



**FAKULTA  
ELEKTROTECHNICKÁ  
ZÁPADOČESKÉ  
UNIVERZITY  
V PLZNI**

## **DISERTAČNÍ PRÁCE**

# ***VLIV INTERMETALICKÝCH SLOUČENIN NA KVALITU BEZOLOVNATÉHO PÁJENÉHO SPOJE***

**Ing. Václav Wirth**  
**Školitel: Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.**  
**Datum státní doktorské zkoušky: 13. 12. 2014**

Plzeň 2017

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu literatury.

V Plzni dne

.....

Podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval mému školiteli Doc. Ing. Františkovi Steinerovi, Ph.D. za odborné vedení této práce a získání celkového přehledu v problematice propojování v elektrotechnice, který mi byl po celou dobu doktorského studia předáván.

Dále bych chtěl poděkovat firmě Rohde & Schwarz závod Vimperk, s.r.o., bez jejíž materiální a technologické podpory by nemohla vzniknout experimentální část této práce.

## **Anotace**

Tato práce popisuje problematiku pájení v elektronice, konkrétně se zaměřuje na vznik intermetalických vrstev ve struktuře spoje. Úvodní část je věnována popisu měkkého pájení v elektronice. Popsány jsou materiály a technologie využívané pro pájení a současný stav problematiky intermetalických sloučenin. Práce je zaměřena na tvorbu a růst intermetalických sloučenin v pájeném spoji a vlivu na jeho vlastnosti. Dále se věnuje faktorům, které vznik ovlivňují. Jedním z hlavních faktorů je volba přetavovacího profilu. Je popsána metoda definování pájecího profilu pomocí heating faktoru. Práce sleduje vznik dutin, intermetalické vrstvy a jejich vývoj u různých materiálových kombinací a procesního nastavení pájení. Měření tloušťky intermetalické vrstvy je provedeno nově vyvinutou metodou stanovení střední hodnoty tloušťky z obrazu.

### ***Klíčová slova:***

Bezolovnatý pájený spoj, intermetalická sloučenina, heating faktor, pájecí profil.

## **Annotation**

This thesis describes the issue of soldering in electronics, focusing on the intermetallic compounds formation in a joint structure. The opening part deals with soft soldering in electronic. Materials, technologies of soldering and the current state of the intermetallic compounds issue are described. It is focused on the creation and growth of intermetallic compounds in solder joint and the effect on its properties. The thesis further discusses the factors which influence the creation. A choice of reflow profile is one of the main factors. The heating factor method defines reflow profile and this method is described. The thesis deals with creation of voids, intermetallic compound layer and their growth with various material combinations and setting of soldering process. The measuring of intermetallic layer thickness is studied with new developed method of determining the mean thickness from the image.

### ***Key words:***

Lead-free solder joint, intermetallic compound, heating factor, reflow profile.

85 pages

79 figures

13 tables

4 appendixes

## Použité zkratky

|              |   |
|--------------|---|
| <b>At. %</b> | Atomic percent – atomová procenta   |
| <b>DPS</b>   | Deska plošných spojů  |
| <b>ENIG</b>  | Electroless Nickel Immersion Gold – povrchová úprava nikl-zlato   |
| <b>HASL</b>  | Hot-Air Solder Level – tenká vrstva pájky na desce plošného spoje   |
| <b>IMC</b>   | Intermetallic compound - intermetalická sloučenina  |
| <b>OSP</b>   | Organic Solderability Preservative – ochranná organická vrstva  |
| <b>QFN</b>   | Quad Flat No-leads package – bezvývodové pouzdro s kontakty po čtyřech stranách   |
| <b>RoHS</b>  | Restriction of Hazardous Substances – Omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních |
| <b>RTG</b>   | Rentgenové záření   |
| <b>SAC</b>   | Sn-Ag-Cu pájecí slitina   |
| <b>SMT</b>   | Surface-mount Technology – technologie povrchové montáže  |
| <b>TAL</b>   | Time Above Liquidus – čas nad teplotou tavení   |
| <b>WEEE</b>  | Waste Electrical and Electronic Equipment – Odpadní elektrická a elektronická zařízení  |
| <b>Wt. %</b> | Weight percent – váhová procenta  |

# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| ÚVOD .....  | 8         |
| CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....  | 9         |
| <b>1. MĚKKÉ PÁJENÍ .....</b>  | <b>10</b> |
| 1.1. TVORBA SPOJE .....   | 10        |
| 1.2. MATERIÁLY PRO PÁJENÍ.....  | 12        |
| 1.2.1. Pájecí slitiny.....  | 12        |
| 1.2.2. Povrchové úpravy měděného povrchu DPS .....                                  | 14        |
| 1.2.3. Tavidla.....   | 17        |
| <b>2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY .....</b>                               | <b>20</b> |
| 2.1. BEZOLOVNATÉ PÁJECÍ SLITINY .....   | 20        |
| 2.2. DUTINY V PÁJENÝCH SPOJÍCH.....   | 21        |
| 2.3. INTERMETALICKÉ SLOUČENINY .....  | 24        |
| 2.2.1. Rozpuštění kovového povrchu v tekuté pájce .....                             | 25        |
| 2.2.2. Difúze na rozhraní pájky a kovového povrchu .....                            | 26        |
| 2.2.3. Rozhraní Cu-Sn .....   | 27        |
| 2.2.4. Vliv IMC na životnost pájeného spoje.....                                    | 28        |
| 2.4. VLIV PÁJECÍHO PROFILU NA VZNIK IMC .....                                       | 30        |
| 2.5. HEATING FAKTOR.....  | 31        |
| 2.6. STANOVENÍ TLOUŠŤKY IMC VRSTEV.....   | 32        |
| <b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>   | <b>34</b> |
| 3.1. MATERIÁLY PRO EXPERIMENT .....   | 34        |
| 3.2. PÁJECÍ PROFILY .....   | 37        |
| 3.3. VÝPOČET HODNOTY HEATING FAKTOR .....   | 41        |
| 3.4. MĚŘENÍ TLOUŠŤKY INTERMETALICKÝCH VRSTEV.....                                   | 42        |
| 3.5. TLOUŠŤKA INTERMETALICKÝCH VRSTEV A HEATING FAKTOR.....                         | 52        |
| 3.6. STÁRNUTÍ.....  | 54        |
| 3.7. MĚŘENÍ MECHANICKÉ PEVNOSTI PÁJENÉHO SPOJE .....                                | 55        |
| 3.8. DUTINY V PÁJENÉM SPOJI .....   | 64        |
| 3.9. POROVNÁNÍ VLIVU TLOUŠŤKY IMC A PLOCHY DUTIN NA MECHANICKOU PEVNOST SPOJE ..... | 67        |
| 3.10. VLIV OPAKOVANÉHO PŘETAVENÍ NA VZNIK IMC .....                                 | 68        |
| <b>4. DISKUSE VÝSLEDKŮ, DOPORUČENÍ PRO PRAXI .....</b>                              | <b>74</b> |
| <b>ZÁVĚR.....</b>   | <b>77</b> |
| <b>LITERATURA .....</b>   | <b>79</b> |
| <b>SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA .....</b>  | <b>83</b> |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>   | <b>85</b> |

## Úvod

Pájený spoj se využívá k propojování elektronických součástek při výrobě elektronických zařízení. Tento spoj má za úkol zajistit nejen elektrické propojení, ale i mechanickou fixaci součástky a v některých případech i odvod ztrátového tepla. Tyto vlastnosti dělají z pájení jednu z nejdůležitějších technologií při výrobě elektronických zařízení s ohledem na jeho spolehlivost. Od počátků využívání pájení v elektronice byla používána cín-olovnatá pájecí slitina. V nedávné minulosti bylo olovo spolu s dalšími prvky (rtuť, kadmium...) zařazeno mezi nebezpečné materiály. Z tohoto důvodu je využití olova pro pájení nejen v Evropské unii zakázáno. V souvislosti s tím vznikají nové bezolovnaté slitiny, které se mají vlastnostmi i cenou co nejvíce blížit cín-olovnaté pájce. Proto je výzkum, vývoj a sledování vlastností bezolovnatého pájení v současné době intenzivní.

Životnost, elektrické a mechanické vlastnosti spoje nejvíce ovlivňuje struktura samotného spoje. Struktura se formuje již během pájení, ale její vývoj není s koncem pájení ukončen. Při stárnutí spoje dochází ke změnám ve struktuře, které mají vliv na vlastnosti spoje. Ve spoji vznikají intermetalické sloučeniny, které mají odlišné vlastnosti od pájecí slitiny a tím výrazně ovlivňují vlastnosti spoje. Tvorbu intermetalických sloučenin ovlivňují použité materiály, ale i technologické podmínky při pájení. Intermetalické sloučeniny po dobu životnosti spoje dále narůstají a jsou to často právě tyto sloučeniny, které zapříčiní nefunkčnost spoje.

Práce se věnuje popisu aktuálního stavu problematiky intermetalických vrstev a dutin v pájených spojích. Tyto dva parametry výrazně ovlivňují vlastnosti spojů. Rešeršní část práce potvrzuje důležitost výzkumu struktury a tvorby intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji. Práce je zaměřena na sledování vzniku a vývoje intermetalické vrstvy v pájených spojích při využití odlišných materiálů na straně pájecí slitiny i povrchových úprav desek plošných spojů. Sledován je i vliv procesního nastavení při pájení a to především teplotního profilu. Cílem práce je objasnění vlivu zvolených materiálů a procesních parametrů na formování intermetalické vrstvy a dále vzniku dutin v pájených spojích.



## Cíle disertační práce

Obsahem teoretické části disertační práce je provést stručné seznámení s problematikou měkkého pájení v elektrotechnice. Popsat nejčastější volby používaných materiálů pro pájení, jak na straně pájecích slitin, tak na straně povrchových úprav desek plošných spojů. Čtenáře dále odkazuje na vhodnou literaturu pro další seznámení s touto problematikou. Část o přehled současné problematiky je zaměřena na seznámení s aktuálním vývojem výzkumu v oblasti vzniku a vývoje intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji. Naráží i na problematiku vzniku dutin ve spojích, která často ovlivňuje jejich vlastnosti a kvalitu. Tato část práce přímo ovlivňuje část experimentální, především jde o způsob měření tloušťky intermetalické vrstvy a volbu popisu procesních parametrů. Experimentální část má přispět k objasnění tvorby a vývoje intermetalických vrstev v bezolovnatém pájeném spoji při různých procesních a materiálových nastavení. Stejně vlivy jsou sledovány i u vzniku dutin v pájeném spoji, jelikož i ty výrazně ovlivňují jeden ze sledovaných parametrů spoje, kterým je mechanická pevnost.

**Cíl práce č. 1:** Pomocí experimentu stanovit působení volby aktuálně využívaných materiálů na vznik a růst intermetalických vrstev v bezolovnatém pájeném spoji. Dále sledovat korelaci mezi vznikem intermetalických vrstev a mechanickou pevností spoje. Při měření tloušťky IMC vrstev využít univerzální postup, který by umožnil snadné porovnání výsledků.

**Cíl práce č. 2:** Sledovat vliv nastavení teplotního profilu při přetavení pájecí slitiny na vznik intermetalické vrstvy bezolovnatých pájených spojů. Využít popisu teplotního profilu při přetavení pomocí hodnoty heating faktoru.

**Cíl práce č. 3:** Experimentálně ověřit vývoj intermetalických vrstev v bezolovnatém spoji při vícenásobném přetavení.

**Cíl práce č. 4:** Definovat vhodné závěry, které budou využitelné pro odborníky ve výrobě a návrhu elektronických zařízení.

# 1. Měkké pájení

Pájení je způsob metalurgického spojování dvou kovů třetím roztaveným kovem, který nazýváme pájka. Ta se taví a opět tuhne, čímž dojde k nerozebíratelnému spojení materiálů spojovaných částí. Kovové části, které spojujeme, se netaví. Při montáži v elektronice se využívá především měkkého pájení, které je charakteristické teplotou tavení pájky do 450 °C. Je-li teplota vyšší, jedná se o pájení tvrdé. Technologie pájení je nejčastěji využívaný způsob pro vytvoření vodivého a mechanicky pevného spoje v elektronice. Jedinou alternativou při propojování součástek na DPS je využití vodivého lepení.

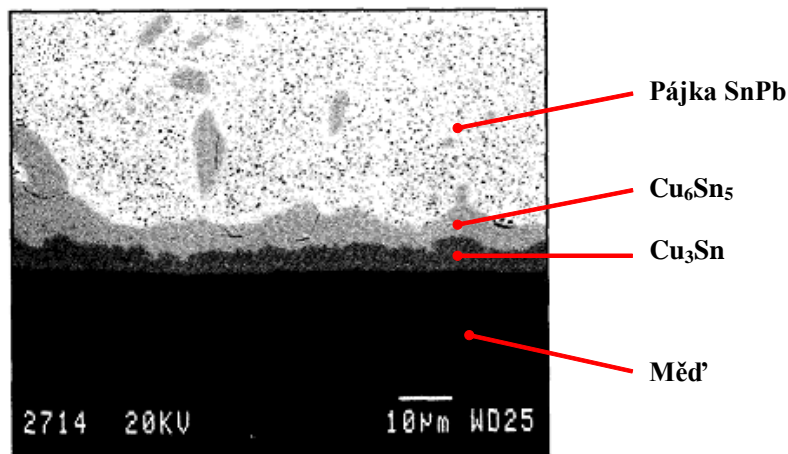
Historickým vývojem vzniklo velké množství technologií pro hromadné pájení desek plošných spojů (DPS). Ty můžeme rozdělit na dvě hlavní skupiny, první je pájení pomocí vlny a druhá je technologie pájení přetavením. Hlavním rozdílem u těchto metod je způsob, jakým je předána energie pro zahřátí spoje a dodání pájecí slitiny. V případě pájení vlnou se tekutá pájka dostane na místo spoje z pájecí lázně a průchodem vlnou dochází k dodání potřebné energie pro vznik spoje. Technologie pájení přetavením využívá nanesení pájky v podobě pájecí pasty a následné dodání energie nutné k přetavení ohřevem. Zvýšení teploty v místě spoje se dosahuje např. pomocí proudění horkého plynu, infračerveným zářením, parní lázní, laserem. Metody pájení jsou detailně popsány v řadě publikací (viz. [1], [2]) a není třeba je zde více popisovat.

## 1.1. Tvorba spoje

Při pájení probíhají složité fyzikálně-chemické pochody na rozhraní tuhé a tekuté fáze. Na počátku vzájemného působení tuhého a tekutého prostředí je snaha systému o snížení mezifázové energie. Při smáčení jsou dva volné povrchy nahrazovány jediným rozhraním s nízkou volnou energií. Na rozhraní se vytváří vrstva uskutečňující vazbu mezi fázemi. Teplem se zvětšuje pohyb atomů obou fází a jejich vzájemná difúze zesiluje vytvořené vazby. Krystalizace při chladnutí pozastavuje a upevňuje probíhající jevy. [2]

Ve většině případů vznikají přechodové oblasti o určité tloušťce, ty pak mají jiné mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti. Těmto částem spoje se říká intermetalické vrstvy (IMC). Při použití pájky Sn-Pb na spojení mědi dochází k tvorbě vrstev  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  a

$\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Tloušťka vytvořených intermetalických vrstev závisí na čase a teplotě, jaké je spoj vystaven. Obr. 1 je pořízen elektronovým mikroskopem. Zobrazuje intermetalické vrstvy u spoje, který byl vystaven teplotě  $150\text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 4000 hodin, viz [3].



Obr. 1 *Intermetalické vrstvy* [3]

Pájené povrchy mají různé vlastnosti, které ovlivňují vznik a kvalitu pájeného spoje. Jde především o schopnost povrchu být smáčen roztavenou pájecí slitinou. Následně dochází na rozmezí pevné a tekuté fáze k rozpouštění, difúzi a krystalizaci. Míru všech těchto pochodů nazýváme po přihlédnutí k dosaženým vlastnostem výsledného pájeného spoje jako pájitelnost. Lze říci, že pájitelnost vyjadřuje schopnosti povrchu být smáčený pájkou, teplotní nároky na ohřev a odolnost povrchu proti rozpuštění během procesu pájení. Pájitelnost povrchu je možné popsat pomocí smáčecího (kontaktního) úhlu. Slovně lze ohodnotit dle [2] takto:

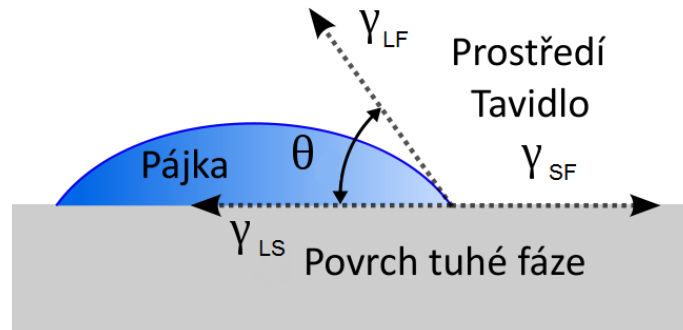
|                                |                               |
|--------------------------------|-------------------------------|
| $0^\circ < \theta < 20^\circ$  | výborné až dokonalé smáčení,  |
| $20^\circ < \theta < 40^\circ$ | dobré až velmi dobré smáčení, |
| $40^\circ < \theta < 55^\circ$ | postačující smáčení,          |
| $55^\circ < \theta < 90^\circ$ | špatné smáčení,               |
| $90^\circ < \theta$            | nesmáčivost.                  |

Podmínky rovnovážného stavu na rozhraní tří fází jsou popsány pomocí Youngovi rovnice (1). Grafické zobrazení rovnovážného stavu povrchových napětí je na Obr. 2. [4]

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LS} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (1)$$

Kde:  $\theta$  – smáčecí úhel [ $^\circ$ ],

$\gamma_{LF}$  – povrchové napětí na rozhraní LF (pájka - tavidlo + prostředí) [ $\text{Nm}^{-1}$ ],  
 $\gamma_{SF}$  – povrchové napětí na rozhraní SF (substrát – tavidlo + prostředí) [ $\text{Nm}^{-1}$ ],  
 $\gamma_{LV}$  – povrchové napětí na rozhraní LS (pájka - substrát) [ $\text{Nm}^{-1}$ ].



Obr. 2 Rovnováha povrchových napětí s vyznačeným smáčecím úhlem [5]

## 1.2. Materiály pro pájení

Z předchozí kapitoly plyne, že mezi důležité materiály pro pájení patří pájecí slitina, pájený povrch (DPS i součástky) a tavidlo, které pomáhá lepšímu smáčení povrchu pájkou.

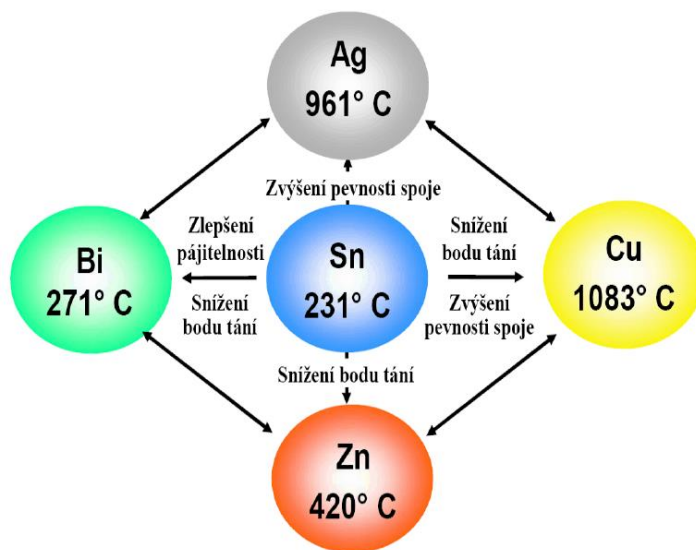
### 1.2.1. Pájecí slitiny

Pájky pro měkké pájení v elektronice jsou tvořeny převážně kovy s nízkou teplotou tavení, základní složku tvoří cín. Pájky můžeme rozdělit podle několika kritérií. Podle počtu prvků, ze kterých jsou tvořeny, na čisté kovy, dvou nebo třísluškové slitiny a složitější slitiny. Dále podle obsahu olova na olovnaté a bezolovnaté pájky, nebo dělení dle teploty tavení slitiny. Pájka se připravuje v různých formách vhodných pro odlišné aplikace. Pro doplňování lázní v pájecích strojích má tvar tyčí. Pro ruční pájení to je drát různého průměru s jádrem naplněným tavidlem. Pro pájení přetavením se pájka připravuje ve tvaru drobných kuliček o průměru několika desítek mikrometrů. V dnes nejpoužívanější pastě Type 3 musí být 80 % kuliček slitiny v rozmezí průměrů 25 až 45  $\mu\text{m}$ . Tyto parametry pasty jsou popsány v normě IPC J-STD-005 Requirements for Soldering Pastes [6]. Technologické vlastnosti pasty jsou určeny obsahem kovových částí a tavidla. Především jde o viskozitu, která bude odlišná pro pastu určenou pro zpracování šablonovým tiskem a pro nanášení disperzerem.

Historicky nejvíce využívanou pájecí slitinou v elektronice byla eutektická slitina Sn-Pb. Díky legislativě je však v současné době použití pájecí slitiny s obsahem olova větším než 0,1% velice omezeno. Na počátku roku 2003 vydala Evropská unie dvě ze svých směrnic týkajících se ochrany životního prostředí, které jsou závazné pro všechny členské

státy Unie, včetně České republiky. Tyto směrnice se vztahují na elektrické a elektronické výrobky, a to nejen na omezení používání určitých nebezpečných látek v nich obsažených (2002/95/EC *Restriction of Hazardous Substances* – RoHS [7]), ale i na bezplatný zpětný odběr použitých elektronických zařízení, jejich zpracování, využití a odstranění (2002/96/EC *Waste Electrical and Electronic Equipment* – WEEE [8]). Přestože tyto směrnice platí pouze pro Evropskou unii, musí se jimi řídit i výrobci elektronických zařízení, jejichž výrobky jsou do států Unie dováženy. V roce 2011 byla vydána novela směrnice RoHS, označená 2011/65/EU [9], která přinesla několik zcela zásadních změn, včetně zákazu použití olova v lékařských aplikacích. Díky této legislativě je použití olověných pájecích slitin až na několik výjimek uvedených v [9] či [10] zakázáno. Na území ČR jsou směrnice přeneseny díky zákonu 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů. [10]

Aby bylo možné nahradit olovo jiným kovem, je nutné splnit několik základních požadavků: slitina musí být netoxická, blízká teplota tání slitině Sn-Pb, dobré elektrické a tepelné vlastnosti, přijatelné smáčení, vytvoření spolehlivého spoje, dostupná cena slitiny. Základní používané kovy, jejich teploty tání a vliv na výslednou vlastnost slitiny jsou uvedeny na **Obr. 3**.



Obr. 3 Základní kombinace slitin, teploty tavení jednotlivých prvků a vliv na vlastnosti pájky

Na trhu se dnes objevuje celá řada pájek bez olova, avšak způsob jejich použití není zcela shodný s pájkami typu Sn-Pb. Zásadní, i když ne jediný, problém je teplota tavení bezolovnaté pájecí slitiny, ta bývá obecně vyšší. V závislosti na složení pájky se nejčastěji pohybuje v rozmezí 195 až 227 °C. Následuje základní přehled používaných

bezolovnatých pájek, rozdělených podle teploty tavení (v závorce je uvedena přibližná teplota tavení). [11]

- a) Slitiny s bodem tavení nad 210 °C  
Sn-Cu (227 °C), Sn-Ag (221 °C), Sn-Ag-Cu (217 °C), Sn-Ag-BiCu,  
Sn-Ag-Bi-Cu-Ge
- b) Slitiny s bodem tavení v rozsahu 180 °C až 210 °C  
Sn-Ag-Bi-X (206 - 213 °C), Sn-Ag-Bi (206 - 213 °C), Sn-Zn (199 °C)
- c) Slitiny s bodem tavení pod 180 °C  
Sn-Bi (138 °C), Sn-Bi-Zn

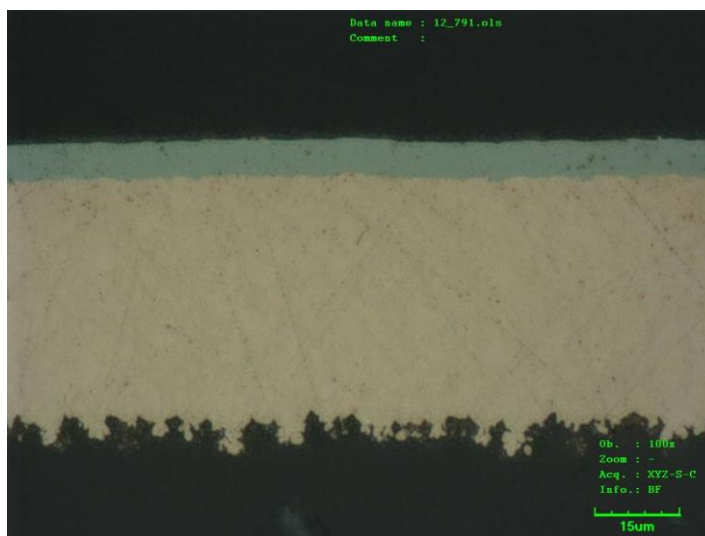
### 1.2.2. Povrchové úpravy měděného povrchu DPS

U desek plošných spojů se můžeme setkat s několika druhy povrchových úprav. Měď je nejčastěji používaným materiálem pro výrobu vodivého motivu na deskách plošných spojů, protože má dobré elektrické vlastnosti, dobrou pájitelnost a relativně nízké výrobní náklady. Špatnou vlastností mědi je její chemická stálost, kdy se při kontaktu s okolní atmosférou povrch mědi pokryje vrstvou oxidů. Tato vrstva velmi zhoršuje pájitelnost. Z tohoto důvodu se měď ošetřuje povrchovou úpravou. Není možné splnit všechny požadavky jednou nejlepší povrchovou úpravou, proto se rozšířilo více variant. Prvním požadavkem je zajištění dobré pájitelnosti, tento požadavek může být i opakovatelný pro opravy, případně musí povrchová úprava snést více než jeden průchod přetavovací pecí (např. pájení přetavením spodní strany DPS, pájení přetavením horní strany DPS a pájení pomocí vlny). Úprava je volena i s ohledem na další možné technologie propojování na sestavě (bondování, lepení, lisování). Následující přehled obsahuje používané povrchové úpravy.

#### ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)

U této povrchové úpravy chrání povrch před oxidací tenká vrstva zlata, která zajišťuje dlouhodobou stabilitu povrchu. Tloušťka chemicky nanesené zlaté vrstvy je malá, větší množství rozpuštěného zlata v bezolovnaté pájce způsobuje vznik křehkých intermetalických sloučenin. Jelikož by takto tenká vrstva difundovala s měděným povrchem, je od něj oddělena pomocí vrstvy niklu. Ten se nanáší pomocí pokovení v nikl-fosforovém roztoku bez přítomnosti elektrického proudu při teplotě asi 90 °C. Díky tomu vrstva niklu obsahuje i fosfor a to od 6 do 10 %. Tloušťka Ni vrstvy je od 4 do 7 μm. Na

ní je obdobným způsobem nanesená vrstva zlata o tloušťce 0,07 až 0,1  $\mu\text{m}$ . Výbrus této povrchové úpravy na mědi je vidět na Obr. 4, tloušťka je v tomto případě 6,7  $\mu\text{m}$  a vrstva Au není na snímku zaznamenatelná. [12]



Obr. 4 Výbrus - Povrchová úprava ENIG, viditelná pouze Ni vrstva

Povrchová úprava ENIG je hojně využívána pro svoji dobrou pájitelnost, ale je možné ji využít i pro bondování Al drátkem, vodivé lepení a přímé kontakty na DPS. Výhodou této povrchové úpravy je také její rovinnost, která umožňuje její využití i pro nízké rozteče vývodů. Některé studie bohužel uvádějí, že u této povrchové úpravy vzniká větší množství dutin. V práci [13] je to např. 27 % plochy u QFN pouzdra, oproti necelým 11 % u povrchové úpravy imersní cín.

Často bývá s touto povrchovou úpravou zmiňován tzv. Black Pad efekt. Tento termín označuje korozi Ni/Au vrstvy, která má vzhled černé plošky a vede až k nesmáčení plochy pájecí slitinou. Když pájený spoj vznikne, je vždy mechanicky oslaben a někdy dochází k celkovému oddělení spoje z plošky. Nebezpečí Black Pad představuje díky nemožnosti vizuálně detekovat tyto plošky před osazováním desky. Problém je odhalen až při zkoušení sestavy a vždy se vyskytuje jen u některých plošek na DPS. Dle zdrojů v literatuře je vznik Black Pad nejčastěji způsobován silnou vrstvou Ni s vysokým obsahem fosforu a ve spoji dochází k odtržení na rozhraní Ni-Sn intermetalické vrstvy a niklu. [14, 15]

### **Imersní stříbro**

Povrch mědi je chráněn pomocí chemicky nanesené vrstvy stříbra, která vytváří rovnoměrnou vrstvu a udržuje pájitelnost. Výhodou této povrchové úpravy je i její odolnost u vícenásobného teplotního zatížení. Ochranná vrstva vzniká v lázni při nízké

teplotě asi 50 °C. Výsledná tloušťka vrstvy je nejčastěji 0,1 až 0,4 μm silná. Ovšem Ag povrch má také tendenci oxidovat či sulfidovat v atmosféře obsahující síru a chlor, což vede k nižší době skladovatelnosti. Proto se tento povrch v praxi v minulosti výrazněji neprosazoval. Nyní jde o využívanou povrchovou úpravu pro své dobré vlastnosti. Pro prodloužení skladovatelnosti a zamezení zmatnění povrchu se stříbrná vrstva může chránit tenkou organickou vrstvou. [12, 16]

### **Imersní cín**

Vrstva cínu je nanášena pomocí chemické cesty, která je výhodná díky nízké teplotě při aplikaci (asi 55 °C) a výslednému rovnému povrchu. Ponořením do lázně se na měděném povrchu vytvoří tenká vrstva cínu. Maximální tloušťka této vrstvy dosahuje asi 1,2 μm. Cínový povrch je poté velice dobře pájitelný, ovšem pájitelnost se snižuje s dobou skladování. A to v důsledku tvorby intermetalických vrstev  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  a  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Tloušťka vrstvy IMC je funkcí teploty a času. Praktická zkouška provedená Bauerem v práci [17] ukazuje, že po roce skladování DPS s touto povrchovou úpravou při pokojové teplotě dojde ke snížení vrstvy cínu průměrně o 0,22 μm. Naopak o tuto hodnotu se navýší tloušťka IMC vrstvy. Po vystavení této DPS trojnásobnému průchodu přetavovacímu profilu s maximální teplotou 265 °C dojde k oslabení vrstvy o dalších 0,48 μm. Výsledná tloušťka cínové vrstvy je pak kolem 0,3 μm. Delší doba skladování a vícenásobné teplotní namáhání při pájení proto představuje pro tuto vrstvu problém. Někdy se pro prodloužení skladovatelnosti používá opětovné doplnění cínové vrstvy, které probíhá chemickou cestou (tloušťka vrstvy se zvýší o 0,1 až 0,3 μm). Tato levná povrchová úprava je vhodná i pro technologii lisování, např. konektorů do pokovených otvorů DPS. Naopak není možné na tomto povrchu využít propojování pomocí bondování. Často bývá s cínovým povrchem zmiňována problematika růstu cínových vláken (whiskerů). Tyto monokrystalická vlákna představují nesmírné riziko u produktů s vysokými požadavky na spolehlivost, proto se této problematice věnuje značná pozornost, s některými výsledky je možné se seznámit např. na stránkách NASA [18].

### **OSP (Organic Solderability Preservative)**

U této povrchové úpravy je povrch chráněn pomocí tenké vrstvy organických inhibitorů oxidace mědi. Vrstva je nanášena např. ponořením hotové DPS do aplikační lázně, depozice probíhá při relativně nízké teplotě (přibližně 50 °C). Vznikne typicky velice tenká vrstva (0,2 až 0,4 μm). Efektivní složky OSP jsou absorbované na povrchu



mědi pomocí chemické vazby Van Der Waalsovými silami. Tři skupiny organických látek jsou v současné době používány jako sloučeniny OSP, a to benzotriazolové sloučeniny, benzimidazolové sloučeniny a sloučeniny imidazolové. V případě imidazolové sloučeniny se jedná o vrstvu větší tloušťky, která lépe odolává opakovanému zvýšení teploty. Skladovatelnost a vícenásobná teplotní expozice jsou hlavní problémy této ochrany. Formování oxidů u tohoto typu povrchové ochrany popisuje Hannemann a kol. v práci [19], při teplotním namáhání dochází k vzniku oxidů o tloušťce stovek nm při teplotě 150 °C a jednotek hodin. Naopak oxidová vrstva neroste při teplotě 100 °C, této teplotě vrstva OSP odolává. Opticky DPS po nanesení ochrany OSP vypadá jako měděná a aplikace dramaticky nezmění její vzhled. Výhodou této technologie je její nízká cena a rovinnost, je ovšem využitelná pouze pro technologii spojování pomocí pájení. [4, 12]

### **HASL (Hot-Air Solder Leveling)**

Jde o jednoduchou a velice častou ochranu měděného povrchu DPS. Na povrch desky je nanášena vrstva pájecí slitiny. Vrstva je nejčastěji aplikována ponořením DPS do roztavené pájecí slitiny a při vytahování je ofukována proudem horkého vzduchu, který odstraní nadměrné množství slitiny. I při použití horkovzdušného nože nemůže tento způsob splnit nároky na rovinnost pájecích plošek pro aplikace s malou roztečí vývodů. Typická tloušťka vrstvy je do 40 μm. Jako pájecí slitiny je možné využít bezolovnaté i olovnaté pájky. HASL je hodnocena jako dobře pájitelná, ale neumožňuje využití technologie bondování. Pájecí slitina vytvoří na měděném povrchu intermetalickou vrstvu, která má při vzniku tloušťku okolo 1 μm. [20] Pájitelnost této úpravy se výrazně snižuje při odhalení IMC vrstvy na povrch. K tomu může dojít při ofukování vzduchovým nožem, případně při následném prorůstání IMC vrstvy při zvýšené teplotě. [12, 16]

### **1.2.3. Tavidla**

Tavidlo odstraňuje oxidové vrstvy a ostatní nečistoty z povrchu pájeného předmětu. Tavidlo musí dobře smáčet povrch, chránit již očištěný kov a také pájku před další oxidací. Dále musí mít takovou viskozitu, aby napomohlo roztékání pájky. Tavidlo ovlivňuje povrchové napětí pájky a tím i její zatékání, vznik můstků a krápníků. S ohledem na požadovanou spolehlivost a stálost vlastností zapájených dílů elektronických zařízení tavidla hodnotíme nejen podle tvorby pájeného spoje, ale i z hlediska možného ohrožení budoucí funkce elektronického zařízení. Tavidlo by mělo být aktivní za pájecích

teplot, ale neaktivní za teplot běžných, pak není nutné odstraňovat zbytky tavidel po procesu pájení. V případě vzniku korozně aktivních a elektricky vodivých zbytků tavidel, a jejich reakčních produktů, se tyto rezidua musí odstranit. Tavidlo se poté odstraňuje nejčastěji oplachováním vodou nebo organickým rozpouštědlem, záleží na typu použitého tavidla. Pro nanášení na místo pájení se tavidlo připravuje nejčastěji v kapalné formě nebo je součástí pájecí pasty.

Nejrozšířenější tavidla jsou kalafunová, jejich základ tvoří přírodní pryskyřice. Takovéto tavidlo je velice málo aktivní, proto se přidávají další složky pro zvýšení aktivity. Přidávají se organické kyseliny, jsou však korozivní i za běžné teploty. Druhou možností je přidat organické aminohydrochloridy, tento typ je korozivně bezpečnější. [2]

Podle množství aktivátoru kalafunová tavidla dělíme na:

- 1) R (Rosin) - neaktivovaná kalafuna,
- 2) RMA (Rosin Mildly Activated) - středně aktivovaná kalafuna,
- 3) RA (Rosin Activated) - silně aktivovaná kalafuna.

Obecný přehled tavidel používaných při pájení v elektrotechnice dle ČSN EN ISO 9454-1 [21] je uveden v Tab. 1. Jiné členění popisuje norma ANSI J-STD-004 [22], viz Tab. 2.

Tab. 1 *Přehled používaných tavidel dle ČSN EN ISO 9454-1 [21]*

| Typ tavidla | Základ tavidla    | Aktivátor  | Forma                          |
|-------------|-------------------|--|--------------------------------|
| Pryskyřičná | Kalafuna          | Bez aktivátoru<br>Halogenový aktivátor<br>Nehalogenový aktivátor | Roztok<br>Pevná látka<br>Pasta |
|             | Umělá pryskyřice  |  |                                |
| Organická   | Vodou rozpustná   | S chloridem amonným<br>Bez chloridu amonného                     |                                |
|             | Vodou nerozpustná |  |                                |
| Anorganická | Soli              | Kyselina fosforečná  |                                |
|             |                   | Jiná kyselina  |                                |
|             | Kyseliny          | Aminy a/nebo čpavek  |                                |
|             |                   |  |                                |

Tab. 2 Rozdělení tavidel dle ANSI J-STD-004 [22]

| Základ tavidla        | Zkratka         | Úroveň aktivace (% halogenidů) |             |         |             |         |           |
|-----------------------|-----------------|--------------------------------|-------------|---------|-------------|---------|-----------|
|                       |                 | L0<br>0                        | L1<br>< 0,5 | M0<br>0 | M1<br>0,5-2 | H0<br>0 | H1<br>> 2 |
| Přírodní pryskyřice   | ROSIN RO        | A                              | B           | C       | D           | E       | F         |
| Syntetická pryskyřice | RESIN RE        | G                              | H           | I       | J           | K       | L         |
| Organické kyseliny    | ORGANIC OR      | M                              | N           | P       | Q           | R       | S         |
| Anorganické kyseliny  | INORGANIC<br>IN | T                              | U           | V       | W           | X       | Y         |

## 2. Přehled současného stavu problematiky

Tato kapitola se soustředí na popis současného stavu problematiky kvality pájených spojů. Především jde o problematiku spojenou s přechodem na bezolovnaté slitiny, tvorbu intermetalických vrstev a vznik dutin ve spojích.

### 2.1. Bezolovnaté pájecí slitiny

V dnešní době je na trhu velké množství pájecích slitin bez olova. Důvody pro opuštění ověřené eutektické slitiny Sn-Pb jsou popsány v kapitole 1.1.1. Přehled základních typů bezolovnatých slitin je uveden v Tab. 3. V elektrotechnickém průmyslu dle [23] dnes dominuje využívání pájecích slitin Sn-Ag-Cu (SAC). Konkrétně jsou to slitiny s váhovým složením Sn-3,8% Ag-0,7% Cu (SAC387), Sn-4,0% Ag-0,5% Cu (SAC405) a Sn-3,0% Ag-0,5% Cu (SAC305).

Tab. 3 Typy bezolovnatých pájecích slitin [24]

| Typ slitiny                | Popis   |
|----------------------------|---|
| <b>Binární</b>             |   |
| Sn-Ag                      | Vysoká teplota tavení, díky Ag poměrně drahá, spolehlivost souvisí s růstem intermetalické vrstvy Ag <sub>3</sub> Sn. |
| Sn-Cu                      | Vysoká teplota tavení, průměrná smáčivost, vhodná pro všechny aplikace.   |
| Sn-Bi                      | Využitelná pouze pro speciální použití díky nízké teplotě tavení.   |
| Sn-Zn                      | Levná, teplota tavení blízká Sn-Pb, Zn je chemicky aktivní (oxidace pájky).   |
| <b>Ternární</b>            |   |
| Sn-Ag-Cu                   | Nižší teplota tavení než Sn-Ag a Sn-Cu, dobrá smáčivost a mechanické vlastnosti.                                      |
| Sn-Ag-Bi                   | Nižší teplota tavení než Sn-Ag-Cu, dobré mechanické vlastnosti.   |
| <b>Další možné přísady</b> |   |
| Ag, Al, Bi, Ga, In, Cu     | Snižují teplotu tavení Sn pájek a zlepšují mechanická vlastnosti.   |
| Ni, Sb                     | Zvyšují teplotu tavení, ale zlepšují vlastnosti.  |

Přehled US patentů v oblasti bezolovnatých pájek je možné najít v literatuře [25] a pro roky 2005 až 2010 je uveden v Příloze 1. Je zde vidět zastoupení přídatných prvků v jednotlivých pájecích slitinách. Převážně je pro zlepšení vlastností využíváno slitin čtyř a více prvků. Výzkum v této oblasti není ukončen a stále se objevují nové slitiny. Jako

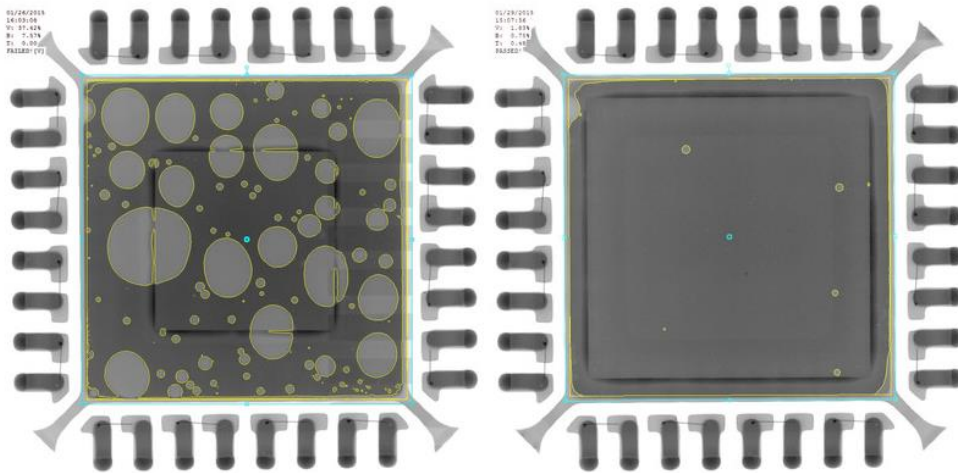
příklad je možné uvést výzkum nové pájecí slitiny Sn-Zn-Cu, které se věnují na Shandong University [26]. Dle této práce dosahuje nejlepšího smáčení váhové složení slitiny Sn-4% Zn-0,8% Cu. Jaký vliv má na vlastnosti pájeného spoje a i na vznik intermetalických vrstev přidání titanu do pájek typu Sn-Ag a Sn-Cu je uvedeno v článku [27]. Autor Chen konkrétně pracuje se slitinami o váhovém složení Sn-1% Ag-0,2% Ti a Sn-0,7% Cu-0,2% Ti. Přidáním titanu se v cínových pájkách snižuje rozdíl v teplotě tavení a teplotě tuhnutí slitiny. Navíc dochází k vzniku intermetalické sloučeniny  $Ti_2Sn_3$ , která příznivě působí na mechanické vlastnosti spoje při zvýšených teplotách. Také je ovlivněn vznik IMC na rozhraní Cu-Sn při přetavení pájecí slitiny. Naopak dle výzkumu Vuorinena [28] přidáním Ti do eutektické slitiny Sn-Ag dochází pouze k větším nerovnoměrnostem při růstu intermetalických vrstev a přidání Ti nemá praktický přínos při pájení na měděném povrchu. Z těchto nejednoznačných závěrů, oba články byly publikovány v roce 2012, je vidět nutnost prověřit chování nových pájecích slitin dalším testováním.

Z důvodů velkého množství nových bezolovnatých pájecích slitin a neustálému výzkumu v této oblasti je těžké odhadnout, které slitiny se v budoucnu prokáží jako vhodné pro komerční využití. Se slitinami, které jsou na trhu v současné době, je možné se seznámit přímo u výrobců těchto slitin, pájecích drátů a past, například viz [29–32].

## **2.2. Dutiny v pájených spojkách**

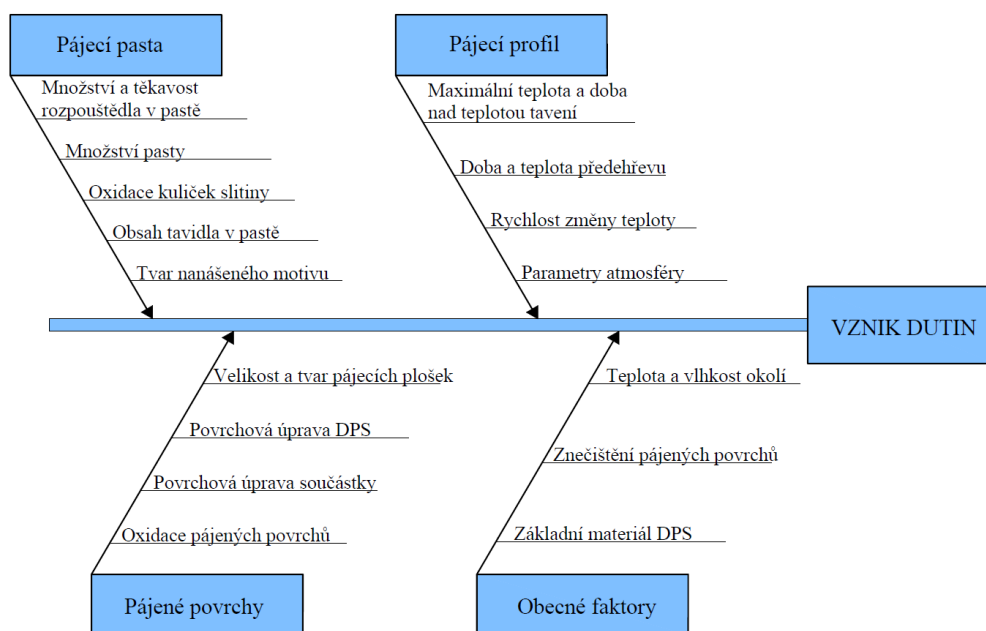
Dutiny v pájeném spoji vznikají z různých příčin. Dutiny ovlivňují kvalitu pájeného spoje a to mechanické a elektrické vlastnosti spoje. Větší plocha dutin negativně ovlivňuje i tepelnou vodivost spoje, díky tomu často vznikají problémy s odvodem ztrátového tepla a přehřívání součástek. Jde o stále aktuálnější problematiku díky zmenšování součástek a to i výkonových. Problém představuje nemožnost detekce dutin optickým sledováním spoje, kdy se spoj může jevit jako ideální, ale množství dutin je nevyhovující. Nejpoužívanější metodou odhalování plochy dutin ve spoji je využití rentgenů. Destruktivně je dále možné vytvořit výbrus spoje nebo součástku mechanicky odtrhnout a analyzovat utrženou plochu pájecí slitiny. Nejvyužívanější norma popisující kritéria přijatelnosti elektronických sestav IPC-A-610F [33] udává jako defekt, když plocha dutin v kolmém RTG snímku představuje více než 30 % plochy spoje. V předchozích revizích byla tato hodnota 25 %. I z této úpravy je vidět aktuálnost této problematiky a zvýšení vzniku dutin ve spojkách spojených s přechodem na bezolovnaté pájecí slitiny u většiny výrobních projektů. Na problematiku vzniku dutin ve spojkách reagují i výrobci pájecích zařízení a do pecí se začínají nabízet moduly pro pájení pod

sníženým tlakem nebo vibracemi. Piezovibrační modul, který má pomocí přeladování frekvence během vzniku spoje odstranit většinu dutin, vyvinula společnost ERSA společně s Fraunhofer Institute for Silicate Research. Dle studie [34] dochází k redukci dutin u pájení QFN pouzdra až o 98 %, příklad rentgenových snímků je vidět na Obr. 5.



Obr. 5 RTG snímek pouzdra pájeného klasicky (vlevo) a v peci s vibračním modulem (vpravo) [34]

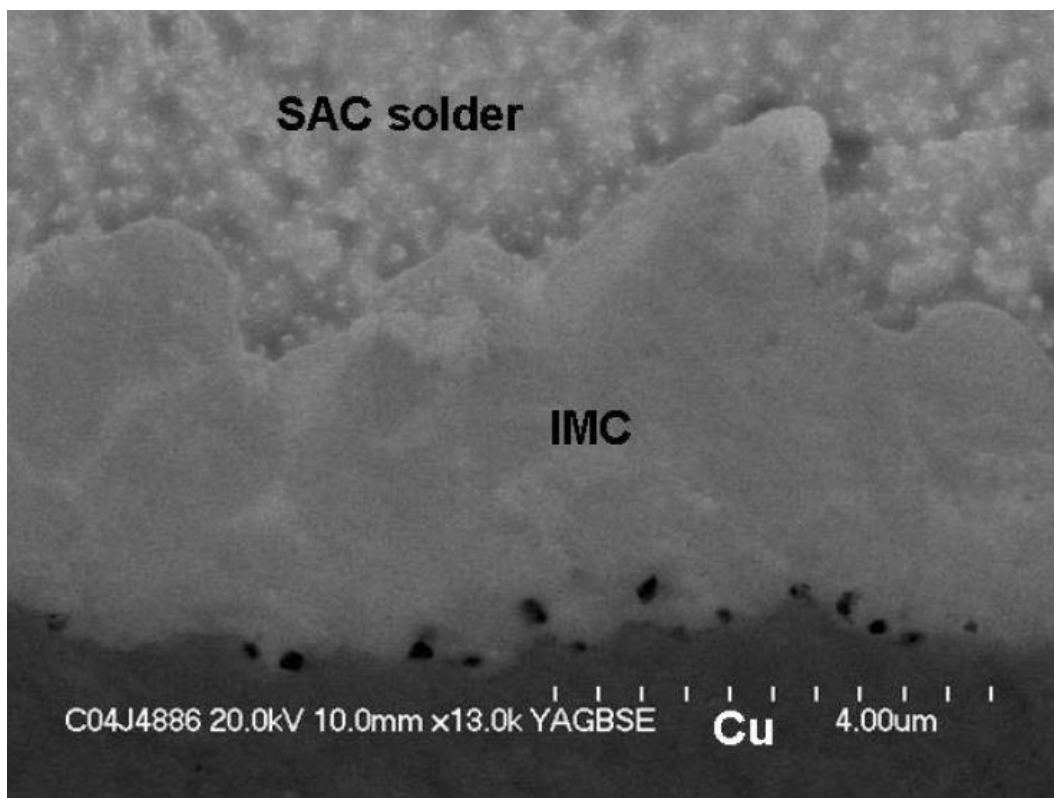
Podle velikosti dutin je možné rozdělit dutiny na makro a mikro dutiny. Vznik dutin během tvorby spoje je spojen převážně s technologickým procesem výroby a použitými materiály. Vznik dutin je možné ovlivnit především teplotním profilem při pájení, množstvím pájecí pasty, tvarem tisku, složením tavidla a jeho množstvím. Makro dutiny totiž vznikají vypařováním složek tavidla během pájení. Když jim není umožněno se dostat z prostoru spoje během kapalného stádia slitiny, jsou ve spoji zachyceny a tvoří dutiny. Přehled faktorů, které vznik dutin ovlivňuje, je na Obr. 6.



Obr. 6 Faktory ovlivňující vznik dutin

Velikost těchto dutin začíná na průměru přibližně 100  $\mu\text{m}$  a mohou se vyskytovat kdekoli v objemu pájeného spoje. Pro kvalitu spoje je nejvíce kritické umístění na rozhraní pájeného povrchu a pájecí slitiny nebo těsně u okraje spoje. V těchto místech je slitina spoje oslabena a dochází zde k vzniku a šíření trhlin. Dle některých publikovaných prací [35] je důležité umístění dutin ve spoji obdobně jako jejich prostá velikost. Pozici dutin ve spoji se věnuje i část normy IPC-7095C [36], která popisuje návrh a využití pouzder typu BGA.

Mikro dutiny se vyskytují v jedné rovině na rozhraní pájeného povrchu a pájecí slitiny. Velikost těchto dutin je menší než u procesních dutin. Mezi tyto dutiny jsou zařazeny dutiny s menším průměrem, než je 1  $\mu\text{m}$ . Jsou spojeny s využíváním různých povrchových úprav DPS, typické jsou pro povrchovou úpravu ImAg, ovšem v praxi jsou pozorovány i při využití povrchových úprav OSP a ENIG. Mezi mikro dutiny lze zahrnout i Kirkendallové dutiny, neboli jinak nazývány intermetalické dutiny. Tyto dutiny vznikají díky jiné příčině a hlavně nevznikají v průběhu formování spoje. Přímá souvislost s intermetalickými slitinami ve spoji dělá Kirkendallové dutiny pro tuto práci zajímavou. A to i přes nemožnost jejich identifikace pomocí RTG a menšího vlivu na kvalitu spoje v porovnání s ostatními druhy dutin. Vznik je dán rozdílnou rychlostí difúze dvou kovů, které tvoří spoj. V případě pájení jde o měď a cín. Měď má větší difúzní koeficient než cín a přechází rychleji do cínu než cín do mědi. Díky tomu vznikají v krystalové mřížce neobsazené pozice a po čase se spojují a je možné pozorovat dutiny. Intermetalické dutiny je tudíž možno pozorovat v těsném okolí rozhraní mědi, nejčastěji ve vrstvě IMC  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Efekt se projevuje při dlouhodobějším teplotním namáhání rozhraní dvou kovů, kdy teplota přesahuje přibližně 100  $^{\circ}\text{C}$ . Malá velikost dutin znemožňuje odhalení pomocí RTG, a proto jsou dutiny sledovány pomocí mikroskopů na výbrusech rozhraní spojů. Popisem Kirkendallových dutin se zabývá např. článek Kirkendall Voids at Cu / Solder Interface and Their Effects on Solder Joint Reliability [37]. Kde je popsán vznik dutin na různých povrchových úpravách a za různých podmínek (stárnutí při konstantní teplotě i teplotní cyklování). Příklad snímku výbrusu s viditelnými dutinami je na Obr. 7. Vzorek byl připraven ze spoje slitinou typu SAC a měděným povrchem. Spoj byl následně vystaven 2000 krát teplotnímu cyklu od -25 až do 125  $^{\circ}\text{C}$  s dobou cyklu 35 minut. Vzorek tak strávil asi 20 dnů při teplotě 125  $^{\circ}\text{C}$ , která nejvíce ovlivnila vznik IMC a zároveň dutin.



Obr. 7 Výbrus rozhraní SAC slitina-Cu s Kirkendallovými dutinami [37]

### 2.3. Intermetalické sloučeniny

Intermetalická sloučenina (IMC) je homogenní chemická sloučenina tvořená ze dvou nebo více kovů. Interpolací vlastností složek nelze předpovědět vlastnosti IMC, většinou existují jen v úzkém oboru koncentrací, mají přesné chemické složení, kterým jsou charakterizovány. Poměr atomů jednotlivých kovů IMC je tvořen celými čísly, pro označení je používána chemická symbolika, např.  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  pro tzv.  $\epsilon$ -fázi. Jedna slitina ovšem může tvořit řadu IMC fází v závislosti na koncentraci. Vazba mezi atomy u IMC je ve své podstatě kovová, avšak má přídavný iontový charakter, který je způsoben rozdílem v elektronegativitě atomů. Jednotlivé atomy IMC jsou uspořádány v krystalové mřížce. Tyto vrstvy se vyskytují na rozhraní mezi pájeným povrchem a pájecí slitinou a výrazně ovlivňují spolehlivost pájeného spoje. Na straně jedné zajistí vyšší pevnostní charakteristiky formovaného spoje, na straně druhé jsou IMC vrstvy podstatně křehčí než pájka i základní materiál a tím redukuje životnost pájeného spoje. Ke vzniku IMC vrstvy dochází procesem rozpouštění pájeného povrchu v tekuté pájce i procesem difúze. Po ztuhnutí pájky se zastaví vytváření IMC vrstvy mechanismem rozpouštění a pokračuje mechanismem difúze v pevné fázi, ta je výrazně větší při zvýšených teplotách. [38]



Zkoumání IMC vrstev v pájených spojích je důležité z důvodu jejich vlivu na spolehlivost. Proto se této problematice věnuje mnoho vědeckých pracovníků a pro dlouhou dobu nejčastěji využívanou pájecí slitinu Sn-Pb je tato problematika velmi dobře popsána. S nástupem bezolovnatých pájecích slitin se pozornost přesunula také tímto směrem. Přehled možných IMC ve spoji tvořeném různými bezolovnatými pájkami a měděným povrchem je uveden v Tab. 4. Vzhledem k velkému množství používaných pájek a díky novým typům a složením bezolovnatých pájecích slitin je stále prostor pro výzkum v těchto materiálových vědách.

Tab.4 IMC u různých pájecích slitin při pájení měděného povrchu [39]

| Pájecí slitina          | IMC v objemu pájky  | IMC na Cu podkladu (rozhraní)   |
|-------------------------|---|---|
| <i>Sn-3,5Ag</i>         | <i>Ag<sub>3</sub>Sn</i>   | <i>Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn</i>                                     |
| <i>Sn-3,4Ag-0,8Cu</i>   | <i>Ag<sub>3</sub>Sn, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn</i> | <i>Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn</i>                                     |
| <i>Sn-3Ag-1Bi-0,5Cu</i> | <i>Ag<sub>3</sub>Sn, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn</i> | <i>Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn</i>                                     |
| <i>Sn-3Ag-3Bi</i>       | <i>Ag<sub>3</sub>Sn</i>   | <i>Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn</i>                                     |
| <i>Sn-0,7Cu</i>         | <i>Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn</i>                   | <i>Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn</i>                                     |
| <i>Sn-9Zn</i>           | -   | <i>CuZn, Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn</i> |
| <i>Sn-8Zn-3Bi</i>       | -   | <i>CuZn, Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn</i> |
| <i>Bi-43Sn</i>          | -   | <i>Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn, Cu-Sn-Bi</i>                           |
| <i>Bi-42Sn-0,5Ag</i>    | <i>Ag<sub>3</sub>Sn</i>   | <i>Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn, Cu-Sn-Bi</i>                           |
| <i>Sn-5Sb</i>           | <i>Sb<sub>2</sub>Sn<sub>3</sub></i>                                     | <i>Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn</i>                                     |
| <i>In-48Sn</i>          | -   | <i>Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn, Cu-In-Sn</i>                           |

### 2.2.1. Rozpuštění kovového povrchu v tekuté pájce

Během vzniku pájeného spoje dochází díky difúzi ke změně chemického složení tuhého povrchu. Vznikají tuhé roztoky eutektických fází a peritektické sloučeniny. Roztokem je myšlena jakákoliv fáze, která obsahuje alespoň dvě složky. Tuhé roztoky jsou homogenní krystalické fáze, jejichž krystalová struktura se shoduje se strukturou jedné ze složek. Tuhý roztok obsahuje atomy rozpouštědla a rozpuštěné látky. Nejčastěji jsou označovány písmeny malé řecké abecedy ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , ...). Atomy rozpouštědla jsou umístěny vždy v uzlových bodech krystalické mřížky a dle umístění atomů v krystalické mřížce rozlišujeme tři základní typy tuhých roztoků: substituční, intersticiální a subtrahční. K peritektické reakci dochází, jestliže při určité teplotě reaguje tavenina a tuhý roztok tak, že vznikne jediný odlišný tuhý roztok. Pokud jsou ve stykové oblasti i sloučeniny s peritektickou reakcí, snižuje se rozpouštění tuhého kovu do roztavené pájky. Přechod atomů kovového povrchu do roztavené pájky probíhá buď za statických podmínek – tj. difúzí, nebo za dynamických podmínek procesem tečení – tj. prouděním. Uvedený vztah (2) udává zákonitosti rozpouštění tuhé fáze v tekuté fázi. [4, 40]

$$\frac{dQ}{dt} = K(C_0 - C)S \quad (2)$$

Kde:  $\frac{dQ}{dt}$  – množství látky rozpuštěné za jednotku času [mol.s<sup>-1</sup>],  
 K – konstanta rychlosti rozpouštění [m.s<sup>-1</sup>],  
 C<sub>0</sub> – koncentrace nasyceného tuhého roztoku [mol.m<sup>3</sup>],  
 C – skutečná koncentrace tuhého roztoku v daném okamžiku [mol.m<sup>3</sup>],  
 S – plocha rozpouštějícího se tuhého povrchu [m<sup>2</sup>].

Rychlost rozpouštění je dána konstantou K, kterou ovlivňuje teplota, vlastnosti materiálu pájky i tuhého povrchu. Nežádoucím jevem je rozpouštění tuhého kovu v roztavené pájce ve větší míře, zvláště pro tenké povlakové materiály (Au, Sn, aj.). Rozpustnost tuhého materiálu v roztavené pájce lze snížit např.: snížením teploty pájení, kratší dobou pájení či volbou složení pájecí slitiny a množstvím pájky. [4]

### 2.2.2. Difúze na rozhraní pájky a kovového povrchu

Reakce mezi dvěma látkami jsou podmíněny vzájemným přemísťováním elementárních částic, k tomu dohází i při vzniku a růstu IMC vrstev v pájeném spoji. Toto přemísťování se nazývá difúze. Na rozhraní pájky a kovového povrchu dochází k přenosu částic (atomů). Difúze ve slitinách, kdy se jedná o migraci atomů různých druhů, se nazývá heterodifúze. Přejed je veden ve většině případů snahou vyrovnat chemické koncentrační rozdíly přemísťováním atomů ve směru koncentračního spádu, tj. z míst o vyšší koncentraci do míst o koncentraci nižší. Difúzní procesy jsou u kovů v pevném skupenství závislé na typu a nepravidelnostech krystalové mřížky. S větší hustotou poruch v krystalové mřížce, roste i součinitel difúze. Na počet poruch krystalové mřížky, jako jsou vakance, intersticiály, dislokace atd., má vliv způsob výroby kovu a jeho opracování. Pokud jsou při difúzi vzájemné síly mezi atomy difundujících prvků malé i aktivační energie je malá, tím je součinitel difúze velký a i rychlost difúze je velká. Součinitel difúze závisí na teplotě difundujícího prvku, na volbě a koncentraci spojovaných a spojujících materiálů. Proto tloušťka IMC vzniklá při pájení bude růst s teplotou i dobou pájení. Velikost součinitele difúze D v čistých kovech je popsána pomocí Arrheniovy rovnice. [4, 40]

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (3)$$

Kde: D<sub>0</sub> – difúzní koeficient [m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>],  
 Q – aktivační energie růstu IMC [eV],  
 k – Boltzmannova konstanta 8,617\*10<sup>-5</sup> [eVK<sup>-1</sup>],  
 T – teplota [K].

Pomocí součinitele difúze je možné z II. Fickova zákona vyjádřit tloušťku difúzní vrstvy, která vznikne při určité době pájení. [4]

$$Z = \sqrt{Dt} \quad (4)$$

Kde:  $Z$  – tloušťka IMC [m],  
 $D$  – součinitel difúze [ $m^2s^{-1}$ ],  
 $t$  – čas [s].

### 2.2.3. Rozhraní Cu-Sn

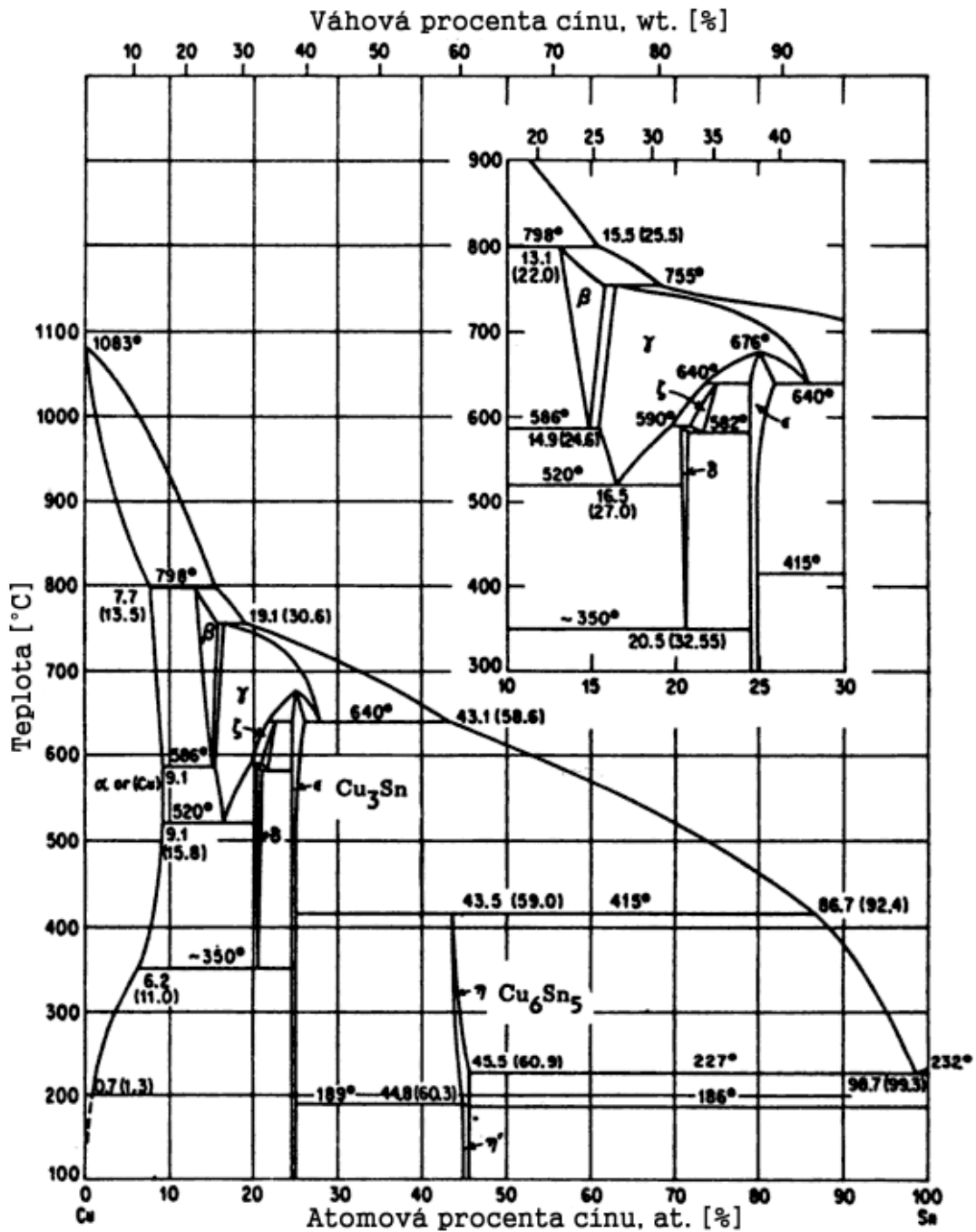
Základ všech pájecích slitin pro měkké pájení tvoří cín. Vodivý motiv na DPS je vyroben z měděné fólie, proto právě měď a cín tvoří nejdůležitější binární systémem pro tvorbu pájených spojů a ovlivňuje kvalitu výsledného spoje. Na rozhraní těchto dvou kovů vzniká vrstva IMC  $Cu_6Sn_5$ , která bývá označována jako  $\eta$  fáze. Při pokojové teplotě mluvíme o fázi  $\eta'$  a po překročení teploty  $186\text{ }^\circ\text{C}$  se stává fází  $\eta$ . Krystalická struktura fází  $\eta$  a  $\eta'$  je hexagonální (šesterečná). Vrstva  $Cu_6Sn_5$  vzniká v okamžiku smáčení Cu povrchu roztavenou pájecí slitinou. Její přítomnost je podmínkou vytvoření pevné vazby na rozhraní pájka a Cu povrchu. Tvorbu IMC je možné ovlivnit volbou pájecího profilu, konkrétně dobou nad teplotou tavení a teplotou během přetavení. Jak již bylo napsáno v předchozí kapitole, k tvorbě IMC dochází díky difúzi i po ochlazení spoje a ztuhnutí pájecí slitiny. Díky vzniku fáze  $\eta$  je tato část spoje ochuzována o cín.

Tab. 5 Vlastnosti IMC vrstev a jejich porovnání s mědí [41]

| Vlastnost                                   | $Cu_6Sn_5$    | $Cu_3Sn$      | Cu                |
|---|---------------|---------------|-------------------|
| Tvrдость podle Vickerse [ $kg/mm^2$ ]       | 378           | 343           | 50                |
| Mechanický charakter                        | <i>křehká</i> | <i>křehká</i> | <i>houževnatá</i> |
| Poisonovo číslo [-]                         | 0,309         | 0,299         | 0,340             |
| Tepelná roztažnost [ $ppm/^\circ\text{C}$ ] | 16,3          | 19,0          | 16,0              |
| Tepelná vodivost [ $W/m^\circ\text{K}$ ]    | 34,1          | 70,4          | 38,5              |
| Rezistivita [ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ]   | 17,50         | 8,93          | 1,70              |
| Hustota [ $g/cm^3$ ]                        | 8,3           | 8,9           | 8,9               |
| Teplota tavení [ $^\circ\text{C}$ ]         | 415           | 670           | 1085              |

V části s nižší koncentrací cínu vzniká druhá vrstva IMC, ta tvoří vrstvu mezi Cu povrchem a již vytvořenou IMC vrstvou  $Cu_6Sn_5$ . Tato druhá vrstva se značí jako fáze  $\epsilon$  a má složení  $Cu_3Sn$ . Tato fáze  $\epsilon$  má ortorombickou (kosočtverečnou) krystalovou strukturu. Při nižších teplotách spoje dominuje vytváření vrstvy  $Cu_6Sn_5$ , při vyšších teplotách je silnější vrstva  $Cu_3Sn$ , což je popsáno mnoho experimenty se zrychleným stárnutím spoje při zvýšené teplotě. Vrstva  $Cu_3Sn$  je nesmáčivá, z čehož plynou možné problémy při opětovném zahřívání spoje, např. při opravách. Obě IMC vrstvy jsou velice pevné, ale díky tomu i značně křehčí v porovnání s Cu povrchem, viz srovnání vlastností v Tab. 5.

Vznik jednotlivých fází ve slitině s různým poměrem cínu a mědi je popsáno pomocí fázového diagramu na Obr. 8.



Obr. 8 Fázový diagram soustavy Sn-Cu [42]

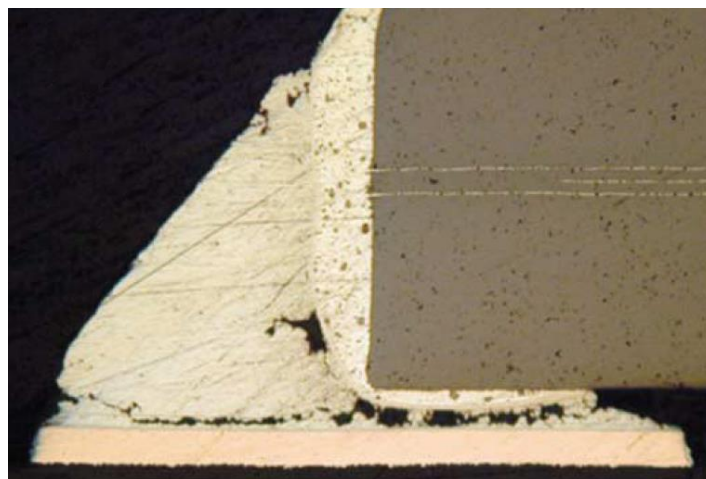
## 2.2.4. Vliv IMC na životnost pájeného spoje

Únava materiálu působením teploty je často sledovaným důvodem selhání pájeného spoje a tím i celého zařízení. Díky rozdílným koeficientům délkové roztažnosti jednotlivých prvků zařízení, nejvíce substrátu DPS a těla součástky, dochází k mechanickému zatěžování pájených spojů. Proto jsou poruchy v IMC vrstvách

nejčastější příčinou selhání spoje. Historicky je mnoho studií zaměřeno na zkoumání IMC vrstev, převážně na rozhraní olovnaté pájky a měděné podložky, viz například [43–46]. Potvrzena je snižující se životnost pájených spojů v důsledku větší tloušťky IMC vrstev. Obdobně nás IMC vrstvy zajímají při použití bezolovnatých pájecích slitin. Především má zvětšující se vrstva IMC negativní vliv na elektrickou vodivost, tepelnou vodivost a mechanickou pevnost pájeného spoje.

Životnost pájených spojů je posuzována pomocí různých testů. Nejčastěji je možné se v literatuře setkat s využitím zrychleného stárnutí pomocí zvýšené teploty. Zde se projevuje narůstající vrstva IMC. Stárnutí pájených spojů při teplotách 80, 100, 125 a 150° C po dobu až 6 měsíců popisuje Hongtao ve svém článku [47]. Pájené spoje byly tvořeny pájkou SAC405, SAC305 a eutektickou Sn-Pb. Práce prokázala významný vliv zvýšené teploty na vlastnosti vzorků. Test byl vyhodnocován pomocí mechanické zkoušky, kdy se zvyšující se teplotou i dobou stárnutí vydržely spoje menší namáhání.

Díky již zmíněné teplotní roztažnosti je často využíváno pro testování životnosti teplotní cyklování. Při testu dochází k zvýšenému namáhání pájených spojů. Křehké IMC vrstvy při takovém namáhání praskají a po rozšíření prasklin ve spoji dochází k jeho selhání. Test dle [48] využívá teplotní cyklování mezi -55°C až 100°C (až 7000 cyklů) a pro porovnání 0°C až 100°C (až 14500 cyklů). Posuzovány byly spoje



Obr. 9 Výbrus spoje po 6000 cyklech teplotních přechodů [48]

z pájecích slitin Sn-3,8Ag-0,7Cu a Sn-3,5Ag. Degradace spojů byla vyhodnocena pomocí mechanického namáhání ve střihu a vytvořením metalografických výbrusů. Větší rozdíl teplot a počet cyklů má vliv na zvýšení degradace spoje. Na Obr. 9 je vidět příklad

metalografického výbrusu spoje součástky velikosti 0805 po vystavení 6000 cyklů mezi  $-55^{\circ}\text{C}$  až  $100^{\circ}\text{C}$ . Patrná je prasklina v místě vrstvy IMC.

DPS jsou během života vystaveny kromě určité teploty i vibracím, např. v automobilovém průmyslu. Z tohoto důvodu jsou i pájené sestavy úmyslně vystavovány působení vibrací, které ovlivňují jejich životnost. V [49] je možné nalézt výsledky kombinovaného testu spojů ze slitiny SAC305 vystavené teplotnímu cyklování a zároveň vibracím.

#### **2.4. Vliv pájecího profilu na vznik IMC**

Jak bylo řečeno v kapitole 2.2.3 vrstva  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  vzniká prakticky ihned při kontaktu roztavené pájecí slitiny a měděného povrchu. Tato vrstva se bude s postupným stárnutím spoje rozšiřovat, až povede k jeho selhání. Proto je dobré vědět, jaké procesní parametry ovlivňují vznik IMC vrstev při procesu pájení. Tloušťku vrstvy IMC po zapájení ovlivňují procesní parametry pájení. Již v roce 1998 ve své práci Harris a Chaggar [50] docházejí k závěru, že množství IMC vznikající při pájení je přímo úměrné času a teplotě. Jde o teplotu přesahující teplotu tavení pájecí slitiny a dobu, po kterou je spoj této teplotě vystaven. Vliv má i velikost pájecí plošky, povrchová úprava pájených ploch a samozřejmě i použitá pájecí slitina. Ovlivnit při samotném procesu pájení je možné pouze pájecí profil, tudíž teplotu a čas. So a Chan ve své práci [51] popisují, jak ovlivňuje teplota a čas přetavení vznik IMC vrstvy u eutektické pájky Sn-Pb. Oba tyto parametry teplotního profilu mají vliv na výslednou vrstvu IMC. Konkrétně byla tloušťka s teplotou přetavení  $190^{\circ}\text{C}$  asi  $1,5\ \mu\text{m}$  a se zvyšující se teplotou až na  $280^{\circ}\text{C}$  tloušťka rostla na  $2,5\ \mu\text{m}$ . Obdobně se síla IMC vrstvy rozšiřovala s delším časem přetavení pájecí slitiny.

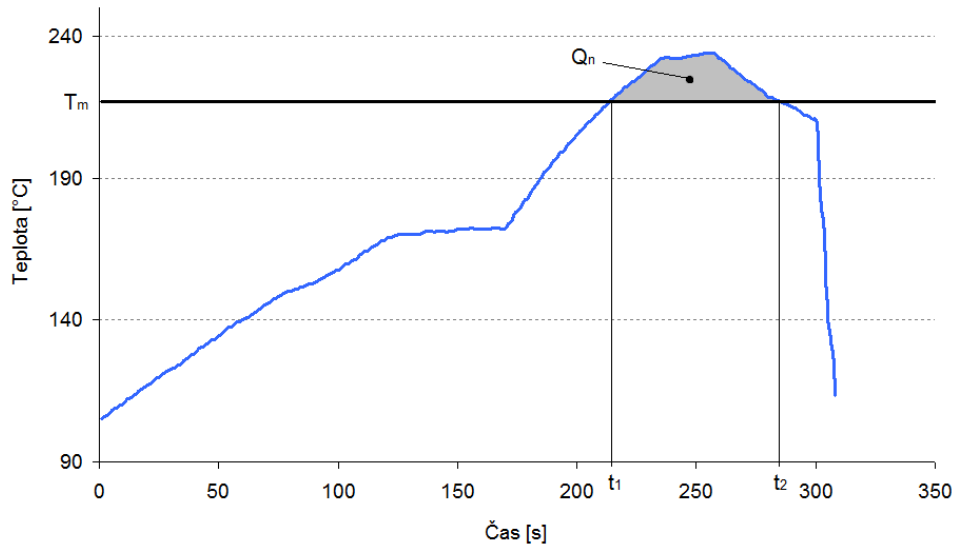
Vliv pájecího profilu na vznik IMC u olovnaté pájecí slitiny byl v minulosti dobře popsán, jeho vliv u bezolovnatých spojů však není dosud zcela zpracován a publikován. Této problematice se v současné době také věnuje zvýšená pozornost odborníků v oblasti propojovacích struktur. Zapříčinila to samozřejmě nutnost přejít na slitiny bez obsahu olova, která je dána legislativou. Vzhledem k vyšší teplotě nutné k přetavení pájecích slitin typu SAC, které mají asi o  $35^{\circ}\text{C}$  vyšší teplotu tavení než eutektická pájka Sn-Pb, lze předpokládat větší množství IMC ve vzniklém spoji. Vliv tvaru pájecího profilu na vznik IMC u pájecí slitiny SAC405 sleduje Aisha [52], konkrétně je vyhodnocován vliv rychlosti ochlazování z pájecí teploty  $250^{\circ}\text{C}$ . Bylo zjištěno, že při rychlejším ochlazování spoje je výsledná tloušťka IMC nižší než u pomalého ochlazování. Je to způsobeno delším

časem, po který je slitina vystavena zvýšené teplotě. Vliv byl pozorován i na struktuře IMC. Rychlejší ochlazení vedlo k jemnější struktuře IMC. Pan a kolektiv [53] vyhodnocoval vznik a růst IMC v závislosti na několika faktorech. Byly použity a porovnávány dvě pájecí slitiny Sn-Pb a SAC305. Byly zvoleny tři maximální teploty pájecího profilu pro každou slitinu. Společným znakem bylo, o kolik byla překročena teplota tavení pájecí slitiny, konkrétně to byly hodnoty 12, 22 a 32 °C. Čas nad teplotou tavení pájecí slitiny byl 30 nebo 90 s. Část zapájených vzorků byla v rámci testu vystavena teplotnímu namáhání a to změně teploty od -40 do 125 °C v 500 cyklech nebo stárnutí při stálé teplotě 125 °C po dobu 250 hodin. Výsledky ukazují tloušťku IMC vrstev u obou pájecích slitin v rozmezí 1 až 2 μm pro všechny pájecí profily. S vyšší teplotou a časem nad teplotou tavení se vrstva zvětšuje. Nedochovalo však k lineárnímu nárůstu tloušťky IMC vrstvy s maximální teplotou přetavení. U vzorků s pájecí pastou SAC305 byla vrstva IMC tlustší než v případě olovnaté pájky. K významnému rozdílu v růstu IMC vrstvy nedošlo v porovnání teplotního cyklování a stárnutí při konstantní teplotě. To znamená, že tepelný šok přispívá k růstu IMC pouze prostřednictvím vysoké teploty. Po tepelném stárnutí byla tloušťka IMC vrstev do 4 μm.

## 2.5. Heating faktor

Jak bylo napsáno výše, je v literatuře možno dohledat mnoho informací o vzniku a růstu IMC v pájených spojích. Nicméně samotné měření tloušťky IMC je ve výrobní praxi složité. Je nutné vytvořit metalografické výbrusy spojů a pomocí mikroskopu změřit IMC vrstvu. Z toho vyplývá, že prakticky není možnost, jak stanovit odhad spolehlivosti pájeného spoje po zapájení DPS ve výrobě. Při volbě vhodného pájecího profilu je však možné předpokládat optimální kvalitu spoje. Výrobci pájecích slitin uvádějí popis doporučeného profilu, ale často se omezují pouze na popis času a teploty přetavení. Navíc je otázkou, jestli výrobce stanovuje doporučený pájecí profil na základě tvorby IMC při pájení nebo převážně na základě dobré smáčivosti povrchu pájkou. Tu v roce 2001 [54] popisuje, jak zajistit vhodný pájecí profil s ohledem na vznik IMC u olovnaté pájky. Heating faktor je označován jako  $Q_\eta$  a je definován jako integrál teploty nad bodem tavení pájecí slitiny, viz (5), kde  $T_m$  vyjadřuje teplotu tavení použité pájecí slitiny. Graficky znázorněný význam rovnice jako plocha nad teplotou tavení slitiny SAC305 je vidět na Obr. 10.

$$Q_\eta = \int_{t_1}^{t_2} [T(t) - T_m] dt \quad (5)$$



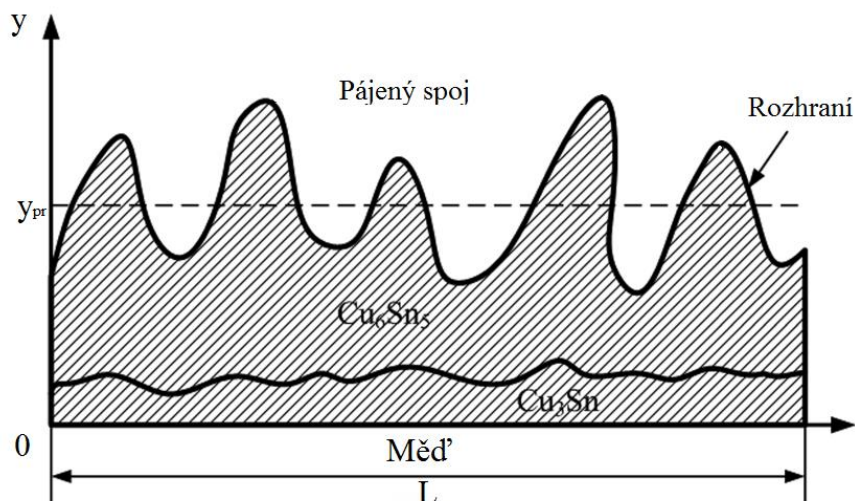
Obr. 10 Pájecí profil s vyznačenou plochou  $Q_{\eta}$

Pokus ve výše uvedené práci [54] ukazuje, že změna doby nad teplotou tavení a vrcholové teploty má velice malý vliv na tloušťku IMC, jestliže je zachována konstantní hodnota heating faktoru. Je možné zjistit vztah mezi tloušťkou IMC a  $Q_{\eta}$ , v [55] je zjištěn lineární růst IMC s rostoucí hodnotou  $Q_{\eta}$  až do dosažení tloušťky vrstvy IMC 2,5  $\mu\text{m}$ . Obdobným způsobem by bylo možné postupovat i v popisu pájecích profilů pro bezolovnaté slitiny. Z těchto důvodů je heating faktor vhodný pro popis pájecího profilu s ohledem na vznik IMC.

## 2.6. Stanovení tloušťky IMC vrstev

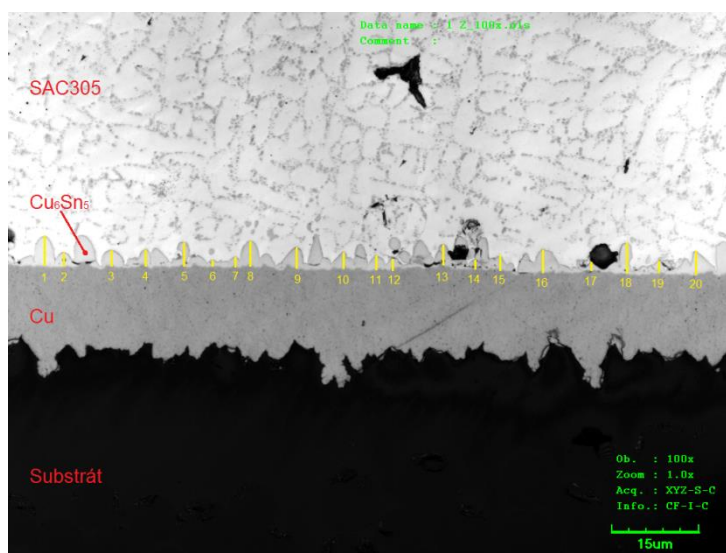
V literatuře a odborných článcích je možné dohledat tloušťky IMC vrstvy u popisovaných experimentů. U měkkého pájení jde o jednotky až desítky  $\mu\text{m}$ . Tyto hodnoty jsou často přebírány a využívány dalšími autory. Problém nastává při snaze porovnávat získané hodnoty od jednotlivých autorů, jelikož v mnohých případech není popsáno, jakým způsobem byla uvedená hodnota získána. Měření probíhá pomocí vyhodnocování snímků z mikroskopů (optických, laserových i elektronových). Vrstva IMC nebývá rovnoměrná a způsob měření může být stanoven například jako minimální dosažená hodnota, maximální dosažená hodnota, průměrná hodnota z určitého množství náhodně či pevně určených bodů měření. Typický vzhled rozhraní měděného povrchu a bezolovnaté pájecí slitiny je na Obr. 11, kde je vidět značně proměnná tloušťka IMC a je vyznačena průměrná hodnota.





Obr. 11 Tvar rozhraní pájený spoj a měděný povrch

Lepším způsobem stanovení tloušťky IMC se poté jeví hodnoty, které jsou získány z plošného měření skenovacím elektronovým mikroskopem s energiově disperzním analyzátozem (EDS), ale i zde je možné stanovit výslednou hodnotu rozdílným výpočtem. Způsob měření ve 20 náhodných bodech snímku, kdy je výsledná hodnota brána jako průměr ze získaných 20 hodnot, je na Obr. 12. Pro vyhodnocení tloušťky IMC v rámci provedeného experimentu byl navržen postup, který odstraňuje náhodnost měření v jednotlivých bodech. Při využití takového postupu vyhodnocení, by bylo možné snadno porovnávat data mezi různými pokusy. Využitý postup je detailně popsán v experimentální části.



Obr. 12 Příklad měření tloušťky ve 20 náhodných bodech snímku

### 3. Experimentální část

Intermetalické sloučeniny a jejich vliv na vlastnosti bezolovnatého pájeného spoje, jejich tvorba a růst nejsou doposud zcela jednoznačně prozkoumány a to především z důvodu velkého počtu dodávaných pájecích slitin. V rešeršní části bylo popsáno, jaký vliv má pájecí profil na vznik IMC a jakým způsobem je možné pájecí profil popsat. Bylo popsáno, jaký problém představuje měření tloušťky IMC vrstev a následné porovnávání mezi experimenty. Na základě těchto poznatků byl navržen experiment. Ten sleduje vliv integrálu teploty nad bodem tavení pájecí slitiny na množství vzniklé IMC ve spoji při různém procesním nastavení. Konkrétně jde o využití více materiálů pájecích slitin a pájeného povrchu. Vývoj a růst IMC je sledován i při stárnutí vyrobených vzorků. Experiment dále sleduje vznik dutin u pájeného spoje s ohledem na materiál a teplotní profil. U spojů byla sledována i mechanická pevnost a to s vyhodnocením k množství dutin i vrstvy IMC. Zkoumání struktury pájeného spoje je realizováno pomocí zkušebních vzorků. Na těchto vzorcích byly vytvořeny pájené spoje za popsáných a opakovatelných podmínek, to z důvodu možnosti získané vzorky porovnávat a vyhodnocovat. Experimenty a jejich výsledky jsou prezentovány v následujících podkapitolách.

#### 3.1. *Materiály pro experiment*

Pro experiment byly vybrány čtyři značně odlišné pájecí slitiny, a to z hlediska složení i velkého rozdílu bodů tavení. Jako první byla zvolena často používaná pájecí slitina typu SAC, konkrétně o váhovém složení Sn 96,5 %, Ag 3 % a Cu 0,5 %. Slitina byla použita v podobě pájecí pasty o velikosti zrn 25–45  $\mu\text{m}$  a obsahu slitiny 88,5 % hmotnosti. Tato slitina má teplotu tavení 219 °C. [56]

Druhá použitá slitina má váhové složení Bi 57 %, Sn 42 % a Ag 1 %. Zrnitost pasty byla shodná s pastou SAC a obsah kovových částí byl 90 % hmotnosti pasty. Teplota tavení této slitiny je pouze 139 °C. Tato slitina je využívána právě pro nízkou teplotu tavení a její možno využít pro pájení součástí citlivých na teplo nebo u aplikací, kde se využívá možnost pájet touto slitinou bez tavení ostatních spojů na desce (tvořených např. slitinou typu SAC). [57]

Třetí slitina má váhové složení Cu 0,7 %, Ni 0,05 %, Ge 0,006 % a zbytek Sn. Jde o slitinu s obchodním označením Sn100C. Slitina neobsahuje stříbro, proto jde o levnější variantu materiálu pro bezolovnaté pájení. Díky ceně se nejvíce rozšiřuje pro pájení vlnou, kde je cena lázně podstatným nákladem výroby. Pro experiment bylo využito

pájecí pasty s velikostí kuliček slitiny 25–45  $\mu\text{m}$  a váhovým obsahem 87,5 % slitiny v pastě. Teplota tavení je 227 °C. [58]

Poslední variantou pájecí slitiny je pasta s váhovým složením Sn 95 % a Sb 5 %. Šlo o pastu s obsahem 89 % kovových částí, které byly opět o velikosti 25–45  $\mu\text{m}$ . V současné době se slitina pro hromadnou výrobu používá velice omezeně. Jde spíše pro speciální aplikace. Naopak je často využívána jako instalatérský materiál v USA. Teplota tavení této slitiny je 243 °C. Přehled využitých pájecích slitin v experimentu je uveden v Tab. 6, slitiny jsou řazeny dle teploty tavení. [59]

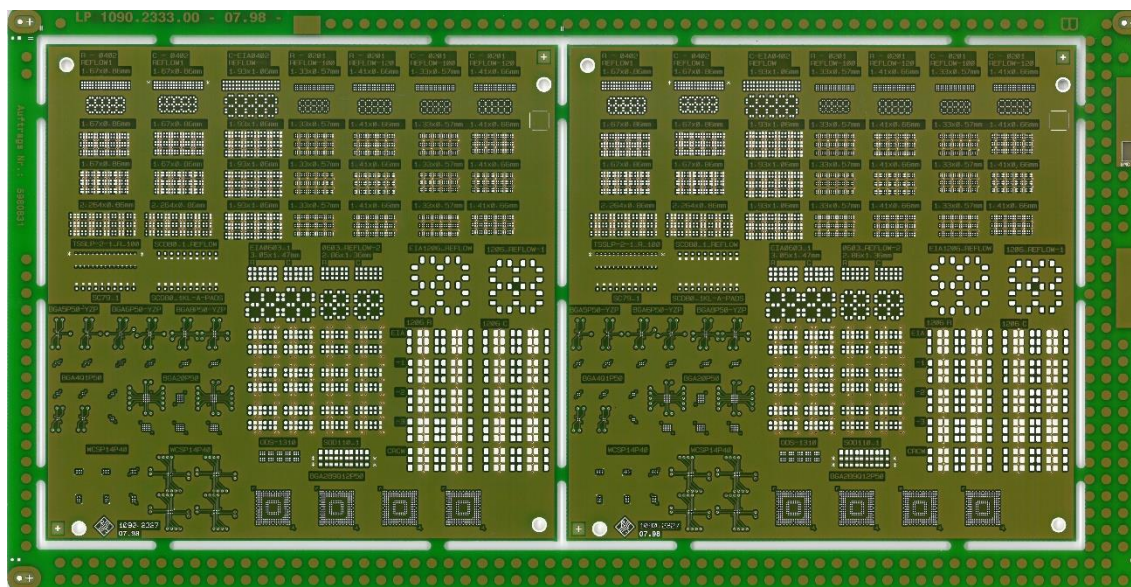
Tab. 6 Přehled pájecích slitin pro experiment

| Označení | Váhové složení                             | Teplota tavení | Obsah tavidla [%] |
|----------|--|----------------|-------------------|
| BiSnAg   | Bi 57 %, Sn 42 %, Ag 1 %                   | 139 °C         | 11,5              |
| SAC305   | Sn 96,5 %, Ag 3 %, Cu 0,5 %                | 219 °C         | 10                |
| Sn100C   | Sn > 99 %, Cu 0,7 %, Ni 0,05 %, Ge 0,006 % | 227 °C         | 12,5              |
| SnSb     | Sn 95 %, Sb 5 %                            | 243 °C         | 11                |

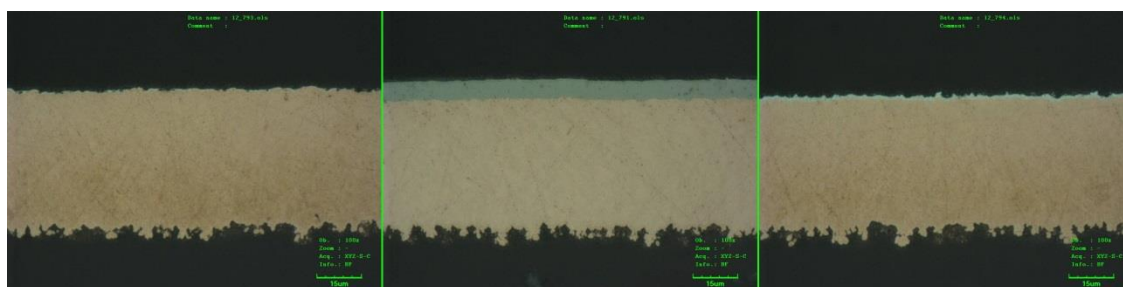
Na vznik IMC má značný vliv povrchová úprava DPS. Do experimentu byly využity 3 povrchové úpravy, které vyhovují dobrou rovinností, dobrou skladování a jsou vhodné i pro opakované přetavení. Jde o povrchové úpravy ENIG, imersní vrstvu stříbra a imersní vrstvu cínu. Z neosazených desek byly vytvořeny výbrusy pro ověření kvality a tloušťky nanesených vrstev. Průměrné tloušťky vrstev jsou uvedeny v Tab. 7. Pouze vrstvu Au u povrchové úpravy ENIG nebylo možné tímto způsobem změřit, tato vrstva není na snímku viditelná. Snímky výbrusů jsou na Obr. 14 Tisk a osazení součástek byl proveden na testovací desky, které slouží pro ověřování a testování automatických osazovacích linek. Desky byly vždy dvě na sdruženém formátu, celý formát je vidět na Obr. 13. Na desku bylo možné osadit větší množství součástek (např. až 142 chipových součástek velikosti 1206), ale byla využita pouze část, která je na Obr. 15. DPS byla vyrobena z laminátu FR4 tloušťky 1,6 mm a byla oboustranně plátována 18  $\mu\text{m}$  měděnou fólií, která byla následně zesílena na tloušťku 43  $\mu\text{m}$  díky pokovování povrchu.

Tab. 7 Průměrné tloušťky povrchových úprav

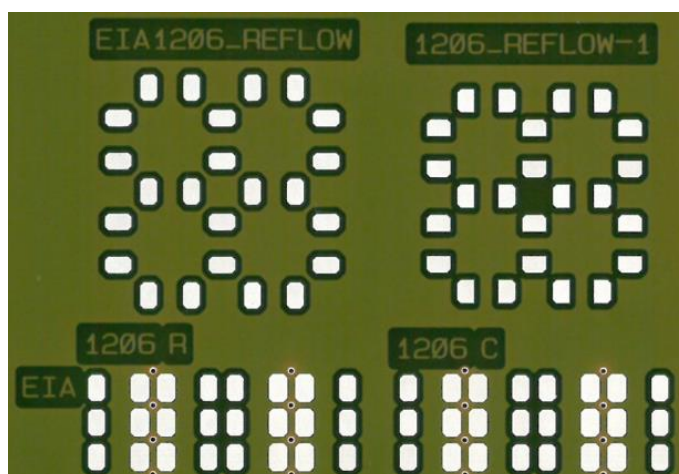
| Povrchová úprava | Vrstva  | Tloušťka [ $\mu\text{m}$ ] |
|------------------|---------|----------------------------|
| ENIG             | Nikl    | 6,7                        |
| Imersní stříbro  | Stříbro | 0,4                        |
| Imersní cín      | Cín     | 1                          |



Obr. 13 Vzorek DPS s povrchovou úpravou imerzní stříbro



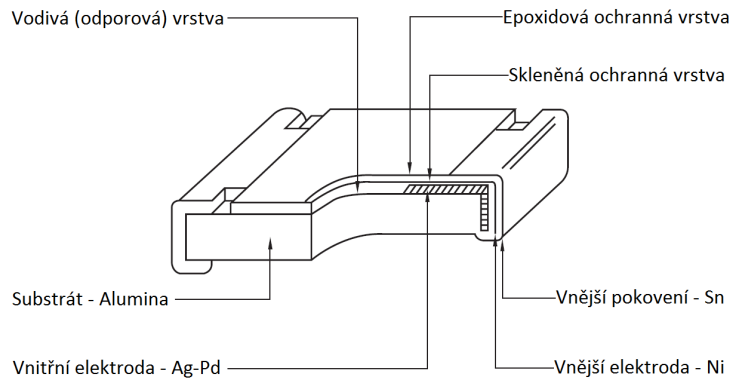
Obr. 14 Porovnání výbrusů povrchových úprav (vlevo Imersní Ag, uprostřed ENIG, vpravo Imersní Sn)



Obr. 15 Část DPS pro osazení součástek velikosti 1206 (povrchová úprava Ag)

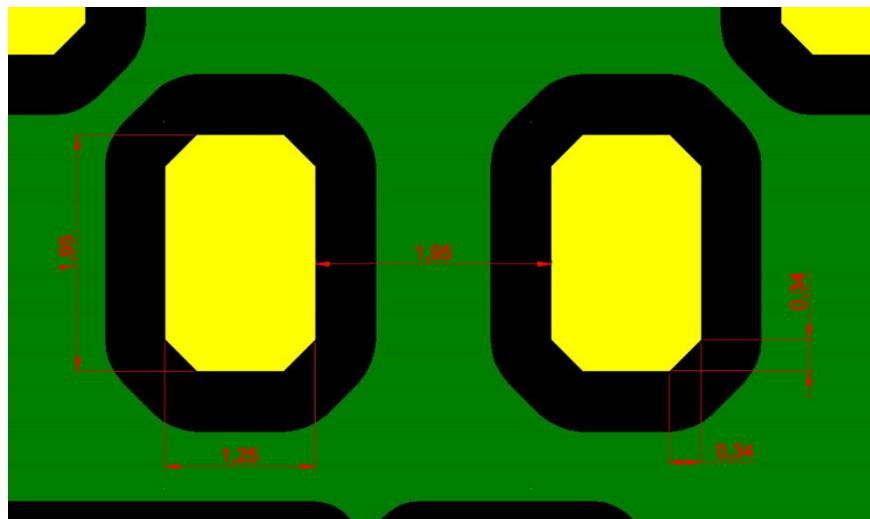
Na každý vzorek bylo osazeno 40 kusů chipové součástky s velikostí 1206. Šlo o propojovací odpory, které mají zkratované elektrody. Rozměry součástky jsou délka 3,2 mm, šířka 1,6 mm, výška 0,55 mm a délka elektrody na spodní straně 0,45 mm.

Vnitřní struktura součástky je popsána na Obr. 16. Povrchové pokovení vývodů je provedeno cínovou vrstvou.



Obr. 16 *Struktura osazovaných chipových rezistorů*

Pájecí pasty byly nanášeny na pájecí plošky pomocí šablonového tisku. Tloušťka šablony byla 120  $\mu\text{m}$  s rozměry apertur dle pájecích plošek. Tvar a rozměry pájecích plošek jsou znázorněny na Obr. 17. Množství natištěné pasty bylo hlídáno pomocí laserového měření výšky pasty (SPI) v rozmezí 80 až 120 % objemu a bylo dosaženo průměrné hodnoty 105 % objemu apertur.



Obr. 17 *Tvar a rozměr pájecích plošek na DPS*

### 3.2. *Pájecí profily*

Pro přetavení pájecí pasty byla využita pec s konvekčním ohřevem a celkem 11 teplotními zónami. V každé zóně je možné nastavit teplotu proudícího plynu odděleně pro horní i spodní stranu DPS. Uvedené teploty dále byly nastaveny pro horní i spodní ohřev obdobně. V peci bylo u všech desek využíváno dusíkové atmosféry. Hodnota zbytkového kyslíku byla v přetavovacích zónách redukována v rozmezí 500 až 800 ppm. Byla snaha vytvořit čtyři teplotní profily, které se liší v energii dodané během pájení.

Rozdíl je vidět na grafickém znázornění průběhů teplot i na vypočtené hodnotě heating faktor. Pro slitinu s nejvyšší teplotou tavení (SnSb) byly vytvořeny pouze tři teplotní profily, jelikož již 3. teplotní profil přesahoval maximální teplotu 260 °C, nad kterou není možné pájet většinu běžných součástek. Teplotní profil s vyšší maximální teplotou by v praxi neměl využití. Návrh profilů byl proveden na základě rozmezí doporučení výrobců past pro jejich přetavení a možností, které dovoluje použitá přetavovací pec. Nastavení pece a základní parametry profilů naměřené během výroby vzorků pro experiment jsou shrnuty v Tab. 8 a 9.

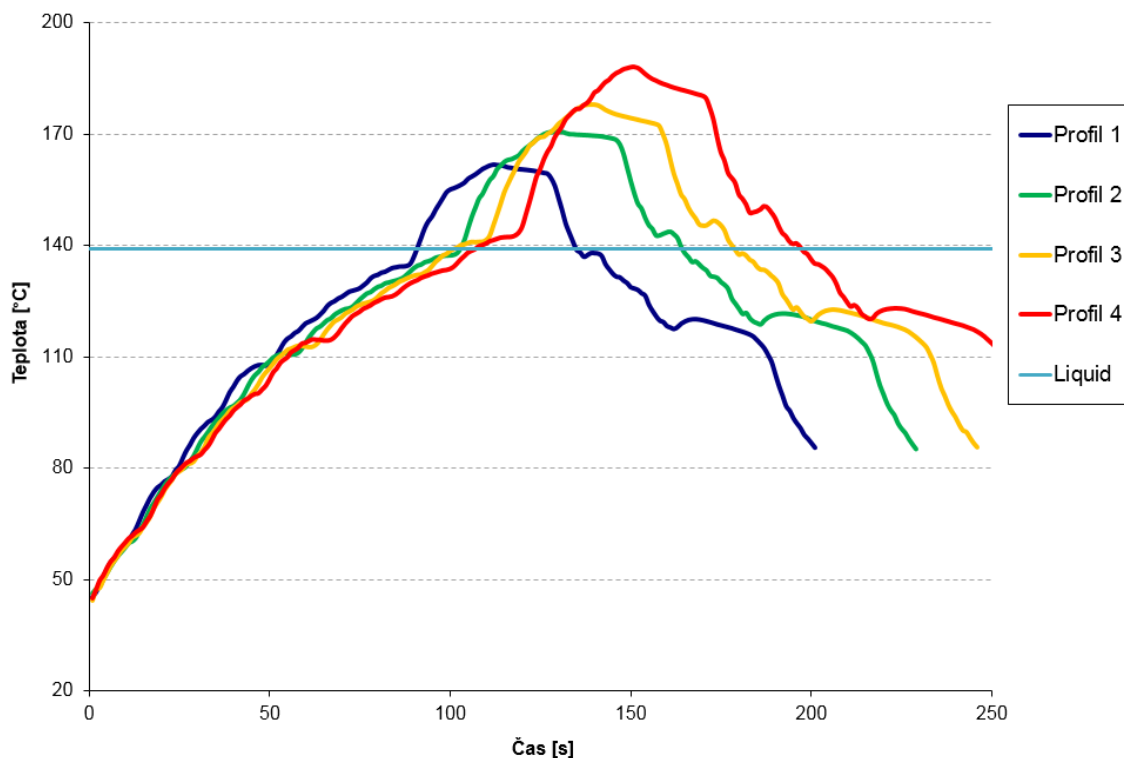
Tab. 8 Nastavení pece a hodnoty teplotních profilů pro slitiny BiSnAg a SAC305

| Označení             | Profil 1 | Profil 2 | Profil 3 | Profil 4 | Profil 5 | Profil 6 | Profil 7 | Profil 8 |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Slitina              | BiSnAg   | BiSnAg   | BiSnAg   | BiSnAg   | SAC305   | SAC305   | SAC305   | SAC305   |
| Rychlost [cm/min]    | 160      | 140      | 130      | 120      | 110      | 90       | 85       | 70       |
| Zóna 1 [°C]          | 90       | 90       | 90       | 90       | 130      | 130      | 130      | 130      |
| Zóna 2 [°C]          | 105      | 105      | 105      | 105      | 150      | 150      | 150      | 150      |
| Zóna 3 [°C]          | 120      | 120      | 120      | 120      | 170      | 170      | 170      | 170      |
| Zóna 4 [°C]          | 135      | 135      | 135      | 135      | 180      | 180      | 180      | 180      |
| Zóna 5 [°C]          | 140      | 140      | 140      | 140      | 190      | 190      | 190      | 190      |
| Zóna 6 [°C]          | 145      | 145      | 145      | 145      | 200      | 200      | 200      | 200      |
| Zóna 7 [°C]          | 145      | 150      | 155      | 155      | 225      | 225      | 225      | 225      |
| Zóna 8 [°C]          | 195      | 205      | 215      | 227      | 262      | 260      | 270      | 265      |
| Zóna 9 [°C]          | 185      | 195      | 205      | 217      | 252      | 255      | 263      | 265      |
| Zóna 10 [°C]         | 165      | 175      | 175      | 180      | 240      | 250      | 255      | 255      |
| Zóna 11 [°C]         | 70       | 70       | 70       | 75       | 120      | 120      | 130      | 120      |
| Max. teplota [°C]    | 162      | 170,7    | 178      | 188,1    | 228,4    | 233,2    | 244,1    | 247,8    |
| TAL [s]              | 44       | 62       | 78       | 91       | 45       | 63       | 72       | 89       |
| Q <sub>η</sub> [s°C] | 733      | 1278     | 1722     | 2385     | 314      | 663      | 1357     | 1906     |

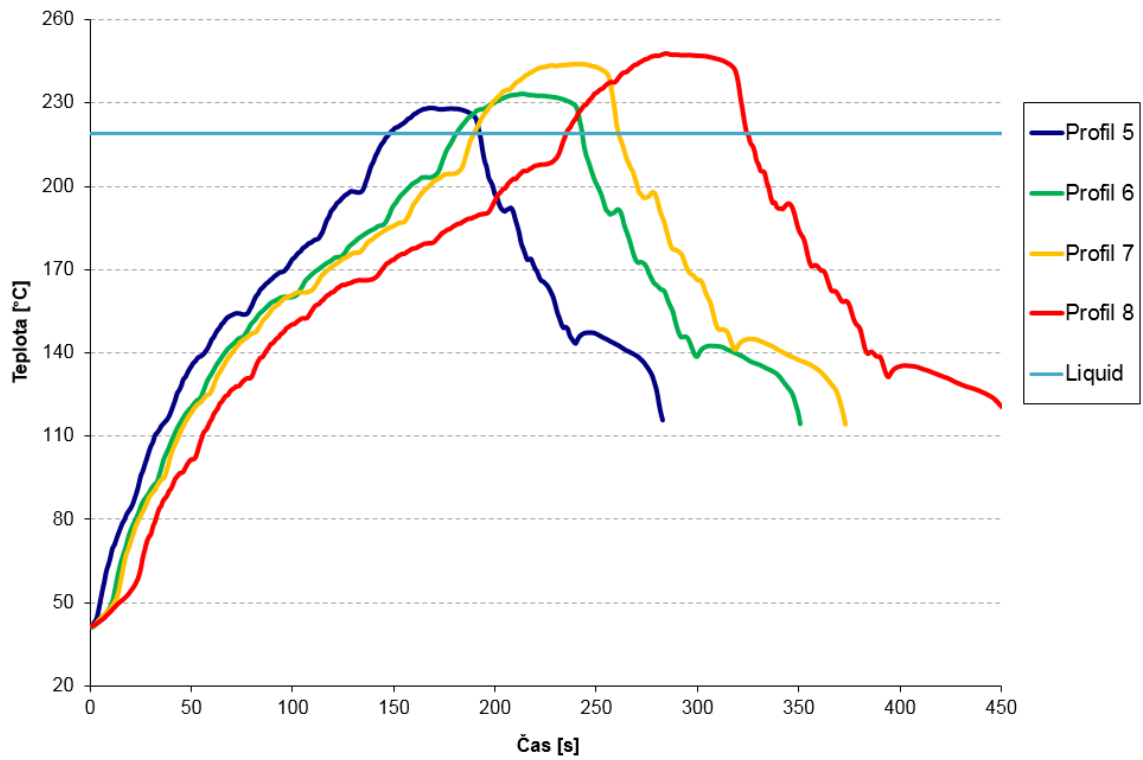
Tab. 9 Nastavení pece a hodnoty teplotních profilů pro slitiny Sn100C a SnSb

| Označení             | Profil 9 | Profil 10 | Profil 11 | Profil 12 | Profil 13 | Profil 14 | Profil 15 |
|----------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Slitina              | Sn100C   | Sn100C    | Sn100C    | Sn100C    | SnSb      | SnSb      | SnSb      |
| Rychlost [cm/min]    | 100      | 85        | 65        | 55        | 90        | 82        | 74        |
| Zóna 1 [°C]          | 130      | 130       | 130       | 130       | 130       | 130       | 130       |
| Zóna 2 [°C]          | 150      | 150       | 150       | 150       | 150       | 150       | 150       |
| Zóna 3 [°C]          | 170      | 170       | 170       | 170       | 170       | 170       | 170       |
| Zóna 4 [°C]          | 180      | 180       | 180       | 180       | 180       | 180       | 180       |
| Zóna 5 [°C]          | 190      | 190       | 190       | 190       | 190       | 190       | 190       |
| Zóna 6 [°C]          | 200      | 200       | 200       | 200       | 200       | 200       | 200       |
| Zóna 7 [°C]          | 225      | 225       | 225       | 225       | 225       | 225       | 225       |
| Zóna 8 [°C]          | 270      | 270       | 270       | 280       | 283       | 290       | 292       |
| Zóna 9 [°C]          | 263      | 265       | 267       | 270       | 273       | 275       | 277       |
| Zóna 10 [°C]         | 255      | 257       | 257       | 265       | 265       | 265       | 265       |
| Zóna 11 [°C]         | 130      | 130       | 130       | 130       | 130       | 130       | 130       |
| Max. teplota [°C]    | 238,9    | 244,5     | 251,9     | 257,5     | 251,5     | 256,7     | 263       |
| TAL [s]              | 48       | 63        | 92        | 113       | 43        | 61        | 75        |
| Q <sub>η</sub> [s°C] | 411      | 814       | 1704      | 2710      | 273       | 624       | 1102      |

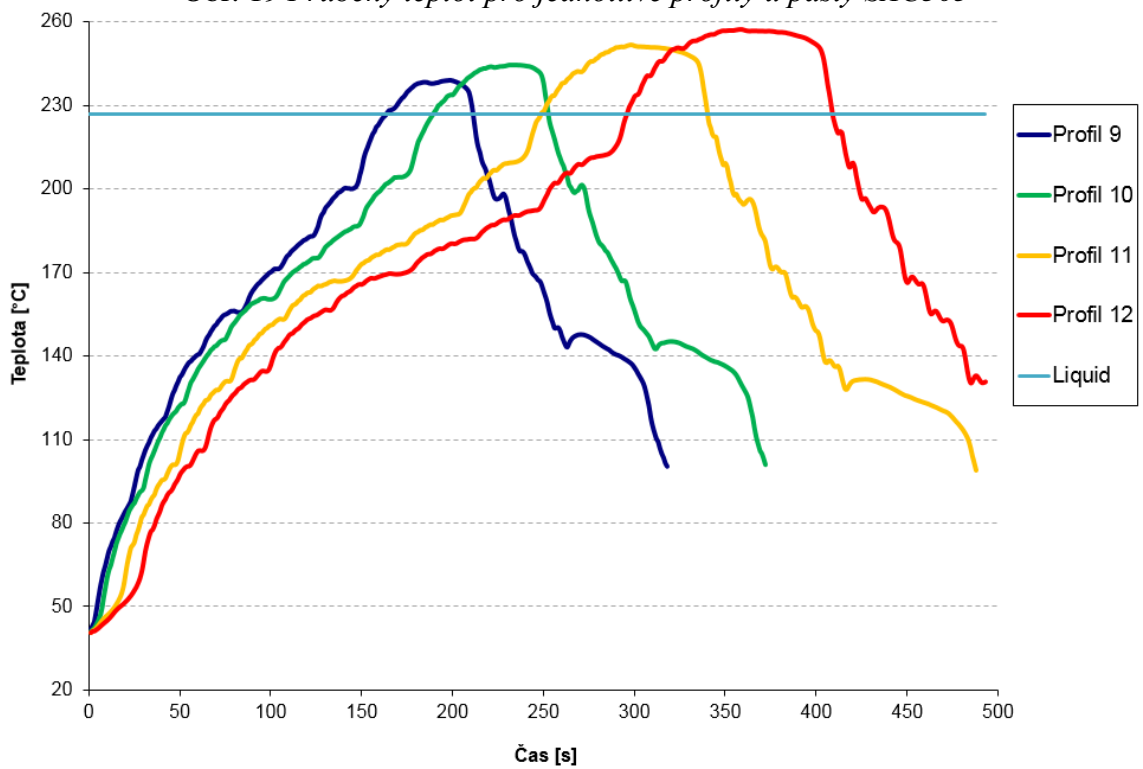
V průběhu pájení byla měřena teplota uprostřed DPS pomocí termočlánku, který byl připájen k pájecí plošce pomocí slitiny se složením 93 % Pb, 5 % Sn a 2 % Ag. Tato slitina je v pevném skupenství až do teploty 296 °C. Teplota byla měřena během průchodu DPS pecí s periodou odečtu hodnot 1 s. Naměřené teplotní profily jsou vyobrazeny na Obr. 18 až Obr. 21.



Obr. 18 Průběhy teplot pro jednotlivé profily u pasty BiSnAg

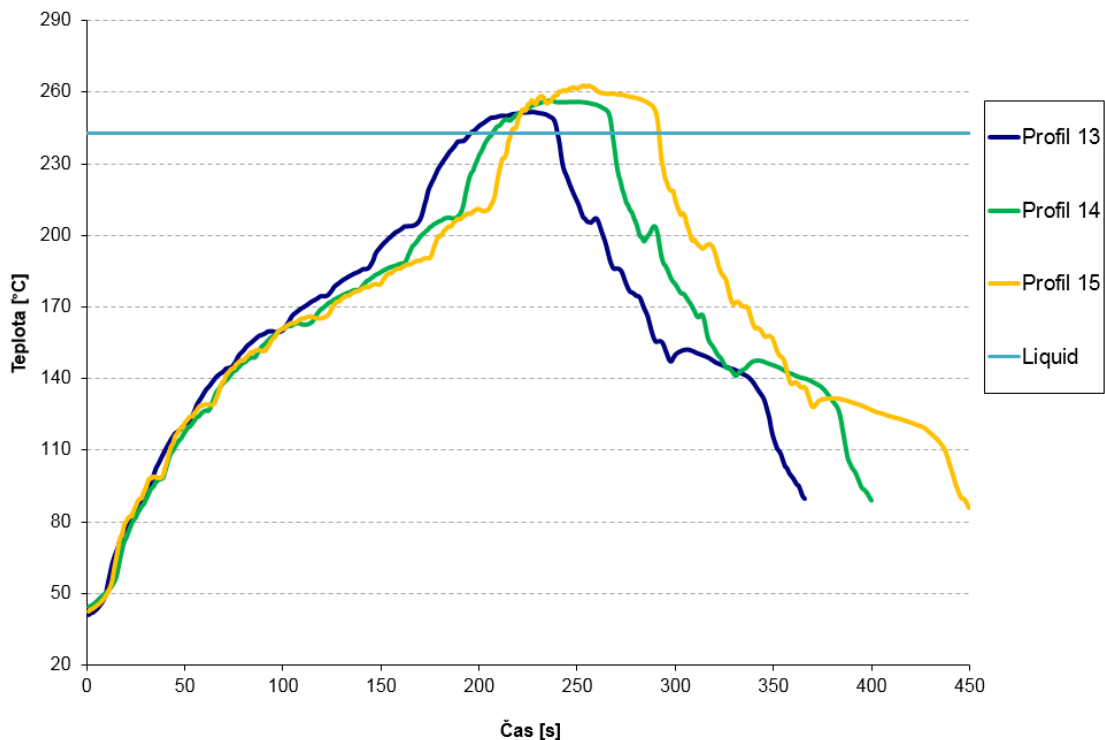


Obr. 19 Průběhy teplot pro jednotlivé profily u pasty SAC305



Obr. 20 Průběhy teplot pro jednotlivé profily u pasty Sn100C

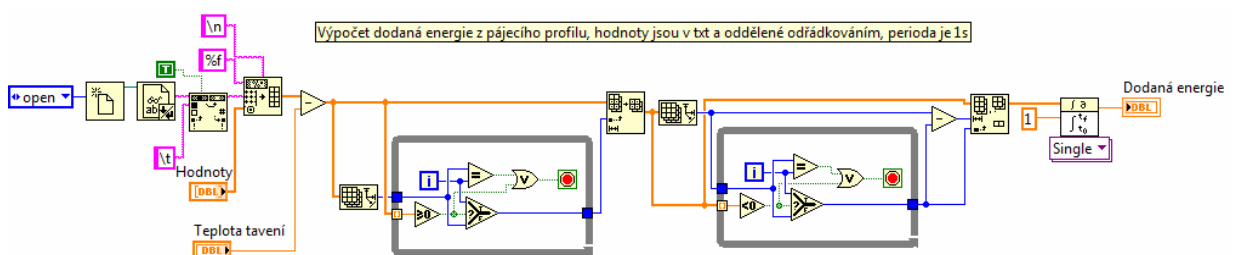




Obr. 21 Průběhy teplot pro jednotlivé profily u pasty SnSb

### 3.3. Výpočet hodnoty heating faktor

Měření teploty bylo provedeno pomocí měřicího zařízení od společnosti Datapaq, které se pohybovalo za měřicí DPS. Hodnota teploty z termočlánku byla snímána každou vteřinu. Zpracování naměřených dat bylo provedeno pomocí vytvořeného programu v grafickém vývojovém prostředí LabView. Program zpracovává naměřené hodnoty teplotního profilu a vypočítává hodnotu heating faktor dle (5). Na Obr. 22 je vidět blokový diagram programu. Na hlavním panelu VI se zadává teplota tavení pájecí slitiny, výsledná hodnota je zobrazena na hlavním panelu a zároveň je uložena do zdrojového souboru s daty. V Tab. 10 jsou uvedeny vypočtené hodnoty  $Q_{\eta}$  pro použité pájecí profily. Doporučení výrobců pájecích past a omezení na straně součástek dávají u každé slitiny jiné technologické okno pro nastavení maximální teploty a doby nad teplotou tavení slitiny. Tyto dva parametry a tvar průběhu nad teplotou tavení slitiny ovlivňují velikost  $Q_{\eta}$ .



Obr. 22 Blokový diagram programu pro výpočet hodnoty  $Q_{\eta}$

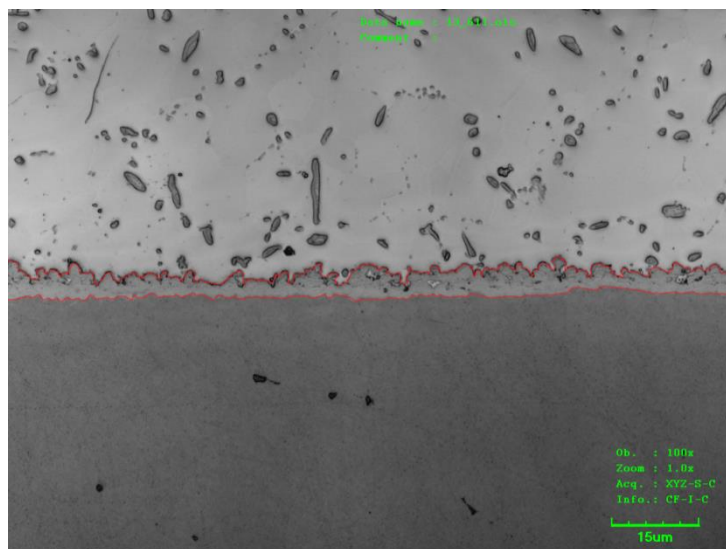
Tab. 10 Vypočtené hodnoty heating factoru

| Označení  | $Q\eta$ [s.°C] |
|-----------|----------------|
| Profil 1  | 733            |
| Profil 2  | 1278           |
| Profil 3  | 1722           |
| Profil 4  | 2385           |
| Profil 5  | 314            |
| Profil 6  | 663            |
| Profil 7  | 1357           |
| Profil 8  | 1906           |
| Profil 9  | 411            |
| Profil 10 | 814            |
| Profil 11 | 1704           |
| Profil 12 | 2710           |
| Profil 13 | 273            |
| Profil 14 | 624            |
| Profil 15 | 1102           |

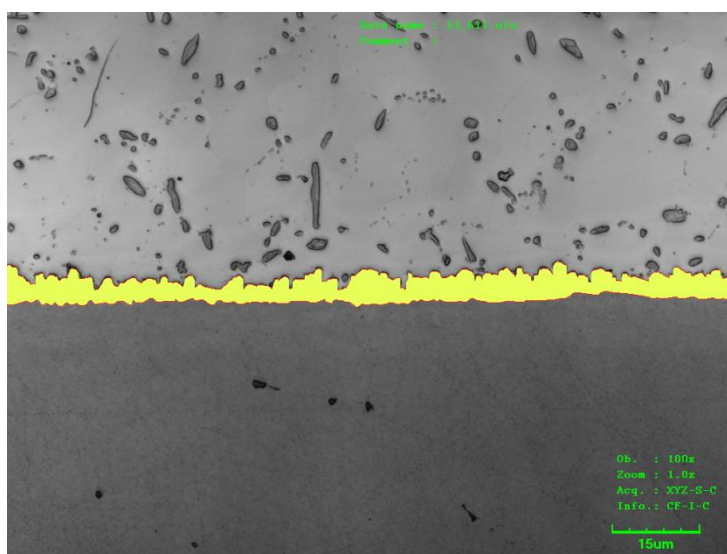
### 3.4. Měření tloušťky intermetalických vrstev

Vzorky, které vznikly přetavením dle výše popsaných pájecích profilů, byly následně upraveny pro analýzu pomocí laserového konfokálního mikroskopu. Na snímku bylo vždy zaznamenáno rozhraní měděné plošky a pájecí slitiny, případně i část terminálu pájené součástky. Rovina rozhraní byla zaznamenána vždy v horizontální rovině snímku. Na mikroskopu byly získány snímky ze všech vytvořených vzorků a následná analýza probíhala bez využití tohoto zařízení. V každém snímku byla ručně označena viditelná rozhraní. V obraze vznikly vždy dvě čáry o šířce jednoho pixelu v definované barvě. Takto upravený snímek je na Obr. 23, jde o vzorek se slitinou Sn100C pájenou profilem č. 9 na povrchové úpravě imerzní Ag, který byl následně vystaven teplotě 120 °C po dobu 16 dnů. Pro vyznačení vrstvy musí být její tloušťka v obraze alespoň o šíři čtyř pixelů, užší rozhraní nelze tímto způsobem vyhodnotit. Pomocí softwaru byl obraz analyzován a byl vyhodnocován počet pixelů obrazu mezi rozhraními v každém obrazovém sloupci. Výsledek byl pro možnou kontrolu uložen i do samotného obrazu, jak je vidět na Obr. 24. Každý pixel představuje vzdálenost 0,12  $\mu\text{m}$  v případě využívaného mikroskopu Olympus Lext OLS 3000 s objektivem 100x. Snímky byly ukládány v rozlišení 1024 x 768 bodů, proto bylo získáno 1024 hodnot tloušťky IMC pro každý snímek. Z těchto hodnot byl následně vypočten a zaznamenán průměr, který představuje hodnotu tloušťky IMC vrstvy. Výpočet je popsán rovnicí (7), kde  $t_{pr}$  představuje průměrnou hodnotu tloušťky IMC a  $t_i$  je tloušťkou vrstvy v jednom obrazovém sloupci.

$$t_{pr} = \frac{1}{1024} \cdot \sum_i^{1024} t_i \quad (7)$$



Obr. 23 Snímek s vyznačenými hranicemi IMC (vzorek 204, tloušťka 4,3  $\mu\text{m}$ )

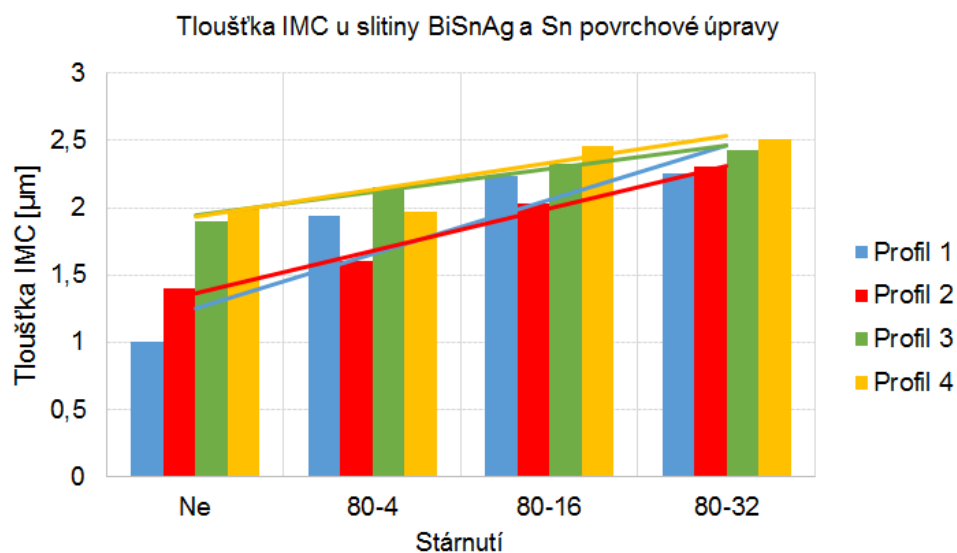


Obr. 24 Softwarově upravený snímek s graficky odlišenou vrstvou IMC

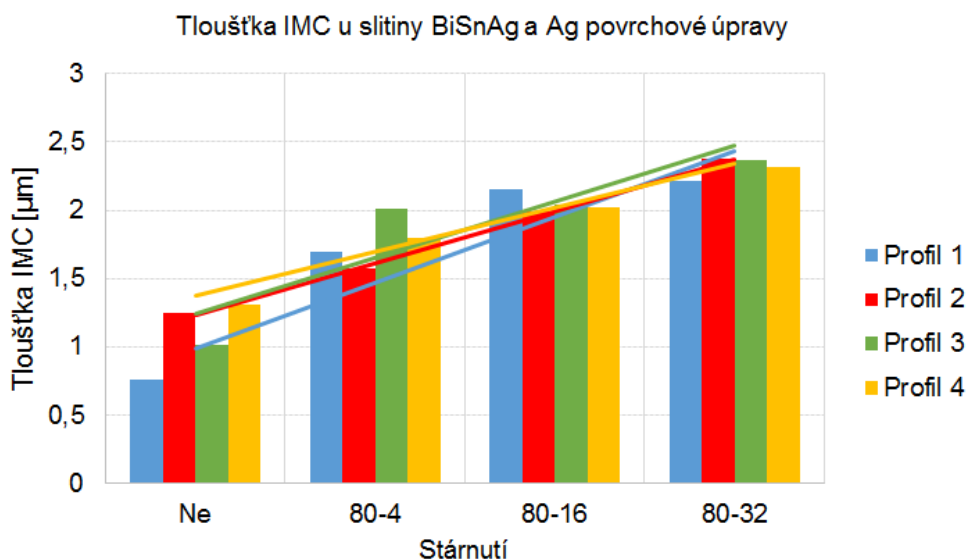
Již během pájení vznikne vrstva  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , která tvoří rozhraní mezi pájeným povrchem a pájecí slitinou. Odlišné je to u povrchové úpravy ENIG, kde dochází ke styku niklové vrstvy a pájecí slitiny. Na tomto rozhraní vzniká trojná IMC  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ . Tato vrstva byla u všech vzorků přítomna a bylo ji možné popsáním způsobem změřit. Během stárnutí a v některých případech již během pájení, vznikala druhá vrstva IMC, která byla tvořena  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Tato vrstva často nepřesahovala v obraze šířku čtyř pixelů, a proto nebyla samostatně vyhodnocována a byla vyhodnocena celková tloušťka vrstev IMC. Všechny vzorky byly podrobeny výše popsané analýze měření tloušťky IMC. Data byla

vyhodnocena s ohledem na vliv použité pájecí slitiny, pájecího profilu, stárnutí a povrchové úpravy DPS na tloušťku IMC vrstev.

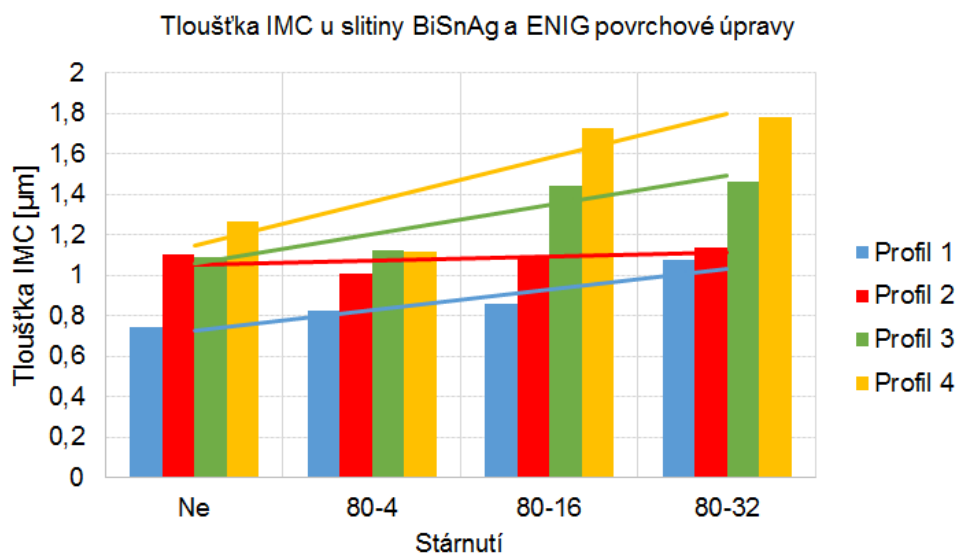
Tloušťka IMC vrstvy po zapájení a během stárnutí je vidět na následujících grafech. Každý graf obsahuje data pro jednu materiálovou kombinaci experimentu. Výška jednotlivých sloupců představuje tloušťku IMC a vynesené trendové spojnice usnadňují porovnání rychlosti růstu IMC během stárnutí. První polovina grafů obsahuje vývoj tloušťky IMC vrstvy během stárnutí při konstantní teplotě 80 °C a druhá při vyšší teplotě stárnutí 120 °C. Díky použitému teplotnímu profilu dochází k vzniku rozdílné tloušťky IMC vrstvy při vzniku spoje, ovšem k výraznější změně dochází během vystavení spoje zvýšené teplotě, kdy vrstva s časem narůstá. Průměrný nárůst IMC byl po 32 dnech zrychleného stárnutí při teplotě 80 °C na 1,66 násobek původní tloušťky IMC. Při zrychleném stárnutí při teplotě 120 °C byl tento nárůst větší a to průměrně na 2,34 násobek původní hodnoty.



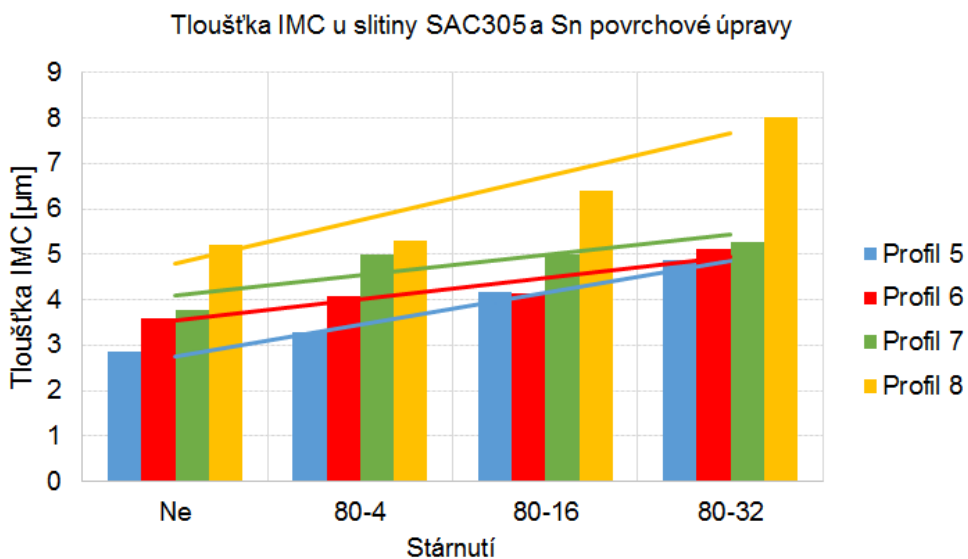
Obr. 25 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny BiSnAg a Sn povrchové úpravy



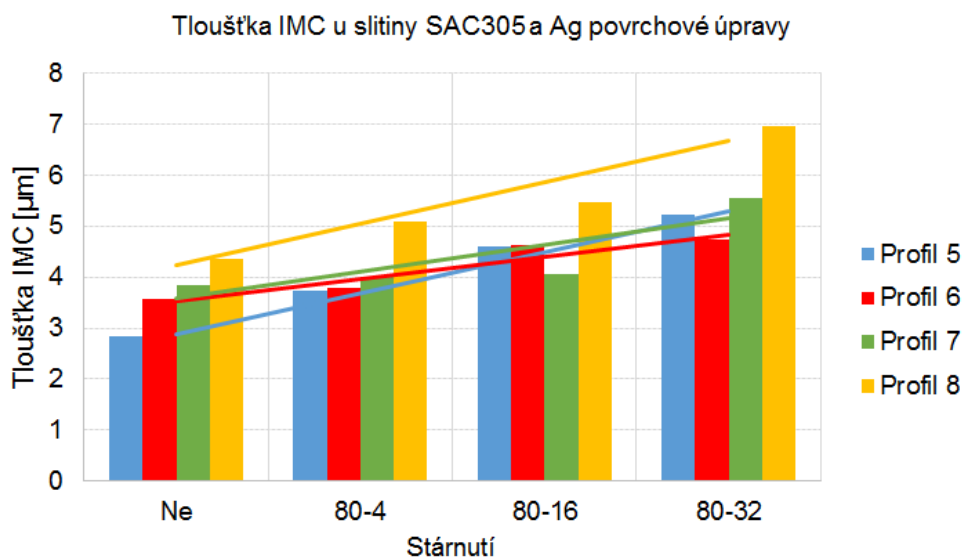
Obr. 26 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny BiSnAg a Ag povrchové úpravy



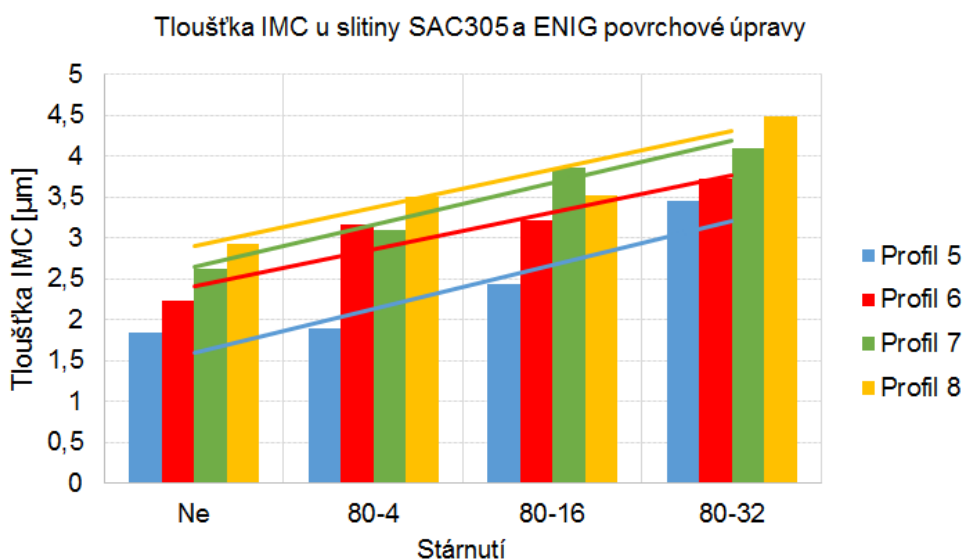
Obr. 27 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny BiSnAg a ENIG povrchové úpravy



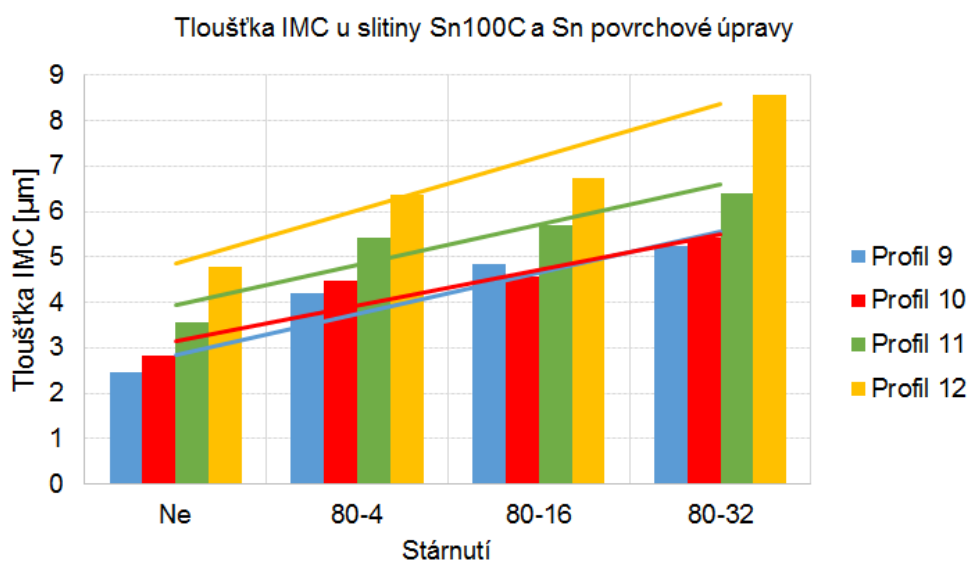
Obr. 28 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny SAC305 a Sn povrchové úpravy



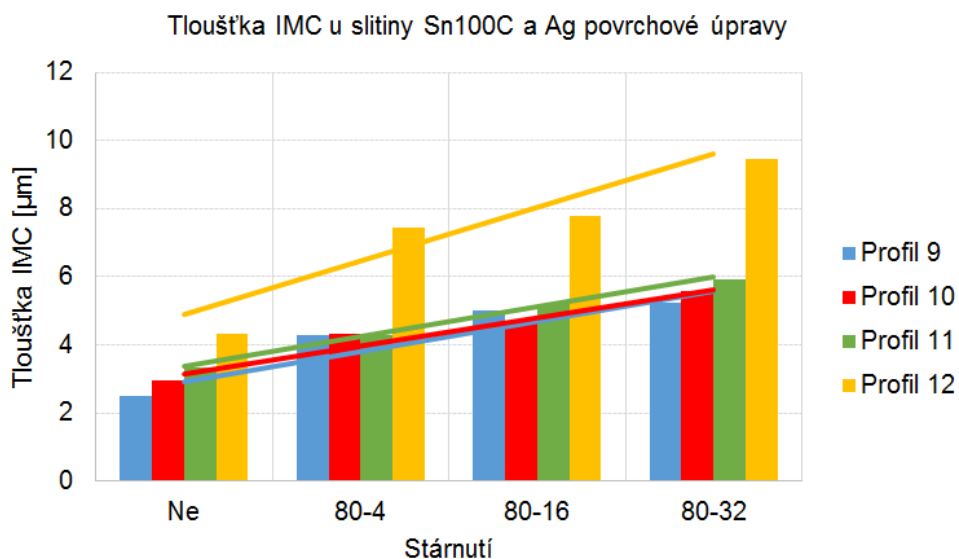
Obr. 29 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny SAC305 a Ag povrchové úpravy



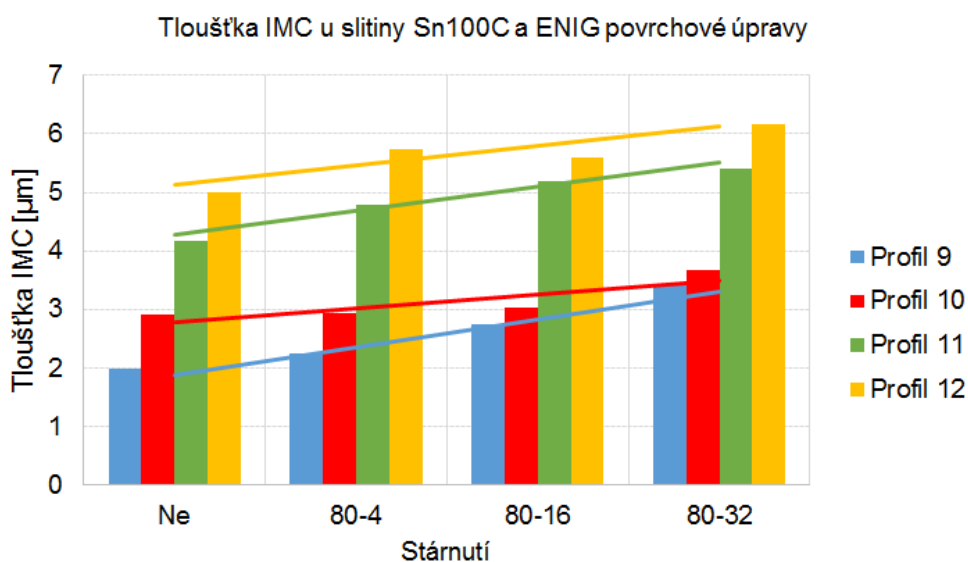
Obr. 30 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny SAC305 a ENIG povrchové úpravy



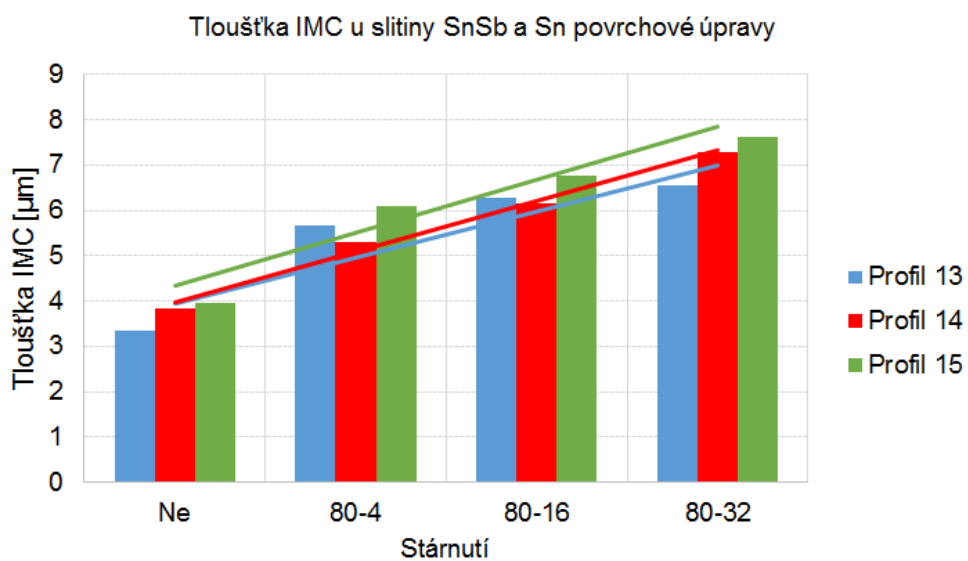
Obr. 31 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny Sn100C a Sn povrchové úpravy



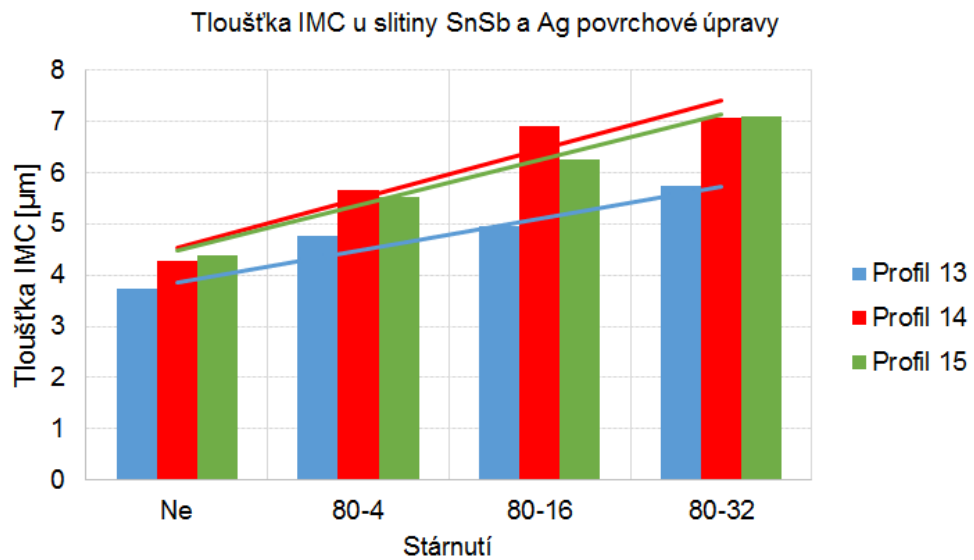
Obr. 32 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny Sn100C a Ag povrchové úpravy



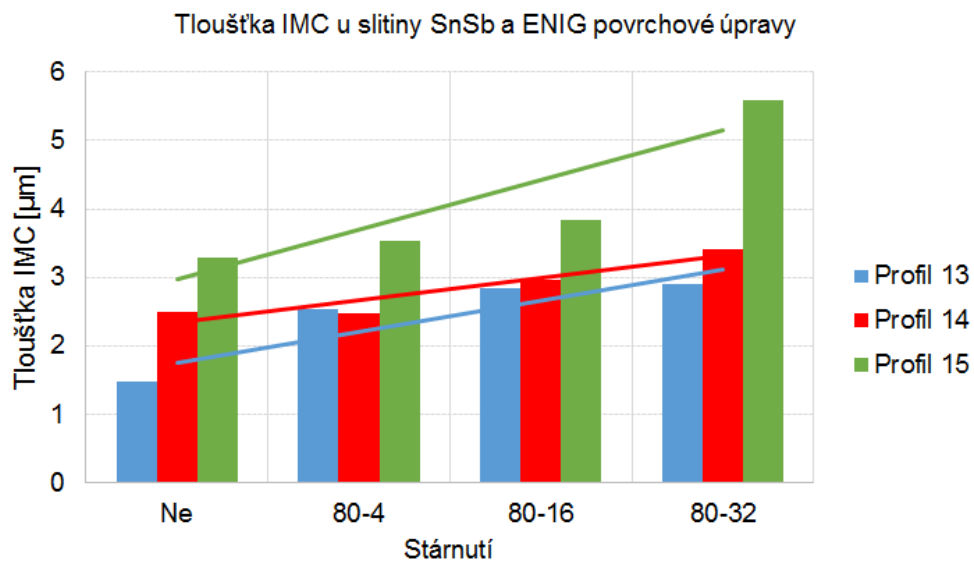
Obr. 33 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny Sn100C a ENIG povrchové úpravy



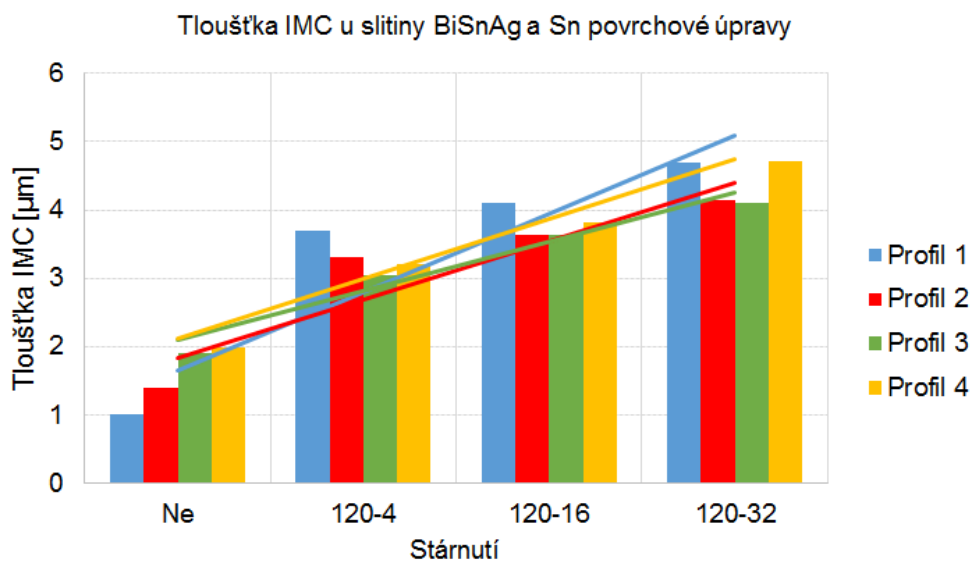
Obr. 34 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny SnSb a Sn povrchové úpravy



Obr. 35 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny SnSb a Ag povrchové úpravy

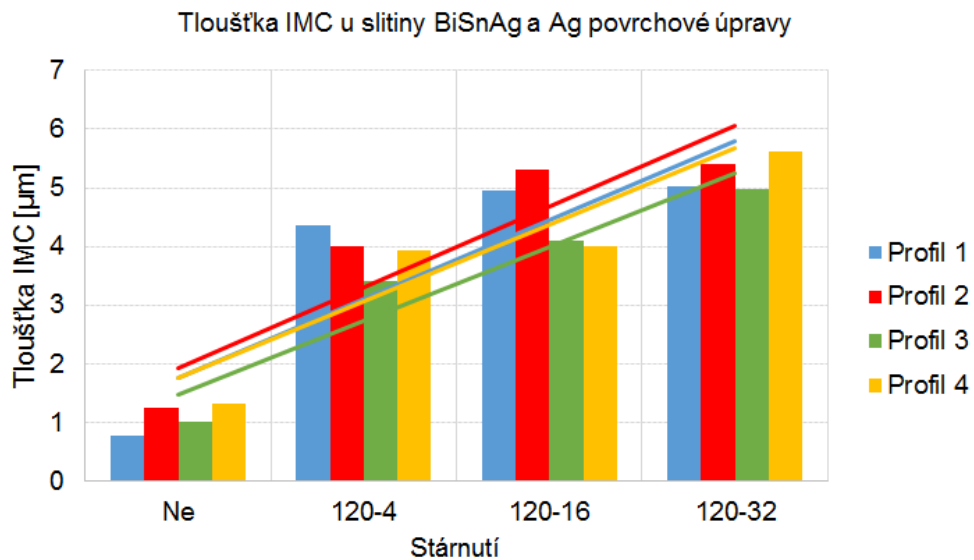


Obr. 36 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny SnSb a ENIG povrchové úpravy

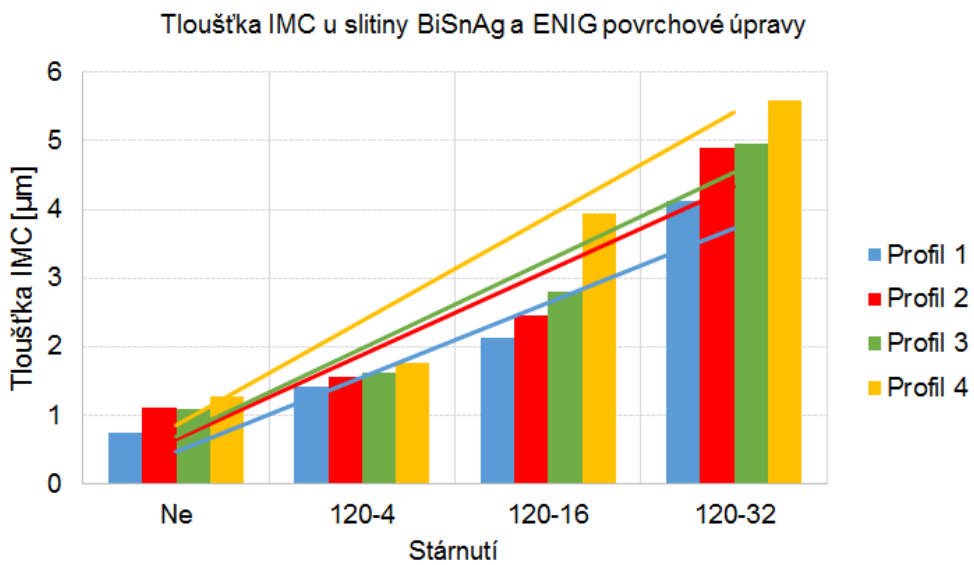


Obr. 37 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny BiSnAg a Sn povrchové úpravy

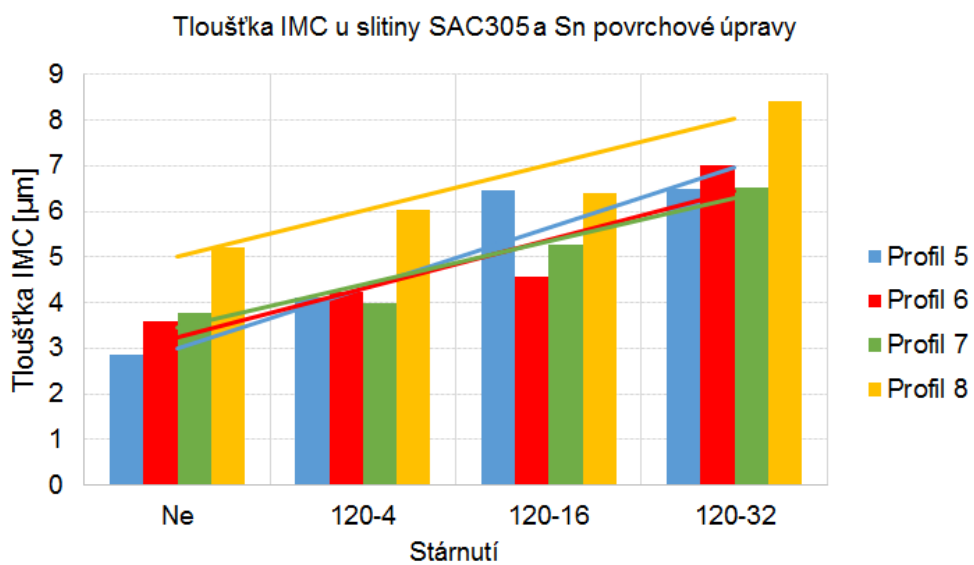




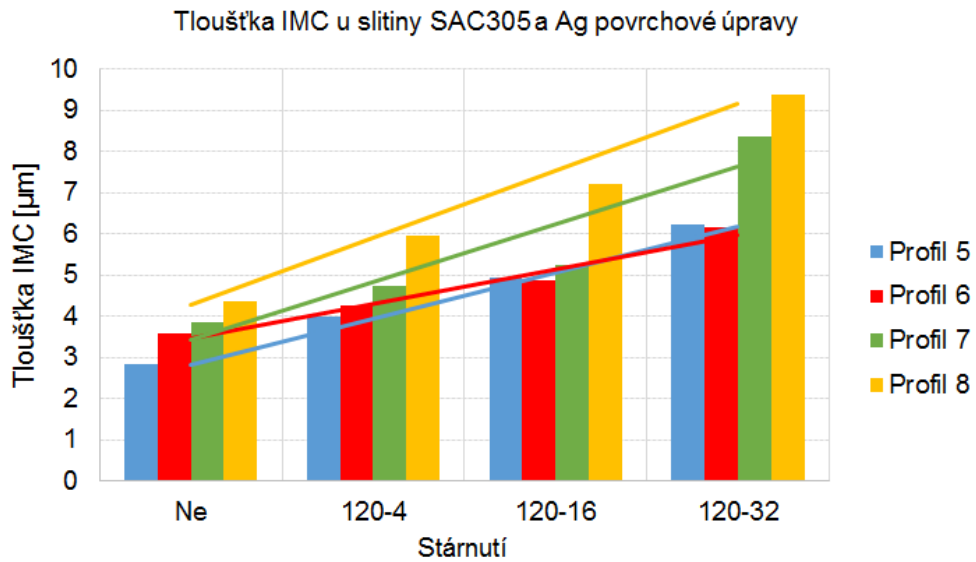
Obr. 38 *Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny BiSnAg a Ag povrchové úpravy*



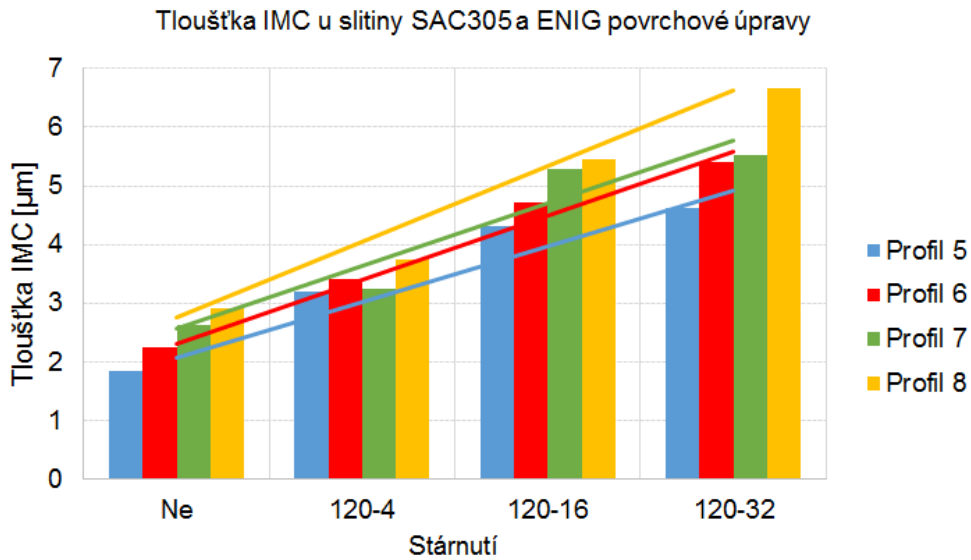
Obr. 39 *Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny BiSnAg a ENIG povrchové úpravy*



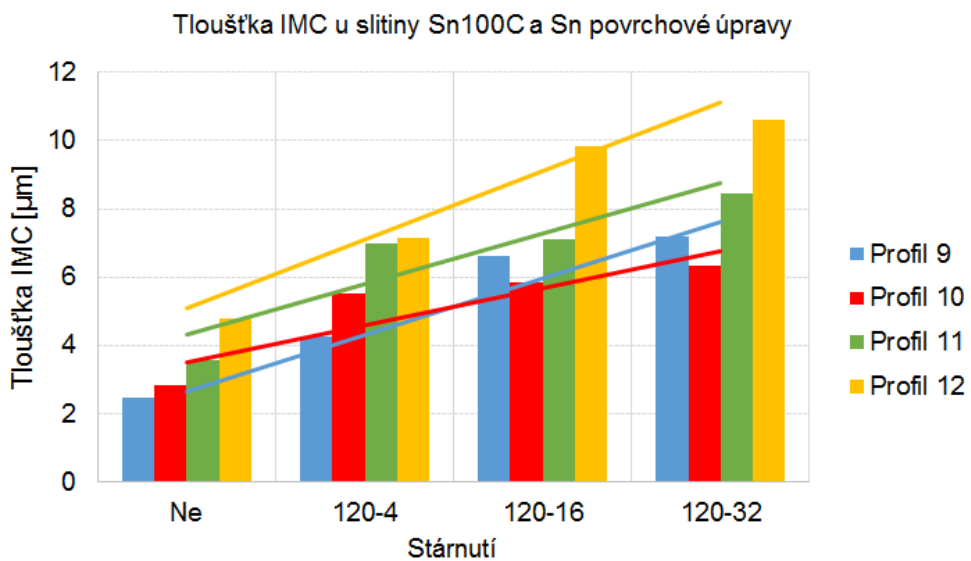
Obr. 40 *Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny SAC305 a Sn povrchové úpravy*



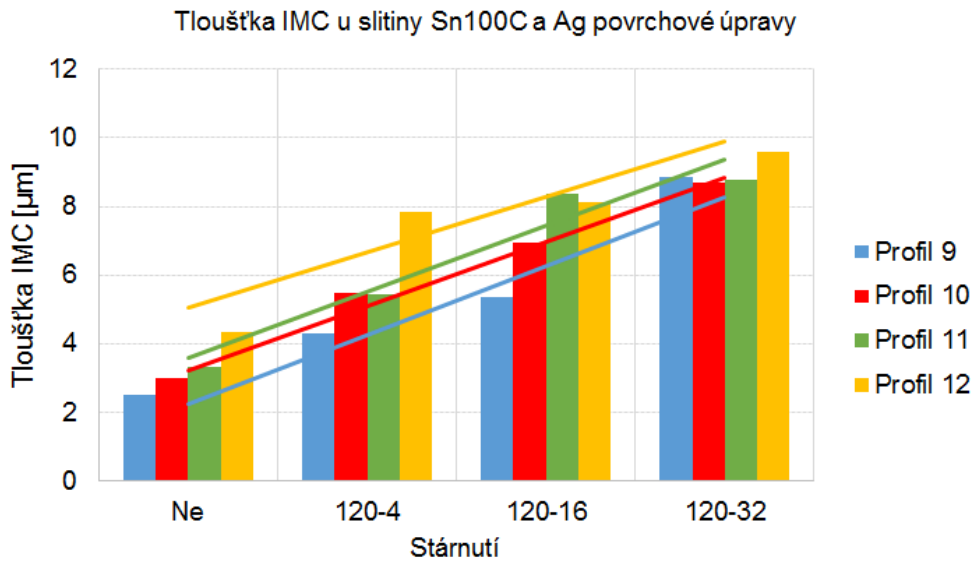
Obr. 41 *Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny SAC305 a Ag povrchové úpravy*



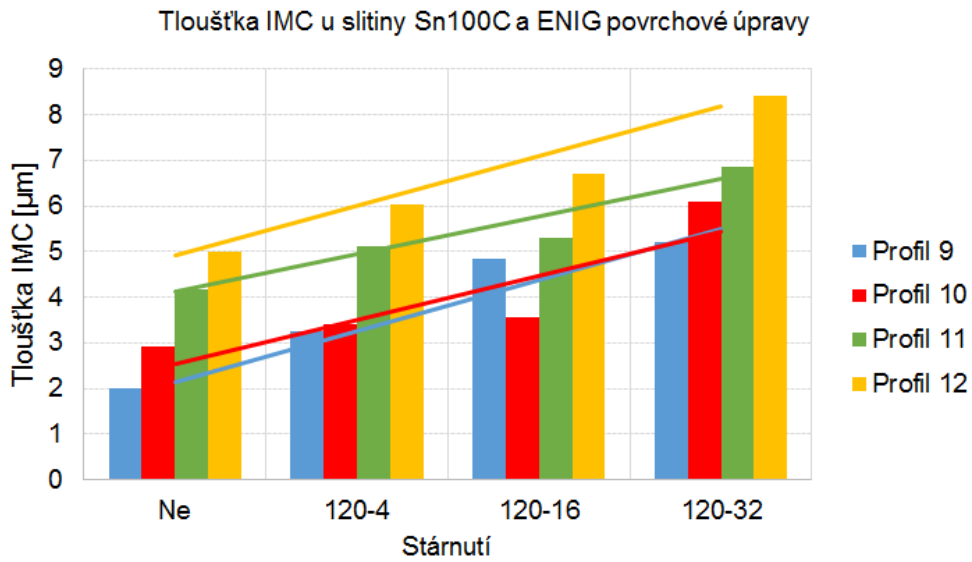
Obr. 42 *Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny SAC305 a ENIG povrchové úpravy*



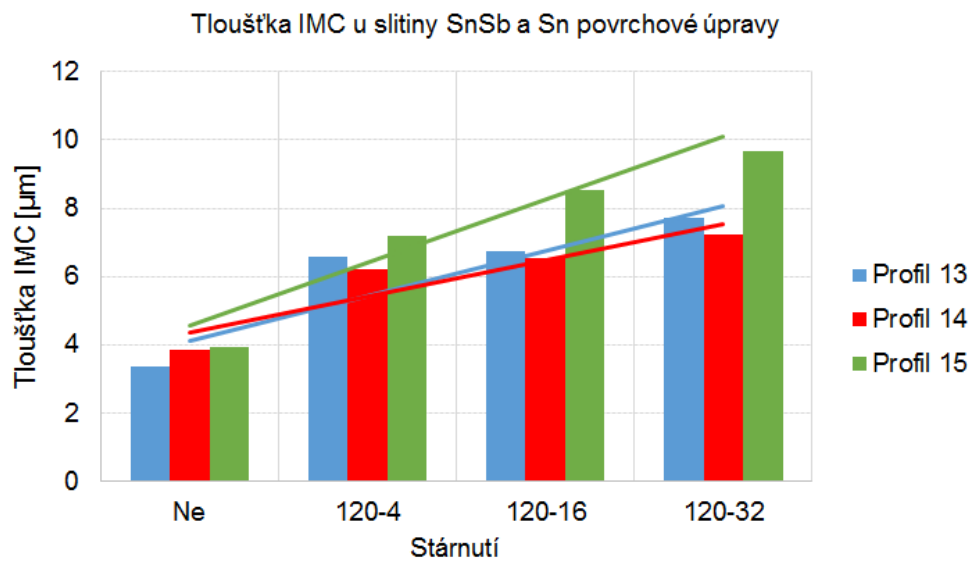
Obr. 43 *Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny Sn100C a Sn povrchové úpravy*



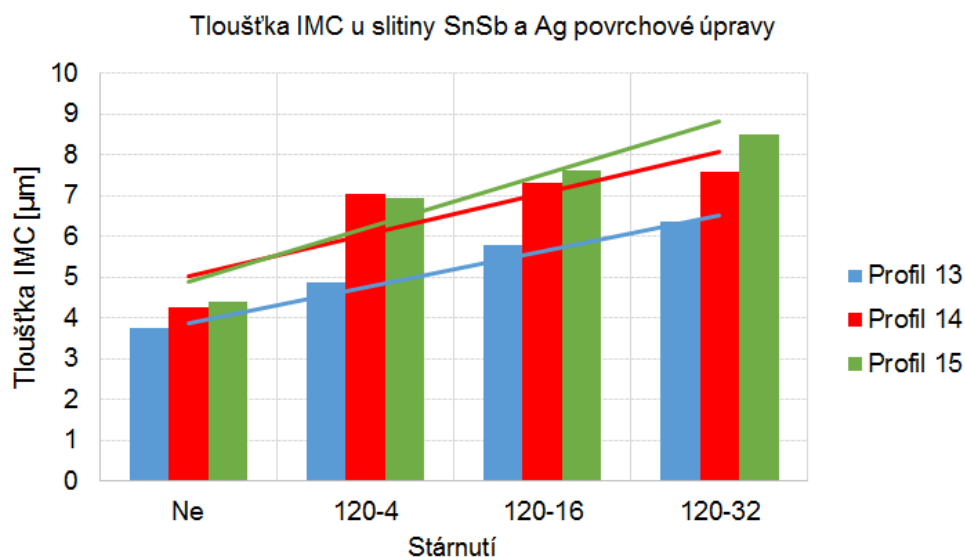
Obr. 44 *Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny Sn100C a Ag povrchové úpravy*



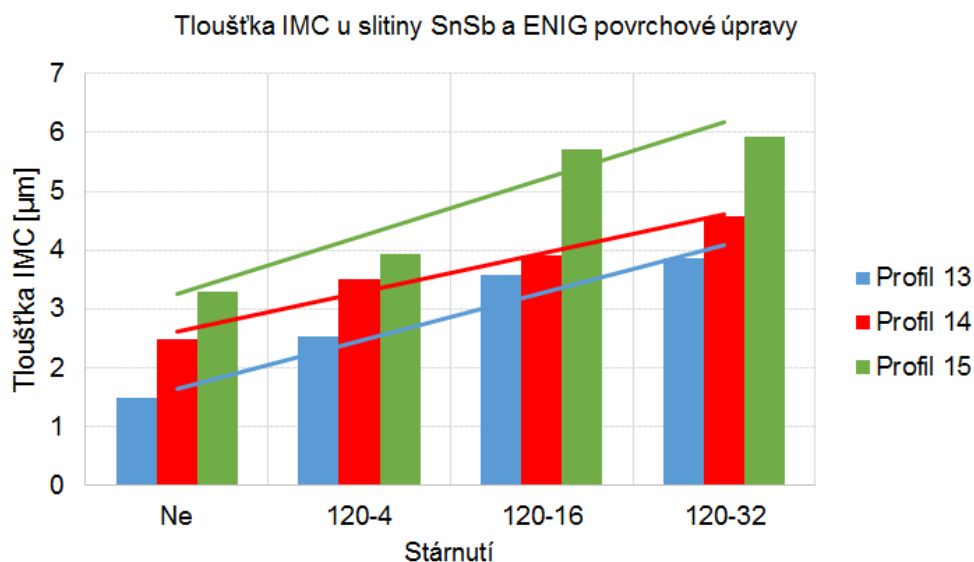
Obr. 45 *Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny Sn100C a ENIG povrchové úpravy*



Obr. 46 *Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny SnSb a Sn povrchové úpravy*



Obr. 47 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny SnSb a Ag povrchové úpravy

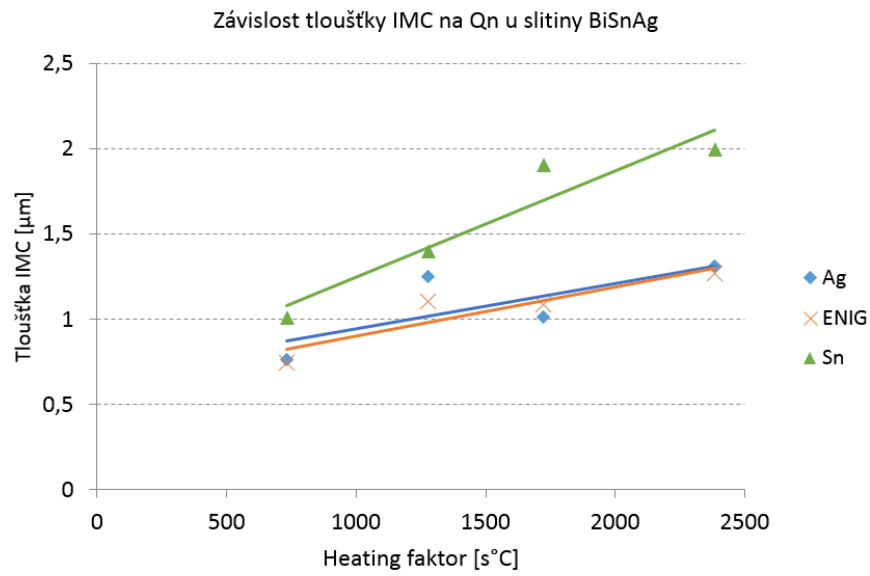


Obr. 48 Tloušťka a vývoj IMC vrstvy u slitiny SnSb a ENIG povrchové úpravy

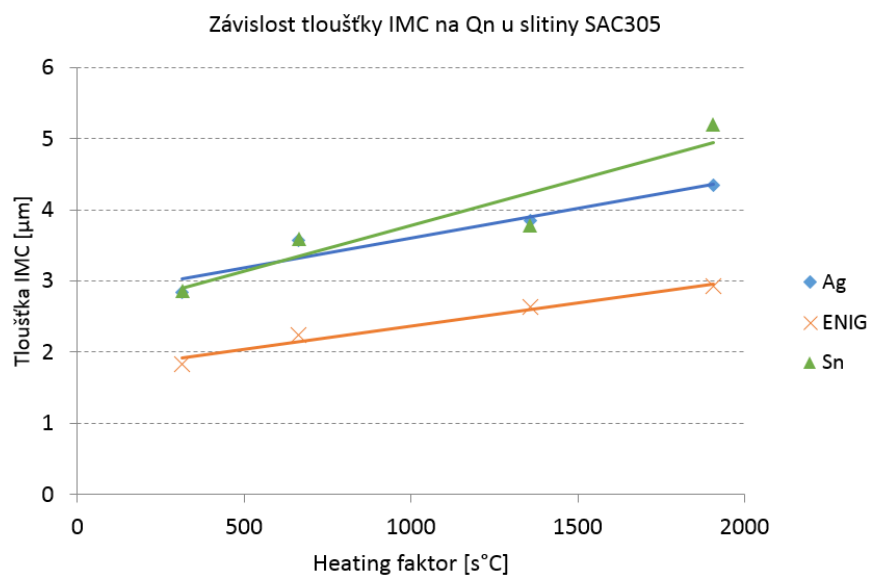
### 3.5. Tloušťka intermetalických vrstev a heating faktor

Pomocí heating faktoru je možné, jak již bylo popsáno výše, popsat teplotní profil nad teplotou tavení pájecí slitiny pomocí jedné číselné hodnoty. Proto je možné jednoduše graficky zobrazit závislost tloušťky vzniklé IMC vrstvy na heating faktoru. Snahou bylo získat hodnoty tloušťky IMC v rozsahu nastavení doporučených hodnot teplotního profilu pro jednotlivé slitiny od výrobců. Obecně lze říci, že doporučené hodnoty heating faktoru vycházejí v rozsahu 400 až 3000 s°C. Vzhledem k omezené možnosti opakování experimentu s jednou pájecí slitinou a povrchovou úpravou DPS, byl stanoven počet různých teplotních profilů na čtyři a u slitiny s největší teplotou tavení na tři. Zvolené profily přibližně rovnoměrně pokryly doporučený rozsah výrobců pájecích past. Popis využitých profilů a stanovení hodnot heating faktor je popsáno v kapitolách 3.2 a 3.3.

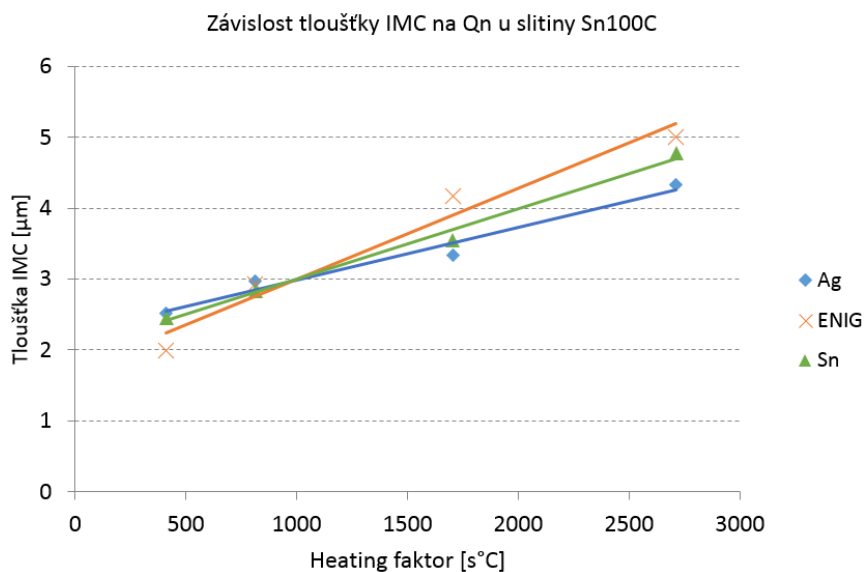
Naměřené závislosti jsou graficky znázorněny na Obr. 49 až Obr. 52. Získané hodnoty lze ve sledovaném rozsahu přibližně lineárně aproximovat.



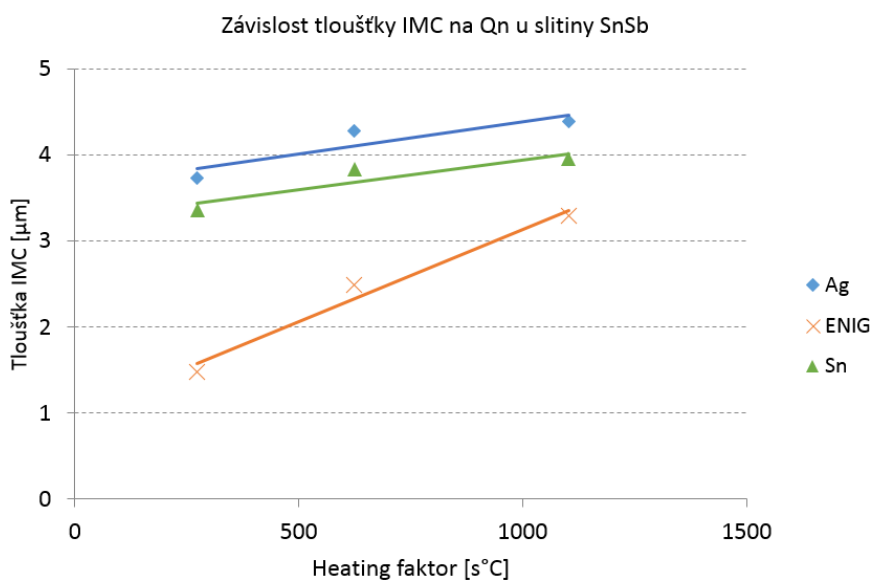
Obr. 49 Závislost tloušťky IMC na  $Q\eta$  u pájecí slitiny BiSnAg



Obr. 50 Závislost tloušťky IMC na  $Q\eta$  u pájecí slitiny SAC305



Obr. 51 Závislost tloušťky IMC na  $Q\eta$  u pájecí slitiny Sn100C



Obr. 52 Závislost tloušťky IMC na  $Q\eta$  u pájecí slitiny SnSb

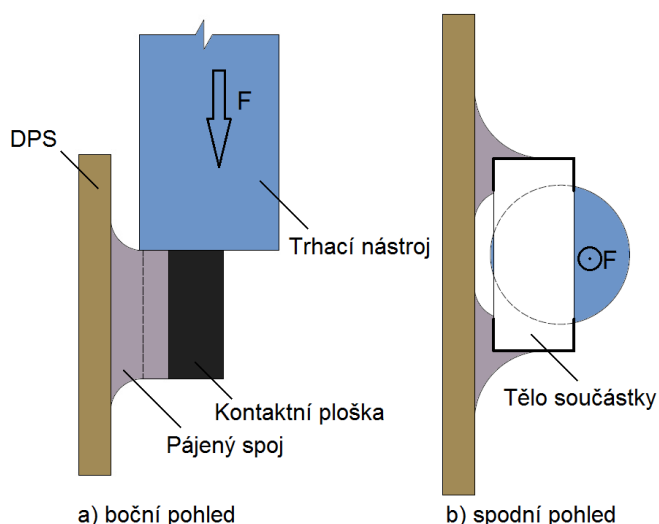
### 3.6. Stárnutí

Intermetalické sloučeniny se s časem mění. Především jde o jejich objem ve spoji. Díky tomu dochází k ovlivnění kvality spoje a v krajním případě až k poruše. Dochází k růstu IMC vrstvy, vzniku intermetalických dutin, vzniku a šíření trhlin. Pro sledování vývoje vlastností spojů během jejich života se využívá zrychleného stárnutí. Pro testy se používá zrychlené stárnutí při konstantní teplotě, teplotní cyklování nebo vystavování teplotním šokům. Rozdíl mezi cyklováním a šokem je pouze v gradientu nárůstu a poklesu teploty. Nejčastěji se v dostupné literatuře rozsah teplot pohybuje v rozmezí -40 až +125 °C a počty cyklů jsou v řádu tisíců. Pro stárnutí při konstantní teplotě se využívá teplota až 150 °C a doba působení od dnů do měsíců. Vzorke pro tento experiment byly vystaveny stárnutí při konstantní teplotě při nižších teplotách, konkrétně při 80 nebo

120 °C. Vyšší teploty nebyly vhodné díky nízké teplotě tavení pájecí slitiny BiSnAg. Vzorčky byly vystaveny uvedeným teplotám 4, 16 a 32 dnů. Cílem bylo sledovat rychlost nárůstu intermetalických vrstev u různých materiálových kombinací a při odlišné teplotě stárnutí.

### 3.7. Měření mechanické pevnosti pájeného spoje

V druhé části experimentu bylo na vzorcích provedeno měření mechanické pevnosti. Cílem bylo zjistit, zda má zvolený pájecí profil vliv na mechanickou pevnost a to i v kombinaci se zrychleným stárnutím. Sledován byl i vliv všech využitých materiálů pájecích slitin a povrchových úprav DPS. Bylo provedeno měření na 16 rezistorech od každého vzorku (zapájené desky). Testována byla pevnost ve smyku pájeného spoje, viz zobrazený princip na Obr. 53. Trnem je působeno silou na součástku až do okamžiku porušení spoje a utržení součástky, které je spojené s poklesem měřené a vyhodnocované síly. Nebyla měřena přímá pevnost ve smyku, jelikož by bylo nutné znát plochu, na kterou působila síla, a ta je u spoje rozdílná dle místa vzniku poruchy. Vyhodnocována je proto maximální zaznamenaná síla během testu. Pro zaznamenání síly působící na součástku bylo využito trhacího zařízení LabTest 3.030. Parametry testu byly následující: rychlost posunu trnu 10 mm/min, návrat trnu 200 mm/min, kritérium ukončení testu při poklesu na 70 % maximální síly ( $F_{max}$ ), trn působil na boční stranu součástky a ta byla v rovnoběžné rovině se spodní stranou trnu.



Obr. 53 Princip měření pevnosti pájeného spoje ve smyku

Výsledná hodnota maximální síly pro odtrhnutí součástky ve smyku je vypočtena Hornovou metodou analýzy malých výběrů. Tato metoda je vhodná pro statistickou analýzu výběrů se 4 až 20 měřenými hodnotami. Umožňuje odhad polohy a rozptýlení

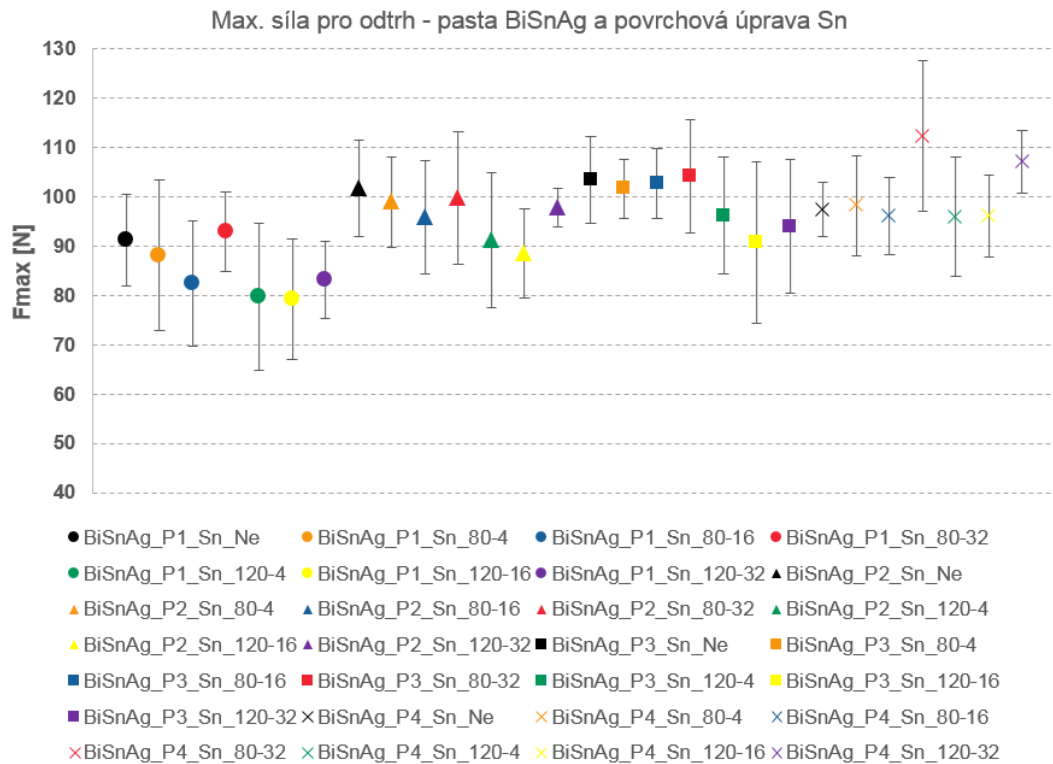
parametrů u malých výběrů. Metoda je detailně popsána v [60]. Hornův postup je založený na pořádkových statistikách  $x(i)$ , kdy se vychází z hloubek pivotů  $H$ . Ty odpovídají přibližně výběrovým kvartilům. Hloubka pivotu pro sudé je rovna  $H = \frac{\text{int}(\frac{n+1}{2}+1)}{2}$ . Dolní pivot  $X_{\text{dol}} = X_{(H)}$  a horní pivot  $X_{\text{hor}} = X_{(n+1-H)}$ . Odhadem parametru polohy je pivotová polosuma  $P_L = \frac{X_{\text{dol}}+X_{\text{hor}}}{2}$  a odhadem parametru variability je pivotové rozpětí  $R_L = X_{\text{dol}} - X_{\text{hor}}$ . Náhodná veličina použitelná k testování  $T_L = \frac{P_L}{R_L} = \frac{X_{\text{dol}}+X_{\text{hor}}}{2(X_{\text{hor}}-X_{\text{dol}})}$  má přibližně symetrické rozdělení, jehož vybrané kvantily jsou uvedeny v tabulce v příloze č. 2. Dle vztahu rovnice (6) se vypočte 95 % interval spolehlivosti střední hodnoty [61]:

$$P_L - R_L t_{L;0,95}(n) \leq \mu \leq P_L + R_L t_{L;0,95}(n) \quad (6)$$

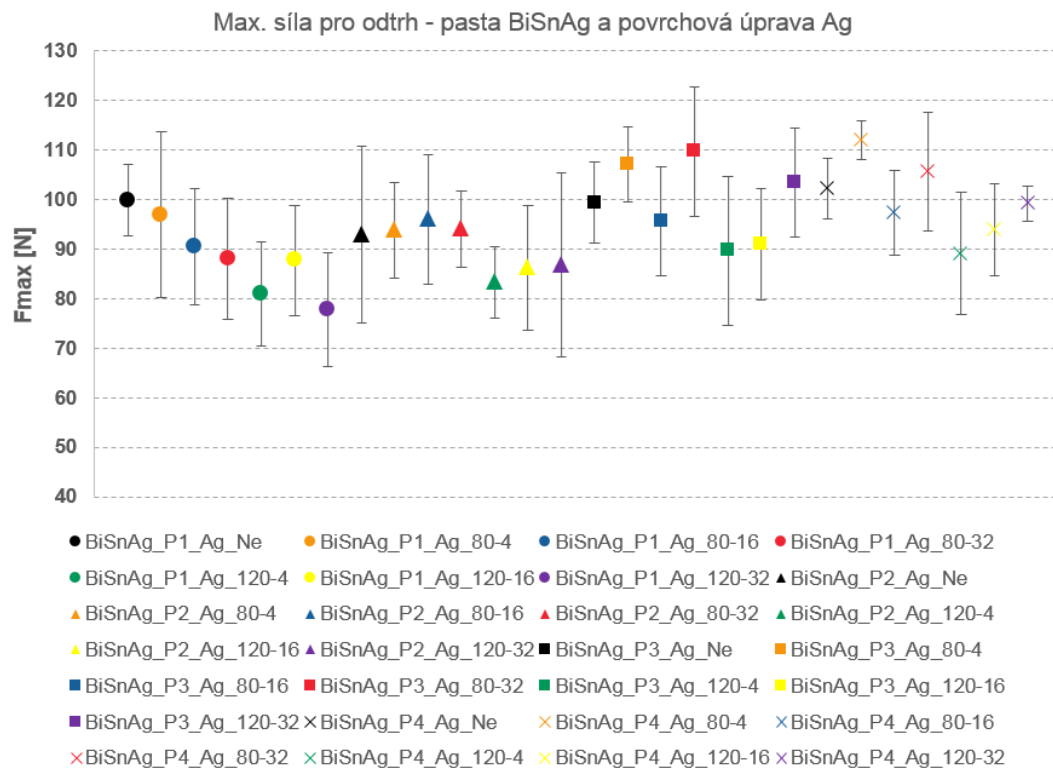
Výsledné hodnoty jsou graficky znázorněny na Obr. 54 až Obr. 65. Vzorky jsou v grafech označeny pomocí složeného označení. První část představuje pájecí slitinu, druhá pájecí profil s číslem (P1 až P15), třetí povrchovou úpravu DPS (Sn je imerzní cín, Ag je imerzní stříbro, Au je ENIG) a poslední část je označení stárnutí (před pomlčkou je teplota a za pomlčkou je počet dnů při této teplotě).

Slitina BiSnAg dosahuje největších hodnot maximální síly ze všech posuzovaných pájecích past. Ke snižování síly docházelo u vzorků vystavených zrychlenému stárnutí u všech povrchových úprav. U imerzního Sn a Ag není viditelný jednoznačný trend poklesu, ale u povrchové úpravy ENIG je trend zcela patrný na všech použitých pájecích profilech. Stárnutí při vyšší teplotě (120 °C) působilo větší snížení hodnoty maximální síly nutné k odtržení součástky. Průměrně měla materiálová kombinace ENIG a BiSnAg o 10 N nižší hodnotu síly k odtržení než BiSnAg na ostatních povrchových úpravách. U všech povrchových úprav je viditelný mírný nárůst  $F_{\text{max}}$  se změnou teplotního profilu směrem k vyšší hodnotě heating faktoru. Největší síly bylo dosaženo u vzorků přetavených pomocí profilu č. 4.

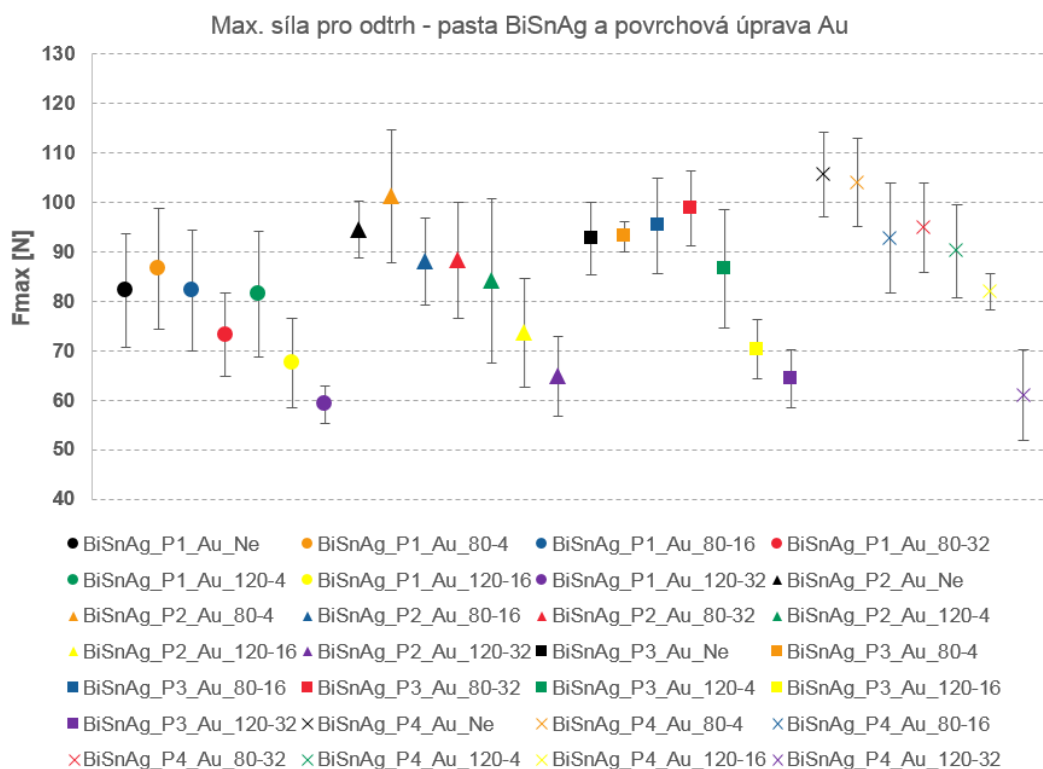




Obr. 54 Maximální síly při odtrhu u pájecí slitiny BiSnAg na povrchové úpravě Sn

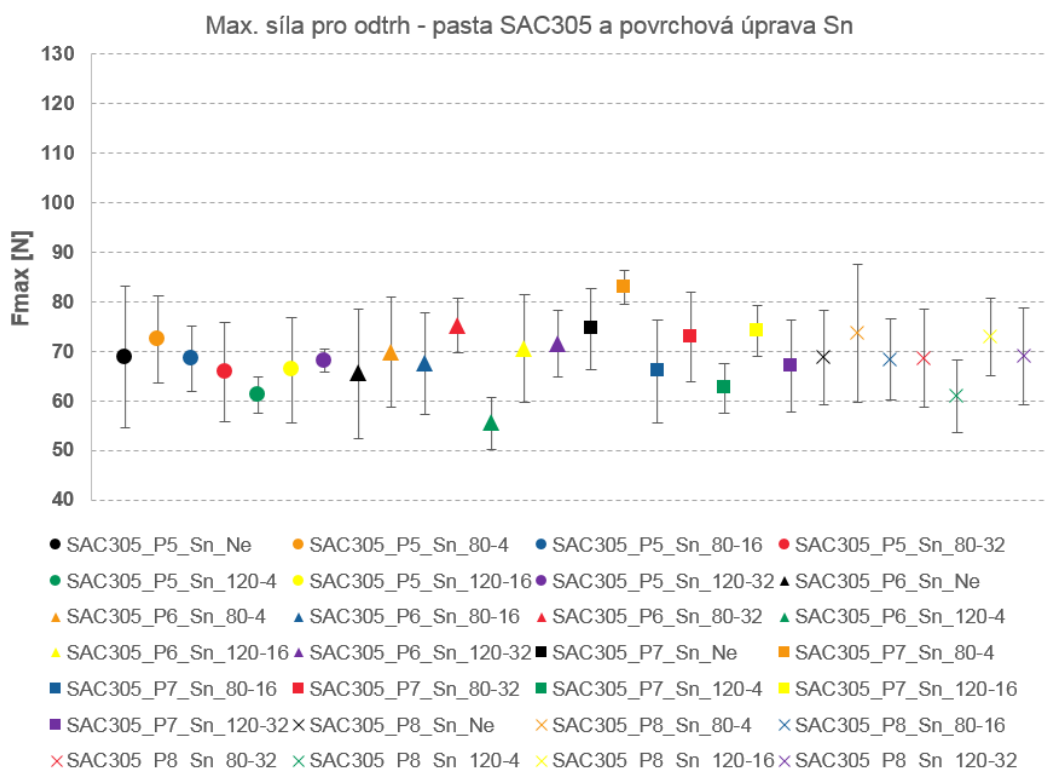


Obr. 55 Maximální síly při odtrhu u pájecí slitiny SnBiAg na povrchové úpravě Ag

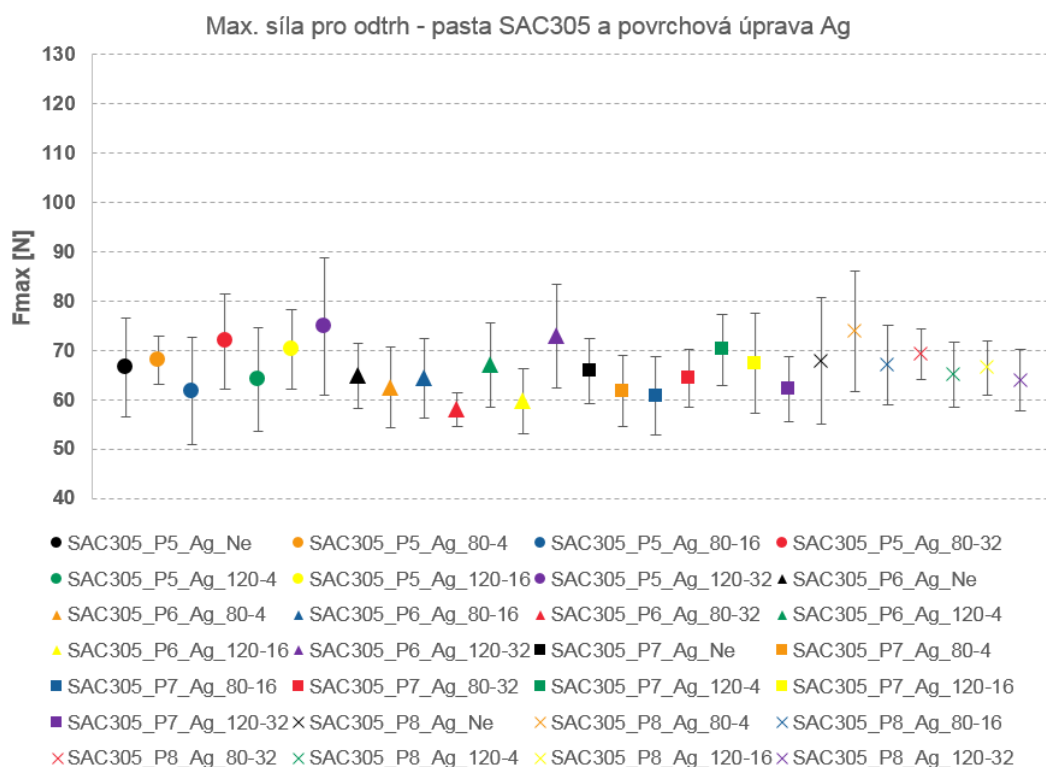


Obr. 56 Maximální síly při odtrhu u pájecí slitiny SnBiAg na povrchové úpravě ENIG

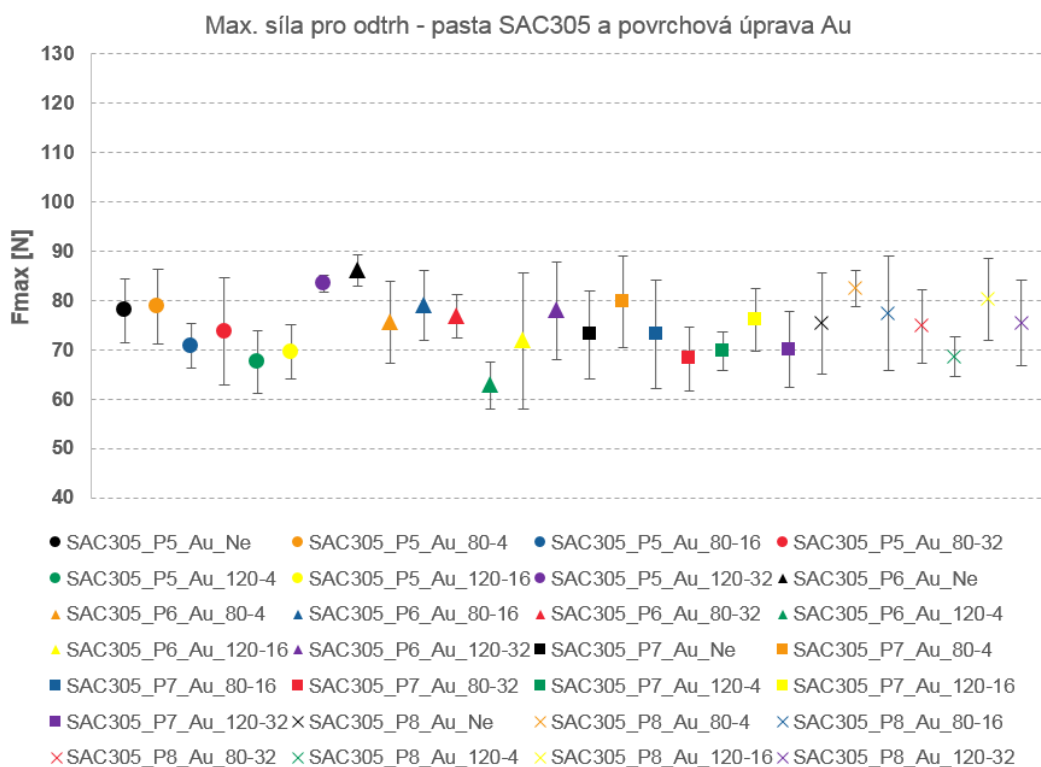
Maximální síla pro odtrh součástky je při pájení slitinou SAC305 nižší v porovnání s předchozí slitinou BiSnAg. Největší průměrná hodnota ze všech měření byla dosažena na povrchové úpravě ENIG a to 74,8 N. U povrchových úprav imerzní cín (68,9 N) a stříbro (66,2 N) je průměrná hodnota nižší. Vliv doby a teploty při stárnutí nelze z naměřených hodnot pozorovat. Na sílu nemá viditelný vliv ani volba pájecího profilu, vzorky pájené odlišnými profily dosahují stejných hodnot Fmax.



Obr. 57 Maximální síly při odtrhu u pájecí slitiny SAC305 na povrchové úpravě Sn

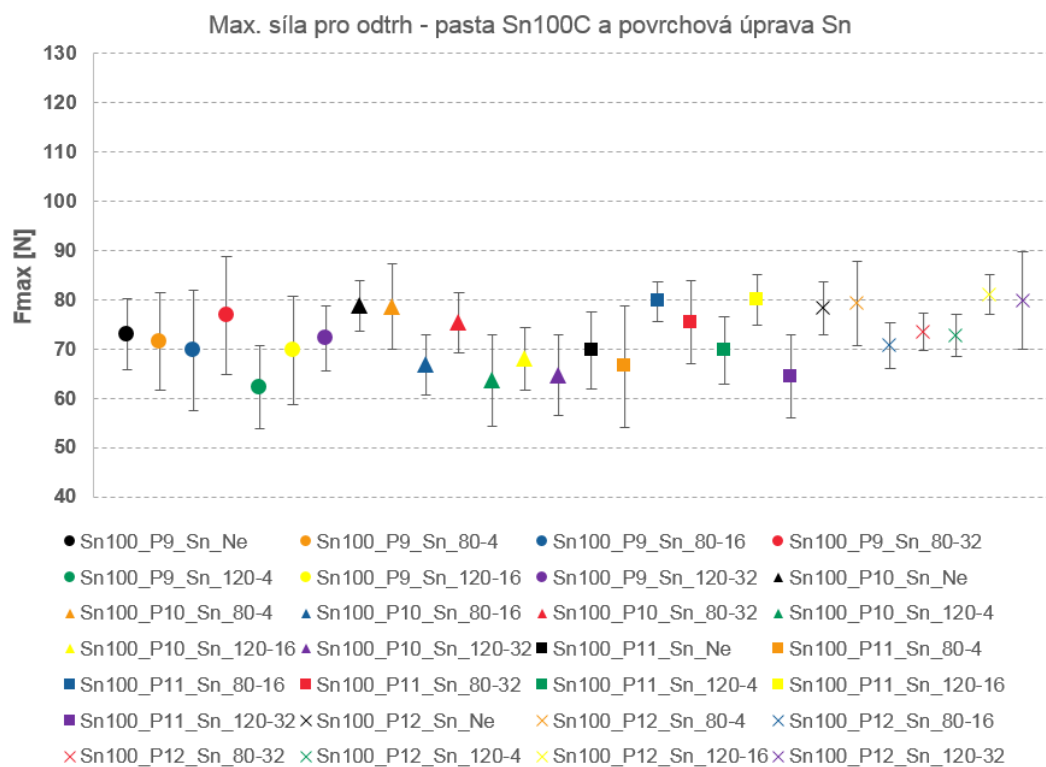


Obr. 58 Maximální síly při odtrhu u pájecí slitiny SAC305 na povrchové úpravě Ag

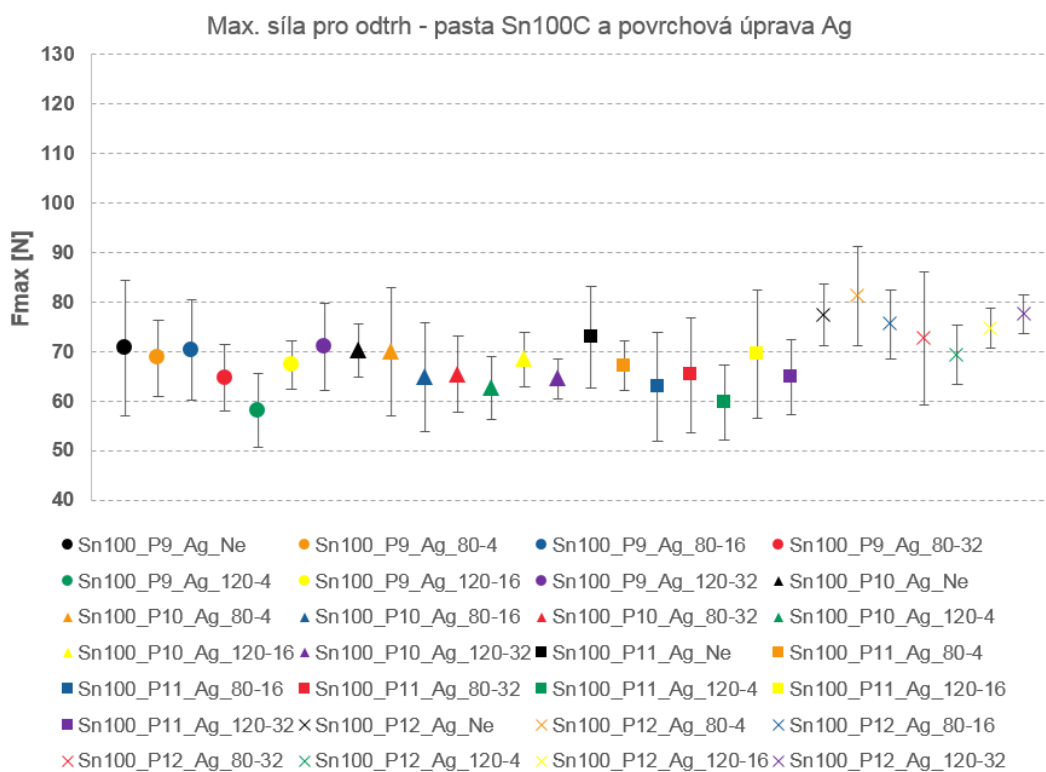


Obr. 59 Maximální síly při odtrhu u pájecí slitiny SAC305 na povrchové úpravě ENIG

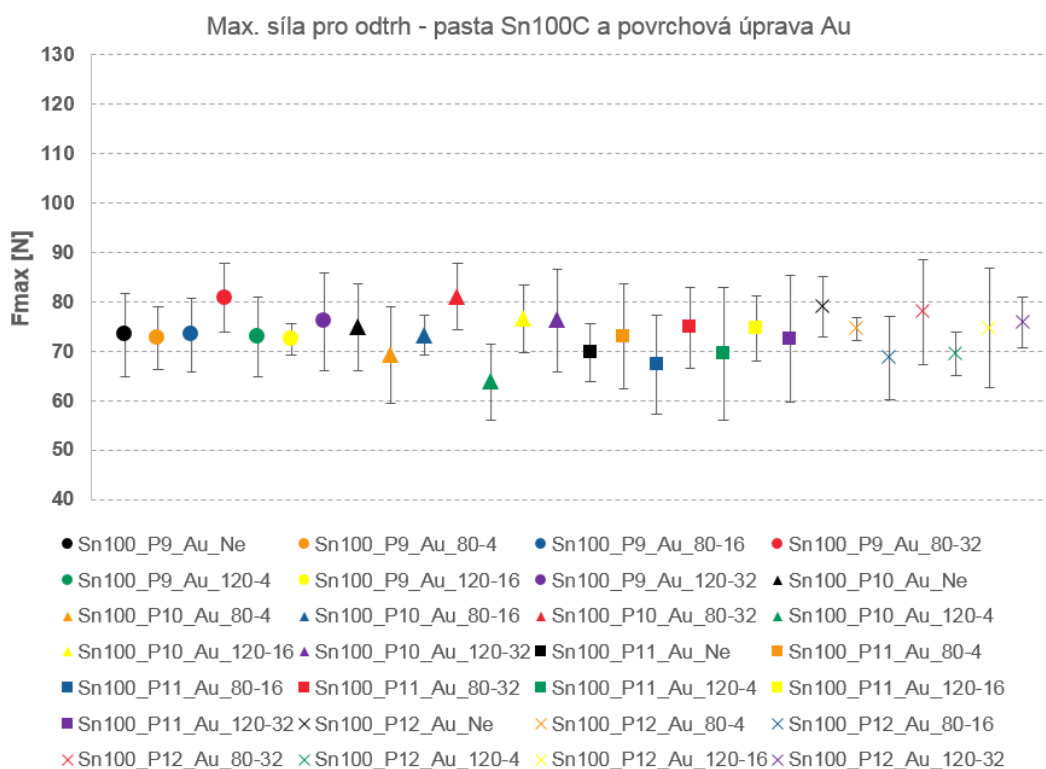
Spoje pájené pomocí slitiny Sn100C dosahují srovnatelných hodnot  $F_{max}$  se slitinou SAC305. Na povrchových úpravách imerzní Sn a ENIG je dosaženo průměrného výsledku 73 N a mírně nižší je hodnota pro povrchovou úpravu imerzní Ag (68,9 N). Stárnutí spojů při konstantní teplotě nezpůsobuje výrazný pokles  $F_{max}$  od hodnot nestárnutých vzorků. Volba pájecího profilu hodnotu maximální odtrhové síly neovlivnila, pouze u povrchové úpravy imerzní Ag došlo k mírnému růstu hodnoty  $F_{max}$  u nestárnutých vzorků s teplotním profilem.



Obr. 60 Maximální síly při odtrhu u pájecí slitiny Sn100C na povrchové úpravě Sn

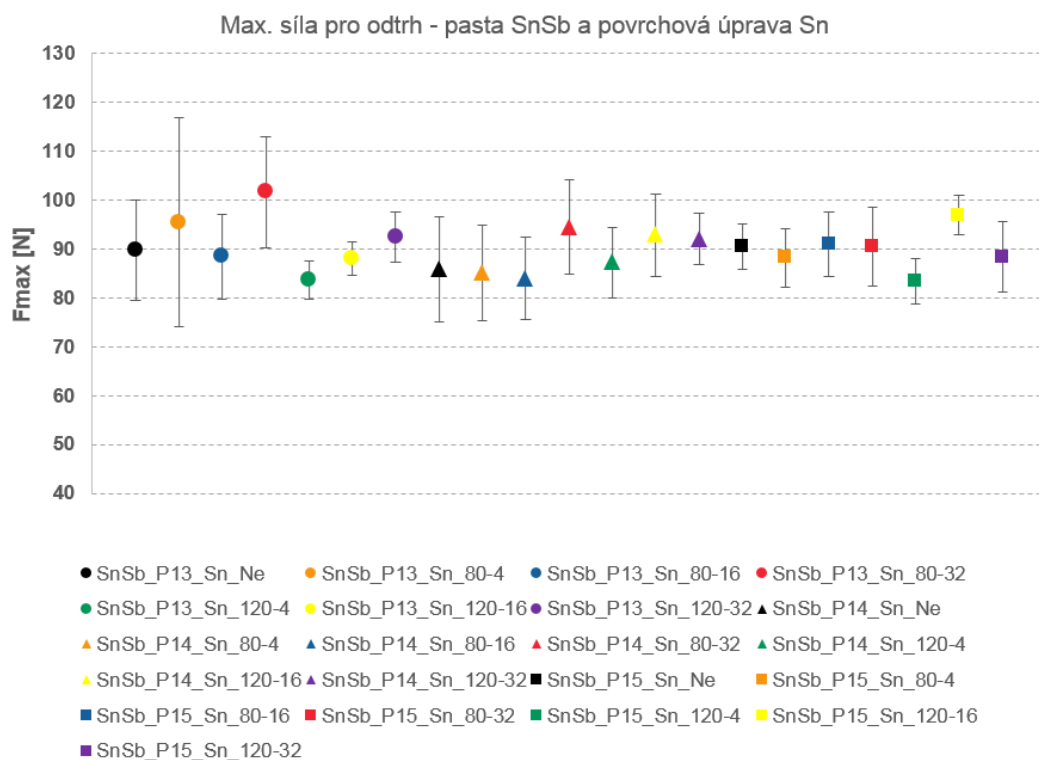


Obr. 61 Maximální síly při odtrhu u pájecí slitiny Sn100C na povrchové úpravě Ag

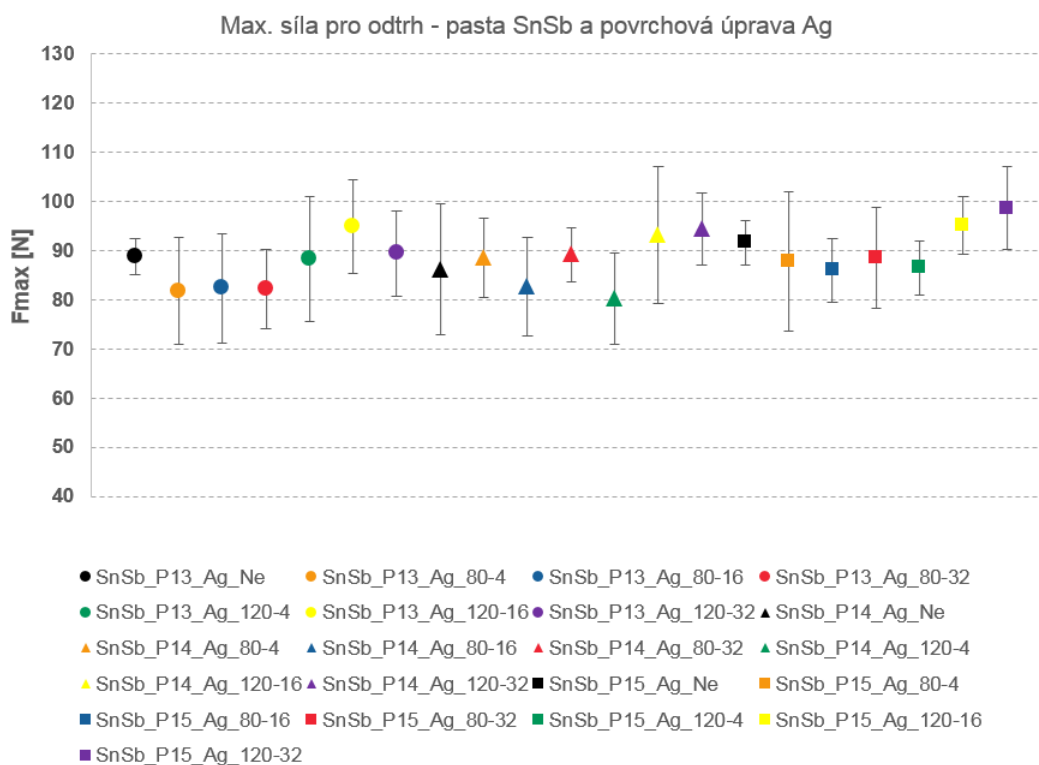


Obr. 62 Maximální síly při odtrhu u pájecí slitiny Sn100C na povrchové úpravě ENIG

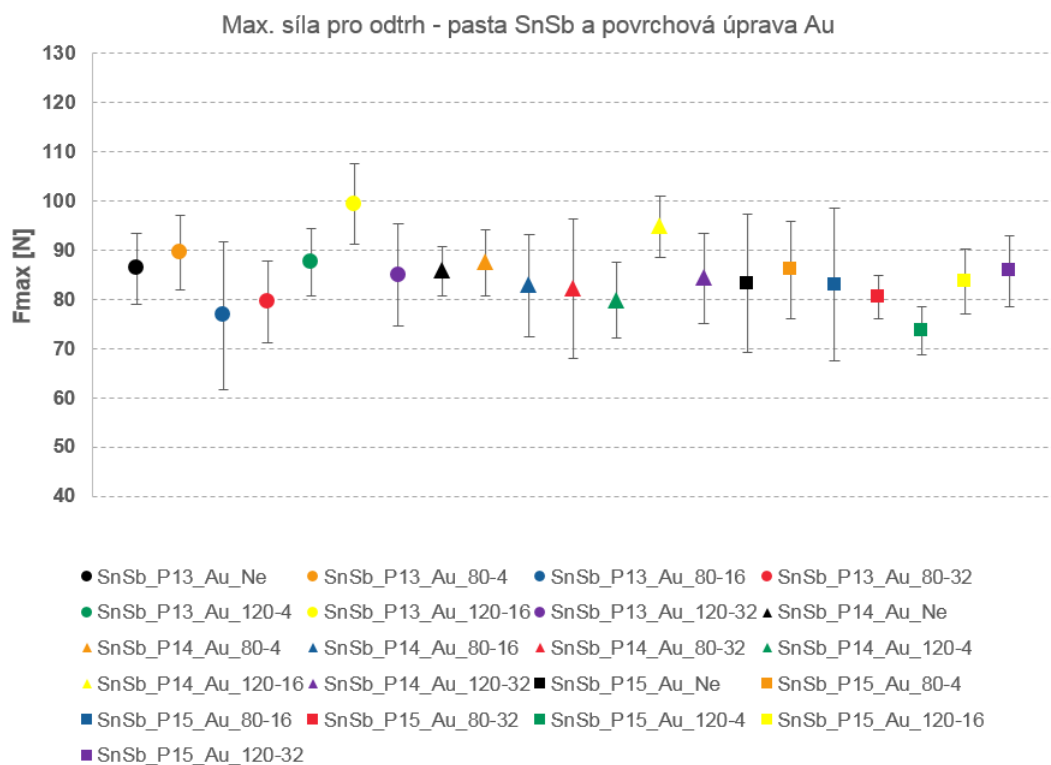
Průměrná mechanická pevnost spojů vytvořených pomocí pájecí slitiny SnSb a vyjádřena pomocí maximální síly nutné k odtržení součástky byla vyšší než u spojů ze slitin SAC305 a Sn100C přibližně o 17 N. Od slitiny BiSnAg byla průměrná hodnota nižší pouze o 4 N. Spoje pájené s odlišným procesním nastavením teplotního profilu ( $Q_n$  od hodnoty 273 až 1102 s°C) nejeví změnu mechanické pevnosti. Vliv zrychleného stárnutí se u vzorků neprojevuje poklesem  $F_{max}$  a spoje jsou pevnostně stabilní.



Obr. 63 Maximální síly při odtrhu u pájecí slitiny SnSb na povrchové úpravě Sn



Obr. 64 Maximální síly při odtrhu u pájecí slitiny SnSb na povrchové úpravě Ag



Obr. 65 Maximální síly při odtrhu u pájecí slitiny SnSb na povrchové úpravě ENIG

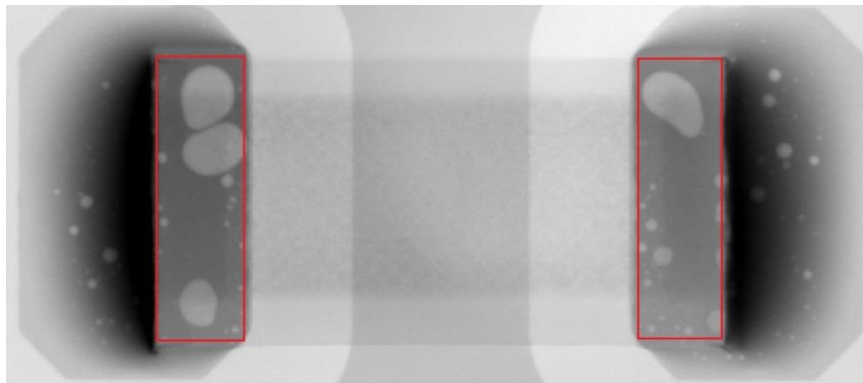
Největší mechanické pevnosti dosahují spoje vytvořené slitinou BiSnAg. U této slitiny lze nevíce ovlivnit mechanickou pevnost pomocí volby parametrů teplotního profilu. Spoje z SAC305 a Sn100C dosahují srovnatelných hodnot maximální odtrhové síly. Slitina SnSb je v mechanické pevnosti spoje lepší volbou než nejběžněji využívané slitiny s vysokým obsahem cínu. Jedinou materiálovou kombinací zahrnutou do experimentu nelze doporučit a to s ohledem na výrazný pokles mechanické pevnosti vzorků vystavených zrychlenému stárnutí, jde o kombinaci slitiny BiSnAg a povrchové úpravy desky ENIG.

### 3.8. Dutiny v pájeném spoji

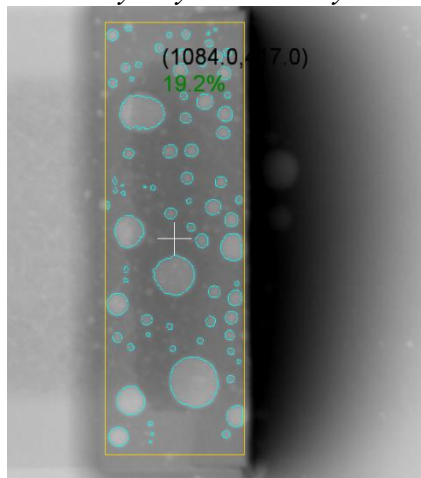
Součástí vnitřní struktury pájeného spoje jsou i dutiny, které při pájení vznikají. Tyto dutiny narušují mechanickou pevnost spojů, proto je vhodné sledovat množství vznikajících dutin i v rámci tohoto experimentu. Tato část je na problematiku množství vzniklých dutin zaměřena. Dutiny uvnitř spoje negativně ovlivňují jeho spolehlivost. Jde o snižování plochy průřezu spoje, což ovlivňuje mechanické i elektrické vlastnosti. S vyšší integrací je tento problém důležitý i pro odvod ztrátového tepla od součástek, jelikož větší množství dutin vede na horší tepelnou vodivost směrem k substrátu. Cílem bylo zjistit, jakým způsobem ovlivňuje volba materiálů a procesního nastavení přetavení vznik dutin v pájených spojih. Po zapájení vzorků byla provedena analýza pomocí



rentgeny, která umožňuje nedestruktivně odhalit dutiny uvnitř spojů. Rentgenové analýze bylo podrobena 16 spojů od každé série vzorků. Jako vyhodnocovací nástroj posloužil obslužný software k rentgeny Nordson Dage Ruby FP, který byl pro sledování využit. Pomocí softwaru byla v každém snímku spoje vyhledána stejná vyhodnocovací oblast a na ní byla stanovena plocha dutin obsažená ve spoji. Tato hodnota byla vyčíslena pomocí procentuálního zastoupení dutin. Jako vyhodnocovací plocha byla zvolena plocha, která je zapájena pod tělem součástky, jelikož zde je tloušťka spoje konstantní. Vyhodnocovací oblast je zvýrazněna na Obr. 66 a vyhodnocený spoj s graficky vyznačenými dutinami je na Obr. 67.



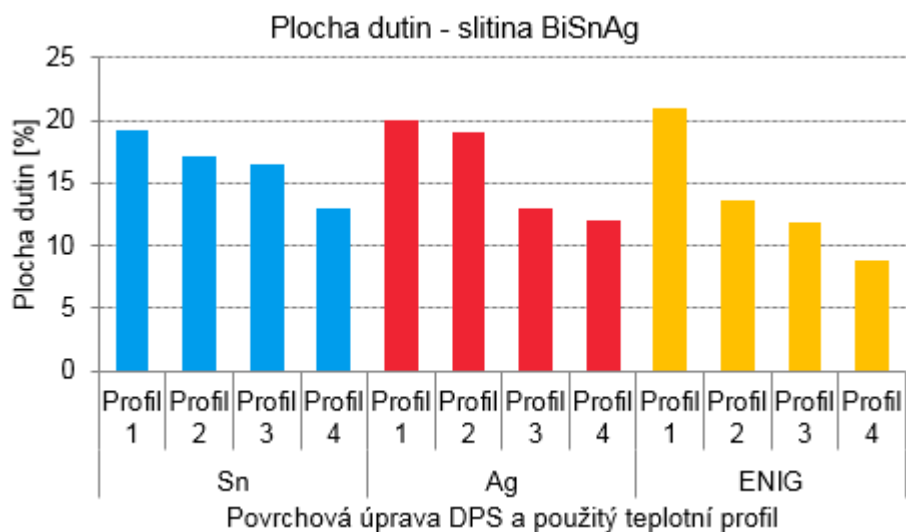
Obr. 66 RTG snímek součástky s vyznačenou vyhodnocovací plochou spojů



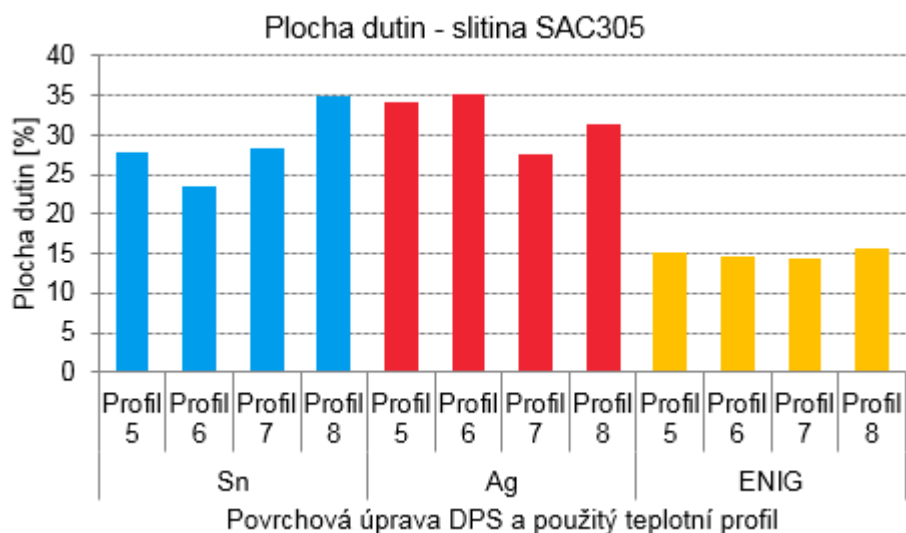
Obr. 67 Snímek s vyznačenými dutinami a hodnotou zaujímané plochy

U každého posuzovaného spoje vznikla nějaká dutina v oblasti vyhodnocovací plochy. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 68 až Obr. 71. V grafech je vidět hodnota plochy v procentech, kterou na RTG snímku zaujímaly dutiny pro jednotlivé slitiny, povrchové úpravy a použité teplotní profily. Zvyšující se hodnota heating faktoru by měla ve spojích snižovat množství dutin, jelikož je slitina déle v kapalném skupenství a plyny mají delší čas na opuštění prostoru spoje. Jak dokazuje provedený experiment, toto lze obecně tvrdit pro většinu materiálových kombinací, ale pro pájecí pastu Sn100C na

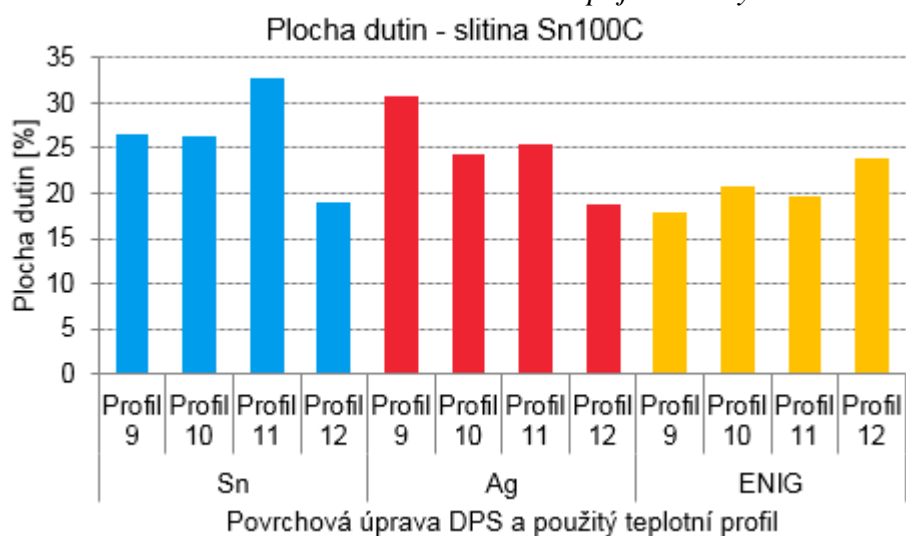
povrchové úpravě ENIG platí zcela opačná závislost. S rostoucí hodnotou  $Q_n$  v tomto případě roste i plocha dutin.



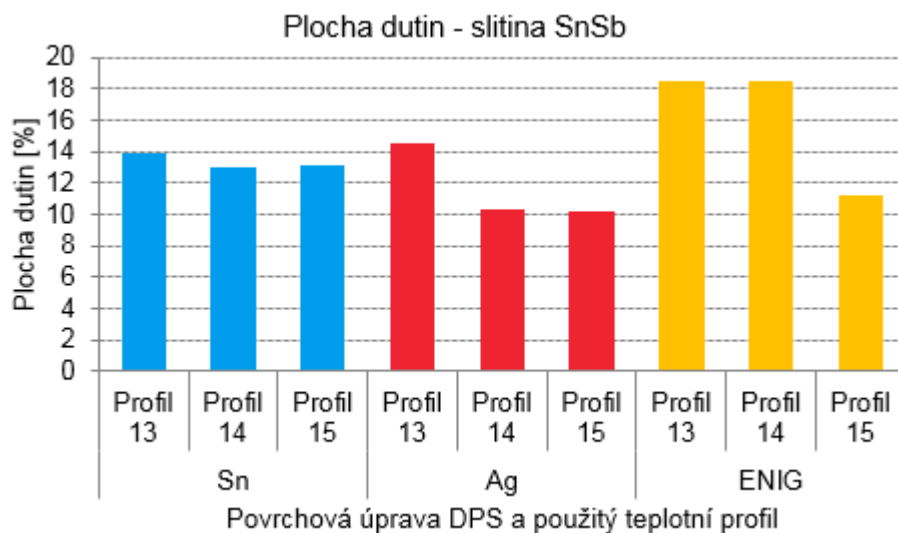
Obr. 68 Plocha dutin na RTG snímcích u pájecí slitiny BiSnAg



Obr. 69 Plocha dutin na RTG snímcích u pájecí slitiny SAC305



Obr. 70 Plocha dutin na RTG snímcích u pájecí slitiny Sn100C



Obr. 71 Plocha dutin na RTG snímcích u pájecí slitiny SnSb

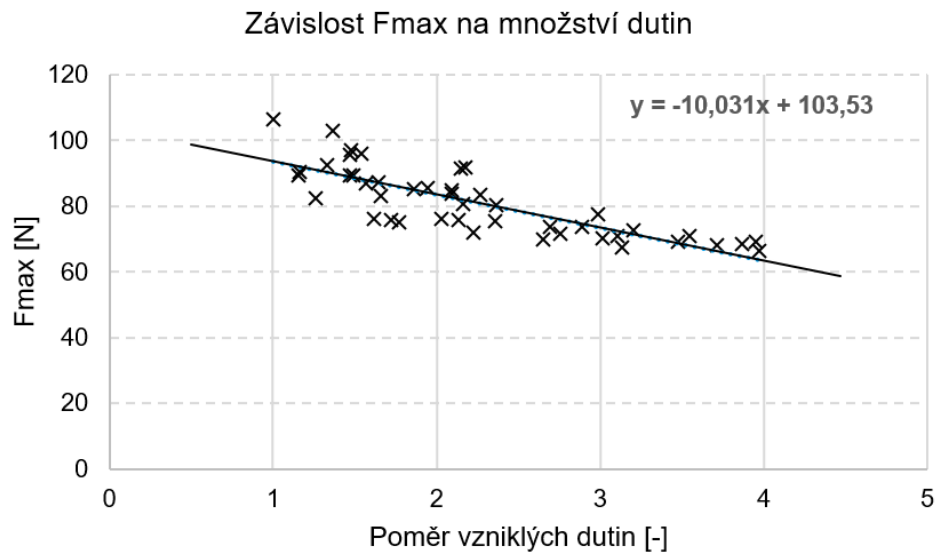
Průměrná hodnota ze všech spojů se pohybovala na hodnotě 19,97 %. Nejnižší průměrné hodnoty mezi všemi pájecími pastami dosáhla povrchová úprava ENIG a to 16,35 %. Spoje na povrchové úpravě Ag obsahovaly průměrně 21,78 % dutin a obdobně na povrchové úpravě Sn 21,68 %.

U pájecích slitin BiSnAg (průměrná plocha dutin 15,43 %) a SnSb (13,70 %) byla tvorba dutin výrazně nižší než u slitin SAC305 (25,18 %) a Sn100C (23,89 %). Navíc lze u slitin BiSnAg a SnSb snižovat plochu dutin pomocí prodlužování času nad teplotou tavení a maximální teplotou. U slitiny SAC305 a Sn100C toto neplatilo ve všech případech a záleželo i na zvolené povrchové úpravě. Nejnižší hodnota průměrné plochy dutin byla 8,8 % u kombinace materiálů BiSnAg, ENIG a profilu s nejvyšším  $Q\eta$  pro tuto pastu (Profil 4).

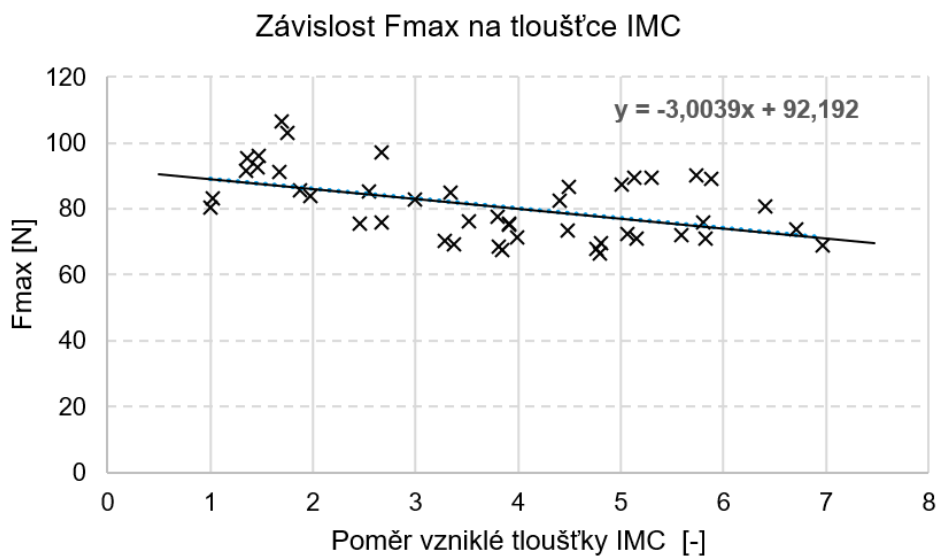
### 3.9. Porovnání vlivu tloušťky IMC a plochy dutin na mechanickou pevnost spoje

Z výše popsaných výsledků měření tloušťky IMC, měření plochy dutin ve spojích a vyhodnocení mechanické pevnosti je jasné, že tloušťka IMC i dutiny ovlivní výslednou mechanickou pevnost spoje. Získaná data je tedy možné zpracovat a říci, který z vlivů má na maximální sílu pro utržení spoje větší vliv. Pro srovnání byly hodnoty plochy dutin a tloušťka IMC vrstvy přepočteny na poměrné hodnoty, kdy nejmenší hodnota se rovná hodnotě 1 a k ní jsou poměrově dopočteny vyšší hodnoty. Výsledky závislostí jsou zobrazeny na Obr. 72 a Obr. 73. Do vyhodnocení byly zahrnuty hodnoty se všemi použitými materiály (čtyři slitiny a tři povrchové úpravy) a všechna procesní nastavení pájecích profilů. V každém grafu je proto vyneseno 45 hodnot a jsou proloženy lineárním

průběhem. Lineární trend je vždy i vyjádřen pomocí rovnice. Díky tomu je možné říci, že množství dutin ve spoji má více než třikrát větší vliv na maximální sílu pro utržení součástky než tloušťka IMC.



Obr. 72 Závislost  $F_{max}$  na poměru vzniklých dutin ve spojích

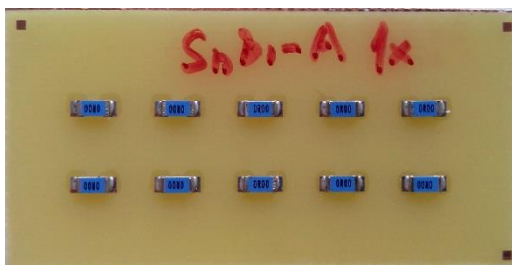


Obr. 73 Závislost  $F_{max}$  na poměru vzniklé tloušťky IMC ve spojích

### 3.10. Vliv opakovaného přetavení na vznik IMC

Dvě pájecí slitiny z předchozích experimentů byly využity pro zjištění vlivu opakovaného přetavení slitiny na zvýšení tloušťky intermetalické vrstvy. Konkrétně šlo o slitinu BiSnAg a SAC305. Pro přetavení bylo využito odlišného zařízení pro přetavení, tj. šlo o krátkou laboratorní pec s konvekčním ohřevem. Tato pec má tři zóny s nastavitelnou teplotou proudícího vzduchu a je možná volba rychlosti průchodu desky

pecí. Z tohoto důvodu nebylo možné využít shodný teplotní profil jako v předchozích částech práce. Pájecí pasta byla nanášena na DPS pomocí šablonového tisku. Jako vzorky DPS posloužily desky pro osazení 10 kusů chipových součástek o velikosti 1206. Využita byla deska bez povrchové úpravy měděných pájecích plošek s rozměry 50 mm x 25 mm. Vzorová DPS s osazenými součástkami je na Obr. 74.

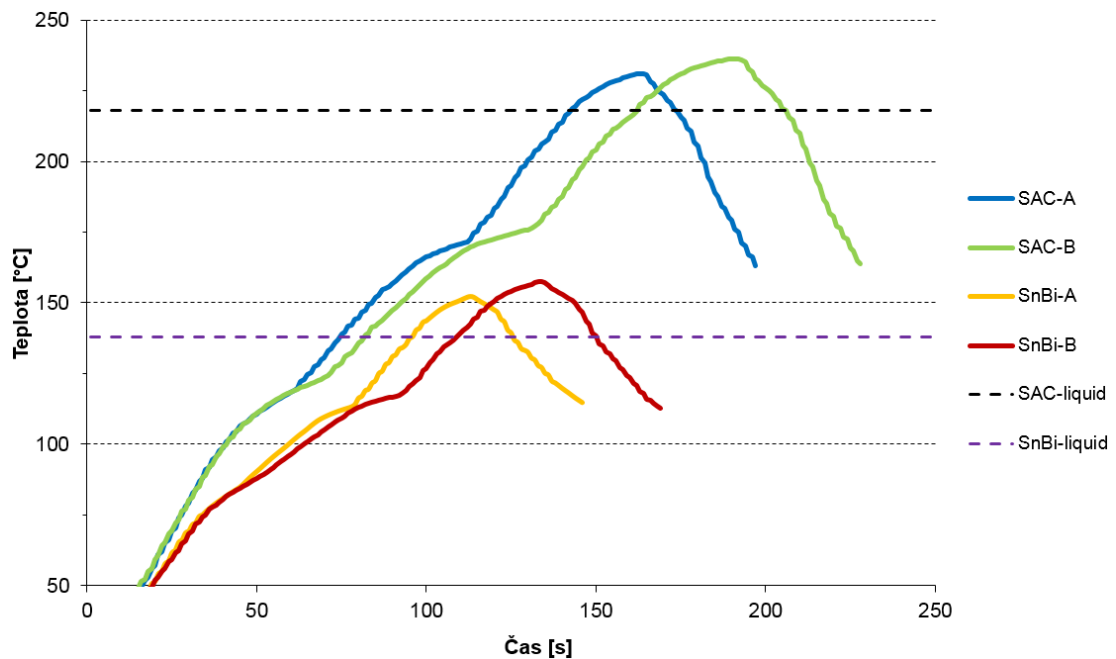


Obr. 74 Vzorok DPS s deseti osazenými součástkami

Tab. 11 Nastavení přetavovací pece

| Profil   | Předehřev 1<br>[°C] | Předehřev 2<br>[°C] | Zóna přetavení<br>[°C] | Rychlost<br>dopravníku<br>[cm/min] |
|----------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------------------|
| SAC-A    | 150                 | 220                 | 270                    | 35                                 |
| SAC-B    | 150                 | 220                 | 270                    | 29                                 |
| BiSnAg-A | 110                 | 120                 | 185                    | 53                                 |
| BiSnAg-B | 110                 | 120                 | 185                    | 44                                 |

Dva odlišné pájecí profily byly vybrány pro každou pájecí slitinu. Teplota profilu byla měřena a následně byla vypočtena hodnota heating factor. Použit byl stejný postup jako v kapitole 3.3. Profily označené jako “A” mají hodnotu  $Q_{\eta}$  rovnou  $250 \text{ s}^{\circ}\text{C}$  a  $Q_{\eta}$  hodnota profilů označených “B” je  $500 \text{ s}^{\circ}\text{C}$ . Rozdílných hodnot bylo dosaženo pouze změnou rychlosti průchodu vzorků pecí. Nastavené parametry pro jednotlivé profily jsou uvedeny v Tab. 11. Vzorky byly přetaveny jednou, dvakrát, čtyřikrát a šestkrát, vždy bylo využito stejného profilu. Naměřené teplotní profily jsou na Obr. 75 i s vyznačenou teplotou tavení použitých slitin. Pro každou sérii bylo využito dvou DPS s celkem 20 součástkami. Každý vzorek byl označen, popisek obsahoval zkratku slitiny (SnBi pro BiSnAg a SAC pro SAC305), písmeno profilu A nebo B a počet přetavovacích cyklů (1x, 2x, 4x nebo 6x).

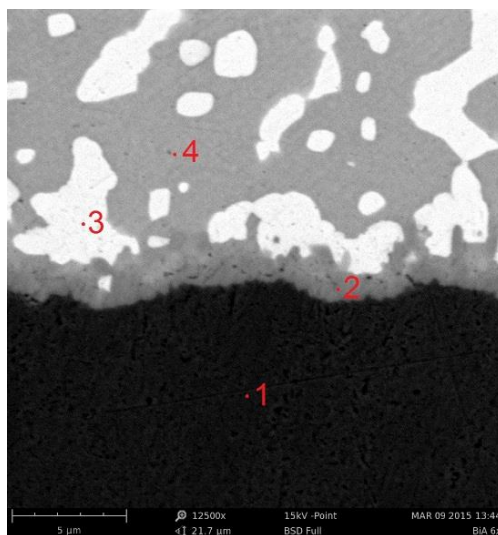


Obr. 75 Teplotní průběhy a teploty tavení použitých slitin

Následovalo vytvoření metalografických výbrusů. Čtyři součástky od každé skupiny vzorků byly zpracovány jako výbrusy. Ostatních 16 součástek bylo využito pro test mechanické pevnosti. Pro měření intermetalického rozhraní bylo využito stejného mikroskopu jako v části popsané výše (konfokální laserový mikroskop Olympus Lext). Dále byla využita metoda stanovení průměrné tloušťky z obrazu (viz kapitola 3.4). Při tomto testu bylo navíc využito skenovacího elektronového mikroskopu Phenom ProX pro identifikaci prvků v jednotlivých částech spojů. Princip měření mechanické pevnosti spojů pomocí zkoušky stříhem je popsán v kapitole 3.6 a zde probíhal zcela shodně. Obr. 76 zobrazuje strukturu a analyzované body pájeného spoje ze vzorku SnBi-A 6x a Tab. 12 popisuje rozložení jednotlivých prvků v označených bodech pájeného spoje. U tohoto spoje byla ověřena přítomnost IMC vrstvy  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  v analyzovaném bodu č. 2. Nepřesnost ve stanoveném množství od poměru 6:5 je způsobena nerovnoměrností vrstvy a nemožností zacílit proud elektronů při prvkové analýze do dostatečně malého bodu a do analýzy jsou proto zařazovány i sousedící atomy. Analýzu navíc není možné provést pouze v rovině řezu vzorku, ale ovlivňují ji i prvky pod ní. Díky přítomnosti jednoho procenta Ag v pájecí slitině se bude v objemu spoje vytvářet malé množství IMC  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ . Tato IMC nevytvoří souvislou vrstvu, ale pouze body v objemu spoje. Dále lze očekávat vznik IMC  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  na rozhraní Cu povrchu a vrstvy  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , tato IMC by se objevila až po stárnutí spoje a zde nebyla detekovatelná. Jiná IMC nebyla v tomto spoji pozorována.

Tab. 12 Prvková analýza vzorku SnBi-A 6x

| Koncentrace atomů | Cu [%] | Sn [%] | Bi [%] |
|-------------------|--------|--------|--------|
| Bod 1             | 100    | -      | -      |
| Bod 2             | 49,3   | 50,7   | -      |
| Bod 3             | -      | -      | 100    |
| Bod 4             | -      | 92,9   | 7,1    |

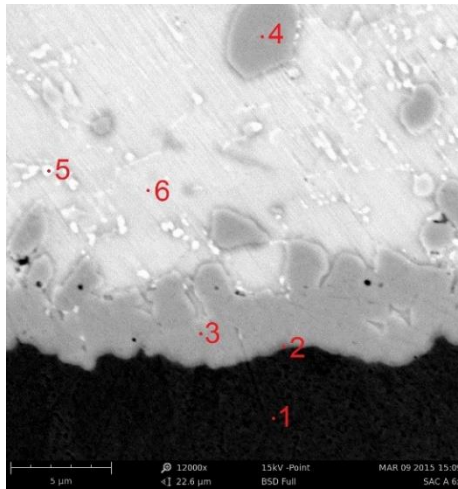


Obr. 76 Snímek ze SEM analýzy vzorku SnBi-A 6x

Rozhraní mezi Cu a SAC pájecí slitinou obsahuje tenkou přechodovou vrstvu  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  a opět nejvýraznější část zaujímá vrstva IMC  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Zjištěné atomové koncentrace jsou uvedeny v Tab. 13 a snímek s označenými body je na Obr. 77. Jde o snímek vzorku s označením SAC-A 6x. Body 3 a 4 mají přibližně shodné složení a jde o IMC  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , ta se zde tvoří nejen v přechodové vrstvě, ale lze ji nalézt často i v objemu pájeného spoje. Vyšší obsah Ag ve slitině SAC305 již způsobí zaznamenaný vznik IMC  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ , který je vidět v bodu 5. Tato IMC vytváří v objemu spoje drobnou a na snímku patrnou nepravidelnou strukturu.

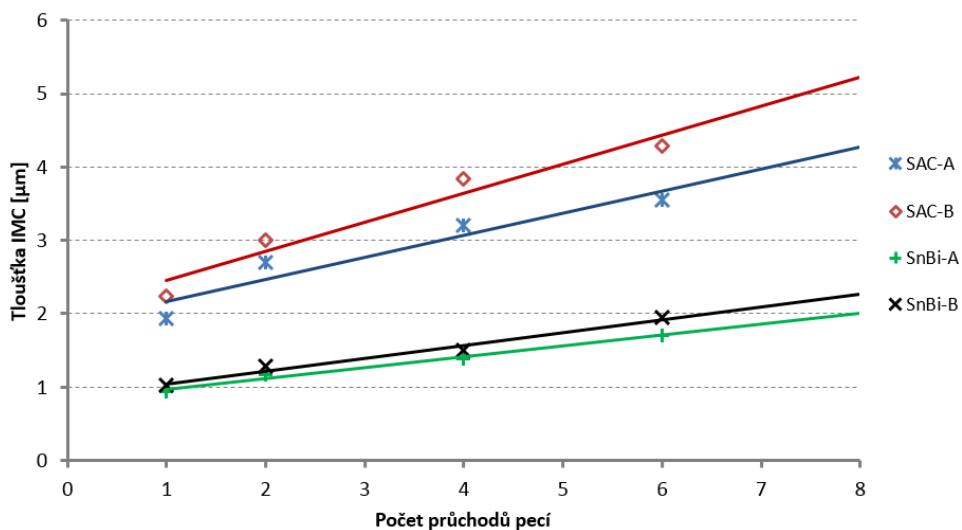
Tab. 13 Prvková analýza vzorku SAC-A 6x

| Koncentrace atomů | Cu [%] | Sn [%] | Ag [%] |
|-------------------|--------|--------|--------|
| Bod 1             | 100    | -      | -      |
| Bod 2             | 69,2   | 30,8   | -      |
| Bod 3             | 51,8   | 48,2   | -      |
| Bod 4             | 49,6   | 50,4   | -      |
| Bod 5             | -      | 27,8   | 72,2   |
| Bod 6             | -      | 100    | -      |



Obr. 77 Snímek ze SEM analýzy vzorku SAC-A 6x

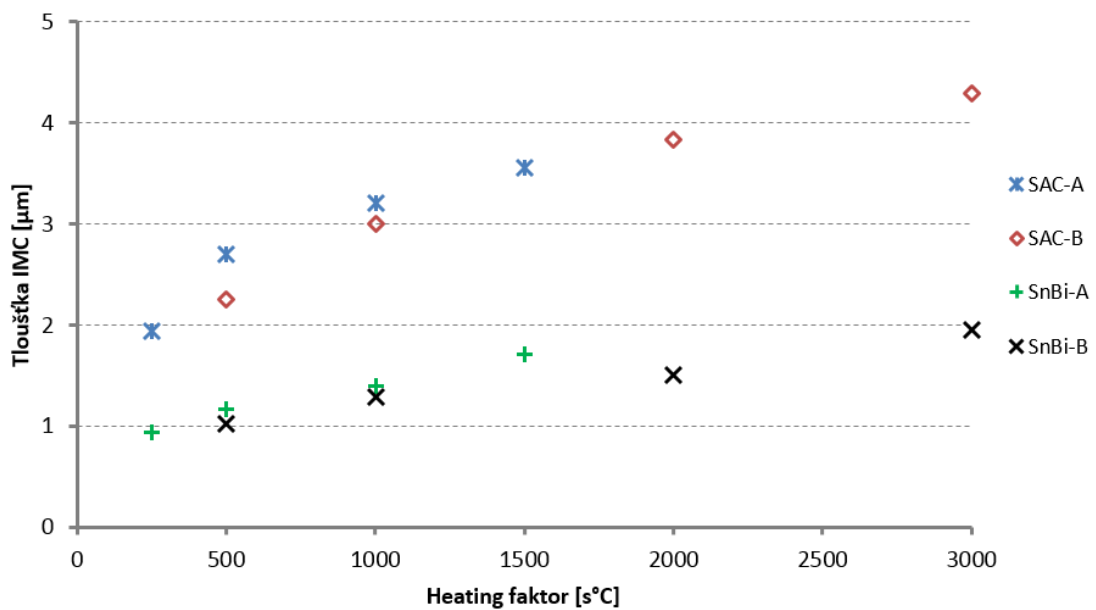
Složení vrstev bylo u všech vzorků shodné, ale měnila se jejich tloušťka s hodnotou heating faktoru a počtem průchodů pecí. Měřena byla přechodová vrstva s převážným složením z  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Druhá IMC  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  tvořící se ve vrstvě nebyla v měřitelné tloušťce pro samostatné vyhodnocení. Závislost tloušťky IMC na počtu průchodů vzorků pecí je graficky znázorněna na Obr. 78. Naměřené hodnoty lze přibližně lineárně aproximovat a tím získat odhad i pro počty průchodů, které nebyly v testu vyhodnocovány. Pro větší množství průchodů lze očekávat pokles rychlosti nárůstu tloušťky IMC. V místě růstu IMC dochází ke snížení rychlosti difúze, protože vrstva IMC částečně působí jako bariéra. Je zde nižší rozdíl koncentrací atomů Cu a Sn než na počátečním rozhraní dvou prakticky čistých kovů. Z grafu je patrný vznik tlustší vrstvy IMC u pájecí slitiny SAC305. To je způsobeno vyššími teplotami během pájení a větší koncentrací Sn v pájecí slitině v porovnání se slitinou SnBiAg. Růst IMC je ve spoji rychlejší při použití pájecích profilů B, které dosahují větší teploty a doby nad teplotou tavení pájecí slitiny.



Obr. 78 Závislost tloušťky IMC na počtu průchodů pecí



Pájecí profily byly nastaveny tak, aby hodnota heating faktoru u profilů označených písmenem A byla poloviční proti hodnotě u odpovídajícího profilu B. Konkrétně byla hodnota  $Q\eta$  u profilů A 250 s°C a u profilů B 500 s°C. U vícenásobného průchodu pecí se hodnota heating faktoru sčítá a to umožňuje zobrazit závislost tloušťky IMC na této hodnotě, viz Obr. 79. Při hodnotě 1000 s°C je tloušťka IMC u obou slitin velice blízká, ovšem při rozdílném počtu průchodů pecí. Vzorky A prošly pecí čtyřikrát a vzorky B pouze dvakrát. Díky úpravě pájecího profilu je možné dosáhnout stejného nárůstu IMC i při vícenásobném průchodu pecí.



Obr. 79 Závislost tloušťky IMC na hodnotě heating faktoru

## 4. Diskuse výsledků, doporučení pro praxi

Technologie pájení je náročný proces, který byl výrobci elektronických zařízení u olovnaté pájecí slitiny dobře zvládnut. S příchodem bezolovnatých pájecích slitin je ovšem nutné věnovat této problematice zvýšenou pozornost. V teoretické části této práce je popsána problematika vzniku intermetalických sloučenin. Především jde o faktory, které vznik těchto sloučenin ovlivňují. Jde o nastavení technologických parametrů i volbu použitých materiálů. Dále je popsán současný stav výzkumu v oblasti vlivu intermetalických vrstev na životnost pájeného spoje. Volba pájecí slitiny ovlivňuje vznik intermetalických vrstev i volbu pájecího profilu. Používání velkého množství bezolovnatých pájecích slitin výrobci elektronických zařízení a vznik stále nových variant složení pájecích slitin vytváří prostor pro další výzkum v této oblasti. Ve vědeckých člancích je možné nalézt nejednoznačné závěry u některých nových pájecích slitin, to ukazuje na nutnost prověřit jejich chování dalším testováním. Na základě rešeršní činnosti byl navržen postup pro zkoumání vzniku intermetalických sloučenin v pájeném spoji po přetavení. Podle tohoto postupu byl proveden experiment popsáný v předchozích kapitolách.

### Měření tloušťky intermetalických vrstev

Na základě předchozích zkušeností a praktickou nemožností porovnávat různé výsledky měření tloušťky IMC byl vypracován jednoznačný postup měření tloušťky IMC. Nejmenší vrstva IMC vzniká při využití pájecí pasty BiSnAg, kdy byla změřena průměrná tloušťka na všech povrchových úpravách a teplotních profilech 1,24  $\mu\text{m}$ . Ostatní slitiny s převahou Sn ve složení (SAC305, Sn100C a SnSb) mají tloušťku vrstvy IMC po zapájení přibližně stejnou a to v rozmezí 3,3 až 3,4  $\mu\text{m}$ . Sledováním vývoje IMC při zrychleném stárnutí při teplotě 80  $^{\circ}\text{C}$  je stále nejtenčí vrstva u BiSnAg (2  $\mu\text{m}$ ). Následuje slitina SAC305 s hodnotou 5,1  $\mu\text{m}$ . Sn100C a SnSb mají podobnou tloušťku 5,8 až 5,9  $\mu\text{m}$ . Při vyhodnocení zrychleného stárnutí při teplotě 120  $^{\circ}\text{C}$  lze sledovat stejné pořadí slitin v tloušťce IMC (BiSnAg 4,85  $\mu\text{m}$ , SAC305 6,73  $\mu\text{m}$ , SnSb 6,83  $\mu\text{m}$ , Sn100C 6,93  $\mu\text{m}$ ). Při této teplotě stárnutí je zajímavá změna při vyhodnocení rozdílu nárůstu vrstvy IMC po zapájení a po stárnutí. BiSnAg zde má větší přírůstek IMC (3,61  $\mu\text{m}$ ) než SAC305 a SnSb (3,43  $\mu\text{m}$ ). Životnost spoje z BiSnAg bude při vyšších teplotách omezena i přes tenčí počáteční vrstvu IMC. Při 80  $^{\circ}\text{C}$  bylo tempo růstu IMC u BiSnAg nižší než u ostatních slitin, ale při 120  $^{\circ}\text{C}$  je tomu naopak. Příčinou je nízká teplota tavení této slitiny (139  $^{\circ}\text{C}$ ) a pro použití při zvýšených teplotách ji nelze z dlouhodobého hlediska doporučit.

U všech materiálových kombinací došlo při vzniku spoje k vytvoření dostatečné vrstvy IMC. Dostatečnost této vazby byla ověřena pomocí trhací zkoušky, kdy bylo nutné pro utržení součástky po zapájení vynaložit minimální sílu 65 N. Tloušťku IMC vrstvy lze při vzniku spoje značně ovlivnit procesním nastavením pájecího profilu a to opět u všech sledovaných materiálových kombinací. Dostatečná je již hodnota heating faktoru okolo 400 s°C. S růstem této hodnoty narůstá i tloušťka IMC. Z hlediska životnosti spoje je tedy vhodné teplotní profil navrhnout na „nejstudenějším“ místě pájené sestavy na hodnotu  $Q_{\eta} = 400 \text{ s}^{\circ}\text{C}$ . Při dodržení tohoto pravidla dojde ke vzniku dostatečné vazby ve spojovaných materiálech a naopak nebude struktura spoje obsahovat silnou vrstvu IMC již od svého vzniku. Dle výsledku experimentu vzniká v průmyslově velmi okrajově využívané slitině SnSb při rozsahu  $Q_{\eta}$  273 až 1103 s°C IMC vrstva o tloušťce 1,5 až 4,4  $\mu\text{m}$  dle povrchové úpravy DPS. Tyto hodnoty jsou porovnatelné s komerčně více využívanými slitinami a zajišťují vznik kvalitního spoje. Slitinu proto lze doporučit pro běžnou produkci u sestav, kde osazené součástky povolují vyšší teploty přetavení. Po zapájení vznikla nejmenší vrstva IMC u povrchové úpravy DPS ENIG, průměrně u všech slitin a teplotních profilů jde o hodnotu tloušťky 2,3  $\mu\text{m}$ , následuje povrchová úprava Ag s hodnotou 2,97  $\mu\text{m}$  a nejtlustší vrstva byla měřena na povrchové úpravě Sn o hodnotě 3,1  $\mu\text{m}$ . Při vystavení vzorků zrychlenému stárnutí vrstva na všech povrchových úpravách roste, nejnižší hodnota je opět na povrchové úpravě ENIG 3,45  $\mu\text{m}$  při 80 °C a 5,51  $\mu\text{m}$  při 120 °C. Zjištěné hodnoty u povrchových úprav Ag (5,19  $\mu\text{m}$  při 80 °C, 7,3  $\mu\text{m}$  při 120 °C) a Sn (5,32  $\mu\text{m}$  při 80 °C, 6,88  $\mu\text{m}$  při 120 °C) jsou velice podobné a z hlediska tvorby IMC s nimi lze v praxi pracovat obdobně.

### **Měření mechanické pevnosti**

Tato část experimentu odhaluje, že nejvyšší pevnost ve smyku má spoj spájený na povrchovou úpravu imerzní Ag pájecí slitinou BiSnAg, následuje stejná slitina na povrchu ENIG. U této kombinace materiálů (BiSnAg na ENIG) lze ovšem sledovat výrazný pokles mechanické pevnosti. Zde je jednoznačný trend poklesu maximální síly pro utržení součástky při stárnutí vzorků a lze předpokládat pokračování tohoto trendu s delší dobou stárnutí. Z tohoto důvodu nelze tuto materiálovou kombinaci doporučit pro využití ve výrobě. U všech ostatních materiálových kombinací není takový trend v naměřených hodnotách viditelný. V části o měření tloušťky IMC se lze seznámit s vlivem teplotního profilu na vznik IMC. Tloušťka IMC zde ale nemá jednoznačný vliv na mechanickou pevnost. Z dostupné literatury se dozvídáme, že by silnější vrstva IMC (pájecí profil s větší hodnotou  $Q_{\eta}$ ) měla snižovat pevnost spoje. Tento předpoklad ale

není z naměřených dat patrný. Důvodem je pokles plochy dutin ve spoji při využití profilu s větší hodnotou  $Q\eta$ , který naopak vede na větší mechanickou pevnost spoje. Z vyhodnocení v kapitole 3.9 je patrný více než třikrát větší vliv nárůstu plochy dutin ve spoji v porovnání s růstem vrstvy IMC v naměřené sadě hodnot. Je nutné zdůraznit, že vznik dutin velmi souvisí s použitým tavidlem v pájecí pastě a získané hodnoty u pájecích past jiných výrobců se mohou výrazně lišit, konkrétní hodnoty plochy dutin a vliv teplotního profilu na jejich vznik u jednotlivých materiálů je uveden v kapitole 3.8. Pro mechanickou pevnost spoje je patrná nutnost přizpůsobit teplotní profil přednostně omezení vzniku dutin ve spoji.

### **Opakované přetavení a vznik IMC**

Hodnoty tloušťky IMC při opakovaném přetavení byly sledovány v samostatné části experimentu. Z tohoto důvodu není možné hodnoty přímo porovnat s předchozí částí (není stejná povrchová úprava a teplotní profily). Přesto je tloušťka IMC u pájecí pasty BiSnAg vždy nižší než u pasty SAC305, stejně jako je tomu v kapitole 3.5. Vyhodnocení dokazuje vhodnost popisu pájecího profilu pomocí jedné hodnoty heating faktoru místo popisu jednou hodnotou maximální teploty nebo doby nad teplotou tavení slitiny. Při vícenásobném přetavení při hodnotě  $Q\eta$  rovno 250 s°C a 500 °C je při hodnotě 1000 s°C tloušťka IMC u vzorků pájených rozdílnými teplotními profily velice blízká, ovšem při rozdílném počtu průchodů pecí. To lze sledovat použité pájecí slitiny BiSnAg i SAC305. Dnes je převážná část sestav navržena jako oboustranná a k přetavení tak dochází minimálně dvakrát. S adekvátním růstem IMC po těchto vícenásobných přetavení však většinou není počítáno. Omezením hodnoty  $Q\eta$  při nastavování teplotního profilu lze tento vliv omezit a dosáhnout nižší tloušťky IMC. Při počtu dvou průchodů pecí byl rozdíl v tloušťce IMC u slitiny SAC305 0,3  $\mu\text{m}$ , po šesti průchodech se rozdíl zvětšil na 0,73  $\mu\text{m}$ . U slitiny BiSnAg byl rozdíl při dvojnásobném průchodu 0,11  $\mu\text{m}$  a při šesti průchodech 0,24  $\mu\text{m}$ . Nižší hodnota tloušťky byla vždy dosažena s profilem s  $Q\eta$  rovno 250 s°C.

## Závěr

Předkládaná práce je zaměřena na problematiku měkkého pájení v elektronice. Věnuje se bezolovnatým pájecím slitinám, které jsou z výše popsaných legislativních důvodů v současné době využívány pro výrobu elektronických zařízení. Vývoj v oblasti těchto slitin není ukončen a nedá se říci, že je konkrétní slitina využívána jako náhrada za eutektickou olovnatou pájku. Teoretická část práce se snaží popsat současný vývoj především s ohledem na vnitřní strukturu pájeného spoje. Struktura spoje je ovlivněna vznikem intermetalických sloučenin na rozhraní materiálů a v samotném objemu pájecí slitiny.

Přehled současného stavu problematiky popisuje používané i nové bezolovnaté pájecí slitiny a stav výzkumu v oblasti intermetalických sloučenin. Jejich vznik ve spoji je ovlivněn několika faktory, např. použitými materiály, množstvím pájecí slitiny a teplotním průběhem během procesu pájení. Zejména vliv tvaru pájecího profilu a dodané energie při přetavení na vznik intermetalických vrstev není u všech slitin prověřen. Intermetalické sloučeniny se navíc v průběhu životnosti spoje vyvíjejí a ovlivňují jeho strukturu. Ta má vliv na mechanické i elektrické vlastnosti spoje a značně omezuje samotnou životnost spoje a tím spolehlivost celého zařízení.

**Cíl práce č. 1:** Pomocí experimentu stanovit působení volby aktuálně využívaných materiálů na vznik a růst intermetalických vrstev v bezolovnatém pájeném spoji. Dále sledovat korelaci mezi vznikem intermetalických vrstev a mechanickou pevností spoje. Při měření tloušťky IMC vrstev využít univerzální postup, který by umožnil snadné porovnání výsledků.

Přínos práce je v zahrnutí tří poměrně často využívaných pájecích slitin a jedné neobvyklé do experimentální části. Pro pokrytí široké škály současné výroby elektronických sestav byly využity i tři odlišné povrchové úpravy DPS. V této části bylo vytvořeno 360 metalografických výbrusů pro sledování tloušťky IMC a jejího růstu při zrychleném stárnutí při dvou rozdílných zvýšených teplotách. Vývoj mechanické pevnosti spoje je sledován u všech vytvořených vzorků, bohužel ho zde nelze očistit o vliv dutin ve spoji na mechanickou pevnost. Porovnání těchto vlivů je uvedeno v kapitole 3.9. Součástí práce je i detailně popsaný postup pro měření tloušťky IMC (kapitola 3.4), kterým by bylo možné porovnávat výsledky jednotlivých autorů. Tento postup je pro měření využít a do budoucna by bylo možné ho i zcela zautomatizovat na základě rozpoznávání obrazu.

**Cíl práce č. 2:** Sledovat vliv nastavení teplotního profilu při přetavení pájecí slitiny na vznik intermetalické vrstvy bezolovnatých pájených spojů. Využít popisu teplotního profilu při přetavení pomocí hodnoty heating faktoru.

V kapitole 3.5 je možné nalézt výsledky. Graficky je znázorněna tloušťka intermetalických vrstev při různém nastavení teplotního profilu. Teplotní profil je popsán pomocí hodnoty heating faktoru. Tloušťku IMC lze na sledovaném rozsahu hodnoty heating faktoru lineárně aproximovat. Díky uvedenému grafickému znázornění lze snadno predikovat tloušťku IMC vrstev u posuzovaných pájecích slitin a povrchových úprav ve výrobě pro libovolný teplotní profil. Obecně lze říci, že nejmenší tloušťka IMC vzniká u povrchové úpravy ENIG. Z pájecích slitin vzniká nejtenčí vrstva IMC u slitiny BiSnAg.

**Cíl práce č. 3:** Experimentálně ověřit vývoj intermetalických vrstev v bezolovnatém spoji při vícenásobném přetavení.

Tato část experimentu je popisována v kapitole 3.10. Byl sledován vývoj tloušťky IMC vrstev až po 6 průchodů přetavovací peci u dvou odlišných bezolovnatých slitin. Výsledné tloušťky IMC vrstvy jsou graficky zobrazeny v závislosti jak na počtu průchodů přetavovací peci, tak na celkovém součtu hodnoty heating faktoru.

**Cíl práce č. 4:** Definovat vhodné závěry, které budou využitelné pro odborníky ve výrobě a návrhu elektronických zařízení.

Doporučení jsou uvedeny v kapitole 4 nebo jsou přímo součástí konkrétní části práce. Jde o závěry z provedených experimentů týkajících se volby slitin, povrchových úprav a procesního nastavení při vzniku spoje. Počet přetavení je nejčastěji dán již návrhem elektronické sestavy, proto lze výsledky kapitoly 3.10. o opakovaném přetavení využít pro orientaci v problematice i pro produktové inženýry ve fázi vývoje produktu.

Na tuto práci je možné navázat v několika dalších směrech. Velice zajímavé by bylo k práci připojit zkoumání elektrických parametrů pájených spojů při různé tloušťce IMC. Dále se v praxi se začíná rozšiřovat pájení v pecích se sníženým tlakem. Vzorky vyrobené pomocí takového zařízení by obsahovaly menší množství dutin, což by experiment zpřesnilo a navíc je toto pájení spojeno s nutnou delší dobou slitiny nad teplotou tavení. Na takové peci by se obtížně dosahovalo nízké hodnoty heating faktoru a musela by vzniknout odlišná doporučení pro praxi.

## Literatura

- [1] WASSINK, R. J. Klein. *Soldering in Electronics: A Comprehensive Treatise on Soldeing Technology for Surface Mounting and Through-hole Techniques*. 2. Port Erin: Electrochemical Publications, 1994. ISBN 0 901150 24 X.
- [2] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [3] OHRINER, E. K. Kinetics of intermetallic layer growth for soldered copper and copper-nickel alloys. *Oak Ridge National Laboratory* [online]. 2005 [vid. 2013-12-15]. Dostupné z: [http://www.ctcms.nist.gov/~cecamp/TMS2005/TMS\\_2005\\_ohriner\\_vugraphs.ppt](http://www.ctcms.nist.gov/~cecamp/TMS2005/TMS_2005_ohriner_vugraphs.ppt)
- [4] STARÝ, Jiří. *Bezolovnaté pájení: materiálová a procesní kompatibilita v inertní a inertně/redukční atmosféře*. B.m., 2005. VUT v Brně.
- [5] Contact angle. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2001 [vid. 2013-12-08]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Contact\\_angle](http://en.wikipedia.org/wiki/Contact_angle)
- [6] *IPC J-STD-005A: Requirements for Soldering Pastes*. B.m.: Association Connecting Electronics Industries, 2012. ISBN 978-1-61193-038-2.
- [7] *Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment*. [online]. 2003. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/>
- [8] *Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)* [online]. 2003. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/>
- [9] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2011/65/EU ze dne 8. června 2011 o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních* [online]. 2011. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/>
- [10] *Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů*. B.m.: Sbírka zákonů. 2001
- [11] SZENDIUCH, Ivan. *Pájení a bezolovnaté pájky* [online]. [vid. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [12] GUPTA, Piyush. *Effect of intermetallic compounds on thermomechanical reliability of lead-free solder interconnects for flip-chips* [online]. B.m., 2004. Georgia Institute of Technology. Dostupné z: [https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/4800/gupta\\_piyush\\_200412\\_master.pdf?sequence=1](https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/4800/gupta_piyush_200412_master.pdf?sequence=1)
- [13] WOHLRABE, Heinz. *Abschlussbericht Voiding Projekt*. 2008.
- [14] LI, Weiming. Failure Analysis on Bad Wetting of ENIG Surface Finish Pads [online]. 2015, s. 538–541. Dostupné z: [doi:10.1109/ICEPT.2015.7236644](https://doi.org/10.1109/ICEPT.2015.7236644)
- [15] CHAMPAIGN, Robert, Jodi ROEPSCH a Marlin DOWNEY. Afraid of the dark. *Circuits Assembly* [online]. 2003, č. January, s. 22–25. Dostupné z: <http://circuitsassembly.com>
- [16] Technologie povrchových úprav plošných spojů. *Semach: výroba plošných spojů* [online]. 2013. Dostupné z: <http://www.semach.cz/povrchy3.html>
- [17] BAUER, Matthias. Bleifreie Leiterplattenoberflächen. In: *Proceedings EE-Kolleg*. 2006.
- [18] Tin Whisker (and Other Metal Whisker) Homepage. *NASA* [online]. 2011 [vid. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://nepp.nasa.gov/whisker/index.html>

- [19] HANNEMANN, Monika, Mathias NOWOTTNICK a Reiner ZAJITSCHEK. *Lötbarer Oberflächen für Leiterplatten*. 1. B.m.: TGBZ Technologieberatung, 1999.
- [20] BELL, Hans a Günter GROSSMANN. *Reflow Technology: Fundamentals of Reflow Soldering*. Blaubeuren: Rehm Thermal Systems, 2009.
- [21] ČSN EN 29454-1. *Tavidla pro měkké pájení. Klasifikace a požadavky. Část 1: Klasifikace, označování a balení*. 1997
- [22] ANSI/J-STD-004A, *Requirements for Soldering Fluxes. American National Standard*. B.m.: Joint Industry Standard. 2004
- [23] HENSHALL, Gregory. *Lead-Free Solder Process Development*. 1. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2011. ISBN 9780470410745.
- [24] PUTTLITZ, Karl J. a Kathleen A. STALTER. *Handbook of lead-free solder technology for microelectronic assemblies*. New York: Marcel Dekker, 2004. ISBN 08-247-4870-0.
- [25] SUBRAMANIAM, K. *Lead-free solders: materials reliability for electronics*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 9780470971826.
- [26] MIN, Yang, Liu XIUZHONG a Dai JIAHUI. *Development of Sn-Zn-Cu lead free solder*. Piscataway: IEEE, 2010. ISBN 9781424481408.
- [27] CHEN, W. M., S. K. KANG a C. R. KAO. Systematic investigation of Sn-Ag and Sn-Cu modified by minor alloying element of titanium. *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference* [online]. 2012, s. 729–735. ISSN 05695503. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2012.6248913
- [28] VUORINEN, V., H. Q. DONG a T. LAURILA. Effect of Ti on the interfacial reaction between Sn and Cu. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [online]. 2012, roč. 23, č. 1, s. 68–74. ISSN 09574522. Dostupné z: doi:10.1007/s10854-011-0426-6
- [29] Overview solder pastes. *BALVER ZINN* [online]. 2013 [vid. 2013-12-28]. Dostupné z: <http://www.balverzinn.com/overview-solder-pastes.html>
- [30] Soldering Alloys. *Alpha* [online]. 2013 [vid. 2013-12-28]. Dostupné z: <http://alpha.alent.com/en/Products/Soldering-Alloys>
- [31] Leadfree. *Heraeus Material Technology* [online]. 2013 [vid. 2013-12-28]. Dostupné z: [http://heraeus-contactmaterials.de/en/products/solderpaste/bleifrei/productpage\\_lead\\_free.aspx](http://heraeus-contactmaterials.de/en/products/solderpaste/bleifrei/productpage_lead_free.aspx)
- [32] Eco Solder. *SENJU METAL INDUSTRY* [online]. 2013 [vid. 2013-12-28]. Dostupné z: <http://www.senju-m.co.jp/en/product/ecosolder/index.html>
- [33] *IPC-A-610F: Acceptability of Electronic Assemblies*. B.m.: Association Connecting Electronics Industries, 2014. ISBN 978-1-61193-154-9.
- [34] *Ersa Hybrid Rework System HR 600/2 VOIDLESS – concept study* [online]. 2015. Dostupné z: [http://www.kurtzrsa.com/fileadmin/medien/members\\_final/Electronics/1\\_Technische\\_Datenblaetter/1.2\\_Rework/Ersa\\_Datenblatt - HR 600-2 VOIDLESS eng web.pdf](http://www.kurtzrsa.com/fileadmin/medien/members_final/Electronics/1_Technische_Datenblaetter/1.2_Rework/Ersa_Datenblatt_-_HR_600-2_VOIDLESS_eng_web.pdf)
- [35] YUNUS, Mohammad, K. SRIHARI, J. M. PITARRESI a Anthony PRIMAVERA. Effect of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints. *Microelectronics Reliability* [online]. 2003, roč. 43, č. 12, s. 2077–2086. ISSN 00262714. Dostupné z: doi:10.1016/S0026-2714(03)00124-0
- [36] *IPC-7095C: Design and Assembly Process Implementation for BGAs*. B.m.: Association Connecting Electronics Industries, 2013. ISBN 978-1-61193-080-1.
- [37] MEI, Z., M. AHMAD, M. HU a G. RAMAKRISHNA. Kirkendall voids at Cu/solder interface and their effects on solder joint reliability. *Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* [online]. 2005, roč. 2, s. 415–



420. ISSN 05695503. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2005.1441298
- [38] NOVÁK, Václav. *Sborník populárních přednášek z fyziky: Tvarová paměť* [online]. 1999. Dostupné z: department.fzu.cz/ofm/sma//brana\_cz/info/kluiber7.pdf
- [39] LAČNÝ, Radek. *Elektrická vodivost pájeného spoje a vliv na spolehlivost: Solder Joint Electric Conductivity and Solder Joint Reliability*. B.m., 2010. Brno: Vysoké učení technické.
- [40] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály* [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/Elektrotechnicke materialy.pdf
- [41] PAŠKO, Martin. *Analýza změn v pájených spojích vzniklých vlivem stárnutí*. B.m., 2011. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [42] FREAR, Darrel, Harold MORGAN, Steven BURCHETT a John LAU. *The Mechanics of solder alloy interconnects*. New York: Chapman & Hall, 1994. ISBN 04-420-1505-4.
- [43] SO, A.C.K. a Y.C. CHAN. Aging studies of Cu-Sn intermetallic compounds in annealed surface mount solder joints. In: *1996 Proceedings 46th Electronic Components and Technology Conference* [online]. B.m.: IEEE, nedatováno, s. 1164–1171. ISBN 0-7803-3286-5. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.1996.550884
- [44] KIM, H. K. a K. N. TU. Kinetic analysis of the soldering reaction between eutectic SnPb alloy and Cu accompanied by ripening. *Physical Review B* [online]. 1996, roč. 53, č. 23, s. 16027–16034. ISSN 0163-1829. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevB.53.16027
- [45] SCHAEFER, Matt, Raymond A FOURNELLE a Jin LIANG. Theory for intermetallic phase growth between cu and liquid Sn-Pb solder based on grain boundary diffusion control. *Journal of Electronic Materials* [online]. 1998, roč. 27, č. 11, s. 1167–1176. ISSN 0361-5235. Dostupné z: doi:10.1007/s11664-998-0066-7
- [46] ZORAN MIRIC, Anton a Angela GRUSD. Lead-free alloys. *Soldering & Surface Mount Technology* [online]. 1998, roč. 10, č. 1, s. 19–25. ISSN 0954-0911. Dostupné z: doi:10.1108/09540919810203793
- [47] MA, Hongtao, Jeffrey C. SUHLING, Yifei ZHANG, Pradeep LALL a Michael J. BOZACK. The Influence of Elevated Temperature Aging on Reliability of Lead Free Solder Joints. In: *2007 Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference* [online]. B.m.: IEEE, 2007, s. 653–668. ISBN 1-4244-0984-5. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2007.373867
- [48] ANDERSSON, C., Per-erik TEGEHALL, D.R. ANDERSSON, Göran WETTER a JOHAN LIU. Thermal Cycling Aging Effect on the Shear Strength, Microstructure, Intermetallic Compounds (IMC) and Crack Initiation and Propagation of Reflow Soldered Sn-3.8Ag-0.7Cu and Wave Soldered Sn-3.5Ag Ceramic Chip Components. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* [online]. 2008, roč. 31, č. 2, s. 331–344. ISSN 1521-3331. Dostupné z: doi:10.1109/TCAPT.2008.916793
- [49] PANG, J H L, F L WONG, K T HENG, Y S CHUA a C E LONG. Combined vibration and thermal cycling fatigue analysis for SAC305 lead free solder assemblies. In: *2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference* [online]. B.m.: IEEE, 2013, s. 1300–1307. ISBN 978-1-4799-0232-3. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2013.6575740

- [50] HARRIS, Paul G. a Kaldev S. CHAGGAR. The role of intermetallic compounds in lead-free soldering. *Soldering & Surface Mount Technology* [online]. 1998, roč. 10, č. 3, s. 38–52. ISSN 0954-0911. Dostupné z: doi:10.1108/09540919810237110
- [51] SO, A.C.K. a Y.C. CHAN. Reliability studies of surface mount, solder joints-effect of Cu-Sn intermetallic compounds. In: *1995 Proceedings. 45th Electronic Components and Technology Conference* [online]. B.m.: IEEE, nedatováno, s. 1073–1080. ISBN 0-7803-2736-5. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.1995.517824
- [52] AISHA, I. Siti Rabiattull, A. OURDJINI, M A Azmah HANIM a O. Saliza AZLINA. Effect of Reflow Profile on Intermetallic Compound Formation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2013, roč. 46, č. 4, s. 12037. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/46/1/012037
- [53] PAN, Jianbiao, Tzu-Chien CHOU, Jasbir BATH, Dennis WILLIE a Brian J. TOLENO. Effects of reflow profile and thermal conditioning on intermetallic compound thickness for SnAgCu soldered joints. *Soldering & Surface Mount Technology* [online]. 2009, roč. 21, č. 4, s. 32–37. ISSN 0954-0911. Dostupné z: doi:10.1108/09540910910989411
- [54] TU, P.L, Y.C CHAN, K.C HUNG a J.K.L LAI. Study of micro-BGA solder joint reliability. *Microelectronics Reliability* [online]. 2001, roč. 41, č. 2, s. 287–293. ISSN 00262714. Dostupné z: doi:10.1016/S0026-2714(00)00217-1
- [55] TAO, Bo, Yiping WU, Han DING a Y. L. XIONG. A quantitative method of reliability estimation for surface mount solder joints based on heating factor  $Q \eta$ . *Microelectronics Reliability* [online]. 2006, roč. 46, s. 864–872. ISSN 00262714. Dostupné z: doi:10.1016/j.microrel.2005.04.013
- [56] *Product Data Sheet: Solder Paste DP 5505* [online]. 2013. Dostupné z: [http://www.interflux.com/sites/default/files/documents/en/TD DP 5505\\_1.pdf](http://www.interflux.com/sites/default/files/documents/en/TD DP 5505_1.pdf)
- [57] *Product Data Sheet: Solder Paste DP 5600* [online]. 2015. Dostupné z: [http://www.interflux.com/sites/default/files/documents/en/TD DP 5600\\_0.pdf](http://www.interflux.com/sites/default/files/documents/en/TD DP 5600_0.pdf)
- [58] *Technical data sheet: BALVER ZINN SOLDER SN100C®* [online]. 2016. Dostupné z: <http://www.balverzinn.com/solder-SN100C.html>
- [59] *Data Sheet: Ecosolder Paste M10-235C-42-11, SENJU METAL INDUSTRY*. 2014
- [60] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Statistická analýza experimentálních dat*. 2. vydání. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1254-0.
- [61] MELOUN, Milan. *Analýza malých výběrů (Horn)* [online]. 2001 [vid. 2015-05-30]. Dostupné z: <http://meloun.upce.cz/docs/research/chemometrics/methodology/3horn.pdf>

## Seznam publikací autora

### Publikace vztahující se k předmětu disertační práce

#### Vysokoškolské kvalifikační práce

- [1] WIRTH, V.: Vliv intermetalických sloučenin na kvalitu bezolovnatého pájeného spoje, teze k disertační práci, ZČU v Plzni, 2014, 38s.

#### Publikace v impaktovaných časopisech

- [2] STEINER, F., RENDL, K., WIRTH, V. Correlation analysis of wettability, intermetallic compound formation and PCB contamination. *Circuit world*, 2015, roč. 41, č. 2, s. 70-75. ISSN: 0305-6120

#### Statě ve sborníku

- [3] WIRTH, V., HUJER, T., NOVÁK, T., RENDL, K., STEINER, F. Comparison of solderability testing methods of PCBS with different surface finishes. In *Electronic devices and systems : IMAPS CS international conference : proceedings*. Brno: Vysoké učení technické, 2011. s. 229-234. ISBN: 978-80-214-4303-7
- [4] WIRTH, V. Testování pájitelnosti DPS pomocí zkoušky roztékavosti. In *Elektrotechnika a informatika 2011 část první*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 165-166. ISBN: 978-80-261-0016-4
- [5] WIRTH, V. Porovnání kalafunových tavidel pomocí testu roztékavosti. In *Elektrotechnika a informatika 2012. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 175-178. ISBN: 978-80-261-0120-8
- [6] WIRTH, V. Vliv pájecího profilu na mechanickou pevnost pájeného spoje. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. s. 175-178. ISBN: 978-80-261-0233-5
- [7] RENDL, K., MACHAČ, J., STEINER, F., WIRTH, V. Comparison of Rosin Fluxes. In *Electronic devices and systems : IMAPS CS international conference : proceedings*. Brno: Vysoké učení technické, 2013. s. 166-171. ISBN: 978-80-214-4754-7
- [8] HIRMAN, M., RENDL, K., STEINER, F., WIRTH, V. Influence of Reflow Soldering Profiles on Creation of IMC at the Interface of SnBi/Cu. In *ISSE 2014 - 37th International Spring Seminar on Electronics Technology - "Advances in Electronic System Integration"*. Piscataway: IEEE, 2014. s. 1-5. ISBN: 978-3-934142-49-7
- [9] WIRTH, V., RENDL, K., STEINER, F. Effect of multiple reflow cycles on intermetallic compound creation. In *Proceedings of the 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 1-5. ISBN: 978-1-4799-8860-0, ISSN: 2161-2528
- [10] HROMADKA, K., ŘEBOUN, J., RENDL, K., WIRTH, V., HAMÁČEK, A. Comparison of the surface properties of power electronic substrates. In *Proceedings of the 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 1-5. ISBN: 978-1-4799-8860-0, ISSN: 2161-2528
- [11] RENDL, K., WIRTH, V., STEINER, F. Impact of no-clean fluxes cleaning on PCB Ionic contamination. In *Proceedings of the 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 1-5. ISBN: 978-1-4799-8860-0, ISSN: 2161-2528

### Články v recenzovaných časopisech

- [12] RENDL, K., STEINER, F., WIRTH, V., MACHAČ, J. Comparison of Rosin Fluxes. *Electroscope*, 2013, roč. 2013, č. 5, s. 1-4. ISSN: 1802-4564

### Přednáška, poster

- [13] WIRTH, V., HUJER, T., NOVÁK, T., RENDL, K., STEINER, F. *Comparison of solderability testing methods of PCBs with different surface finishes*. Brno, 2011.
- [14] HIRMAN, M., RENDL, K., STEINER, F., WIRTH, V. *Influence of Reflow Soldering Profiles on Creation of IMC at the Interface of SnBi/Cu*. Drážďany, 2014.

## Ostatní publikace

### Statě ve sborníku

- [15] RENDL, K., WIRTH, V., STEINER, F., BLECHA, T., LINHART, R., HERC, L., SEHNAL, P., KLOCKER, L. Multiplexer for Automatic Testing of Multimedia Units. In *Electronic devices and systems : IMAPS CS international conference : proceedings*. Brno: Vysoké učení technické, 2012. s. 71-76. ISBN: 978-80-214-4539-0
- [16] WIRTH, V., BLECHA, T., LINHART, R., RENDL, K., STEINER, F., KLOCKER, L., HERC, L., SEHNAL, P. Automatic testing of multimedia units. In *35 th International Spring Seminar on Electronics Technology - Power Electronics*. Vienna: Vienna University of Technology, Austria, 2012. s. 1-6. ISBN: 978-3-85465-015-7

### Přednáška, poster

- [17] WIRTH, V., BLECHA, T., LINHART, R., RENDL, K., STEINER, F., KLOCKER, L., HERC, L., SEHNAL, P. *Automatic testing of multimedia units*. Bad Aussee, Austria, 2012.
- [18] RENDL, K., WIRTH, V., STEINER, F., BLECHA, T., LINHART, R., HERC, L., SEHNAL, P., KLOCKER, L. Multiplexer for Automatic Testing of Multimedia Units. Brno, 2012.

### Články v recenzovaných časopisech

- [19] RENDL, K., BLECHA, T., LINHART, R., STEINER, F., WIRTH, V., HERC, L., KLOCKER, L., SEHNAL, P. Multiplexer for Automatic Testing of Multimedia Units. *Electroscope*, 2012, roč. 2012, č. 6, s. 1-6. ISSN: 1802-4564

### Software

- [20] LINHART, R., RENDL, K., WIRTH, V. *Testovací a konfigurační aplikace pro multiplexor signálů*. 2013.

### Funkční vzorek

- [21] LINHART, R., STEINER, F., BLECHA, T., RENDL, K., WIRTH, V. *Multiplexor měřících signálů*. 2013.
- [22] STEINER, F., BLECHA, T., LINHART, R., RENDL, K., WIRTH, V., HERZ, L., SEHNAL, P., KLOCKER, L. *Systém pro testování multimediálních jednotek*. 2013.

## **Seznam příloh**

Příloha 1 – Patenty pájecích slitin pro roky 2005 až 2010

Příloha 2 – Hornovy kvantily

Příloha 3 – Snímky struktury pájených spojů

Příloha 4 – Katalogové listy pájecích past

## Příloha 1 - Patenty pájecích slitin pro roky 2005 až 2010

Tab. 14 Přehled US patentů nových pájecích slitin [25]

| Patent č. | Vlastník        | Sn<br>(wt%) | Bi      | Ag      | In      | Sb      | Cu           | Zn      | Ostatní         |
|-----------|-----------------|-------------|---------|---------|---------|---------|--------------|---------|-----------------|
| 6837947   | NCK Un.         | Zbytek      |         | 4,0>    |         |         |              | 7,0-10  | Al, Ga          |
| 6843862   | Quantum         | 88-94       |         | 3,5-4,5 | 2,0-6   |         | 0,3-1,0      |         |                 |
| 6884389   | Kabushiki       | Zbytek      | 43-47   | 0,9-2,2 | 0,4-0,6 |         | 0,4-0,6      |         | Ni,Sb,Ge        |
| 6936219   | IKA             | Zbytek      |         |         |         |         |              | 7,5-9,0 | Mn              |
| 6984254   | Fujitsu         | 77-87       | 10-20   | 2,8-3,1 |         |         |              |         |                 |
|           | Fujitsu         | 34-40       | 46-55   |         | 10-20   |         |              |         |                 |
| 7022282   | Murata          | >90,5       |         | 0,5-9,0 |         | 0,5-5,0 |              |         | Mn,Cr           |
| 7111771   | Intel           | Zbytek      | (Bi)    | (Ag)    | 5,0-15  | (Sb)    | (Cu)         | (Zn)    | Ni,Ge,Pt        |
| 7148426   | Hitachi         | Zbytek      |         | 2,0-5,0 |         |         | 0,01-2       |         | P               |
| 7172726   | Senju           | 90-98       |         |         |         |         | 1,5-8        |         | Ni,Co           |
| 7175804   | Nippon          | Zbytek      | 0,5-6,0 |         |         |         |              | 6,0-10  | Mg,Al           |
| 7175805   | Nippon          | Zbytek      |         |         |         |         |              | 6,0-10  | Mg              |
| 7220493   | Koa<br>Kabush   | Zbytek      |         |         |         |         |              | 30-70   | Ni,Al           |
| 7224067   | Intel           |             | 63-67   |         | 33-37   |         |              | (Zn)    | Li,Ti,Zr,<br>Re |
| 7250135   | MK              | >94,79      |         | 2,8-4,2 | 0,2     |         | 0,3-0,8      |         | Ge              |
| 7273540   | Shinryo         | Zbytek      |         | 2,6-3,4 |         |         | 0,4-0,7      |         |                 |
| 7282174   | Senju           | Zbytek      | 0,5-12  |         |         | <1      |              | 5-10    | Au,Pt,Pd,<br>Fe |
| 7282175   | Senju           | Zbytek      |         | 0,05-5  |         |         | 0,01-<br>0,5 |         | P,Ni,Co         |
| 7335269   | Aoki            | 99>         |         | 0,3-0,4 |         |         | 0,6-0,7      |         | P               |
| 7338567   | Senju           | 98>         |         |         |         |         | 0,1-1,5      |         | Ni,P            |
| 7410833   | IBM             | >90         | (Bi)    | (Ag)    |         | (Sb)    | (Cu)         | (Zn)    |                 |
| 7425299   | Senju           | Zbytek      |         | 4,0-6,0 |         |         | 1,0-2,0      |         |                 |
| 7422721   | Murata          | 90,5        |         |         |         |         | 0,5-2        |         | Pd,Co           |
| 7576428   | Int Tech<br>Res | 0,01-30     | 30-60   |         | 20-70   |         |              |         | Ga              |

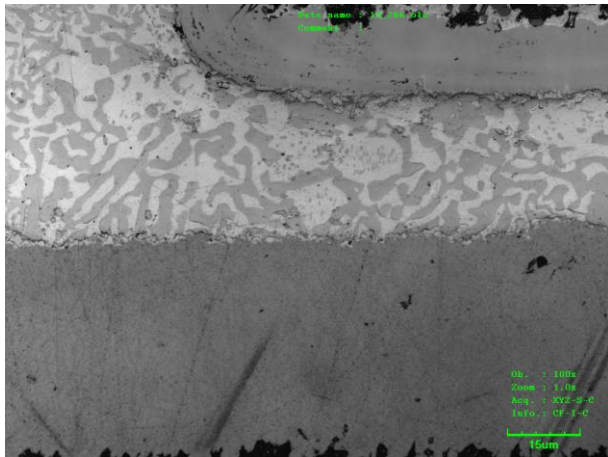
## **Příloha 2 – Hornovy kvantily**

Tab. 15 Hodnoty kvantilů pro Hornův postup [61]

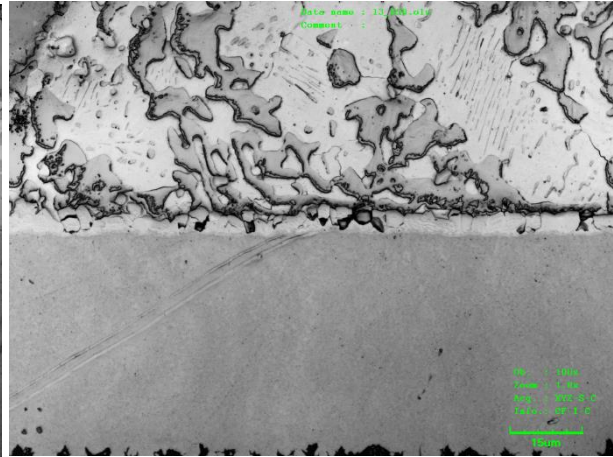
| $1-\alpha$ | 0,9   | 0,95  | 0,975 | 0,99  | 0,995 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $n$        |       |       |       |       |       |
| 4          | 0,477 | 0,555 | 0,738 | 1,040 | 1,331 |
| 5          | 0,869 | 1,370 | 2,094 | 3,715 | 5,805 |
| 6          | 0,531 | 0,759 | 1,035 | 1,505 | 1,968 |
| 7          | 0,451 | 0,550 | 0,720 | 0,978 | 1,211 |
| 8          | 0,393 | 0,469 | 0,564 | 0,741 | 0,890 |
| 9          | 0,484 | 0,688 | 0,915 | 1,265 | 1,575 |
| 10         | 0,400 | 0,523 | 0,668 | 0,878 | 1,051 |
| 11         | 0,363 | 0,452 | 0,545 | 0,714 | 0,859 |
| 12         | 0,344 | 0,423 | 0,483 | 0,593 | 0,697 |
| 13         | 0,389 | 0,497 | 0,608 | 0,792 | 0,945 |
| 14         | 0,348 | 0,437 | 0,525 | 0,661 | 0,776 |
| 15         | 0,318 | 0,399 | 0,466 | 0,586 | 0,685 |
| 16         | 0,299 | 0,374 | 0,435 | 0,507 | 0,591 |
| 17         | 0,331 | 0,421 | 0,502 | 0,637 | 0,774 |
| 18         | 0,300 | 0,380 | 0,451 | 0,555 | 0,650 |
| 19         | 0,288 | 0,361 | 0,423 | 0,502 | 0,575 |
| 20         | 0,266 | 0,337 | 0,397 | 0,464 | 0,519 |

### Příloha 3 – Snímky struktury pájených spojů

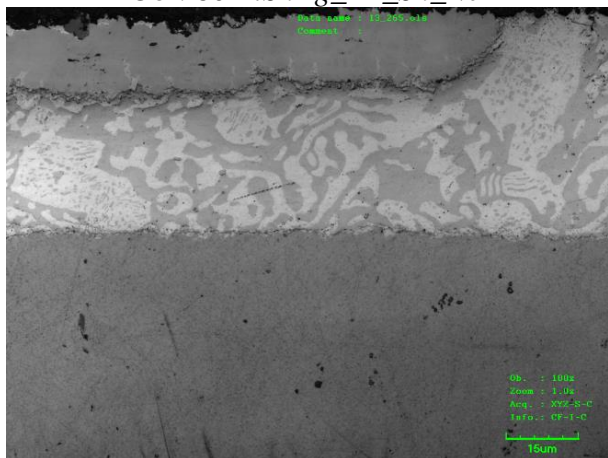
Příloha obsahuje snímky výbrusů pájených spojů bez stárnutí a vystavené 32 dnů teplotě 120 °C. Označení vzorků odpovídá kapitole 3.7. Snímky jsou označeny pomocí složeného popisu. První část představuje pájecí slitinu, druhá pájecí profil s číslem (P1 až P15), třetí povrchovou úpravu DPS (Sn je imerzní cín, Ag je imerzní stříbro, Au je ENIG) a poslední část je označení stárnutí (před pomlčkou je teplota a za pomlčkou je počet dnů při této teplotě). Patrný rozdíl ve snímcích je dán časovým rozestupem výroby vzorků (začátek a konec experimentu) a rozdílnou technikou leptání při finální úpravě.



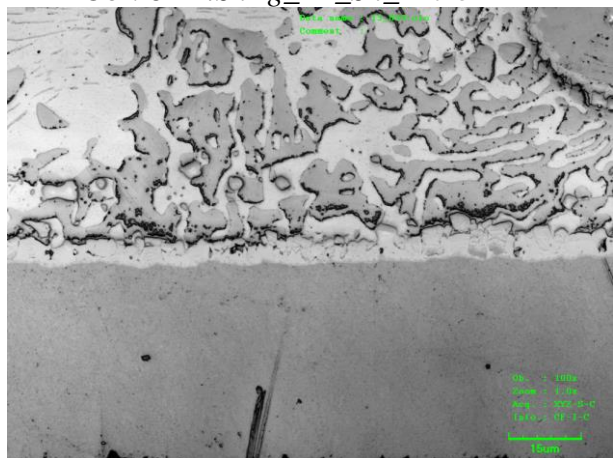
Obr. 80 *BiSnAg\_P1\_Sn\_Ne*



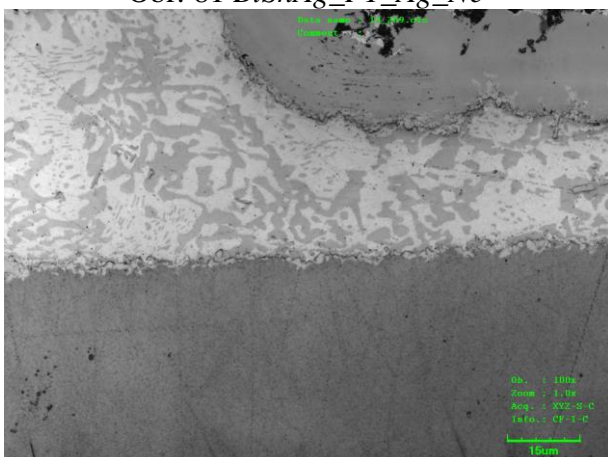
Obr. 81 *BiSnAg\_P1\_Sn\_120-32*



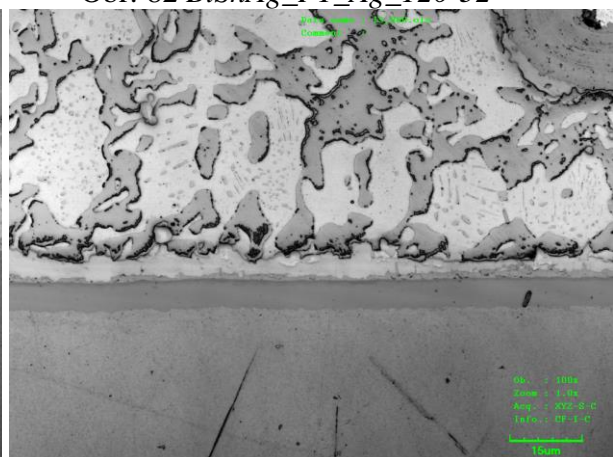
Obr. 81 *BiSnAg\_P1\_Ag\_Ne*



Obr. 82 *BiSnAg\_P1\_Ag\_120-32*

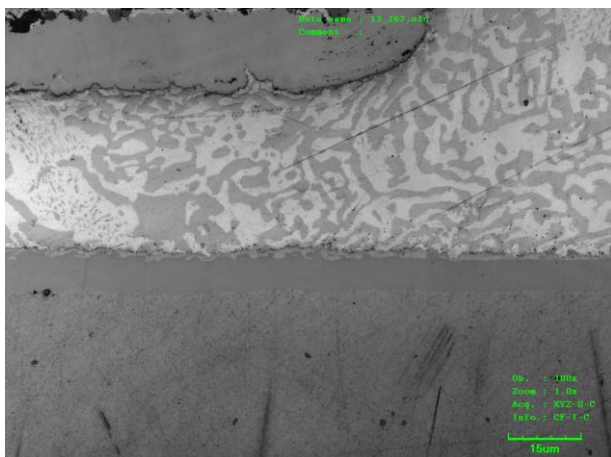


Obr. 83 *BiSnAg\_P1\_Au\_Ne*

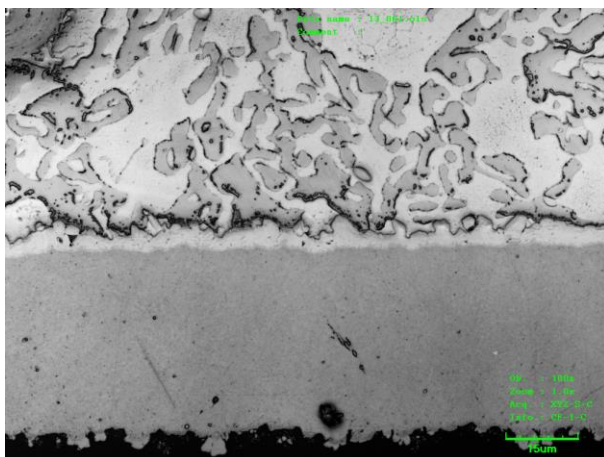


Obr. 84 *BiSnAg\_P1\_Au\_120-32*

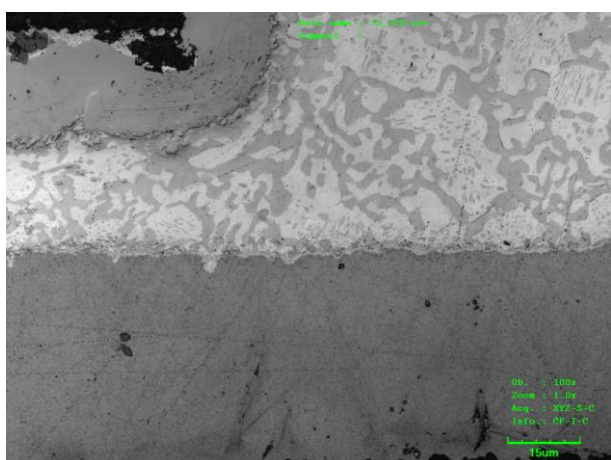




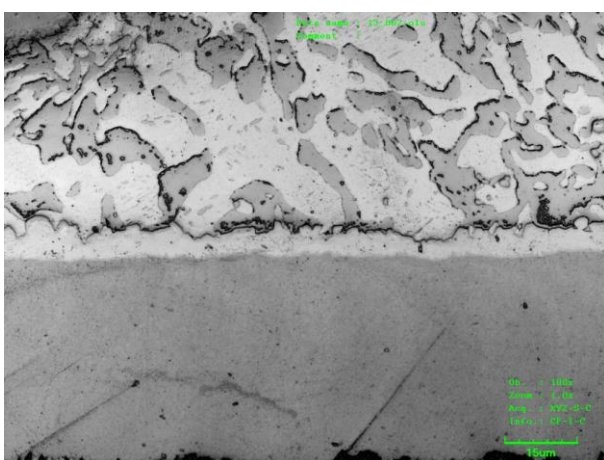
Obr. 85 *BiSnAg\_P2\_Sn\_Ne*



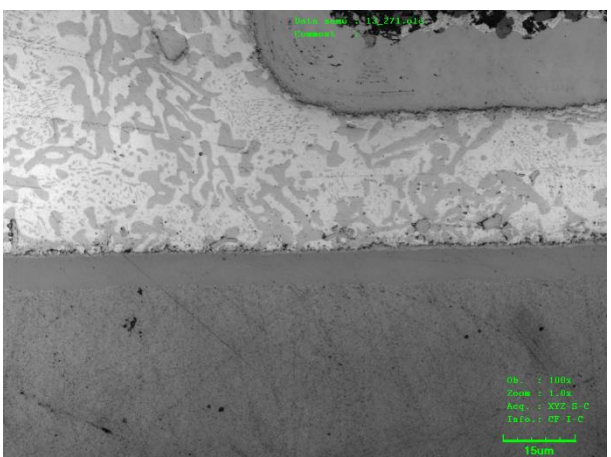
Obr. 86 *BiSnAg\_P2\_Sn\_120-32*



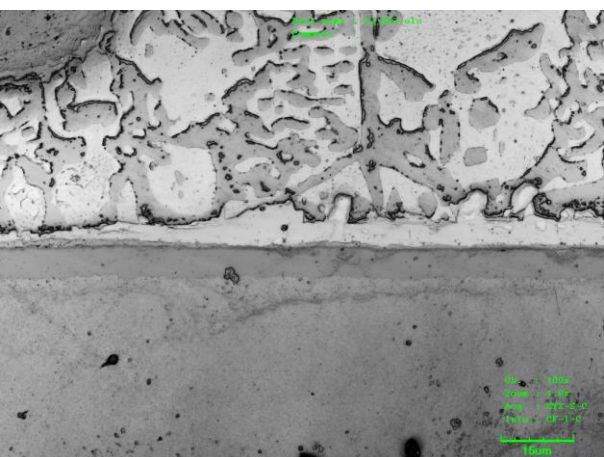
Obr. 87 *BiSnAg\_P2\_Ag\_Ne*



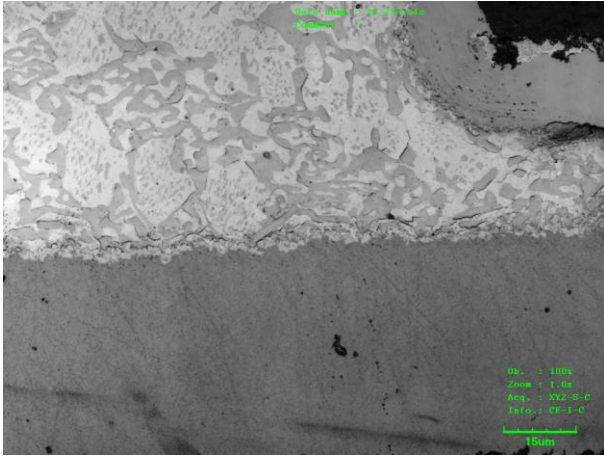
Obr. 88 *BiSnAg\_P2\_Ag\_120-32*



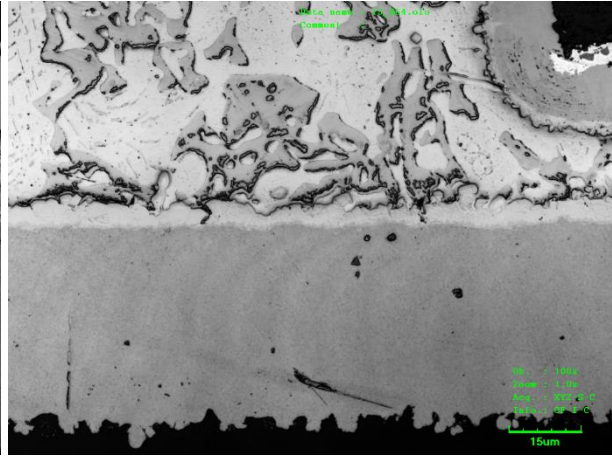
Obr. 89 *BiSnAg\_P2\_Au\_Ne*



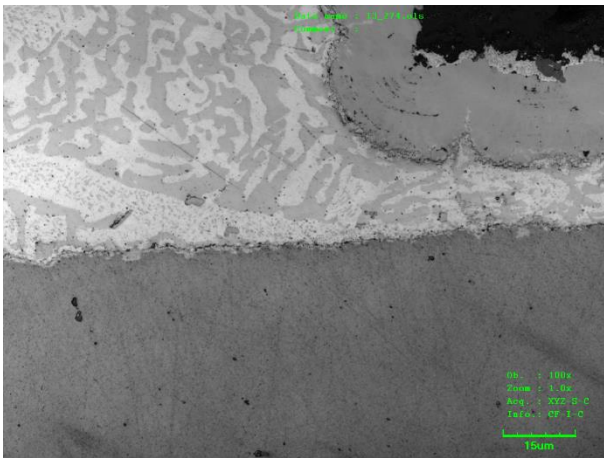
Obr. 90 *BiSnAg\_P2\_Au\_120-32*



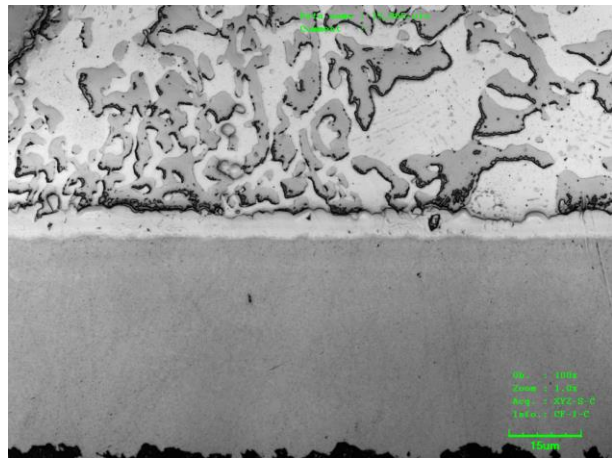
Obr. 91 *BiSnAg\_P3\_Sn\_Ne*



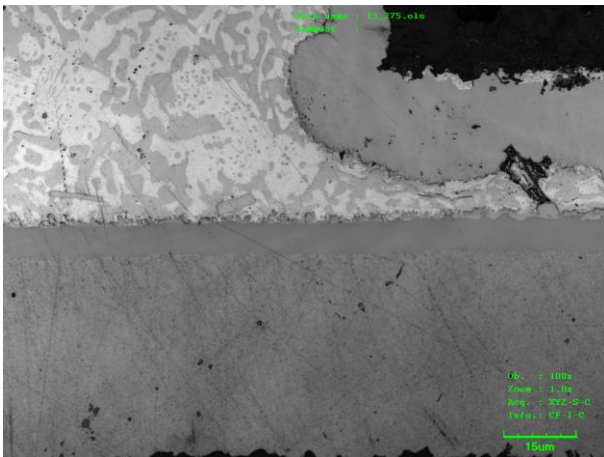
Obr. 92 *BiSnAg\_P3\_Sn\_120-32*



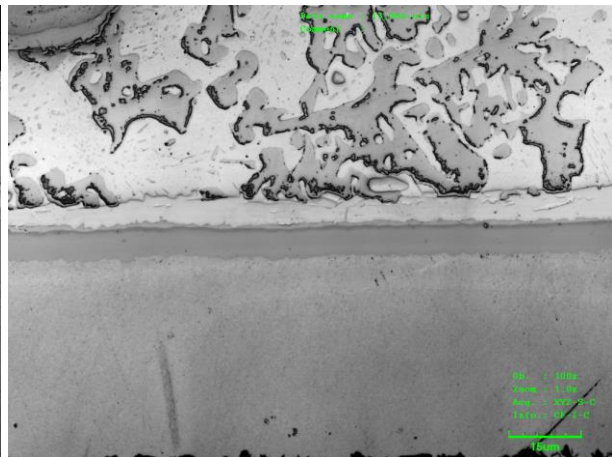
Obr. 93 *BiSnAg\_P3\_Ag\_Ne*



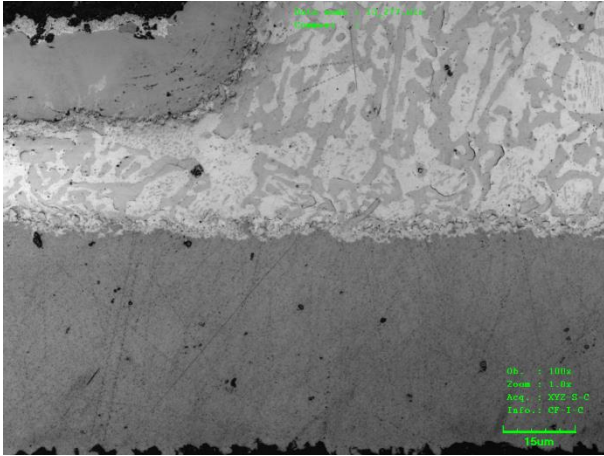
Obr. 94 *BiSnAg\_P3\_Ag\_120-32*



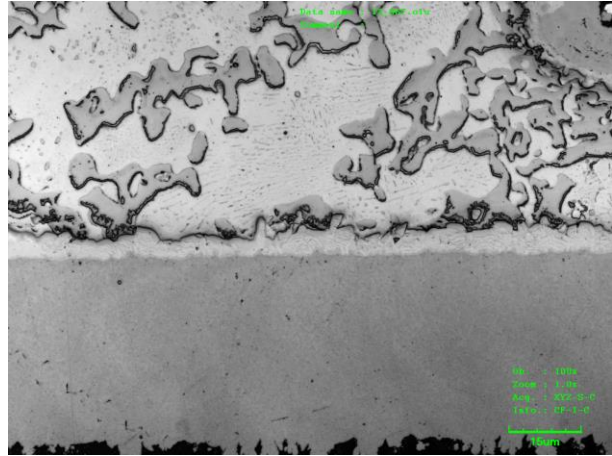
Obr. 95 *BiSnAg\_P3\_Au\_Ne*



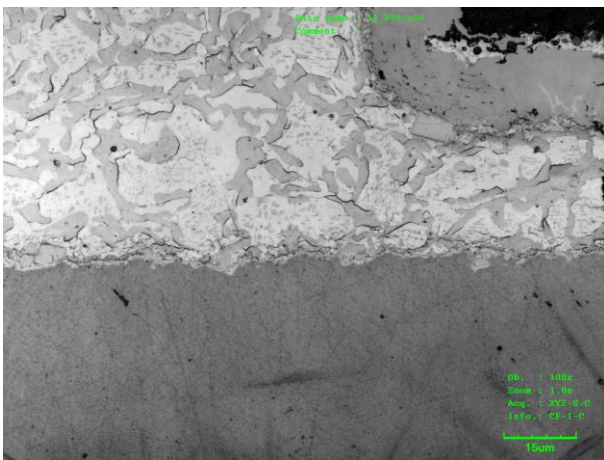
Obr. 96 *BiSnAg\_P3\_Au\_120-32*



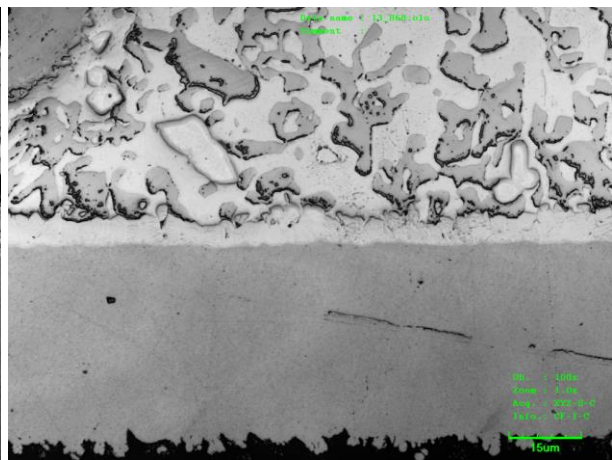
Obr. 97 *BiSnAg\_P4\_Sn\_Ne*



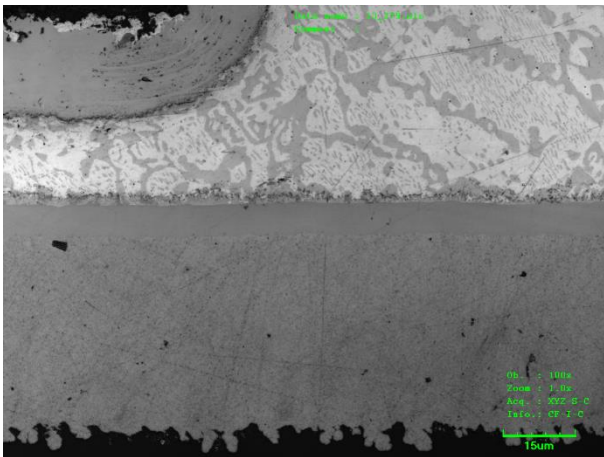
Obr. 98 *BiSnAg\_P4\_Sn\_120-32*



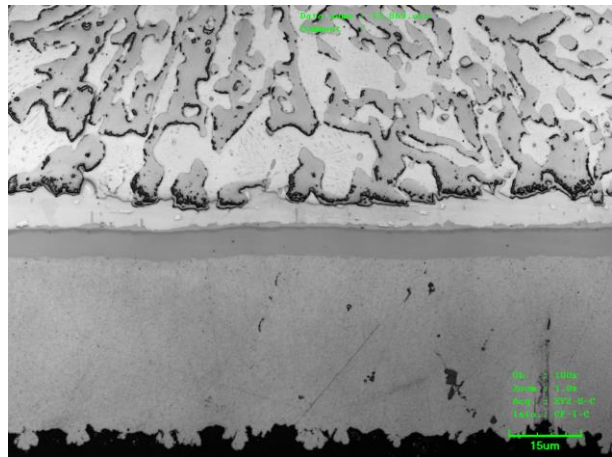
Obr. 99 *BiSnAg\_P4\_Ag\_Ne*



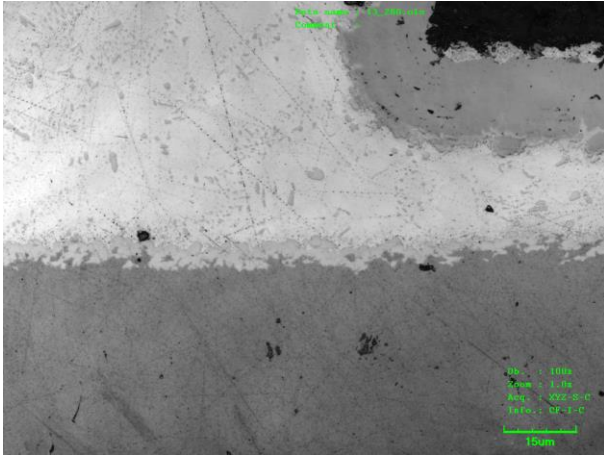
Obr. 100 *BiSnAg\_P4\_Ag\_120-32*



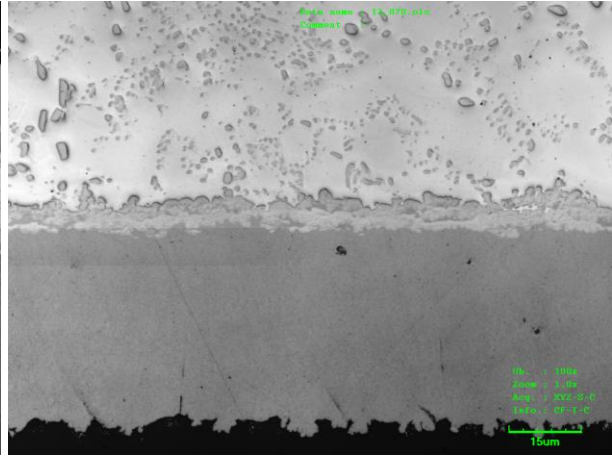
Obr. 101 *BiSnAg\_P4\_Au\_Ne*



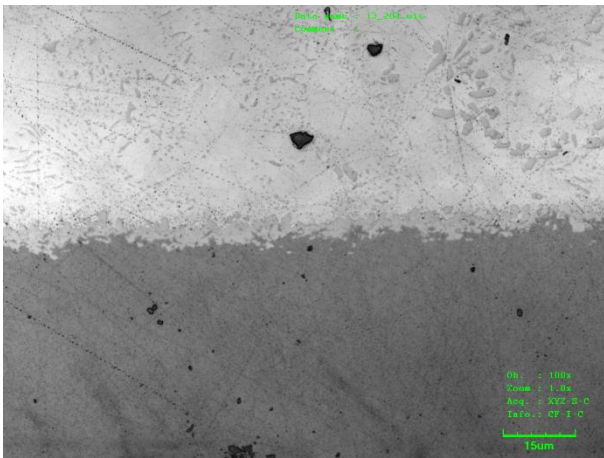
Obr. 102 *BiSnAg\_P4\_Au\_120-32*



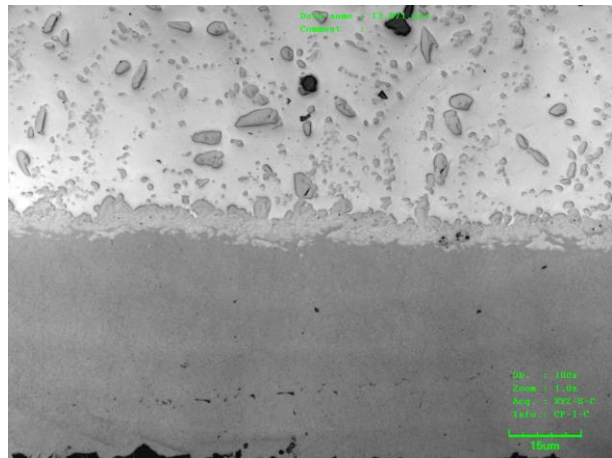
Obr. 103 SAC305\_P5\_Sn\_Ne



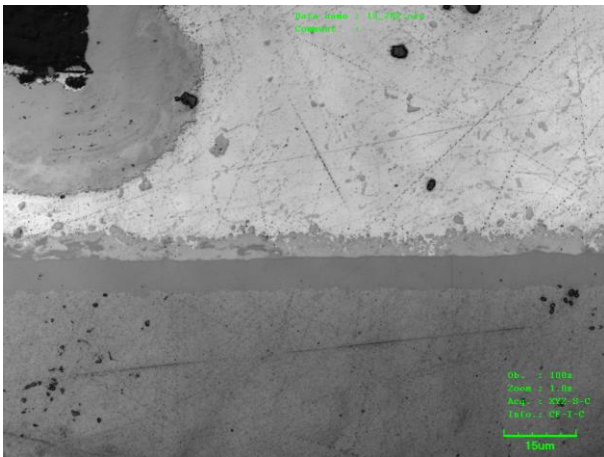
Obr. 104 SAC305\_P5\_Sn\_120-32



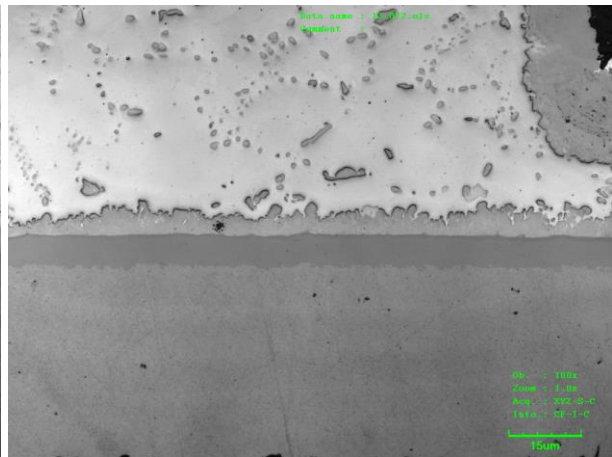
Obr. 105 SAC305\_P5\_Ag\_Ne



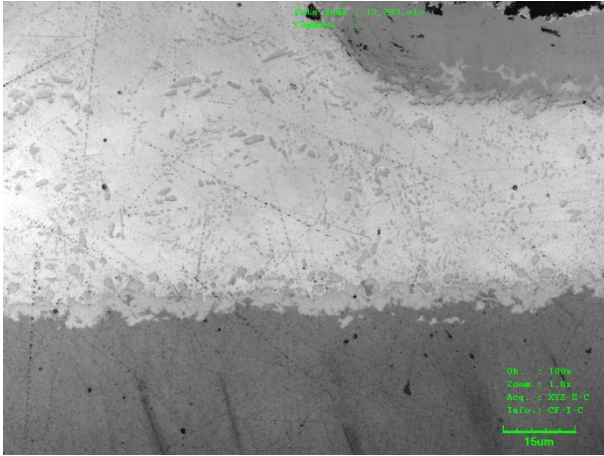
Obr. 106 SAC305\_P5\_Ag\_120-32



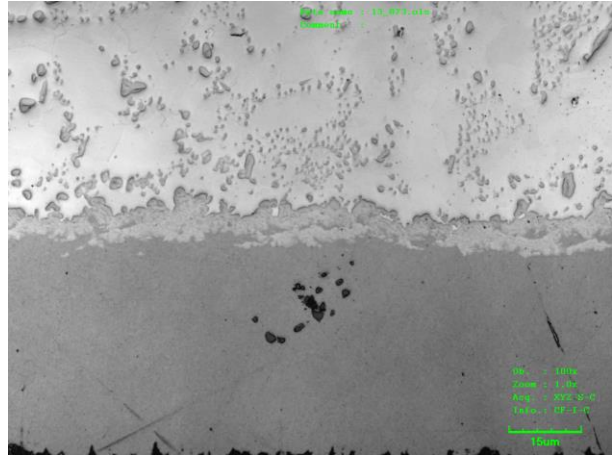
Obr. 107 SAC305\_P5\_Au\_Ne



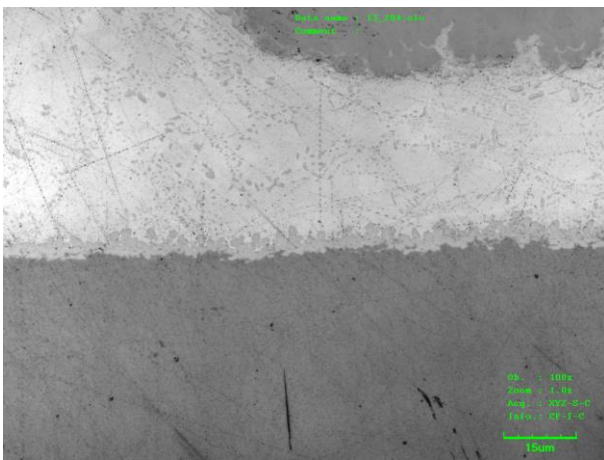
Obr. 108 SAC305\_P5\_Au\_120-32



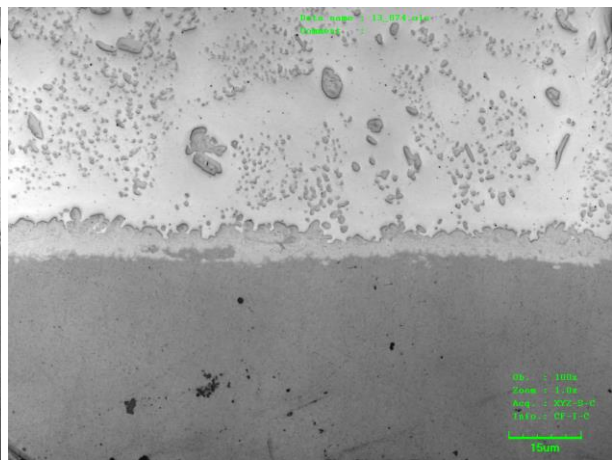
Obr. 109 SAC305\_P6\_Sn\_Ne



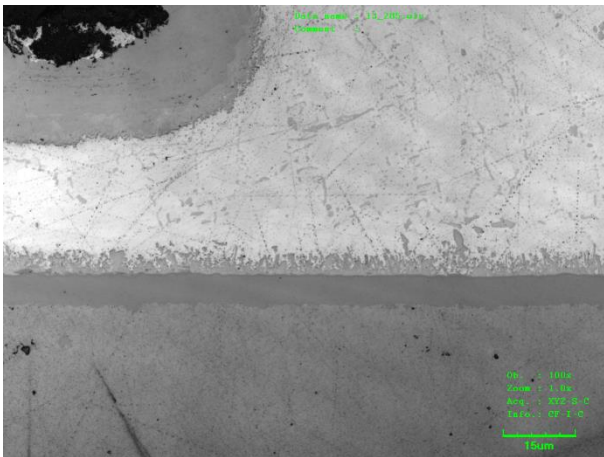
Obr. 110 SAC305\_P6\_Sn\_120-32



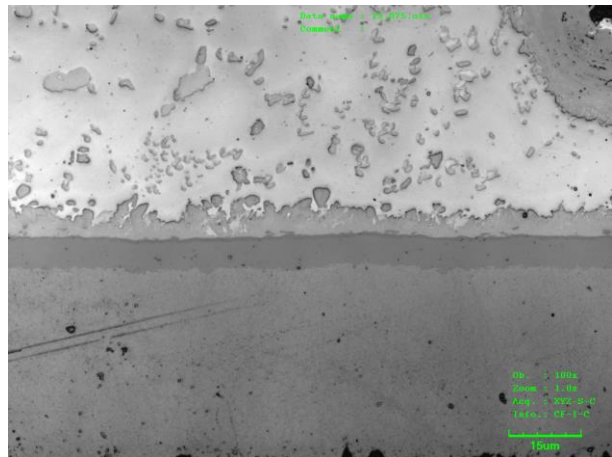
Obr. 111 SAC305\_P6\_Ag\_Ne



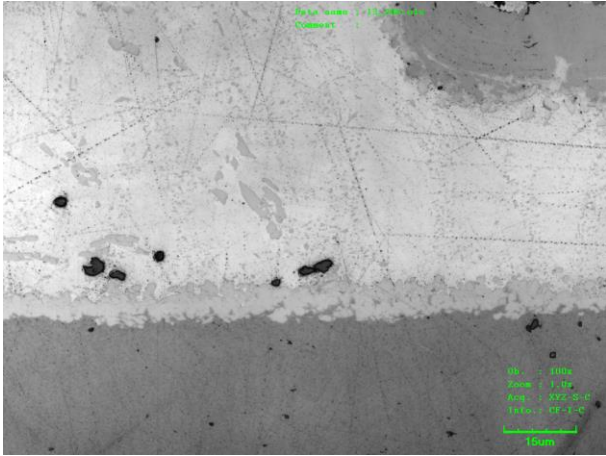
Obr. 112 SAC305\_P6\_Ag\_120-32



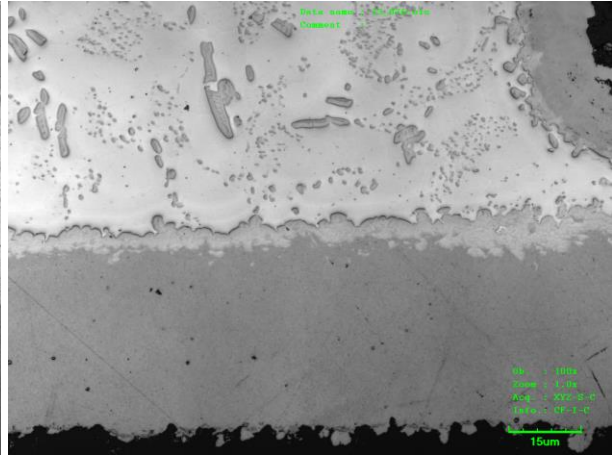
Obr. 113 SAC305\_P6\_Au\_Ne



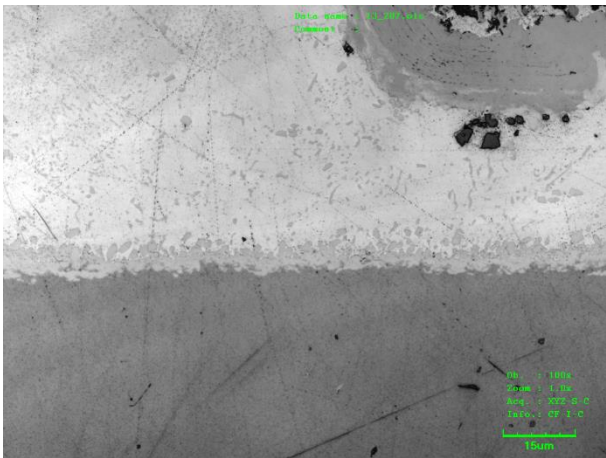
Obr. 114 SAC305\_P6\_Au\_120-32



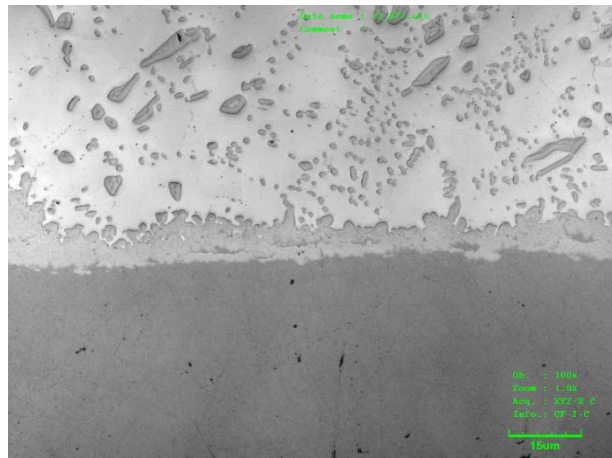
Obr. 115 SAC305\_P7\_Sn\_Ne



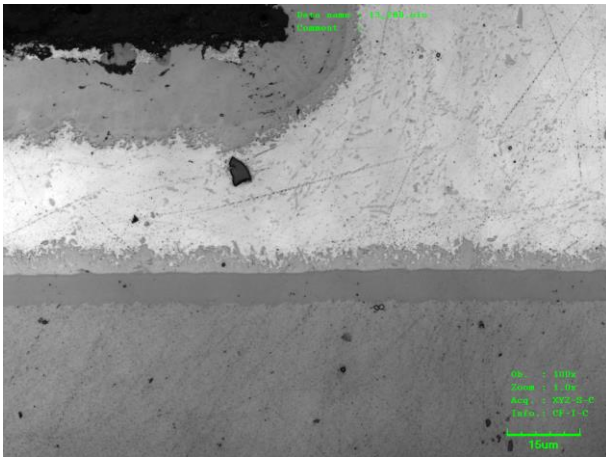
Obr. 116 SAC305\_P7\_Sn\_120-32



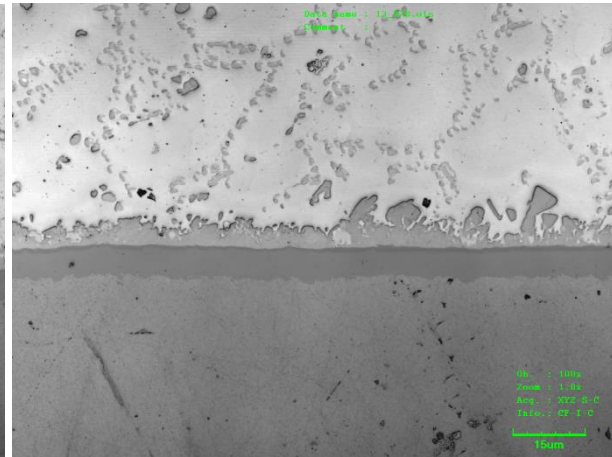
Obr. 117 SAC305\_P7\_Ag\_Ne



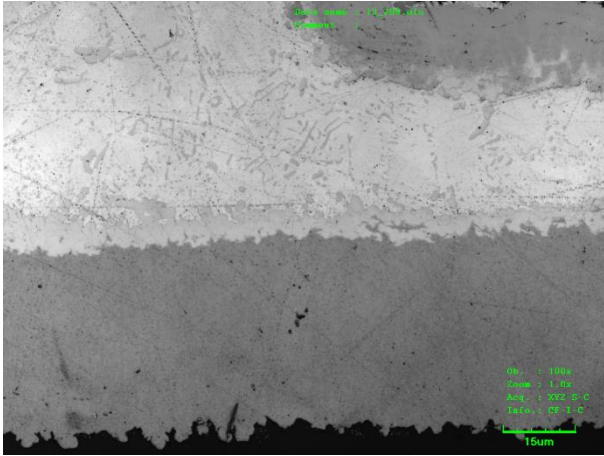
Obr. 118 SAC305\_P7\_Ag\_120-32



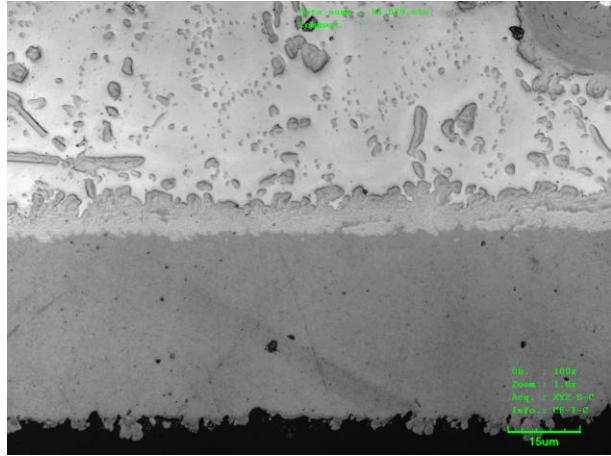
Obr. 119 SAC305\_P7\_Au\_Ne



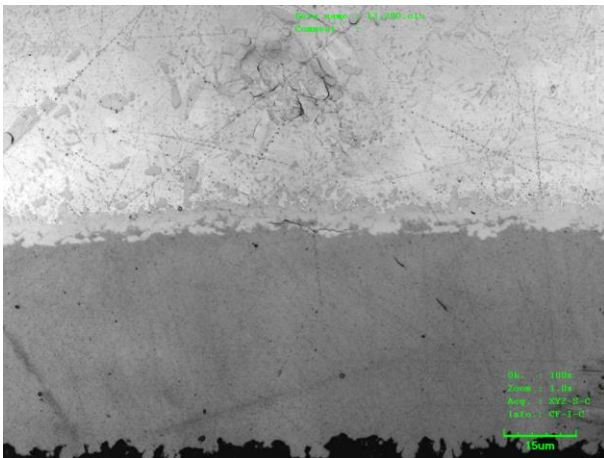
Obr. 120 SAC305\_P7\_Au\_120-32



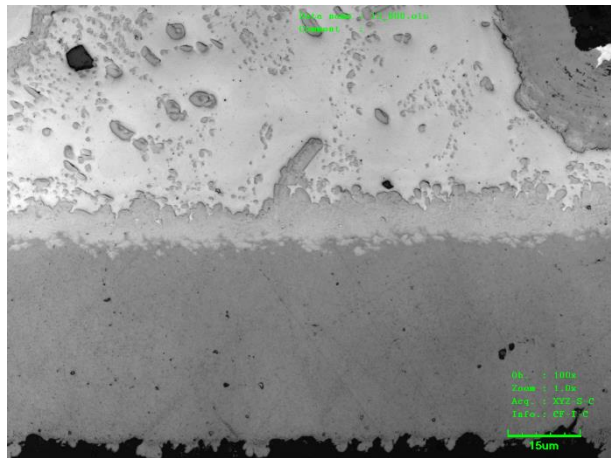
Obr. 121 *Sn100C\_P8\_Sn\_Ne*



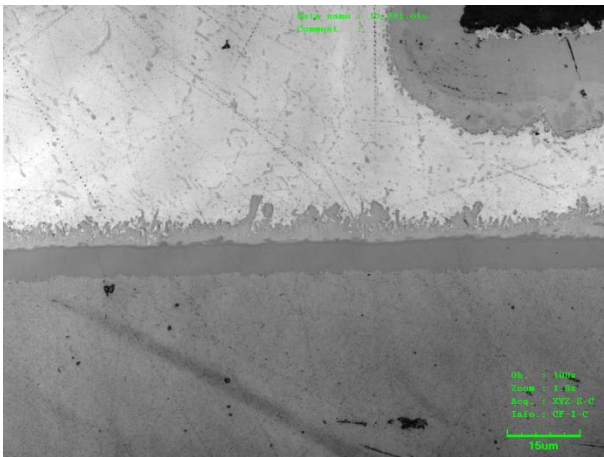
Obr. 122 *Sn100C\_P8\_Sn\_120-32*



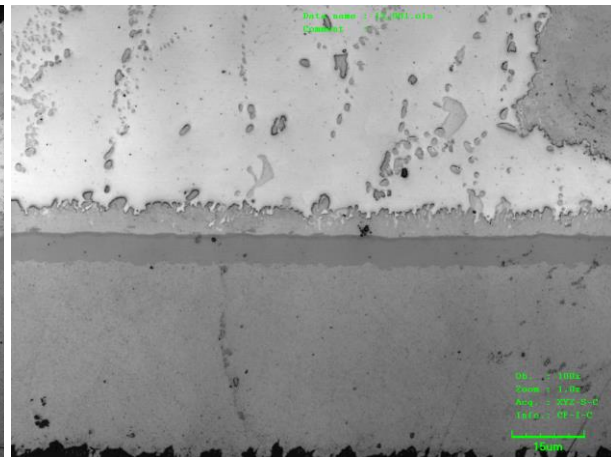
Obr. 123 *Sn100C\_P8\_Ag\_Ne*



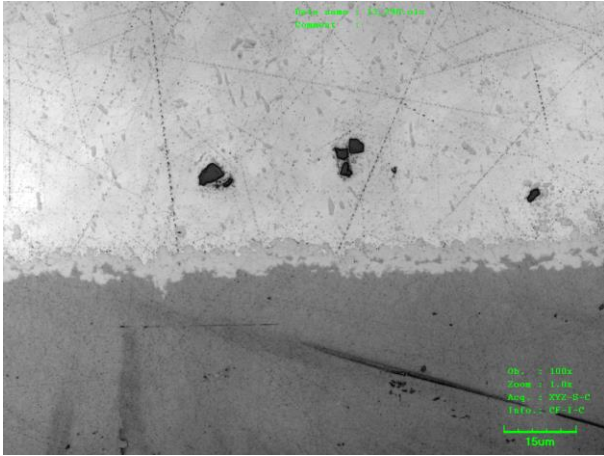
Obr. 124 *Sn100C\_P8\_Ag\_120-32*



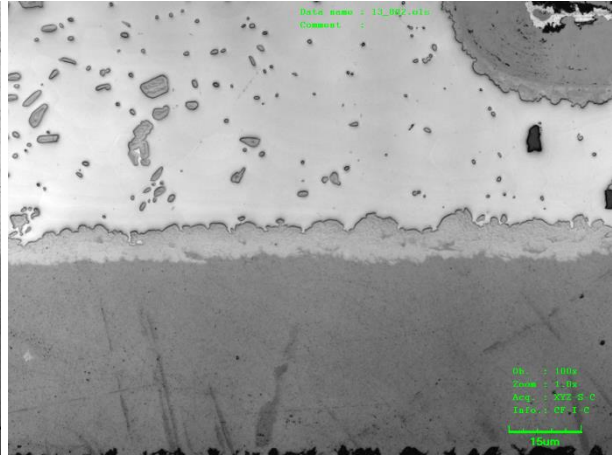
Obr. 125 *Sn100C\_P8\_Au\_Ne*



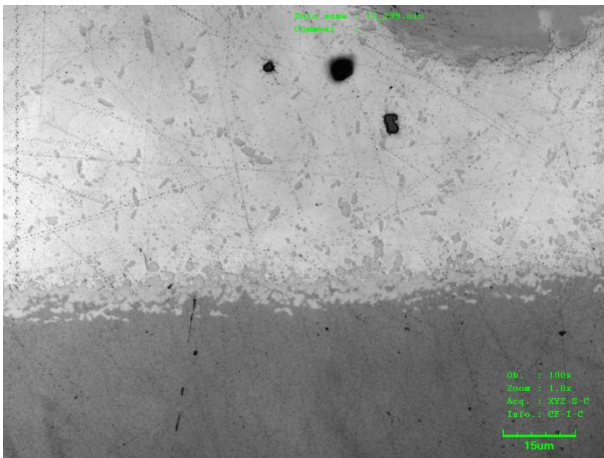
Obr. 126 *Sn100C\_P8\_Au\_120-32*



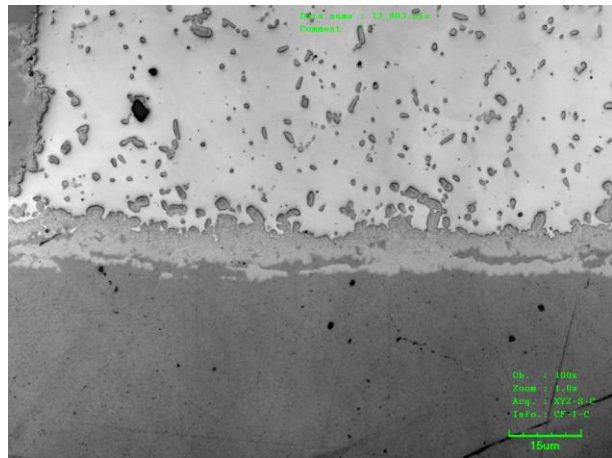
Obr. 127 Sn100C\_P9\_Sn\_Ne



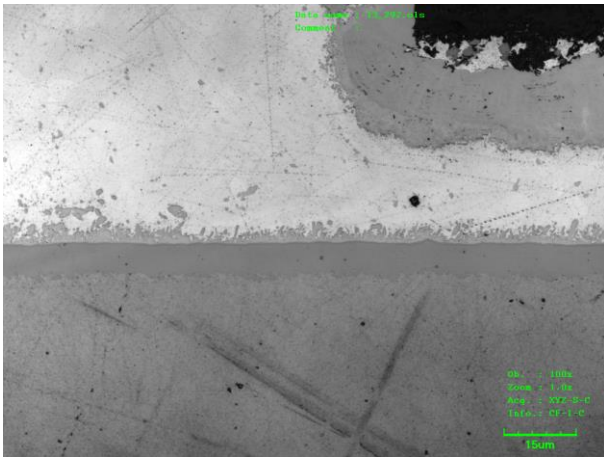
Obr. 128 Sn100C\_P9\_Sn\_120-32



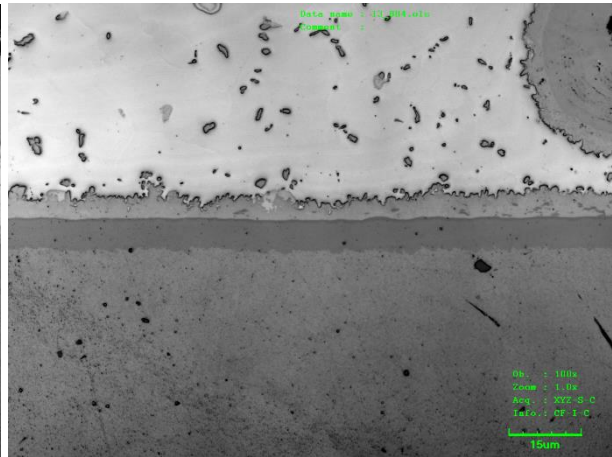
Obr. 129 Sn100C\_P9\_Ag\_Ne



Obr. 130 Sn100C\_P9\_Ag\_120-32

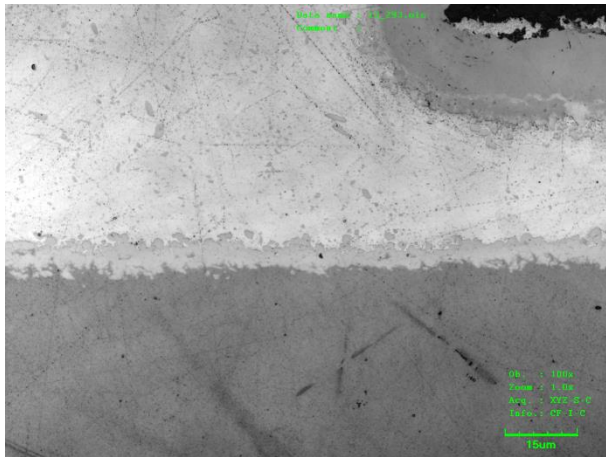


Obr. 131 Sn100C\_P9\_Au\_Ne

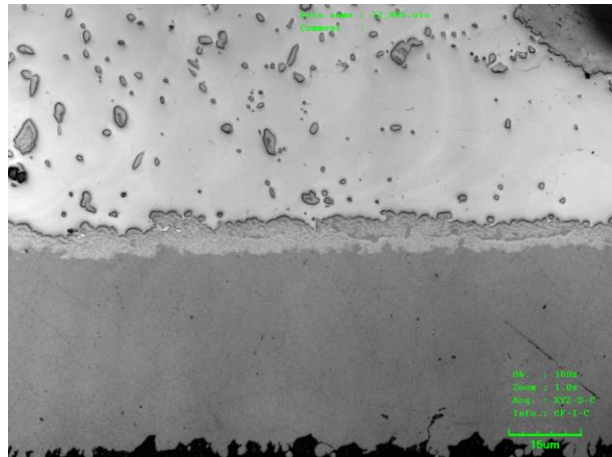


Obr. 132 Sn100C\_P9\_Au\_120-32

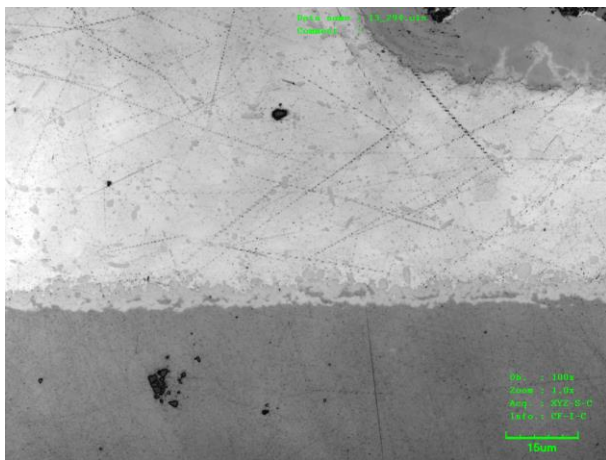




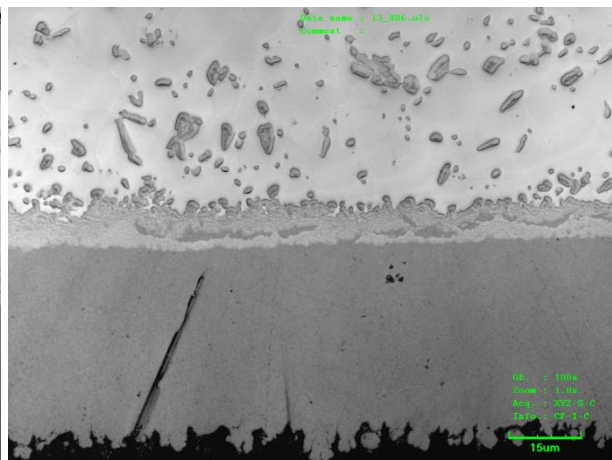
Obr. 133 Sn100C\_P10\_Sn\_Ne



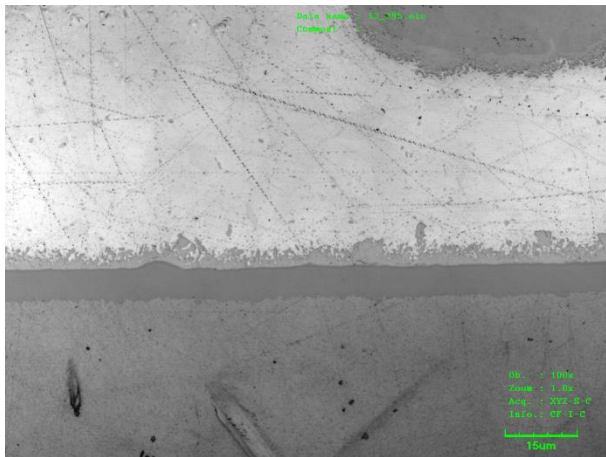
Obr. 134 Sn100C\_P10\_Sn\_120-32



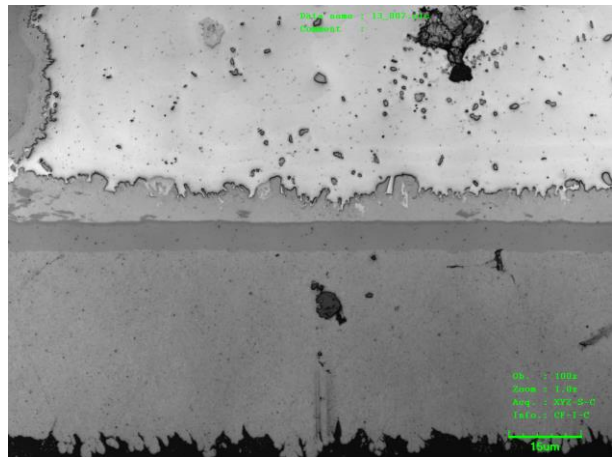
Obr. 135 Sn100C\_P10\_Ag\_Ne



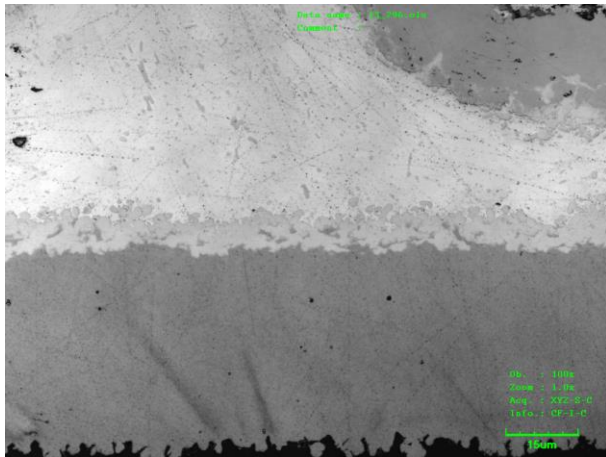
Obr. 136 Sn100C\_P10\_Ag\_120-32



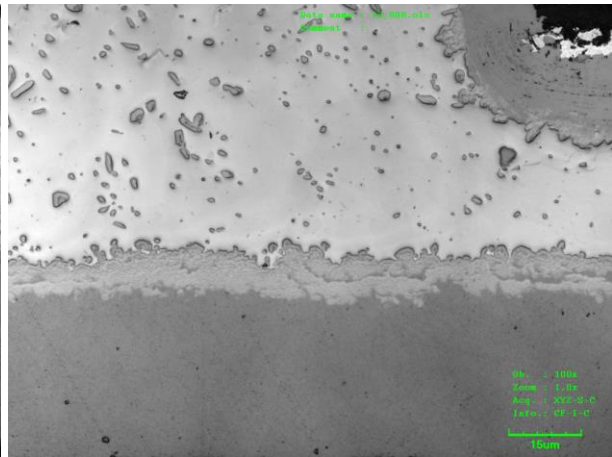
Obr. 137 Sn100C\_P10\_Au\_Ne



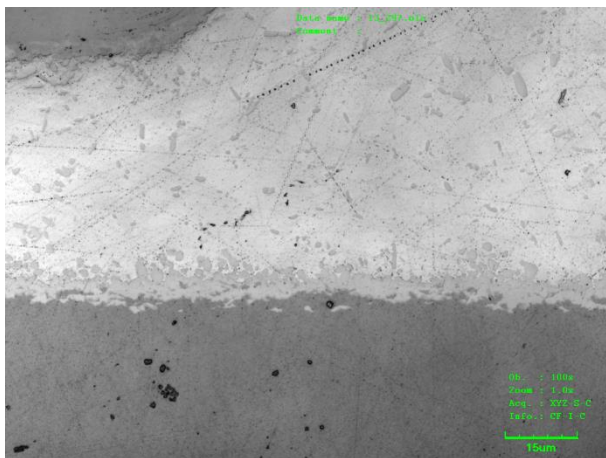
Obr. 138 Sn100C\_P10\_Au\_120-32



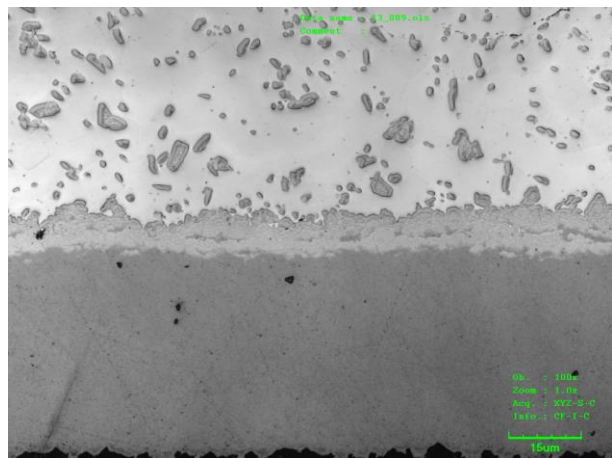
Obr. 139 *Sn100C\_P11\_Sn\_Ne*



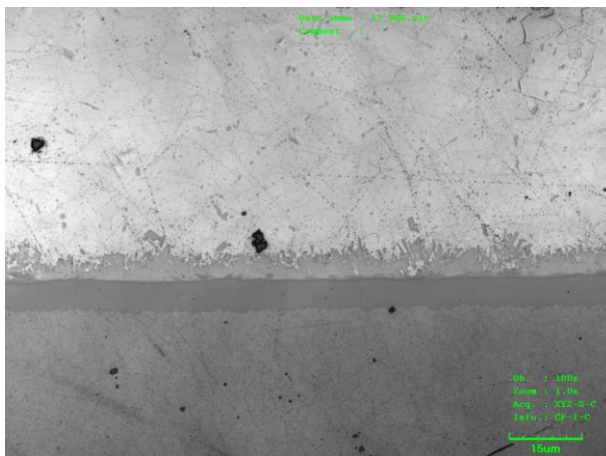
Obr. 140 *Sn100C\_P11\_Sn\_120-32*



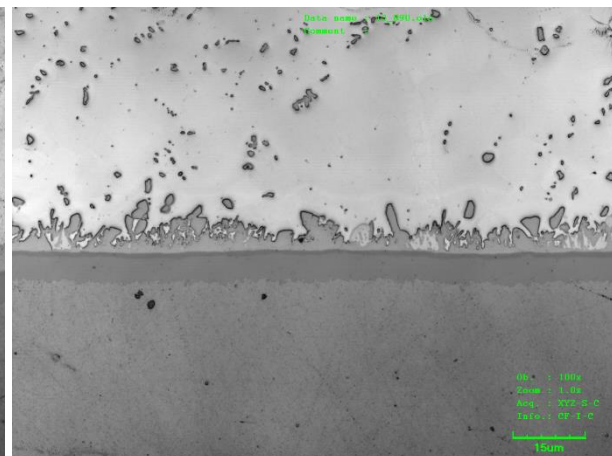
Obr. 141 *Sn100C\_P11\_Ag\_Ne*



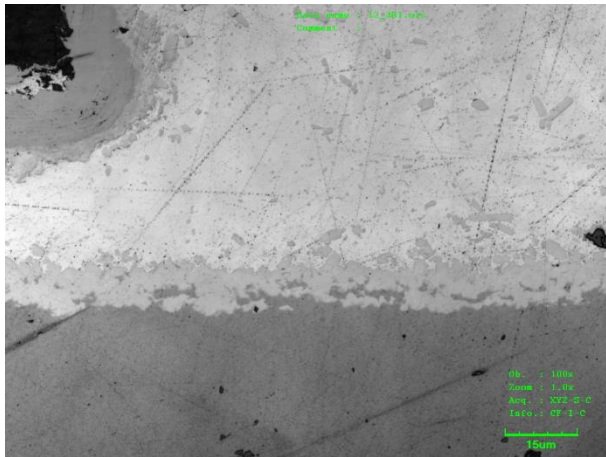
Obr. 142 *Sn100C\_P11\_Ag\_120-32*



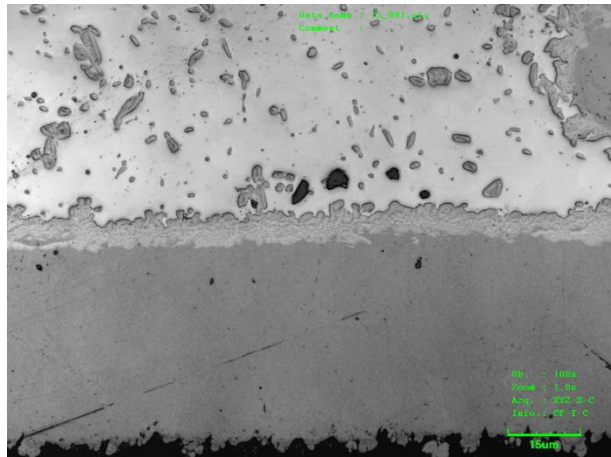
Obr. 143 *Sn100C\_P11\_Au\_Ne*



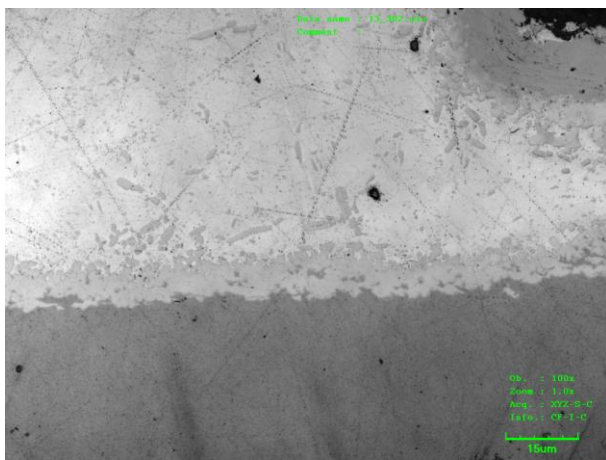
Obr. 144 *Sn100C\_P11\_Au\_120-32*



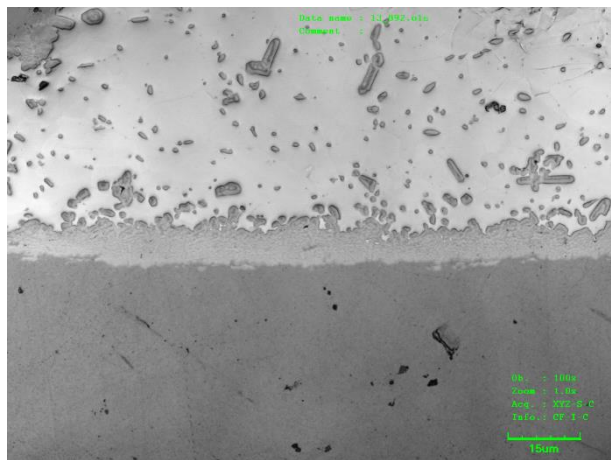
Obr. 145 Sn100C\_P12\_Sn\_Ne



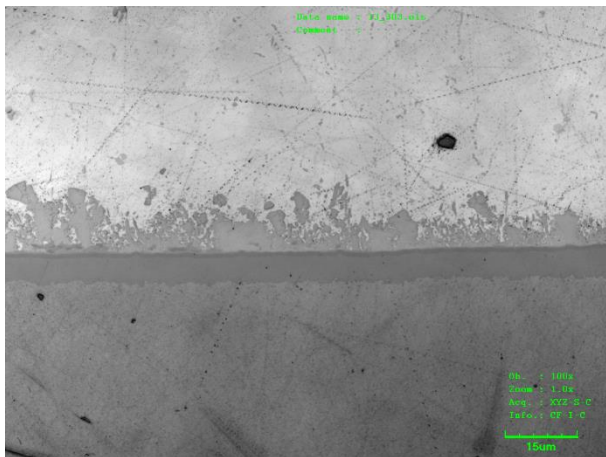
Obr. 146 Sn100C\_P12\_Sn\_120-32



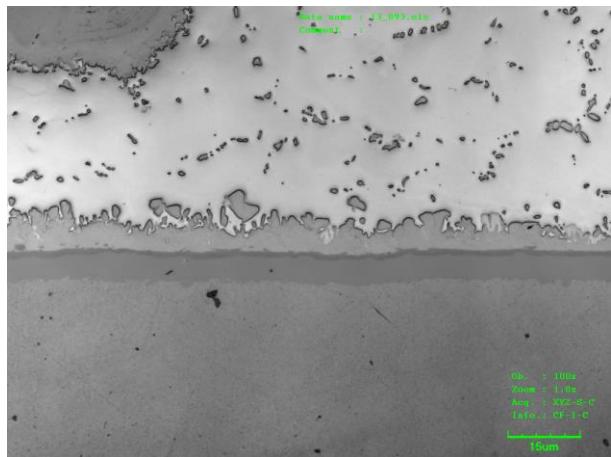
Obr. 147 Sn100C\_P12\_Ag\_Ne



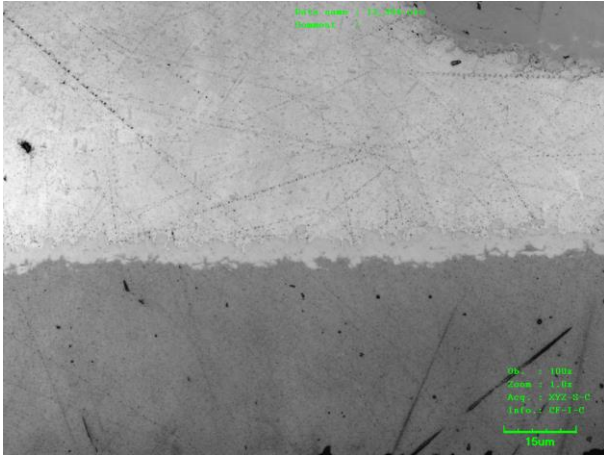
Obr. 148 Sn100C\_P12\_Ag\_120-32



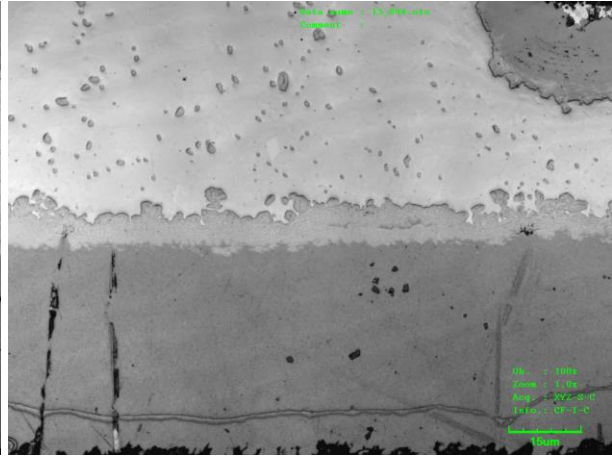
Obr. 149 Sn100C\_P12\_Au\_Ne



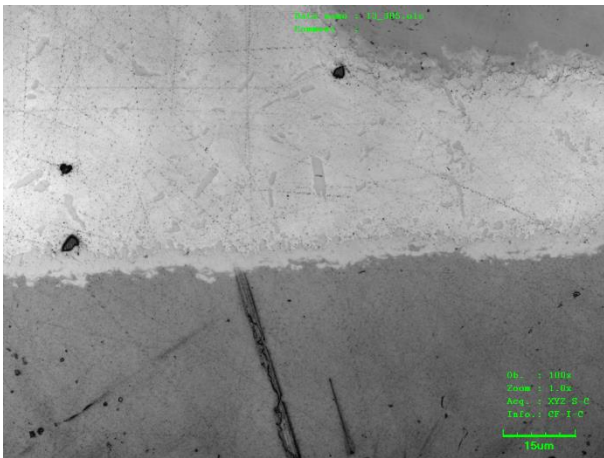
Obr. 150 Sn100C\_P12\_Au\_120-32



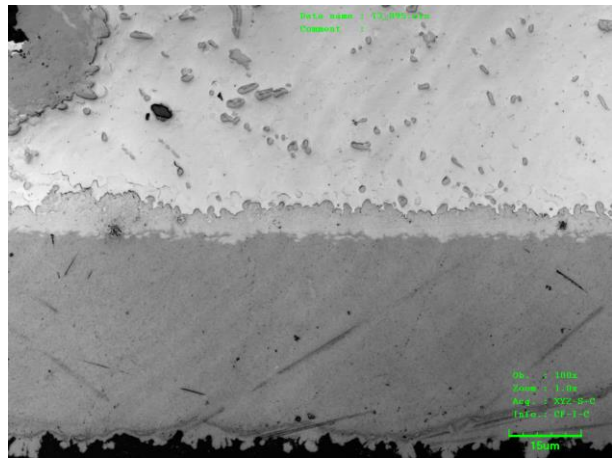
Obr. 151 *SnSb\_P13\_Sn\_Ne*



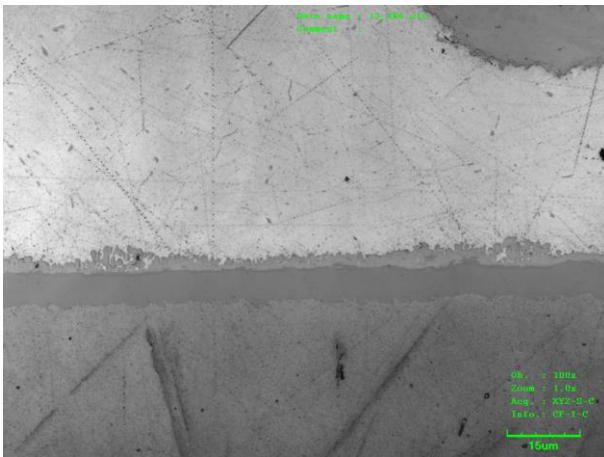
Obr. 152 *SnSb\_P13\_Sn\_120-32*



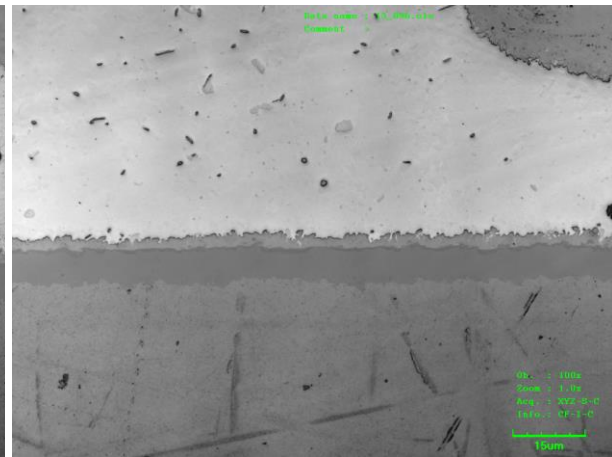
Obr. 153 *SnSb\_P13\_Ag\_Ne*



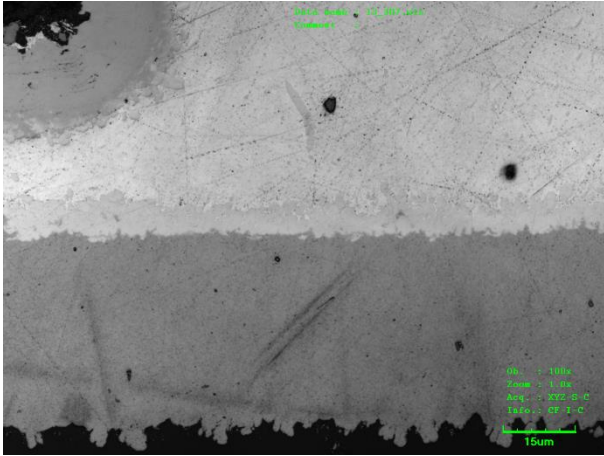
Obr. 154 *SnSb\_P13\_Ag\_120-32*



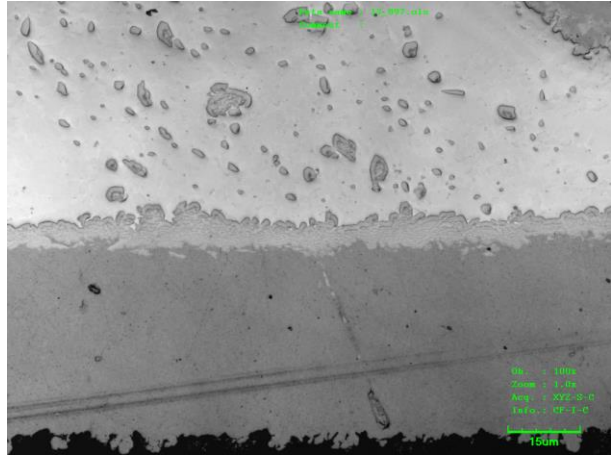
Obr. 155 *SnSb\_P13\_Au\_Ne*



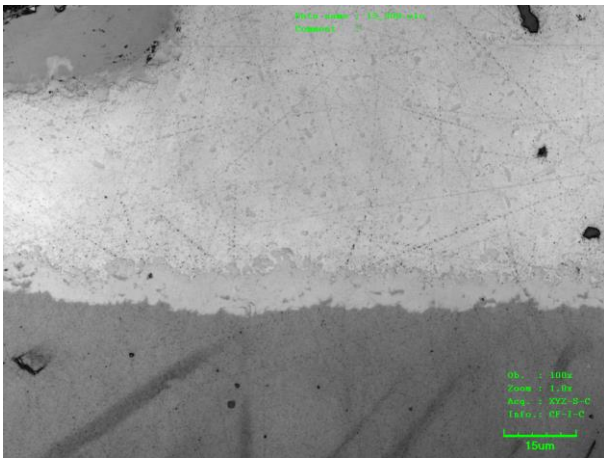
Obr. 156 *SnSb\_P13\_Au\_120-32*



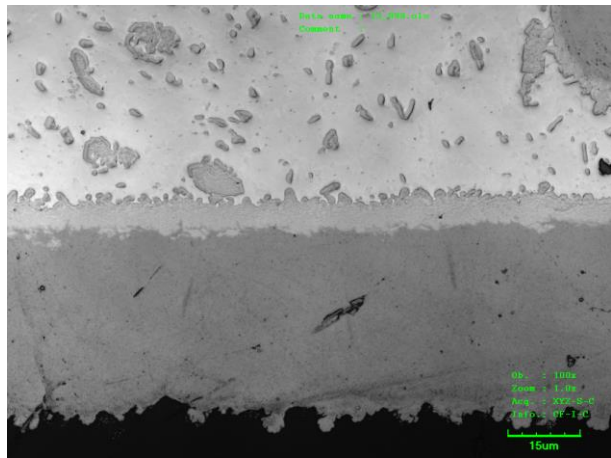
Obr. 157 *SnSb\_P14\_Sn\_Ne*



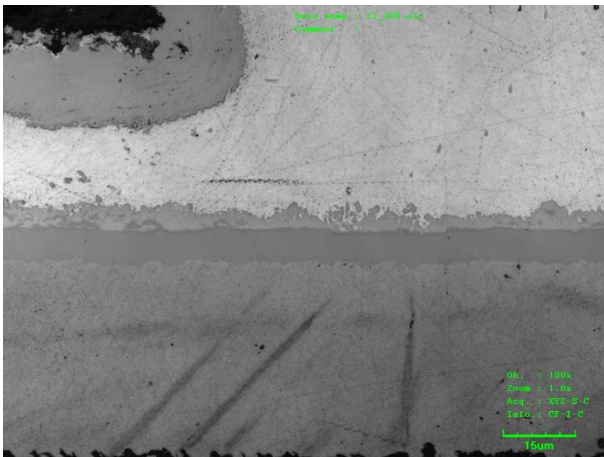
Obr. 158 *SnSb\_P14\_Sn\_120-32*



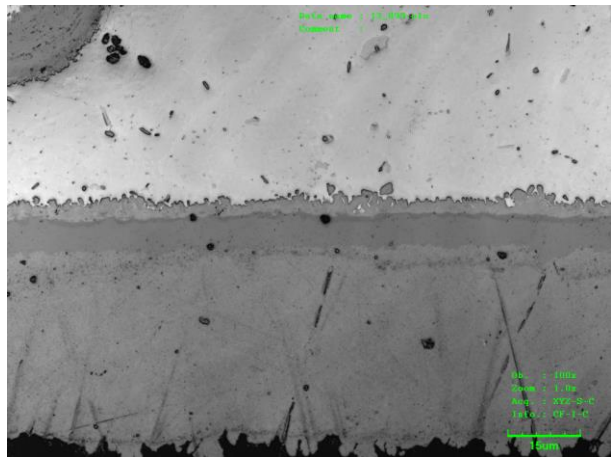
Obr. 159 *SnSb\_P14\_Ag\_Ne*



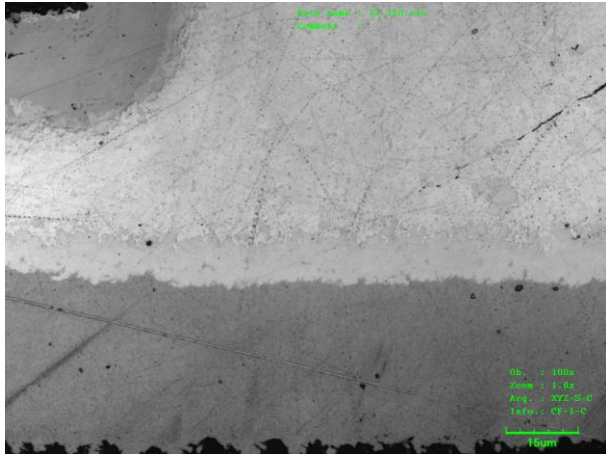
Obr. 160 *SnSb\_P14\_Ag\_120-32*



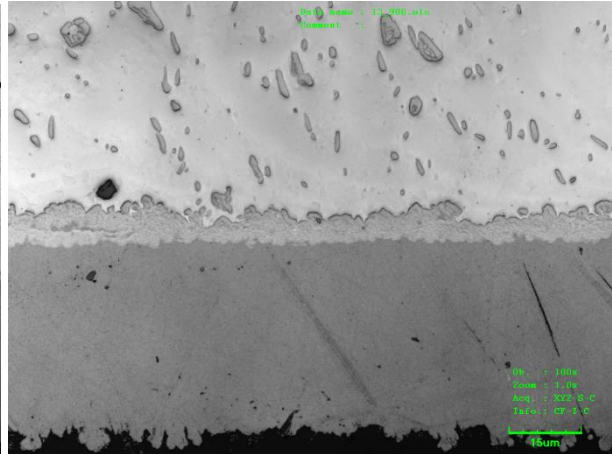
Obr. 161 *SnSb\_P14\_Au\_Ne*



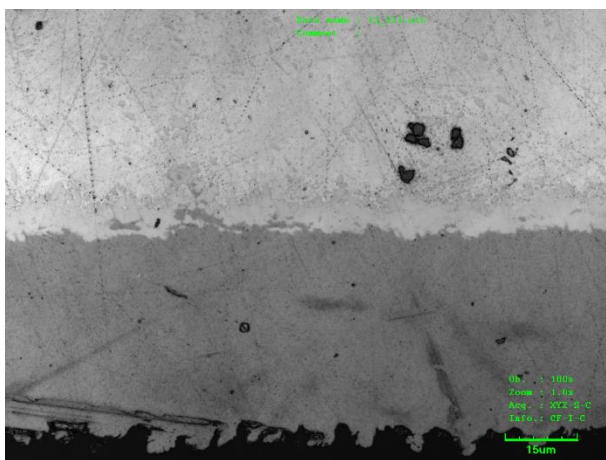
Obr. 162 *SnSb\_P14\_Au\_120-32*



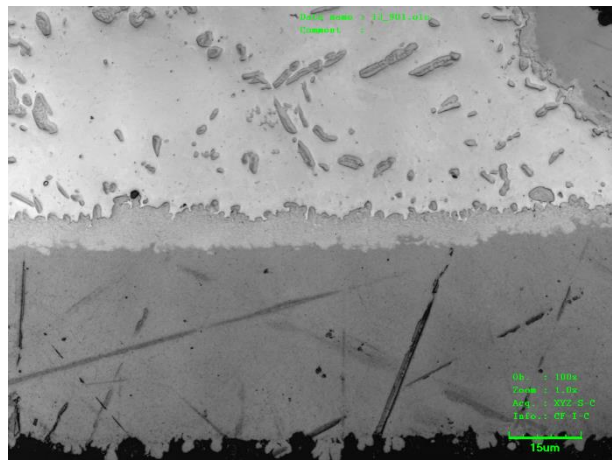
Obr. 163 *SnSb\_P15\_Sn\_Ne*



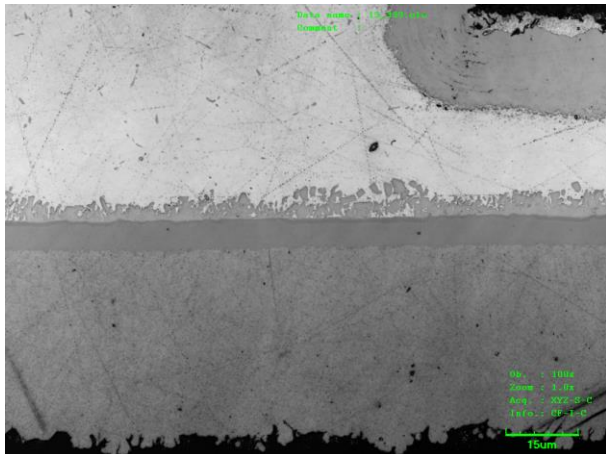
Obr. 164 *SnSb\_P15\_Sn\_120-32*



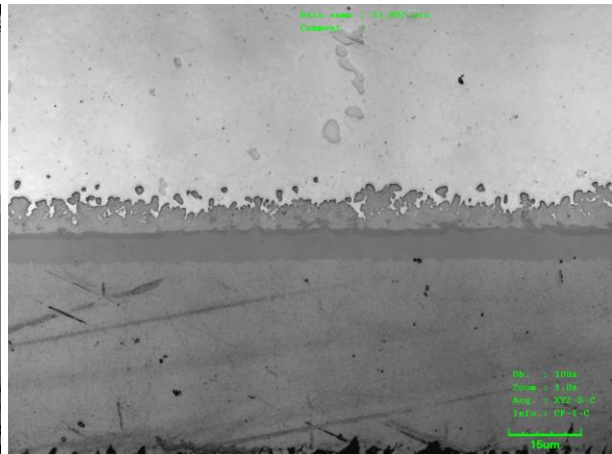
Obr. 165 *SnSb\_P15\_Ag\_Ne*



Obr. 166 *SnSb\_P15\_Ag\_120-32*



Obr. 167 *SnSb\_P15\_Au\_Ne*



Obr. 168 *SnSb\_P15\_Au\_120-32*

## Příloha 4 – Katalogové listy pájecích past

|  <h1>Solder paste</h1> <h2>DP 5600</h2>   |                                  | <b>INTERFLUX®</b><br><b>ELECTRONICS N.V.</b>   |   |   |             |           |             |                                  |       |   |   |                           |  |  |  |  |  |
|--|----------------------------------|---|---|---|-------------|-----------|-------------|----------------------------------|-------|---|---|---------------------------|--|--|--|--|--|
|  |                                  | Technical data DP 5600<br>Ver: 3.11 30-09-15  |   |   |             |           |             |                                  |       |   |   |                           |  |  |  |  |  |
| <p>No-clean, halide free, solder paste for low melting point lead-free alloys</p> <p><b>Description</b></p> <p><b>DP 5600</b> is a no-clean halide free solder paste for low melting point SnBi(Ag) alloys.</p> <p>The solder paste is typically being used for soldering components with sensitivity to high temperatures, like e.g. LEDs, Elcos, components with plastic bodies, etc... Another field of use is the soldering of shieldings.</p> <p><b>DP 5600</b> provides good wetting and clean soldering results without the typical black spots.</p> <p>The paste combines low voiding with a high stability on the stencil.</p> <p><b>DP 5600</b> is absolutely halogen free, providing optimal reliability after soldering.</p> <p>The residues after reflow are minimal and clear.</p> |                                  | <p>Page 1</p> <p><br/>RoHS compliant</p> <p>More information:</p> <p>Reflow profile P. 2</p> <p>Profile recommendations P. 2</p> <p>Product handling P. 3</p> <p>Test results P. 3</p> <p>Operating parameter recommendations P. 4</p> <p>Key advantages:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• High stability on the stencil</li> <li>• Good wetting on many surface finishes</li> <li>• Clean soldering result, no black spots</li> <li>• Low voiding</li> <li>• Low residue after reflow</li> <li>• Absolutely halogen free</li> </ul> |   |   |             |           |             |                                  |       |   |   |                           |  |  |  |  |  |
| <p><b>DP 5600</b> is classified as <b>RO LO</b> according IPC and EN standards.</p>  <p><i>Products pictured may differ from the product delivered</i></p>  |                                  |   |   |   |             |           |             |                                  |       |   |   |                           |  |  |  |  |  |
| <p><b>Availability</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>alloy</th> <th>metal content</th> <th>melting T°</th> <th>powder size</th> <th>packaging</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sn42Bi57Ag1</td> <td>printing: 90%<br/>dispensing: 87%</td> <td>139°C</td> <td>standard type 3 (25– 45µ)<br/><br/>other types upon request</td> <td>jars :250g/500g<br/>cartridges:<br/>6Oz: 500g/600g/700g<br/>12Oz: 1kg/1,2kg/1,3kg/1,5kg<br/>syringes : 5CC/10CC/ 30CC<br/>other packaging upon request</td> </tr> <tr> <td>other alloys upon request</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>   |                                  | alloy   | metal content   | melting T°  | powder size | packaging | Sn42Bi57Ag1 | printing: 90%<br>dispensing: 87% | 139°C | standard type 3 (25– 45µ)<br><br>other types upon request | jars :250g/500g<br>cartridges:<br>6Oz: 500g/600g/700g<br>12Oz: 1kg/1,2kg/1,3kg/1,5kg<br>syringes : 5CC/10CC/ 30CC<br>other packaging upon request | other alloys upon request |  |  |  |  |  |
| alloy  | metal content                    | melting T°  | powder size   | packaging   |             |           |             |                                  |       |   |   |                           |  |  |  |  |  |
| Sn42Bi57Ag1  | printing: 90%<br>dispensing: 87% | 139°C   | standard type 3 (25– 45µ)<br><br>other types upon request | jars :250g/500g<br>cartridges:<br>6Oz: 500g/600g/700g<br>12Oz: 1kg/1,2kg/1,3kg/1,5kg<br>syringes : 5CC/10CC/ 30CC<br>other packaging upon request |             |           |             |                                  |       |   |   |                           |  |  |  |  |  |
| other alloys upon request  |                                  |   |   |   |             |           |             |                                  |       |   |   |                           |  |  |  |  |  |

S.A. INTERFLUX® ELECTRONICS N.V - Eddastraat 51 - BE-9042 Gent - Belgium  
 tel.: +32 9251 49 59 - fax.: +32 9251.4970  
 www.interflux.com - Info@interflux.com

Obr. 169 Katalogový list pájecí pasty BiSnAg – 1. strana



## Reflow profile

### **General**

In general a ramp profile or a profile with limited soak is advised. Also soak profiles are possible. Soak profiles may be used when temperature differences across a board, due to a high mix of components or

large board sizes, need to be levelled out.

The low melting temperature drastically reduces the risk on overheating.

However, when soldering an assembly using air convection or

IR, care must be taken not to overheat components. It is very important to know the temperature limitations of the components used on the board. To get a good thermal mapping of the board it is advised to use thermocouples

and a thermal measuring tool. Measure on small outline, big outline and temperature sensitive components. Measure on the board side near the conveyor chain, in the middle of the board and close to, or on heat sinks.

## Profile recommendations for SnBi and SnBiAg alloys

### **Preheat**

From room temperature until about 120°C (248°F) at a rate of 1-3°C/seconds.

Higher heating rates could result in component cracking due to absorbed moisture.

### **Soak**

Between about 100°C (212°F) and 120°C (248°F), a temperature

holding soak zone is often used at a rate of 0°C/s - 1°C/s to level out differences on a board.

### **Ramp-up to reflow**

Maximum 4°C/s because of differences in thermal expansion of different materials on the PCB.

### **Reflow**

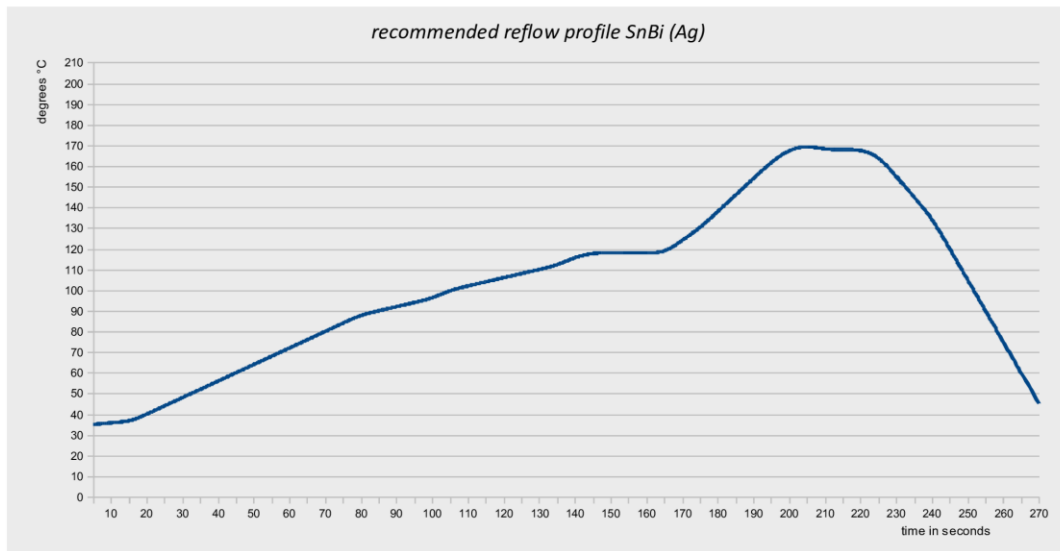
Peak temperature used is related to alloy melting point. In general between 160°C (320°F) and 190°C (374°F). The time in liquidus (over melting point of the alloy used) could be between 30 seconds and 90 seconds.

NiAu (ENIG) board finishes will require a

higher peak temperature to get nice and even solder joint cosmetics.

### **Cooling**

Cooling rate around -4°C/s because of differences in thermal expansion of different materials.



SA. INTERFLUX® ELECTRONICS N.V. - Eddastraat 51 - BE-9042 Gent - Belgium  
tel.: +32 9251 49 59 - fax.: +32 9251.4970  
www.interflux.com - Info@interflux.com





# Solder Paste

## DP 5505

INTERFLUX®  
ELECTRONICS N.V.



Technical data DP 5505  
Ver: 2.1 07-03-13  
latest version on [www.interflux.com](http://www.interflux.com)

Page 1

### No-clean, halide free, lead-free solder paste

#### Description

**DP 5505** is a no-clean, halide free and lead-free solder paste that has been designed to minimize the 'hidden pillow' defect on bga's.

It has high resistance against moisture and elevated temperatures.

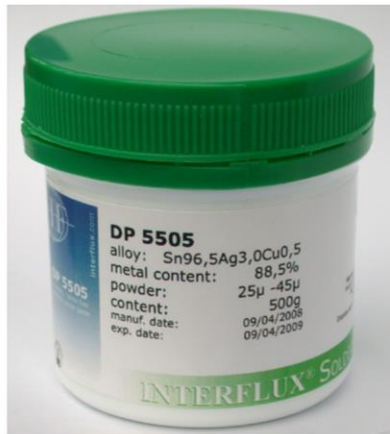
The rheology of **DP 5505** allows for very fast printing speeds, even on small apertures and is excellent for Pin in Paste applications.

Furthermore, the chemistry of **DP 5505** has been designed to minimize void formation. It meets IPC 7095 voiding performance class 3.

**DP 5505** is halide free providing optimal reliability after soldering.

The residues after reflow are minimal and clear, they are easy to be penetrated by flying probe- and ICT-test pins.

**DP 5505** is classified as **RO LO** according to IPC and EN standards.



#### More information:

|  |             |
|--|-------------|
| <i>Reflow profile</i>                      | <i>P. 2</i> |
| <i>Profile recommendations</i>             | <i>P. 2</i> |
| <i>Product handling</i>                    | <i>P. 3</i> |
| <i>Test results</i>                        | <i>P. 3</i> |
| <i>Operating parameter recommendations</i> | <i>P. 4</i> |

#### Key advantages:

- High stability / High abandon time
- Optimised formula to prevent the 'hidden pillow' defect on bga's
- Wide process window
- Low voiding
- Low residue after reflow
- Absolutely halogen free

#### Availability

| alloy            | metal content       | powder size  | packaging                           |
|------------------|---------------------|--|-------------------------------------|
| Sn96,5Ag3Cu0,5   | printing:<br>88-89% | Standard type 3<br>(25— 45µ)                         | 500g jar                            |
| Sn95,5Ag3,8Cu0,7 |                     |  | 1kg—1,2kg—1,3kg in 12 Oz. cartridge |
| Sn95,5Ag4Cu0,5   | dispensing:<br>85%  | Type 4 and type<br>5 available for<br>certain alloys | 5cc— 10cc— 30cc syringe             |
| Sn99Ag0,3Cu0,7   |                     |  | Other packaging upon request        |
| Sn98,5Ag0,8Cu0,7 |                     |  |                                     |
| Sn96,5Ag3,5      |                     |  |                                     |
| Sn95,8Ag4,2      |                     |  |                                     |
| Sn99,3Cu0,7      |                     |  |                                     |

N.V. INTERFLUX® ELECTRONICS S.A. - Eddastraat 51—BE-9042 Gent  
tel.: +32-9-251.49.59—fax.: +32-9-251.49.70  
[www.interflux.com](http://www.interflux.com)



### Reflow profile for SAC, SnCu and SnAg alloys

#### General

In general a profile with limited soak is advised. Also ramp profiles and soak profiles are possible. Soak profiles may be used when temperature differences across a board, due to a high mix of components or large board sizes, need to be levelled

out or when voids, if present, need to be decreased.

When soldering an assembly in a lead free solder process, care must be taken not to overheat components especially when using air convection or IR ovens. It is very important to know the temperature

limitations of the components used on the board. To get a good thermal mapping of the board it is advised to use thermocouples and a thermal measuring tool. Measure on small outline, big outline and temperature sensitive components. Measure on the board side near the conveyor chain, in the

middle of the board and close to, or on heat sinks.

### Profile recommendations (SnAgCu, SnCu and SnAg type alloys)

#### Preheat

From room temperature until about 200°C at a rate of 1-3°C/seconds. Higher heating rates could result in component cracking due to absorbed moisture.

#### Soak

From 180°C to about 200°C at a rate of 0-1°C/seconds.

In some cases a temperature holding soak zone is used to level out differences on a board. It is often used on high mix boards or to reduce voids in certain lead free proc-

esses. A 30-90 sec soak between 180°C and 200°C is often used for this purpose.

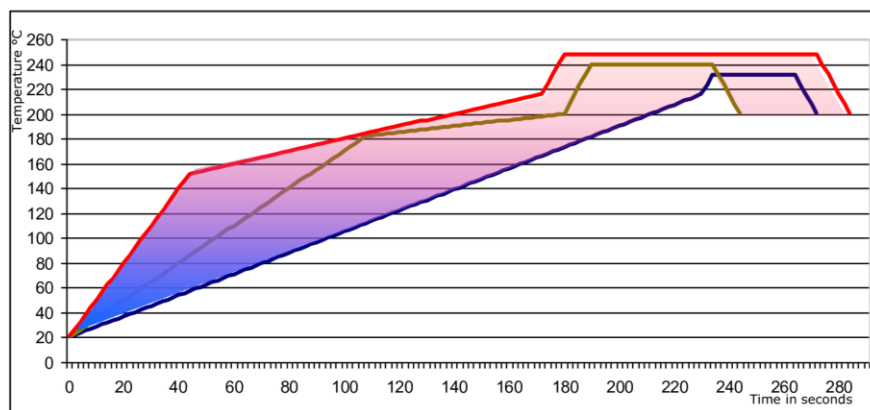
#### Reflow

Peak temperature used is related to component specifications. In general between 235°C and 250°C. The time in liquidus (over melting

point of the alloy used) could be between 45 seconds and 90 seconds.

#### Cooling

Cooling rate around -4°C/second because of differences in thermal expansion of different materials



N.V. INTERFLUX® ELECTRONICS S.A. - Eddastraat 51—BE-9042 Gent  
tel.: +32-9-251.49.59—fax.: +32-9-251.49.70  
www.interflux.com

Obr. 172 Katalogový list pájecí pasty SAC305 – 2. strana



# Electronic

## Technical Data Sheet

### BALVER ZINN SOLDERPASTE

#### RMA H-1 FDQ

#### SN100C (SnCu0,7Ni)

# BALVER ZINN®

#### General information

**BALVER ZINN SOLDER PASTE RMA H-1 FDQ SN100C** is a lead-free no clean solder paste based on **SN100C** for air or nitrogen reflow applications. The specially flux composition of **RMA H-1 FDQ SN100C** gives excellent print and reflow characteristics with **SN100C**. The soldering residues of **BALVER ZINN SOLDER PASTE RMA H-1 FDQ SN100C** are concentrated around the pad. **BALVER ZINN SOLDER PASTE RMA H-1 FDQ SN100C** is a no clean formulation. The residues can remain on the board after reflow and will not interfere with in-circuit test. The paste flux system of **BALVER ZINN SOLDER PASTE RMA H-1 FDQ SN100C** shows long tack life and long stencil life. The paste flux compositions enables reflow profiles with a peak temperature of 240°C - 250°C and enables a wide process window with lead free solders. We recommend a temperature of 240°C for vapour phase soldering. **BALVER ZINN SOLDER PASTE RMA H-1 FDQ SN100C** is available as a licensed lead free alloy. SN100C-SnCu0,7Ni (EU 0985486; JPN 3152945; US 6180055).

\***BALVER ZINN SOLDER PASTE RMA H-1 FDQ SN100C** does not contain hazardous substances beyond the limits prescribed by EU Directive 2002/95/EG ("RoHS").

Technical information and further Technical Data Sheets can be found on our website ([www.BALVERZINN.com](http://www.BALVERZINN.com)). You can also obtain all information and documents directly from **BALVER ZINN**.

#### BALVER ZINN Production Programme

The **BALVER ZINN** production programme also includes solder pastes, flux and solder wires. Beside the **SN100C** product family, **BALVER ZINN** offers additional unpatented and patented solder alloys for wave soldering, reflow and rework.

#### Product Properties

- Flux classified according to J-STD-004 as: **ROL1**
- Paste classified according to EN 61190 -1-2: **ROL1**
- RoHS compliant\*
- Compatible with RoHS conform solder masks
- Bright and shiny solder joints with SN100C
- Long tack time.
- Excellent print results with 16 and 20 mils pitch.

#### Physical and Chemical Properties of flux RMA H-1 FDQ

|   |         |
|---|---------|
| <b>Metal content:</b>   | 87.5 %  |
| <b>Viscosity:</b><br>Brookfield viscometer @ 10 rpm and 25°C      | 330 Pas |
| <b>Initial Tackiness:</b><br>J-STD-004, IPC-TM-650, Method 2.4.44 | 100 gf  |
| <b>Slump Test:</b><br>JIS-Z-3284 Appendix 7; Appendix 8           | pass    |
| <b>Solder Ball Test:</b><br>JIS-Z-3284 Appendix 11                | pass    |
| <b>Wetting Test:</b><br>JIS-Z-3284 Appendix 10                    | pass    |
| <b>Copper Plate Corrosion:</b><br>JIS-Z-3197 6.6.1                | pass    |
| <b>SIR, IPC:</b><br>J-STD-004, IPC-TM-650, Methode 2.6.3.3        | pass    |

**Standard application:**  
87.5 % Metal for dispensing

**BALVER ZINN SOLDER PASTE RMA H-1 FDQ** is available in SN100C (SnCu0,7Ni) lead free alloy.  
Type 3 powder from 45-20 micron for fine pitch applications.

BALVER ZINN  
Josef Jost GmbH & Co. KG  
Blintropfer Weg 11  
D-58802 Balve  
Page - 1 / 2 -

+49 (0) 2375 / 915-0  
Fax: +49 (0) 2375 / 915-114  
✉ [TECHNIK@BALVERZINN.com](mailto:TECHNIK@BALVERZINN.com)  
🌐 [www.BALVERZINN.com](http://www.BALVERZINN.com)  
Date: 09.08.2010 / Revision: 2.0 TA/PC

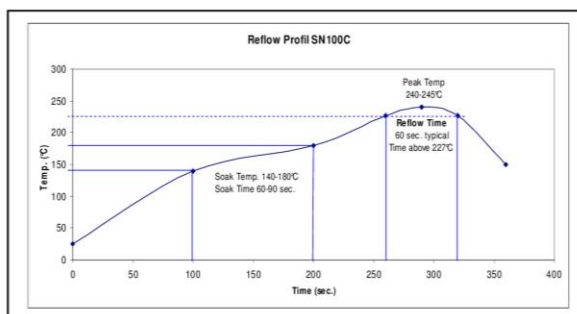
**Geschäftsführer:** Josef Jost, Gregor Jost  
**Balver Zinn:** HRA 4705  
**Jost-Verwaltungs-GmbH:** HRB 5121  
**Gerichtsstand:** Arnsberg  
**UST-Id-Nr.:** DE 125570384

# Electronic Technical Data Sheet BALVER ZINN SOLDERPASTE RMA H-1 FDQ SN100C (SnCu0,7Ni)



## Recommended Reflow Profile:

The recommended reflow profile for **BALVER ZINN SOLDER PASTE RMA H-1 FDQ SN100C** offers a wide process window allowing adjustment to suit component board loadings. The illustrated profile is based on a full convection reflow system.



## Printing Parameters:

DEK ProFlow and MPM Pumphead approved

|                      |   |
|----------------------|---|
| Squeegee Blade       | Stainless steel                                     |
| Squeegee Speed       | Capable of a max. printing speed of 150mm/sec       |
| Stencil Material     | Stainless steel                                     |
| Temperature/Humidity | Optimal conditions are 21-25°C and 35-65% humidity. |

## Cleaning:

**BALVER ZINN SOLDER PASTE RMA H-1 FDQ SN100C** is a no clean formulation, the residues left on the board are non-conductive and non-corrosive and do not require removal in most applications. Although it is a No Clean formulation, the residues can be easily removed with a variety of cleaning agents used in automated cleaning systems.

## Delivery sizes:

Syringe/Cartridges: 5cc, 10cc, 30cc, 60cc, 120cc

## Storage and shelf life:

It is recommended that **BALVER ZINN SOLDER PASTE RMA H-1 FDQ SN100C** is stored in clean dry conditions with temperature 5-10°C to maintain consistent reflow and print characteristics. **BALVER ZINN SOLDER PASTE RMA H-1 FDQ SN100C** should be equalized to room temperature prior to printing (minimum 8 hours). Do not use excessive heating. The time of storage in the original packaging at a temperature of 5 – 10°C amounts to 6 months in doses and 4 months in syringes or cartridges.

## Safety Advice

Before use please refer to the appropriate Material Safety Data Sheet.

The information in this Data Sheet is based on data considered accurate. The measured values stated are based on own measurements, but do not represent assured properties or delivery specifications. Because of the vast number of different materials and applications – also with respect to possible protective rights of third parties – Balver Zinn Josef Jost GmbH & Co. KG **cannot** accept any liability.



## OUR GLOBAL PARTNERS FOR LEAD-FREE SOLDERS

|  |  |  |
|--|--|--|
| Nihon Superior Co., Ltd<br>Phone:+81(0) 6-63 80 11 21<br>Fax: +81(0) 6-63 80 12 62<br>E-mail: <a href="mailto:info@nihonsuperior.co.jp">info@nihonsuperior.co.jp</a><br>Web page: <a href="http://www.nihonsuperior.co.jp">www.nihonsuperior.co.jp</a> | DKL Metals Ltd., Avontoun Works<br>Phone:+44 (0)1506-847710<br>Fax: +44 (0)1506-848199<br>E-mail: <a href="mailto:sales@dklmetals.co.uk">sales@dklmetals.co.uk</a><br>Web page: <a href="http://www.dklmetals.co.uk">www.dklmetals.co.uk</a> | Florida CirTech, Inc.<br>Phone:+1 (970) 346-8002<br>Fax: +1 (970) 346-8331<br>E-mail: <a href="mailto:b.gilbert@fctassembly.com">b.gilbert@fctassembly.com</a><br>Web page: <a href="http://www.fctassembly.com">www.fctassembly.com</a> |
|--|--|--|

BALVER ZINN  
Josef Jost GmbH & Co. KG  
Blintropfer Weg 11  
D-58802 Balve  
Page - 2 / 2 -

☎ +49 (0) 2375 / 915-0  
☎ Fax:+49 (0) 2375 / 915-114  
✉ [TECHNIK@BALVERZINN.com](mailto:TECHNIK@BALVERZINN.com)  
🌐 [www.BALVERZINN.com](http://www.BALVERZINN.com)  
📅 Date: 09.08.2010 / Revision: 2.0 TA/PC

**Geschäftsführer:** Josef Jost, Gregor Jost  
**Balver Zinn:** HRA 4705  
**Jost-Verwaltungs-GmbH:** HRB 5121  
**Gerichtsstand:** Amsberg  
**USt-Id-Nr.:** DE 125570384

## Data Sheet

### Ecosolder Paste M10-235C-42-11

| Item   |    | Remarks                       |                           |   |
|--------|----|-------------------------------|---------------------------|---|
| Powder | 1  | Alloy composition             | Sn:Bal<br>Sb:5            | ---   |
|        | 2  | Melting point                 | 240~243°C                 | DSC<br>Differential Scanning Calorimeter          |
|        | 3  | Shape                         | Spherical type            | Microscope  |
|        | 4  | Size                          | 25~45µm                   | Microscope and<br>Laser Diffraction Method        |
| Flux   | 5  | Chlorine content              | 0.05%                     | Potentiometric<br>Titration Method                |
|        | 6  | Insulation resistance         | over 1X10 <sup>12</sup> Ω | JIS Z 3284 40°C90%RH<br>(Measuring out of device) |
| Paste  | 7  | Viscosity<br>(malcom PCU-205) | 200 Pa·s                  | JIS Z 3284<br>25°C 10RPM                          |
|        | 8  | Thixotropy index              | 0.55                      | JIS Z 3284  |
|        | 9  | Slump-in-heating              | 0.6 mm                    | JIS Z 3284 Fifth Printing                         |
|        | 10 | Flux content                  | 11.0%                     | JIS Z 3197  |
|        | 11 | Corrosivity test              | No corrosion              | JIS Z 3284  |
|        | 12 | Spreading rate                | 70% or more               | JIS Z 3284  |
|        | 13 | Solder ball                   | below category 3          | JIS Z 3284 ceramic                                |

data prepared 11 Apr, 2014

SENJU METAL INDUSTRY CO.,LTD  
23, Senju-Hashido-cho, Adachi-ku, TOKYO 120, Japan  
Tel. Tokyo (03)3888-5156

Obr. 175 Katalogový list pájecí pasty SnSb