pece

je nutné zadat teploty a rychlost dopravníku. Pro přesné nastavení teplot a rychlosti byly využity dva termočlánky, které byly posílány pecí. Umístění termočlánku na DPS je na obrázku 9 naznačeno černými obdélníky. Vyhodnocovaly se naměřené průběhy teplot. Změřený teplotní profil byl porovnán s teplotním profilem pájecí pasty uvedeném v datasheetu. Použité teplotní profily jsou zobrazeny na grafu 2. Základní teplotní profil je 110-185-255, rychlost dopravníku byla u všech profilů 21 cm za minutu.



Obrázek 9: DPS s termočlánky



Graf 2: Teplotní profily

4.4 Měření mechanických vlastností

Při měření mechanických vlastností se využívá trhačka DEFROM 02, viz obrázek 10. Využívá se zejména pro měření tahu, tlaku a pevnosti pájených a lepených spojů. Lze ji také využít pro měření deformačních procesů. Zařízení je připojeno přes síťovou jednotku. Hlavní přednosti trhačky DEFROM 02 jsou:

- vysoká silová přesnost 0,1 %,
- přesnost posunu je 10 μm [28].

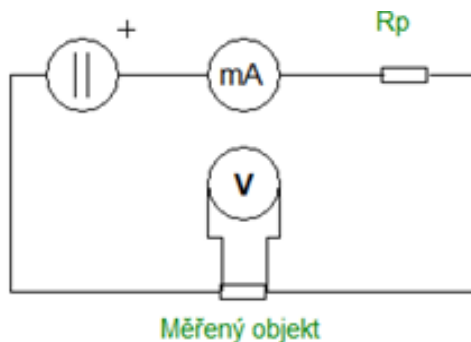
V této diplomové práci byla provedena stříhová zkouška zapájených rezistorů v pouzdře 1206 pomocí výše uvedené trhačky DEFROM 02. Rychlost posunu trhačím trnu byla konstantní pro všechna měření 1 mm za minutu.



Obrázek 10: Trhačka DEFROM 02 [28]

4.5 Měření elektrického odporu

Pro měření elektrického odporu byla využita čtyřbodová metoda a miliohmometr Kust MM2030. Výhodou čtyřbodové metody je, že eliminuje vliv přívodů. Principiální schéma je zobrazeno na obrázku 11. R_p je rezistor, který znázorňuje odpor přívodů.



Obrázek 11: Schéma čtyřbodové metody měření elektrického odporu

Aby byla zjištěna požadovaná hodnota elektrického odporu, je nutné pomocí Ohmova zákona vypočítat elektrický odpor měřeného objektu, viz rovnice 5:

$$R = \frac{U}{I} \quad (5)$$

U – napětí [V], I – proud [mA] – Obě tyto veličiny měří miliohmmeter, který i následně vypočítává elektrický odpor.

Rovnice 5 udává odpor, který je složen:

- z odporu pájeného spoje,
- z odporu součástky (využívají se odpory, které mají 19,075 mΩ, tato hodnota byla získána měřením na deseti odporech a následným vypočtením průměrné hodnoty).

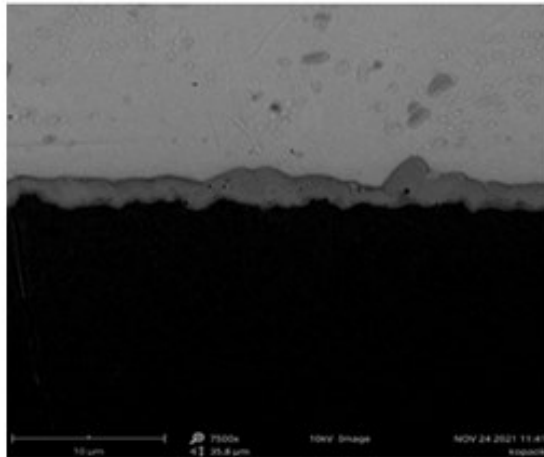
Požadovaný odpor jednoho pájeného spoje je získán z rovnice 6:

$$R_v = \frac{(R - R_s)}{2} \quad (6)$$

R_v – výsledný odpor pájeného spoje, R – vypočtený odpor podle rovnice 5, R_s – odpor použité součástky (v našem případě 19,075 mΩ) [29]

4.6 Určování tloušťky IMC

K určení tloušťky IMC v pájeném spoji se používá elektronový mikroskop. Princip elektronového mikroskopu je popsán v kapitole 2. 9. 4. Z elektronového mikroskopu SEM Thermo Scientific Phenom ProX, viz kapitola 4. 6. 1, dostáváme obrázky IMC, jak lze vidět na obrázku 12. Následně je nutné upravit získaný obrázek z elektronového mikroskopu na takzvanou binární mapu, která je na obrázku 13. Takto upravený obrázek obsahuje pouze bílou a černou barvu. Bílá barva značí intermetalickou vrstvu a černá barva značí ostatní. Pro zjištění výsledné tloušťky se využívá MATLAB. Aby bylo možné vypočítat tloušťku IMC, je nutné zadat přepočítávací konstantu v $\mu\text{m}/\text{px}$. Vložený obrázek je převeden na 2D pole. V každé buňce tohoto pole je jeden pixel vloženého obrázku. Skript postupně prochází sloupce tohoto pole, počítá počet bílých buněk a poté průměrnou hodnotu ze všech sloupců. Nakonec je počet bílých buněk z 2D pole vynásoben konstantou, aby byla zjištěna výsledná tloušťka intermetalické vrstvy.



Obrázek 12: IMC z elektronového mikroskopu



Obrázek 13: Binární mapa

4.6.1 SEM Thermo Scientific Phenom ProX – Skenovací elektronový mikroskop

Tento elektronový mikroskop byl použit pro snímání IMC vrstev ve fakultní laboratoři a umožňuje volbu hladin 5 kV, 10 kV a 15 kV. V optické oblasti je mikroskop schopen pracovat v rozsahu přiblížení od 20 do 135x, v elektronovém módu lze vzorek přiblížit od 160 do 130 000x. Pomocí tohoto mikroskopu lze zpracovávat vzorky vodivé i vzorky nevodivé. Tento mikroskop je také schopen provést prvkovou analýzu zkoumaných vzorků [28].

4.7 Výsledky a diskuse

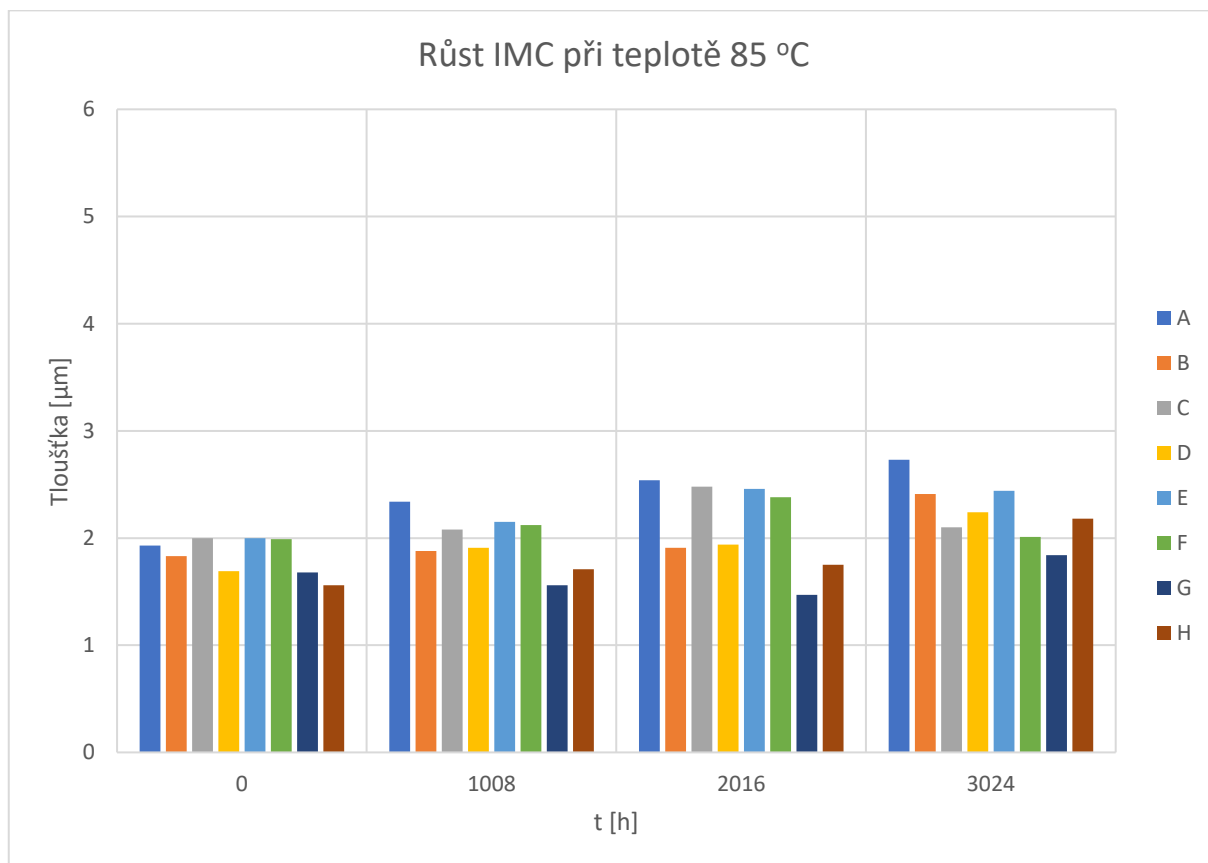
V první části jsou uvedeny změřené hodnoty intermetalických vrstev pro měřené časy stárnutí a vyhodnoceny změny, které nastaly při dlouhodobém stárnutí v klimatických komorách. Po zhodnocení výsledků následuje tabulka s vypočítanou aktivační energií. Postupně jsou uvedeny a vyhodnoceny hodnoty elektrického odporu a hodnoty smykové síly pro všechny tři teploty stárnutí.

4.7.1 Výsledky růstu IMC při teplotách v klimatické komoře

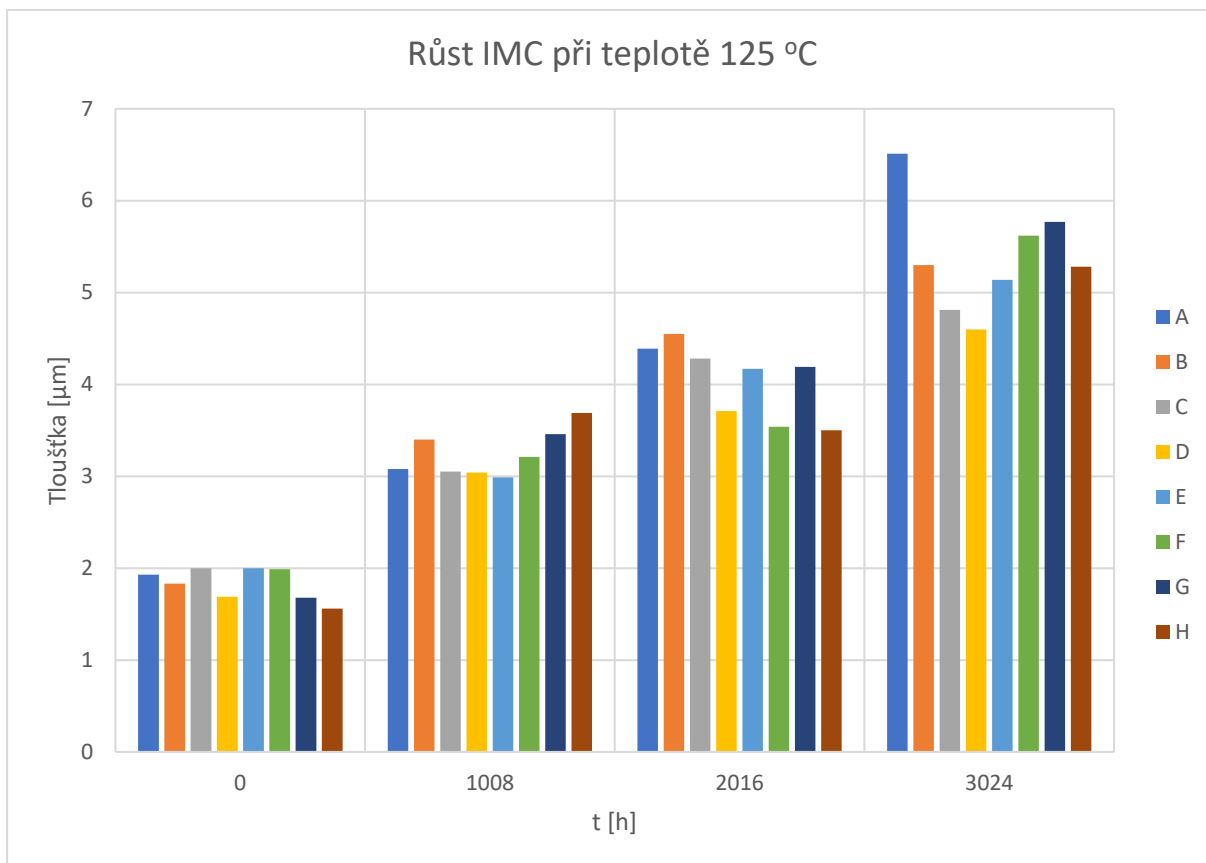
Tabulka 7: Výsledky IMC pro všechny teploty

Kombinace	Čas stárnutí [h]	Teplota 85 °C	Teplota 125 °C	Teplota 150 °C
		Tloušťka IMC [μm]	Tloušťka IMC [μm]	Tloušťka IMC [μm]
A	0	1,93	1,93	1,93
	1008	2,34	3,08	7,29
	2016	2,54	4,39	8,03
	3024	2,73	6,51	
B	0	1,83	1,83	1,83
	1008	1,88	3,40	5,43
	2016	1,91	4,55	7,6
	3024	2,41	5,30	
C	0	2	2	2
	1008	2,08	3,05	7,28
	2016	2,48	4,28	8,37
	3024	2,1	4,81	
D	0	1,69	1,69	1,69
	1008	1,91	3,04	6,34
	2016	1,94	3,71	7,78
	3024	2,24	4,60	
E	0	2	2	2
	1008	2,15	2,99	5,49
	2016	2,46	4,17	7,88
	3024	2,44	5,14	
F	0	1,99	1,99	1,99
	1008	2,12	3,21	6,14
	2016	2,38	3,54	7,71
	3024	2,01	5,62	
G	0	1,68	1,68	1,68
	1008	1,56	3,46	5,98
	2016	1,47	4,19	7,96
	3024	1,84	5,77	
H	0	1,56	1,56	1,56
	1008	1,71	3,69	6,97
	2016	1,75	3,50	7,66
	3024	2,18	5,28	

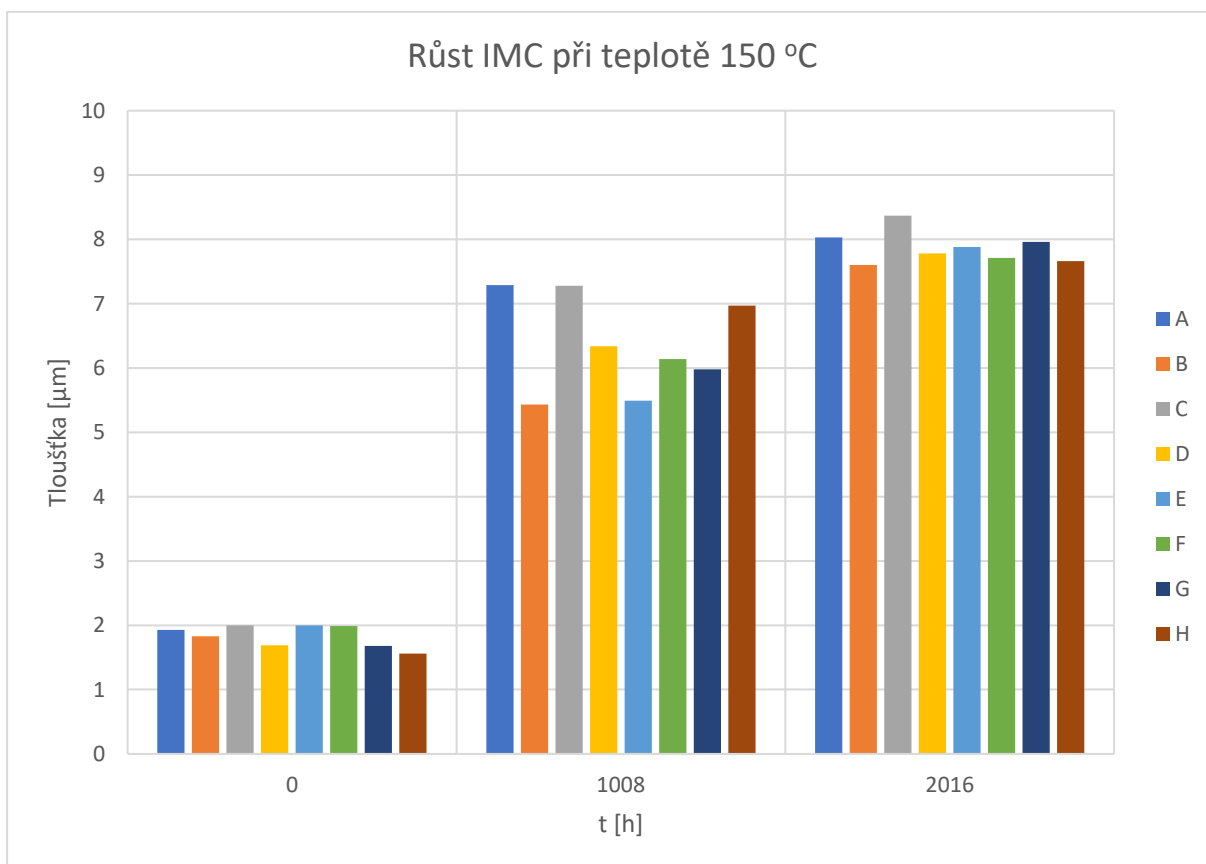
V tabulce 7 jsou uvedeny změřené průměrné hodnoty zkoumaných kombinací pro tři různé teploty stárnutí. U teploty 85 °C je nárůst intermetalických vrstev v porovnání s ostatními teplotami daleko menší, u teplot 125 °C a 150 °C lze pozorovat výraznější růst průměrné tloušťky intermetalické vrstvy. U čtyř kombinací byla naměřena po delší době stárnutí menší hodnota tloušťky intermetalické vrstvy než za kratší časový úsek. To je z důvodu, že intermetalická vrstva se měří pouze v několika místech, a ne po celé délce. Při teplotě 85 °C není růst intermetalické vrstvy velký, vrstva je velmi nepravidelná. S největší pravděpodobností byla vybrána místa, kde je intermetalická vrstva slabá. Tento jev u vyšších teplot nenastal, protože intermetalická vrstva vzrostla více. Grafické zobrazení tabulky 7 je na grafech 3, 4 a 5.



Graf 3: Růst IMC při teplotě 85 °C

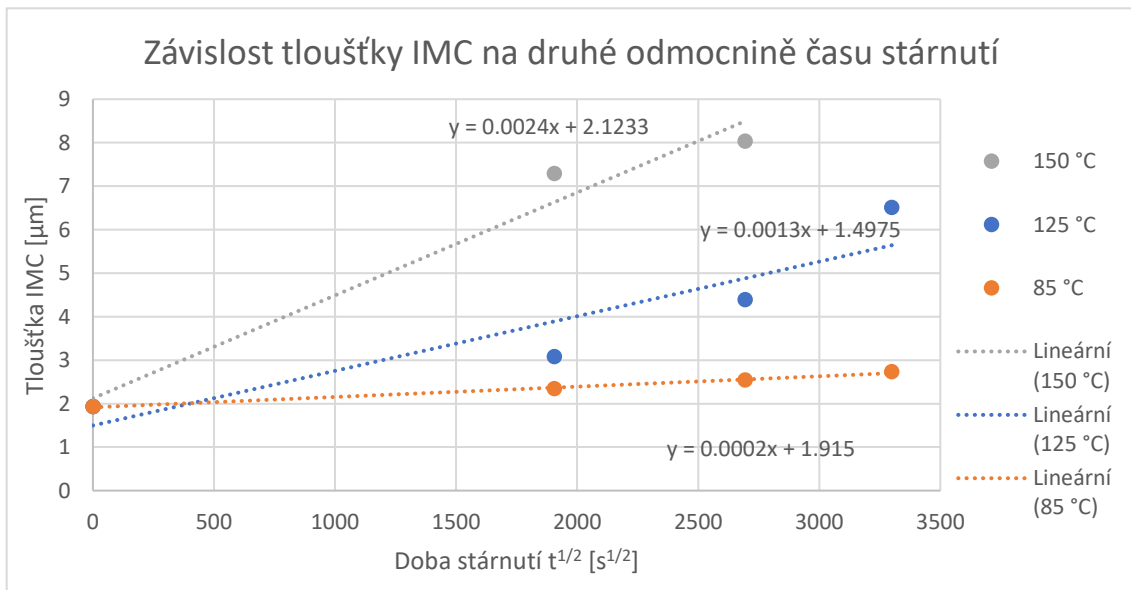


Graf 4: Růst IMC při teplotě 125 °C



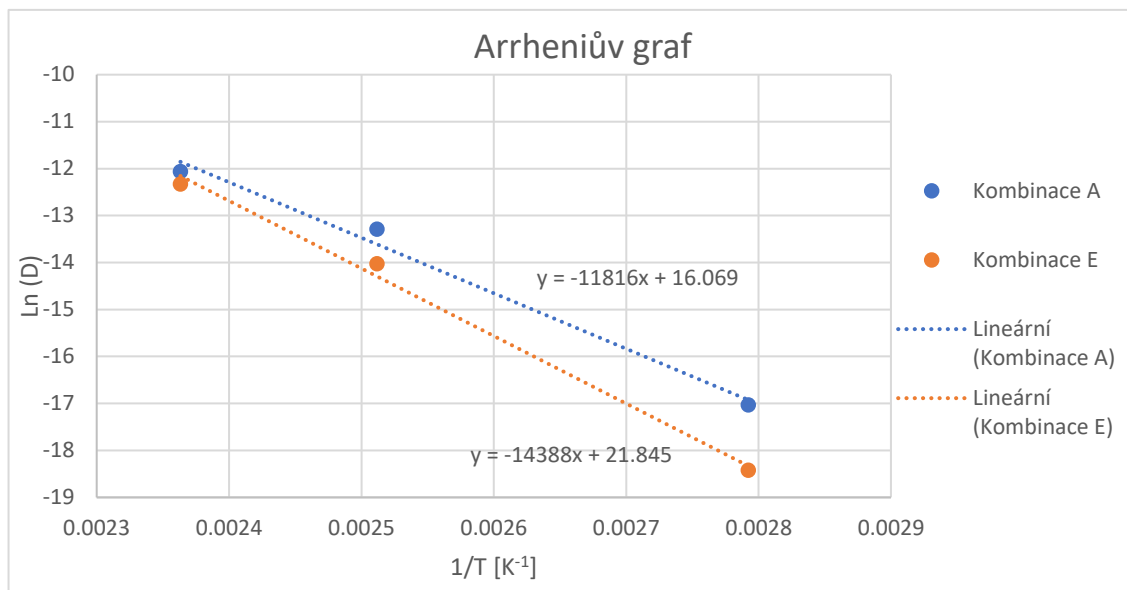
Graf 5: Růst IMC při teplotě 150 °C

Aby bylo možné určit aktivační energii, podle které se dá hodnotit kvalita pájeného spoje z hlediska intermetalických vrstev, je nutné znát hodnoty tloušťek IMC při dlouhodobém stárnutí, viz tabulka 7. Z takto získaných hodnot je nutné vytvořit graf závislosti IMC na druhé odmocnině času stárnutí v sekundách pro kombinaci A, viz graf 6. Změřené hodnoty jsou následně proloženy lineárním prokladem a je určena směrnice. Tuto směrnici je nutné umocnit, aby byl pro každou teplotu stárnutí zjištěn jeden difuzní koeficient D [$\mu\text{m}^2/\text{s}$].



Graf 6: Závislost tloušťky IMC na druhé odmocnině času stárnutí pro kombinaci A

Aktivační energie se určuje z Arrheniova grafu [30], viz graf 7, kde jsou vyneseny hodnoty pro dvě kombinace A a E. Pro sestavení je nutné vypočítat logaritmus z jednotlivých difuzních koeficientů. Arrheniův graf je závislost logaritmu difuzní konstanty na převrácené hodnotě teploty v Kelvinech. K získání směrnice je nutné lineárně proložit vynesené body. V poslední části je nutné směrnici z Arrheniova grafu vynásobit plynovou konstantou $8,314 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$, výsledkem je požadovaná aktivační energie.



Graf 7: Arrheniův graf pro kombinace A a E

V tabulce 8 jsou uvedeny hodnoty aktivačních energií pro všechny kombinace, které se poměrně liší.

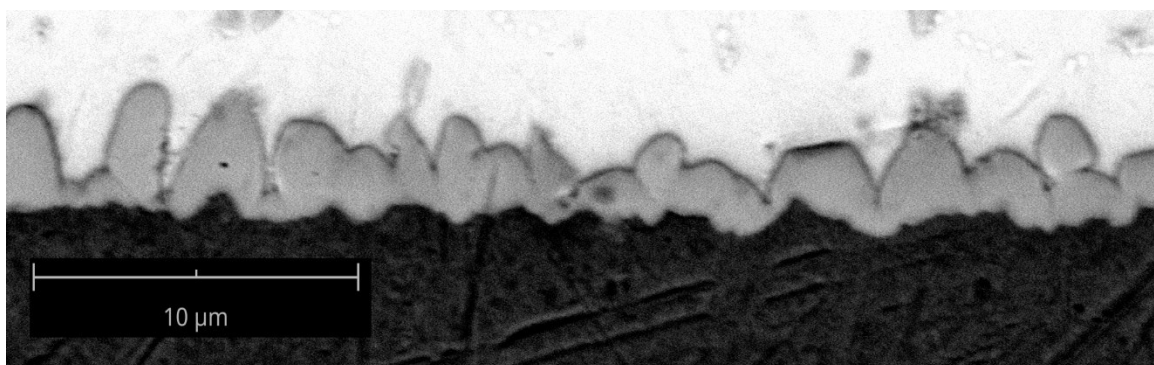
Tabulka 8: Aktivační energie pro všechny kombinace

Kombinace	Aktivační energie [kJ/mol]
A	98,24
B	120,44
C	133,37
D	121,78
E	119,62
F	148,35
G	219,66
H	96,22

U kombinací A až D byla použita pájecí pasta s tavidlem ROL1 a u kombinací E až H pájecí pasta s tavidlem REL1. Kombinace jsou seřazeny podle teploty v prvních dvou zónách pájecího procesu. Pokud je vypočtena průměrná hodnota kombinací A až D, tedy pro pájecí pastu SAC 305 s tavidlem ROL1, vyjde hodnota 118,46 kJ/mol. Pro kombinace E až H, s pájecí pastou REL61 s tavidlem REL1, je získána hodnota 145,96 kJ/mol. Z těchto hodnot lze prohlásit, že u pájecí pasty REL61 s tavidlem REL1 byl průměrný růst intermetalických vrstev menší. Z tohoto poznatku tedy plyne, že v dlouhodobém stárnutí z hlediska intermetalických vrstev lépe odolávaly pájené spoje s tavidlem REL1. Pokud jsou porovnány zjištěné hodnoty aktivační energie s hodnotami v odborném článku [31], kde také počítali velikost aktivační energie pro SAC 305, je zjištěno, že

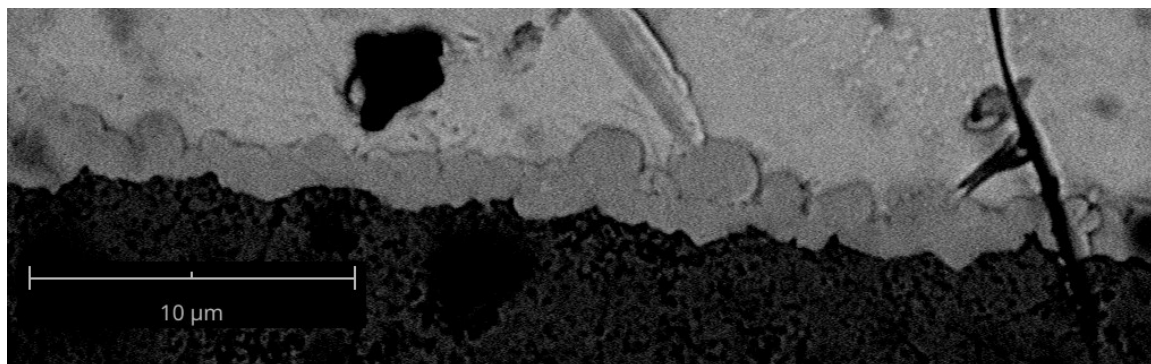
hodnota aktivační energie v našem experimentu je přibližně 2,5 větší. To je způsobeno tím, že v citovaném článku dosahují změřené tloušťky intermetalických vrstev větších přírůstků než v měření této diplomové práce. V článku bylo zmiňováno použití tavidla agresivnějšího typu, což pravděpodobně způsobilo větší hodnoty tlouštěk změřených IMC. Z porovnání výsledků této diplomové práce s výsledky článku [31] plyne, že agresivnější tavidlo pravděpodobně způsobí pokles aktivační energie.

Pokud u pájecích slitin se stejným tavidlem je uvažován vliv teplotního profilu na růst intermetalických vrstev, je zjištěno, že se změnou pájecího profilu se ovlivní vlastnosti pájeného spoje. U kombinací A až D, které obsahují tavidlo ROL1, je změna aktivační energie vlivem teplotního profilu menší než u pájecí slitiny s tavidlem REL1. Z toho lze usoudit, že tavidlo REL1 potřebuje pro kvalitní pájený spoj přesnější nastavení pájecího profilu. U pájecí slitiny s tavidlem ROL1 je nejideálnější kombinace C (80 – 155 – 260 – ROL1). U tohoto pájecího profilu došlo k nejlepší funkci tavidla. U kombinace D (60 – 140 – 260 – ROL1), kde jsou nižší teploty než u kombinace C v prvních dvou zónách pájecího procesu pravděpodobně nedošlo k plné aktivaci tavidla. U kombinace B (110 – 185 – 255 – ROL1) již teplota byla vyšší, to pravděpodobně způsobilo částečné odpaření tavidla. U kombinace A (130 – 185 – 250 – ROL1), kde je nejvyšší teplota, je velikost aktivační energie nejmenší. Zde pravděpodobně došlo v důsledku vysoké teploty v prvních dvou zónách k odpaření tavidla, to mohlo způsobit opětovnou oxidaci a vytvořit pájený spoj náchylnější na růst intermetalické vrstvy. Na obrázku 14 je intermetalická vrstva kombinace A po vytvoření pájeného spoje. Je zde vidět, že vrstva není celistvá, jsou vidět hrbolky, které jsou v dlouhodobém stárnutí náchylnější na růst IMC.



Obrázek 14: Intermetalická vrstva kombinace A po vytvoření pájeného spoje

Obrázek 15 ukazuje intermetalickou vrstvu po vytvoření pájeného spoje u kombinace C, která má největší aktivační energii u pájecí slitiny s tavidlem ROL1. Lze si všimnout, že zde je vrstva celistvější než u předchozího obrázku. Z toho lze usuzovat, že růst intermetalické vrstvy je menší. Tento pájený spoj lépe odolává růstu IMC při dlouhodobém stárnutí.



Obrázek 15: Intermetalická vrstva kombinace C po vytvoření pájeného spoje

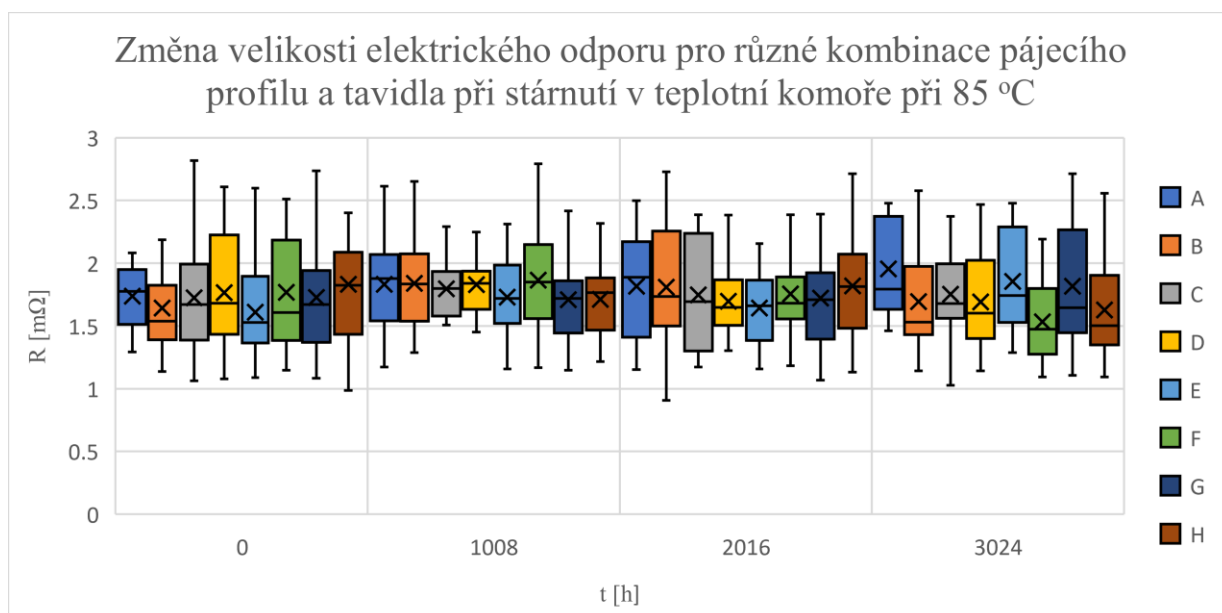
Při porovnání aktivačních energií pro pájecí slitinu s tavidlem REL1, se zjistilo, že nejlepší kombinace je G (80 – 155 – 260 – REL1). To je stejný pájecí profil jako pro pájecí slitinu s tavidlem ROL1. Nejhorší kombinace s tímto tavidlem je H (60 – 140 – 260 – REL1), tato kombinace má nejnižší aktivační hodnotu úplně ze všech kombinací. Z toho lze usoudit, že teplota zde nebyla dostatečná a pravděpodobně zde tavidlo nezačalo plnit svou funkci. U kombinací E (130 – 205 – 250 – REL1) a F (110 – 185 – 255 – REL1) došlo k tomu, že s rostoucí teplotou v prvních dvou zónách pájecího procesu hodnota aktivační energie klesala. U kombinace E, která má nejvyšší teplotu, pravděpodobně došlo k odpaření tavidla a pájecí plošky nebyly zbaveny oxidace. U kombinace F je hodnota aktivační energie větší než u kombinace E, to je pravděpodobně způsobeno částečným odpařením tavidla a nedostatečným odstraněním oxidů.

4.7.2 Stárnutí v klimatické komoře při 85 °C – elektrický odpor a smyková síla

Ve druhém experimentu byl zkoumán vliv použitého tavidla a pájecího profilu na velikost elektrického odporu při dlouhodobém stárnutí v teplotní komoře při 85 °C. V tabulce 9 jsou uvedeny průměrné hodnoty elektrického odporu pájeného spoje pro všechny kombinace a pro všechny časy stárnutí. Z grafu 8 lze vyčíst výsledky změny elektrického odporu pro různé pájecí procesy a různá použitá tavidla.

Tabulka 9: Změřené hodnoty elektrického odporu pro všechny časy stárnutí při teplotě 85 °C

A					E				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
R [mΩ]	1,74	1,83	1,82	1,95	R [mΩ]	1,61	1,73	1,64	1,86
B					F				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
R [mΩ]	1,64	1,84	1,81	1,70	R [mΩ]	1,77	1,86	1,75	1,53
C					G				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
R [mΩ]	1,73	1,80	1,75	1,75	R [mΩ]	1,73	1,71	1,72	1,82
D					H				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
R [mΩ]	1,77	1,83	1,70	1,69	R [mΩ]	1,83	1,71	1,82	1,63



Graf 8: Změna velikosti elektrického odporu pro různé kombinace pájecího profilu a tavidla při stárnutí v teplotní komoře při 85 °C

Pokud jsou porovnány průměrné hodnoty v čase 0 hodin, vychází nejlépe pájecí kombinace E (130 – 205 – 250 – REL 1). Rozdíl mezi nejmenší a největší hodnotou je 0,19 mΩ. Pro statistické porovnání naměřených hodnot v čase 0 hodin byl proveden t-test na hladině významnosti 95 %. Tento test neprokázal mezi kombinacemi se stejným pájecím profilem a jiným tavidlem statisticky významný rozdíl. Z toho lze vyvodit závěr,

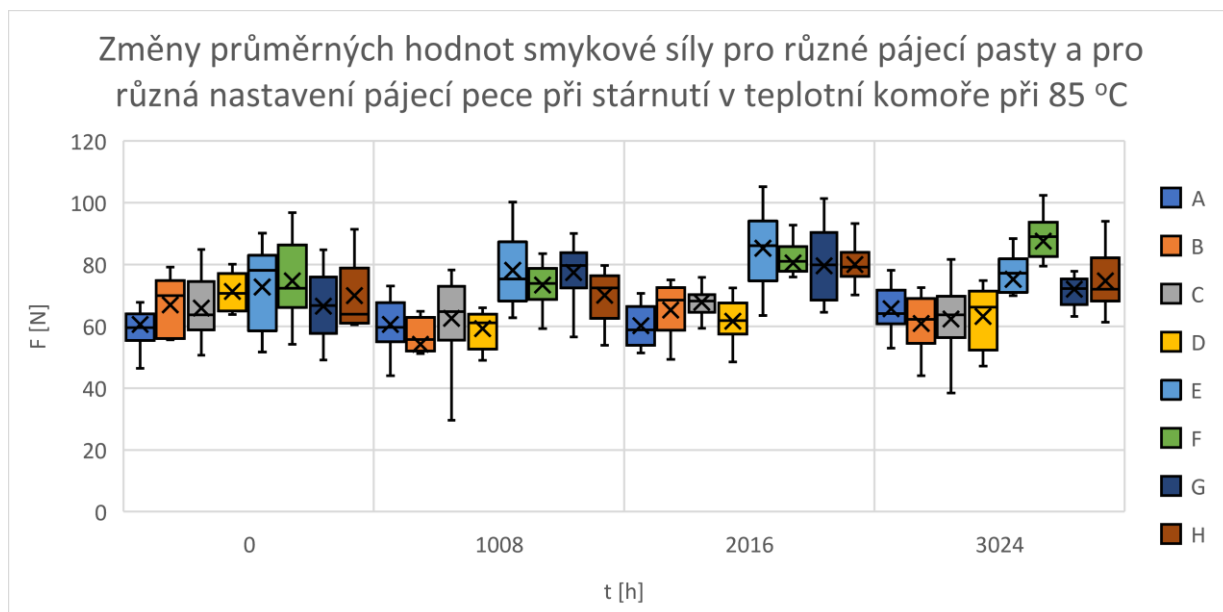
že použité tavidlo ani u jednoho pájecího profilu nezpůsobilo výraznou změnu elektrického odporu. Do praxe lze vyvodit závěr, že obě tavidla splnila svůj úkol.

Pro posouzení, jak se měnil elektrický odpor při dlouhodobém stárnutí, byl u všech kombinací proveden t-test mezi počáteční a koncovou hodnotou elektrického odporu. U kombinace E (130 – 205 – 250 – REL1) a A (130 – 205 – 250 – ROL1) byl odhalen statisticky významný rozdíl hodnot před a po stárnutí. Tyto kombinace mají nevyšší teploty v prvních dvou zónách. Vyšší teploty pájecího profilu mohly způsobit, že tavidla sice splnila svou funkci, odstranila oxidaci z pájených kontaktů, ale mohlo dojít k tomu, že se tavidla rychleji odpařovala a došlo ke zpětné oxidaci. Ta mohla způsobit, že hodnota intermetalické vrstvy byla po čase stárnutí 3024 hodin ze všech kombinací nejvyšší u kombinace A a E. To mohlo způsobit statisticky významnou změnu elektrického odporu při dlouhodobém stárnutí.

V tabulce 10 jsou uvedeny průměrné hodnoty smykové síly potřebné pro odtržení součástky z DPS pro všechny kombinace a pro všechny časy stárnutí v klimatické komoře při teplotě 85 °C.

Tabulka 10: Změřené hodnoty smykové síly pro všechny časy stárnutí při teplotě 85 °C

A					E				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
F[N]	60,58	60,62	60,23	65,66	F[N]	72,72	78,17	85,33	75,26
B					F				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
F[N]	66,91	54,13	65,23	60,96	F[N]	74,76	73,37	80,53	87,54
C					G				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
F[N]	65,95	62,58	67,74	62,35	F[N]	66,48	77,42	79,59	72,02
D					H				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
F[N]	71,28	59,24	61,68	63,25	F[N]	69,97	70,01	80,01	74,71



Graf 9: Změny velikosti smykové síly pro různé pájecí pasty a pro různá nastavení pájecí pece při stárnutí v teplotní komoře při 85 °C

Tabulka 10 uvádí průměrné hodnoty naměřené smykové síly pro odpory při teplotě stárnutí 85 °C. V grafu 9 jsou vyneseny změřené hodnoty pro všechny kombinace. Po zaměření se na hodnoty smykové síly v čase 0 hodin byl proveden t-test mezi kombinacemi se stejným pájecím profilem a jiným tavidlem po vytvoření pájeného spoje. T-testem byl zjištěn statisticky významný rozdíl u nejvyššího pájecího profilu. Použitým tavidlem lze způsobit změnu mechanických vlastností pájeného spoje.

Při porovnání počáteční a koncové hodnoty u některých kombinací velikost smykové síly vzrostla. A to u kombinací A (130 – 205 – 250 – ROL1), E (130 – 205 – 250 – REL1), F (110 – 185 – 255 – REL1), G (80 – 155 – 260 – REL1) a H (60 – 140 – 260 – REL1). Z průměrných hodnot nejlépe vychází kombinace F (110 – 185 – 255 – REL1), kde došlo k nárůstu o 12,78 N. U všech kombinací byl proveden t-test na hladině významnosti 95 %, pomocí kterého se zjišťoval statisticky významný rozdíl mezi hodnotou smykové síly ihned po zapájení a po 3024 hodinách. U kombinace F (110 – 185 – 255 – REL1) se statistický rozdíl potvrdil. Z toho lze usoudit, že se dokonce vlastnosti kombinace F zlepšily. Statistický rozdíl byl zjištěn také u kombinace D (60 – 140 – 260 – ROL1). Z průměrných hodnot vyplývá, že tato kombinace má největší pokles průměrné hodnoty. Z měřených hodnot lze vyvodit závěr, že pájené spoje tvořené pájecí slitinou s tavidlem REL1 mají lepší vlastnosti při dlouhodobém stárnutí. To potvrzuje graf 9, který uvádí rozdíl mezi kombinacemi s různým tavidlem již po 1008 hodinách stárnutí, tento rozdíl se stále zvyšoval. Pravděpodobně pájené spoje s tavidlem

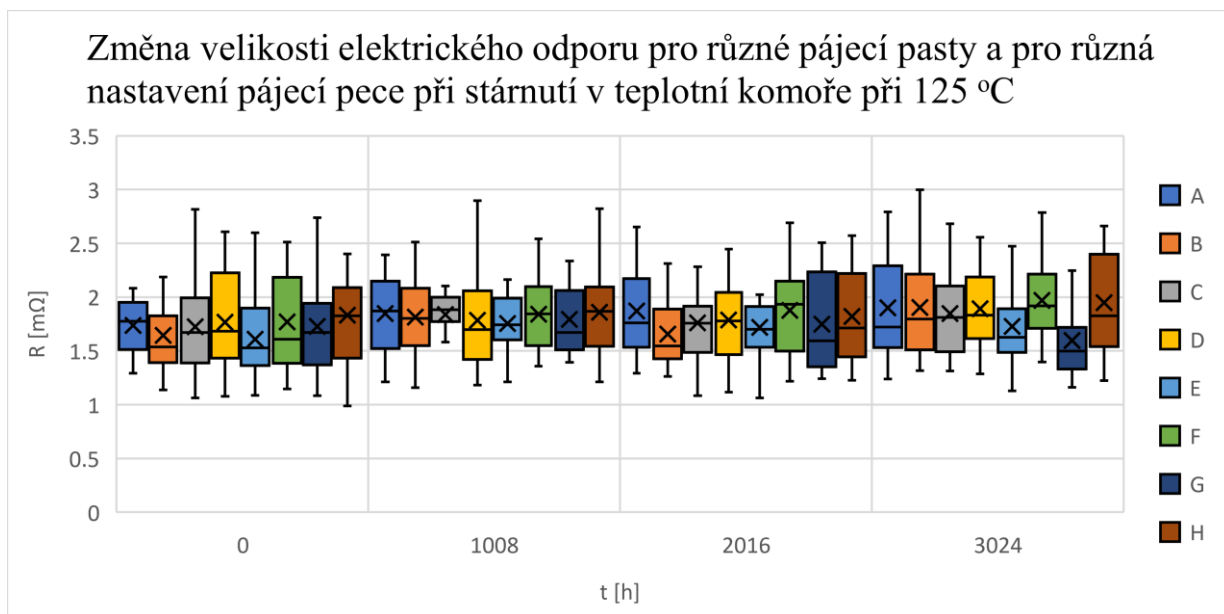
REL1 mají menší počet voidů. Voidy způsobují zhoršení mechanických vlastností pájených spojů. Voidy při dlouhodobém stárnutí zvětšují svou velikost a způsobují zhoršení mechanických vlastností. Zlepšení mechanických vlastností by mohlo souviset s tím, že tyto kombinace mají lepší celistvost a opravdu malý počet vodiů. Se studií [32], která tvrdí, že vznik voidů pravděpodobně souvisí s čistotou Cu substrátu a čistotou pájky, je dán do souvislosti výsledek tohoto experimentu. Výsledky s tavidlem REL1 ukazují, že toto tavidlo pravděpodobně lépe odstraňuje nežádoucí vlivy, např. zbavení oxidace a zabránění opětovné oxidace.

4.7.3 Stárnutí v klimatické komoře při 125 °C – elektrický odpor a smyková síla

V tabulce 11 jsou uvedeny průměrné hodnoty elektrického odporu pájeného spoje pro všechny kombinace a pro všechny časy stárnutí v klimatické komoře při teplotě 125 °C.

Tabulka 11: Změřené hodnoty elektrického odporu pro všechny časy stárnutí při teplotě 125 °C

A					E				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
R [mΩ]	1,74	1,85	1,87	1,90	R [mΩ]	1,61	1,75	1,72	1,73
B					F				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
R [mΩ]	1,64	1,81	1,66	1,90	R [mΩ]	1,77	1,84	1,88	1,97
C					G				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
R [mΩ]	1,73	1,84	1,76	1,85	R [mΩ]	1,73	1,79	1,75	1,60
D					H				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
R [mΩ]	1,77	1,78	1,79	1,89	R [mΩ]	1,83	1,86	1,82	1,95



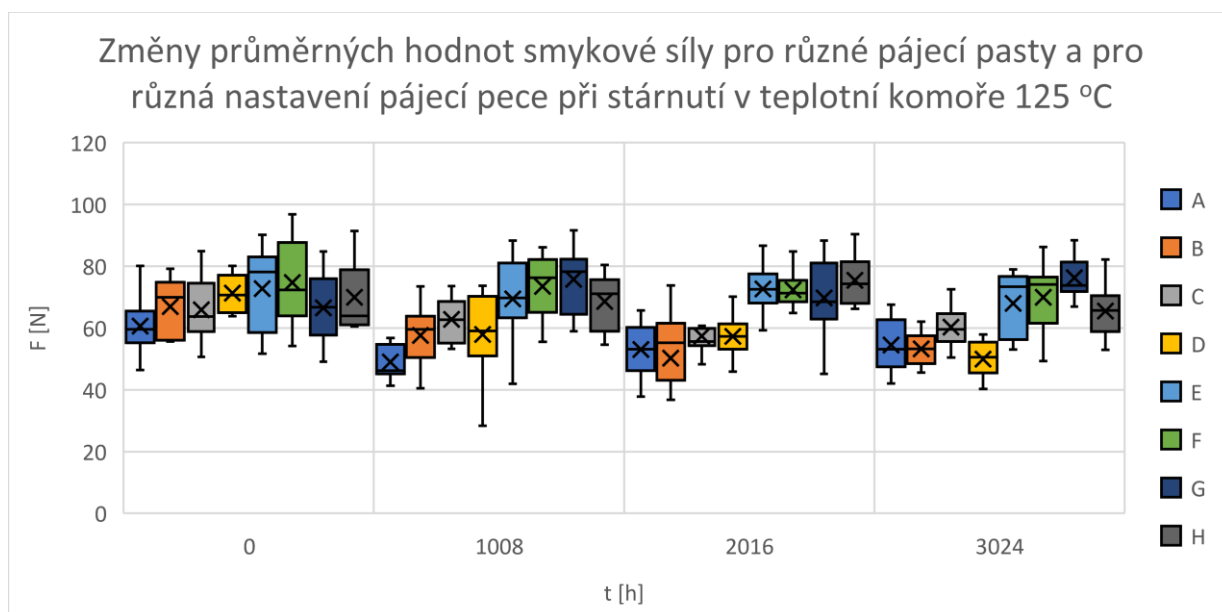
Graf 10: Změna velikosti elektrického odporu pro různé kombinace pájecího profilu a tavidla při stárnutí v teplotní komoře při 125 °C

Pokud jsou porovnány průměrné hodnoty z tabulky 11, je patrné, že hodnota odporu u všech kombinací kromě kombinace G (80 –155 – 260 – REL1) vzrostla. Aby došlo k určení, zda jsou statistické rozdíly mezi počáteční a koncovou hodnotou, byly také provedeny t-testy. Ty neodhalily u žádné kombinace statisticky významné změny mezi počáteční a koncovou hodnotou. Z toho lze usoudit, že elektrický odpor se výrazně nezměnil. Při porovnání průměrných konečných hodnot elektrického odporu u kombinací se stejným pájecím profilem, ale jiným tavidlem, bylo zjištěno, že se zde vliv tavidla neprojevil. Do praxe lze vyvodit závěr, že změna hodnot elektrického odporu je velmi malá a hledání optimalizace je zbytečné.

V tabulce 12 jsou uvedeny průměrné hodnoty smykové síly potřebné pro odtržení součástky z DPS pro všechny kombinace a pro všechny časy stárnutí v klimatické komoře při teplotě 125 °C.

Tabulka 12: Změřené hodnoty smykové síly pro všechny časy stárnutí při teplotě 125 °C

A					E				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
F[N]	60,58	48,97	53,01	54,47	F[N]	72,72	69,43	72,59	67,99
B					F				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
F[N]	66,91	57,57	50,24	53,22	F[N]	74,76	73,47	72,34	69,98
C					G				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
F[N]	65,95	62,84	57,4	60,26	F[N]	66,48	75,79	69,78	76,25
D					H				
t [h]	0	1008	2016	3024	t [h]	0	1008	2016	3024
F[N]	71,28	57,95	57,29	49,97	F[N]	69,97	68,57	75,4	65,53



Graf 11: Změny průměrných hodnot smykové síly pro různé pájecí pasty a pro různá nastavení pájecí pece při stárnutí v teplotní komoře 125 °C

V tabulce 12 jsou uvedeny průměrné hodnoty smykové síly pro všech osm kombinací a pro všechny časy stárnutí. Téměř u všech kombinací smyková síla, která byla potřebná v 0 hodinách a v 3024 hodinách, klesla. Jediná kombinace, kde smyková síla vzrostla, je kombinace G (80 – 155 – 260 – REL1). Pro zjištění, zda zvýšení síly oproti síle v čase 0 hodin je statisticky významné, byl proveden t-test, který odhalil statisticky významný rozdíl. Větší rozdíl v počáteční a koncové hodnotě byl také zjištěn

pro kombinace B (110 – 185 – 255 – ROL1) a D (60 – 140 – 260 – ROL1). U těchto kombinací ale smyková síla statisticky významně klesla. Z výsledků také plyne, že lepší vlastnosti mají kombinace, kde je tavidlo REL1. Ani u jedné této kombinace nedošlo ke statisticky významnému poklesu smykové síly, u jedné kombinace dokonce hodnota smykové síly vzrostla. U tavidla ROL1 jsou horší výsledky, u dvou kombinací byl statisticky významný pokles a u dvou kombinací nebyl potvrzen.

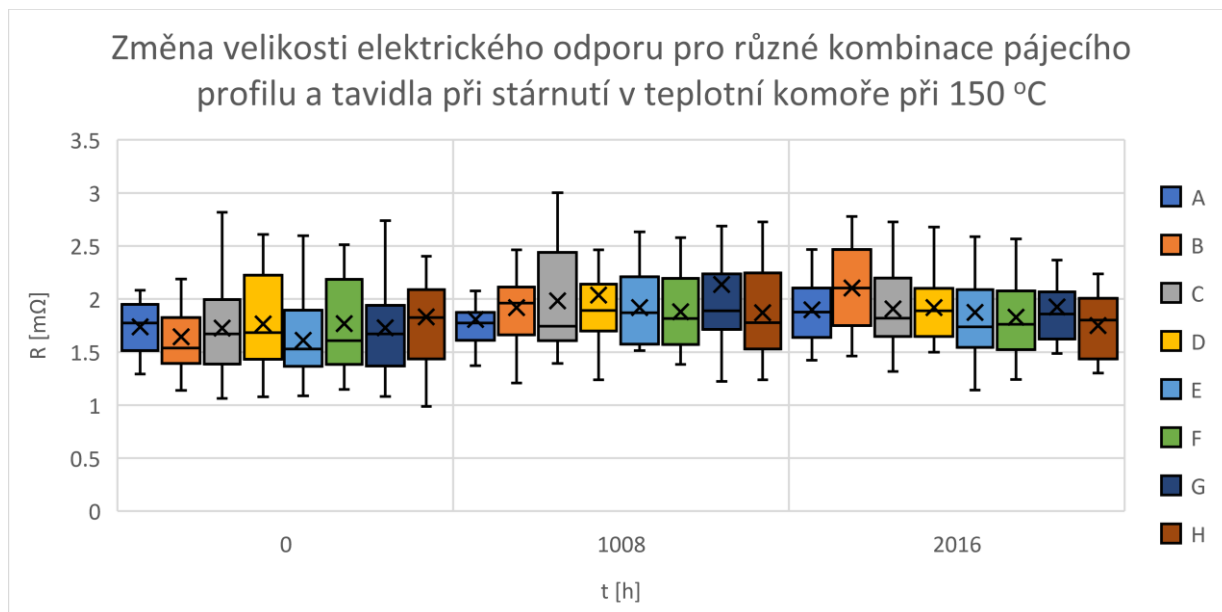
Při teplotě stárnutí 125 °C a po čase stárnutí 3024 hodin lze v grafu 11 vidět významný rozdíl mezi kombinacemi se stejným teplotním profilem a jiným tavidlem, to bylo potvrzeno pomocí t-testů. U teploty 85 °C bylo zjištěno, že slitina s tavidlem REL1 má lepší mechanické vlastnosti. Tento výsledek je potvrzen i zde. Vyšší teplotou byl pravděpodobně urychlen růst voidů, které vznikly v pájeném spoji s tavidlem ROL1. U pájecí slitiny s tavidlem REL1 jsou voidy velmi malé, ani vyšší teplota nezpůsobila jejich růst.

4.7.4 Stárnutí v klimatické komoře při 150 °C – elektrický odpor a smyková síla

V tabulce 13 jsou uvedeny průměrné hodnoty elektrického odporu pájeného spoje pro všechny kombinace a pro všechny časy stárnutí v klimatické komoře při teplotě 150 °C.

Tabulka 13: Změřené hodnoty elektrického odporu pro všechny časy stárnutí při teplotě 150 °C

A				E			
t [h]	0	1008	2016	t [h]	0	1008	2016
R [mΩ]	1,74	1,81	1,90	R [mΩ]	1,61	1,92	1,87
B				F			
t [h]	0	1008	2016	t [h]	0	1008	2016
R [mΩ]	1,64	1,92	2,10	R [mΩ]	1,77	1,88	1,83
C				G			
t [h]	0	1008	2016	t [h]	0	1008	2016
R [mΩ]	1,73	1,98	1,91	R [mΩ]	1,73	2,14	1,92
D				H			
t [h]	0	1008	2016	t [h]	0	1008	2016
R [mΩ]	1,77	2,04	1,92	R [mΩ]	1,83	1,87	1,75



Graf 12: Změna velikosti elektrického odporu pro různé kombinace pájecího profilu a tavidla při stárnutí v teplotní komoře při 150 °C

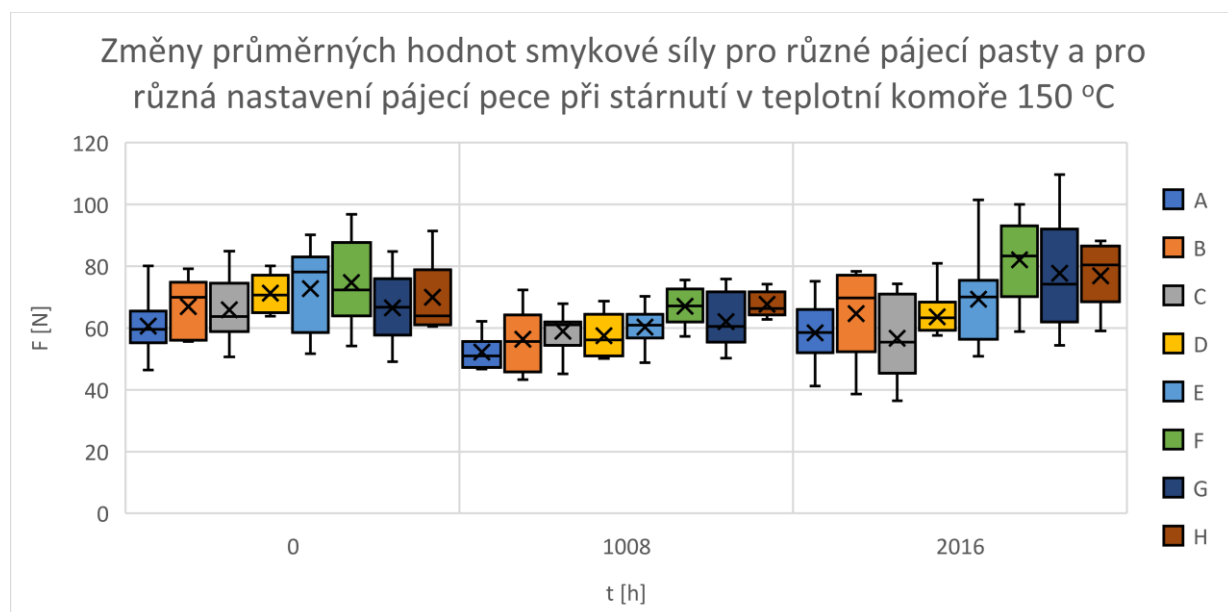
V tabulce 13 jsou uvedeny hodnoty elektrického odporu změřené pro čas 0 hodin, 1008 hodin a 2016 hodin. Pokud je porovnáván rozdíl elektrického odporu v čase 0 hodin a 2016 hodin, jsou patrné malé rozdíly. Největší rozdíl lze pozorovat v kombinaci B (110 – 185 – 255 – ROL1), zde odpor vzrostl 0,46 mΩ. U ostatních kombinací vyšly rozdíly elektrického odporu do 0,26 mΩ. Pomocí t-testu, který porovnával počáteční a koncovou hodnotu pro všechny kombinace, bylo zjištěno, že statistický rozdíl mezi hodnotami byl zjištěn pouze u kombinace B (110 – 185 – 255 – ROL1).

Použité tavidlo nezpůsobilo větší rozdíly v dlouhodobém stárnutí při teplotě 150 °C, pouze u jedné kombinace s tavidlem ROL1 byl potvrzen statisticky významný rozdíl. U kombinací s tavidlem REL1 nebyl při porovnání počátečních a koncových hodnot statisticky významný rozdíl potvrzen. Z toho lze do praxe vyvodit, že změna elektrického odporu je tak malá, že ji lze zanedbat.

V tabulce 14 jsou uvedeny průměrné hodnoty smykové síly potřebné pro odtržení součástky z DPS pro všechny kombinace a pro všechny časy stárnutí v klimatické komoře při teplotě 150 °C.

Tabulka 14: Změřené hodnoty smykové síly pro všechny časy stárnutí při teplotě 150 °C

A				E			
t [h]	0	1008	2016	t [h]	0	1008	2016
F[N]	60,58	52,21	58,47	F[N]	72,72	60,27	69,3
B				F			
t [h]	0	1008	2016	t [h]	0	1008	2016
F[N]	66,91	56,37	64,68	F[N]	74,76	67,03	82,12
C				G			
t [h]	0	1008	2016	t [h]	0	1008	2016
F[N]	65,95	58,94	56,7	F[N]	66,48	62,1	77,73
D				H			
t [h]	0	1008	2016	t [h]	0	1008	2016
F[N]	71,28	57,5	63,63	F[N]	69,97	67,63	76,91



Graf 13: Změny průměrných hodnot smykové síly pro různé pájecí pasty a pro různá nastavení pájecí pece při stárnutí v teplotní komoře 150 °C

Tabulka 14 uvádí všechny naměřené hodnoty smykové síly při teplotě stárnutí 150 °C. Hodnoty změřené v čase 0 jsou větší než hodnoty smykové síly po 1008 hodinách v teplotní komoře. Následně se velikost smykové síly téměř u všech kombinací zlepšila. Jediná výjimka je kombinace C (80 – 155 – 260 – ROL1), zde smyková síla stále klesá. Z průměrných hodnot lze také usoudit, že kombinace s tavidlem REL1 mají vyšší průměrné hodnoty v čase 2016 hodin než kombinace s tavidlem ROL1. Pomocí t-testu

bylo provedeno statistické porovnání smykové síly kombinací po čase stárnutí 2016 hodin, kde je stejný pájecí profil, ale jiné tavidlo. U třech kombinací ze čtyř byl zjištěn statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 95 %. Jediná kombinace, ve které není statisticky významný rozdíl, je kombinace A (130 – 205 – 250 – ROL1) a E (130 – 205 – 250 – REL1). Tyto dvě kombinace mají nejvyšší teplotu v první a druhé zóně pájecí pece ze všech zkoumaných kombinací.

I u mechanických zkoušek při teplotě stárnutí 150 °C byl pozorován rozdíl mezi kombinacemi s různými tavidly. I zde se potvrdilo, že větší mechanickou pevnost mají spoje s tavidlem REL1. Pravděpodobně je to způsobeno menším výskytem voidů u tohoto tavidla.

5 Závěr

Diplomová práce se zabývala vlivem tavidla na růst intermetalických vrstev. V teoretické části byly uvedeny základní informace ohledně pájení a kvality pájených spojů. Také byla provedena rešerše na téma pájecí slitiny a tavidla. Následoval popis vybraných způsobů pájení přetavením a byly uvedeny metody pro testování kvality pájených spojů při dlouhodobém stárnutí. Na závěr teoretické části byla vypracována rešerše v oblasti intermetalických vrstev mezi pájkou a pájeným substrátem.

V praktické části se zjišťoval vliv tavidla na růst intermetalických vrstev. Byla provedena měření elektrického odporu a smykové síly pro všechny časy stárnutí u teplot 85 °C a 125 °C. U teploty stárnutí 150 °C byly poslední změřené hodnoty po 2016 hodinách. Vzorky po 3024 hodin budou dostupné až po termínu odevzdání diplomové práce. Měření po 3024 hodinách nebylo možné uskutečnit z důvodu využití jen dvou teplotních komor a nastavení nejvyšší teploty až po ukončení stárnutí při nižších teplotách.

Z výsledků tloušťek intermetalických vrstev plyne, že se zvyšující se teplotou v klimatických komorách dochází k většímu růstu intermetalických vrstev. Ze změřených hodnot aktivační energie lze prohlásit, že změna tavidla z ROL1 za tavidlo REL1 způsobila lepší vlastnosti ohledně růstu IMC. Z výzkumu vlivu pájecího procesu bylo zjištěno, že pro obě tavidla je nejlepší teplotní profil 80 °C – 155 °C – 260 °C. Při tomto teplotním profilu vznikl pájený spoj, který byl schopen nejlépe odolat růstu IMC. Při zvýšení nebo snížení teplotního profilu dochází k poklesu aktivační energie, pro uvedený profil je hodnota aktivační energie největší u obou tavidel. Z toho tedy plyne, že vliv pájecího procesu nelze zanedbat, hraje důležitou roli vzhledem k tloušťkám intermetalických vrstev. Větší vliv teplotního profilu lze pozorovat u tavidla REL1, protože je zde větší rozptyl hodnot aktivační energie. Při dalším možném rozšíření tohoto experimentu by bylo vhodné provést dlouhodobé stárnutí ještě u vyšších teplot například 175 °C.

Z naměřených hodnot elektrického odporu při dlouhodobém stárnutí při třech různých teplotách bylo zjištěno, že vliv tavidla i pájecího procesu je velmi malý. U některých teplot byly zjištěny statisticky významné rozdíly, v praxi by tyto změny neměly zásadní vliv na kvalitu pájených spojů.

Jiná situace ale nastala u měření smykové síly. Zde se projevil více vliv tavidla než vliv pájecího profilu. Z výsledků této práce vychází, že pájecí slitina s tavidlem REL1 vychází lépe po uplynutí 3024 hodin. Jak již bylo zmíněno v diskusi, u slitiny s tavidlem REL1 pravděpodobně dochází k menšímu výskytu voidů v pájeném spoji. Pro potvrzení, že u slitiny s tavidlem ROL1 vzniká větší množství voidů, by bylo vhodné provést výzkum právě v této oblasti. Zajímavý by byl další experiment zaměřený na růst intermetalické vrstvy, která se nachází mezi pájkou a pájenou součástí jak z pohledu intermetalických vrstev, tak i z pohledu mechanických vlastností.

V budoucnu by bylo zajímavé provést další testy s organickými a anorganickými tavidly. Tavidla, která zde byla uvažována, mají nízkou úroveň aktivace. Nabízí se výzkum v oblasti tavidel s vyšší úrovní aktivace.

6 Použité zdroje

- [1] KAHLE, Petr a STARÝ, JIŘÍ. *Plošné spoje a povrchová montáž*. B.m.: Vysoké učení technické v Brně. 2011
- [2] WU, C. M. L., D. Q. YU, C. M. T. LAW a L. WANG. Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions. *Materials Science and Engineering: R: Reports* [online]. 2004, **44**(1), 1–44 [vid. 2021-11-26]. ISSN 0927-796X. Dostupné z: doi:10.1016/j.mser.2004.01.001
- [3] ABTEW, Mulugeta a Guna SELVADURAY. Lead-free Solders in Microelectronics. *Materials Science and Engineering: R: Reports* [online]. 2000, **27**(5), 95–141 [vid. 2021-11-26]. ISSN 0927-796X. Dostupné z: doi:10.1016/S0927-796X(00)00010-3
- [4] OLOFINJANA, Ayodele, Rezwanul HAQUE, Mashdalina MATHIR a Nyuk.Yoog. VOO. Studies of the solidification characteristics in Sn-Ag-Cu-Bi solder alloys. *Procedia Manufacturing* [online]. 2019, **30**, Digital Manufacturing Transforming Industry Towards Sustainable Growth, 596–603 [vid. 2021-11-26]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2019.02.084
- [5] REN, Jing, Mingliang HUANG a Xudong YANG. Effect of Ag element on microstructure and mechanical properties of Sn-Bi-xAg solders designed by cluster-plus-glue-atom model. *2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)* [online]. 2018, **2018**, 265–269. Dostupné z: doi:10.1109/ICEPT.2018.8480522
- [6] VESELÝ, Petr a Martin KOZÁK. Accelerated Aging of Bismuth-Tin Solder Joints on Various Substrates. In: *2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* [online]. 2020, s. 1–6. ISSN 2161-2536. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE49702.2020.9120870
- [7] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Pardubice: ABE. TEC, 2005. ISBN 978-80-903597-0-3.
- [8] PIETRIKOVÁ, Alena, Juraj ĎURIŠIN a Pavel MACH. *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. 1. vyd. B.m.: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010.
- [9] ABEL, Martin. *SMT - technologie povrchové montáže*. Pardubice: Platan, 2000. ISBN 978-80-902733-1-3.
- [10] *IPC J-STD-004B with Amendment 1 – Requirements for Soldering Fluxes*. IPC, USA. 2011. 2011
- [11] *SMT Reflow Soldering Temperature Curve* [online]. [vid. 2021-10-17]. Dostupné z: <https://www.nexpcb.com/blog/smt-reflow-soldering-temperature-curve>

- [12] FROŠ, Denis. *Termomechanické zkoušky pájecích plošek* [online]. Fakulta elektrotechnická, 2019 [vid. 2021-10-18]. Diplomová práce. ČVUT. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/82538>
- [13] TAO, Bo, Yiping WU, Han DING a Y. L. XIONG. A quantitative method of reliability estimation for surface mount solder joints based on heating factor $Q\eta$. *Microelectronics Reliability* [online]. 2006, **46**(5), 864–872 [vid. 2021-10-18]. ISSN 0026-2714. Dostupné z: doi:10.1016/j.microrel.2005.04.013
- [14] KATEDRA FYZIKY. *MĚŘENÍ MALÝCH ODPORŮ ČTYŘVODIČOVOU METODOU* [online]. B.m.: Katedra fyziky, Fyzikální praktikum 3 (FP3B). 2013. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiL0LrRoPD2AhXTuKQKH5AMkQFnoECAUQAQ&url=https%3A%2F%2Fnanoed.tul.cz%2Fmod%2Fresource%2Fview.php%3Fid%3D1907&usg=AOvVaw2tLD4yrLdP_9CShmFpWk00
- [15] *ČSN EN 62137-1-1 Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje - Část 1-1: Zkouška odolnosti proti odtržení*. Praha: Český normalizační institut. 2008.
- [16] *ČSN EN 62137-1-2 Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje - Část 1-2: Zkouška pevnosti ve smyku*. Praha: Český normalizační institut. 2008.
- [17] PROF. DR. EMEL TABAN. *METALLOGRAPHIC SAMPLE PREPARATION TECHNIQUES* [online]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjc3Pnai6X0AhWMzaQKHZxGBgsQFnoECAMQAQ&url=http%3A%2F%2Fmakina.kocaeli.edu.tr%2Fupload%2Fduyurular%2F%2F18041908150518d73.pdf&usg=AOvVaw38eJaLES2uL3vf96wPS-20>
- [18] KOPECKÁ, Jitka a Petra ŠALAMÚNOVÁ. *Elektronová mikroskopie* [online]. [vid. 2021-11-28]. Dostupné z: http://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/0060~~c_WNDwtRSE3JLAEA.pdf
- [19] NISHIKAWA, Hiroshi a Noriya IWATA. Formation and growth of intermetallic compound layers at the interface during laser soldering using Sn–Ag Cu solder on a Cu Pad. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2015, **215**, 6–11 [vid. 2021-10-28]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.08.007
- [20] DOC. ING. IVAN SZENDIUCH, CSC. *PÁJENÍ A BEZOLOVNATÉ PÁJKY* [online]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [21] SUN, Lei, Liang ZHANG, Su-juan ZHONG, Jia MA a Li BAO. Reliability study of industry Sn3.0Ag0.5Cu/Cu lead-free soldered joints in electronic packaging. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [online]. 2015, **26**(11). ISSN 0957-4522. Dostupné z: doi:10.1007/s10854-015-3606-y

- [22] SHARMA, Ashutosh, Santosh KUMAR, Do-Hyun JUNG a Jae Pil JUNG. Effect of high temperature high humidity and thermal shock test on interfacial intermetallic compounds (IMCs) growth of low alpha solders. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [online]. 2017, **28**(11), 8116–8129 [vid. 2022-05-15]. ISSN 1573-482X. Dostupné z: doi:10.1007/s10854-017-6518-1
- [23] LIN, Ke, Huiqin LING, Anmin HU, Yunwen WU, Liming GAO, Tao HANG a Ming LI. Growth behavior and formation mechanism of porous Cu₃Sn in Cu/Sn solder system. *Materials Characterization* [online]. 2021, **178**, 111271 [vid. 2022-03-28]. ISSN 1044-5803. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchar.2021.111271
- [24] ING. WIRTH, Václav. *VLIV INTERMETALICKÝCH SLOUČENIN NA KVALITU BEZOLOV Natého PÁJENÉHO SPOJE*. B.m., nedatováno. Dizertační práce. ZCU.
- [25] VESELÝ, Petr. *Vliv tavidla na kvalitu povrchové montáže*. B.m., 2021. Dizertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- [26] MA, Hongtao, Jeffrey C. SUHLING, Yifei ZHANG, Pradeep LALL a Michael J. BOZACK. The Influence of Elevated Temperature Aging on Reliability of Lead Free Solder Joints. *2007 Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference* [online]. 2007, 653–668 [vid. 2022-03-29]. ISSN 2377-5726. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2007.373867
- [27] JIANBIAO, Pan, Chou TZU-CHIEN, Dennis WILLIE a Brian J. TOLENO. Effects of reflow profile and thermal conditioning on intermetallic compound thickness for SnAgCu soldered joints [online]. 2009, **21**(4), 32–37 [vid. 2022-04-10]. ISSN 0954-0911. Dostupné z: doi:10.1108/09540910910989411
- [28] *Trhacka.cz - DEFORM 02 - univerzální deformační zkušební zařízení, trhačka* [online]. [vid. 2021-11-28]. Dostupné z: <http://www.trhacka.cz/>
- [29] SERBULOVA, Kateryna a Youry VOUNTESMERY. Simulation of the Sample Overheat for the Four Point Semiconductor Resistivity Measurement. In: *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* [online]. 2019, s. 369–374. ISBN 978-1-72812-065-2. Dostupné z: doi:10.1109/ELNANO.2019.8783837
- [30] KRAMMER, Oliver, Tamás HURTONY a Áron HADARITS. Investigating the activation energy of intermetallic layer growth in SAC305 and Innolot alloys. In: *2017 IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME): 2017 IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)* [online]. 2017, s. 73–77. ISBN 978-1-5386-1626-0. Dostupné z: doi:10.1109/SIITME.2017.8259860
- [31] ZAIMI, Nur Syahirah Mohamad, Mohd Arif Anuar Mohd SALLEH, Andrei Victor SANDU, Mohd Mustafa Al Bakri ABDULLAH, Norainiza SAUD, Shayfull Zamree Abd RAHIM, Petrica VIZUREANU, Rita Mohd SAID a Mohd

Izrul Izwan RAMLI. Performance of Sn-3.0Ag-0.5Cu Composite Solder with Kaolin Geopolymer Ceramic Reinforcement on Microstructure and Mechanical Properties under Isothermal Ageing. *Materials* [online]. 2021, **14**(4), 776 [vid. 2022-05-17]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14040776

- [32] GU, Huandi. *INTERFACIAL REACTION OF SN-BASED SOLDER JOINT IN THE PACKAGE SYSTEM*. B.m.: THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON. 2014

Seznam tabulek

Tabulka 1: Dělení tavidel podle ČSN EN ISO 9454-1 [1]	18
Tabulka 2: IPC J-STD-004B [10].....	19
Tabulka 3: Standard JESD22-A-103C [8]	24
Tabulka 4: Vlastnosti Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn a Cu [24]	32
Tabulka 5: Přehled počtu vzorků pro kombinaci A	35
Tabulka 6: Přehled kombinací pro testování a jednotlivé teploty v zónách pájecí pece	36
Tabulka 7: Výsledky IMC pro všechny teploty	42
Tabulka 8: Aktivační energie pro všechny kombinace.....	46
Tabulka 9: Změřené hodnoty elektrického odporu pro všechny časy stárnutí při teplotě 85 °C	49
Tabulka 10: Změřené hodnoty smykové síly pro všechny časy stárnutí při teplotě 85 °C	50
Tabulka 11: Změřené hodnoty elektrického odporu pro všechny časy stárnutí při teplotě 125 °C	52
Tabulka 12: Změřené hodnoty smykové síly pro všechny časy stárnutí při teplotě 125 °C	54
Tabulka 13: Změřené hodnoty elektrického odporu pro všechny časy stárnutí při teplotě 150 °C	55
Tabulka 14: Změřené hodnoty smykové síly pro všechny časy stárnutí při teplotě 150 °C	57

Seznam grafů

Graf 1: Grafické znázornění závislosti Q_n na δ	34
Graf 2: Teplotní profily	37
Graf 3: Růst IMC při teplotě 85 °C	43
Graf 4: Růst IMC při teplotě 125 °C	44
Graf 5: Růst IMC při teplotě 150 °C	44
Graf 6: Závislost tloušťky IMC na druhé odmocnině času stárnutí pro kombinaci A....	45
Graf 7: Arrheniův graf pro kombinace A a E.....	46
Graf 8: Změna velikosti elektrického odporu pro různé kombinace pájecího profilu a tavidla při stárnutí v teplotní komoře při 85 °C.....	49
Graf 9: Změny velikosti smykové síly pro různé pájecí pasty a pro různá nastavení pájecí pece při stárnutí v teplotní komoře při 85 °C	51
Graf 10: Změna velikosti elektrického odporu pro různé kombinace pájecího profilu a tavidla při stárnutí v teplotní komoře při 125 °C.....	53
Graf 11: Změny průměrných hodnot smykové síly pro různé pájecí pasty a pro různá nastavení pájecí pece při stárnutí v teplotní komoře 125 °C.....	54
Graf 12: Změna velikosti elektrického odporu pro různé kombinace pájecího profilu a tavidla při stárnutí v teplotní komoře při 150 °C.....	56
Graf 13: Změny průměrných hodnot smykové síly pro různé pájecí pasty a pro různá nastavení pájecí pece při stárnutí v teplotní komoře 150 °C.....	57

Seznam obrázků

Obrázek 1: Faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje [1]	15
Obrázek 2: Příklad teplotního profilu s vyznačeným Heating factorem [13].....	23
Obrázek 3: Zkouška tahem [8].....	26
Obrázek 4: Nastavení trhací hlavy [17]	27
Obrázek 5: Způsoby odtržení součástky z DPS [18]	27
Obrázek 6: Jevy po dopadu elektronu na zkoumaný objekt [28]	29
Obrázek 7: Průřez části pájeného spoje s vyznačenou IMC [19]	30
Obrázek 8: Testovací deska v KiCAD.....	35
Obrázek 9: DPS s termočlánky	37
Obrázek 10: Trhačka DEFROM 02 [28]	38
Obrázek 11: Schéma čtyřbodové metody měření elektrického odporu	39
Obrázek 12: IMC z elektronového mikroskopu	40
Obrázek 13: Binární mapa	40
Obrázek 14: Intermetalická vrstva kombinace A po vytvoření pájeného spoje	47
Obrázek 15: Intermetalická vrstva kombinace C po vytvoření pájeného spoje	48