

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Intermetalické sloučeniny bezolovnatých pájecích slitin

Autor práce: **Bc. Petr Příbek**
Vedoucí práce: **doc. Ing. František Steiner, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr PŘIBEK**
Osobní číslo: **E20N0020P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Intermetalické sloučeniny bezolovnatých pájecích slitin**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s problematikou bezolovnatých pájecích slitin a tvorby intermetalických sloučenin.
2. Zpracujte rešerši současného stavu v oblasti zkoumání intermetalických sloučenin (IMC) bezolovnatých pájek.
3. Stanovte faktory ovlivňující tloušťku a složení IMC.
4. Navrhněte experiment pro stanovení míry vlivu jednotlivých faktorů a experiment realizujte.
5. Vyhodnoťte realizovaný experiment a navrhněte doporučení pro praxi.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Klein Wassink, R. J. Soldering in Electronics
2. Hwang, J. Environment-Friendly Electronics: Lead-free Technology
3. Coombs, Clyde F. Printed circuits handbook
4. Internet

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou bezolovnatých pájecích slitin a tvorbou intermetalických sloučenin v jejich objemu. V teoretické části je nastíněna obecná problematika pájení včetně její fyzikální podstaty. Dále se práce zabývá popisem současné situace ohledně výzkumu intermetalických sloučenin v pájených spojích a jejich vlastností v závislosti na různých faktorech.

V rámci praktické části práce je popsán návrh experimentu, který byl vytvořen na základě daných faktorů, ovlivňujících růst intermetalických vrstev v pájených spojích. Ovlivňujícími faktory jsou v rámci experimentu: typ použité pájecí slitiny (SnNiGe, SnNiCoP, SAC305, SnCu_{0,2}NiGe a SnCu_{0,2}NiCo), počet přetavení pájeného spoje (jednou, dvakrát, třikrát) a typ použité zkoušky tepelným namáháním (bez tepelného zatížení, šoková teplotní zkouška, zkouška tepelným zatížením). Je popsán postup vyhotovení zkušebních vzorků včetně způsobu následného měření tloušťek intermetalických vrstev uvnitř pájených spojů pomocí fluorescenčního mikroskopu. V rámci práce jsou analyzována a vyhodnocována naměřená data tloušťek intermetalických vrstev a zbývajících měděných vrstev.

Klíčová slova

Pájění, bezolovnatá pájecí slitina, intermetalická sloučenina, pájený spoj, DOE

Abstract

The diploma thesis deals with the issue of lead-free solder alloys and the formation of intermetallic compounds in their volume. The theoretical part outlines the general issues of soldering, including its physical nature. Furthermore, the work deals with the description of the current situation regarding the research of intermetallic compounds in soldered joints and their properties depending on various factors.

The practical part of the work describes the design of the experiment, which was created based on the factors affecting the growth of intermetallic layers in soldered joints. The influencing factors in the experiment are: the type of used solder alloy (SnNiGe, SnNiCoP, SAC305, SnCu_{0,2}NiGe, SnCu_{0,2}NiCo), the number of reflow of the soldered joint (once, twice, three times) and the type of used thermal stress test (no heat load, temperature shock test, heat load test). The procedure for making test specimens is described, including the method of subsequent measurement of the thicknesses of intermetallic layers inside soldered joints using a fluorescence microscope. The measured data of intermetallic layers and copper layers are analyzed and evaluated within the work.

Key Words

Soldering, lead-free solder alloy, intermetallic compound, solder joint, DOE

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Františku Steinerovi, Ph.D. za odborné vedení při zpracování práce a užitečné rady v oblasti problematiky růstu intermetalických sloučenin během zpracování práce.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2021-003 „Materiály, technologie a diagnostika v elektrotechnice“

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Teoretická část	- 2 -
1.1 Pájení	- 2 -
1.2 Teorie pájení	- 2 -
1.2.1 Difúze	- 3 -
1.2.2 Závislost difúze na poruchách krystalové mřížky.....	- 5 -
1.2.3 Rozpustnost základního materiálu v tekuté pájce.....	- 5 -
1.2.4 Smáčivost.....	- 6 -
1.2.5 Omezení použití olova v elektrotechnice	- 7 -
1.3 Pájecí slitiny.....	- 7 -
1.4 Povrchové úpravy.....	- 9 -
1.4.1 Hot Air (Solder) Leveling (HAL/HASL)	- 10 -
1.4.2 Imerzní cín.....	- 10 -
1.4.3 Imerzní zlato (ENIG/ENEPIG).....	- 11 -
1.4.4 Organické povrchy (OSP)	- 11 -
1.5 Intermetalické sloučeniny.....	- 12 -
1.5.1 Cu_3Sn a Cu_6Sn_5	- 12 -
1.5.2 Ni_3Sn_4	- 13 -
1.5.3 Ag_3Sn	- 13 -
1.6 Design of Experiment.....	- 13 -
1.7 Současný stav výzkumu IMC	- 14 -
1.7.1 Mechanické vlastnosti pájených spojů.....	- 14 -
1.7.2 Morfologie pájených spojů.....	- 16 -
1.7.3 Omezení růstu IMC.....	- 16 -
1.7.4 Vliv teplotního profilu na růst IMC	- 16 -
2 Experimentální část.....	- 18 -
2.1 Návrh experimentu.....	- 18 -
2.2 Materiály pro experiment	- 20 -
2.3 Příprava vzorků.....	- 20 -
2.4 Pájecí profil.....	- 22 -

2.5	Stárnutí vzorků.....	- 23 -
2.6	Vyhodnocení tloušťky intermetalických vrstev.....	- 25 -
2.7	Výsledky experimentu.....	- 28 -
2.7.1	Vliv počtu přetavení na výslednou tloušťku IMC	- 29 -
2.7.2	Vliv typu stárnutí na výslednou tloušťku IMC.....	- 34 -
2.7.3	Vliv použité pájecí slitiny na výslednou tloušťku IMC	- 39 -
2.7.4	Vliv počtu přetavení na úbytek mědi	- 40 -
2.7.5	Vliv typu stárnutí na úbytek mědi.....	- 45 -
2.7.6	Vliv použité pájecí slitiny na úbytek mědi	- 50 -
2.7.7	Analýza struktury intermetalické vrstvy v pájeném spoji	- 51 -
	Zhodnocení a závěr	- 57 -
	Literatura.....	- 59 -
	Přílohy	I

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek
<i>DFM</i>	Darkfield Microscopy, mikroskopie temného pole
<i>DOE</i>	Design of Experiment
<i>DPS</i>	deska plošných spojů
<i>ENEPIG</i>	Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold, pokovení pájecích plošek vrstvou zlata a paladia
<i>ENIG</i>	Electroless Nickel Immersion Gold, pokovení pájecích plošek vrstvou zlata
<i>HAL/HASL</i>	Hot Air (Solder) Leveling, povrchová úprava desky plošných spojů nanesením pájecí slitiny
<i>IMC</i>	Intermetallic compound – intermetalická vrstva
<i>NA</i>	Not Aged, vzorek nebyl podroben tepelnému stárnutí
<i>OSP</i>	Organic Solderability Preservative, ochrana DPS organickou vrstvou
<i>RoHS</i>	Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních
<i>S</i>	šoková teplotní zkouška
<i>SAC</i>	pájecí slitina o složení Sn-Ag-Cu
<i>SMT</i>	Surface Mount Technology, technologie povrchové montáže elektronických součástek
<i>TN</i>	tepelné namáhání, vzorek podroben zkoušce teplotního zatížení

Úvod

Pájecí slitiny tvoří spolu s pájecí ploškou pájený spoj. Ten je jedním z nejdůležitějších prvků nejen v elektrotechnickém odvětví. Na kvalitě pájených spojů stojí výsledné vlastnosti celých elektronických sestav. Nekvalitní pájený spoj může vyřadit z provozu méně i více důležitá elektrická zařízení. Aby bylo dosaženo vytvoření kvalitního pájeného spoje s požadovanými vlastnostmi, je potřeba pochopit změny ve struktuře pájeného spoje během procesu pájení. Při tomto procesu dochází vlivem rozpuštění pájecí slitiny a kontaktem s pájecí ploškou k difúzi pájecí slitiny do měděné vrstvy a následné tvorbě intermetalických sloučenin. Vytvoření intermetalické sloučeniny je nezbytné pro vytvoření kvalitního pájeného spoje. Intermetalická vrstva ovšem může nabývat různých tloušťek, chemických složení a struktur v závislosti na mnoha faktorech. Těmito ovlivňujícími faktory mohou být například typ použité pájecí slitiny a její složení, doba a teplota pájení, počet přetavení pájecí slitiny a mnohé další. Vlastnosti pájeného spoje jsou ovlivněny vlastnostmi intermetalické vrstvy na rozhraní pájecí slitiny a měděné pájecí plošky. Díky těmto vlastnostem může být pájený spoj pevnější, ale zároveň také křehčí, tudíž méně odolný vůči mechanickým rázům.

Dlouhá léta byla v elektrotechnickém průmyslu využívána pájecí slitina SnPb, která vykazovala velmi dobré vlastnosti. Kvůli toxicitě olova bylo nutné omezit použití olova, a tedy i SnPb pájecích slitin v elektrotechnice a najít za ně náhradu. V současné době se již používá řada bezolovnatých pájecích slitin, které nahrazují olovnaté pájky. Jejich výzkum se mimo jiné soustředí právě na tvorbu intermetalických sloučenin a jejich vývoj v čase v závislosti na vnějších a vnitřních vlivech. Aby bylo možné vylepšit vlastnosti pájených spojů skrze ovlivnění růstu intermetalické vrstvy, je potřeba nejdříve zjistit, jakým způsobem intermetalická vrstva roste při různých podmínkách.

Touto problematikou se diplomová práce zabývá. V rámci práce je zpracována rešerše v oblasti zkoumání intermetalických sloučenin a na základě ní jsou určeny faktory, ovlivňující růst intermetalické vrstvy v pájeném spoji. Cílem práce je návrh experimentu nadefinováním konkrétních faktorů, zkoumaných v rámci experimentu, a jejich úrovní. Na základě navrženého experimentu je vytvořeno požadované množství vzorků, u kterých se sleduje tloušťka intermetalické vrstvy a úbytek mědi v pájecí plošce. Podle naměřených dat je potřeba vyhodnotit vlivy daných faktorů na výslednou tloušťku intermetalické vrstvy.

1 Teoretická část

1.1 Pájení

Způsob metalurgického spojování jednotlivých kovových částí, při kterém nedochází k jejich natavení, ale pouze smáčení použitou pájecí slitinou, se nazývá pájení. Oproti svařování tedy nedochází k roztavení spojovaných kovů, ale pouze k jejich ohřátí na teplotu blízkou teplotě tavení pájecí slitiny, jinak nazývané pájky. Pájka má tu vlastnost, že při jejím natavení vzájemně difunduje s pájenými kovy a tím dochází k jejich spojení. [1], [2]

Aby bylo dosaženo kvalitního pájeného spoje, je nutné dodržet několik základních podmínek. Mezi tyto podmínky patří například smáčivost spojovaného materiálu tekutou pájkou. [1]

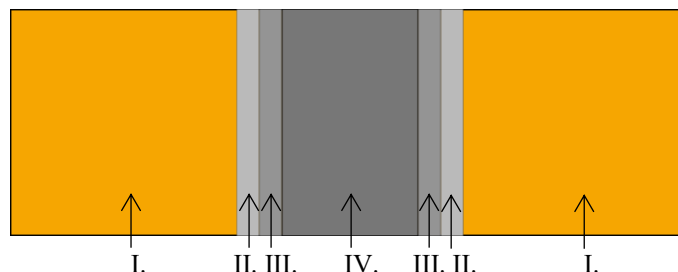
1.2 Teorie pájení

Pájení probíhá vzájemným stykem dvou různých materiálů, základního materiálu a tekuté pájky, po dobu trvání v řádu sekund až klidně minut, podle toho, jaký typ ohřevu byl zvolen pro pájení. Styk těchto dvou materiálů při působení zvýšené teploty je nejdůležitější předpoklad pro vznik metalurgických reakcí v pájené oblasti. V závislosti na použitých pájených materiálech a použité pájecí slitině může na hranici pájeného materiálu a tekuté pájky dojít buď k vytvoření adhezního spojení nebo k tomu, že prvky pájecí slitiny a pájeného materiálu začnou vzájemně difundovat. Dále může u některých základních materiálů docházet k jejich rozpouštění působením roztavené pájecí slitiny anebo složky pájky mohou začít reagovat s povrchovými oxidy přítomnými na základním materiálu. [1]

Adhezní spojení nastává tehdy, je-li spojovaný základní materiál takový, že při pájení nedochází k vzájemnému rozpouštění materiálu a pájecí slitiny. Vznik adhezního spojení je důležitý hlavně tehdy, potřebujeme-li, aby při pájení nedocházelo ke změnám chemického složení jednotlivých spojovaných materiálů. Vlastností adhezních spojů je například dobrá elektrická vodivost, ovšem na úkor horší pevnosti ve smyku a ohybu. [1]

Při pájení se v drtivé většině případů vytvářejí přechodové oblasti o určité tloušťce. Tyto oblasti se nazývají intermetalické sloučeniny a oproti základním materiálům a pájecím slitinám mají rozdílné fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti. Intermetalické sloučeniny tedy udávají vlastnosti pájeného spoje. Ve většině případů obsahuje pájený spoj čtyři oblasti. Tyto oblasti jsou znázorněny na obrázku (Obr. 1). První oblast (I.) je základní spojovaný materiál s případnými strukturálními změnami, způsobenými pájecím procesem

(působením tepla). Druhá oblast (II.) je přechodovou oblastí základního pájeného materiálu a třetí oblast (III.) je přechodová oblast navazující na pájecí slitinu. Čtvrtou oblastí (IV.) je poté pájecí slitina. Je třeba zmínit, že vznik všech těchto oblastí není bezpodmínečně nutný. [1]



Obr. 1: Schéma pájeného spoje s vyznačenými oblastmi: I. – základní spojovaný materiál, II. – přechodová oblast základního pájeného materiálu, III. – přechodová oblast navazující na pájecí slitinu, IV. – pájecí slitina. [1]

1.2.1 Difúze

Pokud dochází k vzájemnému pronikání atomů základního pájeného materiálu a pájky, projevuje se proces zvaný difúze. Podmínkou pro počátek přemísťování atomů jednotlivých materiálů je nehomogenita složení. Směr pohybu atomů pak určuje gradient koncentrace. Dále mají na vlastnosti difúze vliv například gradient teploty a aktivity nebo poruchy struktury. [1], [3]

K ověření skutečnosti, že tok atomů závisí na přítomnosti nehomogenit lze využít I. Fickův zákon:

$$I_A = -D_A \left(\frac{\delta C_A}{\delta x} \right), \quad (1.1)$$

kde I_A je tok prvku A v čase, D_A je součinitel difúze prvku A a C_A je koncentrace prvku A v dané soustavě. [1]

Ze vztahu I. Fickova zákona (1.1) vyplývá, že tok atomů se zmenšuje s ubývajícím množstvím nehomogenit v pájecí slitině a základním pájeném materiálu. Pokud se tedy složení pájecí slitiny a základního pájeného materiálu blíží homogennímu stavu, tok atomů se blíží nulové hodnotě. [1]

Dále se používá i II. Fickův zákon (1.2), který udává změnu koncentrace v daném bodě nebo ploše v čase. Tento zákon vychází z podmínky, která udává, že počet atomů difundujícího prvku zůstává stejný. [1]

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D \frac{\delta^2 C}{\delta x^2}, \quad (1.2)$$

kde C je koncentrace a D je součinitel difúze.

Tyto rovnice se považují za základní rovnice difúze a vychází z nich závislost součinitele difúze D na teplotě T :

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right), \quad (1.3)$$

kde D_0 je frekvenční faktor, Q je aktivační energie difúze a k je Boltzmannova konstanta.

Vztah (1.3) je určen empiricky na základě různých pokusů. Veličiny D_0 a Q nejsou v tomto případě teplotně závislé a jsou určovány pomocí grafické interpretace nebo jsou počítány z experimentálních výsledků. [1]

Tab. 1: Hodnoty difúzního součinitele D pro různé kombinace. [1]

Základní materiál	Difundující prvek	Teplota [°C]	D [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
Sn	Cu	160	$9,4 \cdot 10^{-13}$
Cu	Ni	800	$3,5 \cdot 10^{-10}$
Cu	Ni	840	$3,6 \cdot 10^{-10}$
Cu – Zn	Ni	840	$7 \cdot 10^{-10}$
Cu – P	Zn	700	$2 \cdot 10^{-10}$
Cu	Zn	800	$4,5 \cdot 10^{-10}$
Cu	Zn	840	$9,4 \cdot 10^{-9}$

Hloubku difúze lze vyjádřit pomocí II. Fickova zákona pomocí vztahu:

$$x^2 = 2Dt, \quad (1.4)$$

kde x je hloubka difúze, D je součinitel difúze a t je čas. [1]

Dosud zmíněné vztahy slouží hlavně k popisu chování difúze v čistých kovech. V reálné praxi se však ve většině případů setkáme s pájecími slitinami složenými z více různých složek. Tyto slitiny se ovšem chovají o poznání složitěji, než je tomu v případě jednosložkových pájek. Díky obsahu více různých prvků se v pájce vytváří tuhé roztoky, eutektické směsi, či intermetalické sloučeniny. [1]

Tuhé roztoky jsou chemické sloučeniny, ve kterých je množství jednoho prvku, jež leguje základní kov, tak malé, že se daný prvek do základního kovu rozpouští v jeho tuhém stavu. Sloučenina se jeví jako homogenní směs a tuhý roztok má krystalovou strukturu shodnou se základním kovem. Pokud hovoříme o sloučenině jako o eutektické směsi, znamená to, že daná sloučenina má takový poměr koncentrací složek, při kterém se během přechodu

z roztaveného do tekutého stavu netvoří krystaly tuhého roztoku jednotlivých složek, nýbrž se tavenina přemění přímo na směs dvou tuhých fází, nazývanou eutektikum. [4], [5]

Kvůli vytváření tuhých roztoků, eutektické směsi či intermetalickým sloučeninám, působí difúze, na rozdíl od jednoduchých kovů, v několika fázích. Výše zmíněné součinitele difúze (1.3), které lze jednoduše vyjádřit u čistých kovů, jsou ve víceprvkových sloučeninách závislé na vícero faktorech a obtížněji se určují pomocí součinitelů difúze pro čisté kovy. V případě víceprvkových sloučenin se tedy pro určení charakteru difúze a její rychlosti vystačí s určením hloubky difúzní vrstvy podle výše uvedeného vztahu (1.4). Při určování hloubky difúzní vrstvy se v tomto případě bere v potaz doba pájení a teplota, při které se pájí. [1]

1.2.2 Závislost difúze na poruchách krystalové mřížky

Jedním z faktorů, který ovlivňuje proces difúze, je struktura kovu, konkrétně struktura jeho krystalové mřížky. Kovy, jejichž struktura vykazuje velmi hustě uspořádané atomy, mají menší rychlost difúze než kovy, které mají prostorově centrovanou kubickou mřížku. Pokud se navíc v krystalové mřížce nacházejí poruchy, jako například hranové či šroubové dislokace, vakance či hranice zrn, součinitel difúze nadále roste. [1]

1.2.3 Rozpuštěnost základního materiálu v tekuté pájce

Při pájení dochází kromě difúze pájecí slitiny do základního materiálu také k rozpouštění základního materiálu v tekuté pájecí slitině. Rozpouštění je v podstatě přestup atomů z povrchu základního materiálu do tekuté pájecí slitiny. Při pájení dochází k přestupu atomů základního materiálu z míst, která mají shodnou teplotu tavení jako použitá pájecí slitina. Rozpouštění základního materiálu v tekuté pájce nemusí ovšem nastat vždy. Přejít atomů základního materiálu do tekuté pájky probíhá difúzí, v případě, že pájka i základní materiál jsou v klidu, nebo prouděním, za předpokladu, že pájecí slitina teče či proudí. Proces rozpouštění, respektive jeho kinetika, tuhé fáze (základního materiálu) v tekuté fázi (pájecí slitina) je formulován pomocí následujícího vztahu:

$$\frac{dQ}{dt} = K(C_0 - C) S, \quad (1.5)$$

kde $\frac{dQ}{dt}$ je množství látky rozpuštěné za jednotku času, S je povrch rozpouštějícího se základního materiálu, C_0 je koncentrace nasyceného tuhého roztoku, C je skutečná koncentrace tuhého roztoku v daném okamžiku a K je konstanta rychlosti rozpouštění. [1]

Základní kinetická veličina, charakterizující rozpouštění základního materiálu se nazývá konstanta rychlosti rozpouštění a je dána vztahem:

$$K = \frac{D}{x}, \quad (1.6)$$

kde D [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] je součinitel difúze rozpustnosti atomů v pájecí slitině a x [cm] je šířka difúzní zóny.

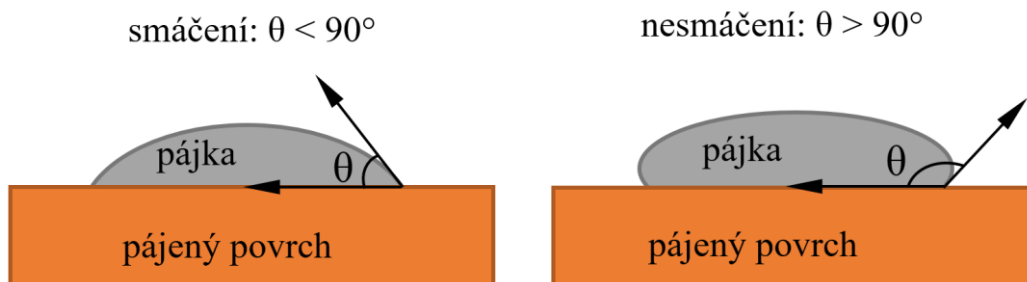
Proces rozpouštění základního materiálu v pájecí slitině ovlivňuje kromě samotného základního materiálu i pájecí proces. S rostoucí teplotou pájení se znatelně zvyšuje intenzita rozpouštění základního materiálu. Dalším faktorem, který může zvýšit intenzitu rozpouštění je druh použité pájecí slitiny či druh použitého základního materiálu. Větší rozpustnost základního materiálu vykazují pájky difundující na hranicích zrn onoho základního materiálu. Toto chování vykazují například pájecí slitiny s vyšším obsahem cínu. [1]

Rozpustnost základního materiálu je nechtěná vlastnost, obzvláště při pájení plošek, které jsou opatřeny povrchovými úpravami (například pokovení cínem, stříbrem či zlatem). V tomto případě dochází k rozpouštění převážně zlata. [1]

Pro omezení rozpouštění základního materiálu je vhodné snížit teplotu pájení a dobu, po kterou se bude pájet, a tedy vystavovat základní materiál a pájku vysokým teplotám. Zároveň lze rozpouštění omezit i použitím co nejmenšího množství pájecí slitiny. [1], [3]

1.2.4 Smáčivost

K vytvoření kvalitního metalurgického propojení mezi dvěma kovy je mimo jiné nutné zajistit kvalitní smáčivost obou povrchů. To znamená, že mezi pájecí ploškou, která má být zapájena, a pájecí slitinou musí dojít ke specifické interakci. Schopnost roztavené pájky téct nebo se šířit prostředím během procesu pájení je jedním z klíčových faktorů pro vznik kvalitního pájeného spoje. Smáčivost je tedy schopnost pájecí slitiny šířit se po jiném materiálu, většinou pájecí plošce. Míra smáčení je určena kontaktním úhlem. Jedná se o úhel na styku pevné látky a kapaliny v konkrétním prostředí. Pokud hodnota kontaktního úhlu leží mezi 0° a 90° , systém tvořený pájecí ploškou a pájkou je smáčivý. Naopak, pokud hodnota kontaktního úhlu dosahuje hodnot mezi 90° a 180° , systém je nesmáčivý a nedojde k vytvoření pevného a kvalitního pájeného spojení. [6]

Obr. 2: Závislost smáčení na kontaktním úhlu θ . [5]

1.2.5 Omezení použití olova v elektrotechnice

Dlouhou dobu byly k pájení v elektrotechnickém průmyslu využívány pájky s obsahem olova. Z celkové produkce olova bylo jen velmi malé množství (okolo 0,49 %) využíváno k výrobě pájek, používaných při výrobě elektronických zařízení. Přestože bylo olova v elektronice velmi málo, jeho přítomnost představovala a stále je velkým problémem. Velké množství elektronických výrobků totiž končí na odpadních skládkách, na kterých může za působení kyselých dešťů docházet k vylučování olova do vodních zdrojů. Přesněji řečeno se při působení kyselé vody z kyselých dešťů, vznikajících při znečištěné okolní atmosféře, olovo do zmíněných kyselých vod vylučuje a společně vytvářejí jedovatou sloučeninu rozpustnou ve vodě. Pokud se tedy ona sloučenina olova dostane do styku s některým vodním zdrojem, může ho kontaminovat. Tímto způsobem se olovo může dostat do lidského organismu, pro který je toxické, přestože otrava olovem je velmi pozvolná a vzniká při jeho dlouhodobém vystavení. [2]

V souvislosti se škodlivostí a toxicitou olova vydala v únoru roku 2003 Evropská unie směrnice, které se zabývají danou problematikou. První ze směrnic (WEEE – Waste Electrical and Electronic Equipment) se zabývá bezplatným zpětným odběrem, zpracováním, využíváním a odstraňováním použitých elektrických a elektronických výrobků. Druhá ze směrnic (RoHS – Restriction of Certain Hazardous Substances) se zabývá omezením používání některých nebezpečných látek (například rtuť, olovo, kadmium a šestimocný chrom) v elektrických a elektronických zařízeních. [2]

1.3 Pájecí slitiny

V současné době existuje celá řada různých pájecích slitin na bázi cínu bez obsahu olova. Výskyt olova a slitin obsahujících olovo je považován za riziko pro životní prostředí kvůli toxicitě olova. Přestože kvůli směrnici RoHS, omezující užívání olova při pájení, mělo být používání pájecích slitin na bázi cínu a olova ukončeno, stále se v pár aplikacích s těmito pájkami lze setkat. Jejich používání se však neustále snižuje. Velké množství bezolovnatých

pájek se využívá při výrobě různých elektronických zařízení, ovšem značná část je stále ve fázi vývoje a zkoumání vlastností při pájení. V největší míře se v průmyslových aplikacích využívá pájecí slitiny SAC složené z cínu, stříbra a mědi. Konkrétně se nejvíce využívá pájka SAC305 s 3% obsahem stříbra a 0,5% obsahem mědi, která je zároveň jednou z pěti zástupců pájecích slitin zkoumaných v průběhu experimentu.

Tab. 2: Příklad některých využívaných bezolovnatých pájecích slitin. [7]

Pájecí slitina	Teplota tavení (°C)	Aplikační poznámky
Bi-33In (eutektická)	109	Díky obsahu Bi nízká teplota tání pro některé aplikace.
Sn-52In	118	Specializované aplikace pro smáčení keramik a skel. Díky obsahu In nákladnější.
Sn-20Bi-10In	143 - 193	Kandidátská pájecí slitina pro nahrazení PbSn pájek. Potenciální segregace a problémy s tvorbou prasklin se zvyšujícím se obsahem Bi.
Sn-8Zn-3Bi	189 - 199	Prvek Zn zhoršuje odolnost proti korozi a snižuje smáčivost pájky.
Sn-3,5Ag (eutektická)	221	Vysoký bod tavení. Nejvhodnější náhrada blízko eutektických SnPb pájecích slitin.
Sn-0,7Cu (eutektická)	227	Nízká cena. Špatné mechanické vlastnosti.

Bezolovnaté pájecí slitiny, ať už využívané, či pouze testované, jsou binární, ternární či některé dokonce kvaternární. To znamená, že jejich složení odpovídá slitinám složeným ze dvou, tří či čtyř prvků. Ve vzácných případech se lze setkat i se slitinami složenými z více než čtyř prvků. Jedná se ovšem o ojedinělé aplikace či pouze výzkumné účely. V článku [6] věnovaném zkoumání bezolovnatých pájecích slitin užívaných v mikroelektronice autoři zmiňují až 69 různých bezolovnatých pájecích slitin. Cín je u velké části pájecích slitin dominantním prvkem. Když už ne dominantním, tak alespoň sekundárním. V přehledové tabulce pájecích slitin z článku [6] lze také vyčíst, že dalšími hlavními složkami bezolovnatých pájecích slitin jsou bismut a indium. Právě bismut je ve většině binárních či ternárních pájecích slitin, složených z bismutu a cínu, dominantním prvkem s podílem lehce přes 50 %. Příklady těchto slitin jsou například: Bi-42Sn, eutektická slitina Bi-43Sn nebo Bi-41Sn-1Ag. Dále se vyskytují pájecí slitiny s indiem jakožto majoritním prvkem.

Příkladem takových pájek jsou například: In-3Ag, In-34Bi nebo eutektická In-48Sn. Většina pájecích slitin je ovšem složená primárně z cínu. Jeho objem v pájecích slitinách často dosahuje hodnot přes 90 %. Příklady pájecích slitin, u kterých se dosahuje takového objemu cínu jsou například: Sn-4Ag, Sn-3,6Ag-1,5Cu nebo Sn-3Cu. Vedle india a bismutu se často do pájecích slitin přidávají prvky jako například: zinek, stříbro, antimon, měď a hořčík. Tyto prvky se v pájecích slitinách vyskytují v řádech jednotek procent. [6]

Jak již bylo zmíněno, cín je prvek, ze kterého se skládá většina pájecích slitin. Jeho obsah v pájkách je často velmi velký, a to díky jeho vlastnostem. Cín vykazuje dobrou smáčivost na spoustě různých substrátů. Teplota tavení elementárního cínu je 231 °C. Pro snížení teploty tavení se využívá dopování pájecích slitin dalšími prvky. [6]

1.4 Povrchové úpravy

V naprosté většině případů se pájecí plošky a jejich vodivé propojení na deskách plošných spojů vyrábí z mědi. Je to dáno jejími vynikajícími vodivými vlastnostmi a přijatelnou cenovou dostupností. Velkou nevýhodou je ovšem náchylnost mědi k oxidaci, která velkou mírou zhoršuje pájitelnost měděných plošek. Obzvláště v případě pájení SMT (z angl. Surface Mount Technology, tedy povrchová montáž) to může znamenat velký problém s kvalitou pájených spojů a jejich vlastností. Kvůli zamezení vytváření oxidů na povrchu měděných plošek na deskách plošných spojů se proto zavedly povrchové úpravy desek plošných spojů. Ty mají za cíl kromě zamezení koroze povrchu mědi také prodloužení životnosti pájeného spoje, zvýšení odolnosti vůči působení vyšších teplot a mnohá další zlepšení vlastností pájených spojů. [8]

Existuje vícero různých povrchových úprav, které budou detailněji rozepsány dále. Výběr vhodné povrchové úpravy závisí na různých faktorech. Například, zda se během výrobního procesu budou využívat různé speciální technologie, třeba wire bonding, nebo jestli bude docházet k lisování kontaktu přímo do plošného spoje. Dále je při výběru povrchové úpravy podstatné zvážit dobu skladování, tedy po jak dlouhé době od výroby desky plošných spojů a aplikaci povrchové úpravy dojde k připájení součástek. Výrobce DPS tedy předem definuje určitou dobu, po kterou je garantována pájitelnost pájecích plošek. Dalším faktorem může být volba použité pájecí slitiny, ať už bezolovnaté či olovnaté, pro každou mohou platit různé požadavky na provedenou povrchovou úpravu. O volbě povrchové úpravy může dále rozhodovat i prostředí, ve kterém bude výsledný produkt provozován. V tomto případě přichází v úvahu rozhodovat podle požadavku na zvýšenou teplotní odolnost či vlhkost a jiné

vlivy. Posledním, ale mnohdy také nejdůležitějším faktorem, je samozřejmě cena, která je při návrhu a výrobě produktu jedním z klíčových faktorů. [8]

1.4.1 Hot Air (Solder) Leveling (HAL/HASL)

Hot Air Leveling je povrchová úprava desky plošných spojů, při které dochází k ponoření dané desky do roztavené slitiny cínu (pájky) a případně dalších kovů. Po vysunutí desky plošných spojů z cínové lázně následně dochází k odstranění přebytku slitiny pomocí proudu horkého vzduchu. Tloušťka takto vytvořené ochranné vrstvy dosahuje jednotek mikrometrů. Z hlediska spotřebované energie se jedná o velmi náročný proces, při kterém navíc v důsledku tavení slitiny vzniká větší množství zplodin. Navzdory využití proudu horkého vzduchu není rovinnost pájecích plošek při použití technologie HAL zcela ideální. Deska plošných spojů je navíc při procesu vytváření povrchové úpravy metodou HAL vystavena velkým teplotním šokům, což se může odrazit na její celkové životnosti. Tato technologie byla velice rozšířena před zavedení restrikcí ohledně používání olova v elektrotechnice. Do té doby se k pokovení využívala slitina cínu a olova. V tomto případě docházelo při přetavení slitiny k uvolňování toxických zplodin z olova. [2], [9]

S příchodem směrnice RoHS se přešlo na použití metody Hot Air Leveling (HAL) s využitím bezolovnaté slitiny, do které se deska plošných spojů ponořuje. Jako slitina v HAL lázni se využívá stabilní eutektická homogenní směs Sn/Cu/Ni. Jelikož mají bezolovnaté slitiny vyšší teplotu tání, je při procesu nastavena vyšší pracovní teplota a tím pádem dochází k ještě většímu teplotnímu namáhání desek plošných spojů. [2]

1.4.2 Imerzní cín

Z názvu je patrné, že se jedná o imerzní pokovení měděné plošky cínem. Při imerzním pokovování dochází k nahrazování atomů mědi atomy cínu. Pájecí plošky opatřené povrchovou úpravou imerzním cínem vykazují stříbrnou barvu. Tato povrchová úprava je velmi vhodná pro pájení za použití bezolovnatých pájecích slitin. Zároveň jsou takto upravené pájecí plošky velmi rovné, a tudíž vhodné pro použití při osazování SMT součástek. Další výhodou této úpravy je její nízká cena. Vedle výhod má tato povrchová úprava také nevýhody a těmi jsou především tvorba intermetalických sloučenin při reakci mědi s cínem a poté i whiskerů, což jsou dlouhé a tenké útvary, podobné jehličkám, vzniklé z cínu, které mohou způsobovat zkraty. [8]

1.4.3 Imerzní zlato (ENIG/ENEPIG)

Povrchová úprava, která využívá pokovení pájecích plošek desek plošných spojů zlatem se nazývá ENIG, z anglického Electroless Nickel Immersion Gold, což v překladu znamená: bezproudé pokovení niklem a následné pokovení imerzním zlatem. V případě ENEPIG, z anglického Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold, se přidává bezproudé pokovení paladiem.

Pájecí plošky ošetřené povrchovou úpravou ENIG jsou díky nanesené vrstvě zlata zářivě zlaté. Před nanášením niklu se povrch měděné plošky vyčistí, odleptá a následně připraví v katalyzační lázni, pro snížení aktivační energie měděného povrchu. Po této přípravě se nanáší chemickou cestou vrstva niklu, dosahující 3–6 μm . Nikl chrání měď před prorůstáním intermetalickými sloučeninami. Po nanesení niklu se vrstva opatří imerzní vrstvou zlata, která niklovou vrstvu chrání před vznikem oxidů na jeho povrchu. Tloušťka imerzní zlaté vrstvy dosahuje 0,05 μm . Jestliže se niklová vrstva nepokryje zlatem dostatečně, začne jeho povrch oxidovat. Tento jev se nazývá „Black Pad“, jelikož zoxidovaný nikl vykazuje černé zbarvení. Oxidy niklu znemožňují kvalitní pájení. [8]

ENIG se hodí pro použití při pájení bezolovnatými pájecími slitinami. Zároveň je takto opatřený povrch velice rovný a vhodný pro aplikace SMT součástek. Jeho nevýhodou, kromě již zmíněné možné oxidace niklu, je jeho vysoká cena.

1.4.4 Organické povrchy (OSP)

Další povrchovou úpravou pájecích plošek desek plošných spojů jsou organické povrchy, zkráceně OSP (z anglického Organic Solderability Preservative). Při vytváření OSP povrchu se na měděnou pájecí plošku nanese organická vrstva (zpravidla deriváty benzotriazolu, imidazolu, fenyimidazolu či benzimidazolu). Takto nanesené vrstvy dosahují tloušťky od 0,2 do 0,5 μm . Výhodou je velmi nízká cena a rovinnost povrchu. Navíc lze tuto povrchovou úpravu kombinovat s povrchovou úpravou ENIG. Ovšem nevýhoda spočívá v krátké životnosti takto vytvořené ochrany. Desku plošných spojů opatřenou touto povrchovou úpravou je nutno osadit součástkami a zapájet do 6 měsíců od aplikace OSP. [8], [10]

1.5 Intermetalické sloučeniny

1.5.1 Cu_3Sn a Cu_6Sn_5

Při již zmíněné ochraně pájecích plošek povrchovými úpravami, především technologií HASL, dochází k reakci materiálu chráněné pájecí plošky (často měď či nikl) s pájecí slitinou. Při této reakci je postupně vytvářena intermetalická vrstva, jejíž tloušťka se pohybuje v řádu desetin mikrometrů. Vznik této intermetalické vrstvy je nezbytný pro dosažení přijatelné adheze mezi povrchem pájecí plošky a pájecí slitinou. Kromě toho dochází v objemu pájky k vytváření krystalických útvarů zmíněné intermetalické fáze. Pokud pájecí slitina s obsahem cínu zreaguje s podkladem (pájecí ploškou vyrobenou z mědi), dojde ke vzniku intermetalické sloučeniny s chemickým vzorcem Cu_6Sn_5 . Po určitém čase začne na rozhraní intermetalické vrstvy Cu_6Sn_5 a měděné pájecí plošky docházet k vytváření a růstu intermetalické vrstvy s chemickým vzorcem Cu_3Sn . Jestliže při procesu pájení zreaguje pájecí slitina obsahující cín s niklem, vytvoří se intermetalická vrstva s chemickým vzorcem Ni_3Sn_4 . Stejná situace nastává tehdy, pokud je v pájecí slitině obsaženo stříbro, které se přidává nejčastěji do pájecích slitin SAC (Sn – cín, Ag – stříbro, Cu – měď). V tomto případě dochází ke vzniku intermetalické vrstvy s chemickým vzorcem Ag_3Sn . [9], [11]

Tab. 3: Vlastnosti intermetalických sloučenin Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , Ni_3Sn_4 , mědi a niklu. [9], [12]

	Cu_6Sn_5	Cu_3Sn	Ni_3Sn_4	Ag_3Sn	Cu	Ni
Tvrdość podle Vickerse (kg/mm^2)	378	343	365	290	50	15
Youngův modul (GPa)	85,6	108,3	133,3	86	117	213
Poissonovo číslo (-)	0,309	0,299	0,33	-	0,34	0,3
Koeficient tepelné roztažnosti ($10^{-6}/\text{K}$)	16,3	19	13,7	-	16	12,9
Tepelná vodivost ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	34,1	70,4	19,6	-	386	90,5
Odpor ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	17,5	8,9	28,5	5	1,7	6,8
Hustota (g/cm^3)	8,28	8,9	8,65	9,9	8,96	8,91
Tepelná kapacita ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)	286	326	272	-	385	439

1.5.2 Ni₃Sn₄

Tato intermetalická sloučenina, jak už je z chemického názvu patrné, obsahuje nikl. Vyskytuje se tedy hojně v pájených spojkách, opatřených povrchovou úpravou ENIG, která spočívá v pokovení měděné pájené plošky vrstvou niklu a následně i vrstvou zlata. [13]

1.5.3 Ag₃Sn

Intermetalická sloučenina Ag₃Sn vzniká při použití bezolovnatých pájecích slitin s obsahem stříbra. Typickými zástupci těchto pájek jsou například pájky SAC (Sn, Ag, Cu).

Intermetalická sloučenina Ag₃Sn roste v objemu pájky, kde vytváří útvary blízké krystalkům a jehlicím. Bylo prokázáno, že intermetalická sloučenina Ag₃Sn má pozitivně velký vliv na pevnost v tahu výsledného pájeného spoje v porovnání s intermetalickou sloučeninou Cu₆Sn₅. Ag₃Sn tedy brání deformaci ve skluzu a zlepšuje tudíž mechanické vlastnosti pájeného spoje. [14]

1.6 Design of Experiment

Testování různých úrovní jednotlivých faktorů, tedy experimentování neboli souvislá změna běžných pracovních podmínek, která si bere za cíl najít nejlepší pracovní postupy a zároveň obdržet hlubší poznání ohledně vlastností výrobků a jejich výrobních procesů se nazývá Design of Experiment. [15], [16]

Postupy experimentů můžeme dělit na experimenty plánované a neplánované neboli živelné. Experimenty plánované jsou řízeny určitým experimentálním plánem. Experimentální plán definuje 3 základní charakteristiky. První z nich je počet pokusů, které jsou ke složení experimentu potřeba. Druhá charakteristika stanovuje podmínky, za nichž se uskuteční jednotlivé pokusy a poslední charakteristikou je pořadí, v jakém se jednotlivé pokusy uskuteční. Pokus je tedy proces, při kterém se zjišťuje hodnota jistého ukazatele kvality při splnění určitých podmínek výroby, které jsou předem naplánovány. Experiment namísto toho je soubor všech provedených pokusů. [15]

Navržený experiment má jistý ukazatel kvality (může jich být více), které vyhodnocují výsledné vlastnosti produktu. Experiment má dále různé faktory, které určitou měrou ovlivňují výsledné ukazatele kvality. Faktory mají dále různé úrovně, které by měly být jednoznačně popsány. Plánování experimentu si klade za cíl zjistit, jak velký vliv má který faktor na výsledné ukazatele kvality a tedy určit, který z daných faktorů ovlivňuje ukazatele kvality nejvyšší měrou. Kromě určení míry ovlivnění ukazatele kvality se dále určují

i úrovně významnějších faktorů tak, aby výsledný ukazatel byl co nejoptimálnější a stabilní. [15]

Design of Experiment, ve zkratce DOE je silná statistická technika sloužící k vylepšování návrhů produktů či jejich výrobních procesů a zároveň k řešení problémů vzniklých při výrobě. Standardizovaná verze DOE umožňuje aplikovat techniky optimalizace návrhu produktů a zjistit problémy ve výrobě. Design of Experiment byl vyvinut ve 20. letech R. A. Fisherem v Anglii. Jeho cílem bylo zjistit, jaký poměr deště, slunečního svitu a hnojiva zajistí největší produkci plodin. DOE tedy zjišťuje vliv různých proměnných působících současně při nějaké činnosti. Následně se pomocí DOE určí taková kombinace faktorů, které zajistí nejoptimálnější výsledky. Vstupy v DOE jsou tedy různé faktory, které mají určité množství úrovní. [17], [18]

1.7 Současný stav výzkumu IMC

Při pájení hraje na výslednou kvalitu pájeného spoje roli celá řada faktorů. Různé faktory mohou mít různě velké vlivy a jejich kombinace může také ovlivňovat výsledné vlastnosti pájeného spoje. Během pájení a bezprostředně po jeho dokončení dochází k růstu intermetalických vrstev uvnitř pájeného spoje. Na růst a tloušťku intermetalických vrstev má také vliv vícero faktorů. Jedním z hlavních faktorů je typ použité pájecí slitiny, která mimo jiné určuje, jaký druh intermetalických vrstev se bude v pájeném spoji tvořit. Rovněž i typ povrchové úpravy pájecí destičky. Dalšími faktory jsou zvolený pájecí profil a stárnutí pájených spojů. To znamená, zda byl pájený spoj během své životnosti provozován při pokojové teplotě a vlhkosti nebo při zvýšených teplotách, či při skokových změnách teplot. Jelikož intermetalické vrstvy ovlivňují jak elektrické, tak i mechanické vlastnosti pájených spojů, je jim věnována velká spousta výzkumných prací a článků.

1.7.1 Mechanické vlastnosti pájených spojů

Požadavek na stále se zvyšující objem elektronických součástek na deskách plošných spojů a s tím související redukcí velikosti samotných elektronických součástek, jejich vzdáleností od sebe a redukcí velikosti pájených spojů sebou přináší potřebu zdokonalení pájecího procesu. S přechodem pájecích slitin z olovnatých pájek na pájecí slitiny bez obsahu olova se stal výzkum intermetalických sloučenin mnohem důležitější, jelikož jejich růst v bezolovnatých pájecích slitinách nabývá na objemu, což ovlivňuje mechanické vlastnosti pájených spojů. Přítomnost intermetalických vrstev v pájených spojích je zdrojem selhání elektronického systému, kvůli lámání pájeného spoje v blízkosti intermetalické

vrstvy po pádu zařízení. Je tedy důležité pochopit chování intermetalických sloučenin, abychom znali a byli schopni předpovědět mechanické vlastnosti pájeného spoje.

Měření mechanických vlastností pájených spojů, vytvářených za pomoci bezolovnatých pájecích slitin, se ve svém článku [19] věnovali autoři A. Fahim a S. Ahmed. K měření mikromechanických vlastností materiálu byla využita metoda nanoindentace, jež spočívá ve vtlačování miniaturního hrotu do měřeného objektu. Pomocí nanoindentace je možné měřit mechanické vlastnosti materiálů velmi malých rozměrů a je vhodná ke zkoumání mechanických vlastností pájených spojů, intermetalických sloučenin na rozhraní měděné pájecí desky a pájecí slitiny nebo částic intermetalických sloučenin, které se vytvářejí v objemu pájky. Za pomoci této techniky se měří modul pružnosti a tvrdost. Bylo zjištěno, že izotermické stárnutí pájených spojů, k jejichž vzniku byla využita pájecí slitina SAC, vede k růstu intermetalických sloučenin jak na přechodu pájka-měď, tak i v objemu pájky. Při měření se také zjistilo, že hodnoty tvrdosti a modulu pružnosti intermetalických sloučenin klesly se zvyšující se teplotou. Nejvíce znatelný byl pokles u intermetalické sloučeniny Ag_3Sn , za ní následovala Cu_6Sn_5 a méně znatelný pokles tvrdosti byl pozorován u $(\text{Cu}_1 - x\text{Ni}_x)_6\text{Sn}_5$. Dále bylo zjištěno, že tvrdost intermetalických sloučenin Cu-Sn a Cu-Ni-Sn intermetalických sloučenin se podobala tvrdosti typické keramiky, kdežto tvrdost částic intermetalické sloučeniny Ag_3Sn byla podobná kovům a slitinám. V praxi to znamená, že intermetalické sloučeniny na bázi Cu-Sn mají potenciál k iniciaci trhlin v důsledku křehkého chování, kdežto intermetalická sloučenina Ag_3Sn , která má nižší modul pružnosti, je měkkší a tažnější, a tedy by nebyla pravděpodobně zdrojem trhlin, které by mohly být příčinou přerušení vodivého propojení pájeného spoje.

Další studií zkoumající mechanické vlastnosti pájených spojů se zabývá článek [14] od autorů M. Iwasaki, A. Yamauchi a M. Kurose. V tomto článku se zkoumal vliv velikosti vzorku na pevnost v tahu, a to konkrétně u pájek na bázi: čistého cínu, Sn-Ag-Cu, Sn-Cu a Sn-Ag. V těchto pájkách se nacházejí intermetalické sloučeniny Ag_3Sn a Cu_6Sn_5 , které byly předmětem pozorování. Zkoumán byl konkrétně vliv těchto intermetalických sloučenin na pevnost v tahu pájeného spoje. U pájek na bázi čistého cínu a Sn-Cu byl pozorován vliv velikosti vzorku na pevnost v tahu. U pájecích slitin Sn-Ag-Cu a Sn-Ag tento efekt ovšem pozorován nebyl. Výsledkem studie je skutečnost, že intermetalické vrstvy potlačují vliv velikosti vzorku na pevnost v tahu a intermetalická sloučenina Ag_3Sn má velký vliv na pevnost v tahu v porovnání s Cu_6Sn_5 , jelikož brání deformaci v kluzu. Intermetalická sloučenina Ag_3Sn tedy může zlepšit mechanické vlastnosti pájeného spoje.

1.7.2 Morfologie pájených spojů

Článek [20] se zabývá morfologií pájených spojů a jejím vlivem na vznik trhlin a lomů. Zkoumán je vliv intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 na rozhraní mezi pájkou a měděným substrátem a intermetalické sloučeniny Ag_3Sn v objemu pájky vykazující různou morfologii v závislosti na podmínkách pájení. Bylo zjištěno, že zrna intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 se zvětšila s prodloužením doby přetavení a také s procesem stárnutí pájeného spoje. Morfologie zrn intermetalické sloučeniny Ag_3Sn v objemu pájky se po procesu stárnutí změnila. Pevnost pájeného spoje se s vývojem intermetalických sloučenin Cu_6Sn_5 a Ag_3Sn snížila. Z nabytých skutečností lze říci, že zpomalení růstu intermetalických sloučenin může zvýšit spolehlivost pájeného spoje.

1.7.3 Omezení růstu IMC

Jelikož mohou intermetalické sloučeniny v pájených spojích způsobovat velké problémy se spolehlivostí, je nasnadě snažit se jejich růst do největší možné míry omezovat. Autoři článku [21] Q. Cao, H. Zhao a L. Xu se zabývali využitím grafenových nanovrstev přidávaných do pájecí slitiny SAC, ve které zkoumali účinky grafenových nanovrstev na tvorbu a růst intermetalických sloučenin ve vzniklé kompozitní pájecí slitině. Během experimentu bylo zjištěno, že tloušťka intermetalické vrstvy této kompozitní SAC/0,10GNS pájecí slitiny byla menší než tloušťka intermetalické vrstvy u klasické pájecí slitiny SAC. Kompozitní pájecí slitina vykazovala také menší difúzní koeficient díky tomu, že nanovrstvy mají velmi velký povrch, díky čemuž tvoří překážku difúzi atomů kovů. Z toho vyplývá, že grafenové nanovrstvy mohou významně omezovat růst intermetalických vrstev na rozhraní pájecí slitiny a substrátu a tím pádem zlepšovat mnohé vlastnosti pájených spojů ať už mechanické, či elektrické.

1.7.4 Vliv teplotního profilu na růst IMC

Mnoho faktorů má vliv na růst intermetalických vrstev během procesu pájení. Mezi tyto faktory patří teplota pájení a doba, po kterou je pájený spoj vystaven zvýšené teplotě. Pokud by na pájecí slitinu, či desku plošných spojů, působila příliš velká teplota, mohlo by dojít ke znehodnocení desky plošných spojů nebo zhoršení vlastností pájecí slitiny. Naopak při příliš nízké teplotě by nemuselo dojít ke kvalitnímu rozpuštění pájecí slitiny a jejímu smáčení na pájecí plošku. Kombinací těchto dvou faktorů je teplotní profil, který určuje průběh nárůstu či poklesu teploty v závislosti na čase během procesu pájení. Teplotní profil lze interpretovat křivkou průběhu teploty v závislosti na čase. Pomocí teplotního profilu lze

kontrolovat takzvaný heating faktor, který je definován jako množství tepla dodaného po přechodu pájecí slitiny do kapalného stavu [22]. Je důležité nastavit teplotní profil neoptimálněji, aby bylo dosaženo nejkvalitnějších výsledků pájení. [23]

Existuje řada článků, které se zabývají vlivem typu použitého teplotního profilu na výsledné vlastnosti pájených spojů. Problematikou se zabývají autoři D. Bušek, K. Dušek a O. Renza, kteří ve svém článku [22] popisují vliv použitého teplotního profilu na růst intermetalické vrstvy uvnitř pájeného spoje. Autoři na základě provedeného experimentu s pájkami SnBi a SAC305 zjistili, že nárůst tloušťky IMC se pro obě použité pájecí slitiny zvyšoval s rostoucím heating faktorem. Dále bylo zjištěno, že IMC se v objemu pájky začala formovat bezprostředně po roztavení pájecí slitiny (za předpokladu zajištění dobré smáčivosti), jelikož autoři pozorovali vrstvu IMC i u vzorků, které byly přetaveny procesem s nastavením velmi nízkého heating faktoru.

Další článek [24] od P. Veselého, K. Duška a A. Staňkové se zabývá vlivem tvaru použitého teplotního profilu na výslednou tloušťku IMC, při zachování stejného heating faktoru. V jednom případě docházelo k předeřtání a aktivaci tavidla v dřívější fázi pájecího procesu než v případě druhém. Autoři zjistili, že fáze předeřtění a proces aktivace tavidla může mít větší vliv na růst IMC než fáze přetavení. Vzorky, které byly přetaveny během procesu dříve vykazovaly při stejném heating faktoru menší růst IMC než vzorky přetavené v pozdější fázi pájecího cyklu.

2 Experimentální část

2.1 Návrh experimentu

Intermetalické sloučeniny a jejich růst závisí, jak již bylo zmíněno v teoretické části práce, na vícero faktorech. Před zahájení experimentu bylo nutné provést rešerši problematiky IMC pro zjištění, jaké faktory mohou ovlivňovat růst a vlastnosti intermetalických vrstev. Bylo zjištěno, že mezi faktory ovlivňující růst intermetalických vrstev v pájených spojích patří zejména teplota pájecí slitiny při procesu pájení, tedy maximální dosažená teplota pájecí slitiny. Dalším ovlivňujícím faktorem je doba pájení, tedy doba, po kterou je pájecí slitina zahřívána. Významný vliv na růst intermetalických vrstev a jejich vlastností má také typ použité pájecí slitiny a její složení. V neposlední řadě se na růstu intermetalických sloučenin podílí také typ použité povrchové úpravy pájené plošky, jakou může být například ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold), HAL (Hot Air Leveling), OSP (Organic Solderability Preservative) nebo se může pájet na čisté mědi bez použití jakékoliv povrchové úpravy. Dalším neméně důležitým faktorem vstupujícím do procesu tvorby intermetalických sloučenin v pájených spojích je počet přetavení. Během procesu pájení totiž může být pájený spoj přetaven opakovaně pro modifikaci jeho vlastností. Počet přetavení nám tedy určuje, kolikrát byl daný pájený spoj vystaven působení zvýšené teploty, při které se pájecí slitina daného spoje roztavila. Na růst intermetalických sloučenin má vliv také druh stárnutí. Některé pájené spoje nejsou vystaveny žádným extrémním vlivům vnějšího prostředí a po celou dobu životnosti se pohybují v rozmezí teplot kolem pokojové teploty a průměrné relativní vlhkosti. Jiná zařízení mohou být ovšem během svého života vystavena extrémním vlivům prostředí, jakými jsou například extrémně nízké či extrémně vysoké teploty nebo jejich střídání během krátkého časového intervalu. V laboratorních podmínkách lze dlouhodobé teplotní zatížení nasimulovat vložением vzorků do pece na delší dobu. Střídání velmi nízkých a velmi vysokých teplot během krátkého časového úseku lze zařídit pomocí speciální šokové komory. Těmito způsoby lze nasimulovat faktor stárnutí s úrovněmi teplotní zatížení a šoková teplotní zkouška.

Faktorů, ovlivňujících tvorbu a růst intermetalických sloučenin v pájených spojích, je velké množství, od působení vnitřních faktorů týkajících se složení pájecí slitiny až po vnější faktory, jako jsou teplota okolí a složení okolní atmosféry, ve které se pájený spoj nachází.

Před započítím experimentu, v rámci této diplomové práce a přípravou vzorků pro následnou analýzu, bylo nutné nejprve stanovit faktory, které se v rámci experimentu budou podílet na tvorbě intermetalických sloučenin, a jejichž úrovně se budou v průběhu experimentu měnit. Po konzultaci s vedoucím diplomové práce jsme došli k závěru, že se v rámci experimentu budou měnit úrovně následujících faktorů:

- použitá pájecí slitina
- počet přetavení
- typ stárnutí

Každý z těchto faktorů má několik úrovní. V případě použité pájecí slitiny bylo použito 5 různých pájecích slitin. Pro každou pájecí slitinu byly zhotoveny tři vzorky se třemi různými počty přetavení: jednou, dvakrát a třikrát přetavený. Různé vzorky byly zároveň podrobeny třem rozdílným typům stárnutí: bez stárnutí, teplotní zatížení a šoková teplotní zkouška. Před samotnou přípravou vzorků bylo ovšem nutné předem stanovit konečný potřebný počet vzorků. K tomuto účelu se využil statistický nástroj zvaný Design of Experiment (DOE), pomocí něhož se nadeřinovaly faktory a jejich úrovně a došlo se ke konečnému počtu vzorků, které bylo potřeba připravit pro experiment. Výsledný počet vzorků, včetně popisu úrovní faktorů každého vzorku, je vidět v tabulce (Tab. 4), kde jsou pro přehlednost jednotlivé úrovně barevně odlišeny.

Tab. 4: Soupis všech vzorků navržených pomocí DOE

Číslo vzorku	Použitá pájecí slitina	Počet cyklů přetavení	Druh stárnutí
1.	SnNiGe	1	NA
2.	SnNiCoP	1	NA
3.	SAC305	1	NA
4.	SnCu0,2NiGe	1	NA
5.	SnCu0,2NiCo	1	NA
6.	SnNiGe	2	NA
7.	SnNiCoP	2	NA
8.	SAC305	2	NA
9.	SnCu0,2NiGe	2	NA
10.	SnCu0,2NiCo	2	NA
11.	SnNiGe	3	NA
12.	SnNiCoP	3	NA
13.	SAC305	3	NA
14.	SnCu0,2NiGe	3	NA
15.	SnCu0,2NiCo	3	NA
16.	SnNiGe	1 S	
17.	SnNiCoP	1 S	
18.	SAC305	1 S	
19.	SnCu0,2NiGe	1 S	
20.	SnCu0,2NiCo	1 S	
21.	SnNiGe	2 S	
22.	SnNiCoP	2 S	
23.	SAC305	2 S	
24.	SnCu0,2NiGe	2 S	
25.	SnCu0,2NiCo	2 S	
26.	SnNiGe	3 S	
27.	SnNiCoP	3 S	
28.	SAC305	3 S	
29.	SnCu0,2NiGe	3 S	
30.	SnCu0,2NiCo	3 S	
31.	SnNiGe	1 TN	
32.	SnNiCoP	1 TN	
33.	SAC305	1 TN	
34.	SnCu0,2NiGe	1 TN	
35.	SnCu0,2NiCo	1 TN	
36.	SnNiGe	2 TN	
37.	SnNiCoP	2 TN	
38.	SAC305	2 TN	
39.	SnCu0,2NiGe	2 TN	
40.	SnCu0,2NiCo	2 TN	
41.	SnNiGe	3 TN	
42.	SnNiCoP	3 TN	
43.	SAC305	3 TN	
44.	SnCu0,2NiGe	3 TN	
45.	SnCu0,2NiCo	3 TN	

2.2 Materiály pro experiment

Během experimentu bylo použito 5 typů pájecích slitin. První z nich byla pájecí slitina SnNiGe. Tato pájka je složena z 0,036 % niklu, 0,01 % germania a zbytek tvoří cín a malá část doprovodných prvků.

Druhá pájecí slitina použitá v experimentu byla pájecí slitina SnNiCoP skládající se z 0,046 % niklu, 0,012 % kobaltu a 0,003 % fosforu. Zbytek tvoří cín a malá část doprovodných prvků.

Třetí pájecí slitinou byla široce používaná SAC305, složená z 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi.

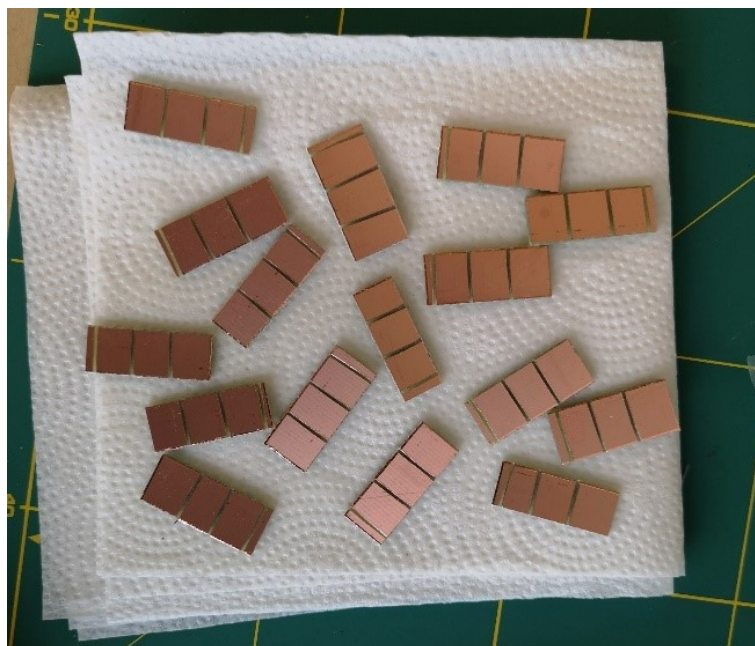
Poslední dvě pájecí slitiny obsahují přídavek mědi. První z nich, pájecí slitina SnCu_{0,2}NiGe je složena z 0,2 % mědi, 0,036 % niklu, 0,01 % germania a zbytek tvoří cín a malá část doprovodných prvků. Pájecí slitina SnCu_{0,2}NiCo se skládá z 0,21 % mědi, 0,041 % niklu, 0,006 % kobaltu a zbytek tvoří cín a malá část doprovodných prvků.

Všechny pájecí slitiny byly dodány ve formě tyčí.

Pájecí slitiny byly pájeny na laminátovou destičku ze skelné tkaniny nasycené epoxidovou pryskyřicí, která byla potažena měděnou fólií. Tato destička je známá také pod názvem „cuprexit“ nebo FR4.

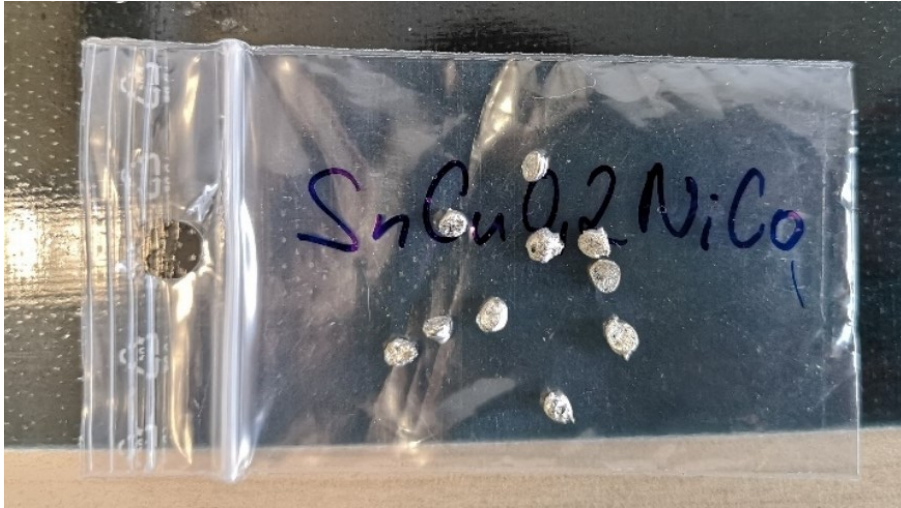
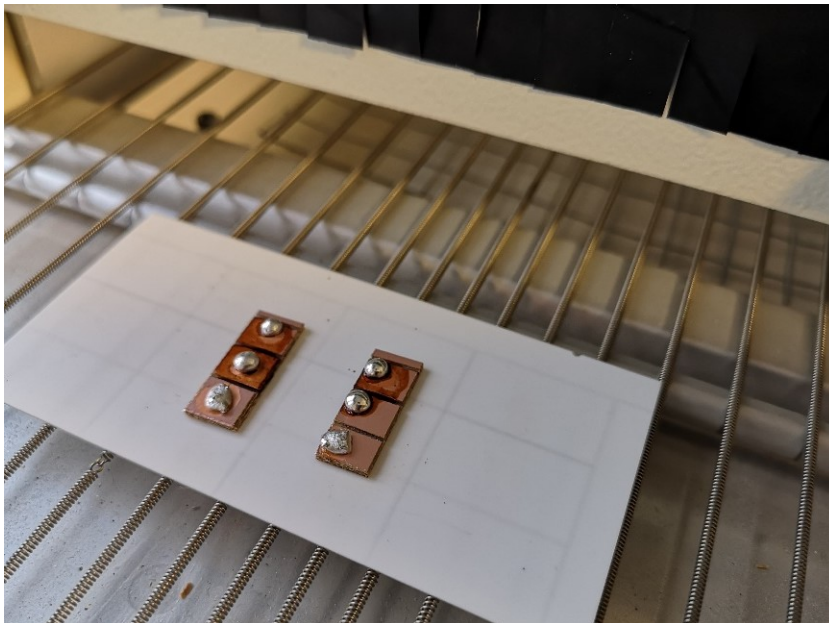
2.3 Příprava vzorků

Před samotným přetavováním bylo nejprve potřeba si připravit pájecí destičky, které se za pomoci pákových nůžek nastříhaly na přibližně stejné velikosti. Následně se do každé pájecí destičky za pomoci diamantové pily vyfrézovaly tři rýhy, sloužící k oddělení pájecích slitin pro jedno, dvě a tři přetavení. Třetí rýha sloužila k odlišení vzorků (u této rýhy se vždy nacházela třikrát přetavená pájecí slitina).



Obr. 3: Pájecí destičky s vytvořenými rýhami

Z pájecích slitin ve formě tyčí se pomocí štípacích kleští odebíralo požadované množství pájky. Odebrané odštěpky se následně s využitím pájecí stanice přetavily do podoby souměrných kuliček o přibližně totožné velikosti. Na pájecí plošky měděné destičky se nanoslo tavidlo Actiec 5. Toto tavidlo je alkoholovým roztokem, obsahujícím 94 % izopropylalkoholu, 1,5 % kyseliny adipové, 1,5 % kyseliny jantarové, 1,5 % kyseliny glutarové a 1,5 % kalafuny [25]. Kuličky pájky byly následně za pomoci pinzety umístěny na dané místo na pájecí destičce a poté se destička i s kuličkami pájky na ní poslala do přetavovací pece.

Obr. 4: Kuličky pájecí slitiny SnCu_{0,2}NiCo

Obr. 5: Kuličky pájecí slitiny na substrátu směřující do přetavovací pece, kuličky na obrázku nejnižší nejsou přetaveny, zbylé podstupují opakované přetavení

2.4 Pájecí profil

K přetavení všech testovaných vzorků pájek byla využita průběžná pájecí pec Mistral 260. Tato pec disponuje příkonem 3600 W a obsahuje 3 zóny s maximální možnou dosažitelnou teplotou 300 °C. Výchřev pece je zajištěn recirkulovaným horkým vzduchem. Díky této technologii lze přetavovat pájecí slitinu při teplotách nižších než při přetavování za pomoci IR systémů. [26]

Pájecí profil, tedy teploty různých přetavovacích zón, byl nastaven dle doporučení pro přetavení pájecí slitiny SAC305. Teplota v první zóně byla nastavena na 170 °C, ve druhé zóně na 200 °C a ve třetí zóně na 285 °C. Rychlost posuvného pásu byla 20 cm/min.



Obr. 6: Přetavovací pec Mistral 260

2.5 Stárnutí vzorků

Součástí experimentu bylo kromě hodnocení vlivu použití rozdílných pájek různého složení také hodnocení vlivu stárnutí vzorku. Během návrhu experimentu byly zvoleny tři typy stárnutí vzorků:

- bez stárnutí,
- šoková teplotní zkouška,
- zkouška tepelným zatížením.

První sada vzorků tedy nebyla nijak teplotně zatěžována, pouze byla skladována při pokojové teplotě a vlhkosti. Druhá sada vzorků prošla šokovou teplotní zkouškou. Tato zkouška spočívala v opakovaném cyklickém ohřívání a chlazení vzorku. Ke stárnutí byla využita teplotní šoková testovací komora Vötsch VT³ 7012 S2. Tato teplotní šoková testovací komora může být využita pro teplotní šoky v rozmezí teplot od -80 °C do +220 °C [26]. Pro účely experimentu byly vzorky teplotně šokově namáhány od -40 °C do +120 °C. Celkový počet cyklů činil 1000 cyklů po 10 minutách.



Obr. 7: Šoková teplotní komora Vötsch VT³ 7012 S2

Třetí sada vzorků byla podrobena zkoušce tepelným zatížením. Tato zkouška spočívala v ohřívání vzorků na dané teplotě po určitou dobu. Ke zkoušce tepelným zatížením byla využita horkovzdušná sušárna Memmert. Vzorky byly v sušárně podrobeny tepelnému zatížení při teplotě 120 °C po dobu 42 dní.



Obr. 8: Horkovzdušná sušárna Memmert

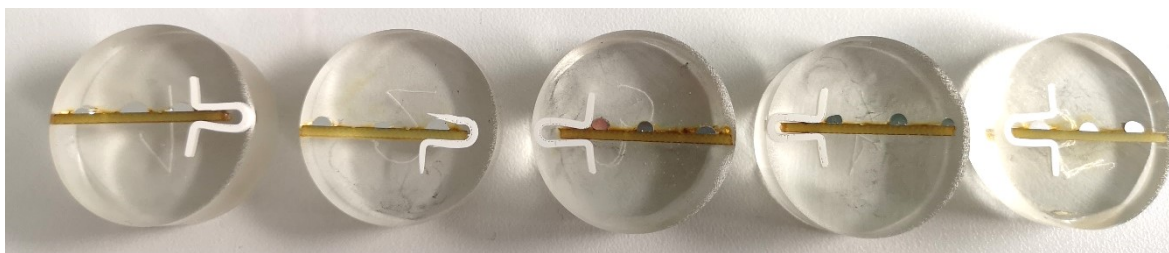
2.6 Vyhodnocení tloušťky intermetalických vrstev

Vyhodnocení tloušťky intermetalických vrstev probíhalo za pomoci fluorescenčního mikroskopu Olympus MX51. Aby bylo možné pozorovat tloušťky intermetalických vrstev a jejich strukturu, bylo nutné vyrobit materiálografický výbrus vzorku pájeného spoje. Ten se zhotovil nejprve zalitím vzorku pájených spojů na měděné destičce pryskyřicí. Vzorek byl před zalitím umístěn v připravené formě. Ve formě byl vzorek zafixován tak, aby bylo možné provést řez požadovanou rovinou. Po zalití byly vzorky vystaveny zvýšenému tlaku, aby se eliminovaly případné vzduchové bubliny, které by narušovaly pozorování vzorků pod mikroskopem.

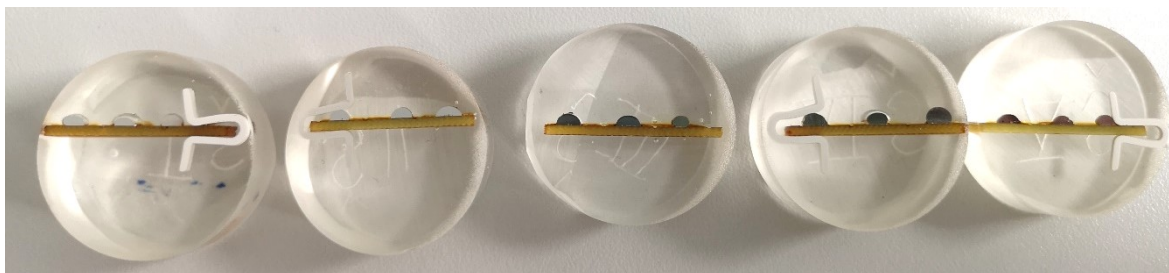


Obr. 9: Formy použité při zalévání vzorků pryskyřicí

V okamžiku vytvrzení pryskyřice byly zalité vzorky broušeny na brusce pro přípravu materiálografických výbrusů pomocí smirkových papírů o různých hrubostech od hrubších postupně po jemnější. Následně byly broušené plochy zaleštěny pro eliminaci vrypů, způsobených při broušení a poté zaleptány pro zvýraznění intermetalických vrstev. Leptadlo použité při leptání totiž narušuje vrstvu pájky, která není leptadlu tolik odolná, jako odolnější intermetalická vrstva.



Obr. 10: Materiálografické výbrusy tepelně nestárnutých vzorků, zleva SnNiGe, SnNiCoP, SAC305, SnCu_{0,2}NiGe a SnCu_{0,2}NiCo



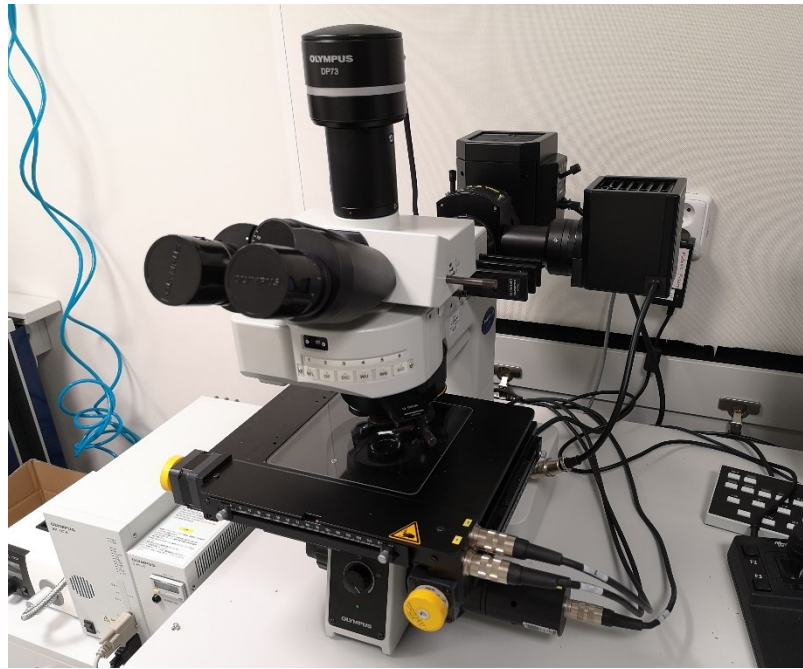
Obr. 11: Materiálografické výbrusy vzorků podrobených šokové teplotní zkoušce, zleva SnNiGe, SnNiCoP, SAC305, SnCu_{0,2}NiGe a SnCu_{0,2}NiCo



Obr. 12: Materiálografické výbrusy vzorků podrobených zkoušce tepelným zatížením, zleva SnNiGe, SnNiCoP, SAC305, SnCu_{0,2}NiGe a SnCu_{0,2}NiCo

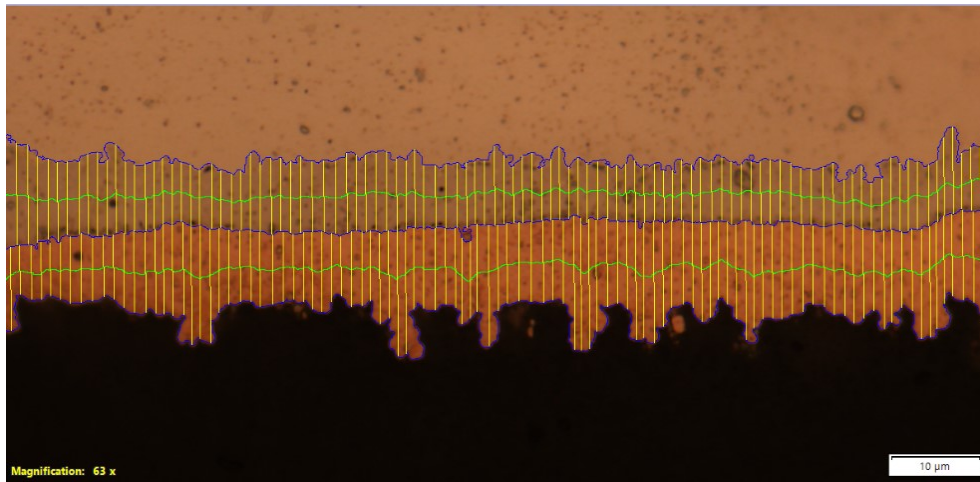
Jakmile byly vzorky vyleptány, bylo možné je začít zkoumat za pomoci fluorescenčního mikroskopu. Vzorky byly umístěny do připraveného držáku tak, aby byla zkoumaná plocha ve vodorovné poloze. Vodorovná poloha je důležitá pro výslednou ostrost pořízených snímků. Pokud by byl vzorek umístěn nakřivo, bylo by velmi obtížné, až nemožné, dosáhnout požadovaného zaostření po celé délce pozorované oblasti. Bylo by možné použít funkci proostřování obrazu, která ovšem také může do snímku zanést nežádoucí artefakty v podobě nezaostřených oblastí.

Snímky byly pořizovány fluorescenčním mikroskopem Olympus MX51 za použití objektivu se stonásobným zvětšením. Vzorky byly pozorovány za pomoci metody mikroskopie temného pole (darkfield microscopy, DFM), za použití klasické výbojky, jakožto zdroje světla.



Obr. 13: Mikroskop Olympus MX51

Intermetalické vrstvy v pájeném spoji byly pro zlepšení statistického vyhodnocení snímány na třech různých místech. Pro každý pájený spoj tedy byly pořízeny tři snímky. Za pomoci softwaru Olympus Stream Motion, určeného pro mikroskop Olympus MX51 byla následně provedena měření tloušťek intermetalických vrstev (Obr. 14). Během měření se nejprve vytyčily hranice začátku a konce intermetalické vrstvy a konce měděné vrstvy. Následně se určily hranice pro první vrstvu – začátek a konec intermetalické vrstvy a pro druhou vrstvu – začátek intermetalické vrstvy a konec měděné vrstvy. Program Olympus Stream Motion následně vytvořil přibližně sto míst, na kterých provedl změřeni tloušťky intermetalické vrstvy, které se následně zaznamenaly a exportovaly do tabulky, pomocí které se provedla analýza.



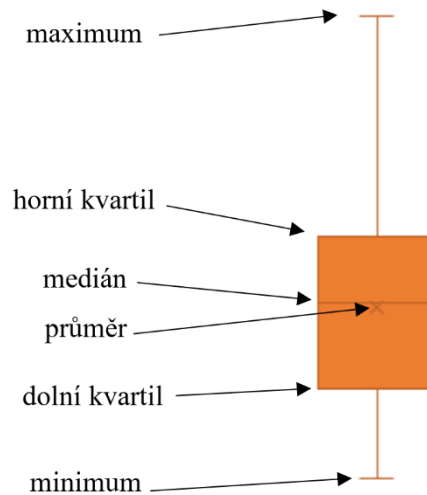
Obr. 14: Měření tloušťky IMC (horní vrstva) a tloušťky mědi (spodní vrstva) v programu Olympus Stream Motion

2.7 Výsledky experimentu

Data tlouštěk intermetalických vrstev se sloučila ze tří různých míst pro každý pájený spoj do jednoho sloupce v tabulce. Takto se zlepšila statistická přesnost měření intermetalických vrstev v pájeném spoji a zajistila se rovnoměrnost měření po celé délce intermetalické vrstvy pájeného spoje. V různých místech pájeného spoje totiž může docházet k tomu, že na určitém místě může být tloušťka intermetalické vrstvy a její struktura značně odlišná od místa na opačné straně pájeného spoje. Mikroskop při použitém zvětšení není schopen zachytit takto široký rozsah intermetalické vrstvy pájeného spoje, a proto je vhodné intermetalickou vrstvu fotit na více místech zároveň a výsledná data vyhodnocovat jako celek.

Ze středních hodnot naměřených dat se pomocí metody DOE v programu Develve spočetly výsledné hodnoty tlouštěk IMC a zbývající měděné vrstvy, prokazující vliv daného faktoru při kombinaci ostatních faktorů. Ze získaných hodnot se následně vytvořily grafy zobrazující vliv daného faktoru na výslednou tloušťku IMC či měděné vrstvy (tlustá černá linka značí střední hodnotu, tenké šedé linky značí rozdíl směrodatné odchylky od střední hodnoty) [27].

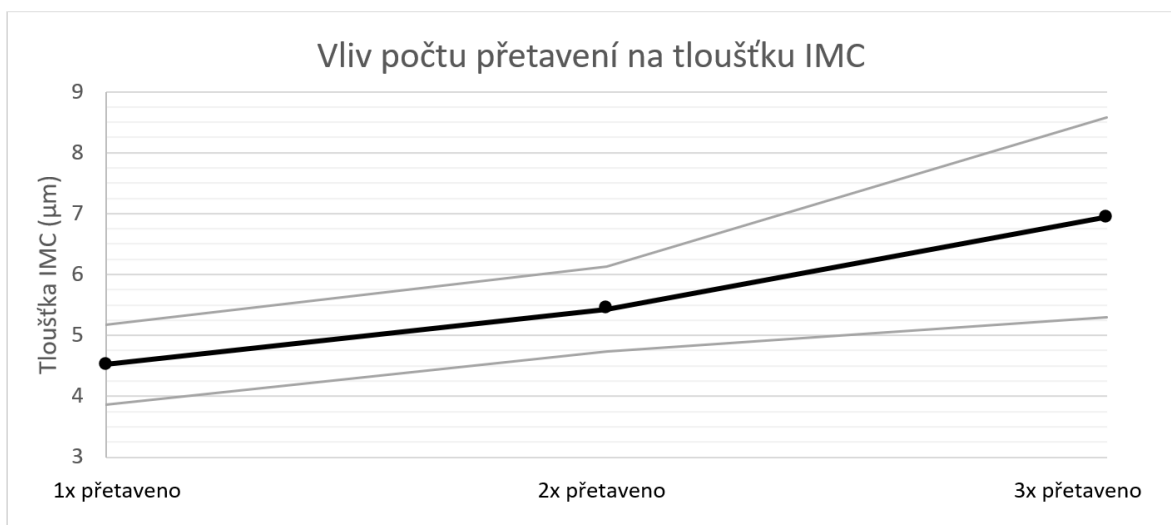
Z naměřených dat se nadále provedlo vyhodnocení vytvořením takzvaných boxplotů, jinak označovaných také jako krabicové grafy (diagramy). Tento typ grafu umožňuje vizuálně interpretovat několik statistických ukazatelů naměřených dat. Konkrétně se jedná o zobrazení minima a maxima, dolního a horního kvartilu, mediánu daného souboru dat a také jeho průměru. Po vytvoření boxplotu byly z grafu odstraněny odlehlé hodnoty.



Obr. 15: Interpretace krabicového grafu [28]

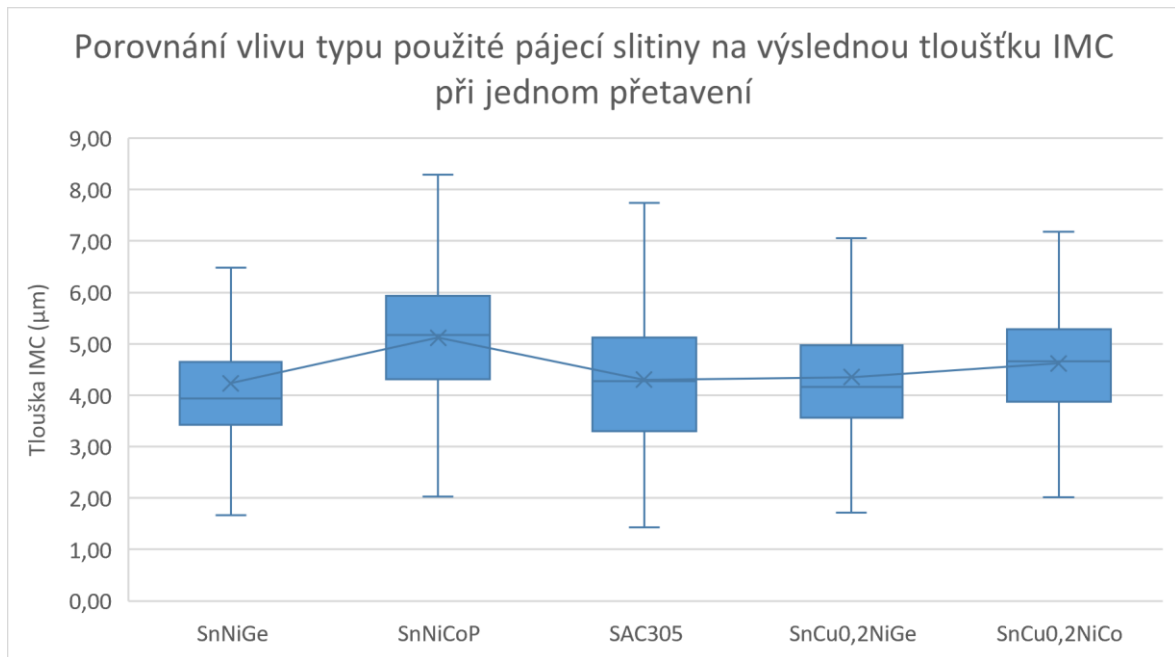
2.7.1 Vliv počtu přetavení na výslednou tloušťku IMC

Jak lze vidět na grafu (Obr. 16), počet přetavení má významný vliv na tloušťku intermetalické vrstvy v pájeném spoji, která se při zvyšujícím se počtu přetavení zvětšuje. Při třetím přetavení je tento jev výraznější než při druhém přetavení.



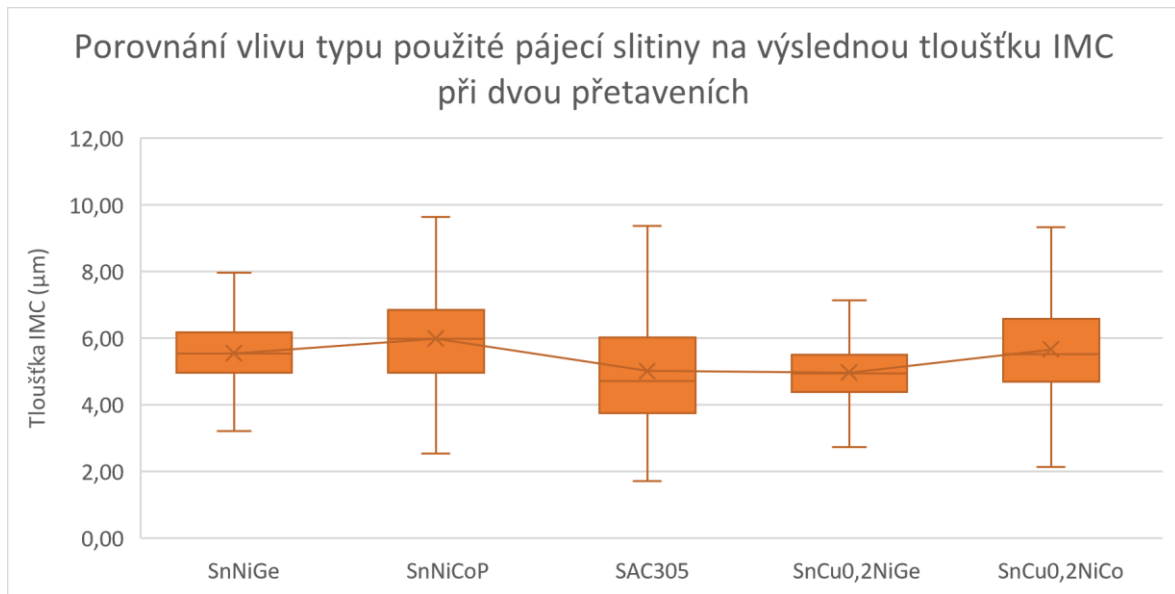
Obr. 16: Graf vlivu faktoru počet přetavení na výslednou tloušťku IMC

První souhrnný krabicový graf (Obr. 20) interpretuje závislost vlivu počtu přetavení na výslednou tloušťku intermetalické vrstvy. Data jsou rozdělena podle typu použité pájecí slitiny a každá barva interpretuje počet přetavení, tedy kolikrát byl daný pájený spoj přetaven. Na následujících obrázcích jsou rozebrány grafy znázorňující danou úroveň zkoumaného faktoru samostatně.



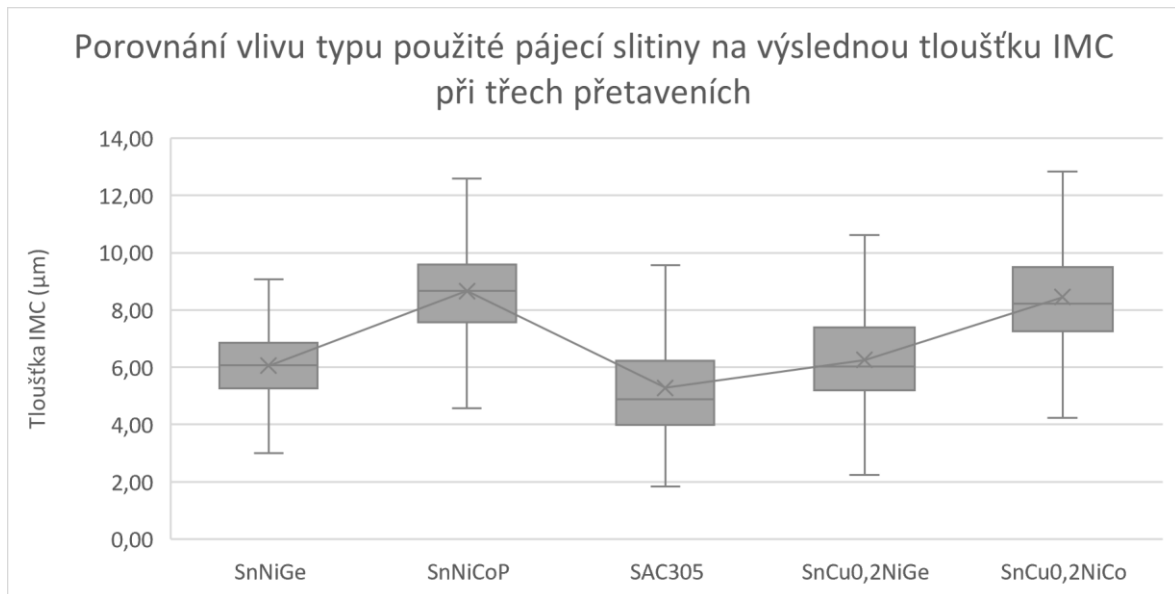
Obr. 17: Graf porovnání tlouštěk intermetalických vrstev jednou přetavených pájecích slitin

Z porovnání vlivu typu použité pájecí slitiny na výslednou tloušťku intermetalické vrstvy pouze při jednom přetavení lze vyvodit následující závěry. Pájky SnNiGe a SnCu0,2NiGe dosahují přibližně totožných tlouštěk intermetalických vrstev, pájka SnCu0,2NiGe vykazuje tloušťku intermetalické vrstvy mírně vyšší. Obě tyto pájecí slitiny mají ve svém obsahu nikl a germanium. Velmi podobné tloušťky dosahuje i pájecí slitina SnCu0,2NiCo, která má s pájecí slitinou SnCu0,2NiGe společný přídavek mědi. Pájka SnNiCoP dosahuje ze všech pájek znatelně nejvyšší tloušťky intermetalické vrstvy. Tato pájka neobsahuje přídavek niklu a germania ani mědi a je tedy možné, že obsah těchto prvků v pájecí slitině omezuje růst intermetalické vrstvy. V současné době nejpoužívanější pájecí slitina SAC305 vykazuje průměrnou tloušťku intermetalické vrstvy v porovnání s ostatními pájecími slitinami. Nejmenší rozptyl hodnot, tedy nejpravidelnější tloušťku intermetalické vrstvy bez výrazných změn podél pájeného spoje vykazuje pájecí slitina SnNiGe. Naopak největší rozptyl hodnot tlouštěk IMC vykazuje pájecí slitina SAC305 těsně následována pájecí slitinou SnNiCoP.



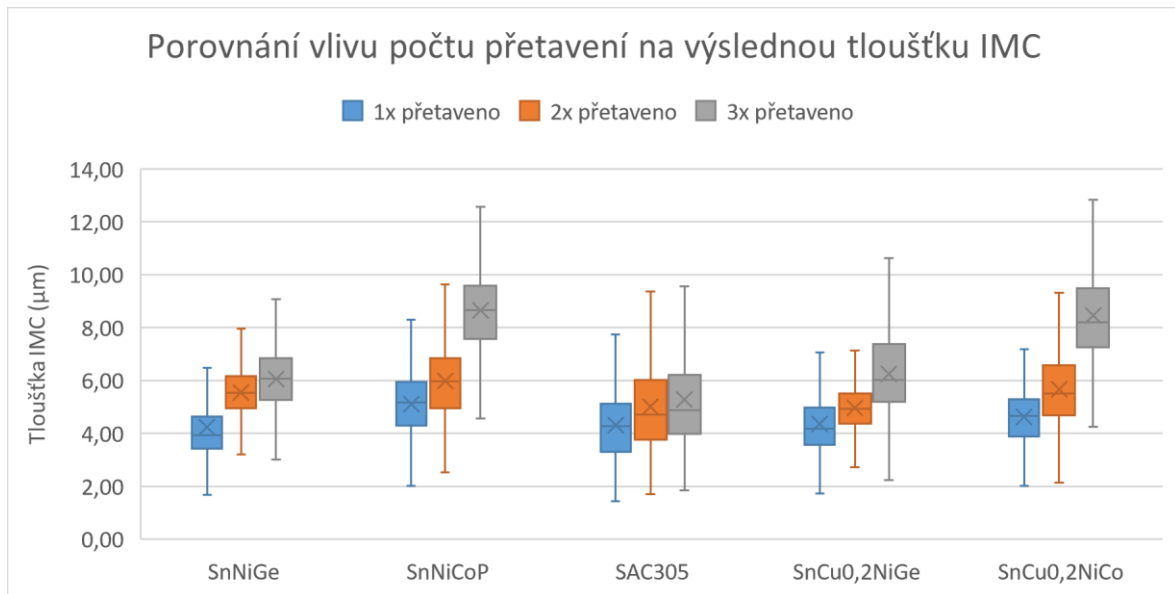
Obr. 18: Graf porovnání tlouštěk intermetalických vrstev dvakrát přetavených pájecích slitin

Při srovnání typu použité pájecí slitiny, které dvakrát prošly procesem přetavení, vyšly následující poznatky. Nejshodnější tloušťky intermetalických vrstev vykazovaly pájecí slitiny SnNiGe a SnCu0,2NiGe, avšak tentokrát pájecí slitina SnNiGe dosahovala lehce zvýšené hodnoty tloušťky intermetalické vrstvy. Jejich rozptyl je ovšem shodný. Stejně tak rozptyl hodnot pájecích slitin obsahujících nikl-kobalt, tedy pájecích slitin SnNiCoP a SnCu0,2NiCo, je shodný. Pájka bez obsahu mědi, SnNiCoP ovšem dosahovala oproti SnCu0,2NiCo trochu větší hodnoty tloušťky intermetalické vrstvy. Zdá se tedy, že pájky s obdobným složením, SnNiGe a SnCu0,2NiGe a poté SnNiCoP a SnCu0,2NiCo, mají podobný rozptyl hodnot, a tedy že složení pájek má na tuto vlastnost vliv. Pájecí slitina SAC305 opět vykazuje největší rozptyl tlouštěk intermetalické vrstvy. Její tloušťka je v tomto případě pod průměrem.



Obr. 19: Graf porovnání tlouštěk intermetalických vrstev třikrát přetavených pájecích slitin

Při porovnání vlivu typu použité pájecí slitiny u vzorků, které byly třikrát přetaveny, na tloušťku intermetalické vrstvy se došlo k následujícím poznatkům. Hodnoty tlouštěk pájecích slitin obsahujících nikl-germanium SnNiGe a SnCu0,2NiGe dosahují opět podobných hodnot, ačkoliv pájecí slitina SnCu0,2NiGe vykazuje větší rozptyl než pájecí slitina SnNiGe. Také pájecí slitiny obsahující nikl-kobalt SnNiCoP a SnCu0,2NiCo dosahují velice obdobných hodnot tlouštěk intermetalických vrstev. Tloušťky intermetalických vrstev těchto pájek dosahují největších hodnot. Rozdíl v rozptylu jejich hodnot je velmi malý. Menší rozptyl vykazuje pájecí slitina SnNiCoP. Pájecí slitina SAC305 dosahuje nejmenších hodnot tloušťky intermetalické vrstvy ze všech pájecích slitin při třetím přetavení. Rozptyly hodnot jsou u všech pájecích slitin obdobné, u pájecí slitiny SnNiGe je značně menší.



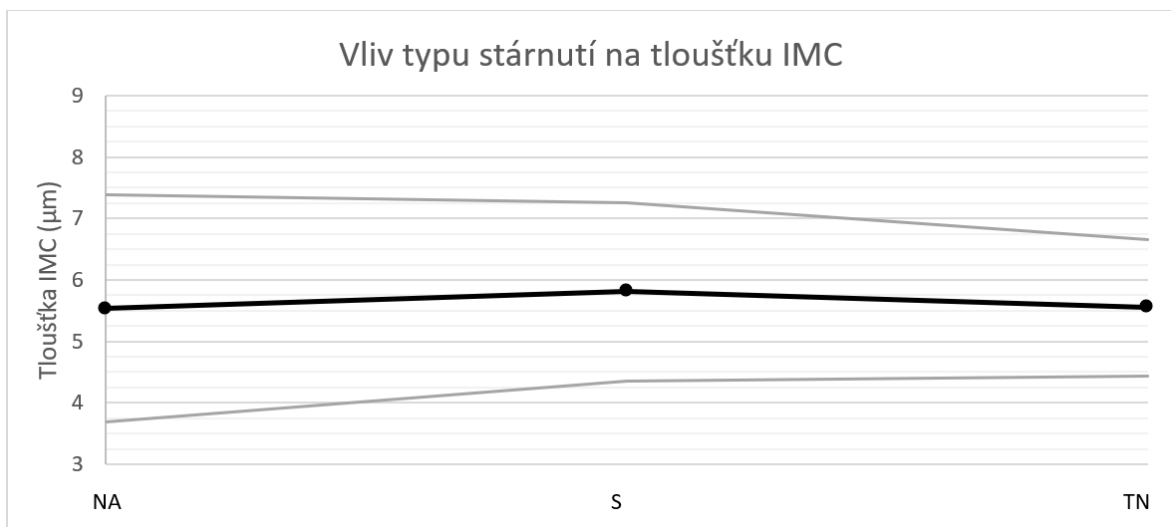
Obr. 20: Krabicový graf porovnání vlivu počtu přetavení na výslednou tloušťku intermetalické vrstvy

Další zajímavý pohled se naskytne při porovnání všech pájecích slitin při všech počtech přetavení (reflow). V každém případě pro každou pájecí slitinu bez pochyby platí, že se zvyšujícím se počtem přetavení stoupá tloušťka intermetalické vrstvy. Jejich nárůst je ovšem odlišný. Na první pohled je patrné, že nejvíce ovlivněny počtem přetavení jsou pájecí slitiny obsahující nikl-kobalt, tedy SnNiCoP a SnCu0,2NiCo. Nejpatrnější nárůst tloušťky intermetalické vrstvy je v obou případech při třetím přetavení. Tyto pájky dosahují zdaleka největších hodnot tlouštěk intermetalických vrstev ze všech dostupných vzorků. Rozdíly mezi prvním a druhým přetavením nejsou u těchto pájecích slitin tak patrné. Co se týče tlouštěk intermetalických vrstev, jsou na tom pájky na bázi nikl-germanium, konkrétně SnNiGe a SnCu0,2NiGe, lépe. Tloušťka intermetalické vrstvy pájecí slitiny SnNiGe je ovlivněna především druhým přetavením, u třetího přetavení už nárůst intermetalické vrstvy není tak velký, jako u druhého přetavení. Pájecí slitina SnCu0,2NiGe se v tomto ohledu chová opačně. Tloušťka intermetalické vrstvy se při druhém přetavení zvýší jen nepatrně, ovšem při třetím přetavení naroste značně. Běžně využívaná pájecí slitina SAC305 vykazuje stejně jako zbylé pájky rostoucí trend tloušťky intermetalické vrstvy při zvýšení počtu přetavení. Nárůst tloušťky intermetalické vrstvy je ovšem oproti ostatním pájecím slitinám zdaleka nejmenší. Zároveň dosahuje pájecí slitina SAC305 po finálním přetavení nejmenší tloušťky intermetalické vrstvy. Jedná se tedy stále o nejlepší volbu, pokud se vyžadují neměnné vlastnosti pájeného spoje při opakovaném přetavení.

Z výše zmíněného lze pozorovat obdobné chování u pájek na bázi nikl-kobaltu a poté u pájek na bázi nikl-germanium. Složení pájecích slitin tedy hraje velkou roli při růstu intermetalických vrstev.

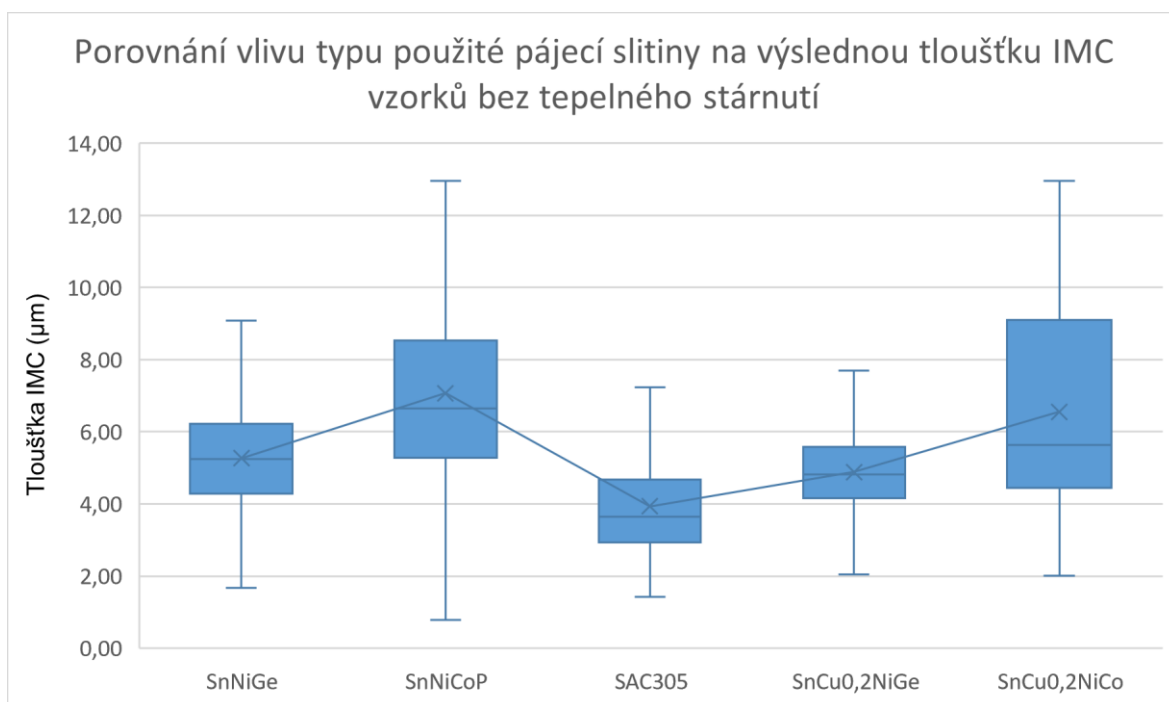
2.7.2 Vliv typu stárnutí na výslednou tloušťku IMC

Jak je možné vidět na grafu (Obr. 21), typ stárnutí nemá významnější vliv na růst tloušťky intermetalické vrstvy. Při šokové zkoušce (S) je tloušťka IMC nepatrně vyšší než u zbylých dvou úrovní, které vykazují shodnou hodnotu průměrné tloušťky IMC.



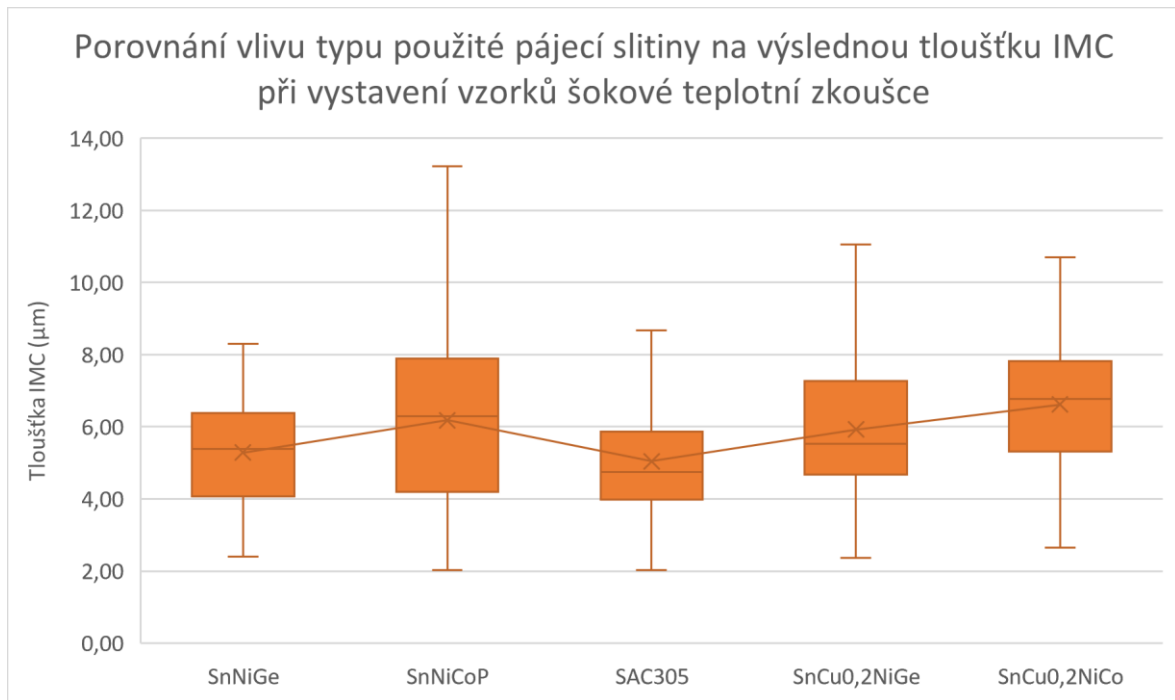
Obr. 21: Graf vlivu faktoru typ stárnutí na výslednou tloušťku IMC

Druhý souhrnný krabicový graf (Obr. 25) interpretuje závislost vlivu typu aplikovaného tepelného stárnutí na výslednou tloušťku intermetalické vrstvy. Data jsou rozdělena podle typu použité pájecí slitiny a každá barva interpretuje typ aplikovaného tepelného stárnutí (namáhání). První sada vzorků nebyla vystavena žádnému tepelnému namáhání a byla skladována při pokojové teplotě. Tato sada vzorků je označena symbolem „NA“. Další sada vzorků byla podrobena šokové teplotní zkoušce, tedy cyklickým změnám teplot v šokové teplotní komoře. Tato sada vzorků je označena symbolem „S“. Poslední sada vzorků byla podrobena zkoušce tepelným zatížením (namáháním), tedy působení zvýšené teploty po delší dobu. Tyto vzorky jsou označeny symbolem „TN“. Na následujících obrázcích jsou rozebrány grafy znázorňující danou úroveň zkoumaného faktoru samostatně.



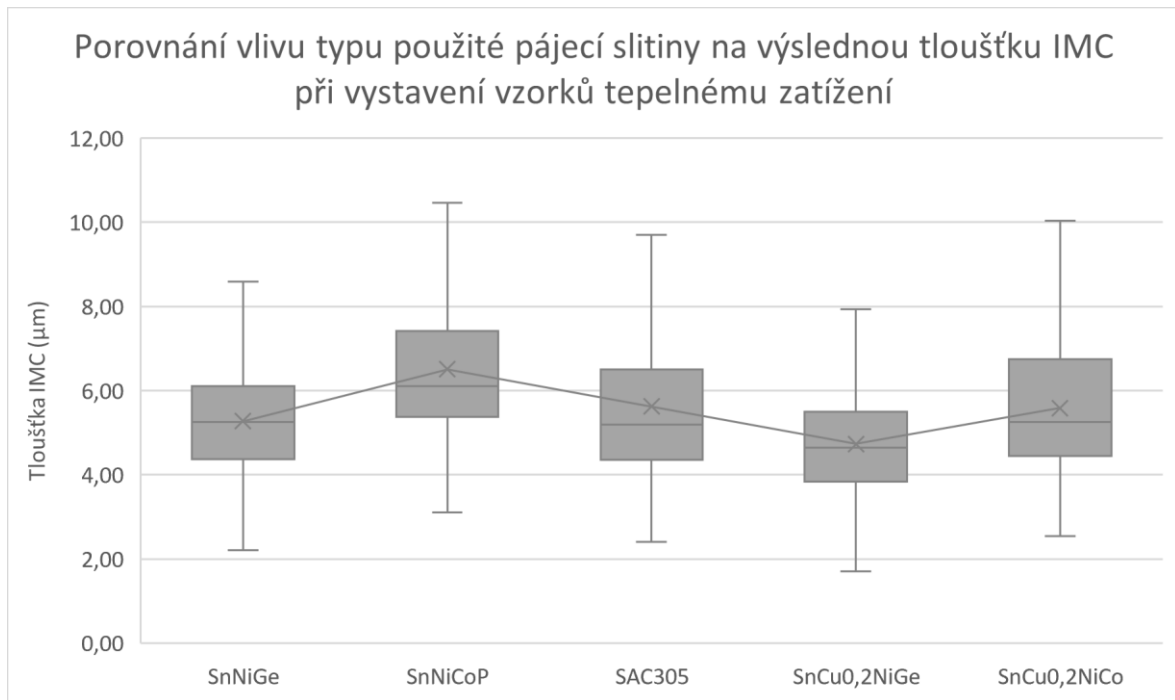
Obr. 22: Graf porovnání tlouštěk intermetalických vrstev pájecích slitin vystavených pokojové teplotě

Z grafu porovnání vlivu typu použité pájecí slitiny na tloušťku intermetalické vrstvy bez tepelného stárnutí vyplývají následující poznatky. Konvenční pájecí slitina SAC305 dosahuje při absenci tepelného stárnutí nejmenší tloušťky intermetalické vrstvy ze všech testovaných pájecích slitin. Stejně jako při zkoumání vlivu počtu přetavení, i zde lze pozorovat jistou podobnost mezi chováním slitin na bázi nikl-germania a pájecích slitin na bázi nikl-kobaltu. Pájecí slitiny s obsahem NiGe, tedy SnNiGe a SnCu0,2NiGe vykazují obdobnou tloušťku intermetalické vrstvy, SnNiGe dosahuje lehce větší tloušťky intermetalické vrstvy než SnCu0,2NiGe, která má navíc menší rozptyl hodnot. Největší tloušťky intermetalické vrstvy, jsou na tom pájecí slitiny na bázi nikl-kobaltu, konkrétně SnNiCoP a SnCu0,2NiCo. Tyto pájky se zároveň vyznačují největším rozptylem hodnot, tudíž rozdíl v tloušťkách intermetalických vrstev na různých místech se lišil ve větší míře než u jiných pájecích slitin. Největší průměrná tloušťka intermetalické vrstvy byla zaznamenána u pájecí slitiny SnNiCoP. Přídavek mědi v tomto případě u pájecích slitin SnCu0,2NiCo a SnCu0,2NiGe mohl mít drobný pozitivní vliv na omezení růstu intermetalické vrstvy, jelikož obě tyto pájecí slitiny vykázaly nepatrně menší tloušťku intermetalické vrstvy než pájecí slitiny SnNiGe a SnNiCoP.



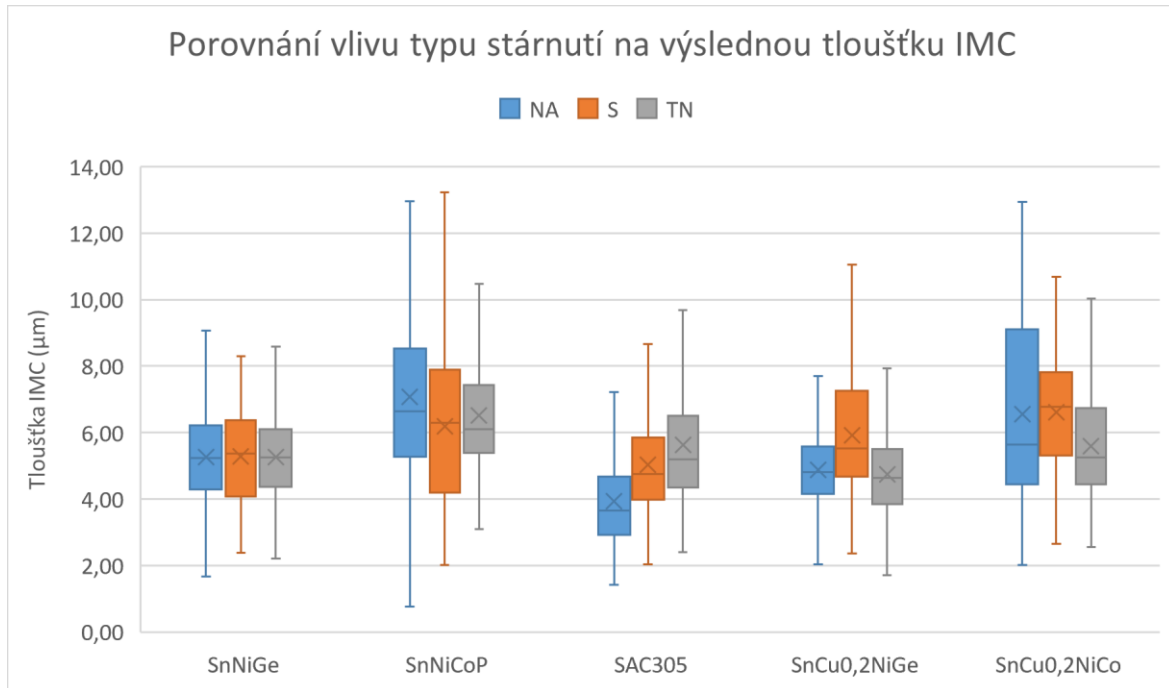
Obr. 23: Graf porovnání tlouštěk intermetalických vrstev pájecích slitin vystavených šokové teplotní zkoušce

Oproti vzorkům, které nebyly vystaveny tepelnému namáhání (NA), jsou u vzorků, vystavených šokové teplotní zkoušce, tloušťky intermetalických vrstev shodnější napříč různými pájecími slitinami. V tomto případě pájecí slitina SAC305 opět dosahuje nejmenší hodnoty tloušťky intermetalické vrstvy. O trochu větší tloušťky intermetalické vrstvy dosahuje slitina SnNiGe, která má oproti SAC305 menší rozptyl hodnot a hned za ní následuje také slitina na bázi nikl-germania SnCu0,2NiGe, která má značně větší rozptyl hodnot než SnNiGe. Po této slitině následuje, co se týče tloušťky intermetalické vrstvy, pájecí slitina SnNiCoP, která má značně velký rozptyl hodnot, a tedy se podél pájeného spoje chová nesourodě. Největší průměrnou tloušťku intermetalické vrstvy vykazuje pájecí slitina SnCu0,2NiCo, její rozptyl je ovšem mnohem menší než u pájecí slitiny SnNiCoP. Opět tedy pájecí slitiny na bázi nikl-germania vykazují menší tloušťku intermetalické vrstvy než dvě pájky na bázi nikl-kobaltu. Je tedy pravděpodobné, že germanium může mít pozitivní vliv na omezení růstu intermetalické vrstvy. Co se týče přídavku mědi, pájecí slitiny bez přídavku, tedy SnNiGe a SnNiCoP, dosahují obě nepatrně menší tloušťky intermetalické vrstvy než pájky SnCu0,2NiGe a SnCu0,2NiCoP.



Obr. 24: Graf porovnání tlouštěk intermetalických vrstev pájecích slitin vystavených tepelnému zatížení

Poslední sada vzorků byla vystavena tepelnému zatížení. V tomto případě vykazují nejmenší tloušťku intermetalické vrstvy pájecí slitina SnCu0,2NiGe. Podobné chování lze opět pozorovat i u pájecí slitiny SnNiGe, která má obdobný rozptyl a průměrnou tloušťku intermetalické vrstvy přibližně o 0,5 μm větší než u SnCu0,2NiGe. Další v pořadí je pájecí slitina SnCu0,2NiCo, která vykazuje nepatrně větší tloušťku intermetalické vrstvy než SnNiGe. Druhá pájecí slitina na bázi nikl-kobaltu, SnNiCoP, vykazuje největší tloušťku intermetalické vrstvy. Oproti SnCu0,2NiCo je průměrná tloušťka intermetalické vrstvy o necelý mikrometr větší. Pájecí slitina SAC305 dosahuje průměrné hodnoty tloušťky intermetalické vrstvy ze všech pájecích slitin. V tomto případě lze usuzovat, že přidavek mědi v pájecích slitinách SnCu0,2NiGe a SnCu0,2NiCo omezuje růst intermetalické vrstvy při zatížení pájeného spoje působením vyšších teplot po delší dobu.



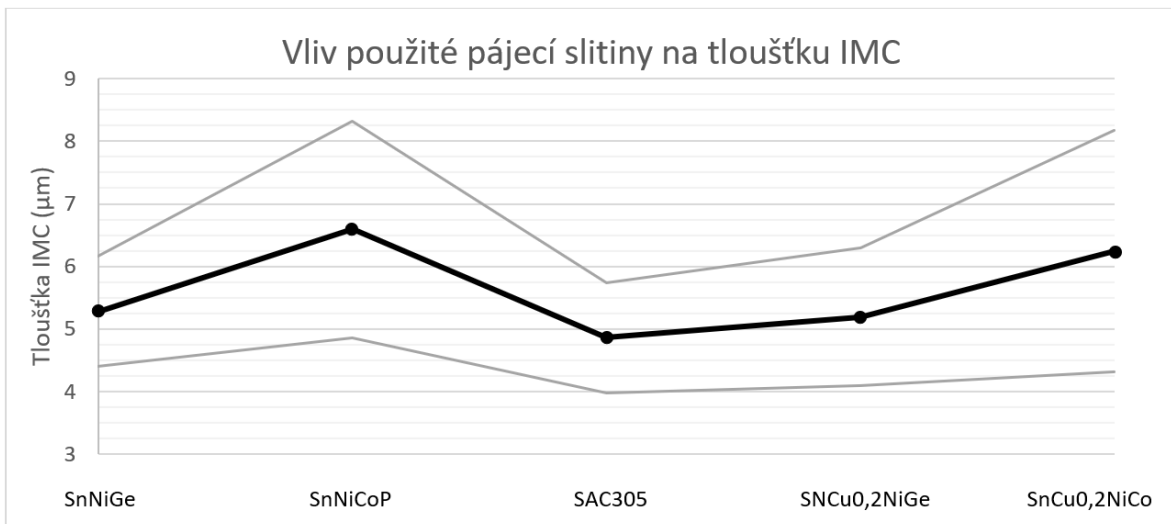
Obr. 25: Krabicový graf vlivu použitého typu stárnutí na výslednou tloušťku intermetalické vrstvy

Na rozdíl od porovnání všech pájecích slitin při různých počtech přetavení, při porovnání pájecích slitin s různým tepelným zatížením, nelze pozorovat jednotný trend pro všechny pájecí slitiny. Zdá se, že pájecí slitina SnNiGe není ovlivněna jakoukoliv teplotní zkouškou. Průměrné tloušťky intermetalické vrstvy jsou u vzorku bez tepelného zatížení, šokové teplotní zkoušky i tepelného zatížení naprosto shodné. Mírně se liší pouze rozptyl hodnot, který je největší u tepelně nestárnutého vzorku a u šokové teplotní zkoušky jsou hodnoty ustálenější. Je zajímavé, že u pájecí slitiny SnNiCoP, došlo při stárnutí šokovou teplotní zkouškou k redukci tloušťky intermetalické vrstvy oproti tepelně nestárnutému vzorku. Průměrná hodnota tloušťky IMC vzorku podrobeného tepelnému zatížení je také nižší než tloušťka nestárnutého vzorku, avšak je vyšší než průměrná tloušťka intermetalické vrstvy vzorku, který byl zatížen šokovou teplotní zkouškou. Na druhou stranu jsou rozměry tloušťky TN vzorku podél pájeného spoje značně ustálenější než rozměry vzorku podrobeného šokové teplotní zkoušce, který má značně velký rozptyl hodnot. Konvenční pájecí slitina SAC305 vykazuje rostoucí trend s teplotním zatížením. Tloušťka intermetalické vrstvy této pájecí slitiny, bez podrobení vzorku stárnutí, je ze všech vzorků nejmenší. Rozptyl dosahuje malé hodnoty, tudíž intermetalická vrstva bude nejspíše pravidelná bez větších odchylek. Větší hodnoty intermetalické vrstvy se u této pájecí slitiny dosahuje při zatížení pájeného spoje šokovou teplotní zkouškou, přičemž rozptyl hodnot zůstává shodný s nestárnutým vzorkem. Třetí vzorek, podrobený tepelnému zatížení,

vykazuje opět nárůst tloušťky intermetalické vrstvy oproti nestárnutému vzorku a vzorku testovanému šokovou teplotní zkouškou. Rozptyl je opět shodný s předchozími vzorky. Dá se tedy usuzovat, že struktura intermetalické vrstvy se nemění a vrstva roste rovnoměrně na všech místech. Pájecí slitina SnCu0,2NiGe má po podrobení tepelnému zatížení lehce tenčí vrstvu intermetalické sloučeniny při lehce zvýšeném rozptylu. Avšak po vystavení vzorku šokové teplotní zkoušce vzrostla tloušťka intermetalické vrstvy, oproti zbylým dvěma vzorkům, znatelně. S pájecí slitinou SnNiGe má tedy společné chování, co se týče rozdílu mezi nestárnutým vzorkem a vzorkem podrobeným tepelnému zatížení. Během šokové teplotní zkoušky ovšem vykazuje pájecí slitina s přídavkem mědi zhoršené vlastnosti v oblasti tloušťky intermetalické vrstvy. Poslední pájecí slitina SnCu0,2NiCo během šokové teplotní zkoušky dosahuje, vzhledem k nestárnutému vzorku, stejné průměrné hodnoty tloušťky intermetalické vrstvy, avšak rozptyl hodnot je ustálenější a vrstva intermetalické sloučeniny je po šokové teplotní zkoušce pravděpodobně rovnoměrnější. Po zkoušce teplotním zatížením došlo ke zmenšení tloušťky intermetalické vrstvy v pájeném spoji. V tomto ohledu se pájecí slitina SnCu0,2NiCo chová opačně vzhledem k pájecí slitině bez přídavku mědi SnNiCoP.

2.7.3 Vliv použité pájecí slitiny na výslednou tloušťku IMC

Z grafu (Obr. 26) je vidět, jak velký vliv má použitá pájecí slitina na výslednou tloušťku intermetalické vrstvy v pájeném spoji. Na rozdíl od předchozích analýz vlivů pomocí boxplotů, které byly vždy vztažené k určitému faktoru, zde se zkoumá vliv pouze jednoho faktoru. Co se týče srovnání, tento graf potvrdil předem známá zjištění. Největší vliv na růst intermetalické vrstvy mají pájecí slitiny obsahující kobalt, konkrétně SnNiCoP a SnCu0,2NiCo. Znatelně menší růst tloušťky intermetalických vrstev je pozorován u pájecích slitin obsahujících germanium, tedy SnNiGe a SnCu0,2NiGe, které dosahují přibližně stejných hodnot. Nejlépe dopadla pájecí slitina SAC305 vykazující nejmenší růst IMC v pájeném spoji.

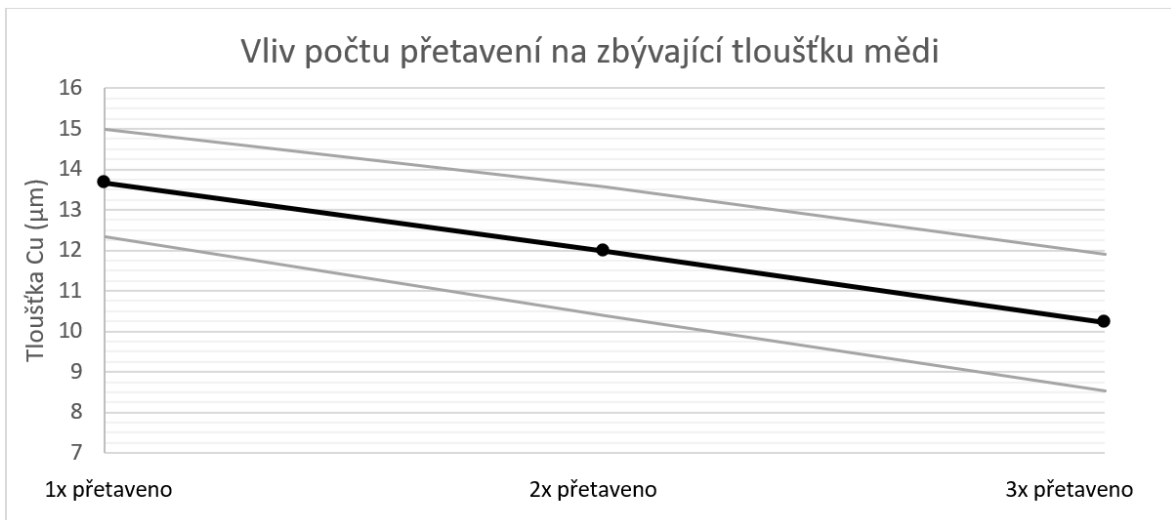


Obr. 26: Graf vlivu faktoru použitá pájecí slitina na výslednou tloušťku IMC

2.7.4 Vliv počtu přetavení na úbytek mědi

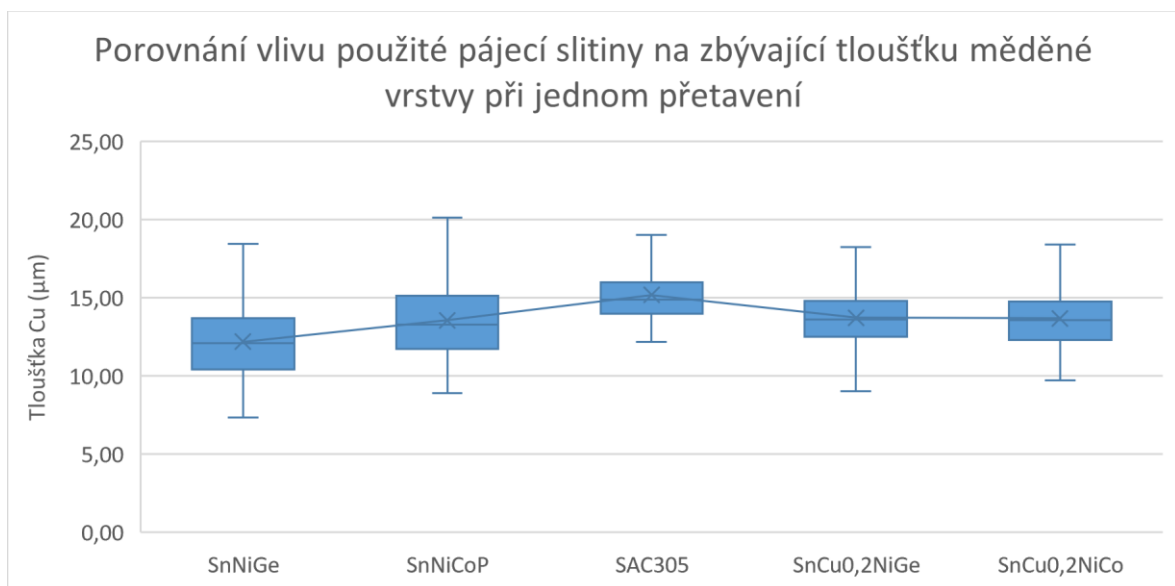
Během měření tlouštěk intermetalických vrstev byla měřena kromě samotné tloušťky intermetalické vrstvy také tloušťka měděné vrstvy pod pájeným spojem. Během procesu pájení totiž dochází k tomu, že kromě růstu intermetalické vrstvy do objemu pájky, roste intermetalická sloučenina také do objemu mědi, která se v pájecí slitině rozpouští. Tento jev je částečně chtěný, jelikož zajišťuje vytvoření kvalitního pájeného spoje s požadovanými elektrickými i mechanickými vlastnostmi. Některé pájecí slitiny ovšem mohou vykazovat zvýšené pronikání do měděné vrstvy a ve výsledku ji mohou narušit natolik, že zbyde jen velice tenká vrstva mědi a pájený spoj nebude dosahovat požadovaných vlastností.

Jak je možné vidět na grafu (Obr. 27), přetavení má, stejně jako u IMC, značný vliv na úbytek měděné vrstvy v pájeném spoji. S vyšším počtem přetavení pájecí slitina úměrně rozpouští vrstvu mědi, která tím pádem ubývá.



Obr. 27: Graf vlivu faktoru počet přetavení na zbývající tloušťku měděné vrstvy pájecí destičky

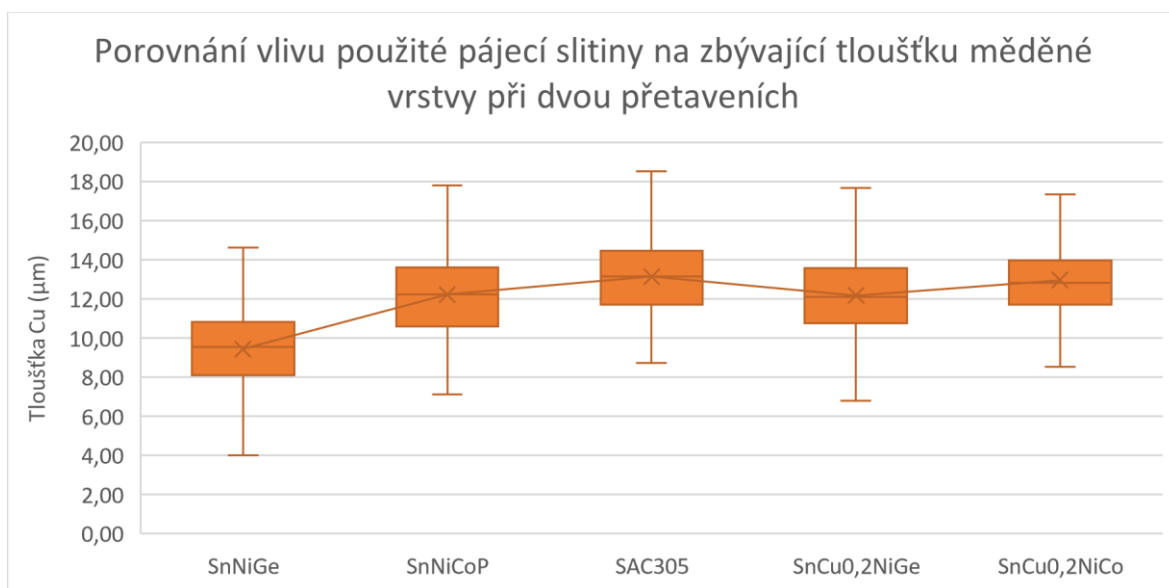
První souhrnný krabicový graf (Obr. 31), zabývající se vizualizací naměřených tlouštěk mědi, interpretuje závislost vlivu počtu přetavení na zbývající tloušťku mědi. Data jsou rozdělena podle typu použité pájecí slitiny a každá barva interpretuje počet přetavení, tedy kolikrát byl daný pájený spoj přetaven. Na následujících obrázcích jsou rozebrány grafy znázorňující danou úroveň zkoumaného faktoru samostatně.



Obr. 28: Graf porovnání zbývajících tlouštěk mědi jednou přetavených pájecích slitin

Při porovnání vlivu použité pájecí slitiny na zbývající tloušťku měděné vrstvy si lze všimnout, že největší tloušťka mědi byla zaznamenána v pájeném spoji při použití pájecí slitiny SAC305. Rozptyl hodnot tloušťky měděné vrstvy je velmi malý. Tyto skutečnosti naznačují, že pájecí slitina SAC305 difunduje do mědi v nejmenší míře

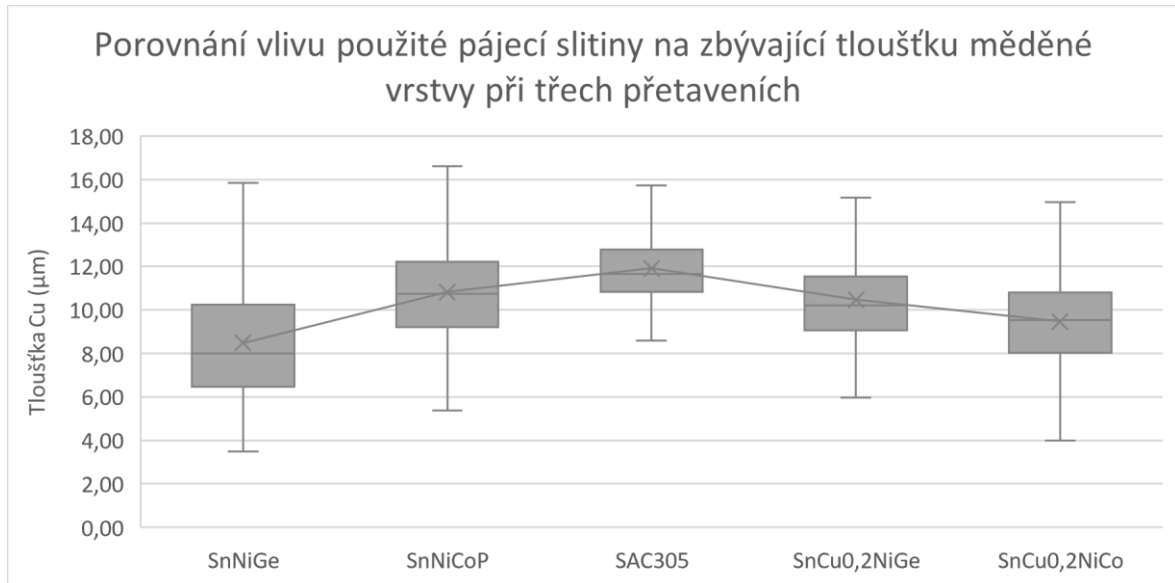
ze všech pájecích slitin a nejméně ji rozpouští. Zajímavé je, že obě pájecí slitiny s přídavkem mědi $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiGe}$ a $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiCo}$ dosahují v tomto případě totožných hodnot, $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiGe}$ má nepatrně větší rozptyl. Tuto podobnost může mít na svědomí právě přídavek mědi v pájecích slitinách, kterou je opatřena i pájecí slitina SAC305, která má ve svém složení větší obsah mědi než zbylé dvě pájecí slitiny $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiGe}$ a $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiCo}$. Proti tomu ovšem stojí pájecí slitina SnNiCoP , u které byla naměřena jen nepatrně menší průměrná tloušťka měděné vrstvy než u pájecích slitin $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiGe}$ a $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiCo}$. Je možné, že přídavek fosforu může zamezovat rozpouštění mědi. U poslední pájecí slitiny SnNiGe byla naměřena nejmenší tloušťka měděné vrstvy a pájecí slitina tedy do mědi difundovala nejvíce ze všech pájecích slitin. Z dostupných dat se dá tedy předpokládat, že obsah mědi v pájecích slitinách pomáhá nejvíce omezovat rozpouštění měděné vrstvy desky plošných spojů a zároveň je pravděpodobné, že nikl-germanium v pájecích slitinách má na omezení rozpustnosti měděné vrstvy nejmenší vliv.



Obr. 29: Graf porovnání zbývajících tlouštěk mědi dvakrát přetavených pájecích slitin

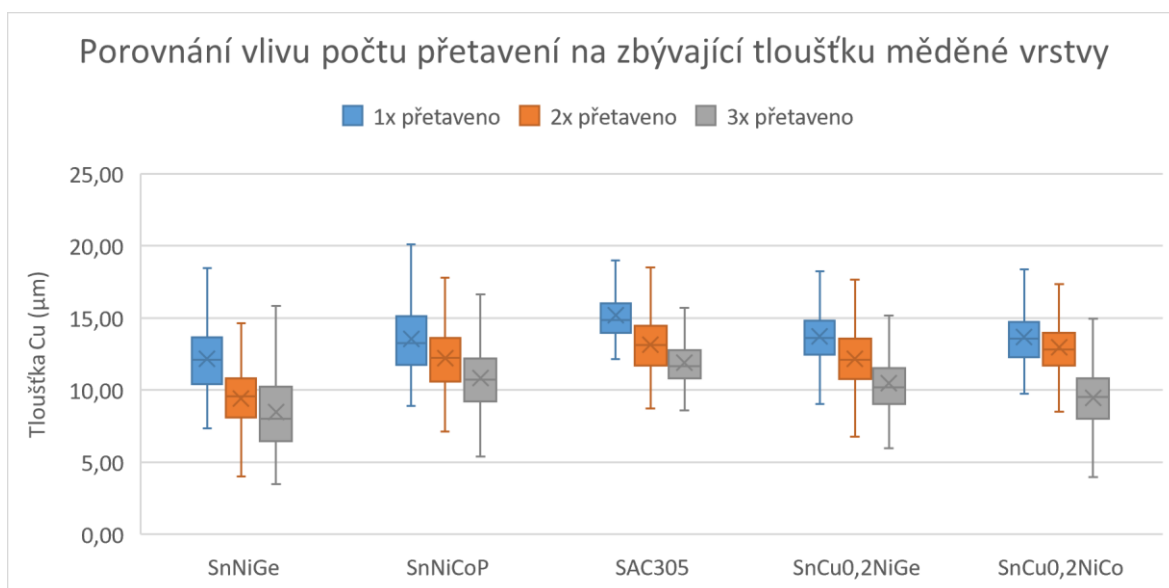
Při porovnání dostupných pájecích slitin, které prošly dvakrát procesem přetavení, byla v pájeném spoji u pájky SAC305 znovu naměřena největší tloušťka měděné vrstvy. Rozptyl hodnot je tentokrát větší. Pájecí slitina tedy opět vykázala minimální rozpustnost měděné vrstvy. Oproti jednou přetaveným vzorkům je zde vidět rozdíl mezi pájkami s přídavkem mědi $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiGe}$ a $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiCo}$ ve prospěch $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiCo}$, u které byla tloušťka měděné vrstvy větší, a tudíž pájecí slitina nerozpouštěla měděnou vrstvu v takové míře. Pájecí slitina $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiGe}$ má v tomto případě nejbližší pájecí slitině SnNiCoP . Nejhůře

ze všech zkoumaných pájecích slitin dopadla opět pájecí slitina SnNiGe, která oproti zbylým pájkám zdatelně rozpouštěla měděnou vrstvu, jejíž tloušťka byla v tomto případě nejmenší.



Obr. 30: Graf porovnání zbývajících tlouštěk mědi třikrát přetavených pájecích slitin

I při třetím přetavení vyšla pájecí slitina SAC305 ze všech testovaných pájecích slitin nejlépe. Tloušťka měděné vrstvy byla u pájeného spoje vytvořeného touto slitinou největší, tudíž se měď nerozpouštěla v takové míře, jako u ostatních pájecích slitin. Také rozptyl hodnot byl zaznamenán nejmenší, což může značit rovnoměrnou strukturu intermetalické vrstvy podél celého pájeného spoje bez výrazných výchylek. V tomto případě vykazala druhou největší tloušťku mědi pájecí slitina SnNiCoP, která překonala obě pájecí slitiny s přídatkem mědi SnCu0,2NiGe a SnCu0,2NiCo. Další změnou oproti jednou a dvakrát přetaveným vzorkům je tloušťka mědi pájecí slitiny SnCu0,2NiGe, která je zdatelně větší než u pájecí slitiny SnCu0,2NiCo, jejíž tloušťka měděné vrstvy se značně snížila oproti jednou a dvakrát přetaveným vzorkům. Stejně jako v případě jednou a dvakrát přetavených vzorků je i u třikrát přetavených vzorků tloušťka mědi u pájecí slitiny SnNiGe nejmenší.

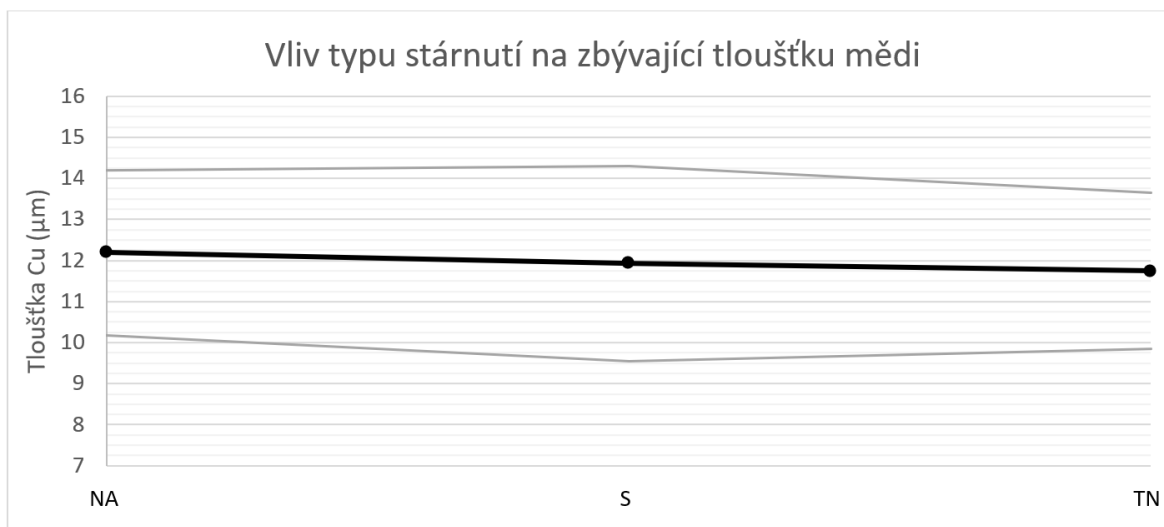


Obr. 31: Krabicový graf porovnání vlivu počtu přetavení na zbývající tloušťku měděné vrstvy

Z grafu porovnání vlivu počtu přetavení všech pájecích slitin na Obr. 31 je patrné, že s rostoucím počtem přetavení se vždy sníží tloušťka měděné vrstvy. Takové chování odpovídá předpokladu, jelikož opakovaně přetavovaná pájka bude neustále difundovat do měděné vrstvy a rozpouštět ji. Počet přetavení má u každé pájecí slitiny různý vliv. Pájecí slitina SnNiCoP vykazuje nejlineárnější pokles průměrné zbývající tloušťky měděné vrstvy ze všech testovaných pájecích slitin. Pájecí slitina SAC305 vykazuje při porovnání jednou a dvakrát přetavených vzorků výraznější pokles tloušťky měděné vrstvy než při porovnání dvakrát a třikrát přetavených vzorků, kde byl pokles mírnější. Pájecí slitina SnCu0,2NiGe má stejně jako SnNiCoP téměř lineární pokles zbytkové tloušťky měděné vrstvy, mezi jednou a dvakrát přetavenými vzorky byl rozdíl mezi tloušťkami mědi menší než mezi dvakrát a třikrát přetavenými vzorky. U pájecí slitiny SnNiGe, která nejintenzivněji rozpouští měděnou vrstvu, si lze povšimnout velkého rozdílu mezi jednou a dvakrát přetavenými vzorky. Mezi dvakrát a třikrát přetavenými vzorky už není rozdíl tak znatelný. Poslední pájecí slitinou je SnCu0,2NiCo, jejíž rozdíly v tloušťkách v závislosti na počtu přetavení jsou přesně opačné vůči pájecí slitině SnNiGe. Rozdíl v tloušťkách měděné vrstvy mezi jednou a dvakrát přetavenými vzorky je minimální, zatímco rozdíl mezi dvakrát a třikrát přetavenými vzorky je mnohem znatelnější.

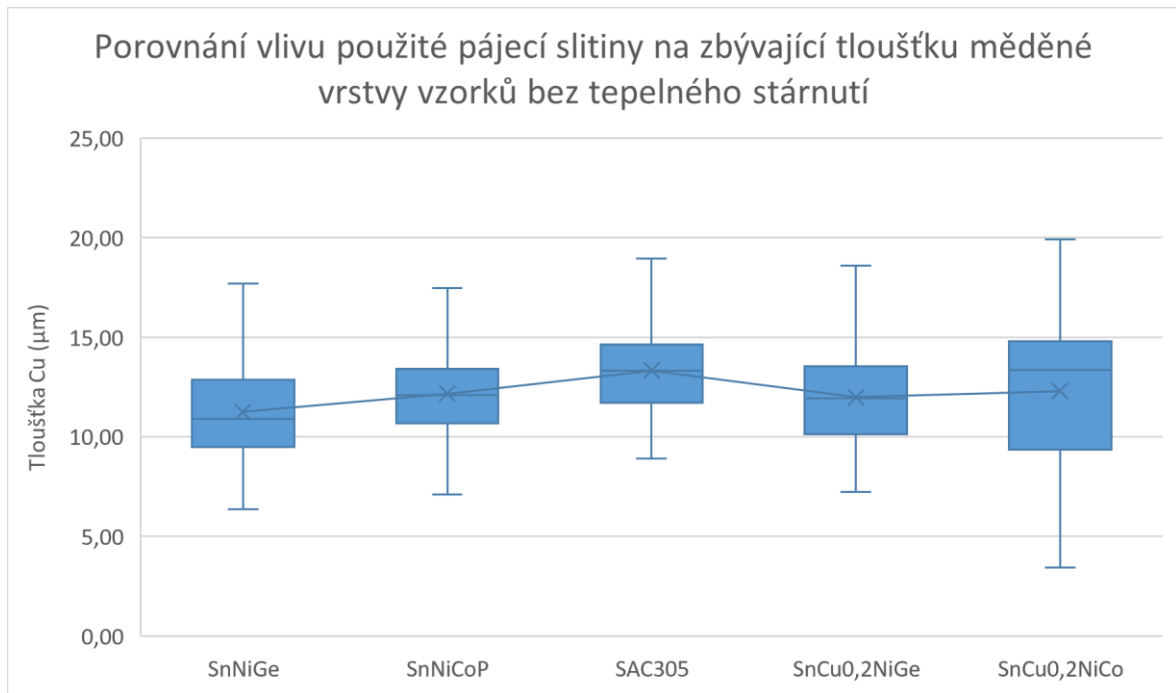
2.7.5 Vliv typu stárnutí na úbytek mědi

Podobně jako v případě IMC i u vývoje tloušťky měděné vrstvy v závislosti na zvoleném typu stárnutí (Obr. 32) není vidět velký vliv. Přesto u šokové zkoušky (S) dochází k mírnému poklesu průměrné tloušťky měděné vrstvy, u tepelného zatížení (TN) je pokles nepatrně větší.



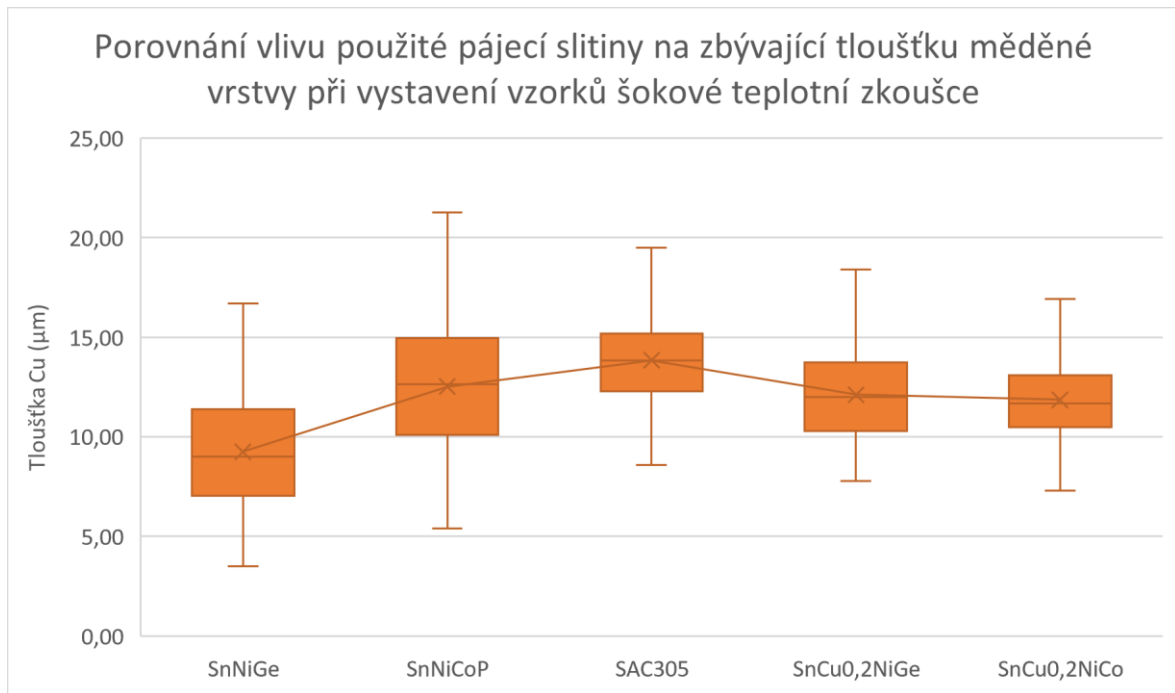
Obr. 32: Graf vlivu faktoru typ stárnutí na zbývající tloušťku měděné vrstvy pájecí destičky

Ve druhém krabicovém grafu (Obr. 36) jsou znovu zobrazeny naměřené tloušťky měděné vrstvy pájených spojů pro každou z pěti testovaných pájecích slitin v závislosti na zvoleném typu stárnutí. Stejně jako v předchozím případě jsou data rozdělena podle typu použité pájecí slitiny a každá barva interpretuje typ aplikovaného tepelného stárnutí (namáhání). První sada vzorků nebyla vystavena žádnému tepelnému namáhání a byla skladována při pokojové teplotě. Tato sada vzorků je označena symbolem „NA“. Další sada vzorků byla podrobena šokové teplotní zkoušce, tedy cyklickým změnám teplot v šokové teplotní komoře. Tato sada vzorků je označena symbolem „S“. Poslední sada vzorků byla podrobena zkoušce tepelným zatížením (namáháním), tedy působení zvýšené teploty po delší dobu. Tyto vzorky jsou označeny symbolem „TN“.



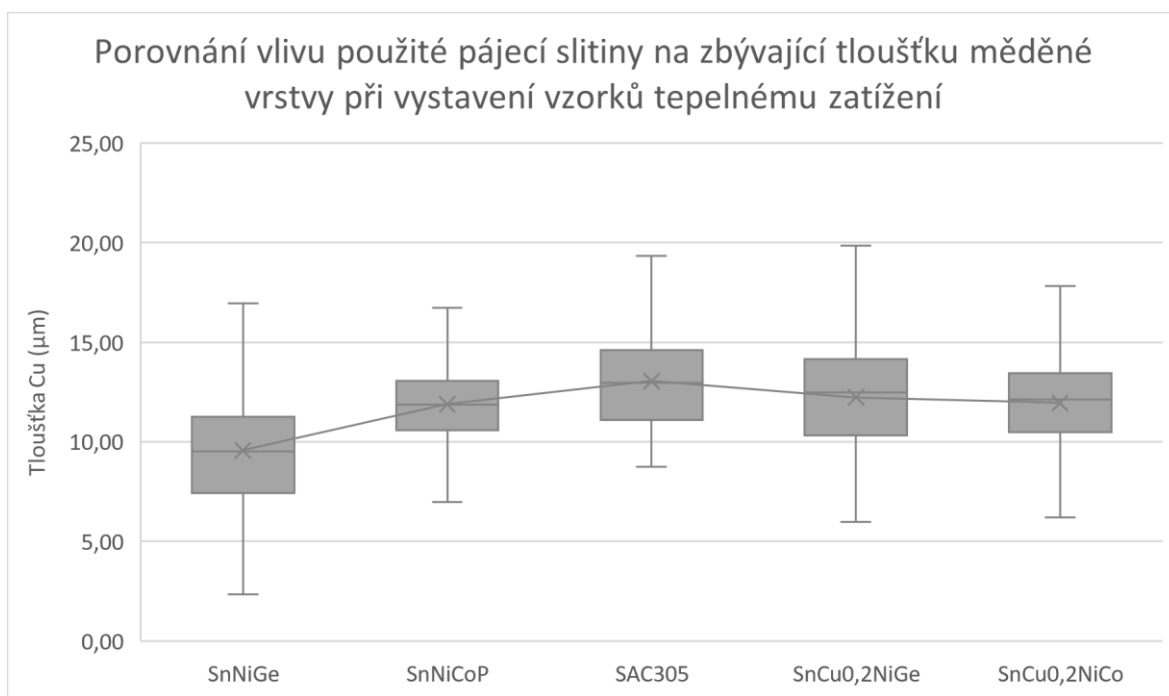
Obr. 33: Graf porovnání zbývajících tlouštěk mědi pájecích slitin vystavených pokojové teplotě

První porovnání (Obr. 33) se týká pájených spojů vzniklých za použití různých pájecích slitin, které nebyly vystaveny tepelnému namáhání, pouze byly skladovány při pokojové teplotě. Největší průměrné tloušťky mědi dosahovala pájecí slitina SAC305, která rozpouštěla měď v nejmenší míře. Druhá největší tloušťka měděné vrstvy byla zaznamenána u pájecí slitiny SnCu0,2NiCo, která ovšem dosahuje největšího rozptylu. Na některých místech byla tedy zaznamenána tloušťka měděné vrstvy větší než u pájecí slitiny SAC305. To může znamenat, že pájecí slitina SnCu0,2NiCo při stárnutí narušuje měděnou vrstvu nerovnoměrně. Třetí největší průměrné tloušťky měděné vrstvy dosahuje pájecí slitina SnNiCoP, poté SnCu0,2NiGe a nejmenší tloušťka měděné vrstvy byla znovu naměřena u pájecí slitiny SnNiGe. Rozdíl v průměrné tloušťce a rozptylu hodnot oproti pájecím slitinám SnCu0,2NiGe a SnNiCoP byl velmi malý. Co se tedy týče naměřených průměrných hodnot tlouštěk měděných vrstev jednotlivých pájecích slitin, není mezi pájkami velký rozdíl, až na pájecí slitinu SAC305, jež vykazovala značně větší tloušťku měděné vrstvy než zbylé pájky a pájecí slitinu SnCu0,2NiCo s významně větším rozptylem hodnot než u zbylých pájecích slitin.



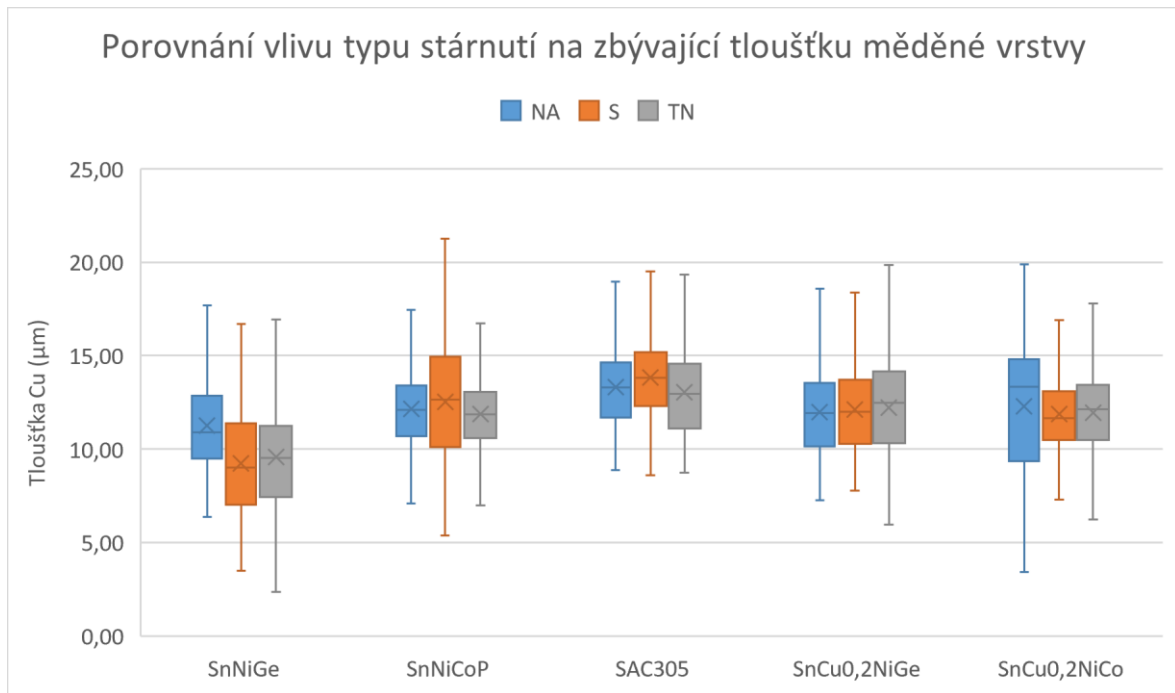
Obr. 34: Graf porovnání zbývajících tlouštěk mědi pájecích slitin vystavených šokové teplotní zkoušce

Při porovnání naměřených tlouštěk měděných vrstev pájecích slitin, které byly vystaveny šokové teplotní zkoušce (Obr. 34), lze vidět, že největší tloušťka měděné vrstvy byla opět zaznamenána u pájecí slitiny SAC305, navíc s malým rozptylem hodnot. Pájecí slitina tedy s největší pravděpodobností rozpouští měď rovnoměrně podél pájeného spoje a v nejmenší míře vzhledem k ostatním pájecím slitinám. Druhá největší tloušťka měděné vrstvy byla zaznamenána u pájecí slitiny SnNiCoP, která zároveň dosahovala největšího rozptylu hodnot. Na některých místech tedy pájecí slitina SnNiCoP dosahovala větších tlouštěk měděné vrstvy než pájecí slitina SAC305. Pájecí slitina SnNiCoP tedy nerozpouštěla měděnou vrstvu rovnoměrně podél pájeného spoje jako SAC305. Třetí největší průměrná tloušťka měděné vrstvy byla zaznamenána u pájeného spoje vzniklého s použitím pájecí slitiny SnCu0,2NiGe, nepatrně menší tloušťku měděné vrstvy vykazuje pájecí slitina SnCu0,2NiCo. Stejně jako ve všech předchozích případech i zde rozpouštěla měď v největší míře pájecí slitina SnNiGe, u které byla naměřena znatelně nejmenší tloušťka měděné vrstvy.



Obr. 35: Graf porovnání zbývajících tloušťek mědi pájecích slitin vystavených tepelnému zatížení

Poslední sada vzorků byla podrobena zkoušce tepelného zatížení. Výsledky se velice podobají vzorkům podrobeným šokové teplotní zkoušce. Nejlépe obstála pájecí slitina SAC305, rozpouštějící měď v nejmenší míře. Druhá největší průměrná tloušťka měděné vrstvy byla zaznamenána u pájecí slitiny SnCu0,2NiGe, třetí největší u SnCu0,2NiCo. Mezi těmito dvěma pájecími slitinami s přídatkem mědi 0,2 % je v tloušťce měděné vrstvy velmi malý rozdíl. Pájecí slitina SnCu0,2NiGe vykazuje opět větší rozptyl hodnot a na některých místech dosahuje tloušťky měděné vrstvy větší než v případě pájecí slitiny SAC305. Pájecí slitina SnNiCoP má téměř stejnou průměrnou tloušťku měděné vrstvy jako pájecí slitina SnCu0,2NiCo, ovšem s menším rozptylem hodnot, tudíž rozpouštění mědi podél pájeného spoje pravděpodobně probíhá pravidelněji bez větších odchylek. Stejně jako ve všech předchozích případech i při podrobení tepelnému zatížení měděnou vrstvou v největší míře rozpouští pájecí slitina SnNiGe. Její rozptyl hodnot je navíc značně velký, tudíž rozpouštění neprobíhá na všech místech rovnoměrně.



Obr. 36: Krabicový graf porovnání vlivu použitého typu stárnutí na zbývající tloušťku mědi

Na krabicovém grafu porovnání vlivu typu stárnutí na zbývající tloušťku měděné vrstvy všech testovaných pájecích slitin (Obr. 36) lze vidět, že zvolený typ stárnutí obecně nevykazuje velký vliv na úbytek vrstvy mědi v pájeném spoji. Nejmenší vliv dosahuje zvolený typ stárnutí u pájených spojů vzniklých pájecí slitinou SnCu_{0,2}NiGe, kde je rozdíl v průměrných tloušťkách mědi minimální. Nejmenší hodnoty dosahuje vzorek, který byl stárnut při pokojové teplotě. Větší průměrnou hodnotu tloušťky měděné vrstvy dosahuje vzorek stárnutý šokovou teplotní zkouškou a tepelně zatížený vzorek vykazuje ze zmíněných tří vzorků největší tloušťku měděné vrstvy, ovšem s největším rozptylem hodnot. U pájených spojů vzniklých pomocí pájecí slitiny SnCu_{0,2}NiGe tedy, co se týče úbytku měděné vrstvy, nezáleží na skladovacích a provozních podmínkách prostředí. Podobné chování je zaznamenáno i u komerčně využívané pájecí slitiny SAC305, u které je však patrný, co se týče průměrné hodnoty, větší úbytek měděné vrstvy u nestárnutého vzorku a vzorku podrobeného zkoušce tepelného zatížení než u vzorku, který byl testován šokovou teplotní zkouškou. Naměřené hodnoty vzorků podrobených šokové teplotní zkoušce ovšem vykazují větší rozptyl hodnot než tepelně nestárnuté vzorky a tepelně zatížené vzorky. Dá se tedy říct, že vliv typu stárnutí není u pájecí slitiny SAC305 prokazatelný.

Pájecí slitina SnNiCoP dosahovala velmi podobných průměrných hodnot tlouštěk měděné vrstvy. U šokově stárnutých vzorků byla hodnota mírně vyšší. Co se týče rozptylu hodnot tlouštěk měděné vrstvy, jasně nejvyšší hodnoty dosahují vzorky podrobené šokové

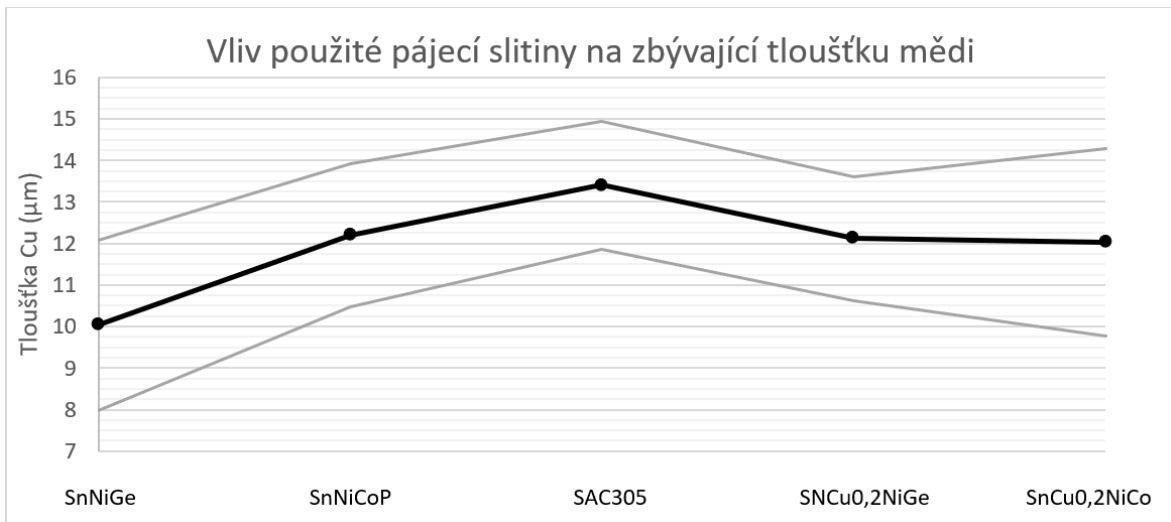
teplotní zkoušce. Pokud bude tedy pájený spoj vytvořený pájecí slitinou SnNiCoP vystavován opakovaným šokovým změnám teploty, je možné, že v něm bude místy znatelně ubývat měděná vrstva a úměrně tomu se začnou zhoršovat jeho mechanické a elektrické vlastnosti.

Vzorky pájených spojů vytvořených pájecí slitinou SnCu_{0,2}NiCo se chovají podobně jako SnNiCoP s tím rozdílem, že zde převažuje vliv stárnutí vzorků pájených spojů při pokojové teplotě (teplotně nestárnutý vzorek). Takto stárnuté vzorky mají znatelně větší rozptyl hodnot než vzorky tepelně stárnuté ať už šokovou zkouškou, či tepelným zatížením a stejně jako tomu bylo u pájecí slitiny SnNiCoP v případě šokové teplotní zkoušky, i zde může docházet k místnímu ubývání měděné vrstvy se stárnutím vzorku při pokojové teplotě. Je možné, že teplotní zatížení či šoková změna teploty může ubývání měděné vrstvy učinit pravidelnější podél pájeného spoje.

Posledními vzorky podrobenými testování vlivu použitého tepelného stárnutí byly pájené spoje vytvořené pájecí slitinou SnNiGe. Z grafu (Obr. 36) lze vypožorovat, že tloušťka měděné vrstvy u pájených spojů vytvořených pájecí slitinou SnNiGe je při všech různých typech přetavení vždy nejnižší, tedy, že pájecí slitina SnNiGe má přímý vliv na úbytek mědi v pájecí plošce. Úbytek mědi se v tomto případě zvětšil při stárnutí šokovou teplotní zkouškou i při tepelném zatížení. Tepelně nestárnutý vzorek vykazoval nejmenší úbytek mědi v pájecí plošce ze všech tří případů.

2.7.6 Vliv použité pájecí slitiny na úbytek mědi

Graf (Obr. 37) ukazuje vliv samotného faktoru typ použité pájecí slitiny na úbytek měděné vrstvy v pájeném spoji. Z grafu je patrné, že nejméně rozpouští měď pájecí slitina SAC305. Větší úbytek mědi je zaznamenán při použití pájecí slitiny SnNiCoP a poté dvou pájecích slitin s přídatkem mědi 0,2 %: SnCu_{0,2}NiGe a SnCu_{0,2}NiCo, u kterých je úbytek shodný. Znatelně nejvíce rozpouští měď pájecí slitina SnNiGe. Výsledky potvrdily poznatky z předchozích kapitol.



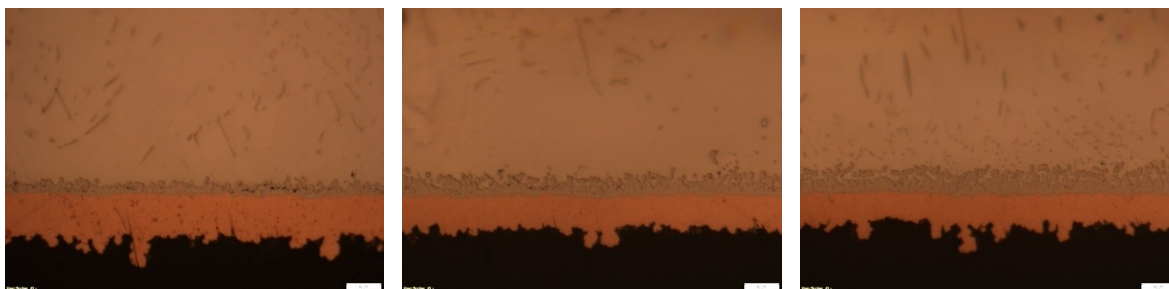
Obr. 37: Graf vlivu faktoru použité pájecí slitiny na zbývající tloušťku měděné vrstvy

2.7.7 Analýza struktury intermetalické vrstvy v pájeném spoji

Na následujících snímcích jsou zachycena rozhraní pájka-měď uprostřed pájeného spoje. Všechny snímky byly zachyceny s 63násobným zvětšením. Bílý pruh v pravém dolním rohu odpovídá 10 μm .

Na přiložených snímcích lze pozorovat rostoucí tloušťku intermetalické vrstvy a ubývající tloušťku mědi se zvýšeným počtem přetavení.

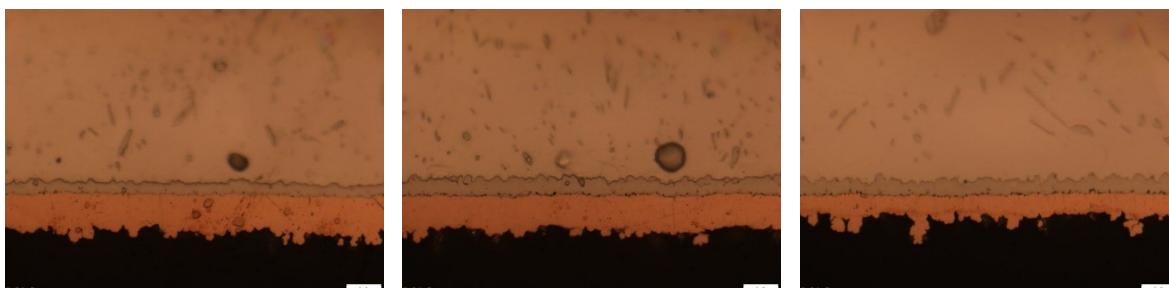
2.7.7.1 Snímky pájeného spoje SnNiGe



Obr. 38: Snímky struktury pájených spojů SnNiGe bez tepelného stárnutí (NA), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený

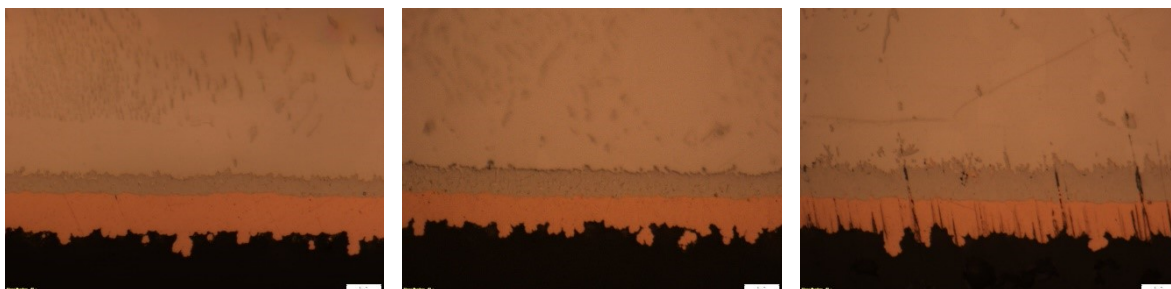


Obr. 39: Snímky struktury pájených spojů SnNiGe stárnutých šokovou teplotní zkouškou (Š), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený

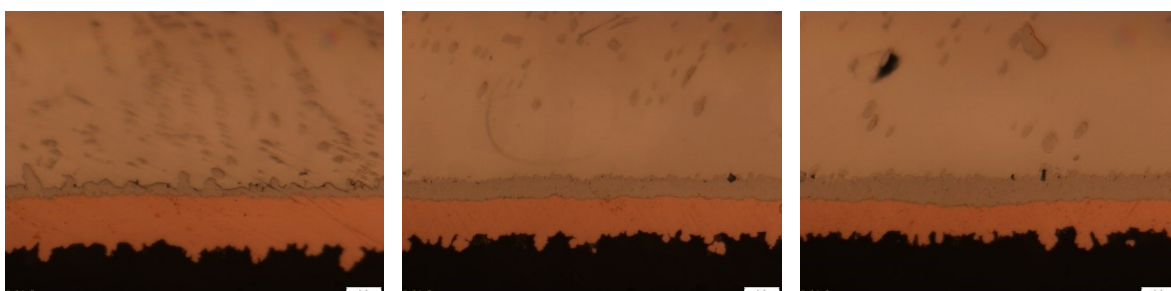


Obr. 40: Snímky struktury pájených spojů SnNiGe stárnutých tepelným zatížením (TN), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený

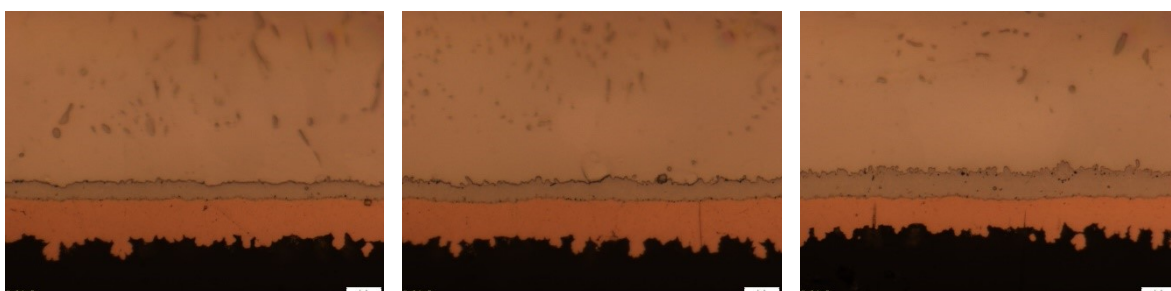
2.7.7.2 Snímky pájeného spoje SnNiCoP



Obr. 41: Snímky struktury pájených spojů SnNiCoP bez tepelného stárnutí (NA), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený

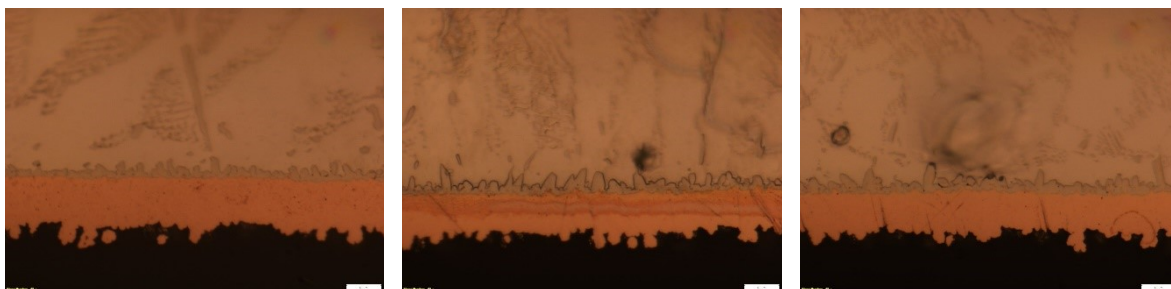


Obr. 42: Snímky struktury pájených spojů SnNiCoP stárnutých šokovou teplotní zkouškou (Š), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený

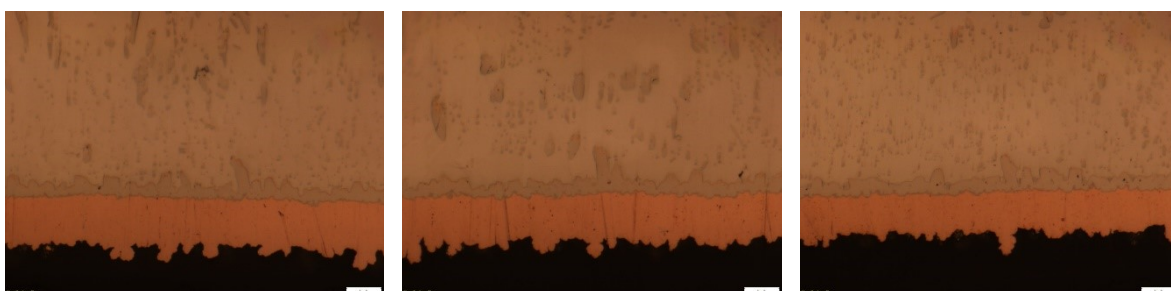


Obr. 43: Snímky struktury pájených spojů SnNiCoP stárnutých tepelným zatížením (TN), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený

2.7.7.3 Snímky pájeného spoje SAC305



Obr. 44: Snímky struktury pájených spojů SAC305 bez tepelného stárnutí (NA), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený

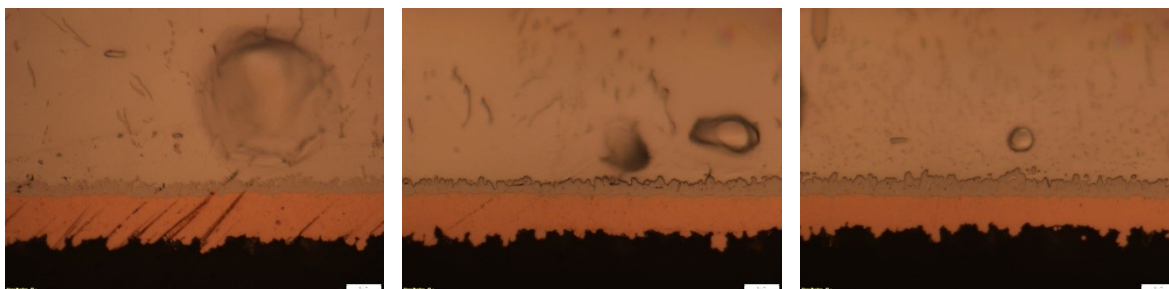


Obr. 45: Snímky struktury pájených spojů SAC305 stárnutých šokovou teplotní zkouškou (Š), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený

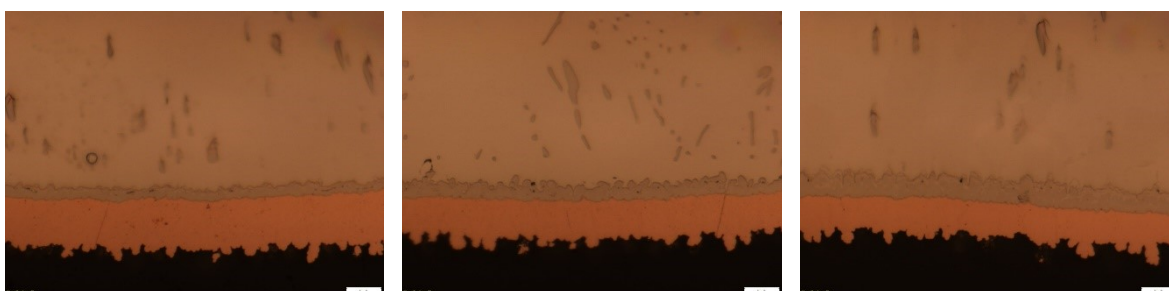


Obr. 46: Snímky struktury pájených spojů SAC305 stárnutých tepelným zatížením (TN), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený

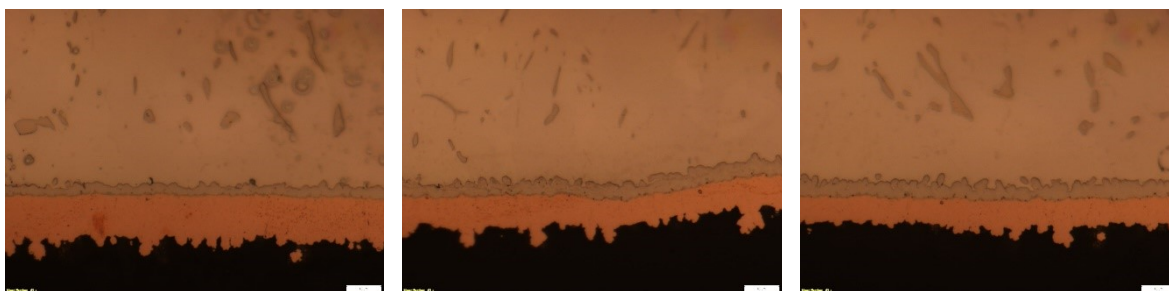
2.7.7.4 Snímky pájeného spoje SnCu0,2NiGe



Obr. 47: Snímky struktury pájených spojů SnCu0,2NiGe bez tepelného stárnutí (NA), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený



Obr. 48: Snímky struktury pájených spojů SnCu0,2NiGe stárnutých šokovou teplotní zkouškou (Š), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený



Obr. 49: Snímky struktury pájených spojů SnCu0,2NiGe stárnutých tepelným zatížením (TN), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený

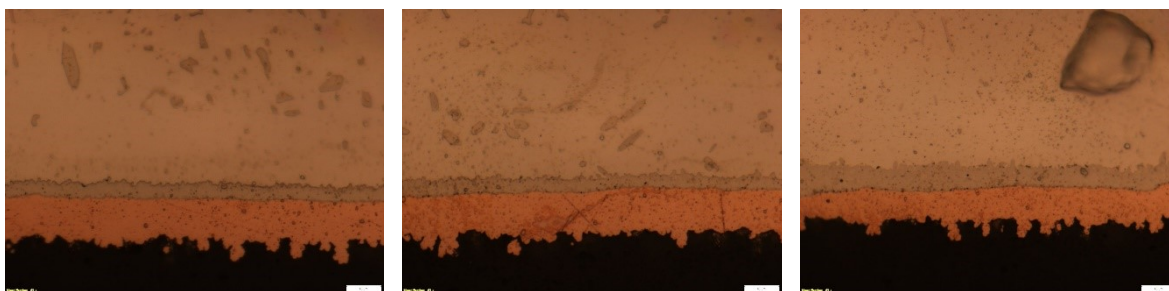
2.7.7.5 Snímky pájeného spoje SnCu0,2NiCo



Obr. 50: Snímky struktury pájených spojů SnCu0,2NiCo bez tepelného stárnutí (NA), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený



Obr. 51: Snímky struktury pájených spojů SnCu0,2NiCo stárnutých šokovou teplotní zkouškou (Š), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený



Obr. 52: Snímky struktury pájených spojů SnCu0,2NiCo stárnutých tepelným zatížením (TN), zleva 1x přetavený, 2x přetavený, 3x přetavený

Zhodnocení a závěr

Práce se zabývá problematikou růstu intermetalických vrstev v pájených spojích. Po provedení rešerše v oblasti zkoumání intermetalických vrstev byly stanoveny faktory ovlivňující růst intermetalických vrstev v pájených spojích. Následně byly vybrány konkrétní faktory a zvoleny úrovně faktorů využité při experimentu. Prvním zvoleným faktorem byl typ použité pájecí slitiny. Těch bylo pro potřeby experimentu zvoleno pět. Konkrétně se jednalo o pájecí slitiny SnNiGe, SnNiCoP, SAC305, SnCu_{0,2}NiGe a SnCu_{0,2}NiCo. Dalším faktorem byl počet přetavení pájecí slitiny. V tomto případě byly vzorky přetaveny jednou, dvakrát anebo třikrát. Posledním faktorem zvoleným pro experiment byl typ použité zkoušky tepelným stárnutím. První sada vzorků nebyla tepelně stárnutá a byla pouze uchována při pokojové teplotě. Druhá sada vzorků byla podrobena šokové teplotní zkoušce a třetí sada vzorků byla tepelně zatížena zvýšenou teplotou po delší dobu. Pomocí Design of Experiment bylo zjištěno potřebné množství vzorků a jejich parametry. Celkem bylo vyrobeno 45 vzorků pájených spojů, ze kterých byly připraveny materiálografické výbrusy. Po pořízení snímků pájených spojů bylo provedeno měření tloušťek intermetalických a měděných vrstev. Výsledná data byla interpretována pomocí grafů vlivů faktorů a krabicových grafů (boxplotů).

Cílem práce bylo vyhodnocení vlivu sledovaných faktorů na výslednou tloušťku intermetalické vrstvy v pájeném spoji a na tloušťku zbývající vrstvy mědi v pájecí destičce. Nejprve bylo sledováno, jak velký vliv má použitá pájecí slitina na tloušťku intermetalické vrstvy při jednom, dvěma a třech přetaveních (Obr. 17, Obr. 18, Obr. 19). Srovnání pájených spojů při jednom přetavení (Obr. 17) ukázalo podobnost mezi pájkami obsahujícími germanium (SnNiGe a SnCu_{0,2}NiGe) a pájkami s přídavkem mědi 0,2 % (SnCu_{0,2}NiGe a SnCu_{0,2}NiCo). Pájecí slitina SnNiCoP dosahovala při každém počtu přetavení největší tloušťky intermetalické vrstvy. Pájecí slitiny s obsahem kobaltu (SnNiCoP a SnCu_{0,2}NiCo) jsou ve velké míře ovlivněny počtem přetavení – při vyšších počtech přetavení roste intermetalická vrstva skokově. Tyto pájecí slitiny se tedy nehodí do aplikací, ve kterých by bylo nezbytné zařízení během výroby podrobit opakovanému přetavení. Intermetalická vrstva by mohla narůst natolik, že by to učinilo pájený spoj křehký a při působení mechanických rázů by se mohl znehodnotit. Naopak, běžně používaná pájecí slitina SAC305 vykazuje nejmenší změnu tloušťky intermetalické vrstvy při opakovaném přetavení. Její složení tedy umožňuje aplikaci v deskách plošných spojů, které jsou během výroby vystaveny několikanásobnému přetavení.

Dalším sledovaným faktorem byl vliv použitého tepelného stárnutí na tloušťku intermetalické vrstvy. Obě pájecí slitiny obsahující kobalt (SnNiCoP a $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiCo}$) vykázaly po stárnutí při pokojové teplotě vyšší tloušťku intermetalické vrstvy oproti zbylým pájecím slitinám. Je tedy nutné počítat s tím, že v praxi by mohlo docházet ke zvýšenému růstu intermetalických vrstev v těchto pájených spojích i bez působení zvýšené teploty. Nejvyšší tloušťky intermetalických vrstev dosáhly vzorky kobaltových pájecích slitin i po dalších dvou teplotních zkouškách (Obr. 25). Zajímavým objevem bylo chování pájecí slitiny SnNiGe , která nevykazovala téměř žádné změny v tloušťce intermetalické vrstvy po působení různých tepelných zatížení. Její použití by tedy bylo vhodné v aplikacích vyžadujících stálost vlastností pájených spojů i za působení šokových změn teplot či dlouhodobě zvýšené teploty. V tomto případě by mohla být její aplikace vhodnější než SAC305, která při šokové teplotní zkoušce dosahovala vyšších hodnot tloušťky IMC než u tepelně nestárnutého vzorku. Při dlouhodobém tepelném zatížení narostla tloušťka IMC ještě více. Fakt, že by na stálost tloušťky IMC mohl mít vliv přídavek germania, podpořila druhá pájecí slitina s přídavkem germania – $\text{SnCu}_{0,2}\text{NiGe}$, jejíž tloušťka IMC při vystavení dlouhodobému tepelnému zatížení zůstala opět stejná jako u nestárnutého vzorku. Při šokové teplotní zkoušce ovšem tloušťka IMC v tomto případě narostla.

Během experimentu byla měřena i zbývající tloušťka mědi, ze které je zhotovena pájecí ploška. Během pájení a stárnutí vzorku totiž dochází k rozpouštění mědi do objemu pájky, a tedy jejímu úbytku, který ve větší míře může způsobit zhoršení vlastností pájeného spoje. Toto je také faktor, který je potřeba brát v úvahu při výběru pájecí slitiny, pokud se pájí na pájecí plošky zhotovené z tenčí vrstvy mědi. U všech pájecích slitin docházelo úměrně při větším počtu přetavení k úbytku měděné vrstvy (Obr. 31). Největší úbytek mědi vykazovala pájecí slitina SnNiGe , a naopak nejmenší pájecí slitina SAC305.

Co se týče doporučení do budoucna, provedenou práci by bylo vhodné rozšířit o testování elektrických a mechanických vlastností pájených spojů při různé kombinaci faktorů. Vhodné by bylo také rozšířit práci o další faktory (například doba nebo teplota pájení), mající vliv na růst intermetalických vrstev, a jejich úrovně.

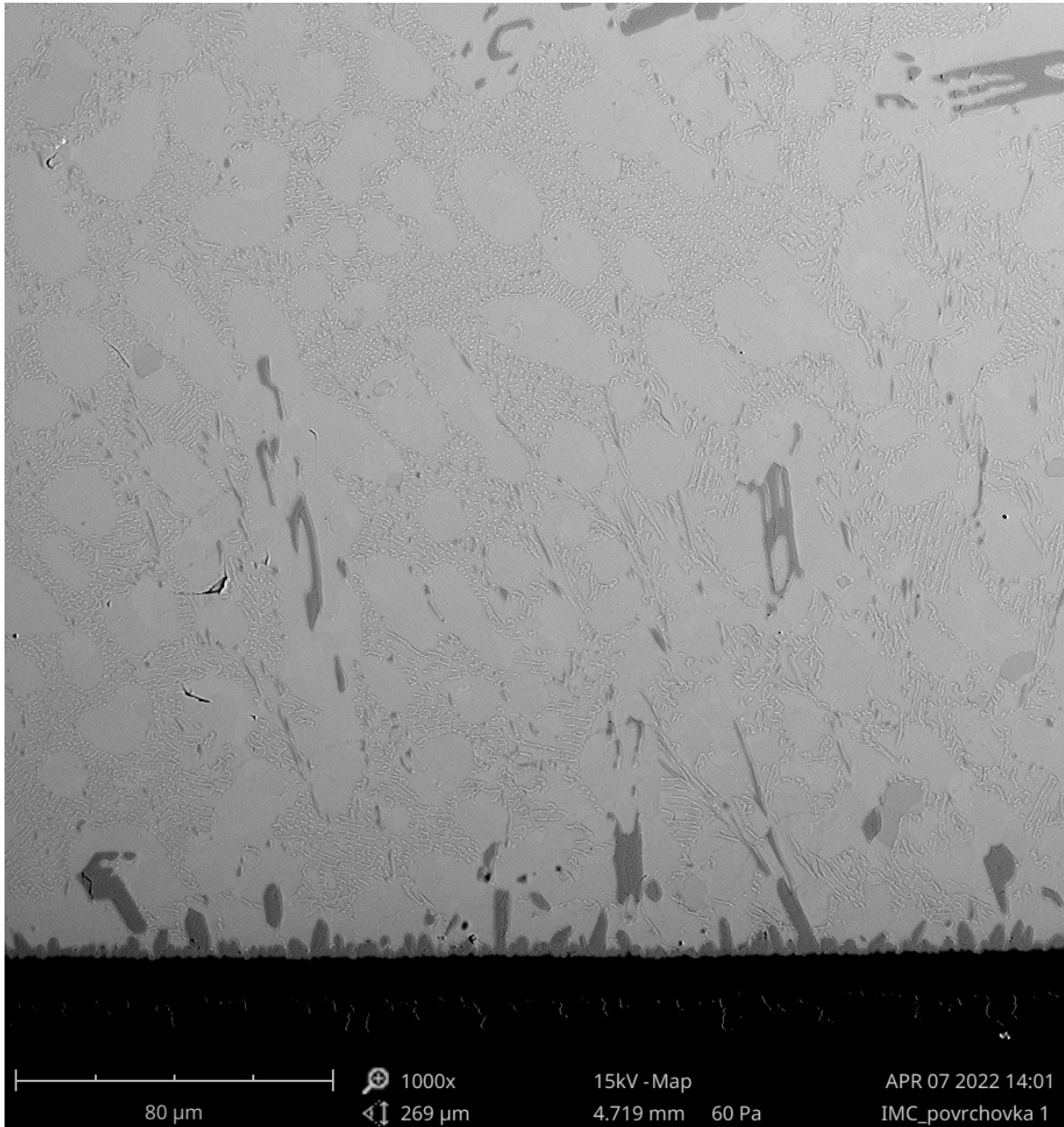
Literatura

- [1] Ruža Viliam, *Pájení*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988.
- [2] M. Abel and V. Cimburek, *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Pardubice: ABE.TEC, s.r.o, Průmyslová 387, 530 03 Pardubice, 2005.
- [3] K. J. Puttlitz and K. A. Stalter, *Handbook of lead-free solder technology for microelectronic assemblies*. Marcel Dekker, 2004.
- [4] D. Vojtěch and Vysoká škola chemicko-technologická v Praze., *Kovové materiály*. Vydavatelství VŠCHT, 2006.
- [5] F. Steiner, “Přednášky z předmětu Technologie kontaktování a propojování,” 2020.
- [6] M. Abteu and G. Selvaduray, “Lead-free solders in microelectronics,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 27, no. 5, pp. 95–141, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0927-796X(00)00010-3.
- [7] H. R. Kotadia, P. D. Howes, and S. H. Mannan, “A review: On the development of low melting temperature Pb-free solders,” *Microelectronics Reliability*, vol. 54, no. 6–7. Elsevier Ltd, pp. 1253–1273, Jun. 01, 2014, doi: 10.1016/j.microrel.2014.02.025.
- [8] “Povrchové úpravy desek plošných spojů.” <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:59606/z-aktualniho-vydani-povrchove-upravy-desek-plosnych-spoju> (accessed Sep. 13, 2021).
- [9] J. Podzemský, “STRUKTURA SPOJŮ PÁJENÝCH PÁJKAMI BEZ OLOVA A JEJÍ VLIV NA VNĚJŠÍ VZHLED SPOJE.”
- [10] “Organic Solderability Preservative (OSP) - PCB Manufacturing Information - PCBway.” https://www.pcbway.com/blog/PCB_Manufacturing_Information/Organic_Solderability_Preservative__OSP_.html (accessed Oct. 05, 2021).
- [11] K.-N. Tu, *Solder Joint Technology*. Springer New York, 2007.
- [12] J. Podzemsky, “Degradace spojů pájených pájkami bez olova,” ČVUT Praha, Praha, 2015.
- [13] K. N. Subramaniam, *Lead-free solders : materials reliability for electronics*. John Wiley & Sons, 2012.
- [14] M. Iwasaki, A. Yamauchi, and M. Kurose, “Influence of intermetallic compounds on tensile strength of lead-free solder,” in *2014 International Conference on Electronics Packaging, ICEP 2014*, 2014, pp. 770–773, doi: 10.1109/ICEP.2014.6826785.

- [15] J. Tošenovský, “Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTŮ učební text,” 2010, Accessed: Sep. 28, 2021. [Online]. Available: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/DOE/Planovani_experimentu.pdf.
- [16] “DOE: Plánování experimentů | Průmyslové Inženýrství.cz.” <https://www.prumysloveinzenyrstvi.cz/doe-planovani-experimentu/> (accessed Sep. 28, 2021).
- [17] I. Nutek, “DOE_Taguchi_Basic_Manual1.”
- [18] F. Steiner, “Design of Experiment (Basic Concept and Taguchi aproach),” 2014.
- [19] A. Fahim, S. Ahmed, J. C. Suhling, and P. Lall, “Mechanical Characterization of Intermetallic Compounds in SAC Solder Joints at Elevated Temperatures,” in *Proceedings of the 17th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm 2018*, Jul. 2018, pp. 1081–1090, doi: 10.1109/ITHERM.2018.8419525.
- [20] L. M. Yang and Z. F. Zhang, “Influences of intermetallic compounds morphologies on fracture behaviors of Sn-3Ag-0.5Cu/Cu solder joint,” in *Proceedings - 2013 14th International Conference on Electronic Packaging Technology, ICEPT 2013*, Aug. 2013, pp. 247–249, doi: 10.1109/ICEPT.2013.6756464.
- [21] D. Grivas, D. Frear, L. Quan, and J. W. Morris, “The formation of Cu₃Sn intermetallic on the reaction of cu with 95Pb-5Sn solder,” *J. Electron. Mater.*, vol. 15, no. 6, pp. 355–359, Nov. 1986, doi: 10.1007/BF02661885.
- [22] D. Busek, K. Dusek, and O. Renza, “Study of temperature profile influence on intermetallic growth,” Aug. 2017, doi: 10.1109/ISSE.2017.8000922.
- [23] “Měření teplotních profilů pájecích strojů | ABE.TEC, s.r.o.” <https://www.abetec.cz/eshop/product/mereni-teplotnich-profilu-pajecich-stroju1/> (accessed May 22, 2022).
- [24] P. Vesely, K. Dusek, and A. Stankova, “Evaluation of Bismuth/Tin Solder Intermetallic Layers Based on Heating Factor,” in *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology*, May 2019, vol. 2019-May, doi: 10.1109/ISSE.2019.8810306.
- [25] “MUST System II+ & Lead-Free Testing.” https://www.stannol.de/fileadmin/user_upload/GEN3/must/EN/TI_Lead-Free_Solderability_Testing_EN.pdf (accessed May 15, 2022).
- [26] “Průběžná pájecí pec MISTRAL 260.” <https://www.p2jtechnology.cz/reflow-pajeci-pece-a-pajeni-v-parach/7305-prubezna-pajeci-pec-mistral-260.html> (accessed May

- 15, 2022).
- [27] “Graphs, Develve Support.” <https://develve.net/Graphs.html> (accessed May 20, 2022).
- [28] “Krabicový graf - Boxplot - Excel | Školení konzultace.” <https://office.lasakovi.com/excel/grafy/krabicovy-graf-boxplot-excel/> (accessed May 20, 2022).

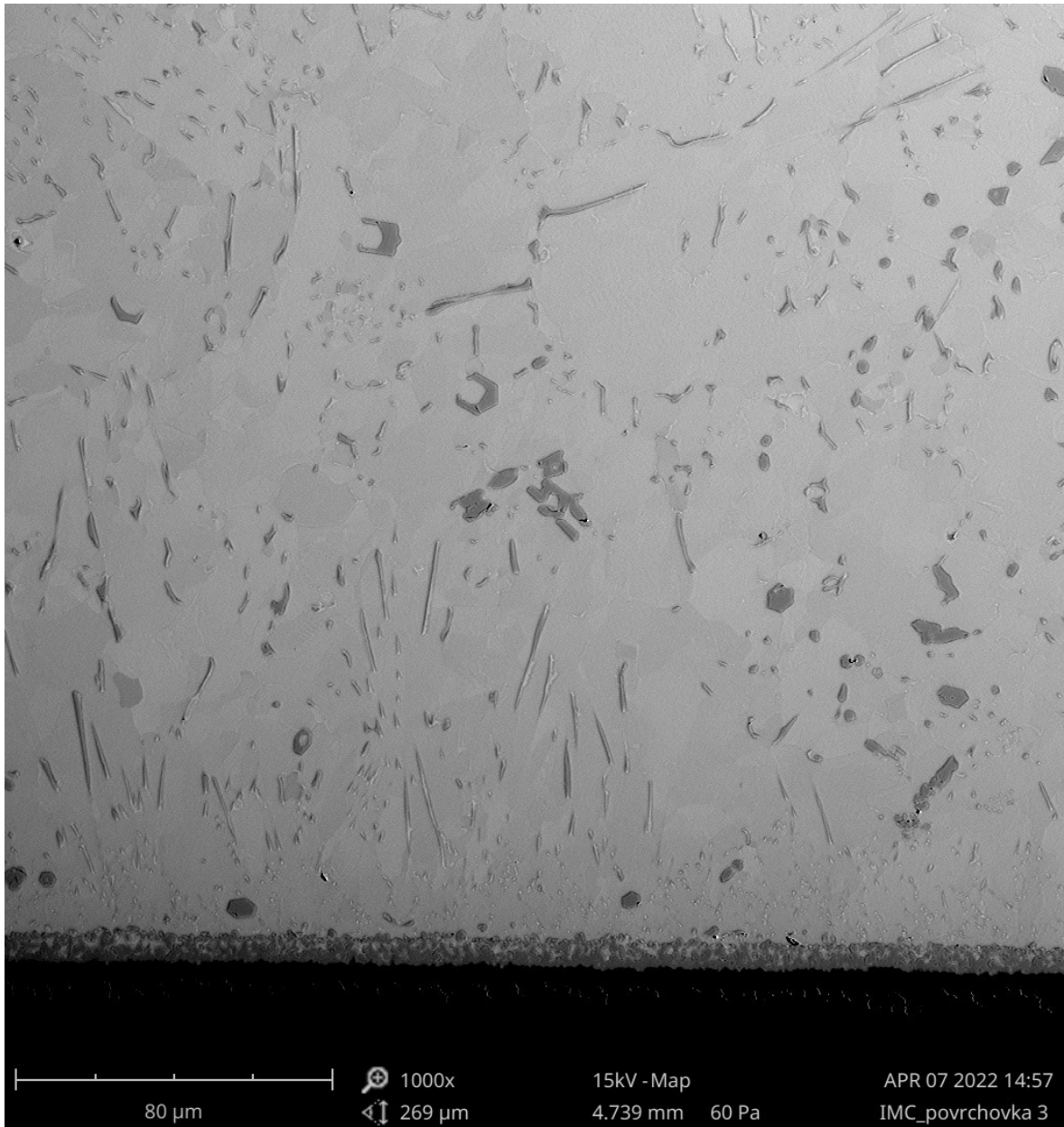
Přílohy



Obr. 53: Struktura pájeného spoje vytvořeného za použití pájecí slitiny SAC305 pořízená elektronovým mikroskopem



Obr. 54: Struktura pájeného spoje vytvořeného za použití pájecí slitiny SnCu0,2NiGe pořízená elektronovým mikroskopem



Obr. 55: Struktura pájeného spoje vytvořeného za použití pájecí slitiny SnCu0,2NiCo pořízená elektronovým mikroskopem