



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie

Studie růstu intermetalických vrstev

Study of intermetallic layers growth

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Bc. Jakub Slavata

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Slavata** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **466341**
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:

Studie růstu intermetalických vrstev

Název diplomové práce anglicky:

Study of intermetallic layers growth

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s pájenými spoji v elektrotechnice, intermetalickými vrstvami a s vlivy, které ovlivňují jejich tloušťku.
- 2) Připravte si sadu vzorků, u kterých budete sledovat změny tloušťky intermetalických vrstev s ohledem na použité materiály a stárnutí vzorků.
- 3) Výsledky experimentů vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] Alena Pietriková, Juraj Ďurišin, and Pavel Mach, Diagnostika a optimalizácia pou žitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **29.01.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.05.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/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 autora práce

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

V Praze dne _____

Podpis autora práce

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Karlovi Duškovi, Ph.D. za odborné a pedagogické vedení mé diplomové práce. Velké díky také patří panu Ing. Martinovi Plačkovi, Ph.D. za zhotovení výbrusů, na kterých stojí celá praktická část této práce. Dále bych chtěl poděkovat všem lidem, které jsem během měření potkával v laboratoři, za zpříjemnění pracovního prostředí v nelehké korona-virové situaci a mé rodině za podporu během celého studia na ČVUT.

V Praze dne _____

Podpis autora práce

Anotace

Cílem této diplomové práce je seznámení čtenáře s faktory, které ovlivňují růst tloušťky intermetalických vrstev (sloučenin) u pájených spojů. V teoretické části je popsáno měkké pájení a s ním spjaté faktory, jako jsou pájecí pasty a tavidla. V práci jsou dále popsány intermetalické vrstvy, jednotlivé faktory, které ovlivňují růst těchto vrstev, a způsob vyhodnocování jejich tloušťky. Praktická část se zabývá přípravou vzorků s pájenými spoji. Na těchto vzorcích je zkoumána tloušťka intermetalických vrstev s ohledem na použité materiály a zrychlené stárnutí vzorků. Závěr je věnován vyhodnocení a porovnání tlouštěk intermetalických vrstev u připravených vzorků.

Annotation

A goal of the diploma thesis is to introduce the reader to factors that affect the growth of intermetallic layers (compound) within soldered joints. The theoretical part of this thesis describes soft soldering and related factors such as solder pastes and fluxes. The theoretical part also describes intermetallic compounds, factors affecting their growth, and the method of assessment of their thickness. The practical part deals with the preparation of samples with soldered joints. These samples are used for studying the growth of intermetallic layers whose thickness depends on used materials and accelerated aging. The conclusion describes the assessment and comparison of the thickness of intermetallic layers of prepared samples.

Klíčová slova

měkké pájení, pájení přetavením, konvekční pájení, intermetalické vrstvy, intermetalické sloučeniny, tloušťka intermetalických vrstev, pájecí pasta, pájecí tavidla, výbrus, příčný řez desky plošných spojů, elektronová mikroskopie, stárnutí, difuze

Key words

soft soldering, reflow soldering, convection soldering, intermetallic compounds, intermetallic layers, thickness of the intermetallic layers, soldering pastes, soldering fluxes, cross-section of the printed circuit board, electron microscopy, aging, diffusion

Obsah

1	Úvod	8
2	Teoretická část	9
2.1	Měkké pájení	9
2.1.1	Pájení přetavením (reflow).....	10
2.1.2	Konvekční pájení	10
2.2	Pájecí pasty	11
2.3	Tavidla	12
2.3.1	Složení tavidel	12
2.3.2	Druhy tavidel	13
2.4	Intermetalické vrstvy (IMC)	14
2.4.1	Vznik IMC.....	15
2.4.2	Stárnutí IMC	16
2.5	Faktory ovlivňující tloušťku IMC	17
2.5.1	Vliv pájecích zrn a povrchové úpravy DPS.....	17
2.5.2	Vliv tavidel	17
2.5.3	Vliv pájecího profilu.....	18
2.5.4	Vliv provozní teploty (stárnutí).....	19
2.5.5	Vliv nepájivé masky a velikosti pájecí plošky.....	20
2.6	Vyhodnocování tloušťky IMC	20
2.7	Elektronová mikroskopie	21
2.7.1	Interakce elektronů s atomy zkoumaného materiálu	22
3	Praktická část	23
3.1	Příprava vzorků	23
3.1.1	Návrh DPS.....	23
3.1.2	Příprava pájecích past	24
3.1.3	Pájení.....	25
3.1.4	Stárnutí vzorků	27
3.1.5	Příprava výbrusů.....	27
3.1.6	Focení elektronovým mikroskopem.....	27
3.2	Zpracování dat	28
3.2.1	Materiálová analýza	28
3.2.2	Vyhodnocení snímků v programu NIS Elements	31
3.2.3	Vyhodnocení tloušťky IMC	34
3.2.4	Vliv velikosti pájecích plošek	36
3.2.5	Vliv váhového poměru tavidla.....	36
3.2.6	Vliv typu (agresivity) tavidla	41
3.2.7	Porovnání odchylek	44
3.2.8	Výpočet difuzních koeficientů	45
3.2.9	Vliv zrychleného stárnutí.....	49
4	Závěr	50

Seznam obrázků.....	52
Seznam tabulek	53
Seznam Grafů	54
Seznam zkratk.....	55
Citovaná literatura	56

1 Úvod

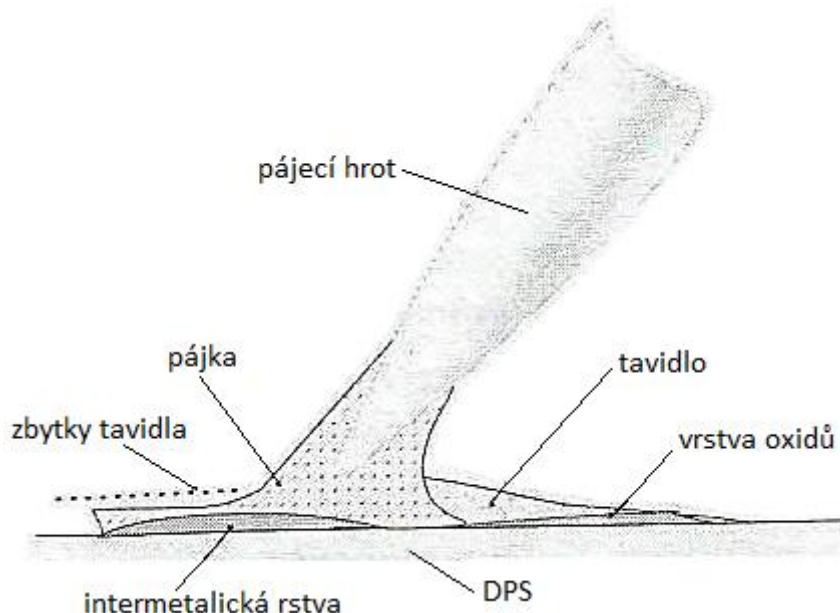
Mobilní telefony, počítače, televizory, pračky, řídicí jednotky atd. jsou elektrická zařízení skládající se z mnoha elektrotechnických komponent, které je nutno propojit elektricky vodivou cestou. K tomuto propojení se používají desky plošných spojů, ke kterým jsou jednotlivé komponenty přidělány, a to zejména pomocí pájených spojů. V elektrotechnickém průmyslu jsou tyto spoje velmi častým zdrojem poruch, a proto jsou na ně kladeny náročné požadavky z hlediska elektrické vodivosti a mechanické odolnosti. Jedním z nezanedbatelných faktorů, který ovlivňuje kvalitu pájeného spoje, je intermetalická vrstva, která je nezbytnou součástí každého pájeného spoje. Díky vzniku této vrstvy během procesu pájení může dojít ke spojení různých prvků kovového charakteru. V praxi to tedy znamená, že intermetalická vrstva vzniklá během procesu pájení zajišťuje elektromechanické propojení mezi pájecí ploškou a pájkou. Naopak nadměrný růst tloušťky této vrstvy způsobený nevhodnými technologiemi použitými během procesu pájení nebo stárnutím může vést k předčasnému selhání přístroje. Z tohoto důvodu je nutno klást důraz na použité pájecí pasty, povrchové úpravy desek plošných spojů (DPS) a teplotní profil použitý při pájení. Právě tyto faktory ovlivňují růst tloušťky intermetalických vrstev nejvíce.

2 Teoretická část

2.1 Měkké pájení

Měkkého pájení se využívá zejména v oblasti elektrotechnické montáže. Při tomto procesu dochází ke spojení kovových částí různých elektrotechnických komponent, přičemž vždy dochází ke spojení základního materiálu s materiálem přidaným. Ze základních materiálů jsou zhotoveny například pájecí plošky (vývody/kontakty) součástek a DPS. Jako přidaný materiál se volí pájka s vhodnými vlastnostmi. Pájka má většinou formu drátu navinutého na cívce, pájecí pasty nebo roztavené pájecí lázně. K elektricky vodivému spojení zmíněných pájecích plošek dojde pomocí přidaného materiálu (roztavené pájky) na rozhraní povrchů obou plošek. Atomy, které jsou na povrchu pájecích plošek (základních materiálů), se promísí s atomy roztavené pájky, čímž dochází ke vzniku intermetalické vrstvy. Takto vzniklé vrstvy spolu s pájkou zajišťují elektromechanický spoj mezi pájecími ploškami obou komponent. [1]

Měkké pájení se vyznačuje tím, že teploty během tohoto procesu nepřekračují 450 °C a dochází pouze k přetavení přidaného materiálu. Z toho vyplývá, že základní materiál musí být zhotoven z kovu, jehož teplota tavení je vyšší než použitá teplota při pájení. Samotný proces pájení lze realizovat mnoha způsoby. Mezi základní strojní technologie měkkého pájení patří pájení vlnou a přetavením. V případě pájení vlnou je jedna strana DPS smáčena v roztavené pájce, která může být pomocí trysky vytvarována do tvaru vlny. V případě pájení přetavením se pájka ve formě pasty nanese na plošky určené k pájení a poté dojde k přetavení. Dalším způsobem pájení je ruční pájení, při kterém nahřejeme pájecí plošku hrotem páječky a poté do spoje přidáme pájku ve formě trubičkového drátu. [1]



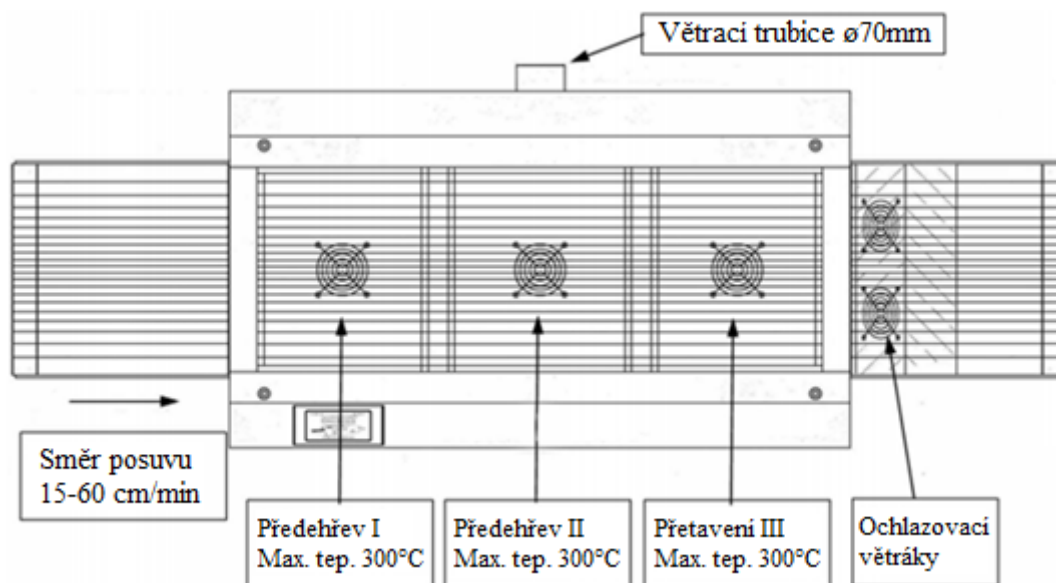
Obrázek 1 Ruční pájení [1]

2.1.1 Pájení přetavením (reflow)

Tento typ pájení je velice rozšířený hromadný způsob pájení vhodný v aplikacích, kde je vysoká pravděpodobnost vzniku můstků mezi vývody sousedních součástek. Na rozdíl od pájení vlnou se zde pájecí pasta nanese přímo na pájecí plošku ve formě pasty, která je poté přetavena přivedením tepla. V případě použití technologií SMT, nebo THT s osazením DPS z obou stran, nejsou součástky smáčeny v roztavené pájce. Díky tomu lze pájet součástky, které nesnesou vysoké teploty. Teplo lze přivést k pájecí pastě jakýmkoliv způsobem, tzn. vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a zářením (radiací). V této práci bude použito pájení v konvekční peci, které bude dále popsáno. [1]

2.1.2 Konvekční pájení

Konvekční pájení je v sériové výrobě nejčastěji realizováno v tunelových pecích, které využívají pro přenos tepla zahřátý plyn (dusík nebo vzduch). Tunelová pec má více zón, přičemž každá může být ohřátá na jinou teplotu. To umožňuje nastavení různých teplotních profilů, díky čemuž lze docílit lepší kvality pájeného spoje. Plyn je v jednotlivých zónách ohříván například odporovým vinutím a poté je rozfoukán pomocí ventilátorů. Tím dojde k cirkulaci velkého objemu ohřátého plynu, který zajistí rychlý, rovnoměrný a účinný přenos tepla na desky plošných spojů. Posun desek plošných spojů skrz pec je zajištěn pomocí dopravníku, který nesmí bránit cirkulaci vzduchu. Výsledné teplo přenesené na desky plošných spojů lze tedy regulovat pomocí ohřevu, ventilátorů a rychlosti posuvu dopravníku. [1]



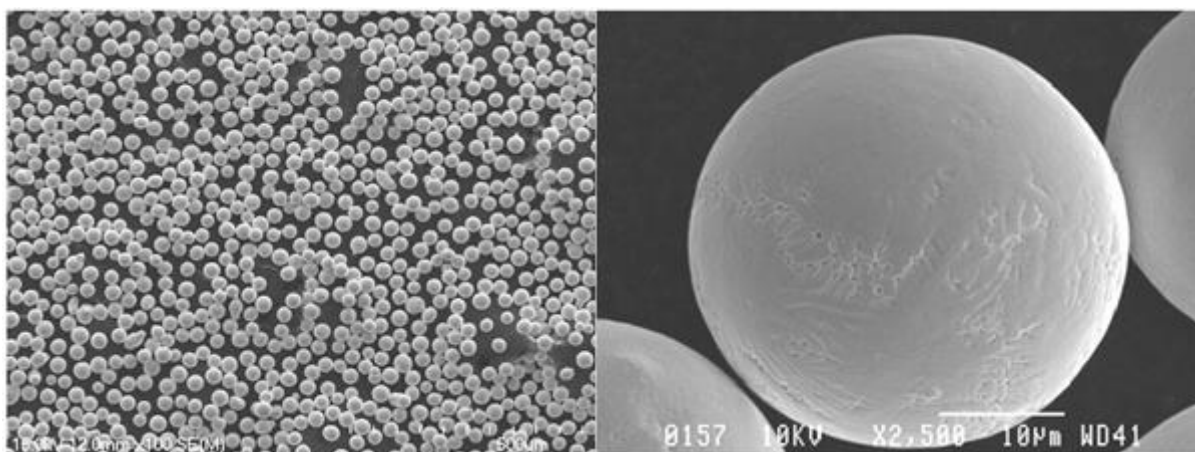
Obrázek 2 Nákres tří zónové tunelové pece Mistral 260 [2]

2.2 Pájecí pasty

Pájecí pasty se využívají při pájení přetavením a mají značnou výhodu v oblasti aplikace SMT. Pomocí disperzeru, sítotisku, nebo tiskem přes šablonu je možno pastu nanést přesně na plošky určené k pájení. Toho je využito zejména při pájení DPS s velkou hustotou osazení, kde jsou velmi malé rozteče mezi pájenými ploškami. Vhodná viskozita a lepivost pasty zajistí adhezivní přilnutí osazené součástky k DPS, díky čemuž není třeba používat lepidla jako je tomu u SMT pájení vlnou. Vhodná pasta se volí dle nároků kladených na pájený spoj a dle maximální teploty, kterou lze použít pro přetavení. Tato teplota je téměř vždy dána teplotním maximem, které vydrží součástky určené k pájení.

Pájecí pasty jsou tvořeny z kovových zrn a tavidla. Pájecí zrna mají většinou tvar kuliček o dané velikosti a jsou běžně dodávána ve formě prášku. V dnešní době jsou používány výhradně bezolovnaté pájecí pasty, jejichž pájecí zrna se skládají například ze slitin kovů Sn-Ag-Cu, Sn-Bi-Ag, Sn-Bi atd. Poměr a volba jednotlivých kovových prvků zrn udává zejména potřebnou teplotu pro přetavení a roztékavost kapalné fáze. Vzhledem k neustálému zmenšování součástek a zvyšování hustoty pájecích plošek na DPS je třeba brát ohled na velikost zrn. Pro běžné aplikace se používají zrna o velikosti několik desítek μm . Naopak pro velmi velkou hustotu osazení je zapotřebí použít co nejmenších zrn o velikosti v řádech jednotek μm . Mnoho malých zrn má ovšem větší celkový povrch než menší množství větších zrn, díky čemuž dochází při použití jemnějších zrn k větší oxidaci. [1] [3] [4]

Tavidla jsou v pastě ve formě lepivého gelu, který se důkladně smíchá spolu s pájecími zrny. V pájecí pastě se běžně vyskytuje v poměru 7 až 14 % tavidla ku celkové váze pasty. Tavidlo odstraňuje nečistoty a oxidy z pájecí plošky, čímž umožní roztavené pájce smočít povrch dané plošky. [1] [3] [4]

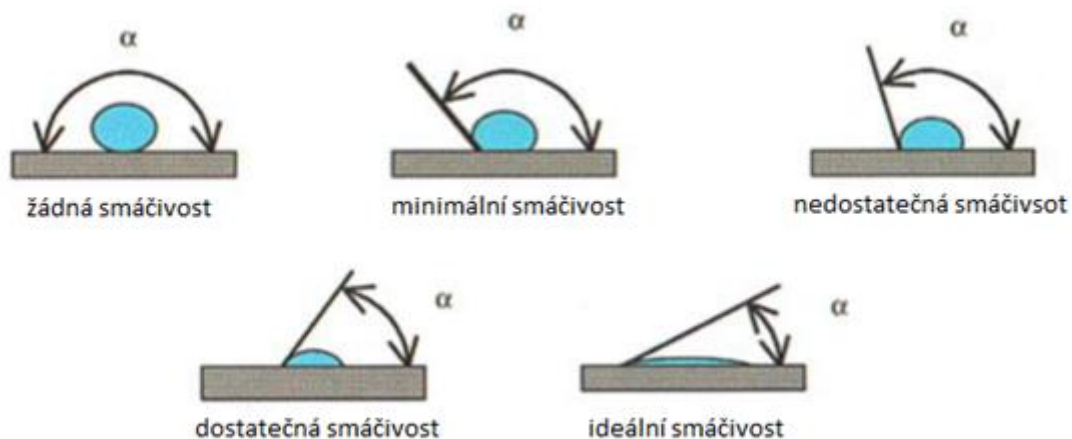


Obrázek 3 Pájecí zrna typu 4 (20–38 μm) [3] [4]

2.3 Tavidla

Používají se k odstranění povrchových nečistot a oxidů z ploch určených k pájení. Zároveň chrání kovové materiály před oxidací během samotného procesu pájení a podporují roztékavost pájky a smáčivost pájeného povrchu. V případě nepoužití tavidla zůstanou na pájeném povrchu oxidy, které sníží smáčivost pájecích ploch. Díky tomu může roztavená pájka zformovat kapku, která odteče mimo pájecí plochu. [1]

Tavidla se mohou vyskytovat v různých formách, v případě pájecích past je tavidlo (většinou ve formě gelu) smícháno přímo s kovovými zrny. Vlastnosti tavidla a jeho množství, které je přidáno k pájecím zrnům, udávají vlastnosti vzniklé pájecí pasty. V případě trubičkových pájek je tavidlo náplní trubičky. Tavidla lze také aplikovat formou roztoku, který je před pájením nanesen na pájecí plošku. Pevným příkladem tavidla je kalafuna (destilát z pryskyřice borovic), která je při pokojové teplotě v tuhé fázi. Kalafuna je za pokojové teploty netečná vůči kovům a má vysoký elektrický odpor. Od 120 °C je kapalná a při teplotách nad 200 °C rozrušuje tenké vrstvy oxidů. [1]



Obrázek 4 Úrovně smáčivosti při pájení [1]

2.3.1 Složení tavidel

Pojiva

Pojiva jsou netěkavé nebo pevné chemikálie odolné vůči vysokým teplotám, které mají vhodnou teplotu tavení a dobrou tepelnou vodivost. Slouží jako základní látka, která pojí ostatní složky tavidla. V pojivu jsou během pájení rozpuštěny oxidy odstraněné pomocí aktivátorů z pájecích ploch a produkty vzniklé při reakci aktivátorů s kovovou pájecí ploškou. Pojiva při roztavení zároveň vytvoří na kovovém povrchu ochrannou vrstvu, která zabraňuje oxidaci pájecích plošek a pájky. [5] [6]

Aktivátory

Aktivátory jsou chemikálie, které narušují a rozpouští oxidy na povrchu kovů. Zajišťují, že tavidlo začne plnit svoji funkci až při zvolených podmínkách. Dělí se na vysoce aktivní a mírné aktivátory. [5] [6]

Vysoce aktivní aktivátory

Použité chemické sloučeniny obsahují halogenidy kovů, které jsou korozivní i za pokojové teploty. V podstatě se jedná o agresivní kyseliny, které je nutno po pájení pečlivě odstranit, jinak začnou chemicky reagovat s pájenými spoji a urychlí jejich degradaci. [5] [6]

Mírně aktivní aktivátory

Reagují s oxidy pouze za zvýšené teploty, za běžných provozních podmínek by tedy měly být neagresivní. Obsahují minimální množství halogenidů a jsou vhodné pro no-clean tavidla, která není třeba omýt po pájecím procesu. [5] [6]

Rozpouštědla

Rozpouštědla se přidávají na pájecí plochy za účelem usnadnění zpracování a nanášení tavidla. Ideálně by se měla kompletně odpařit během fáze predehřátí (preheating). Neodpařené zbytky rozpouštědla mohou při procesu pájení začít vřít a mohou rozstříkat roztavenou pájku do okolí. [5] [6]

Aditiva

Aditiva jsou další přísady (chemikálie), které se přidávají do tavidla za účelem nastavení vhodných vlastností tavidla. Mezi tyto vlastnosti může patřit například odolnost vůči degradaci, viskozita, lepivost, anti korozivní účinky, barva atd.

2.3.2 Druhy tavidel

- **Organická:** Vznikají činností živých organismů.
- **Anorganická:** Pocházejí z neživé přírody (horniny a nerosty).
- **Resin (pryskyřice):** Tuhá, nebo velice viskózní látka získaná především z jehličnatých stromů nebo syntetickým způsobem.
- **Rosin:** Tuhá forma pryskyřice získána zahříváním čerstvé tekuté pryskyřice za účelem odpaření těkavých kapalných složek.

Parametry i kvalita přírodních tavidel na bázi pryskyřic mohou být závislé na geografickém podnebí a životní kondici daného stromu, což je nevhodné pro výboru tavidel o daných standardech. Z tohoto důvodu se v dnešní době využívá synteticky vytvořených pryskyřic, které mají požadované parametry.

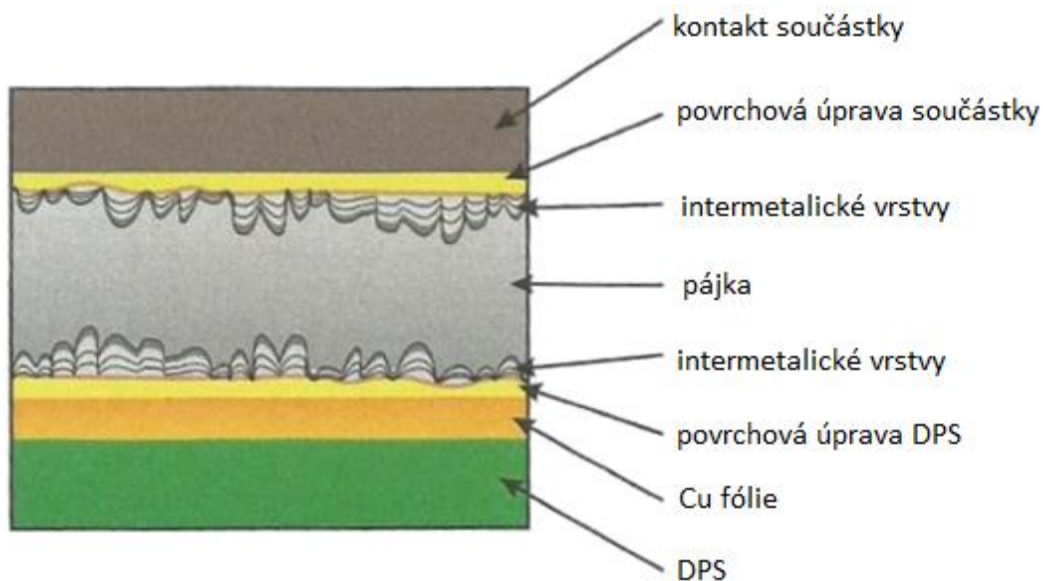
V tabulce 1 vidíme rozdělení tavidel dle složení a agresivity. Modrou barvou jsou zvýrazněny typy tavidel, které jsou použity v praktické části této práce.

Tabulka 1 Rozdělení tavidel [7]

Složení	Zbytková aktivita tavidla (agresivita)	Váhový obsah halogenidů [%]	Typ	Označení
Rosin (RO)	Nízká (Low)	<0,05 %	L0	ROLO
		<0,5 %	L1	ROL1
	Mírná (Minor)	<0,05 %	M0	ROM0
		0,5-2,0 %	M1	ROM1
	Vysoká (High)	<0,05 %	H0	ROH0
		>2,0 %	H1	ROH1
Resin (RE)	Nízká (Low)	<0,05 %	L0	RELO
		<0,5 %	L1	REL1
	Mírná (Minor)	<0,05 %	M0	REMO
		0,5-2,0 %	M1	REM1
	Vysoká (High)	<0,05 %	H0	REH0
		>2,0 %	H1	REH1
Organic (OR)	Nízká (Low)	<0,05 %	L0	ORLO
		<0,5 %	L1	ORL1
	Mírná (Minor)	<0,05 %	M0	ORM0
		0,5-2,0 %	M1	ORM1
	Vysoká (High)	<0,05 %	H0	ORH0
		>2,0 %	H1	ORH1
Inorganic (IN)	Nízká (Low)	<0,05 %	L0	INLO
		<0,5 %	L1	INL1
	Mírná (Minor)	<0,05 %	M0	INMO
		0,5-2,0 %	M1	INM1
	Vysoká (High)	<0,05 %	H0	INHO
		>2,0 %	H1	INH1

2.4 Intermetalické vrstvy (IMC)

Intermetalické vrstvy se nachází zejména na rozhraní pájky a pájecí plošky. Tyto vrstvy jsou nedílnou součástí každého pájeného spoje, neboť bez jejich vzniku není možné zhotovit kvalitní pájený spoj. Naopak při nadměrném růstu této vrstvy dochází ke zkřehnutí spoje. Intermetalické sloučeniny mají díky vyššímu řádu vazby (vyššímu počtu elektronových párů sdílenými mezi atomy), větší hustotě uspořádání atomů a většímu obsahu základního materiálu odlišnou krystalickou strukturu. Díky tomu jsou tvrdší a zároveň méně pružné než přidaný materiál. Intermetalické vrstvy by tedy měly být ideálně co nejtenčí a rovnoměrně rozložené po celé pájené ploše (rozhraní mezi pájecí ploškou a pájkou). [8]



Obrázek 5 Struktura pájeného spoje [1]

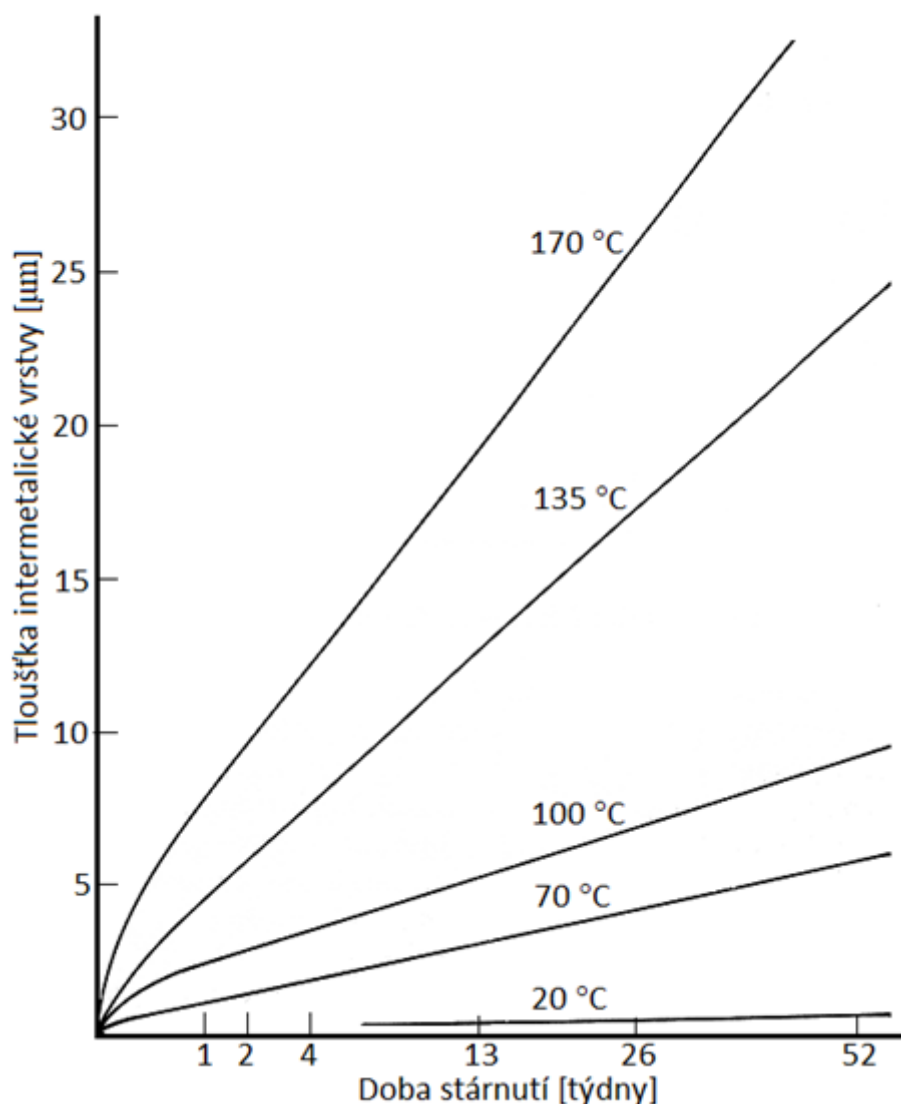
2.4.1 Vznik IMC

Intermetalické vrstvy jsou sloučeniny minimálně dvou různých kovových prvků. V případě přetavení a úplného promíchání obou kovových prvků by došlo ke vzniku slitiny. Během procesu měkkého pájení ovšem dochází pouze k přetavení pájky, díky čemuž vznikne intermetalická sloučenina pouze na rozhraní pájecí plošky a pájky, případně v objemu pájky. Vznik těchto sloučenin je podmíněn difuzí, tedy procesem samovolného rozptylování částic v prostoru. Difuze během procesu pájení je dána typem krystalové mřížky, jejími poruchami, nepravidelnostmi, dislokacemi a poloměrem velikosti atomů (menší atomy snadněji pronikají do struktury s většími atomy). Tyto „nedokonalosti“ ve struktuře materiálu mohou vzniknout například při samotné výrobě nebo při jeho opracování. [8] [9] [10] [11] [12]

Smočíme-li takto nedokonalý povrch pájecí plošky roztavenou pájkou, pak dojde k difuzi atomů pájky do plošky. Atomy pájky začnou zaplňovat volná místa v krystalické mřížce plošky, a naopak přebývající nebo uvolněné atomy pájecí plošky začnou být promíchávány s roztavenou pájkou. Dojde tedy k částečnému rozpouštění pájecí plošky v roztavené pájce. Proces růstu při pájení lze rozdělit na 2 kroky. V prvním kroku, kdy je pájka roztavena, IMC roste směrem do pájecí plošky. V kroku druhém pájka začne tuhnout, díky čemuž dojde k přesycení intermetalické vrstvy na rozhraní s pájecí ploškou a vrstva začne prorůstat hlouběji do pájky. Takto vzniklá IMC se skládá z více fází (vrstev) v závislosti na koncentraci. Proces difuze zahájený přetavením pájky téměř nikdy nekončí, neboť atomy ve vzniklé intermetalické vrstvě budou přecházet z prostředí s vyšší hustotou do prostředí s hustotou nižší, dokud nedojde k úplné rovnováze systému (stav s nejnižší vnitřní energií). [8] [9] [10] [11] [12]

2.4.2 Stárnutí IMC

Ke stárnutí IMC dochází již při pokojové teplotě a je to téměř nekonečný proces. Během tohoto procesu dochází k prorůstání (zvětšování) intermetalické vrstvy ve ztuhlém spoji. Vystavíme-li pájený spoj zvýšené teplotě, pak dojde k urychlení stárnutí. Při vyšší teplotě atomům v nerovnovážném systému poskytneme více tepla (energie) k tomu, aby se mohly snadněji rozptýlit uvnitř pájeného spoje. Intermetalické vrstvy jsou méně tvrdé (pevné) než základní materiál a zároveň jsou méně pružné než materiál přidaný. Tento fakt dělá z IMC největší slabinu v pájeném spoji. Příliš staré spoje jsou náchylné vůči vibracím a při namáhání mohou prasknout. Během růstu intermetalické vrstvy může zároveň docházet k pohlcení atomů pájecí plošky uvnitř pájky, na jejichž místě vznikne tzv. void neboli prázdné místo. Narůst množství takto vzniklých dutin zvyšuje elektrický odpor spoje. Z toho vyplývá, že stárnutí (nadměrný růst) IMC je nežádoucí jev. Na obrázku 6 lze vidět graf závislosti tloušťky IMC na době stárnutí. Rychlost stárnutí je závislá na teplotě a je dána strmostí křivky. Vystavíme-li pájené spoje teplotě vyšší, než je předpokládaná provozní teplota, pak se jedná o zrychlené stárnutí. [8] [9] [10] [11] [12]



Obrázek 6 Růst tloušťky IMC při různých teplotách v závislosti na čase [9]

2.5 Faktory ovlivňující tloušťku IMC

V následujících kapitolách jsou popsány základní faktory ovlivňující růst tloušťky intermetalických vrstev mezi pájecí ploškou a pájkou během procesu pájení a po pájení.

2.5.1 Vliv pájecích zrn a povrchové úpravy DPS

Slitiny pájecích zrn (Sn, Ag, Cu, Bi atd.) spolu s pájecí ploškou (Cu) nebo povrchovou úpravou pájecí plošky (Ni, Au, Ag), tvoří základ pro vznik intermetalických sloučenin. Chemické prvky použitých kovových materiálů tedy určují, jaké intermetalické sloučeniny mohou vzniknout na rozhraní pájecí plošky nebo v objemu pájky. Díky tomu lze zvolit například povrchovou úpravu, jejíž IMC bude narůstat pomaleji než IMC na měděném povrchu. Takováto povrchová úprava bude tvořit difuzní bariéru mezi pájecí ploškou a pájkou. Pomalejší stárnutí lze pozorovat například při poniklování. Povrchové úpravy DPS se zároveň provádějí za účelem ochrany pájecích ploch před oxidací a degradací během skladování nebo při vícenásobném teplotním cyklu. Vhodnou povrchovou úpravou lze také docílit větší rovinnosti povrchu. V tabulce 2 lze vidět možné kombinace atomů tvořící intermetalické sloučeniny. Cu_6Sn_5 je sloučenina obsahující přibližně 55 % mědi. Ag_3Sn , respektive Cu_3Sn jsou sloučeniny obsahující přibližně 75 % stříbra, respektive mědi. Vyšší obsah mědi znamená vyšší tvrdost a menší pružnost z čehož vyplývá, že vrstvy Cu_3Sn jsou více nežádoucí než Cu_6Sn_5 . IMC tvořené z Cu_3Sn lze očekávat přímo u měděné pájecí plošky, zatímco Cu_6Sn_5 lze očekávat až za vrstvou s větším obsahem mědi. V případě obsahu stříbra nebo mědi přímo v pájecí pastě lze očekávat tvorbu Ag_3Sn a Cu_3Sn přímo v objemu pájky. V tabulce lze zároveň vidět, že pájené spoje na měděném povrchu mají celkovou tloušťku IMC cca 4,4 až 5,7 μm po zrychleném stárnutí při teplotě 125 °C po dobu 1000 hodin. [8] [9] [10] [11] [12]

Tabulka 2 Druhy IMC na rozhraní pájecí plošky po pájení a zrychleném stárnutí 125 °C/1000 h [10]

Slitina pájky	IMC v pájce	IMC na Cu	Tloušťka [μm]		IMC na Ni	Tloušťka [μm]	
			Po pájení	Stárnutí		Po pájení	Stárnutí
Sn-Ag	Ag_3Sn	Cu_6Sn_5	0,5	2,7	Ni_3Sn_4	<0,5	2,1
	-	Cu_3Sn	-	2,7			
Sn-Cu	Cu_3Sn	Cu_6Sn_5	0,8	2,2	$(\text{CuNi})_6\text{Sn}_5$	0,6	1,2
	Cu_6Sn_5	Cu_3Sn	-	3,5	Ni_3Sn_4	-	1,9
Sn-Ag-Cu	Ag_3Sn	Cu_6Sn_5	0,8	2,2	$(\text{CuNi})_6\text{Sn}_5$	<0,5	2
	Cu_3Sn	Cu_3Sn	-	2,2			

2.5.2 Vliv tavidel

Použití tavidel je při pájení neodmyslitelné, jelikož bez odstranění oxidů z pájeného povrchu nedojde k řádnému smočení pájecí plochy roztavenou pájkou. Tím pádem nedojde ani k chemickému propojení struktury pájky a pájecí plošky (oxidy tvoří difuzní bariéru). Tavidla jsou různě agresivní, a tím i různě efektivní při odstraňování oxidů. Čím dříve a důkladněji jsou oxidy z pájeného povrchu odstraněny, tím déle budou při procesu pájení atomy roztavené pájky difundovat do pájecí plošky. Tavidla zároveň udávají viskozitu a přilnavost pájecích past k pájené ploše, a tím i tepelnou vodivost mezi pájecí ploškou a zrny obsaženými v pastě, které

je třeba přetavit. Tepelná vodivost je při pájení velmi důležitá, protože pájecí zrna jsou velmi malá (mají velmi malou plochu). V důsledku toho z okolí absorbují příliš málo tepla, aby mohla být přetavena za běžných pájecích teplot a rychlosti posuvu. Naopak plocha DPS je velká a dokáže absorbovat velké množství tepla, které je skrz pájecí plošku na DPS přiváděno do pájecí pasty. Rozdíly mezi jednotlivými typy tavidel lze v praxi kompenzovat vhodnou úpravou pájecího profilu.

2.5.3 Vliv pájecího profilu

Pro správné zacházení s pájecí pastou je třeba vycházet z informací uvedených v datasheetu k dané pájecí pastě. V datasheetu jsou běžně uvedeny následující informace:

- typ použitého tavidla a je-li nutno tavidlo po pájení odstranit,
- materiál zrn – typ pájecí slitiny,
- teplota tání pájecí slitiny, při které pasta přechází z tuhého do tekutého stavu,
- výsledky souborů testů např. na přítomnost halogenidů, koroze, viskozity pasty atd.,
- jak pastu správně nanést v případě strojního nanášení,
- jak pastu správně skladovat,
- doporučený pájecí profil.

Doporučený pájecí profil je udáván jako výchozí bod pro proces optimalizace pájecího profilu. Pájecí profil je udáván jako křivka závislosti teploty na čase. Na této křivce jsou vyznačeny jednotlivé části pájecího profilu, které jsou popsány níže. Zároveň jsou zde doporučené kroky pro pozměnění pájecího profilu, abychom se vyvarovali vzniku voidů, tombstoningu, případně nedostatečné smáčivosti pájky. [13]

Předehřev (preheat)

Předehřev je pozvolné ohřátí DPS tak, aby nedošlo k teplotnímu šoku a poškození (delaminaci) DPS. V tomto kroku dochází k aktivaci tavidla a odpařování rozpouštědla. Maximální oteplení je dáno dle použité DPS a součástek. [14]

Před-tavení (pre-flow)

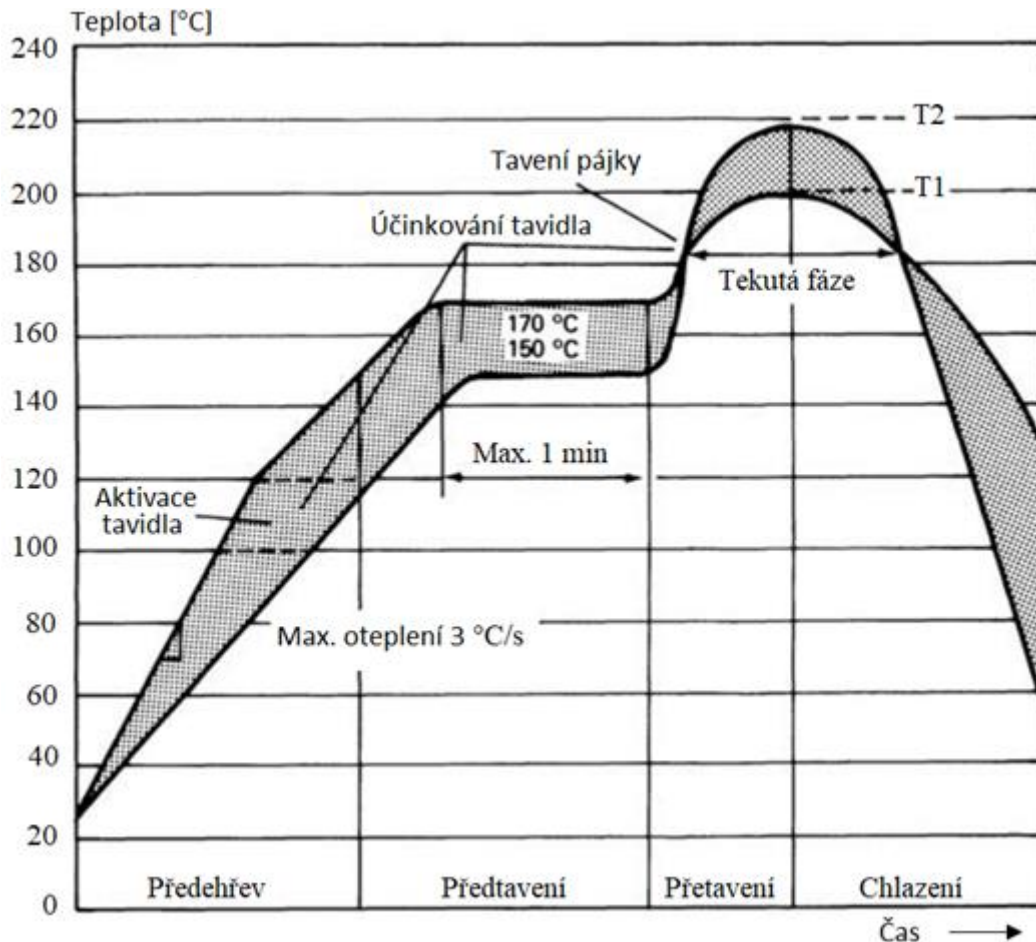
Tavidlo je plně aktivováno, aktivátory odstraňují oxidy a nečistoty z pájeného povrchu. Doba trvání a teplotu je nutno zvolit dle použitého tavidla. Od tohoto kroku je třeba vzít v úvahu vliv tavidla. [14]

Přetavení (reflow)

Pájka přechází do tekutého stavu, IMC začíná růst směrem do pájecí plošky. Teplota a doba přetavení je dána výrobcem pájecí pasty a závisí zejména na použitém mixu pájecích zrn. Ploše pod křivkou, která je dána teplotou a časem během přetavení, se říká heating-factor. Tato fáze musí být nastavena tak, aby došlo k přetavení pájky nanesené na všech pájecích ploškách určených k pájení. [14]

Chlazení (cooldown)

Při chlazení projde roztavená pájka skrz plastickou fázi do stavu tuhého a IMC začíná zrychleně růst směrem do pájky. V případě pomalého chlazení se dá tato fáze přirovnat ke krátkodobému zrychlenému stárnutí pájeného spoje. Naopak při rychlejší ochlazování, s ohledem na DPS a použité součástky, lze omezit růst tloušťky IMC po pájení. [14]



Obrázek 7 Teplotní profil při pájení přetavením [14]

2.5.4 Vliv provozní teploty (stárnutí)

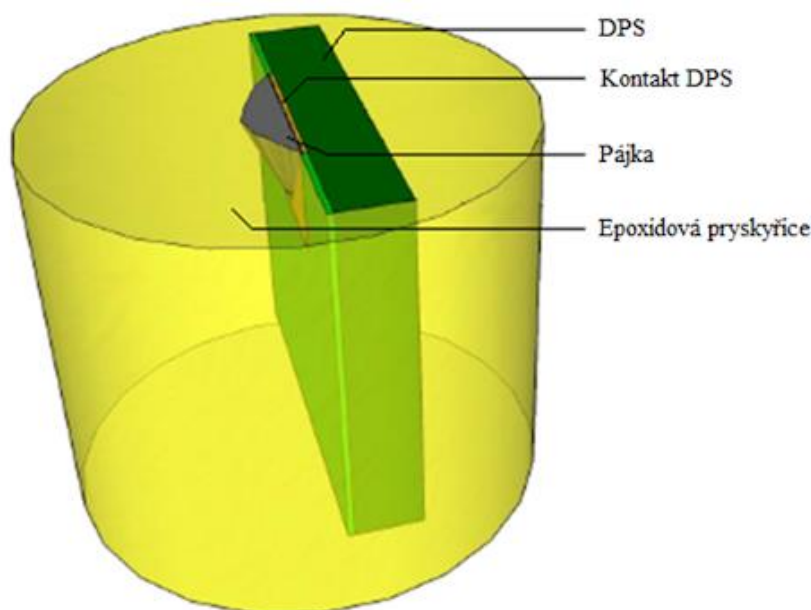
Provozní teplota elektrických zařízení je dána především ztrátami, teplotou okolí a chlazením daného zařízení. V důsledku zvýšené provozní teploty často dochází ke snížení účinnosti a zároveň k urychlení opotřebení zařízení. V případě pájených spojů slouží neodvětrané teplo jako energie pro rychlejší rozptýlení atomů uvnitř pájeného spoje. To způsobuje zrychlený růst IMC (stárnutí), což může vést ke zvýšení přechodového odporu, například v důsledku vzniku voidů, a k nárůstu přechodových ztrát. Při růstu IMC zároveň dochází ke tvrdnutí spoje, díky čemuž je spoj méně pružný, křehčí a náchylný na vibrace a další mechanické vlivy. [8]

2.5.5 Vliv nepájivé masky a velikosti pájecí plošky

Nepájivá maska, respektive její drsnost a velikost pájecí plošky, může ovlivnit množství tavidla, které se během pájení rozteče po okolí pájeného spoje. Nepájivá maska je pro roztavenou pájku nesmáčivá, čímž určuje oblast pájení, ale nebrání tavidlu, aby se rozteklo do okolí. Pokud se tavidlo nerozteče do okolí, pak oxidy odstraněné z povrchu pájecí plošky musí během pájení vystoupat skrz pájku na povrch pájeného spoje. Naopak pokud se tavidlo rozteče do okolí, pak s sebou odnese oxidy mimo pájený spoj. Velikost spoje by teoreticky mohla také ovlivnit množství tavidla, které unikne ze spoje do okolí.

2.6 Vyhodnocování tloušťky IMC

Aby bylo možné změřit tloušťku IMC daného pájeného spoje, je nejprve zapotřebí provést výbrus DPS. Výbrusy se provádějí tam, kde je třeba k zhodnocení kvality pohled na příčný řez daným materiálem. Při provedení příčného řezu se odkryjí jednotlivé vrstvy intermetalických sloučenin. Tímto způsobem lze také zkoumat například kvalitu pokovení, ochranných vrstev DPS, vrtaných otvorů, strukturu materiálu atd. V případě vyhodnocování tloušťky IMC je nutno provést řez materiálem DPS v místě pájecí plošky. Řez musí být přesný a musí být proveden pod úhlem 90° vůči ploše DPS, jinak by mohl být výsledný obraz průřezu zdeformovaný. Řez lze provést před zalitím do epoxidové, nebo akrylátové pryskyřice, nebo naopak až po zalití, což usnadní manipulaci s příliš malými vzorky DPS. Po provedení příčného řezu je třeba provést zabroušení. Pokud nebyl tenký vzorek DPS zalit do pryskyřice/akrylátu v předchozím kroku, je třeba tak učinit nyní, aby bylo možné provést kvalitní zabroušení bez otřepů. Broušení probíhá od nejhrubších brusných kotoučů směrem k nejjemnějším. Samotné vyhodnocení tloušťky IMC se provádí například pomocí elektronového mikroskopu, kterým lze zaznamenat velice detailní snímky jednotlivých vrstev DPS. Z takto pořízeného snímku s měřítkem lze odečíst tloušťku IMC. [8] [15]

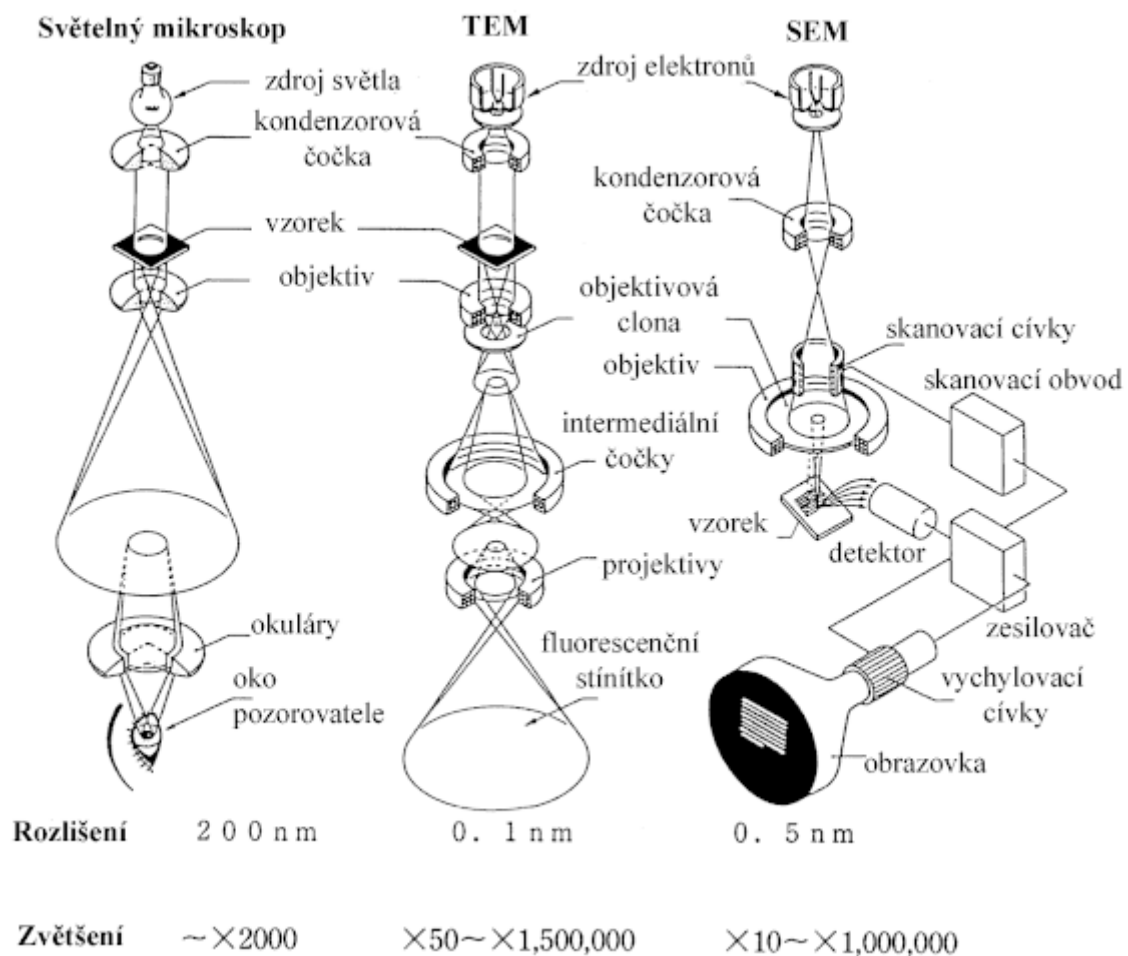


Obrázek 8 Ukázka výbrusu DPS zalité v pryskyřici [8]

2.7 Elektronová mikroskopie

Elektronový mikroskop na rozdíl od optického mikroskopu využívá namísto fotonů elektrony a místo optických čoček využívá čočky elektromagnetické. Elektromagnetické čočky jsou v podstatě vhodně vytvarované cívky, které vytvářejí magnetická pole o požadovaných vlastnostech a tvaru. V důsledku vhodného uspořádání elektromagnetických čoček lze elektrony zacílit do konkrétního bodu stejně jako je tomu u fotonů s optickými čočkami. Elektronové mikroskopy se dělí na dva typy, prvním je transmisní elektronový mikroskop (TEM) a druhým je skenovací elektronový mikroskop (SEM). [16]

Jak už název napovídá, v případě transmisního mikroskopu dochází k průchodu elektronů skrze strukturu pozorovaného materiálu, což umožňuje pozorování vnitřní struktury sledovaného objektu. Elektrony jsou poté zobrazeny na fluorescenčním stínítku. Naopak u skenovacího mikroskopu jsou elektrony odraženy nebo jsou při dopadu na povrch materiálu generovány sekundární elektrony a je pozorován povrch sledovaného objektu. Tyto elektrony jsou poté odsáty elektrickým polem mřížky kolektoru a dopadají na scintilátor, v němž vyvolají emisi fotonů. Fotony jsou převedeny na elektrický signál ve fotonásobiči. Sekundární elektrony jsou pomalé a musí být před dopadem na scintilátor urychleny, naopak odražené elektrony musí být zpomalovány. V daný moment lze tedy sledovat jen jeden typ elektronů. [16]



Obrázek 9 Složení elektronového a optického mikroskopu [16]

2.7.1 Interakce elektronů s atomy zkoumaného materiálu

Kolem atomového jádra se v orbitalech pohybují elektrony. Při ozáření zkoumaného materiálu dojde k interakci elektronů a k vyražení elektronu z orbitalu. Při této interakci elektronů a materiálu vzniká rentgenové záření, které má pro každý materiál svoji specifickou energii. Díky tomu lze pomocí elektronového mikroskopu provést materiálovou analýzu. Tuto analýzu lze provést například pro vybranou plochu nebo po přímce (line scan). Analýza dané plochy může být vhodná například pro ověření složení pájecí pasty. Line scan analýza může být vhodná pro zkoumání atomové koncentrace v závislosti na poloze na přímce. Ze závislosti atomových koncentrací jednotlivých prvků zapojených do procesu pájení na poloze lze provést průzkum atomárního složení intermetalické vrstvy mezi pájecí ploškou a pájkou.

3 Praktická část

Cílem praktické části je zhodnocení tloušťky intermetalické vrstvy u zhotovených vzorků v závislosti na druhu použitého tavidla, váhovém poměru tavidla ku celkové váze pájecí pasty a době stárnutí vzorků. Vzorkem se rozumí jedna DPS se třemi pájecími ploškami, na jejíž pájecí plošky byla nanесena a poté přetavena pájecí pasta. Jedná se tedy o zhodnocení tloušťky IMC, která vznikla během procesu pájení a po pájení mezi pájecí ploškou DPS a pájkou.

3.1 Příprava vzorků

Aby bylo možné zkoumat závislost tloušťky IMC na faktorech popsanych v teoretické části, bylo třeba vyrobit vzorky, z nichž byly zhotoveny výbrusy. Pro výrobu vzorků a zhotovení výbrusů bylo nutno provést následující kroky:

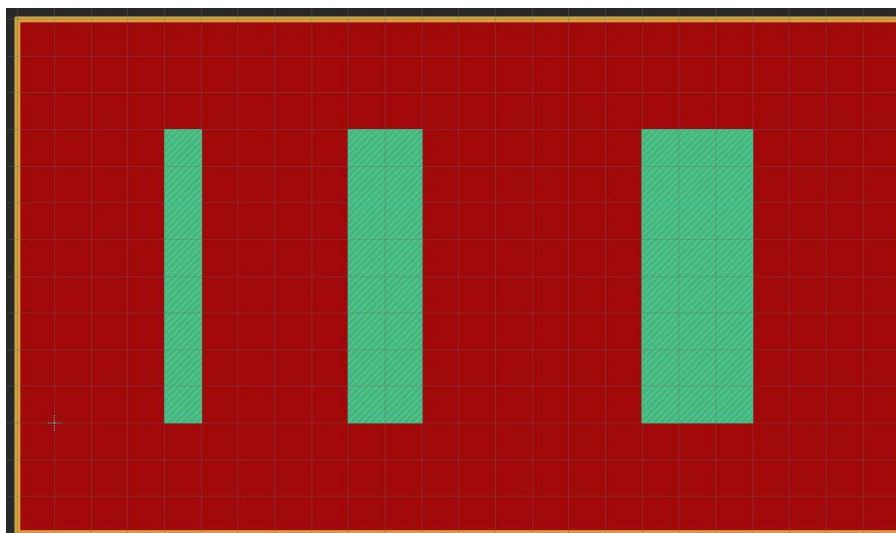
- navrhnout a nechat vyrobit desky plošných spojů (DPS),
- připravit pájecí pasty,
- nanést pájecí pastu na DPS,
- přetavit pájecí pastu při daném teplotním profilu,
- nechat vzorky stárnout v klimatické komoře a
- zhotovit výbrusy.

Tyto kroky jsou podrobně popsány v následujících kapitolách.

3.1.1 Návrh DPS

Prvotním krokem bylo navržení desek plošných spojů, které tvoří základ vzorků. DPS byly navrženy v programu Eagle a vyrobeny firmou PRINTED, která také zhotovila SMD šablonu potřebnou pro nanесení pájecích past na pájecí plošky DPS. Parametry navržené DPS jsou popsány níže, návrh DPS je vidět na obrázku 10.

- Rozměry jednoho vzorku: šířka 24,2 mm, výška 14,2 mm.
- Takovýchto vzorků bylo zhotoveno vždy 15 na jedné DPS, aby bylo možno nanést pájecí pastu na 15 vzorků najednou a poté je rozlámat na jednotlivé kusy.
- Tomu také odpovídají parametry šablony, jejíž perforace byla zvolena dle držáku, který máme k dispozici v laboratoři.
- DPS je jednovrstvá, bez nepájivé masky, s měděnými pájecími ploškami ošetřenými pomocí OSP zabraňující oxidaci při skladování.
- Velikost měděných pájecích plošek je 1 x 8 mm, 2 x 8 mm a 3 x 8 mm.



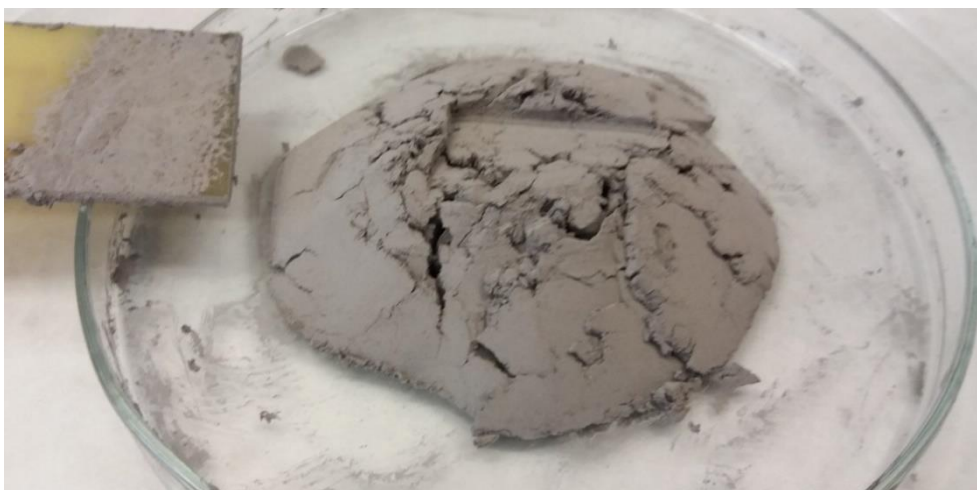
Obrázek 10 Náskres navržené DPS

3.1.2 Příprava pájecích past

Pájecí pasty byly připraveny důkladným smícháním pájecích kuliček Sn42/Bi57/Ag1, type 4 (38–20 μm) od firmy AIM spolu s gelovými tavidly NWS-4200-TF (ORM1), NWS-4200-LF-TF (ORH1), 4300/LF-4300-TF (RELO) a NC-559-ASM-TF (ROLO) od firmy AMTECH. Tavidla označena ORM1 a ORH1 jsou organická tavidla s vyšší agresivitou a větším váhovým obsahem halogenidů. ROLO a RELO jsou naopak méně agresivní tavidla s menším obsahem halogenidů, která jsou založena na bázi rosin a resin (pryskyřice). Teplota tání zhotovených pájecích past je dle datasheetu pro daná tavidla 138 °C. Základní parametry těchto tavidel jsou uvedeny v tabulce 3, podrobnější parametry lze dohledat na stránkách výrobce. Pro každý typ tavidla byly zhotoveny 4 pájecí pasty s váhovým poměrem tavidla ku celkové váze pájecí pasty 5, 10, 15 a 20 %. Dohromady tedy bylo připraveno 16 druhů pájecích past. Čím více tavidla bylo obsaženo v pájecí pastě, tím řidší pasta byla, což v pozdější fázi usnadnilo nanášení pasty na pájecí plošky. Zásadní rozdíl bylo možné pozorovat mezi pastou s váhovým obsahem tavidla 5 % a ostatními pastami. Pasta s obsahem tavidla 5 % nebyla prakticky vůbec roztíratelná a byla spíše sypká, naopak pasta s obsahem 20 % byla velmi řídká. Pasta s váhovým obsahem tavidla 10 % byla velmi hustá, ale roztíratelná. Na obrázcích 11 a 12 je patrný rozdíl v konzistenci mezi váhovými obsahy tavidla 5 % a 20 %. Takto zhotovené pájecí pasty byly poté skladovány v lednici v uzavřených injekčních stříkačkách.

Tabulka 3 Parametry použitých tavidel

Firma	Typ	Klasifikace	Očištění	Využití	
AMTECH	NWS-4200-TF	ORM1 >0,5 % & <2 %	water-washable	UNIVERSAL leaded & lead-free alloys	INCREASED ACTIVITY anti-oxidation
	NWS-4200-LF-TF	ORH1 >2 %			HIGH ACTIVITY anti-oxidation
	4300/LF-4300-TF	RELO <0,05 %			ULTRA-LOW VOIDING clear residue
	NC-559-ASM-TF	ROLO <0,05 %	no-clean	STANDARD leaded alloys	HIGH TEMP UV traceable



Obrázek 11 Pájecí pasta s váhovým obsahem tavidla 5 %



Obrázek 12 Pájecí pasta s váhovým obsahem tavidla 20 %

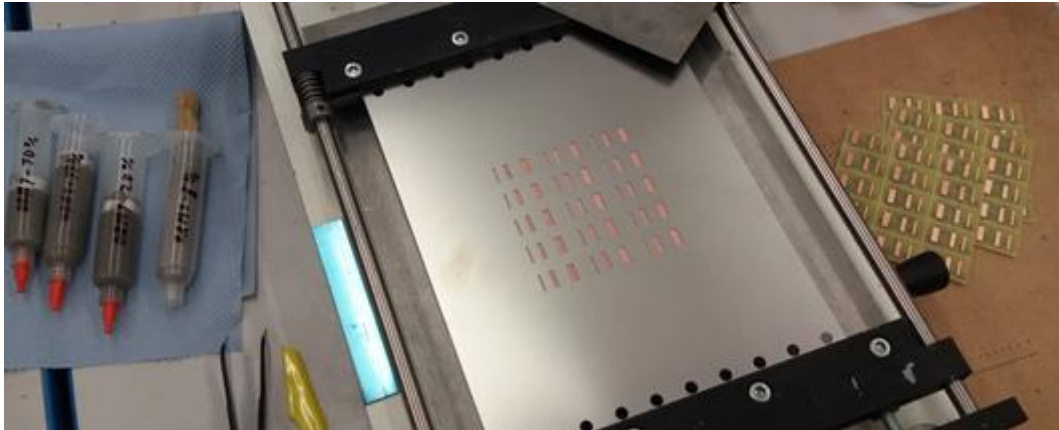
3.1.3 Pájení

Před samotným procesem pájení se pájecí pasty nejprve nanesly přes SMD šablonu na pájecí plošky DPS. Hned poté byly DPS vloženy do tří zónové tunelové pece Mistral 260 s pájecím profilem:

- předehřev 1: 100 °C,
- předehřev 2: 120 °C,
- přetavení: 175 °C,
- chlazení pomocí větráků,
- posuv: 15 cm/min.

Vzorky nebyly po pájení očištěny, tudíž na nich zůstaly zbytky tavidla a oxidů, které vyplavaly na povrch.

Během pájení nastal problém s pájecími pastami s váhovým poměrem tavidla 5 %. Pasta nanesená na DPS po průchodu tunelovou pecí nebyla přetavena. Proto byla DPS umístěna pod horkovzdušnou pájku, která zblízka foukala na jednu pájecí plošku vzduch ohřátý na 300 °C. Zhruba po minutě se začala pálit DPS, ale k přetavení pájecí pasty nedošlo. Po tomto pokusu byly pájecí pasty s poměrem 5 % váhového množství tavidla vyřazeny. Díky nevhodné konzistenci nebylo možné tyto pasty řádně nanést na pájecí plošky tak, aby teplo pohlcené DPS mohlo přejít skrz pájecí plošky do nanesené pasty. Pájecí pasty s obsahem tavidla 5 % tedy nebylo možné přetavit při stejných podmínkách jako ostatní pájecí pasty. Takto zhotovené vzorky by tudíž nebylo možné porovnat s ostatními vzorky.

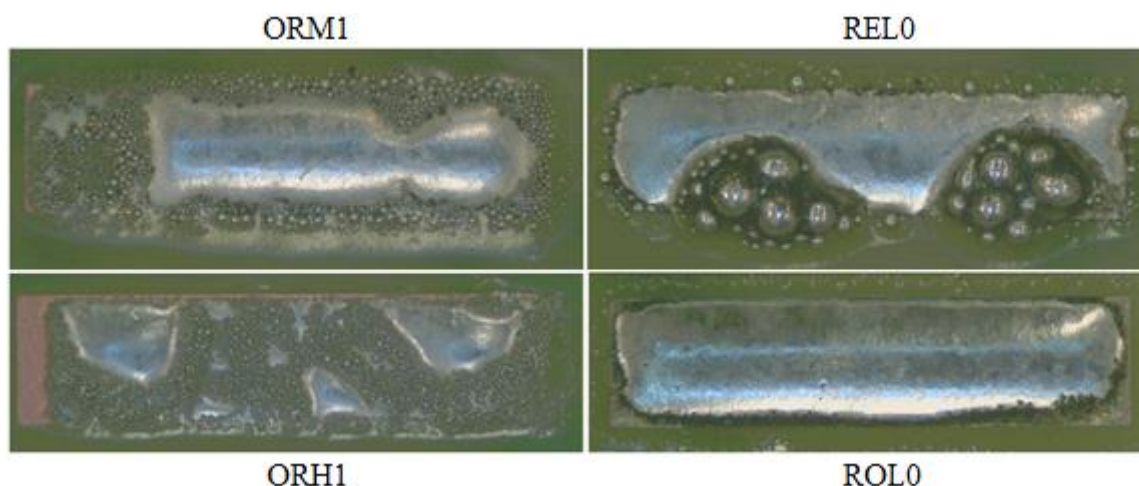


Obrázek 13 SMD šablona



Obrázek 14 Ilustrační fotka tunelové pece Mistral 260 [1]

Na obrázku 15 jsou fotografie neočištěných pájených spojů s váhovým obsahem tavidla v pájecí pastě 10 %. Na levé polovině jsou vidět spoje s agresivnějšími tavidly klasifikovanými jako ORM1 a ORH1, na pravé polovině lze vidět spoje s méně agresivními tavidly klasifikovanými jako REL0 a ROL0. Na všech fotografiích je patrné, že tavidlo splnilo svojí funkci. Povrch pájecích plošek byl zbaven oxidů, které během pájení vyplavaly na povrch a vytvořily bublinky. Všechny 4 spoje mají ideální smáčivost.



Obrázek 15 Pájené spoje s 10 % tavidla

3.1.4 Stárnutí vzorků

Vyrobené vzorky byly poté rozděleny dle doby stárnutí do pěti skupin (0, 250, 500, 750 a 1000 hodin). Kvůli zimním prázdninám a zkouškám byly všechny vzorky uskladněny přibližně po dobu 40 dní v papírové krabici v laboratoři při okolní teplotě cca 22 °C. Poté byly vzorky se stárnutím 0 hodin (tzn. bez zrychleného stárnutí) poslány na zhotovení výbrusů a ostatní vzorky byly vloženy do pece, ve které zrychleně stárnuly při teplotě 120 °C.

3.1.5 Příprava výbrusů

Jednotlivé vzorky byly vloženy do nádoby, zality pryskyřicí a po ztuhnutí skrz pájecí plošky přeříznuty kotoučovou pilou. K zalití byla použita pryskyřice s obsahem uhlíku, díky kterému jsou výbrusy vodivé a v elektronovém mikroskopu nepůsobí jako dielektrikum. Na povrchu výbrusu se tedy nemůže hromadit náboj, který by mohl rušit obraz. Takto zalité vzorky byly následně broušeny pomocí brusných papírů ve tvaru kotouče. Po vybroušení se provedlo leštění pomocí speciálních kotoučů a emulze s diamantovými částicemi.

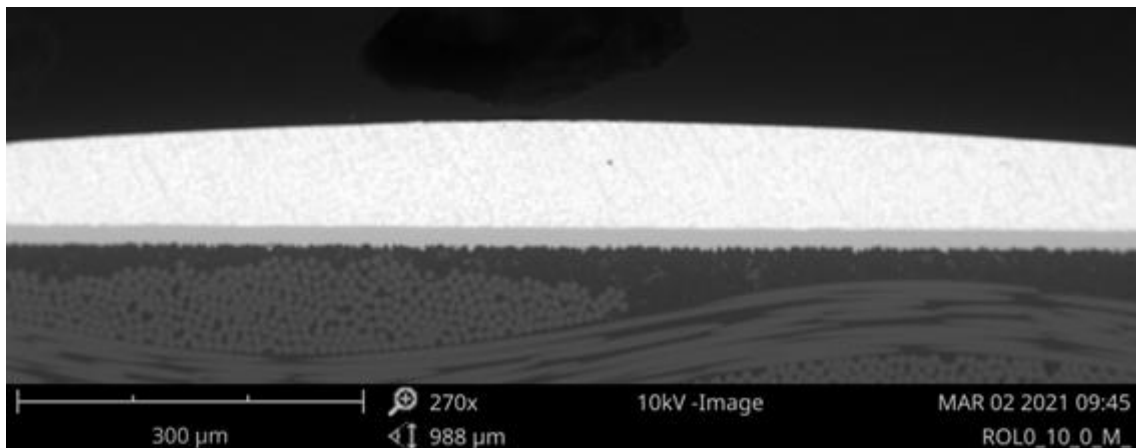
3.1.6 Focení elektronovým mikroskopem

Posledním laboratorním úkonem bylo pořízení dostatečně kvalitních snímků intermetalické vrstvy na rozhraní měděné pájecí plošky a pájky. Každý výbrus byl nejprve očištěn izopropylalkoholem a poté ofoukán tlakovou pistolí s dusíkem. Výbrus byl vložen do elektricky vodivého držáku, který byl zasunut do stolního elektronového mikroskopu Phenom ProX od firmy Thermo Scientific. Mikroskop nejprve nabídl náhled skrz běžnou optickou kameru, při přepnutí do elektronového módu držák vyjel do vakuové komory a obraz se přepnul. Snímky pro měření tloušťky IMC byly pořízeny s běžnou kvalitou (Image) při napětí 10 kV s přiblížením 10 000x, přičemž jas a kontrast byly nastaveny tak, aby měděná podložka byla tmavě šedivá až černá a pájka světle šedivá. Dodatečně byly pořízeny 3 snímky při napětí 15 kV s vysokou kvalitou (Map), ze kterých byla zhotovena materiálová analýza.

V tomto kroku byly vyřazeny úzké pájecí plošky s šířkou 1 mm, protože na některých výbrusech nebyly téměř vidět.



Obrázek 16 Držák na výbrusy elektronového mikroskopu



Obrázek 17 Pájený spoj s přiblížením 270x

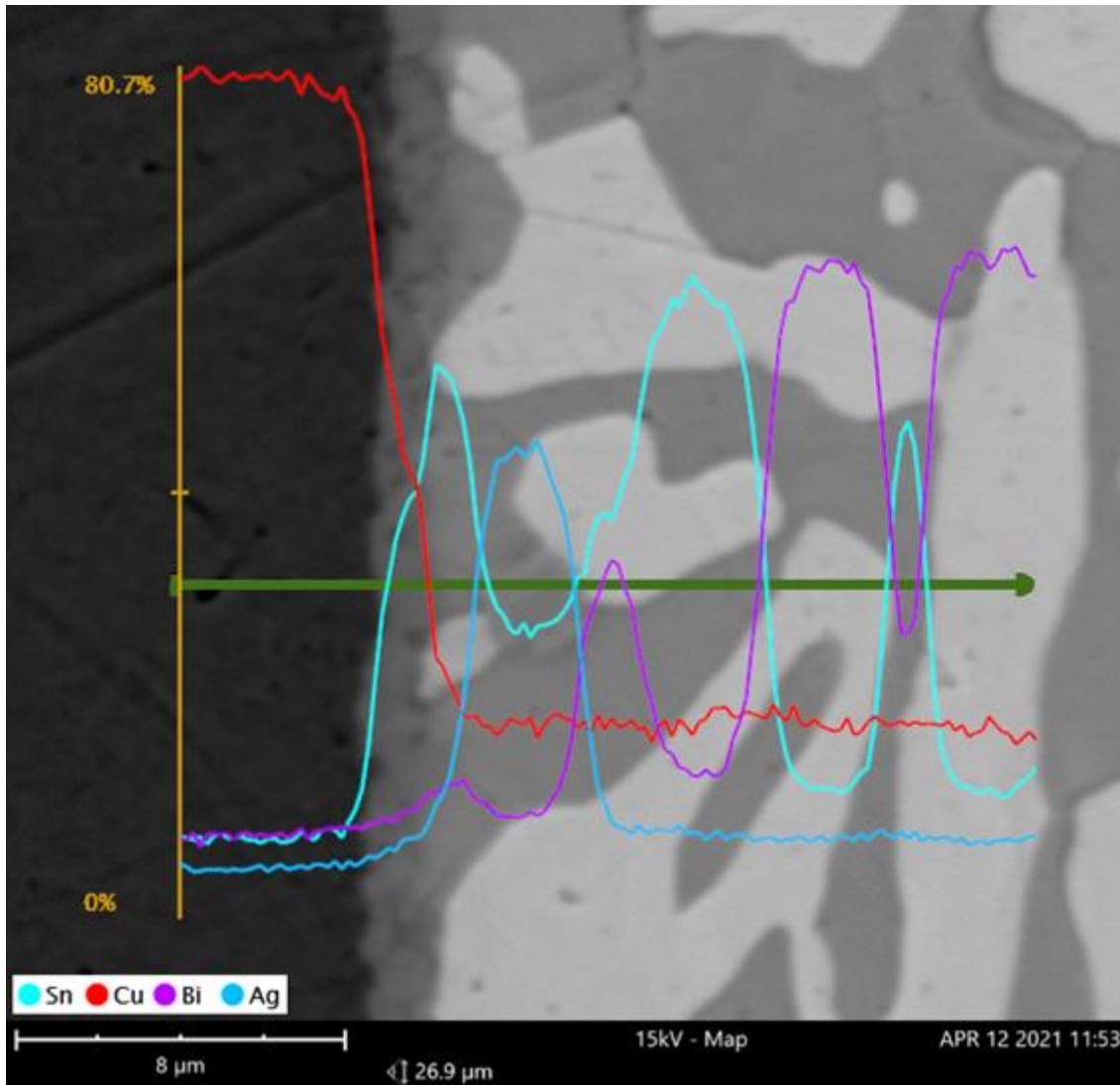
3.2 Zpracování dat

Pomocí elektronového mikroskopu bylo pořízeno 360 fotografií intermetalických vrstev. Ve výsledku byly foceny pájené spoje tvořené z 12 různých pájecích past (4 typy tavidel a 3 váhové poměry) na pájecích ploškách o šířce 2 a 3 mm, pro 5 dob stárnutí, přičemž každý vzorek byl zhotoven 3x. Zanedbáme-li rozdíly v šířce pájecích plošek, pak lze uvažovat, že bylo pořízeno 6 fotografií pro jeden druh pájecí pasty.

3.2.1 Materiálová analýza

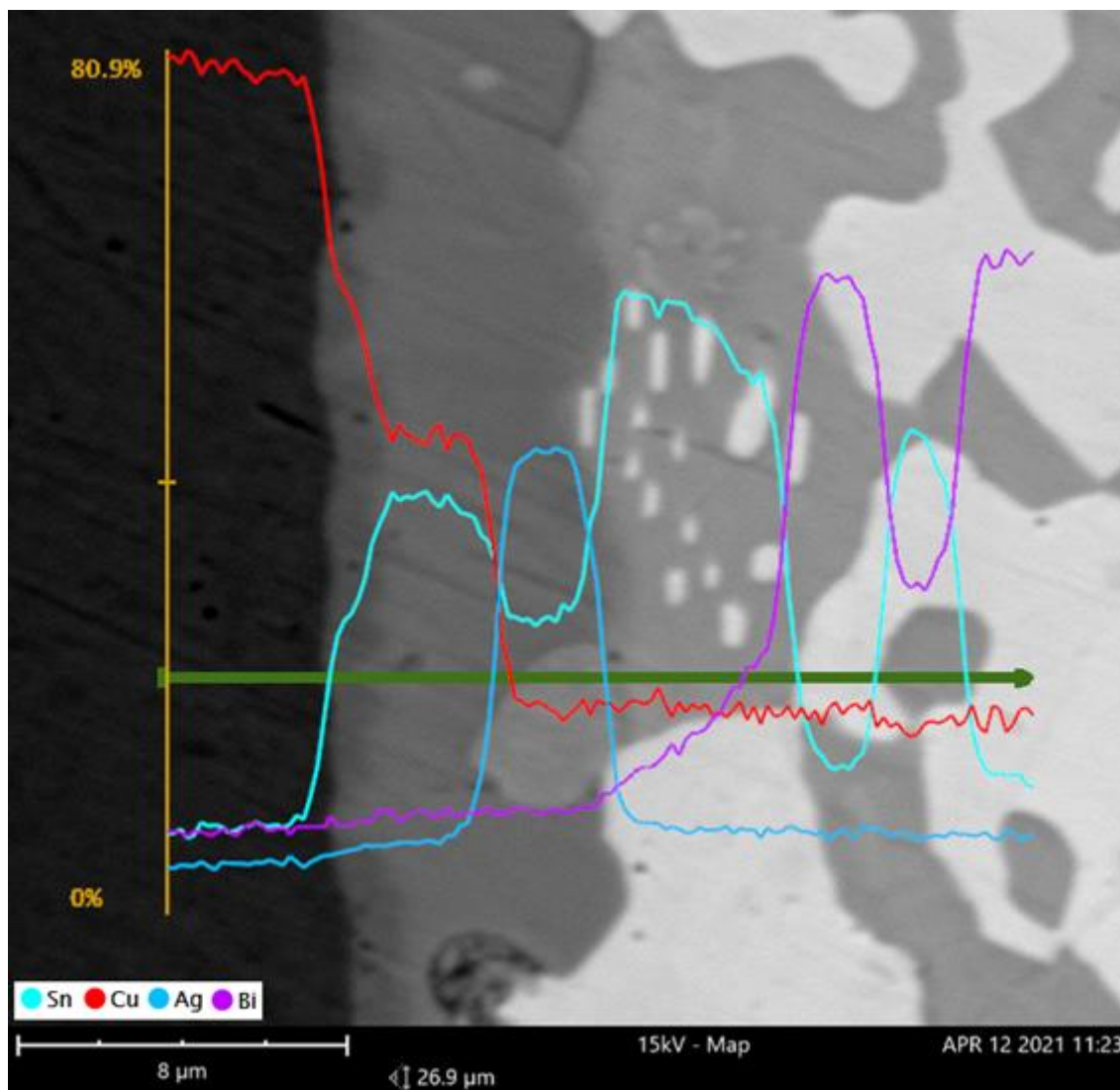
Aby bylo možno ověřit teorii a zároveň lépe porozumět intermetalickým vrstvám vznikajícím na rozhraní pájky a měděné pájecí plošky, byly zhotoveny materiálové analýzy. Celkem byly zhotoveny 3 materiálové analýzy pro dobu stárnutí 0, 250 a 1000 hodin. Každá materiálová analýza byla zhotovena na přímce (tzv. line scan), která byla vybrána tak, aby pokryla všechny materiály (odstíny šedi) na snímku. Výsledkem materiálové analýzy je graf procentuálního zastoupení jednotlivých prvků v závislosti na poloze na dané přímce. Mezi tyto prvky patří zejména měď (Cu), cín (Sn), bismut (Bi), stříbro (Ag) a další prvky jako uhlík (C), kyslík (O), fluor (F), křemík (Si), které byly vyfiltrovány. Vyfiltrované prvky se do oblasti intermetalické vrstvy dostaly většinou zanesením během procesu broušení. Povrch výbrusu je totiž pokryt

mixem prvků uvolněných ze ztuhlé pryskyřice, desky plošných spojů, pájecích plošek a pájky. Díky tomu jsou grafy lehce zkresleny, například v oblasti měděné pájecí plošky graf neukazuje 100 % mědi, ale jen něco okolo 80 %. Zbylých 20 % tvoří právě ty prvky, které nebyly vyfiltrovány. Každý graf byl v editoru obrázků vložen do snímku, ve kterém je zeleně vyznačena přímka, na které byla zhotovena analýza. Všechny obrázky mají přibližně stejně nastavený jas a kontrast. Díky tomu je měď vždy nejtmaší, IMC je šedivá, cín je světle šedivý a bismut je špinavě bílý.



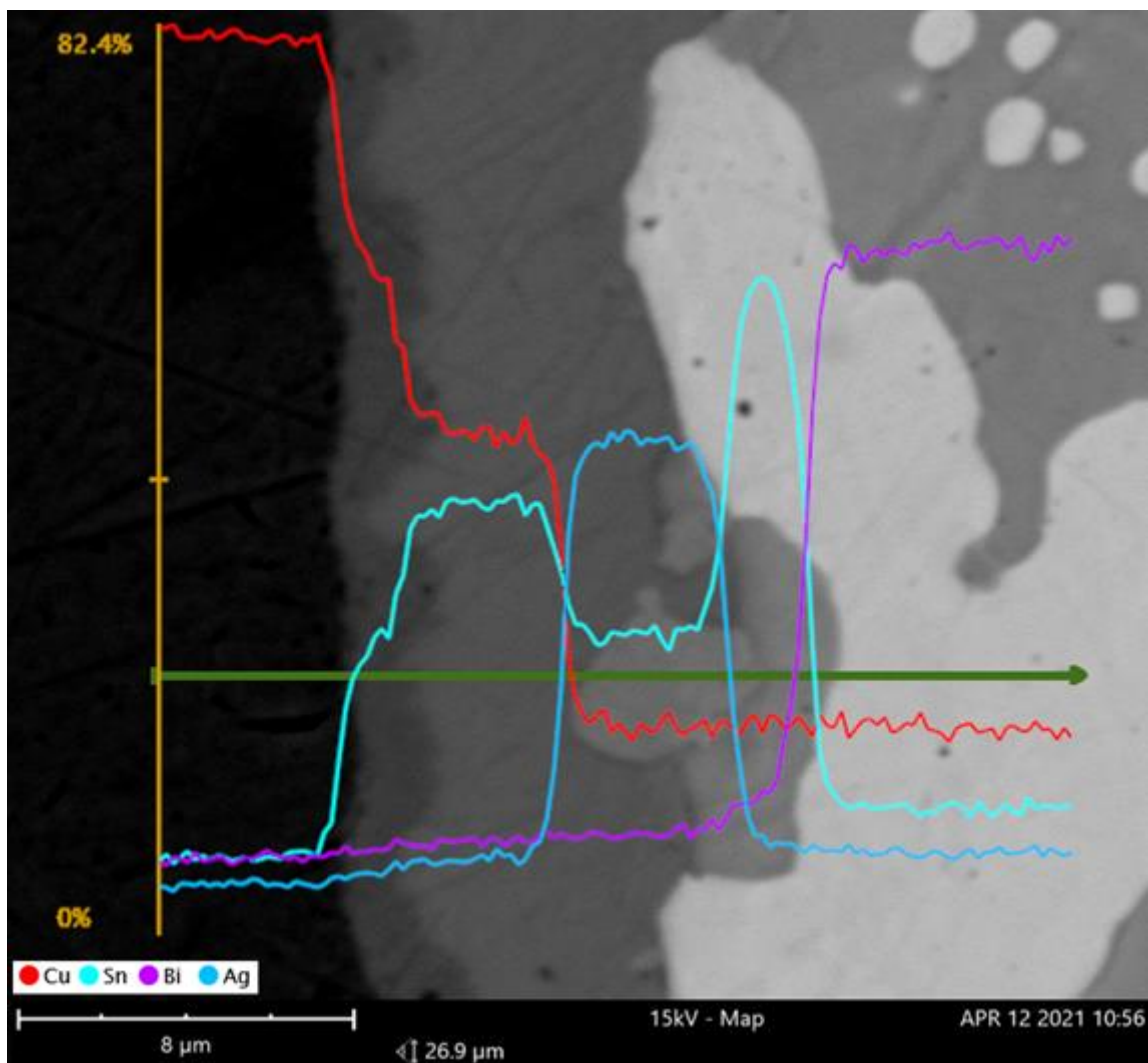
Obrázek 18 Line scan – klasifikace tavidla ORH1 – poměr tavidla v pájecí pastě 10 %
– doba stárnutí 0 h – šířka pájecí plošky 2 mm

Na obrázku 18 je vidět analýza pro vzorek, který byl stárnut 0 hodin, tloušťka a složení IMC tedy odpovídají výchozímu stavu po pájení bez zrychleného stárnutí. Z grafu uvnitř obrázku lze vyvodit že se během pájení bismut neúčastní při tvorbě IMC. Intermetalická sloučenina na rozhraní pájecí plošky a pájky je tvořena z mědi a cínu s předpisem Cu_6Sn_5 . Tzn. 6 atomů mědi na 5 atomů cínu, což odpovídá poměru v grafu 44 % mědi na 36,7 % cínu (dohromady 80,7 %). Hluběji v pájce je vidět zvýšené množství stříbra, což odpovídá sloučenině cínu a stříbra s předpisem Ag_3Sn , která vzniká během pájení pouze v objemu pájky.



Obrázek 19 Line scan – klasifikace tavidla REL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 10 %
– doba stárnutí 250 h – šířka pájecí plošky 2 mm

Obrázek 19 znázorňuje analýzu pro vzorek, který byl stárnut 250 hodin. IMC se na rozhraní pájecí plošky a pájky skládá ze dvou vrstev. Díky zrychlenému stárnutí na rozhraní měděné plošky místy vyrostla tenká vrstva s vyšším poměrem mědi, která má předpis Cu_3Sn . Tzn. 3 atomy mědi na 1 atom cínu, tj. 60,7 % mědi na 20,2 % cínu (dohromady 80,9 %). Bezprostředně za Cu_3Sn následuje Cu_6Sn_5 , která je oproti předchozímu snímku značně tlustší. Na obrázku lze zároveň pozorovat, že sloučenina Cu_6Sn_5 prorostla až ke sloučenině Ag_3Sn , která vznikla v objemu pájky během pájení. Z výše zmíněných intermetalických sloučenin vyplývá, že pro pájecí pastu SnBiAg vznikají při pájení na měděném povrchu obdobné sloučeniny jako pro pájecí pastu SnAg . Zároveň lze z grafu v obrázku pozorovat, že se bismut neúčastní růstu IMC ani během procesu stárnutí.



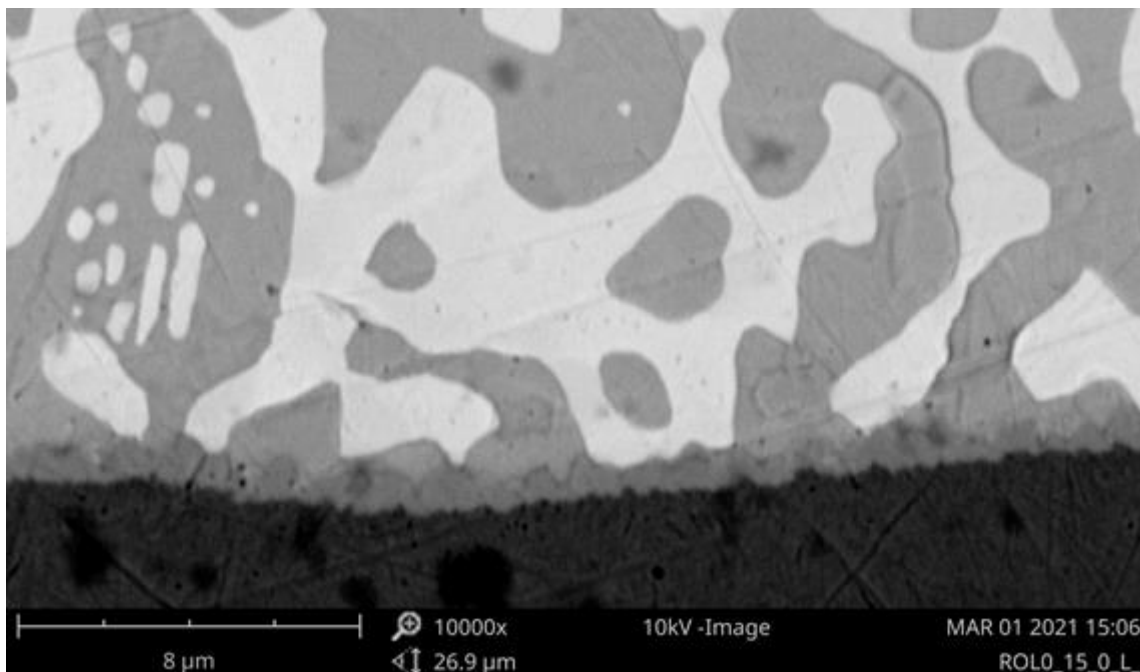
Obrázek 20 Line scan – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 10 %
– doba stárnutí 1000 h – šířka pájecí plošky 2 mm

Na obrázku 20 je vidět analýza pro vzorek, který byl stárnut 1000 hodin. Sloučenina s větším obsahem mědi Cu_3Sn je již plně spojitá, ovšem oproti snímku se stárnutím 250 hodin nenabyla příliš na tloušťce. U sloučeniny Cu_6Sn_5 lze pozorovat také malý nárůst tloušťky. I přesto, že je v pájecích pastách jen 1 % stříbra, lze na obrázku opět pozorovat sloučeninu Ag_3Sn .

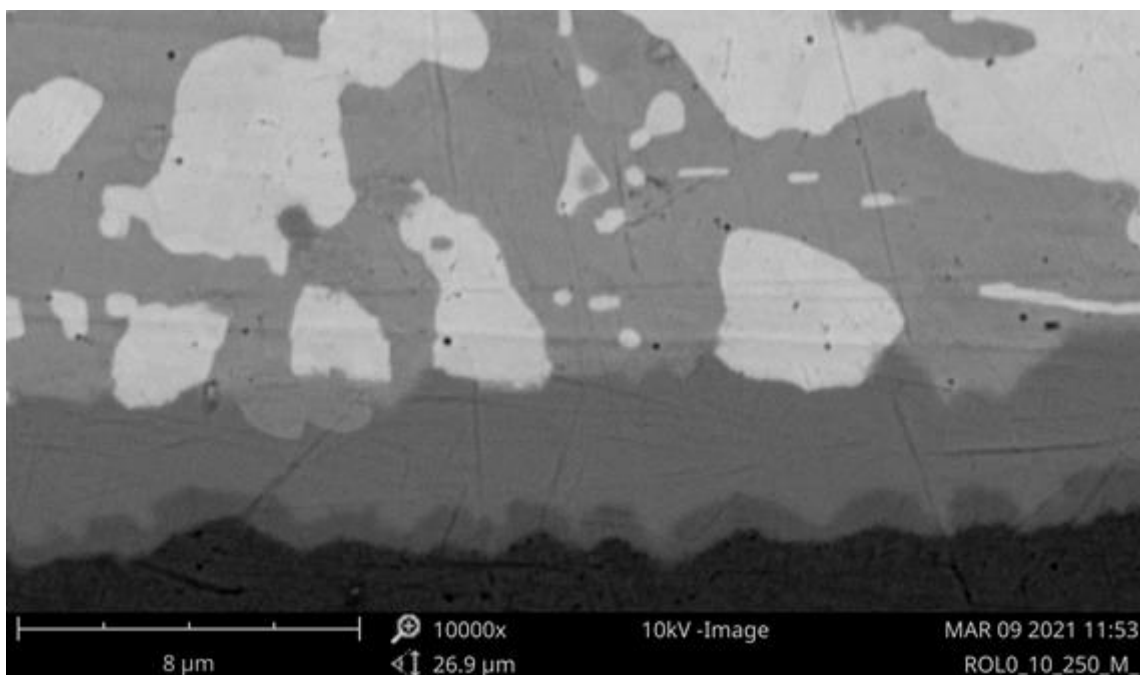
3.2.2 Vyhodnocení snímků v programu NIS Elements

Snímky byly upraveny pomocí programu NIS Elements, ve kterém byly oříznuty a pomocí funkce Binary select byla v každém snímku vybrána plocha IMC. Tato selekce v podstatě funguje na základě podobnosti blízkých pixelů, pokud mají pixely podobný odstín a barvu, v našem případě odstín šedi, pak jsou vybrány jako jedna oblast. Tato metoda ale není bezchybná a obraz fotografií s tak velkým přiblížením místy obsahuje nečistoty. Výsledná selekce tedy vyžadovala korekci a tím i zásah lidské ruky. Korekce vybraných ploch bylo třeba provést s maximální pečlivostí, aby byly všechny obrázky editovány stejně. Výstupem programu NIS Elements jsou černobílé obrázky, na kterých je vybraná IMC čistě bílá a vše ostatní je černé. Výsledný obrázek tedy nese binární informaci, kde bílá barva působí jako

logická 1 a černá jako logická 0. Elektronovým mikroskopem bylo pořízeno 360 snímků vzorků vystihující mnoho kombinací faktorů ovlivňující tloušťku IMC. Rozdíly v tloušťkách IMC jsou okem patrné pouze pro vzorky s různou dobou stárnutí. Z tohoto důvodu bylo vybráno menší množství ukázkových snímků pro jednotlivé doby stárnutí, které tloušťku IMC ovlivnily nejvíce.

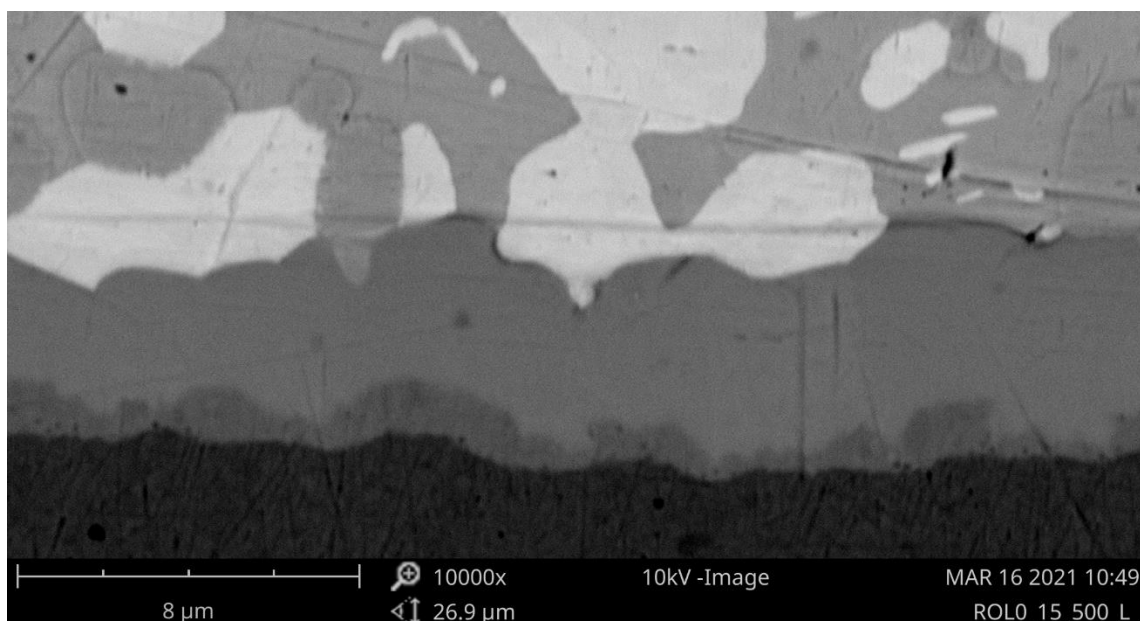


**Obrázek 21 IMC – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 15 %
– doba stárnutí 0 h – šířka pájecí plošky 3 mm**

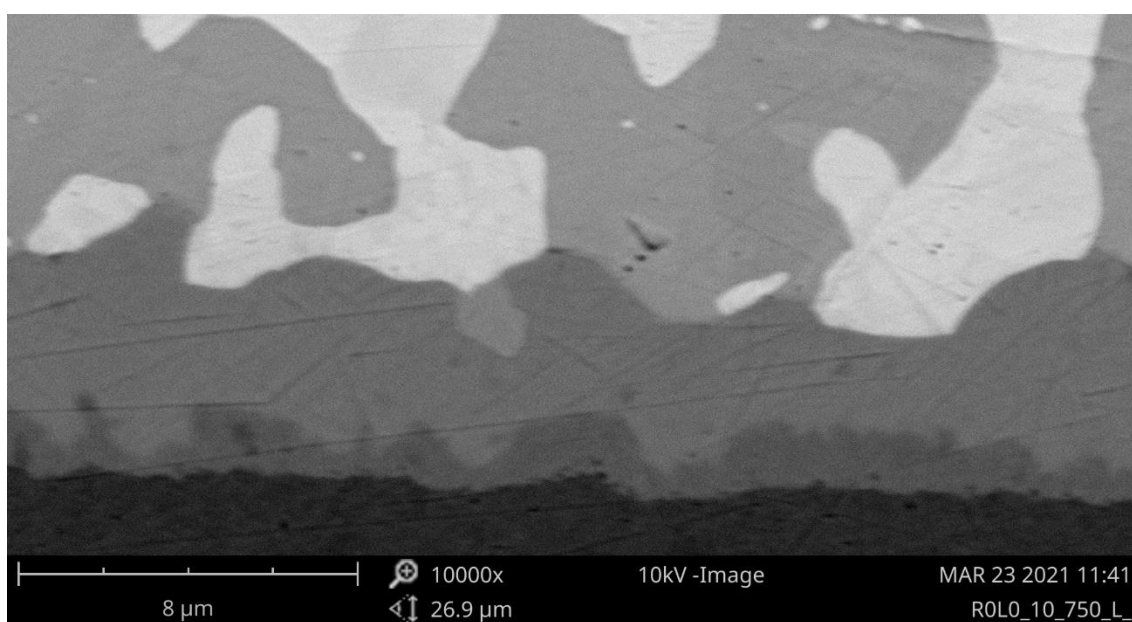


**Obrázek 22 IMC – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 10 %
– doba stárnutí 250 h – šířka pájecí plošky 2 mm**

Na obrázcích 21 a 22 je patrný zásadní rozdíl v tloušťce IMC mezi vzorky, které se nechaly zrychleně stárnout 250 hodin (obr. 22) a vzorky bez stárnutí (obr. 21). Již po 250 hodinách je IMC zhruba 5x větší než IMC bez stárnutí. Vrstva tedy vyrostla z cca 0,8 μm na cca 3,8 μm .

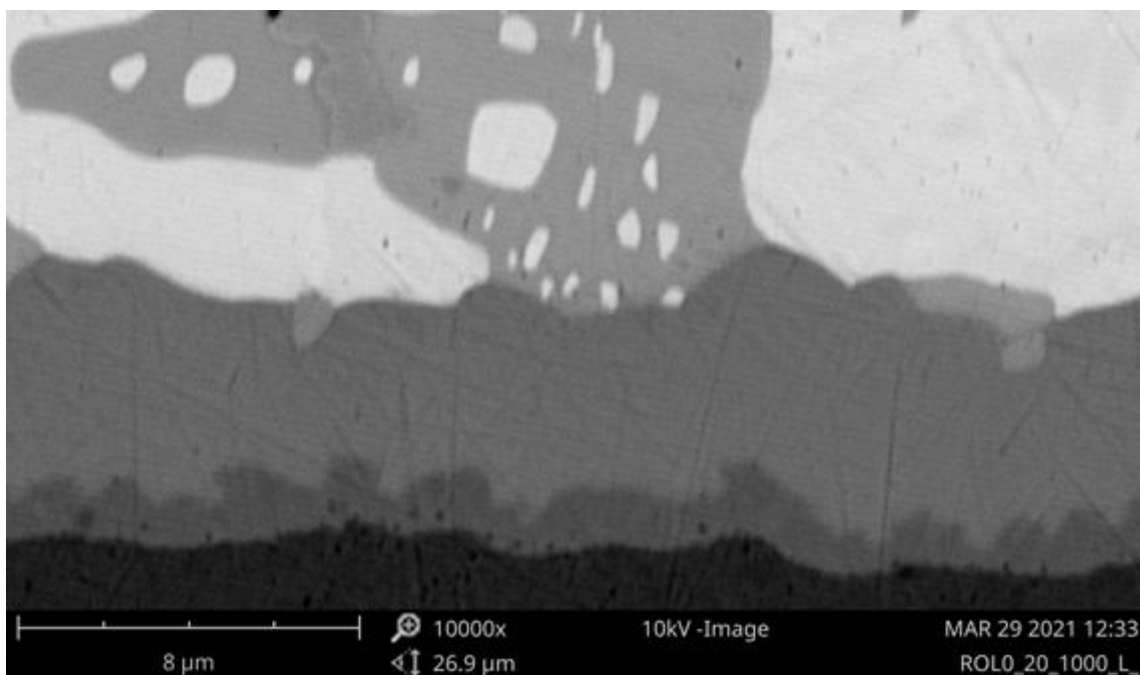


**Obrázek 23 IMC – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 15 %
– doba stárnutí 500 h – šířka pájecí plošky 3 mm**



**Obrázek 24 IMC – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 10 %
– doba stárnutí 750 h – šířka pájecí plošky 2 mm**

Na obrázcích 23 a 24 lze pozorovat, že rozdíl v tloušťce IMC pro 500 a 750 hodin není tak výrazný jako u předchozího porovnání. Tloušťka IMC pro 500 hodin činí cca 4,7 μm a pro 750 hodin cca 5,5 μm .



**Obrázek 25 IMC – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 20 %
– doba stárnutí 1000 h – šířka pájecí plošky 3 mm**

Na obrázku 25 lze vidět tloušťku IMC cca 6,2 μm po stárnutí 1000 hodin. Při porovnání průměrných hodnot tlouštěk IMC pro jednotlivé doby stárnutí se ukazuje, že za prvních 250 hodin narostla IMC zhruba na 3 μm . Za každých dalších 250 hodin narostla IMC pouze o necelý 1 μm .



**Obrázek 26 Binary select – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 20 %
– doba stárnutí 1000 h – šířka pájecí plošky 3 mm**

Černobílý obrázek číslo 26 je jeden ze snímků, které byly upraveny pomocí programu NIS Elements. Takovéto obrázky byly použity pro zjištění průměrných tlouštěk IMC.

3.2.3 Vyhodnocení tloušťky IMC

Tloušťka IMC na jednotlivých fotografiích byla vypočtena pomocí programu BitmapCounter od Adama Petráče, jehož algoritmus je jiný než v programu NIS Elements, ale vede ke stejným výsledkům. NIS Elements počítá průměrnou tloušťku IMC na základě vybrané plochy a zadaného poměru počtu μm na počtu px který byl zjištěn z měřítka fotografie. BitmapCounter

ovšem nepočítá s plochou, ale používá 1 sloupec pixelů jako jednu změřenou hodnotu. Výsledný průměr je tedy reprezentován jako průměr 2048 měření (což odpovídá šířce obrázku v pixelech). Díky tomu lze navíc zjistit medián a odchylku. Medián je vhodný pro kontrolu průměru a odchylka vypovídá o pravidelnosti intermetalické vrstvy. Čím větší odchylka, tím více nepravidelná je tloušťka IMC. Hodnoty tloušťky IMC jsou z pixelů přepočteny na μm pomocí již zmíněného měřítka. Každá pořízená fotografie je vybavena měřítkem, které je díky stejnému zoomu pro všech 360 snímků konstantní.

V tabulce 4 jsou zaznamenány tloušťky IMC zjištěné pro různé typy tavidel, váhové poměry tavidel, velikosti pájecích plošek a doby stárnutí. Každý vzorek byl zhotoven 3x, jedna hodnota v tabulce tedy odpovídá průměru z 3 hodnot získaných z programu BitmapCounter. Pájecí plošky s šířkou 2 mm jsou značeny písmenkem M (medium) a pájecí plošky s šířkou 3 mm jsou značeny písmenkem L (large).

Tabulka 4 Zprůměrované tloušťky IMC ze 3 hodnot

Doba stárnutí [h]	Poměr tavidla [%]	Velikost plošky	ORH1 [μm]	ORM1 [μm]	RELO [μm]	ROLO [μm]
0 hodin	10	L	0,747	0,756	0,886	0,848
		M	0,744	0,767	0,906	0,781
	15	L	0,781	0,787	0,863	0,818
		M	0,770	0,739	0,822	0,803
	20	L	0,809	0,748	0,740	0,778
		M	0,727	0,834	0,752	0,765
250 hodin	10	L	3,769	3,684	3,773	3,564
		M	3,713	3,746	3,879	3,454
	15	L	3,749	3,708	3,774	3,888
		M	3,972	3,872	3,786	3,741
	20	L	4,128	4,456	3,635	3,857
		M	3,910	4,449	3,823	3,900
500 hodin	10	L	4,587	4,699	4,776	4,615
		M	4,668	4,620	4,640	4,300
	15	L	4,766	4,663	4,569	4,590
		M	4,890	4,590	4,581	4,697
	20	L	4,791	4,996	4,794	4,903
		M	4,671	4,864	4,699	4,804
750 hodin	10	L	5,171	5,614	5,406	4,922
		M	5,465	5,423	5,603	5,522
	15	L	5,611	5,365	5,214	5,501
		M	5,677	5,293	5,251	5,949
	20	L	5,512	5,588	5,883	5,201
		M	5,579	6,045	5,542	5,556
1000 hodin	10	L	6,310	6,187	6,513	6,448
		M	6,229	6,011	5,537	5,983
	15	L	6,154	6,413	6,159	5,928
		M	6,153	6,255	6,447	6,194
	20	L	6,582	6,325	6,138	6,037
		M	6,340	6,761	6,283	6,043

3.2.4 Vliv velikosti pájecích plošek

Z tabulky 5 vyplývá, že mezi tloušťkami IMC pro šířku pájecích plošek 2 a 3 mm nelze pozorovat jednoznačnou závislost. Nelze jednoznačně říct, že by tloušťka IMC byla větší, nebo menší pro danou šířku pájecích plošek. V některých případech jsou si průměrné hodnoty tloušťky IMC velmi blízké, v jiných naopak relativně odlišné. Z tohoto důvodu byla vytvořena jednoduchá tabulka, ve které je vidět srovnání tlouštěk IMC mezi menšími a většími pájecími ploškami pro stejné hmotnostní poměry daného tavidla v pájecí pastě. V tabulce 5 jsou zeleně označeny buňky s větší tloušťkou IMC pro šířku pájecí plošky 3 mm (L>M) a žlutě pro šířku plošky 2 mm (M>L). Pro více agresivní organická tavidla ORH1 a ORM1 vychází tloušťka IMC v 9 z 15 případů větší pro širší pájecí plošky. Pro méně agresivní resin tavidla REL0 vychází tlustší IMC pouze v 5 z 15 případů a pro tavidla rosin ROL0 vychází tlustší IMC pro větší pájecí plošky v 8 z 15 případů. Ve výsledku je tedy 31 spojů s tlustší IMC pro pájecí plošky s šířkou 3 mm a 29 spojů s tlustší IMC pro plošky s šířkou 2 mm. Kdyby do zhodnocení nebyly započteny spoje REL0, tak by bylo možné prohlásit, že pro větší pájecí plošky je IMC tlustší než pro plošky menší. Pokud by ovšem velikost pájecí plošky měla ovlivnit tloušťku IMC, pak lze očekávat, že ovlivní tloušťku IMC pro všechny pájecí pasty stejně. Vezmeme-li v potaz srovnání pro všechny typy tavidel, pak lze konstatovat, že v tomto případě velikost pájecí plošky nemá na tloušťku IMC prokazatelný vliv.

Tabulka 5 Porovnání tloušťky IMC v závislosti na velikosti pájecí plošky

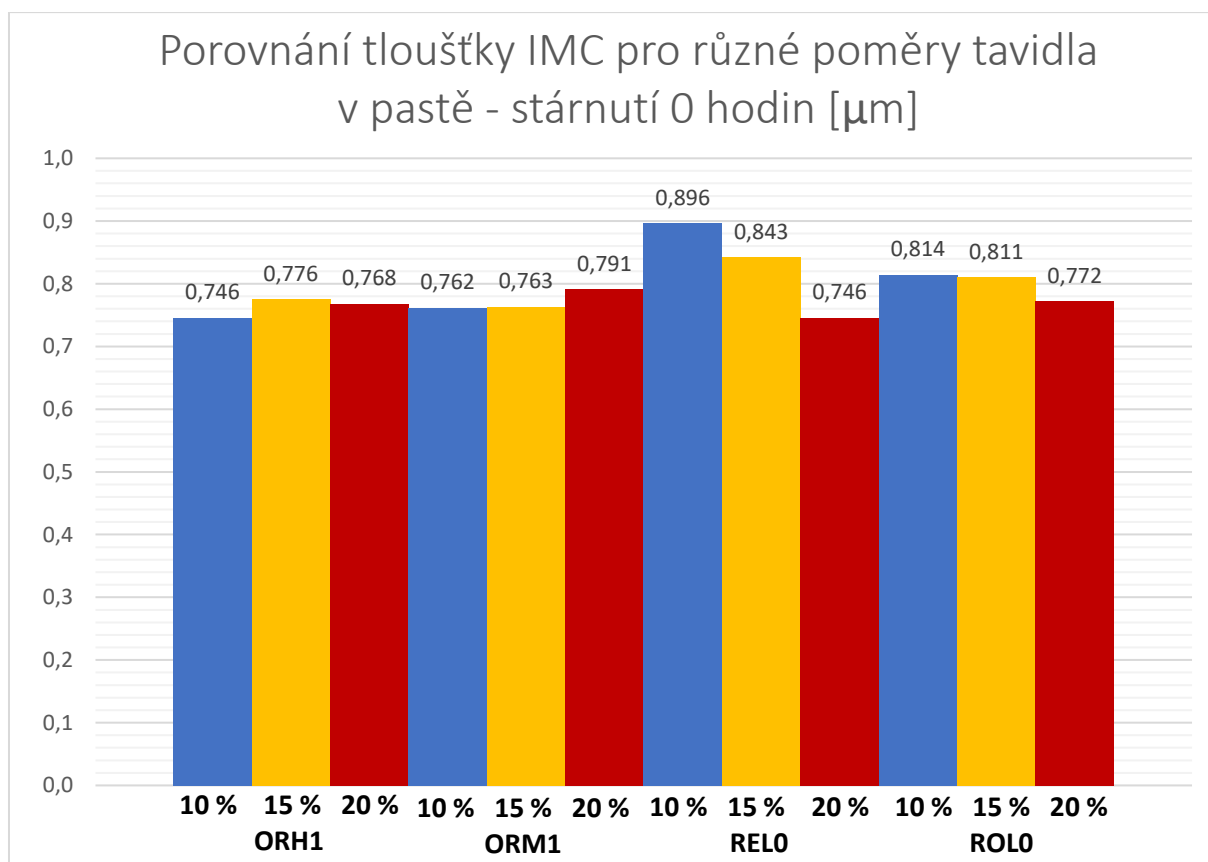
Doba stárnutí [h]	Poměr tavidla [%]	ORH1	ORM1	REL0	ROL0
0 hodin	10	L>M	M>L	M>L	L>M
	15	L>M	L>M	L>M	L>M
	20	L>M	M>L	M>L	L>M
250 hodin	10	L>M	M>L	M>L	L>M
	15	M>L	M>L	M>L	L>M
	20	L>M	L>M	M>L	M>L
500 hodin	10	M>L	L>M	L>M	L>M
	15	M>L	L>M	M>L	M>L
	20	L>M	L>M	L>M	L>M
750 hodin	10	M>L	L>M	M>L	M>L
	15	M>L	L>M	M>L	M>L
	20	M>L	M>L	L>M	M>L
1000 hodin	10	L>M	L>M	L>M	L>M
	15	L>M	L>M	M>L	M>L
	20	L>M	M>L	M>L	M>L

3.2.5 Vliv váhového poměru tavidla

Jelikož má velikost pájecích plošek na tloušťku IMC zanedbatelný vliv, byly zhotoveny průměry z hodnot tlouštěk IMC pro šířku pájecí plošky 2 a 3 mm, vždy pro jeden poměr daného typu tavidla. Porovnání tlouštěk IMC pro různé váhové poměry tavidla v pájecí pastě je tedy dáno porovnáním průměrů z 6 hodnot. Zprůměrované hodnoty tlouštěk IMC pro různé váhové poměry tavidla a doby stárnutí jsou vidět v tabulce 6 a v grafech 1 až 5.

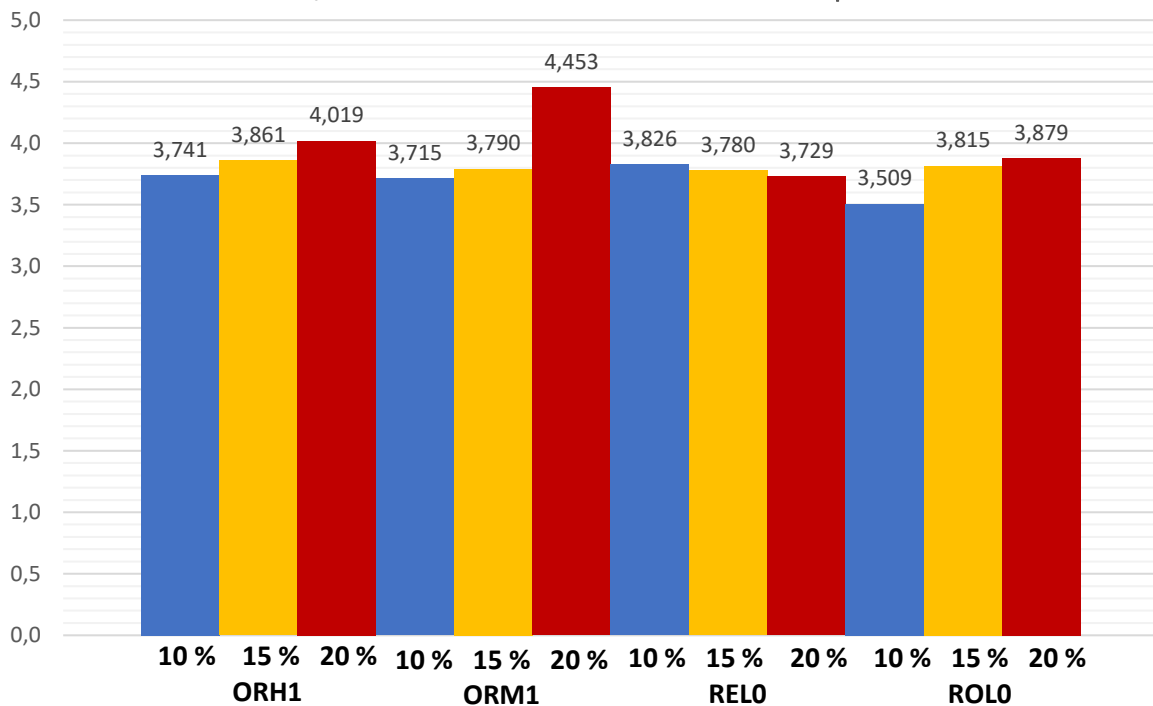
Tabulka 6 Zprůměrované tloušťky IMC z 6 hodnot (LM)

Doba stárnutí [h]	Poměr tavidla [%]	Velikost plošky	ORH1 [μm]	ORM1 [μm]	RELO [μm]	ROLO [μm]
0 hodin	10	LM	0,746	0,762	0,896	0,814
	15	LM	0,776	0,763	0,843	0,811
	20	LM	0,768	0,791	0,746	0,772
250 hodin	10	LM	3,741	3,715	3,826	3,509
	15	LM	3,861	3,790	3,780	3,815
	20	LM	4,019	4,453	3,729	3,879
500 hodin	10	LM	4,628	4,660	4,708	4,457
	15	LM	4,828	4,626	4,575	4,644
	20	LM	4,731	4,930	4,746	4,854
750 hodin	10	LM	5,318	5,519	5,505	5,222
	15	LM	5,644	5,329	5,233	5,725
	20	LM	5,546	5,817	5,713	5,378
1000 hodin	10	LM	6,269	6,099	6,025	6,216
	15	LM	6,154	6,334	6,303	6,061
	20	LM	6,461	6,543	6,211	6,040



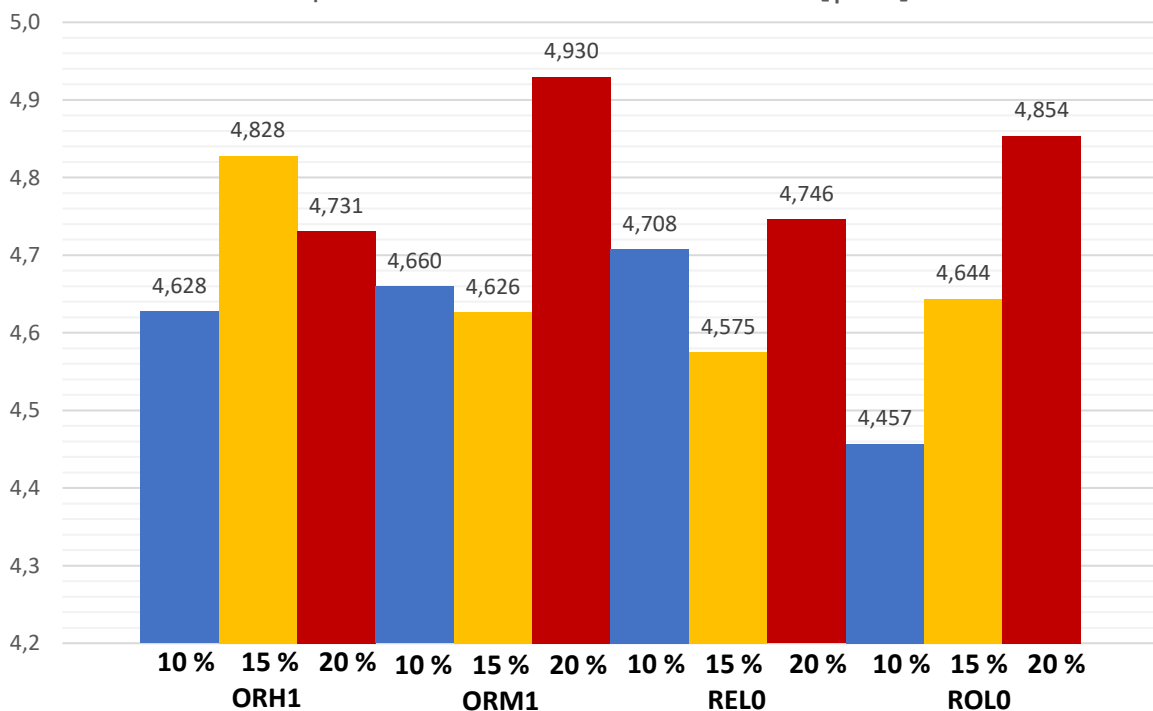
Graf 1 Porovnání tloušťky IMC pro různé poměry tavidla v pastě – stárnutí 0 hodin

Porovnání tloušťky IMC pro různé poměry tavidla v pastě - stárnutí 250 hodin [μm]

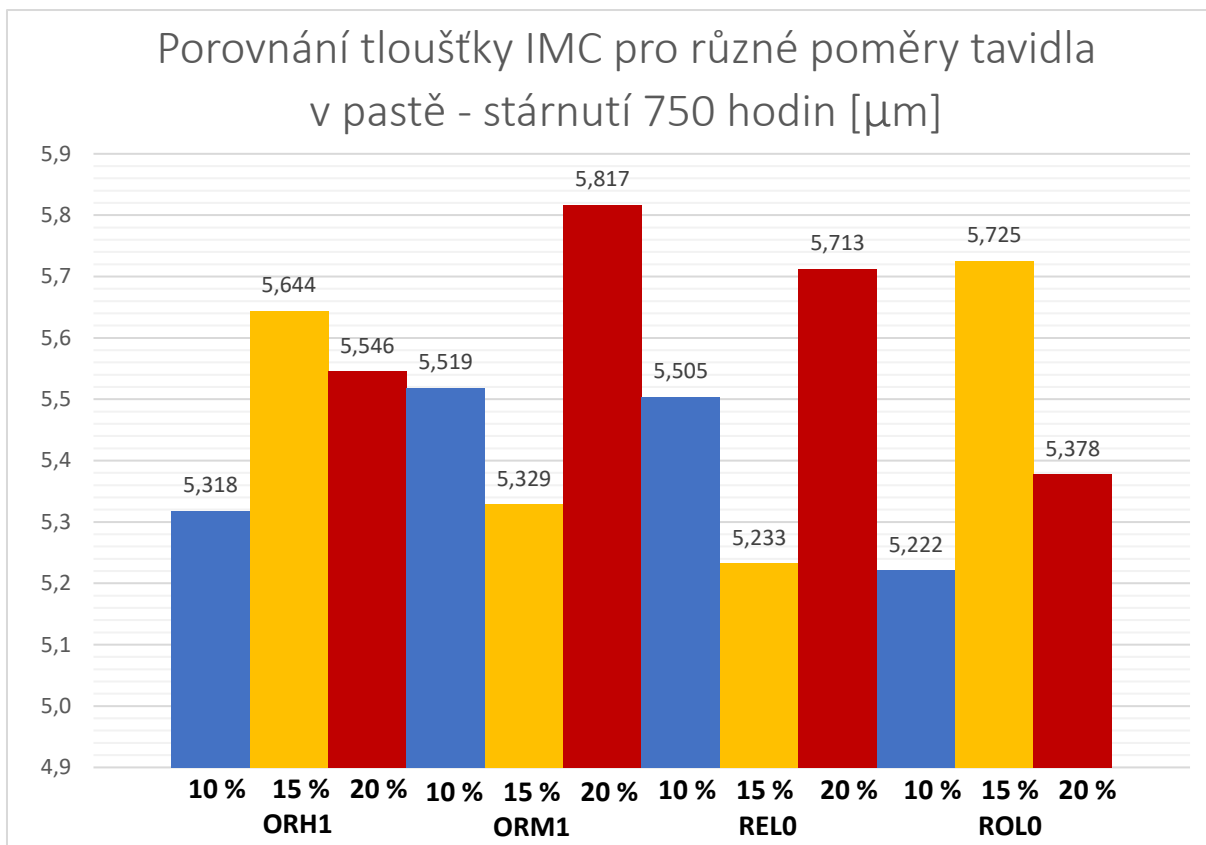


Graf 2 Porovnání tloušťky IMC pro různé poměry tavidla v pastě – stárnutí 250 hodin

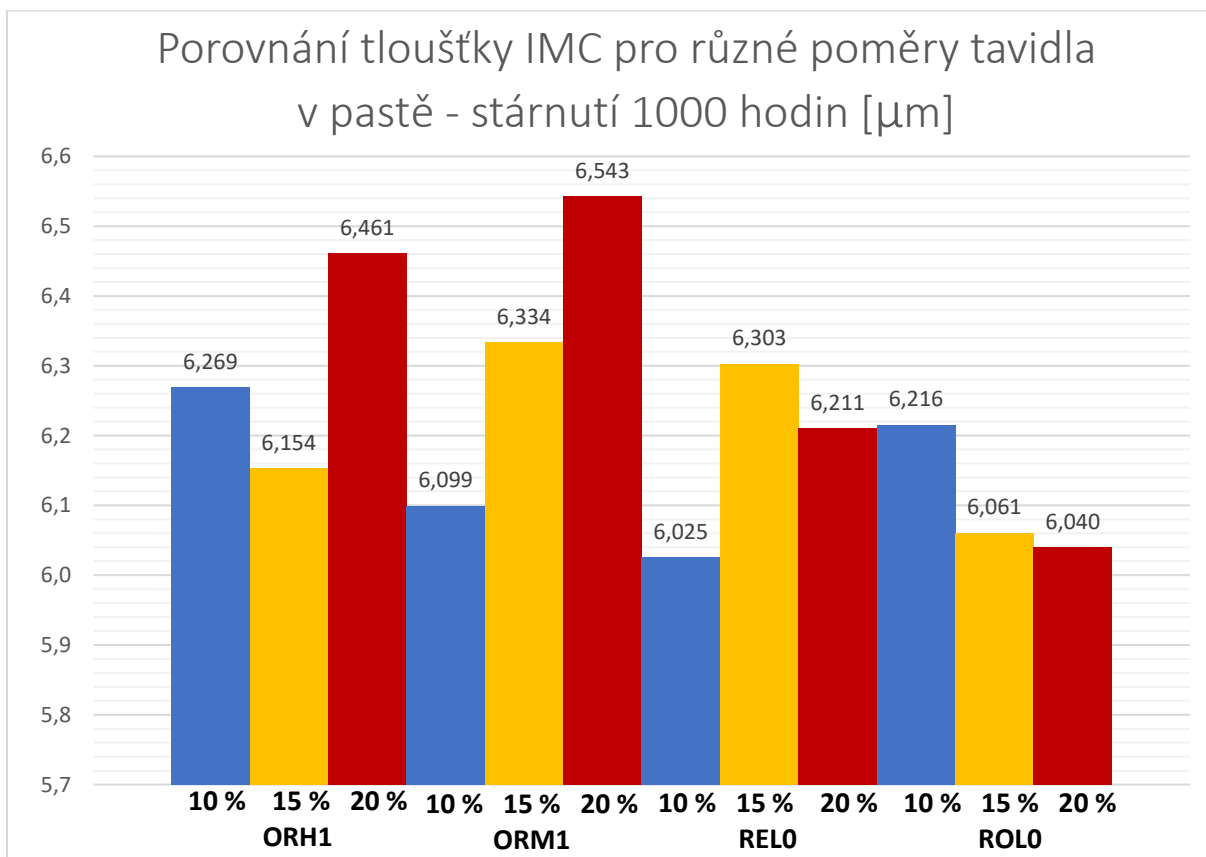
Porovnání tloušťky IMC pro různé poměry tavidla v pastě - stárnutí 500 hodin [μm]



Graf 3 Porovnání tloušťky IMC pro různé poměry tavidla v pastě – stárnutí 500 hodin



Graf 4 Porovnání tloušťky IMC pro různé poměry tavidla v pastě – stárnutí 750 hodin



Graf 5 Porovnání tloušťky IMC pro různé poměry tavidla v pastě – stárnutí 1000 hodin

V grafech 1 a 2 je vidět, že pro stárnutí 0 a 250 hodin jsou si průměrné hodnoty tloušťek IMC pro danou dobu stárnutí velmi podobné. Pro grafy 3 až 5, tj. stárnutí 500 až 1000 hodin, mají průměrné hodnoty tloušťek IMC pro danou dobu stárnutí větší rozptyl. V tabulce 7 je vidět porovnání jednotlivých pájecích past z pohledu váhového poměru tavidla v pastě. Zeleně s popiskem %> jsou označeny případy, kdy je průměrná tloušťka IMC větší pro pájecí pastu s větším poměrem tavidla než pro pastu s nižším poměrem tavidla. Žlutě s popiskem %< jsou označeny opačné případy. Pro více agresivní organické pájecí pasty s tavidlem typu ORH1, respektive ORM1 je IMC tlustší s větším poměrem tavidla v 11, respektive 13 případech. Pro méně agresivní pájecí pasty s tavidlem typu RELO, respektive ROL0 je IMC tlustší v 6, respektive 8 případech. Agresivnější pájecí pasty mají tlustší IMC pro větší poměr tavidla v 24 z 30 případů. Pro méně agresivní tavidla lze naopak pozorovat tlustší IMC jen v 14 z 30 případů. Z toho lze vyvodit, že větší množství agresivního tavidla v pájecí pastě má vliv na tloušťku IMC. Naopak pro méně agresivní tavidla s menším váhovým poměrem halogenidů lze konstatovat, že váhový poměr tavidla v pájecí pastě nemá vliv na tloušťku IMC.

Tabulka 7 Porovnání tloušťky IMC v závislosti na váhovém poměru tavidla

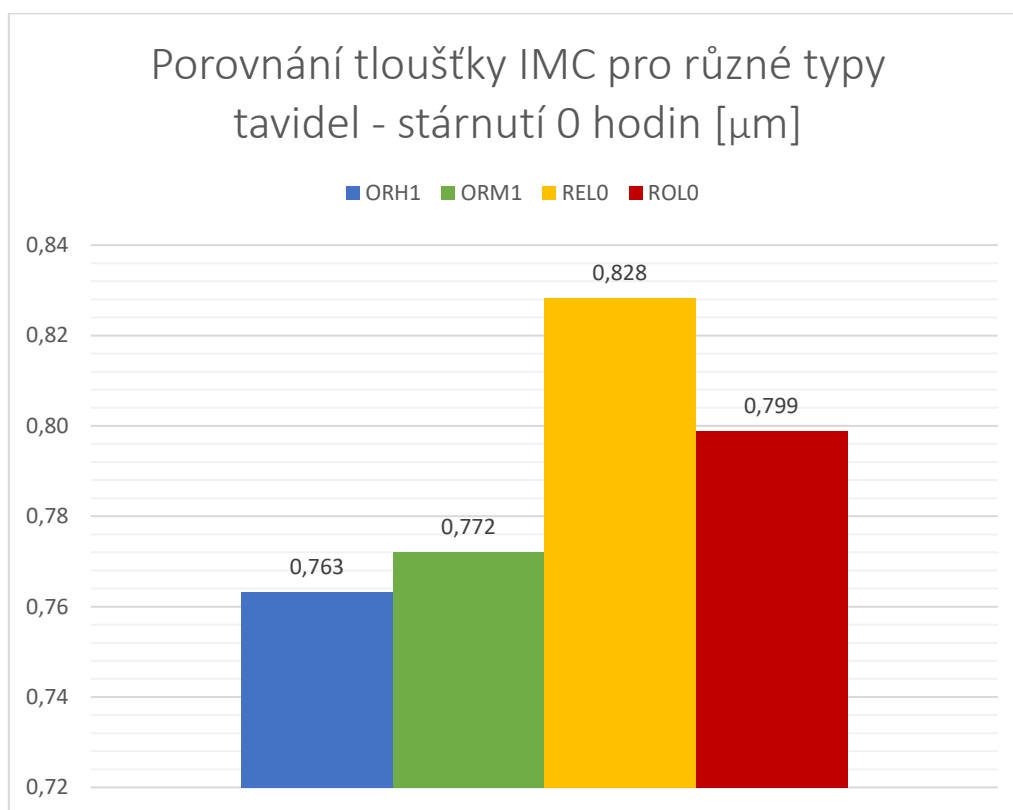
Doba stárnutí [h]	Porovnání poměr. tav. [%]	ORH1	ORM1	RELO	ROLO
0 hodin	10 vs 15	%>	%>	%<	%<
	15 vs 20	%<	%>	%<	%<
	10 vs 20	%>	%>	%<	%<
250 hodin	10 vs 15	%>	%>	%<	%>
	15 vs 20	%>	%>	%<	%>
	10 vs 20	%>	%>	%<	%>
500 hodin	10 vs 15	%>	%<	%<	%>
	15 vs 20	%<	%>	%>	%>
	10 vs 20	%>	%>	%>	%>
750 hodin	10 vs 15	%>	%<	%<	%>
	15 vs 20	%<	%>	%>	%<
	10 vs 20	%>	%>	%>	%>
1000 hodin	10 vs 15	%<	%>	%>	%<
	15 vs 20	%>	%>	%<	%<
	10 vs 20	%>	%>	%>	%<

3.2.6 Vliv typu (agresivity) tavidla

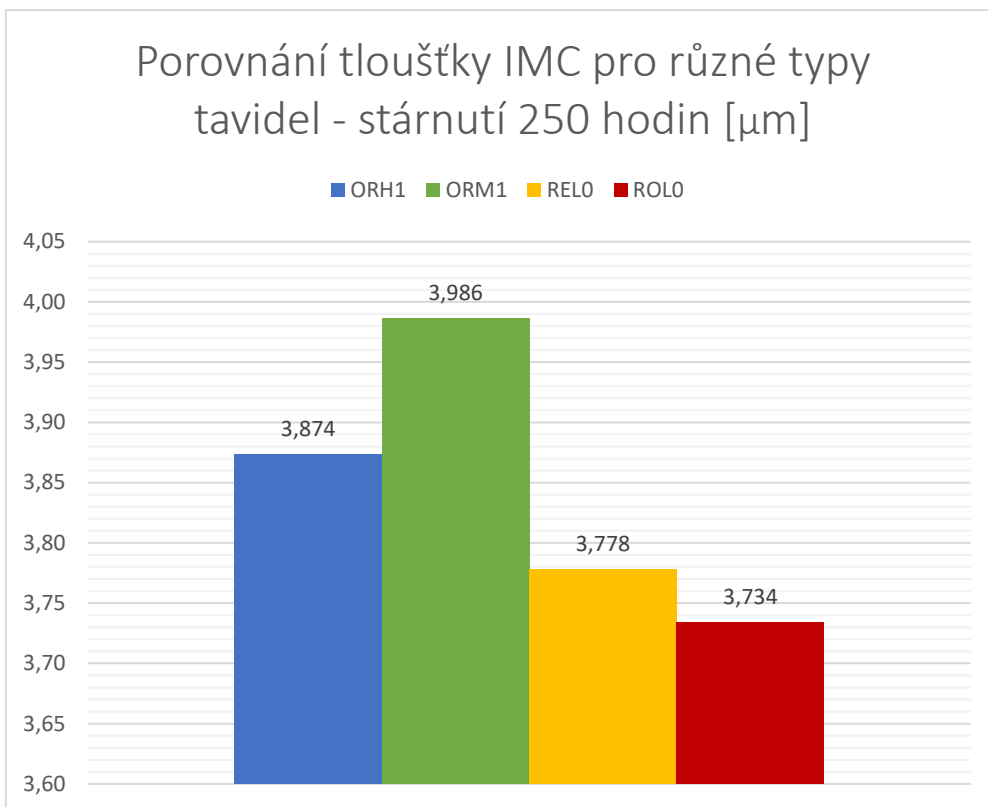
V předchozí kapitole byl zjištěn vliv váhového poměru tavidla na tloušťku IMC v případě použití agresivního tavidla. To ovšem nevypovídá o vlivu typu (agresivity) tavidla na tloušťku IMC. V této kapitole je tedy srovnávána tloušťka IMC mezi jednotlivými typy pájecích past. Při porovnání tlouštěk IMC pro různé typy pájecích past nebyl brán v úvahu poznatek z předchozí kapitoly. Porovnání jednotlivých typů pájecích past (tavidel) v této kapitole je tedy zhotoveno z celkových průměrů tlouštěk IMC pro váhové množství tavidla v pájecí pastě 10, 15 a 20 %, pro danou dobu stárnutí. Výsledná tloušťka každého typu pájecí pasty je tedy reprezentována hodnotou získanou zprůměrováním 18 hodnot (2 velikosti pájecí plošky, 3 poměry tavidel, 3 vzorky pro jednu variantu). Průměrné tloušťky IMC jsou vidět v tabulce 8 a jsou porovnány v grafech 6 až 10.

Tabulka 8 Zprůměrované tloušťky IMC z 18 hodnot (10, 15, 20, LM)

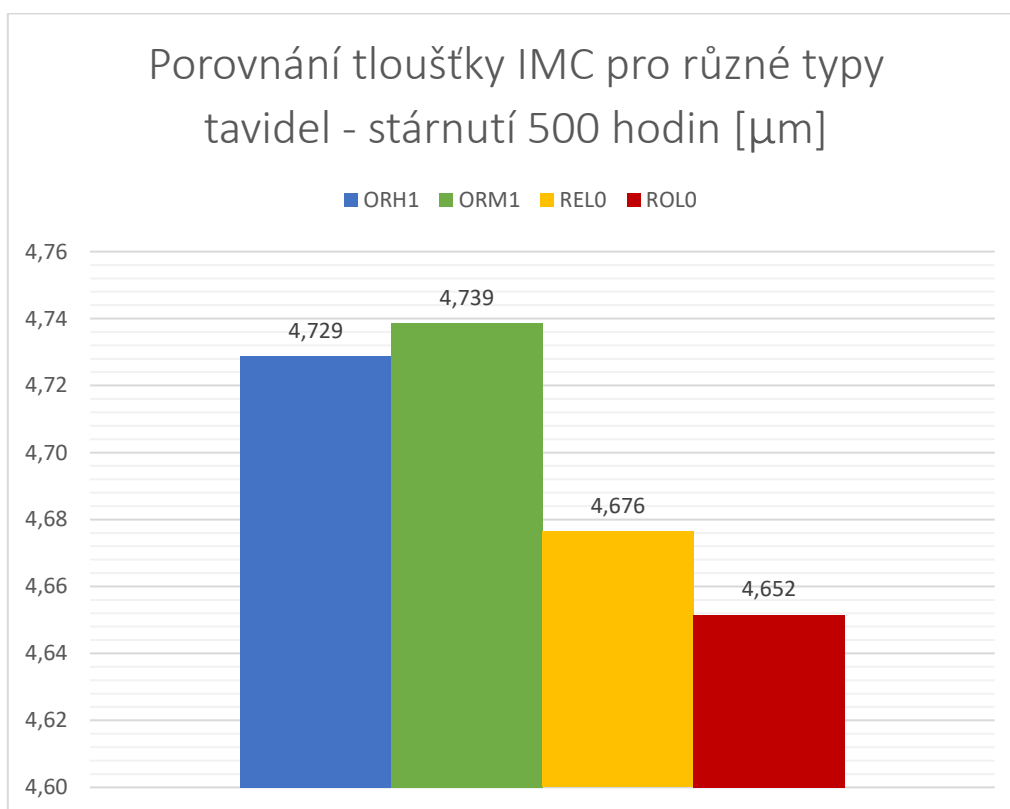
Doba stárnutí [h]	Poměr tavidla [%]	Velikost plošky	ORH1 [μm]	ORM1 [μm]	RELO [μm]	ROLO [μm]
0	10, 15, 20	LM	0,763	0,772	0,828	0,799
250	10, 15, 20	LM	3,874	3,986	3,778	3,734
500	10, 15, 20	LM	4,729	4,739	4,676	4,652
750	10, 15, 20	LM	5,503	5,555	5,483	5,442
1000	10, 15, 20	LM	6,295	6,325	6,180	6,106



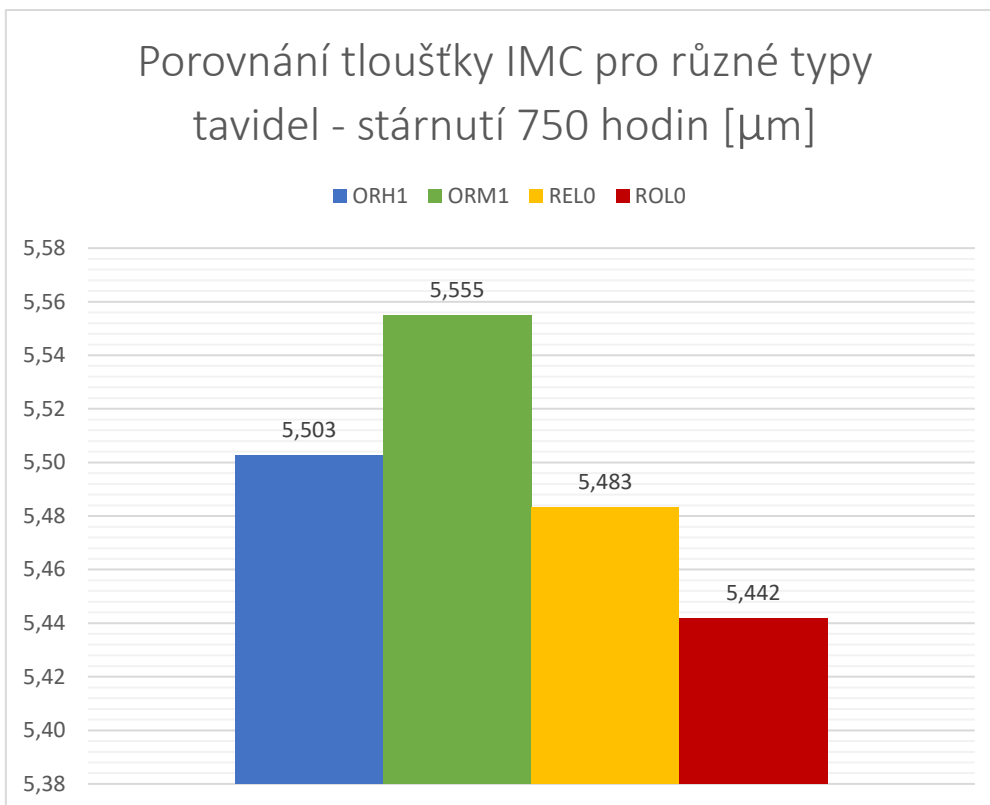
Graf 6 Porovnání tloušťky IMC pro různé typy tavidel – stárnutí 0 hodin



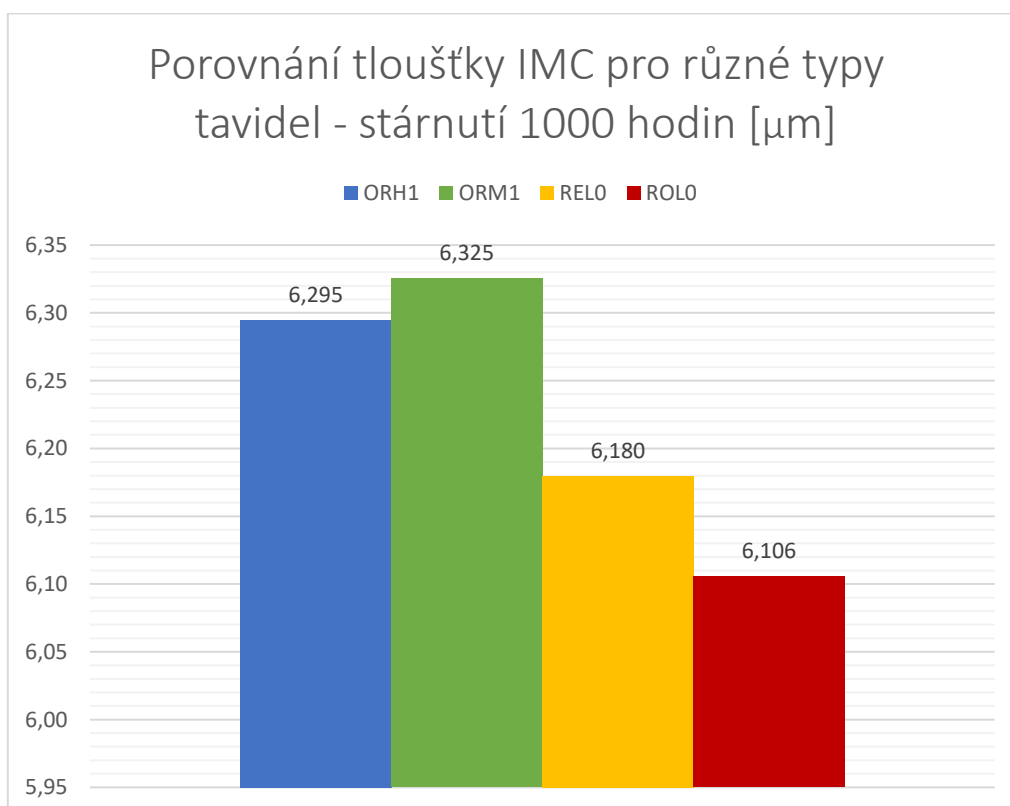
Graf 7 Porovnání tloušťky IMC pro různé typy tavidel – stárnutí 250 hodin



Graf 8 Porovnání tloušťky IMC pro různé typy tavidel – stárnutí 500 hodin



Graf 9 Porovnání tloušťky IMC pro různé typy tavidel – stárnutí 750 hodin

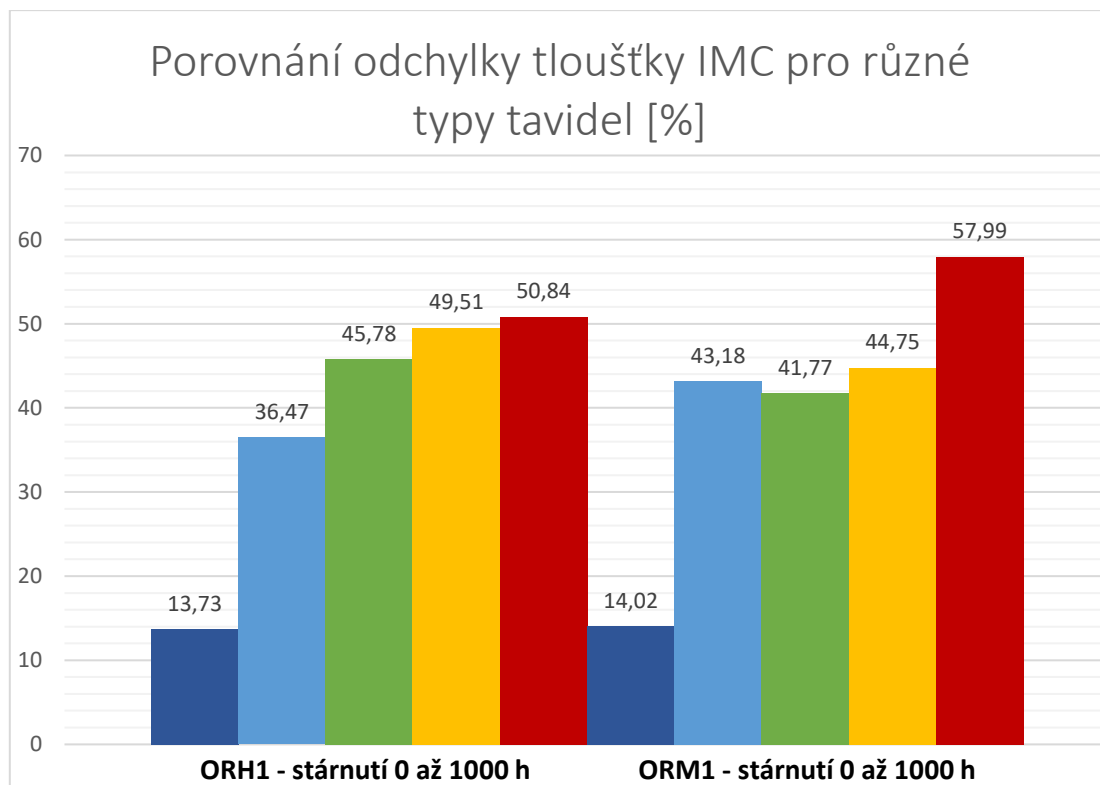


Graf 10 Porovnání tloušťky IMC pro různé typy tavidel – stárnutí 1000 hodin

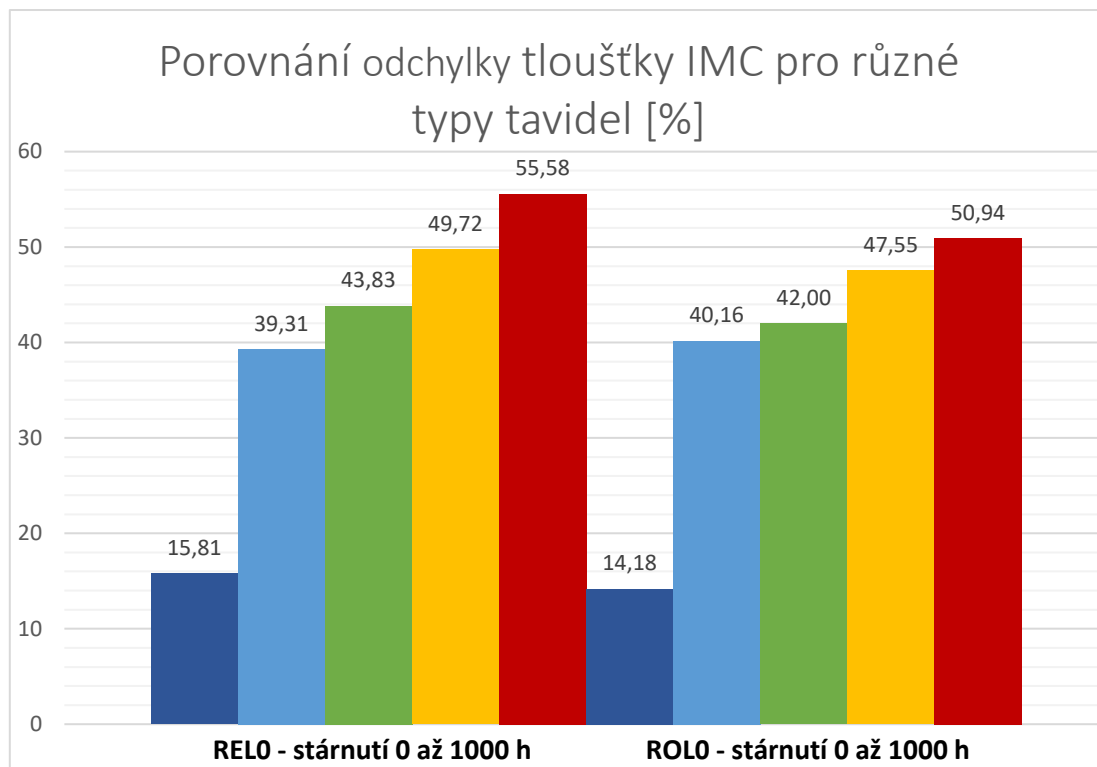
V grafech 6 až 10 je jednoznačně vidět, že je tloušťka IMC závislá na typu tavidla. Pájecí pasty s více agresivním organickým tavidlem (ORH1 a ORM1) mají po pájení menší tloušťku IMC než méně agresivní pájecí pasty s tavidlem resin a rosin (REL0 a ROL0). Při zrychleném stárnutí při teplotě 120 °C spoje zhotovené z agresivnějších pájecích past stárnou rychleji. Již po 250 hodinách stárnutí je tloušťka IMC tlustší pro agresivnější organické pájecí pasty. Po stárnutí 1000 hodin je rozdíl v tloušťce IMC mezi méně a více agresivními pastami cca 0,1 až 0,2 μm . Lze tedy prohlásit, že agresivita tavidla má vliv na růst tloušťky IMC.

3.2.7 Porovnání odchylek

V následujících grafech 11 a 12 jsou porovnány průměrné odchylky, které náleží průměrným hodnotám tlouštěk IMC z předchozí kapitoly. Jedna odchylka je tedy opět získána zpřůměrováním 18 hodnot. Z grafů vyplývá, že odchylka roste s delší dobou stárnutí. Tento fakt vypovídá o tom, že tloušťka IMC při stárnutí roste nepravidelně. Čím déle vzorky stárnou tím více nepravidelná je tloušťka IMC.



Graf 11 Porovnání odchylky tloušťky IMC pro různé typy tavidel ORH1 a ORM1



Graf 12 Porovnání odchylky tloušťky IMC pro různé typy tavidel REL0 a ROL0

3.2.8 Výpočet difuzních koeficientů

Jednotlivé typy pájecích past lze také porovnat pomocí difuzních koeficientů, které v tomto případě udávají množství difundující látky tvořící intermetalickou sloučeninu, která projde průřezem 1 um^2 za sekundu při koncentračním gradientu 1 mol/m . Difuzní koeficienty tedy vypovídají o rychlosti růstu tloušťky intermetalické sloučeniny. S určitým zjednodušením lze zapsat vztah pro tloušťku intermetalické vrstvy dle vzorce 1.

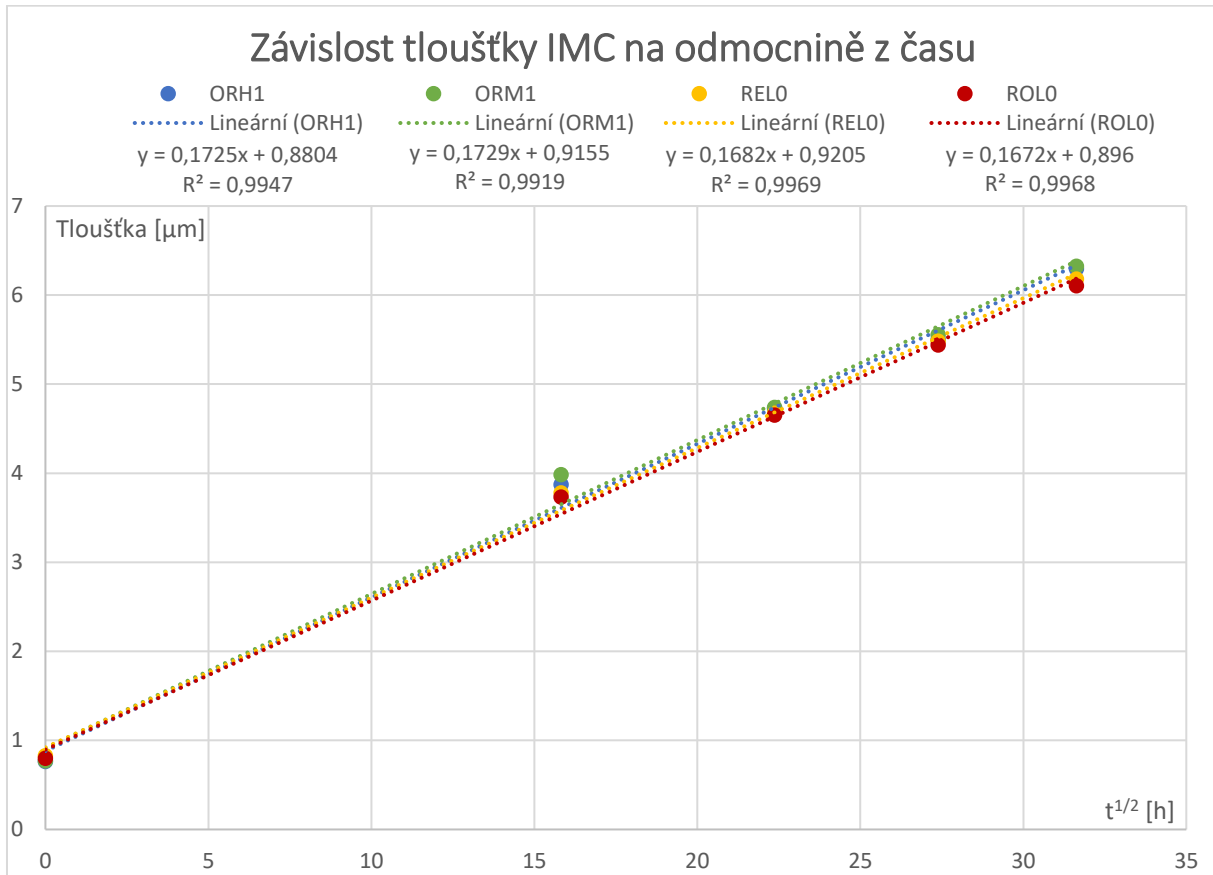
$$y = y_0 + \sqrt{D \cdot t} \quad (1)$$

Vytvoříme-li graf závislosti tloušťky IMC na odmocnině z času, tak dostaneme body, které lze proložit přímkou s předpisem ve vzorci 2, kde x je rovno odmocnině času t , k představuje odmocninu z difuzního koeficientu D , y_0 představuje počáteční tloušťku IMC hned po pájení (bez stárnutí) a y odpovídá tloušťce IMC v libovolném čase.

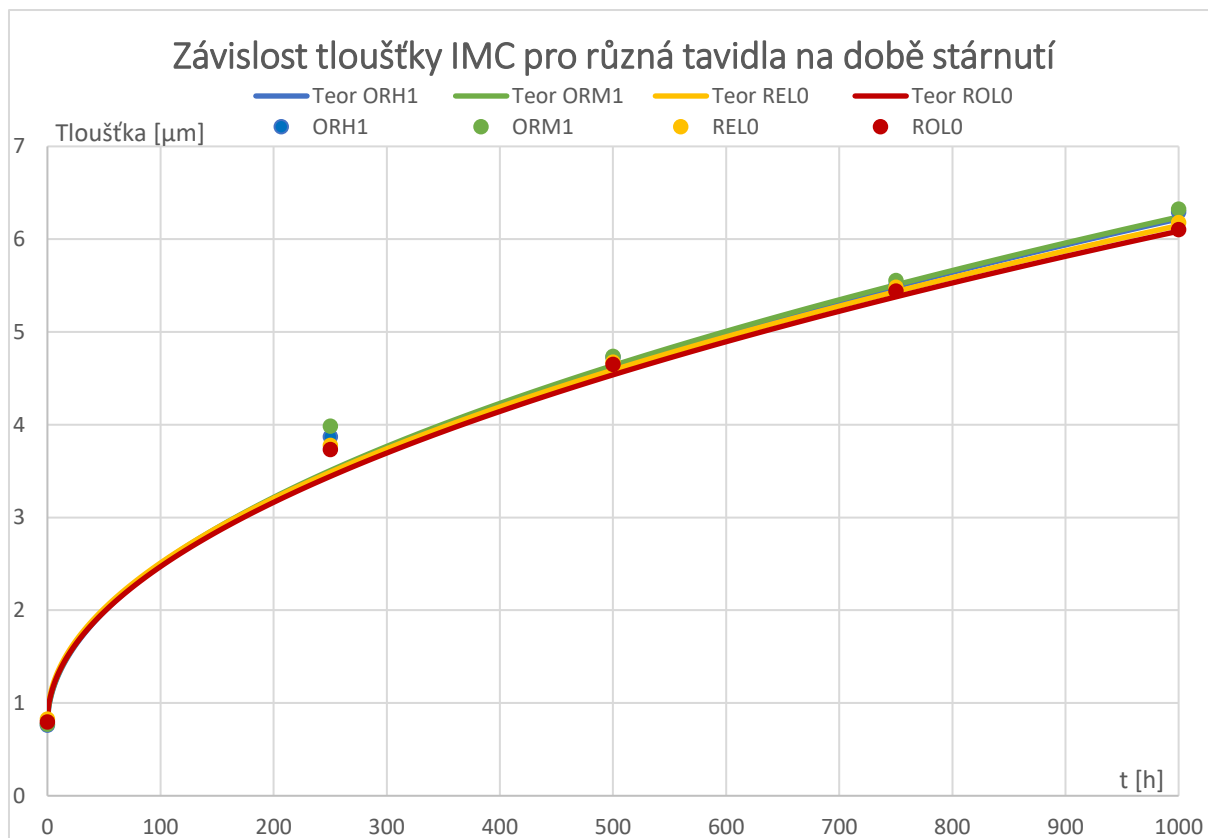
$$y = y_0 + k \cdot x \quad (2)$$

Pomocí difuzních koeficientů lze porovnat rychlost stárnutí jednotlivých typů pájecích past a zároveň lze díky vzorci uvedenému výše sestavit teoretický průběh růstu tloušťky IMC, který s určitou přesností bude odpovídat naměřeným (skutečným) hodnotám. Jako naměřené hodnoty jsou opět použity průměry z 18 hodnot, tzn. celkový průměr tloušťky IMC pro daný typ pájecí pasty a danou dobu stárnutí z 2 velikostí pájecí plošky, 3 různých váhových poměrů tavidla v pájecí pastě, přičemž každý vzorek byl vyroben 3x.

V grafu 13 lze vidět lineární proložení zprůměrovaných tloušťek IMC v závislosti na odmocnině z doby stárnutí. Pro každý typ pájecí pasty byla zhotovena jedna přímka, z jejíž předpisu směrnice byla zjištěna odmocnina z difuzního koeficientu D a hodnota spolehlivosti R^2 . Dosazením daného difuzního koeficientu a libovolných hodnot času do vztahu pro tloušťku IMC byl zhotoven graf 14, jehož body, představující průměrnou tloušťku IMC, jsou proloženy teoreticky dopočtenou křivkou.



Graf 13 Proložení naměřených dat přímkou



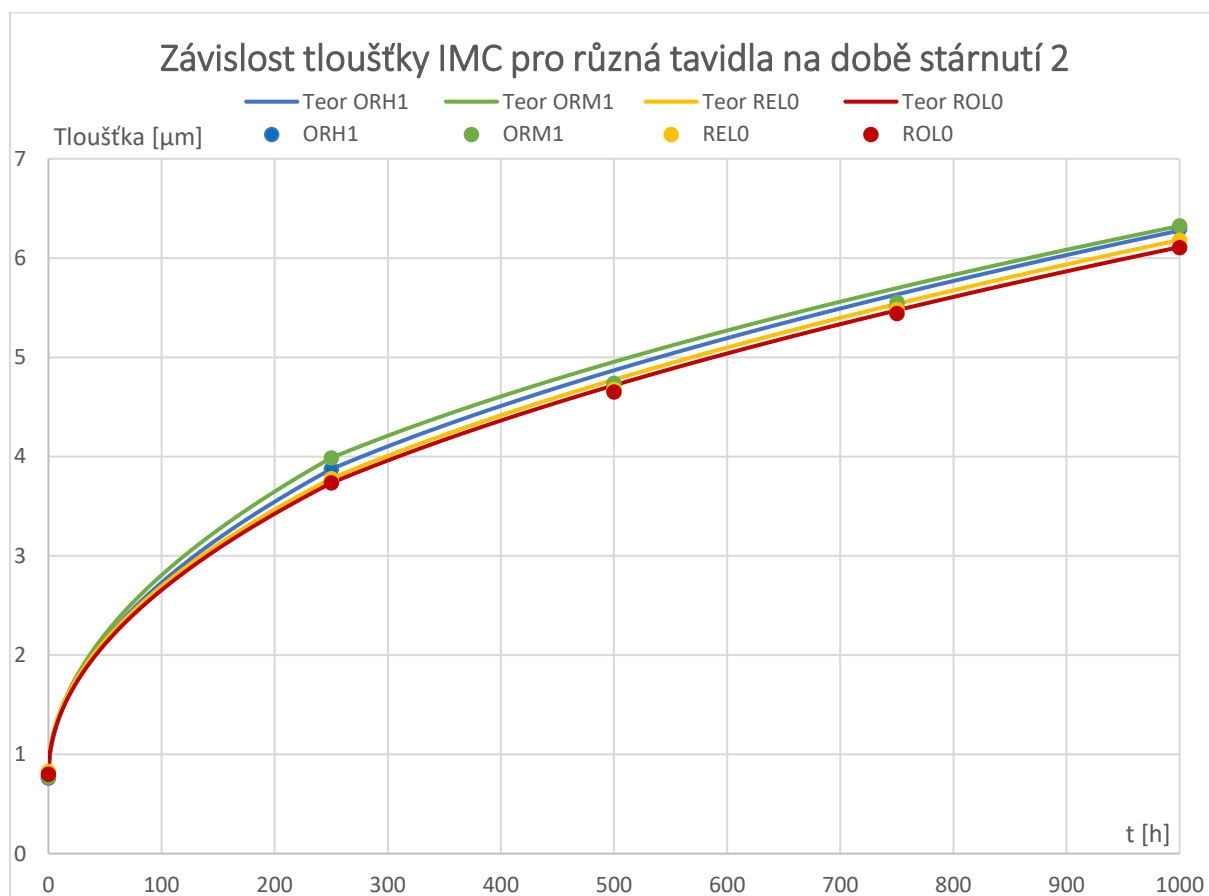
Graf 14 Závislost tloušťky IMC pro různá tavidla na době stárnutí

Z grafů 13 a 14 lze vypožorovat, že body odpovídající době stárnutí 250 hodin leží jak mimo přímku, tak mimo teoreticky dopočítanou křivku. Tento fakt je dán tím, že difuzní koeficient není během stárnutí konstantní. Proložení naměřených dat v závislosti na odmocnině z času jednou přímkou je tedy nepřesné. Díky tomu je nepřesná i teoreticky dopočítaná křivka, která je použita jako proklad naměřených hodnot.

Z tohoto důvodu byl sestrojen druhý graf (Graf 15), jehož teoreticky dopočítaná křivka je tvořena ze dvou hodnot difuzních koeficientů. První difuzní koeficient je dán směrnici přímky, která prokládá body pro 0 a 250 hodin stárnutí. Druhý difuzní koeficient je dán směrnici přímky, která prokládá body pro 250 až 1000 hodin stárnutí. Aby byla teoreticky dopočítaná křivka (která je složena ze dvou křivek) spojitá, bylo třeba k teoretickým hodnotám nad 250 hodin přičíst rozdílový koeficient Δy . Tento koeficient představuje rozdíl v tloušťce IMC mezi počátkem a koncem druhé a první teoreticky zjištěné křivky. Druhá křivka má oproti první značně menší difuzní koeficient, přičemž obě křivky vycházejí ze stejné počáteční tloušťky IMC y_0 , což má za následek skok v grafu, který je třeba kompenzovat. Rovnici pro křivku pro dobu stárnutí 250 hodin a více lze vidět ve vzorci 3.

$$y = y_0 + \Delta y + \sqrt{D \cdot t} \quad (3)$$

Graf s již upravenou křivkou je vidět níže. Oproti předchozímu grafu se metoda s dvěma difuzními koeficienty jeví jako přesnější.



Graf 15 Závislost tloušťky IMC pro různá tavidla na době stárnutí 2

Porovnáme-li grafy 14 a 15, pak dojdeme k závěru, že v případě prvního grafu je stárnutí z počátku více pozvolné a díky malým rozdílům difuzních koeficientů stárnou pájecí pasty téměř stejně rychle. Naopak z druhého grafu vyplývá, že v prvních 250 hodinách je jednoznačně rychlejší stárnutí spojů s agresivnějšími pájecími pastami ORH1 a ORM1. Vzhledem k tomu, že tloušťka IMC narostla nejvíce v prvních 250 hodinách stárnutí, lze považovat druhý graf za přesnější, protože lépe vystihuje prvních 250 hodin stárnutí než graf první. V tabulce 9 jsou zobrazeny hodnoty zjištěných difuzních koeficientů. Hodnoty odpovídají zjištění v kapitole porovnání tloušťky IMC v závislosti na typu tavidla. Pro první variantu (proklad s jedním difuzním koeficientem) vychází hodnota D pro více agresivní ORH1 a ORM1 lehce vyšší než pro zbylá dvě méně agresivní tavidla. Pro druhou variantu (proklad s dvěma difuzními koeficienty) vychází hodnota $D(1)$, tj. pro 0 až 250 hodin, opět vyšší pro tavidla ORH1 a ORM1. Pro $D(2)$ jsou mezi hodnotami difuzních koeficientů menší rozdíly. Dalo by se tedy říct, že po době stárnutí 250 hodin roste tloušťka IMC pro všechny typy tavidla přibližně stejně rychle.

Dle difuzních koeficientů uvedených v tabulce 9 stárnou pájené spoje s vyšší agresivitou tavidel ORH1 a ORM1 rychleji než pájené spoje s méně agresivními resin a rosin tavidly. V grafu 15 je vidět, že tloušťka IMC je větší pro více agresivní organická tavidla, což jen potvrzuje zjištění v tabulce 9. Lze tedy prohlásit, že typ a agresivita tavidla mají vliv na růst tloušťky IMC.

Tabulka 9 Difuzní koeficienty

Dif. koef.	ORH1	ORM1	RELO	ROLO	Varianta
$D^{1/2}$ [$\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$]	0,1725	0,1729	0,1682	0,1672	1
D [$\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$]	0,0298	0,0299	0,0283	0,0280	
$D^{1/2}$ (1) [$\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$]	0,1967	0,2033	0,1866	0,1856	2
D (1) [$\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$]	0,0387	0,0413	0,0348	0,0344	
$D^{1/2}$ (2) [$\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$]	0,1520	0,1478	0,1520	0,1503	
D (2) [$\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$]	0,0231	0,0218	0,0231	0,0226	

3.2.9 Vliv zrychleného stárnutí

V grafu 15 a zároveň v tabulce 10 lze pozorovat vliv zrychleného stárnutí na tloušťku IMC. Zrychlené stárnutí při teplotě 120 °C má zásadní vliv na tloušťku IMC již po 250 hodinách, kdy je IMC přibližně 4,9x tlustší, než je tloušťka IMC bez stárnutí. Zároveň lze pozorovat, že po 250 hodinách pájené spoje stárnou při stejných podmínkách pomaleji. Po stárnutí 1000 hodin je tloušťka IMC přibližně 7,9x tlustší, než je tloušťka IMC bez stárnutí. Vliv zrychleného stárnutí na tloušťku IMC je tedy oproti ostatním faktorům jednoznačně největší.

Tabulka 10 Vliv stárnutí na tloušťku IMC

Doba stárnutí [h]	ORH1 [μm]	ORM1 [μm]	RELO [μm]	ROLO [μm]	Průměr [μm]	Násobek [-]
0	0,763	0,772	0,828	0,799	0,791	1,0
250	3,874	3,986	3,778	3,734	3,843	4,9
500	4,729	4,739	4,676	4,652	4,699	5,9
750	5,503	5,555	5,483	5,442	5,496	7,0
1000	6,295	6,325	6,180	6,106	6,226	7,9

4 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá faktory, které mohou ovlivňovat růst intermetalických vrstev vzniklých během procesu pájení. Praktická část je zaměřena zejména na vliv velikosti pájecích plošek, váhového poměru tavidla v pájecí pastě, typu (agresivity) tavidla a doby zrychleného stárnutí na tloušťku IMC. Praktická část se zároveň věnuje materiálové analýze, která ověřuje, jaké typy intermetalických slitin (vrstev) vznikají na rozhraní pájecí plošky a v objemu pájky.

V praktické části bylo zhotoveno a zpracováno 360 snímků intermetalických vrstev. Množství snímků odpovídá možným kombinacím, které lze pro jednotlivé vlivy zhotovit. Porovnávány jsou tloušťky IMC pro kombinace 2 velikostí šířky pájecích plošek (2 a 3 mm), 3 váhových poměrů tavidla v pájecí pastě (10, 15 a 20 %), 4 typů pájecích past (2 více agresivní organická tavidla typu ORH1, ORM1 a 2 méně agresivní resin a rosin tavidla typu REL0, ROL0), 5 dob stárnutí (0, 250, 500, 750 a 1000 hodin) při teplotě 120 °C, přičemž každý vzorek byl zhotoven 3x. To vše pro 1 typ pájecích zrn (Sn42/Bi57/Ag1), 1 typ pájecích plošek (měděné s povrchovou úpravou OSP) a bez nepájivé masky. Původně byl uvažován váhový poměr tavidla 5 %, ovšem kvůli problémům s přetavením byla tato možnost vyloučena. Zároveň byly z hodnocení vyřazeny spoje s velikostí pájecích plošek 1 mm, protože se pro tuto velikost nepovedlo zhotovit ideální výbrusy.

Díky materiálové analýze provedené pomocí elektronového mikroskopu byly v pájených spojích s pastou SnBiAg nalezeny intermetalické sloučeniny odpovídající pájecí pastě SnAg. Tento fakt je dán tím, že se bismut neúčastní při tvorbě intermetalických sloučenin, tudíž při pájení na měděném povrchu vznikají sloučeniny Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn a Ag_3Sn . Vrstva Cu_3Sn obsahuje více mědi, díky čemuž je tvrdší a křehčí než vrstva Cu_6Sn_5 . Cu_3Sn je detekovatelná až po stárnutí 250 hodin a vzniká blíže k měděnému povrchu než vrstva Cu_6Sn_5 . Sloučeniny Ag_3Sn byly detekovány pouze v objemu pájky, přičemž v některých případech vrstva Cu_6Sn_5 během stárnutí prorostla až ke sloučenině Ag_3Sn .

Jako první faktor byl zkoumán vliv velikosti pájecí plošky. V některých případech jsou si hodnoty tloušťky IMC pro pájecí plošky šířky 2 a 3 mm velmi blízké, v jiných jsou naopak hodnoty výrazně odlišné. IMC je tlustší pro větší pájecí plošku v 31 případech z 60. Z toho vyplývá, že nelze jednoznačně říct, zda má rozdíl v šířce pájecí plošky o 1 mm zásadní vliv na tloušťku IMC. Ke zpřesnění tohoto pokusu by bylo zapotřebí provést více měření, aby bylo možno zprůměrovat tloušťky IMC z více snímků, a zároveň by bylo zapotřebí zvolit větší rozdíl ve velikosti pájecí plošky. Znatelný rozdíl by možná mohl být pozorovatelný například při zhotovení průměru z 10 snímků pro šířku pájecích plošek 2 a 4 mm.

Dále byl sledován vliv váhového poměru tavidla v pájecí pastě. Z grafů 1 až 5 lze pozorovat, že jsou si hodnoty tloušťky IMC pro jednu danou dobu stárnutí 0 a 250 hodin velmi blízké. Pro stárnutí 500, 750 a 1000 hodin jsou mezi hodnotami pro danou dobu stárnutí výraznější rozdíly. Tloušťka IMC tedy roste nerovnoměrně. V tomto případě lze pozorovat rozdíl mezi pájecími pastami s méně a více agresivními tavidly. Pro větší množství neagresivního tavidla na bázi resin a rosin (REL0 a ROL0) nelze pozorovat jednoznačnou závislost mezi poměrem váhového množství tavidla a tloušťky IMC. Tloušťka IMC je větší pro větší množství tavidla v pájecí

pastě jen v 14 z 30 případů. Naopak pro agresivnější organická tavidla (ORH1 a ORM1) vychází větší tloušťka IMC pro větší množství tavidla v pájecí pastě v 24 z 30 případů. Lze tedy říct, že při použití agresivnějšího typu tavidla s obsahem 2 a více procent halogenidů záleží na váhovém poměru tavidla v pájecí pastě. Čím více agresivního tavidla je obsaženo v pájecí pastě, tím tlustší je IMC.

Jako další možný faktor byl uvažován typ (agresivita) tavidla. Při porovnání tloušťek IMC pro jednotlivé typy tavidel lze konstatovat, že při pájení jako takovém si lépe vedou pájecí pasty s organickým tavidlem. Pro 0 hodin stárnutí je tloušťka IMC pro organická tavidla typu ORH1 a ORM1 tenčí než pro tavidla REL0 a ROL0 na bázi pryskyřice. Při stárnutí jsou více agresivní organická tavidla naopak horší. Pro 250 až 1000 hodin vychází pro ORH1 a ORM1 tlustší IMC než pro REL0 a ROL0. Agresivita tavidla má tedy vliv na rychlost stárnutí pájeného spoje. Ten samý závěr lze vyvodit při porovnání difuzních koeficientů, které v prvních 250 hodinách vycházejí pro více agresivní tavidla jednoznačně větší. Po 250 hodinách vycházejí difuzní koeficienty pro všechny 4 pájecí pasty podobně.

Jako poslední byl zhodnocen vliv zrychleného stárnutí, tzn. vystavení vzorků zvýšené teplotě 120 °C po dobu 1000 hodin. Stárnutí má ze všech zkoumaných faktorů největší dopad na tloušťku IMC. Hned po pájení je celková průměrná tloušťka IMC všech vzorků přibližně 0,79 μm, již po 250 hodinách stárnutí je tloušťka IMC cca 3,84 μm, což je skoro 5x více. Po stárnutí 1000 hodin je tloušťka IMC 6,23 μm, což je skoro 8x více než původní tloušťka po pájení. Oproti ostatním vlivům, které navýšily tloušťku IMC v řádech desetin μm, zvýšená teplota navýšila tloušťku IMC v řádech jednotek μm. Z toho lze vyvodit závěr, že elektronika jako taková potřebuje kvalitní chlazení, aby se uvnitř krytu výrobku nehromadilo teplo a nedocházelo ke zrychlenému stárnutí nejen pájených spojů.

S ohledem na stárnutí lze také pozorovat rozdíly v průměrných odchylkách tloušťek IMC, pomocí kterých lze zhodnotit členitost vrstev. Pro spoje, které se nenechaly stárnout, odchylky vycházejí pod 16 %. Po stárnutí 250 hodin je odchylka vyšší než 36 % a pro stárnutí 1000 hodin je odchylka vyšší než 50 %. Tento fakt vypovídá o tom, že tloušťka IMC roste během stárnutí nerovnoměrně. Zároveň z toho také vyplývá, že mezi hodnotami tloušťek IMC pro stárnutí 250 hodin a více mohou být větší rozdíly. Díky nepravidelnému růstu IMC může být na každém snímku IMC jinak různorodá.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Ruční pájení [1]	9
Obrázek 2 Nákres tří zónové tunelové pece Mistral 260 [2].....	10
Obrázek 3 Pájecí zrna typu 4 (20–38 μm) [3] [4]	11
Obrázek 4 Úrovně smáčivosti při pájení [1]	12
Obrázek 5 Struktura pájeného spoje [1]	15
Obrázek 6 Růst tloušťky IMC při různých teplotách v závislosti na čase [9].....	16
Obrázek 7 Teplotní profil při pájení přetavením [14]	19
Obrázek 8 Ukázka výbrusu DPS zalité v pryskyřici [8]	20
Obrázek 9 Složení elektronového a optického mikroskopu [16]	21
Obrázek 10 Nákres navržené DPS	24
Obrázek 11 Pájecí pasta s váhovým obsahem tavidla 5 %	25
Obrázek 12 Pájecí pasta s váhovým obsahem tavidla 20 %	25
Obrázek 13 SMD šablona	26
Obrázek 14 Ilustrační fotka tunelové pece Mistral 260 [1].....	26
Obrázek 15 Pájené spoje s 10 % tavidla.....	27
Obrázek 16 Držák na výbrusy elektronového mikroskopu	28
Obrázek 17 Pájený spoj s přiblížením 270x.....	28
Obrázek 18 Line scan – klasifikace tavidla ORH1 – poměr tavidla v pájecí pastě 10 % – doba stárnutí 0 h – šířka pájecí plošky 2 mm.....	29
Obrázek 19 Line scan – klasifikace tavidla REL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 10 % – doba stárnutí 250 h – šířka pájecí plošky 2 mm.....	30
Obrázek 20 Line scan – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 10 % – doba stárnutí 1000 h – šířka pájecí plošky 2 mm.....	31
Obrázek 21 IMC – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 15 % – doba stárnutí 0 h – šířka pájecí plošky 3 mm.....	32
Obrázek 22 IMC – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 10 % – doba stárnutí 250 h – šířka pájecí plošky 2 mm.....	32
Obrázek 23 IMC – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 15 % – doba stárnutí 500 h – šířka pájecí plošky 3 mm.....	33
Obrázek 24 IMC – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 10 % – doba stárnutí 750 h – šířka pájecí plošky 2 mm.....	33
Obrázek 25 IMC – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 20 % – doba stárnutí 1000 h – šířka pájecí plošky 3 mm.....	34
Obrázek 26 Binary select – klasifikace tavidla ROL0 – poměr tavidla v pájecí pastě 20 % – doba stárnutí 1000 h – šířka pájecí plošky 3 mm	34

Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozdělení tavidel [7]	14
Tabulka 2 Druhy IMC na rozhraní pájecí plošky po pájení a zrychleném stárnutí 125 °C/1000 h [10]	17
Tabulka 3 Parametry použitých tavidel	24
Tabulka 4 Zprůměrované tloušťky IMC ze 3 hodnot	35
Tabulka 5 Porovnání tloušťky IMC v závislosti na velikosti pájecí plošky	36
Tabulka 6 Zprůměrované tloušťky IMC z 6 hodnot (LM)	37
Tabulka 7 Porovnání tloušťky IMC v závislosti na váhovém poměru tavidla	40
Tabulka 8 Zprůměrované tloušťky IMC z 18 hodnot (10, 15, 20, LM)	41
Tabulka 9 Difuzní koeficienty	49
Tabulka 10 Vliv stárnutí na tloušťku IMC	49

Seznam Grafů

Graf 1 Porovnání tloušťky IMC pro různé poměry tavidla v pastě – stárnutí 0 hodin	37
Graf 2 Porovnání tloušťky IMC pro různé poměry tavidla v pastě – stárnutí 250 hodin	38
Graf 3 Porovnání tloušťky IMC pro různé poměry tavidla v pastě – stárnutí 500 hodin	38
Graf 4 Porovnání tloušťky IMC pro různé poměry tavidla v pastě – stárnutí 750 hodin	39
Graf 5 Porovnání tloušťky IMC pro různé poměry tavidla v pastě – stárnutí 1000 hodin	39
Graf 6 Porovnání tloušťky IMC pro různé typy tavidel – stárnutí 0 hodin.....	41
Graf 7 Porovnání tloušťky IMC pro různé typy tavidel – stárnutí 250 hodin.....	42
Graf 8 Porovnání tloušťky IMC pro různé typy tavidel – stárnutí 500 hodin.....	42
Graf 9 Porovnání tloušťky IMC pro různé typy tavidel – stárnutí 750 hodin.....	43
Graf 10 Porovnání tloušťky IMC pro různé typy tavidel – stárnutí 1000 hodin.....	43
Graf 11 Porovnání odchylky tloušťky IMC pro různé typy tavidel ORH1 a ORM1.....	44
Graf 12 Porovnání odchylky tloušťky IMC pro různé typy tavidel REL0 a ROL0.....	45
Graf 13 Proložení naměřených dat přímkou	46
Graf 14 Závislost tloušťky IMC pro různá tavidla na době stárnutí	47
Graf 15 Závislost tloušťky IMC pro různá tavidla na době stárnutí 2	48

Seznam zkratek

DPS – deska plošných spojů

IMC – intermetallic compound

SMT – surface mount technology

THT – through-hole technology

TEM – transmission electron microscopy

SEM – surface electron microscopy

Ag – stříbro

Bi – bismut

Cu – měď

Ni – nikl

Sn – cín

Citovaná literatura

- [1] J. Slavata, Elektricky vodivé spoje, Bakalářská práce, ČVUT v Praze, 2019.
- [2] SPIDÉ, Mistral 260 - Forced Air Convection Oven - User manual, 2016.
- [3] AIM - The Impact of Reduced Alloy Powder Size on Solder Paste Print Performance.
- [4] AIM - Solder Paste Powder: When to Downsize.
- [5] IDC Technologies - Mechanical Engineering - Technical References - Fluxes for Soldering.
- [6] M. L. Mingos, Electronic Materials Handbook, Vol 1, 1989.
- [7] EPTAC CORPORATION - Flux Classification Webinar.
- [8] A. Petráč, Vliv tavidla na tloušťku intermetalické vrstvy u pájených spojů, Diplomová práce, ČVUT v Praze, 2018.
- [9] J. Meliš, Mechanické vlastnosti pájeného spoje, Bakalářská práce, VUT v Brně, 2010.
- [10] P. Hrabak, Vznik intermetalických sloučenin, Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2014.
- [11] J. Podzemský, Degradace spojů pájených pájkami bez olova, Disertační práce, ČVUT v Praze, 2015.
- [12] V. Wirth, Vliv intermetalických sloučenin na kvalitu bezolovnatého spoje, Disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2014.
- [13] AMTECH, NC-31, No-Clean Solder Paste (datasheet), 2015.
- [14] N. Němeček, Analýza voidů v pájených spojích, Bakalářská práce, ČVUT v Praze, 2018.
- [15] M. Tobola, Metalografický výbrus DPS: inspekční a vývojová metoda, 2011.
- [16] K. Dušek, Přednáška o elektronové mikroskopii, ČVUT FEL v Praze, 2020.
- [17] Reza Sayyadi a Homam Naffakh-Moosavy, The Role of Intermetallic Compounds in Controlling the Microstructural, Physical and Mechanical Properties of Cu-[Sn- Ag-Cu-Bi]-Cu Solder Joints, Nature - Scientific Reports, 2019.
- [18] AMTECH, 4300/LF-4300-TF, Water Washable Tacky Flux (datasheet), 2015.

[19] AMTECH, NC-559-ASM-TF, No-Clean Tacky Flux (datasheet), 2015.

[20] AMTECH, NWS-4200, Water Washable Tacky Flux (datasheet), 2015.