

ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ

DISERTAČNÍ PRÁCE

PLZEŇ, 2012

Ing. Tomáš NOVÁK



Fakulta elektrotechnická

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor
v oboru

Elektronika

Ing. Tomáš Novák

Intermetalické sloučeniny v bezolovnatém pájeném spoji

Školitel: doc. Ing. František Steiner, Ph.D.

Datum státní doktorské zkoušky: 23. listopadu 2011

Datum odevzdání práce: 12. prosince 2012

V Plzni, 2012

Prohlášení

Prohlašuji, že disertační práci na téma „Intermetalické sloučeniny v bezolovnatém pájeném spoji“ jsem vypracoval samostatně a použil jsem jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu literatury.

V Plzni dne

.....

Podpis

Poděkování

Rád využiji tuto možnost a chci poděkovat svému školiteli doc. Ing. Františku Steinerovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, za cenné rady při jejím zpracování a v neposlední řadě za přátelský přístup při mentorování mé osoby po celou dobu mého doktorského studia.

Poděkování patří též všem kolegům z Katedry technologií a měření, kteří mi s ochotou pomáhali získávat odborné teoretické i praktické znalosti po dobu mého studia.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2012-026 „Materiálové a technologické systémy v elektrotechnice“ a vznikla za podpory Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

Anotace

Tato disertační práce se zabývá problematikou propojování v elektronice se zaměřením na strukturu a vlastnosti pájených spojů. V úvodní části je obsažen stručný popis materiálů a technologií, které se nejčastěji používají pro propojování v elektronice. Jedná se o technologie pájení a lepení, technologie povrchových úprav desek plošných spojů či pájených součástek a dále popis pájecích slitin a pájecích past. V teoretické části se práce zabývá tvorbou pájeného spoje a dále je podrobněji zaměřena na tvorbu a růst intermetalických sloučenin v pájeném spoji a vlivu na jeho vlastnosti. Intermetalické sloučeniny vznikají na rozhraní mezi pájecí slitinou a pájeným materiálem a na jejich vznik má vliv mnoho faktorů. Pozorování vzniku intermetalických sloučenin mezi různými bezolovnatými pájkami a pájenými materiály je proto předmětem širokého zájmu. Je zde uveden teoretický rozbor formování a růstu intermetalických sloučenin. V další části se práce zabývá návrhem a realizací experimentu pro možnost zkoumání intermetalických sloučenin a jejich vlivu na vlastnosti pájeného spoje. Byly studovány materiálové a procesní vlivy na růst intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji. V závěru práce jsou uvedeny souhrnné grafické výstupy a výsledky z analýz provedeného experimentu. Dále jsou popsány výsledky porovnání jednotlivých vlivů a doporučení pro praktické využití při výrobě elektrotechnických zařízení.

Klíčová slova:

Intermetalická sloučenina; pájení; struktura pájeného spoje; pevnost ve smyku; prvková analýza

Annotation

This thesis deals with interconnection in electronics, focusing on the structure and properties of solder joints. Brief description of materials and technologies mostly used for interconnection in electronics is in the introduction. These are soldering and bonding technology of surface finishes of printed circuit boards or soldered devices and further the description of solder alloys. The second part is closely focused on the creation and growth of intermetallic compounds in solder joints and the effect on its properties. Intermetallic compounds formed at the interface between a solder alloy and solder materials and their formation is affected by many factors. Therefore, observations of intermetallic compounds creation between lead-free solders and solder materials is the subject of wide interest. Theoretical analysis of formation and growth of intermetallic compounds is also given here. The next part of the thesis is concerned with design and realisation of an experiment dedicated to the possible research of intermetallic compounds and their influence on the properties of solder joints. The influence of aging on the growth of intermetallic compounds in solder joints was studied by using of preliminary tests. The results of these tests as well as the proposal of exploration of creation and growth of intermetallic compounds are listed at the end of thesis. Further, the results of comparison of single influences and recommendation for practical usage in electric devices production are described here.

Key words:

Intermetallic compound; soldering; solder joint structure; shear strength; element analysis

Seznam zkratek

at.%	atomic percent - atomová procenta
DPS	deska plošných spojů
EDX	Energy-dispersive X-ray spectroscopy – prvková analýza
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold – povrchová úprava nikl-zlato
EU	European Union – Evropská unie
FR4	Flame Retardant Class 4 – kompozitní materiál ze skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice
HASL	Hot-Air Solder Level – tenká vrstva pájky na desce plošného spoje
IEC	International Electrotechnical Commission
IMC	Intermetallic compound – intermetalická sloučenina
ITRI	Industrial Technology Research Institute
JEITA	Japan Electronics and Information Technology Industries Association
JWES	Japan Welding Engineering Society
LCCC	Leadless Ceramic Chip Carrier – keramické pouzdro bez drátových vývodů
NCMS	National Center for Manufacturing Sciences
NEMI	National Electronics Manufacturing Initiative
OSP	Organic Solderability Preservative - ochranná organická vrstva
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
SAC	Sn-Ag-Cu pájecí slitina
SEM	Scanning electron microscope - rastrovací elektronový mikroskop
USA	United States of America – Spojené státy americké
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
wt.%	weight percent - váhová procenta

Obsah

SEZNAM ZKRATEK	7
OBSAH	8
OBEČNÁ ČÁST.....	11
CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	12
1 PROBLEMATIKA PROPOJOVÁNÍ – TECHNOLOGIE A MATERIÁLY	13
1.1 TECHNOLOGIE PROPOJOVÁNÍ	13
1.2 MATERIÁLY PRO PROPOJOVÁNÍ.....	14
1.2.1 <i>Povrchové úpravy desek plošných spojů</i>	14
1.2.2 <i>Pájecí slitiny</i>	17
TEORETICKÁ ČÁST.....	22
2 TVORBA PÁJENÉHO SPOJE	22
2.1 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ ROZTAVENÉ PÁJKY	22
2.2 SMÁČIVOST A ROZTĚKAVOST PÁJKY PO POVRCHU	23
2.3 KRYSTALIZACE PÁJKY	27
2.4 POVRCHOVÁ DRSNOST MATERIÁLU.....	27
3 INTERMETALICKÉ SLOUČENINY V PÁJENÉM SPOJI	29
3.1 VÝZNAM INTERMETALICKÝCH SLOUČENIN	29
3.2 FORMOVÁNÍ A RŮST IMC.....	29
3.3 EXPERIMENTÁLNÍ KINETIKA PRO RYCHLOST RŮSTU IMC.....	32
3.4 IMC V BEZOLOVNATÉM PÁJENÉM SPOJI	34
3.4.1 <i>Cu–Sn rozhraní</i>	34
3.4.2 <i>Ag–Sn rozhraní</i>	36
3.4.3 <i>Au–Sn rozhraní</i>	36
3.4.4 <i>Ni–Sn rozhraní</i>	37
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
4 MATERIÁLY A METODY POUŽITÉ PŘI EXPERIMENTU	39
4.1 TESTOVACÍ VZORKY.....	40
4.2 VYBRANÉ PÁJECÍ PASTY	41
4.3 TESTOVACÍ METODY A ANALÝZY	42
4.4 ZNAČENÍ VZORKŮ	50
5 ZÁVISLOST SMÁČIVOSTI NA DRSNOSTI POVRCHU.....	52
5.1 POUŽITÉ MATERIÁLY A PROCESNÍ PODMÍNKY	52
5.2 VYHODNOCENÍ A DISKUZE NAMĚŘENÝCH DAT.....	53

6 PRVKOVÁ ANALÝZA INTERMETALICKÝCH SLOUČENIN	59
6.1 POUŽITÉ MATERIÁLY A PROCESNÍ PODMÍNKY	59
6.2 VYHODNOCENÍ A DISKUZE NAMĚŘENÝCH DAT	59
7 MĚŘENÍ TLOUŠŤKY VRSTEV INTERMETALICKÝCH SLOUČENIN.....	67
7.1 MATERIÁLOVÉ VLIVY NA TLOUŠŤKU VRSTEV IMC V PÁJENÉM SPOJI.....	67
7.1.1 <i>Vliv povrchové úpravy desek plošných spojů</i>	67
7.1.2 <i>Vliv složení pájecí pasty</i>	71
7.2 VLIVY PROCESNÍCH FAKTORŮ NA TLOUŠŤKU VRSTEV IMC V PÁJENÉM SPOJI	73
7.2.1 <i>Vliv doby zrychleného stárnutí</i>	73
7.2.2 <i>Vliv hodnoty teploty zrychleného stárnutí</i>	74
7.3 STATISTICKÁ ANALÝZA NAMĚŘENÝCH HODNOT	76
8 MĚŘENÍ MECHANICKÉ PEVNOSTI PÁJENÝCH SPOJŮ	77
8.1 VLIVY MATERIÁLOVÉHO SYSTÉMU NA MECHANICKOU PEVNOST PÁJENÉHO SPOJE	77
8.1.1 <i>Vliv povrchové úpravy desek plošných spojů</i>	77
8.1.2 <i>Vliv složení pájecí pasty</i>	80
8.2 VLIVY PROCESNÍCH FAKTORŮ NA MECHANICKOU PEVNOST PÁJENÉHO SPOJE	83
8.2.1 <i>Vliv nastavení teplotního pájecího profilu</i>	83
8.2.2 <i>Vliv doby zrychleného stárnutí</i>	84
8.2.3 <i>Vliv hodnoty teploty zrychleného stárnutí</i>	86
8.2.4 <i>Vliv množství pájky ve spoji</i>	88
8.3 STATISTICKÁ ANALÝZA NAMĚŘENÝCH HODNOT	90
9 VÝSLEDKY EXPERIMENTU A DOPORUČENÍ PRO PRAXI	92
9.1 MATERIÁLOVÉ VLIVY NA VLASTNOSTI PÁJENÉHO SPOJE	92
9.1.1 <i>Závislost smáčivosti na drsnosti povrchu</i>	92
9.1.2 <i>Vliv povrchové úpravy na vlastnosti pájeného spoje</i>	92
9.1.3 <i>Vliv složení pájecí pasty na vlastnosti pájeného spoje</i>	95
9.1.4 <i>Doporučení pro praxi</i>	96
9.2 PROCESNÍ VLIVY NA VLASTNOSTI PÁJENÉHO SPOJE	97
9.2.1 <i>Vliv doby zrychleného stárnutí na vlastnosti pájeného spoje</i>	97
9.2.2 <i>Vliv teploty zrychleného stárnutí na vlastnosti pájeného spoje</i>	98
ZÁVĚR	99
ZHODNOCENÍ CÍLŮ	100
LITERATURA.....	102
SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	107
PŘÍLOHY	109
PŘÍLOHA A. PRVKOVÁ ANALÝZA – EDX SPEKTRA ANALYZOVANÝCH VZORKŮ	109

PŘÍLOHA B.	MĚŘENÍ TLOUŠTKY INTERMETALICKÝCH SLOUČENIN	126
PŘÍLOHA C.	MATERIÁLOGRAFICKÉ VÝBRUSY PÁJENÝCH SPOJŮ	145
PŘÍLOHA D.	HORNOVY KVANTILY	147

Obecná část

Pájení je nejčastěji používaná technologie propojování při výrobě elektronických zařízení. Cín-olovnatá pájka se používá jako spojovací materiál při výrobě elektroniky již mnoho let. Z důvodu omezení nebezpečných materiálů, např.: olova, rtuti, kadmia, v elektrických a elektronických zařízeních se dnes nejen v Evropské unii používají kromě speciálních výjimek pouze bezolovnaté pájky. Proto jsou stále vyvíjeny nové bezolovnaté pájecí slitiny, kterými chceme dosáhnout co nejlepších elektrických, mechanických, tepelných a chemických vlastností pájeného spoje nebo se co nejvíce přiblížit vlastnostem pájených spojů, které jsou pájeny olovnatou pájkou. Odlišné složení bezolovnatých pájecích slitin přináší různé vlastnosti pájených spojů vytvořených právě těmito pájkami. Vylepšení některé vlastnosti pájecí slitiny je většinou na úkor jiné.

Po procesu pájení je důležitá struktura pájeného spoje a jeho vlastnosti, především elektrické, mechanické a jeho životnost. Struktura pájeného spoje je složitý systém, který není stálý. Během stárnutí pájeného spoje se jeho struktura mění, a tudíž se mění i jeho vlastnosti. Ke struktuře pájeného spoje neodmyslitelně patří intermetalické sloučeniny, které vznikají v pájeném spoji hned při procesu pájení, ale také během stárnutí spoje. Vznik a růst těchto sloučenin v pájeném spoji významně ovlivňují jeho vlastnosti a životnost.

Práce obsahuje shrnutí současného stavu vědy a výzkumu intermetalických sloučenin a je zaměřena zejména na tvorbu a vliv intermetalických sloučenin na vlastnosti pájeného spoje. Důležitost výzkumu struktury bezolovnatého pájeného spoje a tvorby intermetalických sloučenin v tomto spoji je vysoká. Je to díky stálému vývoji nových pájecích slitin a pájených materiálů, kterými chceme dosáhnout optimálního bezolovnatého pájeného spoje z hlediska funkčnosti, spolehlivosti a co nejnižších výrobních nákladů.

Cíle disertační práce

Cílem práce je přispět teoreticky i prakticky k objasnění tvorby a růstu intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji a vlivu intermetalických sloučenin na jeho vlastnosti. V teoretické části jde především o výběr vhodných materiálů, které jsou v současnosti nejčastěji používány pro vytvoření pájených spojů v elektronických zařízeních. Dále se bude tato část zabývat formováním a růstem intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji a tvorbou bezolovnatého pájeného spoje. Experimentální část práce bude zaměřena na zkoumání materiálových a procesních vlivů na formování intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji.

Dílčí cíl 1) Cílem práce je experimentálně ověřit působení materiálových vlivů (povrchové úpravy desek plošných spojů, složení pájecích slitin) na tvorbu a růst intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji. Dále ověřit korelaci mezi tvorbou intermetalických sloučenin a mechanickou pevností bezolovnatého pájeného spoje. Důležitou oblastí je také prvková analýza testovaných vzorků v průběhu experimentů, která umožňuje přesné určení složení intermetalických sloučenin ve struktuře pájeného spoje.

Dílčí cíl 2) Dalším cílem je experimentálně ověřit působení procesních vlivů (nastavení procesu pájení, zrychlené stárnutí) na tvorbu a růst intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji. Stejně jako v dílčím cíli č. 1 ověřit korelaci mezi tvorbou intermetalických sloučenin a mechanickou pevností bezolovnatého pájeného spoje.

Dílčí cíl 3) Z výsledků praktického experimentu definovat závěry vhodné pro použití v praxi, sloužící především procesním a vývojovým inženýrům v předvýrobní a výrobní etapě výroby k určení správných procesních a materiálových nastavení procesu pájení.

1 Problematika propojování – technologie a materiály

Elektronické obvody a systémy procházejí v posledních letech značným technickým vývojem. Podstatné změny v propojování nastaly se zavedením strojního pájení vlnou a přetavením. Miniaturizace součástek a rostoucí integrace spojů ve spojení s narůstajícími nároky na kvalitu a spolehlivost spojů vedou k důležitým rozhodnutím, jakou technologii propojování zvolit, protože každá technologie má svá kritéria a určité výhody a nevýhody [1].

1.1 Technologie propojování

Účelem propojování je vytvoření elektricky vodivého a mechanicky pevného spoje. V dnešní době je nejrozšířenější technologií propojování technologie pájení.

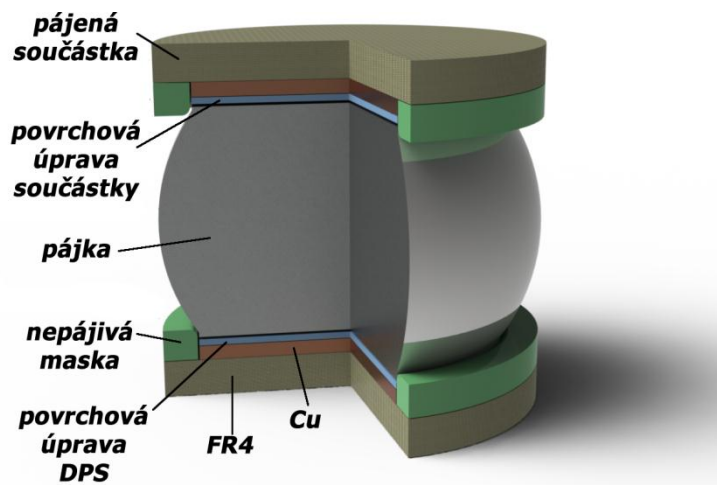
Technologie pájení lze rozdělit podle několika parametrů. Základní rozdělení je na pájení ruční a strojní (automatizované). Ruční pájení se dnes používá spíše jen pro opravy po strojním pájení nebo pro pájení komponent, které nelze pájet strojním pájením. Pájení můžeme dále dělit podle teploty pájení na měkké a tvrdé. Měkké pájení probíhá při teplotě tavení pájky do 450 °C, při teplotě tavení pájky nad 450 °C se jedná o tvrdé pájení. Nejčastěji používané technologie strojního pájení v elektronice jsou pájení vlnou, pájení přetavením a selektivní pájení. Tyto technologie se od sebe liší například v procesu nanášení pájky pro vytvoření pájeného spoje.

Technologie lepení je spojování různých nebo stejných materiálů pomocí lepidla. Lepidla používaná pro vytvoření elektricky vodivých spojů jsou většinou na bázi epoxidové pryskyřice. Vodivost lepidla zajišťuje vodivá složka (plnivo - kovové částičky různých tvarů), která je rozptýlena ve vazební složce - pryskyřice a tvrdidlo. Lepidla můžeme dělit podle vlastností. Pro elektrotechniku to jsou např. elektricky nevodivá a elektricky vodivá lepidla. Elektricky vodivá lepidla dále dělíme na izotropní a anizotropní. Izotropní elektricky vodivá lepidla mají stejnou vodivost ve všech směrech. Vodivou složku v těchto lepidlech tvoří kovové kuličky nebo lupínky 1–15 μm obsaženy obvykle ve velkém množství 50–80 %. Tím v lepidle tvoří souvislou vodivou síť. Naopak u anizotropních vodivých lepidel je vodivého plniva podstatně méně, a to 5–20 %. Tím netvoří souvislou síť a vedou pouze ve směru kolmém na rovinu základní desky. Při přiložení součástky dojde k sevření vodivých částic mezi připojovacími ploškami součástky a základního materiálu, což vede k vytvoření elektricky vodivého spoje. Vodivost může být také vytvořena při vytvrzování vazební

složky lepidla, kdy dochází k jejímu smrštění a tím k příčnému propojení částic vodivé složky [2-4].

1.2 Materiály pro propojování

Základním materiálem pro propojování je substrát. Na substrátu se vytvoří vodivé cesty, které slouží k propojení požadovaných komponent. Ty jsou na substrátu umístěny na přesně definované místo. Pro výrobu desek plošných spojů se jako substrát nejvíce používá FR4, což je deska z vrstvené nealkalické skelné tkaniny, jako výztuže a epoxidové pryskyřice jako pojiva. Pro vytvoření vodivého motivu na desce plošného spoje se nejčastěji používá měď. Měď se používá, protože má dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, je snadno mechanicky zpracovatelná, má dobrou pájitelnost a relativně nízkou cenu. Jelikož měď na atmosférickém vzduchu rychle oxiduje, využívá se různých povrchových úprav, aby se oxidaci zabránilo. Oxidace mědi snižuje její pájitelnost, což je pro technologii pájení podstatný faktor pro vytvoření kvalitního a spolehlivého spoje. Na obrázku č. 1 je znázorněn řez pájeným spojem [5].



Obrázek 1: Struktura pájeného spoje [6]

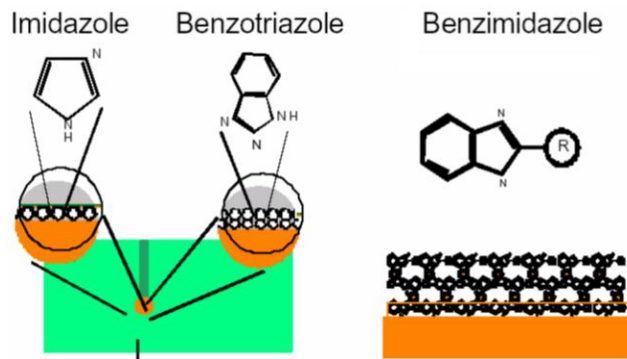
1.2.1 Povrchové úpravy desek plošných spojů

Mezi nejčastěji používané povrchové úpravy desek plošných spojů patří následující technologie.

OSP - Organic Solderability Preservative

OSP je ochranná organická vrstva, která zabezpečuje dobrou pájitelnost mědi. Organické povlaky jsou významnou skupinou ochranných povrchových úprav čisté mědi. Tři třídy organických látek jsou v současné době používány v elektronickém průmyslu jako sloučeniny OSP, a to benzotriazolové sloučeniny, imidazolové

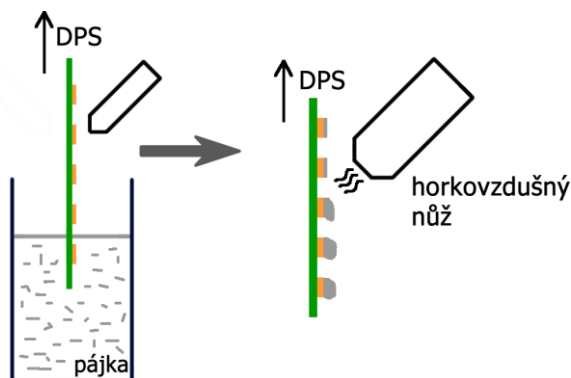
sloučeniny a sloučeniny benzimidazolové. V případě imidazolové sloučeniny se jedná o vrstvu větší tloušťky, která je stálá i při opakovaném průjezdu desky pájecí pecí. Tato vrstva se odpařuje při specifické teplotě a je transparentní. Na obrázku č. 2 jsou zobrazeny sloučeniny OSP. Tyto látky chrání povrch mědi tím, že vytvoří vlastní chemické vazby s mědí, které zabraňují její oxidaci. OSP povlak chrání povrch mědi až do začátku procesu pájení. Vrstva OSP je na povrch mědi fixována slabými Van der Waalsovými silami [7,8].



Obrázek 2: Struktura OSP [7]

HASL – Hot-Air Solder Level

HASL je technologie, při které se na desku plošného spoje nanáší tenká vrstva pájky. Na desku plošného spoje se nanese tavidlo a poté se ponoří do lázně s roztavenou pájkou. Deska je následně vytažena a hned umístěna mezi trysky horkého vzduchu, které odfukují přebytečné množství roztavené pájky. Pouze tenká vrstva pájky zůstane na exponovaných částech. Výhoda procesu ponořování desek do roztavené pájky je v možnosti použití různých složení pájecích slitin. Dalšími výhodami jsou velmi dobrá pájitelnost, dlouhodobá skladovatelnost a možnost vícenásobného teplotního cyklu. Oproti tomu je omezená použitelnost při aplikacích s malou roztečí vývodů z důvodu horší rovinnosti povrchu pájecích plošek [7,9].



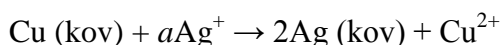
Obrázek 3: Technologie HASL

ENIG - Electroless Nickel Immersion Gold

Při technologii ENIG je na měděnou vrstvu desky plošného spoje nanášena vrstva chemického niklu. Na tuto vrstvu je poté ještě nanášena vrstva zlata. Zlatá vrstva slouží jako ochranný povrch niklu, který rychle oxiduje. Tloušťka zlaté vrstvy je velmi tenká a při smáčení a roztékání pájky po povrchu je rozpouštěna v roztavené pájce. Tudíž roztavená pájka smáčí povrch niklu. Niklová vrstva slouží jako bariéra na průnik atomů zlata do měděného povrchu DPS a je vytvořena chemickým pokovením v niklofosforovém roztoku (Ni-P). Při vysokých teplotách (proces pájení) fosfor migruje na rozhraní pájecí ploška-pájka. To snižuje pevnost v tahu pájeného spoje a může potenciálně způsobit zničení spoje. Proto jsou preferovány chemické lázně s nižším obsahem fosforu (6 %). Zlato je nanášeno imerzním procesem a tloušťka zlaté vrstvy je většinou v rozmezí 0,05–3 μm. Výhody ENIG jsou velmi dobrá rovinnost povrchu pájecích plošek, vynikající kompatibilita pro aplikaci pájecích past, vhodnost pro fine-pitch aplikace a možnost opakovaného pájení [7,10].

Chemicky nanesené stříbro

Stříbro je nanášeno chemickou reakcí, kde atomy stříbra vytěsňují atomy mědi z pájecí plošky.



Chemické stříbro je vhodné pro tvorbu tenkých vrstev až do 100 μm. Vytváří rovinnou a rovnoměrnou vrstvu, která udržuje dlouhodobou pájitelnost[7].

Je to proces při nízkých teplotách a tím eliminuje teplotní šok. Jedna z nevýhod je, že stříbro nepříznivě reaguje se sírou a chlórem, které se mohou vyskytovat v atmosféře, a proto je důležité klást zvláštní požadavky na balení a skladování. Další negativní vlastnost stříbra je jeho tendence k migraci, protože je anodicky velmi rozpustné a vyžaduje nízkou aktivační energii k zahájení procesu migrace. [7,10,12].

Chemicky nanesený cín

Při této technologii je vrstva cínu chemicky nanášena přímo na měděný povrch. Stejně jako u chemicky naneseného stříbra je výhodou rovinnost povrchu a eliminace teplotního šoku v porovnání s technologií HASL. Nevýhodou tohoto povrchu je krátká doba skladovatelnosti a horší pájitelnost. To nastává v důsledku tvorby intermetalických vrstev Cu₆Sn₅ a Cu₃Sn [9,11].

Lakovaná měď

Další technologií, dnes už zřídka používanou je lakování povrchu desky plošných spojů pájitelným lakem. Výhoda lakování je nízká cena. Tato technologie je nahrazována povrchovou úpravou OSP, která je cenově srovnatelná [9,11].

V tabulce 1 je uvedeno porovnání používaných technologií různých typů povrchových úprav.

Tabulka 1: Porovnání různých typů povrchových úprav [13]

Povrchová úprava	OSP	HASL	ENIG	chem. Ag	chem. Sn
Vícenásobný teplotní cyklus	Probl.	Ano	Ano	Ano	Ano
Rovinnost povrchu	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano
Tloušťka vrstvy (μm)	0,5	1 - 20	5	0,16	0,1
Fine-pitch aplikace	Ano	Probl.	Ano	Ano	Ano
Kontaktování	Ne	Ne	Ano	Ano	Ne
Teplotní stres na 65 °C	Ne	Ano	Ne	Ne	Ne
Údržba lázně	Snadná	Obtížná	Střední	Snadná	Snadná
Řízení procesu	Snadné	Střední	Obtížné	Snadné	Snadné
Náklady	Nízké	Střední	Vysoké	Střední	Nízké
Ekologické aspekty	Dobré	Špatné	Dobré	Dobré	Dobré
Bezolovnatá pájka SAC	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje

1.2.2 Pájecí slitiny

Pájky na bázi SnPb se využívají již více než půl století téměř ve všech aplikacích elektrotechnického a elektronického průmyslu. Nejpoužívanější olovnaté pájky jsou vyráběny v přibližném poměru 40 % olova a 60 % cínu. Dříve používané pájecí slitiny na bázi olova, ve složení 37-40 % olova a 60-63 % cínu se v elektronickém průmyslu osvědčily jako velmi dobré materiály pro pájení. Také z ekonomického hlediska bylo používání olovnatých pájek výhodnější, jelikož cena olova je znatelně nižší v porovnání s cenou cínu, mědi či stříbra. Olovo je levné, protože je obsaženo ve velké míře v zemské kůře a díky nízké teplotě tavení ho lze z rudy poměrně snadno extrahovat.

Z důvodu ochrany lidského zdraví je snaha o omezení používání látek, které nepříznivě ovlivňují zdraví člověka a životní prostředí. V elektrotechnické výrobě se to týká zejména olova. Ačkoli spotřeba olova při procesu pájení je přibližně 0,5 % světové produkce, je nezbytné přejít na bezolovnaté technologie při výrobě elektroniky.

Důvodem je olovo obsažené v pájených spojích, které nelze z elektronických zařízení snadno recyklovat. Dalším důvodem je neustálý nárůst spotřeby elektronických zařízení a jejich včlenění do života lidí. Bohužel olovo je toxický kov. Již na počátku devadesátých let bylo v USA olovo využívané v elektronice označeno za škodlivé pro lidské zdraví a byla vytvořena legislativa směřující k jeho postupnému omezení. Vzápětí byla stejná cesta nastoupena i v Japonsku. Ani Evropa nezůstala pozadu a Evropská unie (EU) vydala v platnost směrnice a nařízení týkající se elektronického a elektrotechnického průmyslu. Jedná se například o ekologické normy WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) a také normy RoHS (Restriction of Hazardous Substances). Tyto normy a směrnice upřesňují zpětné přebírání a recyklaci elektronických zařízení (WEEE) a zákaz používání některých materiálů (olovo, kadmium, rtuť a další látky - RoHS) [14-16].

Cín-olovnaté pájky mohou být nahrazovány bezolovnatými pájecími slitinami nebo vodivými lepidly. Olovnaté pájky mají teplotu tavení přibližně 183 °C a plně tekutého stavu dosahují při teplotách 205–210 °C. Bezolovnaté pájecí slitiny mají teplotu tavení přibližně 220 °C a plně tekutého stavu dosahují při teplotách 230–235 °C. Pokud budeme uvažovat pájecí teplotu 245 °C nebo 250 °C, je zde patrné, že proces pájení při použití bezolovnatých pájecích slitin má užší procesní okno v porovnání s olovnatými pájecími slitinami. Bezolovnaté pájecí slitiny, které nahrazují klasickou olovnatou pájecí slitinu, by se jí měly svými vlastnostmi co nejvíce podobat, a to hlavně v těchto oblastech: teploty solidu a likvidu, fyzikální vlastnosti (elektrická a tepelná vodivost, součinitel délkové teplotní roztažnosti), metalurgické vlastnosti na rozhraní materiálů a fází ve spoji, mechanické vlastnosti (pevnost ve smyku, pevnost v tahu, odolnost proti tečení, stabilita mikrostruktury), pájitelnost, stabilita při skladování v různých podmínkách. Bezolovnatých pájecích slitin je celá řada a v současné době se stále vyvíjí nové. Výběr základních materiálových složek je prvním krokem při návrhu nového materiálového systému. Z hlediska pájení jsou kritéria výběru následující: nízká teplota tání základních kovových složek, nízké povrchové napětí a dobrá smáčivost kovů vyskytujících se v pájených soustavách, stabilita vlastností v celém rozsahu vlivů prostředí, nízká toxicita a snadné a levné použití. Tato kritéria vylučují použitelnost kovů s vysokým bodem tání, alkalické kovy a kadmium. Základním kovem bezolovnaté pájecí slitiny je cín (Sn) především pro své metalurgické vlastnosti, nezávadnost, světovým zásobám a ceně[1].

V tabulce 2 jsou uvedeny nejčastěji používané prvky, které nahrazují olovo v pájecích slitinách a ovlivňují různé vlastnosti pájecích slitin, např.: snižují bod tavení, zlepšují smáčivost, snižují difúzi prvků spojovaných částí do pájky a naopak, zlepšují mechanickou pevnost apod. Tabulka 3 uvádí přehled vybraných bezolovnatých pájecích slitin a jejich uživatelů[1].

Tabulka 2: Některé vlastnosti prvků používané v bezolovnatých pájkách [1,13,17]

Prvek	Teplota tavení (°C)	Součinitel teplotní délkové roztažnosti při 300 K (K ⁻¹)	Rezistivita při 300 K (Ω.m)	Vlastnost
Antimon (Sb)	630	11,0.10 ⁻⁶	0,390.10 ⁻⁶	zvyšuje pevnost, snižuje povrchové napětí
Bismut (Bi)	271	13,4.10 ⁻⁶	1,250.10 ⁻⁶	snižuje bod tání, nízká cena
Indium (In)	156	32,1.10 ⁻⁶	0,085.10 ⁻⁶	snižuje bodu tání, vysoká cena, horší mech. pevnost
Měď (Cu)	1083	16,5.10 ⁻⁶	0,017.10 ⁻⁶	dobrá smáčivost povrchu a mech. pevnost,
Stříbro (Ag)	961	18,9.10 ⁻⁶	0,016.10 ⁻⁶	snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost a pevnost
Zinek (Zn)	419	30,2.10 ⁻⁶	0,059.10 ⁻⁶	nízký bod tání, nízká cena

Tabulka 3: Bezolovnaté pájecí slitiny a jejich uživatelé [18]

Pájka	Teplota tavení (°C)	Uživatel
Sn-0,7Cu	227	Nortel
Sn-3,5Ag	221	NCMS,Ford,Motorola,Siemens, TI Japan, Automotive industry
Sn-3,5Ag-3Bi	220	Matsushita/Panasonic
Sn-3,8Ag-0,7Cu	217 - 219	Motorola, Nokia
Sn-Ag-Cu	217	GEC Marconi
Sn-Ag-Cu-Sb	217	Texas Instruments
Sn-2Ag-0,75Cu	217 - 219	NEC
Sn-2Ag-4Bi-0,5Cu-0,1Ge	216	Sony
Sn-2,5Ag-0,8Cu-0,5Sb	213 - 218	Motorola

Pájka	Teplota tavení (°C)	Uživatel
Sn-3,5Ag-5Bi-0,7Cu	210 - 215	Hitachi
Sn-2Ag-3Bi-0,75Cu	210 - 215	NEC
Sn-3,4Ag-4,8Bi	205 - 210	NCMS, Sanda Lab
Sn-8Zn-3Bi	191	Matsushita, Senju, Nec
Sn-57Bi-0,1Ag	138 - 140	Fujitsu

Zcela podrobný popis pájecích slitin je uveden v literatuře [18]. Z tabulky č. 3 je patrné, že bezolovnaté pájecí slitiny se od sebe odlišují nejen druhem použitých prvků, ale také jejich počtem. Mezi nejpoužívanější bezolovnaté pájecí slitiny v elektronickém průmyslu patří slitiny SAC, SnCu a SnAg. Tyto slitiny jsou podrobněji popsány níže. Některá sdružení zabývající se elektrotechnickým průmyslem vydala v různých zemích doporučení, jaké bezolovnaté pájecí slitiny používat. Pro Evropu je to sdružení ITRI (Industrial Technology Research Institute), které doporučuje pájecí slitinu SnAg_{3,4~4,1}Cu_{0,45~0,9}. V Japonsku JWES/JEITA (Japan Welding Engineering Society/Japan Electronics and Information Technology Industries Association) doporučila slitinu SnAg₃Cu_{0,5} a v USA sdružení NCMS (National Center for Manufacturing Sciences) a NEMI (National Electronics Manufacturing Initiative) vydala doporučení pro pájku SnAg_{3,9}Cu_{0,6}. V posledních letech jsou také propagovány pájecí slitiny s obsahem bizmutu [19].

SnAgCu (SAC)

SAC pájky jsou slitiny cínu, stříbra a mědi, přičemž cín je vždy v největším zastoupení. SAC pájek je mnoho druhů, odlišují se vzájemně podle množství jednotlivých prvků ve slitině. Nejpoužívanější SAC pájky mají teplotu tavení v rozmezí 217-219 °C a jejich složení se pohybuje v rozsahu 3–4 % Ag, 0,5–2 % Cu a zbytek Sn. Tyto pájky jsou nejpoužívanější bezolovnatou slitinou pro montáž elektronických zařízení. Důležitá vlastnost je hlavně dobrá mechanická pevnost materiálu v porovnání s Sn-37Pb pájkou, až čtyřikrát vyšší. To je zapříčiněno strukturou pájeného spoje s rozptýlenými intermetalickými sloučeninami Ag₃Sn a Cu₆Sn₅, které brání pohybu dislokací [16-18].

SnCu

Pájecí slitina Sn-0,7Cu má teplotu tání 227 °C, což je o 10 °C více než pájky SAC. V porovnání ceny je však mnohem levnější než SAC, protože neobsahuje stříbro. I přes vysokou teplotu tání má tato pájka doporučení pro pájení vlnou. Požadované

smáčivosti dosahuje při pájení v ochranné atmosféře. Oproti Sn37Pb má nižší mez kluzu a pevnost v tahu. Pájka je používána pro pájení čipů v technologii flip-chip nebo jako povrchová úprava vývodů součástek [16-18].

SnAg

Jedná se o slitinu cínu a stříbra. Nejčastější použití je ve složení 96,5 % Sn a 3,5 % Ag. Teplota tání této slitiny je 221 °C a používá se v telekomunikační technice, spotřební elektronice a automobilovém průmyslu. Únavová životnost je při teplotách 0–100 °C srovnatelná s Sn37Pb pájkou, při nižších hodnotách teploty je horší. Pájka dosahuje při pájení v ochranné atmosféře stejného nebo lepšího smáčení v porovnání s olovnatou pájkou. Pájka by se neměla dostat do kontaktu s olovem, aby se zabránilo vzniku nové pájky Sn-36Pb-2Ag s teplotou tavení 179 °C. To by mohlo negativně ovlivnit pevnost pájeného spoje [16,17].

Pájecí slitiny se od dodavatelů k zákazníkům přepravují v různých formách. Pro strojní pájení vlnou se pájecí slitiny dodávají ve formě tyčí. Ruční pájení využívá pájek dodávaných ve formě pájecích drátů nebo trubičkových pájek o průměru od 0,5 mm do 6 mm. Pro technologii povrchové montáže a pájení přetavením se používá pájka ve formě pasty. Pájecí pasty se skládají z několika složek. Hlavní složky jsou: kovová složka (zrna nebo kuličky pájecí slitiny) a technologická složka (tavidlo), dále obsahují pájecí pasty složky, které upravují viskozitu, roztékavost a lepivost. Obvyklé váhové složení pasty je 90 % pájecích zrn, 6 % tavidla a 4 % aktivátoru tavidla a pojivo. Velikost zrn pájecí slitiny bývá v rozmezí od 20 μm do 150 μm. S postupem času je při povrchové montáži ve výrobě běžné použití jemnějších rastrů, menších součástek a vyšší hustoty osazovaných součástek. Proto jsou na pájecí pasty kladeny nároky, aby vykazovaly jemné a rovnoměrné zrnění s malým rozptylem průměrů kuliček. Protože jsou kuličky pájky pokryty oxidy, s množstvím jemnějšího zrnění stoupá podíl oxidů v pájecí pastě. To vyvolává snahu udržovat co nejnižší podíl velmi jemného zrnění, jelikož by mohl negativně ovlivnit smáčení kvůli svému vysokému podílu oxidů. Obsah oxidů v pájecí pastě také ovlivňuje povrchové napětí a smáčivost tekuté pasty[4,14,20].

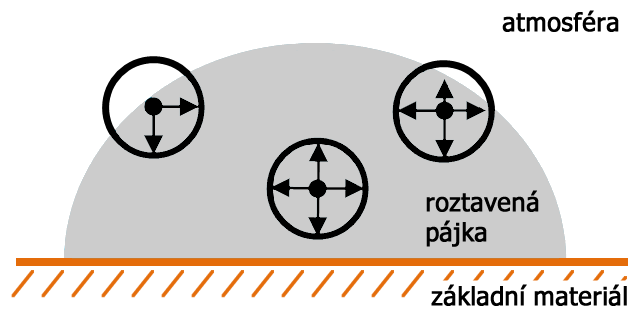
Teoretická část

2 Tvorba pájeného spoje

Pájení lze definovat jako metalurgické spojování dvou materiálů pomocí třetího materiálu. Proces pájení probíhá za teplot nižších než je teplota tavení spojovaných materiálů a dochází k tavení pouze přidávaného spojovacího materiálu – pájecí slitiny. Z fyzikálního a fyzikálně-chemického hlediska musíme procesem pájení dosáhnout elektricky vodivého, mechanicky pevného a dlouhodobě spolehlivého pájeného spoje. Jelikož pájené plochy (vývod součástky, pájecí ploška) nejsou taveny, ale pouze smáčeny roztavenou pájecí slitinou (liquidem), je dobrá smáčivost spojovaných materiálů roztavenou pájkou důležitou podmínkou. Smáčení tuhého povrchu roztavenou pájkou nastane pouze v případě, když je povrchová energie substrátu vyšší než povrchová energie liquidu. Toto kritérium je pro proces smáčení nezbytné, nikoliv však postačující. Aby nastal proces smáčení, musí mít pájecí slitina odpovídající pracovní teplotu a být v kontaktu se smáčeným povrchem. Smáčení je první fází fyzikálně chemického působení atomů roztavené pájecí slitiny a atomů na povrchu spojovaných materiálů. V další fázi dochází k rozpouštění a difúzi atomů spojovaných kovů. Poslední fáze je chladnutí pájeného spoje, kdy dochází ke krystalizaci pájecí slitiny. Vytváří se krystalizační zárodky a začíná růst zrn pájecí slitiny. Velikost těchto zrn je závislá na rychlosti chlazení. Velká zrna, která snižují spolehlivost pájeného spoje, se vytváří při pomalém chladnutí spoje[22].

2.1 Povrchové napětí roztavené pájky

Povrchové napětí většiny liquidů je ovlivněno jeho chemickým složením. Povrchové napětí roztavené pájky je výsledkem vzájemné interakce přitažlivých sil molekul nebo atomů, z nichž se skládá povrchová vrstva. Uvnitř liquidu jsou přitažlivé síly částic navzájem vyrovnány, jsou stejné ve všech směrech. Při pohybu částic uvnitř roztavené pájky se nespotřebuje žádná práce, jelikož výslednice sil působících na ně ze všech stran je rovna nule. Na částicích, které jsou na povrchu roztavené pájky čili na rozhraní mezi liquidem a plynným okolím (atmosférou), však nejsou tyto síly kompenzovány ze strany plynné fáze a molekuly na povrchu jsou vtahovány dovnitř kapaliny (viz obrázek č. 4) [8,22].



Obrázek 4: Schematický princip povrchového napětí kapaliny[23]

Povrchové napětí tedy vzniká tím, že na volném tekutém povrchu, který se chová jako tenká elastická blána, působí asymetrické silové pole a tento povrch vykazuje přebytek energie oproti vnitřní části kapaliny. V důsledku působení relativně velkých přitažlivých sil a existence malých a středních vzdáleností mezi molekulami se bude roztavená pájka tvarovat tak, aby povrchová energie systému byla minimální. energii z povrchu, respektive její přebytek, se snaží roztavená pájka snížit tím, že zaujímá co nejmenší možný povrch (dokonale kulatý tvar)[8,22].

Povrchové napětí je silně závislé na teplotě. Se zvyšující se teplotou se snižuje velikost povrchového napětí, při kritické teplotě je rovno nule. Povrchové napětí však ovlivňuje mnoho dalších faktorů, jako např.: struktura roztavených kovů, tavidlo, atmosféra, míra oxidace pájených míst, drsnost povrchu, znečištění a podobně [8,22].

2.2 Smáčivost a roztékavost pájky po povrchu

Pokud při procesu smáčení dochází na rozhraní k chemické reakci, jedná se o smáčení chemické (reaktivní), kdy se procesy difúze nebo rozpouštění vytvoří společné fáze na rozhraní liquidu a solidu. Vzniká přechodová oblast určité tloušťky. Dalším typem smáčení je fyzikální smáčení. Jedná se v podstatě o adhezní spojení, kdy na rozhraní solidu a liquidu neproběhne chemická reakce a nedojde ke změně chemického složení. Adhezní spoj má menší pevnost ve smyku a ohybu, ale dobrou elektrickou vodivost[22].

Na rozhraní mezi tuhým povrchem a roztavenou pájkou působí během smáčení nevykompenzované mezi atomové síly, které jsou mírou povrchové energie, mezifázové energie i mezifázového povrchového napětí. Smáčením minimalizujeme volnou povrchovou energii postupným roztékáním pájky po povrchu a kompenzací atomů s volnými povrchovými vazbami. Rozhraní se stane stabilním, když se dosáhne minimální potenciální energie[22].

Během smáčení tuhého povrchu roztavenou pájkou musí být vynaložena práce, která působí proti meziatomovým silám. Pokud tento systém není ovlivněn žádnou energií dodanou zvenčí, může být vynaložena práce pouze tehdy, sníží-li se volná entalpie. Platí Gibbsova-Helmholtzova rovnice (1)

$$\Delta G_T = \Delta H_T - T\Delta S_T \quad (1)$$

tzn., že míra použitelné energie ΔG_T nezáleží jen na změně obsahu tepla ze změny entalpie ΔH_T , ale také na změně entropie ΔS_T a na teplotě T systému. Roztavená pájka se začíná roztékat po povrchu solidu, když se volná reakční entalpie stává negativní. Entalpie se vždy snaží dosáhnout maxima ve vztahu ke snížené míře uspořádanosti soustavy[22].

Smáčení

Smáčení roztavenou pájkou může být vysvětlováno jako schopnost přilnutí k povrchu spojovaného materiálu za určité teploty. Zároveň se vytváří na povrchu materiálu souvislá vrstva pájky. Při smáčení se dva volné povrchy, tekutý a pevný kov, mění v jedno mezifázové rozhraní. Kontaktem těchto povrchů přechází atomy (ionty) roztavené pájky do oblasti působení krystalické mřížky základního materiálu. Atomy se ukládají v určitém krystalografickém směru, který je určen minimem hodnoty mezifázové energie. V této fázi smáčení jsou základní a rozhodující kvantové procesy mezi atomy (přechody elektronů kovů z vnějších valenčních sfér)[23].

Podmínky rovnováhy na rozhraní tří fází popisuje Youngova rovnice (2), viz obrázek č. 5,

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LS} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (2)$$

kde V – tavidlo + prostředí - vapour

L – roztavená pájka - liquid

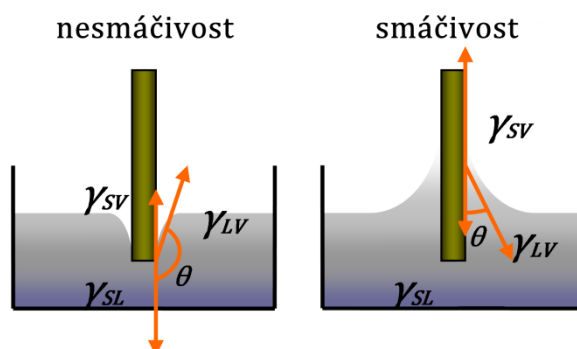
S – substrát - solid

θ – smáčecí úhel (°)

γ_{SV} – povrchové napětí na rozhraní SV (Nm^{-1})

γ_{LS} – povrchové napětí na rozhraní LS (Nm^{-1})

γ_{LV} – povrchové napětí na rozhraní LV (Nm^{-1})



Obrázek 5: Rovnováha povrchových napětí tří fází [24]

Pro splnění Youngovy rovnice se předpokládá ideální hladký homogenní povrch a zanedbání gravitační síly působící na látku. Z rovnice (2) je patrné, že čím větší je povrchové napětí na rozhraní SV γ_{SV} a čím menší je povrchové napětí na rozhraní LV γ_{LV} , tím lepší je smáčení povrchu roztavenou pájkou. Když jsou působící mezifázová napětí v rovnováze, určuje se rozdíl mezi složkami, které lze obtížně měřit, tj. (3)[22,25]

$$\gamma_{LV} \cos \theta = \gamma_{SV} - \gamma_{LS} \quad (3)$$

Pro smáčení povrchu lze z rovnice (3) definovat podmínku. Musí platit $\theta < 90^\circ$, a tím tedy dostáváme podmínku (4) pro smáčení povrchu[22].

$$\gamma_{SV} > \gamma_{LS} \quad (4)$$

V tabulce 4 je uvedeno rozdělení povrchů podle smáčivosti a jim náležící smáčecí úhly.

Tabulka 4: Smáčivost povrchů podle velikosti smáčecího úhlu [14]

Smáčecí úhel θ ($^\circ$)	Smáčivost povrchu
0 - 20	výborná až dokonalá
20 - 40	dobrá až velmi dobrá
40 - 55	dostatečná
55 - 90	špatná až velmi špatná
> 90	nesmáčivost

Roztékání

Roztékavost je schopnost tekuté látky roztéci se po vodorovném povrchu za určité teploty. Při roztékání látky po povrchu tuhého tělesa nastává rovnováha sil povrchových napětí v bodech na okraji tekuté látky. Pokud jsou splněny podmínky pro

roztékání pájky a nastane-li vlastní roztékání pájky, dojde ke zmenšení volné plochy povrchu solidu. Tím vzniká uvolněná povrchová energie, která se použije k formování fázového rozhraní a zvětšení povrchu liquidu. Pokud nedochází k výraznějším chemickým a metalurgickým reakcím na rozhraní mezi fázemi z energetické rovnováhy na rozhraní, platí pro koeficient roztékání S_p v systému (viz obrázek č. 5) s konstantní teplotou (T) a tlakem (p) vztah (5)[22]

$$S_p = - \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{p,T} = \gamma_{SV} - (\gamma_{LS} + \gamma_{LV} \cos \theta), \quad (5)$$

kde S_p – koeficient roztékání (Nm^{-1})

∂G – změna volné energie (J)

∂A – změna plochy (m^2)

θ – smáčecí úhel ($^\circ$)

γ_{SV} – povrchové napětí na rozhraní SV (Nm^{-1})

γ_{LS} – povrchové napětí na rozhraní LS (Nm^{-1})

γ_{LV} – povrchové napětí na rozhraní LV (Nm^{-1})

T – teplota (K)

p – tlak (Pa)

Aby došlo k procesu roztékání, musí platit $\Delta G_T < 0$, přičemž ∂A se zvětšuje, $S_p > 0$ [22]:

$$\gamma_{SV} > \gamma_{LS} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (6)$$

Koeficient roztékání lze vyjádřit také pomocí koeficientů adheze a koheze, pak

$$S_p = S_{ADH} - S_{COH}, \quad (7)$$

kde S_p – koeficient roztékání (Nm^{-1})

S_{ADH} – koeficient adheze (Nm^{-1})

S_{COH} – koeficient koheze (Nm^{-1})

$S_p > 0$, roztečení kompletní

$S_p < 0$, roztečení nekompletní.

2.3 Krystalizace pájky

V procesu pájení je poslední, však neméně důležitou fází proces tuhnutí roztavené pájky. Kontrola tohoto procesu je důležitá pro správné formování struktury pájeného spoje a s tím související mechanické vlastnosti spoje a jeho spolehlivost. Tuhnutím tekuté fáze dochází ke shlukování zrn a k růstu krystalů. Velikost zrn a rychlost růstu krystalů z roztavené slitiny v průběhu procesu chladnutí závisí na teplotním gradientu mezi rovnovážným stavem rozhraní a aktuální teplotou slitiny a také na krystalografické orientaci rozhraní. Volná energie shlukování zrn (nukleace) ΔG_T je obecně vyjádřena rovnicí [22,26]

$$\Delta G_T = \frac{3}{4}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma, \quad (8)$$

kde r – lineární rozměr jádra (m)

G_v – volná energie na jednotkový objem (Jm^{-3})

γ – volná povrchová energie na jednotkovou plochu (Jm^{-2})

Z rovnice je patrné, že převažuje volná povrchová energie pro malé hodnoty r a naopak pro velké hodnoty r převažuje volná objemová energie [19].

2.4 Povrchová drsnost materiálu

Skutečný povrch materiálu se liší od ideálního povrchu různými nerovnostmi. Drsností (topografií) povrchu rozumíme geometrické nerovnosti s poměrně malou vzdáleností. Tyto nerovnosti mohou vznikat při výrobě nebo při manipulaci s hotovým výrobkem. Drsnost povrchu je jedním z faktorů, které ovlivňují proces pájení. Především má vliv na proces smáčení a roztékání roztavené pájky po povrchu. Povrchová drsnost napomáhá redukci smáčecího kontaktního úhlu θ^+ , kde θ^+ souvisí s kontaktním úhlem dokonale rovného povrchu θ . To popisuje rovnice [27]:

$$\cos \theta^+ = c * \cos \theta, \quad (9)$$

kde c je definováno jako poměr drsnosti skutečného povrchu k povrchu ideálně rovnému. Z rovnice (9) plyne, že θ^+ je menší než θ , pokud θ je menší než 90° . To znamená, že po drsném povrchu se bude pájka roztékat lépe než po povrchu ideálně rovném. Zdrsnění povrchu by mělo také zajistit lepší mechanické uchycení pájky na smáčeném povrchu [27].

Drsnost povrchu je charakterizována základními statistickými parametry, kterými jsou střední hodnota drsnosti R_a (arithmetic average), tj. střední aritmetická hodnota absolutních hodnot odchylek y_i profilu v rozsahu základní délky L , viz rovnice (10). Dalším parametrem je střední hodnota R_q , někdy označováno jako R_{RMS} (root mean squared). R_q je kvadratickou střední hodnotou všech hodnot profilu drsnosti, viz rovnice (11). Hodnoty odchylek se odečítají ke střední čáře profilu. Ta rozděljuje skutečný profil tak, že v rozsahu základní délky L jsou součty ploch po obou jejích stranách stejné[27,28].

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (10)$$

$$R_q = \sqrt{\left(\frac{1}{L} \int_0^L |y^2(x)| dx\right)} \quad (11)$$

Topografie povrchu se nejčastěji stanovuje pomocí mikroskopů. SPM (Scanning Probe Microscopy) jsou mikroskopy rastrovacího typu, které vytvářejí zvětšený trojrozměrný obraz povrchu. Dva základní typy SPM jsou mikroskop atomárních sil AFM (Atomic Force Microscope) a rastrovací tunelový mikroskop STM (Scanning Tunnelling Microscope) [28].

3 Intermetalické sloučeniny v pájeném spoji

Výzkum v oblasti intermetalických sloučenin, jejich vazeb, formování, růst a případné poruchy v čase je jedním z nejdůležitějších úkolů při testech životnosti zařízení.

Za intermetalikum lze považovat sloučeninu minimálně dvou různých kovů. Vlastní intermetalické sloučeniny se formují vždy na rozhraní dvou spojovaných materiálů. Intermetalika jsou specifická díky svým fyzikálním a mechanickým vlastnostem. Aplikací potenciál intermetalik není dosud zcela znám, a proto jsou stále nevyčerpatelným podnětem pro výzkum v materiálových vědách [21].

3.1 Význam intermetalických sloučenin

V elektronickém průmyslu jsou intermetalika zkoumána zejména ve strukturách pájených spojů. Hlavním cílem tohoto zkoumání je pozorování tvorby a růstu intermetalických sloučenin (IMC) a vliv IMC na vlastnost pájeného spoje. IMC tvoří důležitou a nedílnou část struktury pájeného spoje. Velikost a šíření IMC v pájeném spoji výrazně ovlivňují jeho vlastnosti. Během reaktivního smáčení a roztékání pájky po povrchu se v pájeném spoji IMC formují procesy rozpouštění a difúze. Na rozhraní mezi roztavenou pájkou a smáčeným povrchem se vytváří chemické a fyzikální vazby. To znatelně ovlivňuje lokální složení spoje na rozhraní smáčených povrchů. V závislosti na typu a velikosti spoje mohou být jeho mechanické vlastnosti postupně ovlivňovány. Dále pak teplota pájek výrazně ovlivňuje difúzní procesy v pájených spojích. Proto můžeme očekávat, že IMC původně vytvořené při reaktivním smáčení se budou dále vyvíjet. To může ovlivnit mikrostrukturu, následné smáčení substrátu a mechanické vlastnosti spojů. Pochopení charakteristik IMC a jejich vývoj je důležitou částí porozumění vlastností pájených spojů [22,29].

3.2 Formování a růst IMC

Jak bylo zmíněno výše, IMC se formují díky rozpouštění a difúzi. Konkrétně je to difúze pájky do tuhého kovu a rozpouštění tuhého kovu v tekuté pájce.

Difúze u pevných kovů závisí především na typu krystalové mřížky, nepravidelnosti a poruchách krystalové mřížky. Se vzrůstající hustotou poruch v krystalové mřížce se zvyšuje součinitel difúze. Hustota vakancí a dislokací, velikost

zrna a množství pružných deformací v kovu je odvozená od způsobu výroby a opracování kovu – mechanické, tepelné, případně chemické. Pokud jsou při difúzi vzájemné síly mezi atomy difundujících prvků malé, i aktivační energie je malá, tím je součinitel difúze velký, a tedy i rychlost difúze je velká. Součinitel difúze také závisí na velikosti difundujícího prvku, teplotě tavení a v případě slitiny i na vlastní koncentraci prvku ve slitině. Difuzní zóna se vytvoří v okamžiku smáčení tuhého kovu roztavenou pájkou. Difuzní tok roztavené pájky, která difunduje přes průřez A po dobu t ze strany s vyšší koncentrací do strany s nižší koncentrací, je úměrný koncentračnímu gradientu. Pro tloušťku vytvořené difuzní vrstvy Z po době pájení t z II. Fickova zákona platí [29,30]:

$$Z = \sqrt{Dt}, \quad (12)$$

kde Z – tloušťka IMC (m)

D – součinitel difúze (m^2s^{-1})

t – čas (s)

Rychlost difúze i tloušťka vytvořené vrstvy závisí na nastavení pájecího procesu (teplota pájení, doba pájení, volba pájky) a na spojovaných materiálech. Ze základních rovnic difúze byla empiricky stanovena Arrheniova rovnice [22,29-31].

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right), \quad (13)$$

kde D_0 – difúzní koeficient (m^2s^{-1})

Q – aktivační energie růstu IMC (eV)

k – Boltzmannova konstanta $8,617 \cdot 10^{-5}$ (eVK⁻¹)

T – teplota (K)

V průběhu smáčení a roztékání dochází vlivem difúze ke změně chemického složení tuhého povrchu. Vznikají zde tuhé roztoky eutektických fází a peritektické sloučeniny. Atomy tuhých roztoků eutektických fází přechází do tekuté pájky, když dosáhnou teploty tavení. Pokud jsou ve stykové oblasti i sloučeniny s peritektickou

reakcí¹, snižuje se rozpouštění tuhého kovu do roztavené pájky. Přechod atomů tuhého kovu do roztavené pájky probíhá buď difúzí – tj. za statických podmínek, nebo prouděním – tj. za dynamických podmínek procesem tečení. Největší tečení pájky nastává na počátku jejího roztavení a smáčení povrchu. Kinetika rozpouštění je řízena tím stádiem, ve kterém je menší rychlost přechodu atomů. Vztah (14) udává zákonitosti rozpouštění tuhé fáze v tekuté fázi [8,22]:

$$\frac{dQ}{dt} = K(C_0 - C)S, \quad (14)$$

kde $\frac{dQ}{dt}$ – množství látky rozpuštěné za jednotku času (mols^{-1})

K – konstanta rychlosti rozpouštění (ms^{-1})

C_0 – koncentrace nasyceného tuhého roztoku (molm^{-3})

C – skutečná koncentrace tuhého roztoku v daném okamžiku (molm^{-3})

S – plocha rozpouštějícího se tuhého povrchu (m^2)

Rychlost rozpouštění je charakterizována konstantou K , kterou ovlivňuje teplota, vlastnosti materiálu pájky i tuhého povrchu. Nežádoucí jev je rozpouštění tuhého kovu v roztavené pájce ve větší míře, zvláště pro povlakované 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 [22,29,30].

Formování a růst IMC v pájeném spoji významně ovlivňuje jeho spolehlivost. Vytvoření IMC je důležité, jelikož vzniká při reaktivním smáčení povrchu a tím zajišťuje vyšší pevnostní charakteristiky formovaného spoje. Oproti tomu intermetalické sloučeniny mají jiné vlastnosti než pájený kov a pájka. Zpravidla jsou křehčí, mají horší elektrickou a tepelnou vodivost, vyšší teplotu tání a horší smáčivost. Pokud jsou IMC ve struktuře pájeného spoje obsaženy ve větší míře, snižují životnost spoje. Stárnutí spoje a růst IMC difúzními procesy vedou také ke zhoršení vlastností pájeného spoje a jeho životnosti. Abychom mohli sledovat spolehlivost pájených spojů a dosáhli jsme jejich správného formování a pevnosti, je důležité znát smáčivost povrchu, vlastnosti pájky i nastavení pájecího procesu [22,29,30].

¹ Reakce taveniny se směsnými krystaly, při níž se tvoří směsné krystaly nového typu. Vyskytuje se v rovnovážných diagramech slitin, jejichž složky mají značný rozdíl v teplotě tání [31].

V současné době není známé přesné složení bezolovnaté pájecí slitiny, která by převyšovala svými vlastnostmi nad ostatními a mohla být používána pro pájení všech povrchových úprav pájených materiálů při výrobě elektronických zařízení. Proto jsou stále vyvíjeny nové bezolovnaté pájecí slitiny. To je hlavní důvod, proč je zkoumání intermetalických sloučenin pořád aktuální.

3.3 Experimentální kinetika pro rychlost růstu IMC

Mnoho faktorů ovlivňuje tloušťku intermetalické vrstvy. Jsou to např.: teplota, čas, vlastnosti pájecí slitiny, objem pájky, morfologie povrchu. Pokud je poměr mezi plochou a objemem pájeného spoje velký, dochází rychle k saturaci mědi ve spoji a začíná růst IMC. Rychlost růstu IMC v teplotní závislosti lze popsat rovnicí[22]:

$$w_{(t)} = w_0 + At^n \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right), \quad (15)$$

kde $w_{(t)}$ – celková tloušťka IMC za dobu t (m)

w_0 – počáteční tloušťka (m)

A – konstanta

n – časový exponent rychlosti růstu

Q – aktivační energie růstu IMC (eV)

k – Boltzmannova konstanta $8,617 \cdot 10^{-5}$ (eVK⁻¹)

T – teplota (K)

Pokud je růst IMC řízen difúzí, používá se předpoklad $n = 1/2$, tj. pro případy rozhraní pájky SAC s Sn nebo Cu povrchem [22].

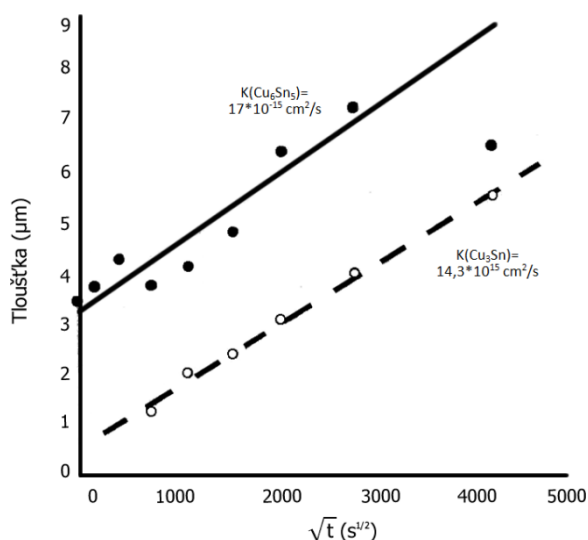
Vynesením $\ln D$ a $1/T$ získáme snadno grafickou závislost, kde dále můžeme podle zkosení, použitím metody nejmenších čtverců a Arrheniova vztahu spočítat aktivační energie pro intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn [29].

Jak již bylo řečeno, intermetalické sloučeniny jsou stále předmětem zkoumání vzhledem k vývoji nových pájecích slitin a jejich uvádění na trh. Intermetalické sloučeniny jsou zkoumány na rozhraní různých pájecích slitin a pájených povrchů.

Chen (1998) zkoumal růst intermetalických vrstev na rozhraní Cu–Sn povrchově montovaných pájených spojů pomocí SnPb pájecích slitin. Pro výzkum byly pájené spoje po různé doby vystaveny tepelnému stárnutí při různých teplotách (70, 120, 155

a 170 °C). Aktivační energii Q pro růst IMC na rozhraní Cu–Sn vyhodnotil Arrheniovým grafem $\ln(D)$ proti $1/T$. Z těchto hodnot stanovil aktivační energie Q a difúzní koeficient D_0 pro mezifázový růst IMC CuSn v povrchově montovaném pájeném spoji jako $Q \sim 1,09$ eV a $D_0 \sim 1,61 \cdot 10^{-4}$ m²s⁻¹[29].

Choi (1999) pozoroval tvorbu intermetalických sloučenin na rozhraní Sn–Ag. Na obrázku č. 6 jsou ukázány naměřené hodnoty tloušťky intermetalických sloučenin proti odmocnině času stárnutí, \sqrt{t} . Z obrázku je patrné, že tloušťka IMC se lineárně zvětšuje s \sqrt{t} a růstová rychlost je vyšší pro vyšší teploty stárnutí. [29].



Obrázek 6: Tloušťka IMC Cu₆Sn₅ a Cu₃Sn v závislosti na odmocnině času při teplotě stárnutí 150 °C pro eutektický pájený spoj Sn-Ag [29]

Spoje vytvořené eutektickou pájkou SnAg se vyznačují nízkým koeficientem růstu vrstev IMC Cu₆Sn₅ a vyšším koeficientem pro vrstvu IMC Cu₃Sn v porovnání se spoji SnPb. Difúze cínu k IMC v SnAg spoji je pomalejší než v SnPb spoji, to způsobuje nižší koeficient růstu IMC Cu₆Sn₅ bohaté na cín a vyšší koeficient růstu pro IMC Cu₃Sn bohatou na měď[29].

Zheng (2002) zkoumal růst Cu₆Sn₅ na rozhraní mědi a pájky Sn_{3,8}Ag_{0,7}Cu. Jako vzorky použil desku plošného spoje s povrchovou úpravou mědi OSP. Vzorky byly připraveny pájením přetavením a vystaveny tepelnému stárnutí při teplotách 119; 143,5 a 168 °C. Z vyhodnocení naměřených údajů stanovil aktivační energii pro formování Cu₆Sn₅ jako $Q = 0,93$ eV[29].

Tabulka 5 zobrazuje přehled zdánlivé aktivační energie Q a koeficientu D_0 růstu intermetalických sloučenin během procesu pájení.

Tabulka 5: Přehled aktivační energie Q a koeficientu D₀ [29]

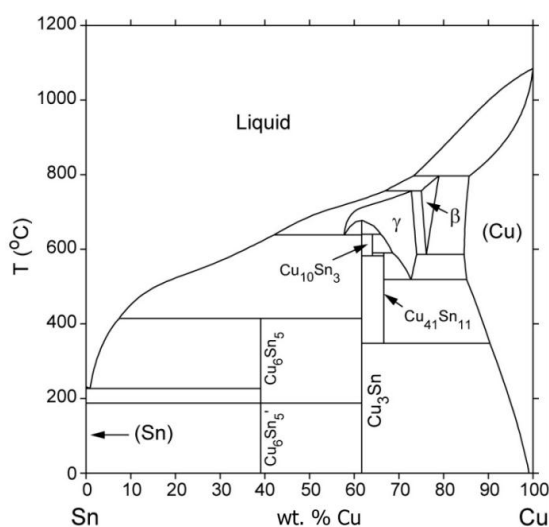
Pájka	Substrát	Q (eV)	D ₀ (μm ² /s)
100Sn	Pokovený Ni	0,86±0,10	0,43
Sn-3,5Ag	Pokovený Ni	1,20±0,10	2,22
Sn-37Pb	Pokovený Ni	1,26±0,05	1,22
100Sn	Válený Cu povlak	0,67±0,04	1,50
100Sn	Pokovený Cu	0,86±0,03	3,40
Sn-3,5Ag	Válený Cu povlak	1,01±0,07	5,30
Sn-3,5Ag	Pokovený Cu	1,44±0,07	37,30
Sn-37Pb	Válený Cu povlak	0,76±0,04	0,60
Sn-37Pb	Pokovený Cu	1,45±0,04	28,60

3.4 IMC v bezolovnatém pájeném spoji

Při bezolovnatém pájení se používají pájecí slitiny s velkým obsahem cínu. Bezolovnaté pájky mají vyšší teplotu tavení, a tudíž se při pájení používá vyšších pájecích teplot v porovnání s olovnatým pájením. Z těchto důvodů dochází ve struktuře bezolovnatých pájených spojů k rozšíření vrstvy s intermetalickými sloučeninami. Rychlost růstu IMC u pájek SAC je vyšší v porovnání s Sn37Pb pájkou [22,29].

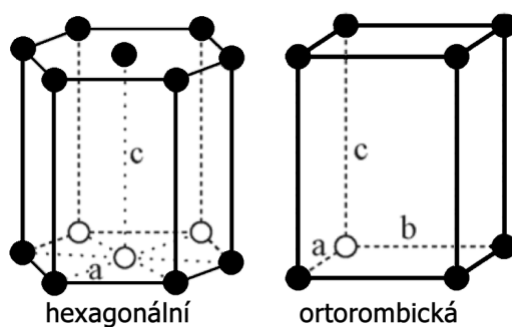
Intermetalické sloučeniny vznikají při pájení různých materiálů. Nejpoužívanějším materiálem je měď, tudíž se jedná o IMC Cu₆Sn₅ a Cu₃Sn. Pokud bychom však pájeli na povrchové úpravě ENIG, vytvoří cín spolu s niklem obdobné sloučeniny. Cín takto reaguje také se stříbrem, zlatem nebo železem. Jednotlivá rozhraní a charakteristika IMC jsou popsány níže [16,22,29].

3.4.1 Cu–Sn rozhraní



Obrázek 7: Fázový diagram Cu-Sn [33]

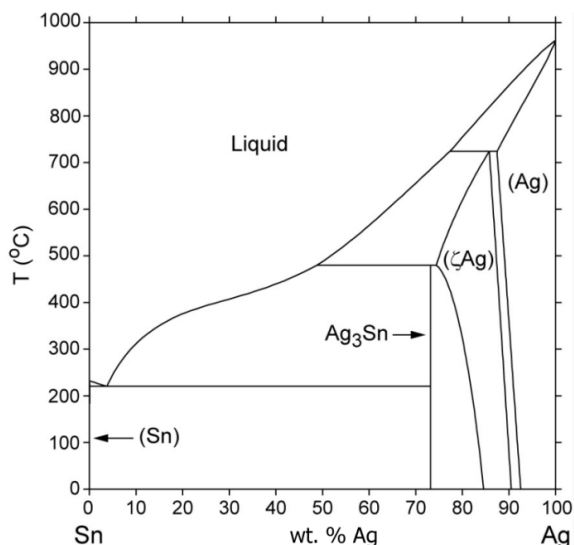
Na obrázku č. 7 můžete vidět fázový diagram Cu-Sn. Cu-Sn je nejdůležitější binární systém příslušný intermetalickým sloučeninám. Při pájení se hned po smáčení mědi pájkou vlivem difúze vytvoří intermetalická sloučenina Cu_6Sn_5 . Tato sloučenina roste i při nižších teplotách než je pájecí teplota. IMC Cu_6Sn_5 má světle šedou barvu, teplotu tání přibližně $415\text{ }^\circ\text{C}$ a je označována jako η fáze. V blízkosti IMC Cu_6Sn_5 je pájka ochuzována o cín. Za určitých podmínek (zejména při vyšších teplotách) se na rozhraní mědi a IMC Cu_6Sn_5 vytvoří druhá IMC Cu_3Sn . Tato IMC obsahuje větší množství mědi než Cu_6Sn_5 . Teplotu tání má přibližně $670\text{ }^\circ\text{C}$, má tmavě šedou barvu a je nesmáčivá. IMC Cu_3Sn je označována jako ε fáze a obecně se tvoří, když je bráněno difúzi cínu do mědi a je podporována difúze mědi do pájky. Krystalická struktura fáze η je hexagonální, zatímco fáze ε má ortorombickou krystalovou strukturu, viz obrázek č. 8. Mikrostruktura fáze ε je převážně sloupcovitého charakteru, zatímco fáze η je více kulovitá [13,16,29].



Obrázek 8: Krystalová struktura IMC Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn [34]

Při nižších teplotách dominuje tvorba vrstvy Cu_6Sn_5 , oproti tomu při vyšších teplotách je mnohem tlustší vrstva Cu_3Sn . Tloušťka intermetalických vrstev není stálá a časem se zvyšuje. V převážné většině případů zkoumání růstu IMC jsou experimentální výsledky přijatelně přibližně s parabolicky vztaženou charakteristikou difúze podle rovnice (9) a (10). Aktivační energie pro růst sloučeniny Cu_3Sn je přibližně 58 kJmol^{-1} , kdežto aktivační energie růstu celkové vrstvy intermetalických sloučenin je okolo 21 kJmol^{-1} [29].

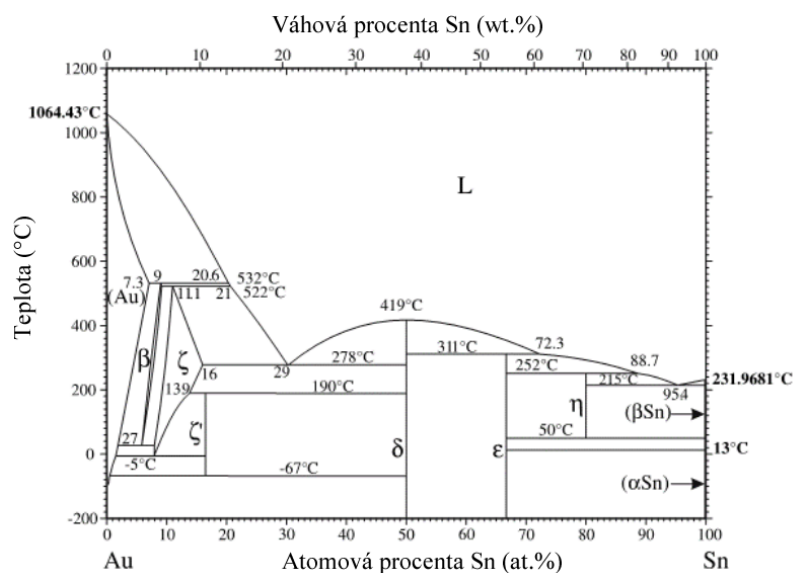
3.4.2 Ag–Sn rozhraní



Obrázek 9: Fázový diagram Ag-Sn [35]

Eutektická složení binárního systému Ag-Sn se vyskytuje ve slitině Sn_{3,5}Ag a eutektická teplota je 221 °C, viz obrázek č. 9. IMC Ag₃Sn je druhá fáze v eutektické slitině Ag-Sn. Morfologie Ag₃Sn v pájeném spoji může mít jehlovitý tvar nebo jakýsi tvar talířové mísy a je rozptýlená jako sekundární fáze v matici cínu. Tvorba jehlovitých tvarů může zhoršovat vlastnosti spoje. Důležitý je poměr množství jehlic v porovnání s velikostí spoje, objemem pájky a kompozicí desky [22].

3.4.3 Au–Sn rozhraní

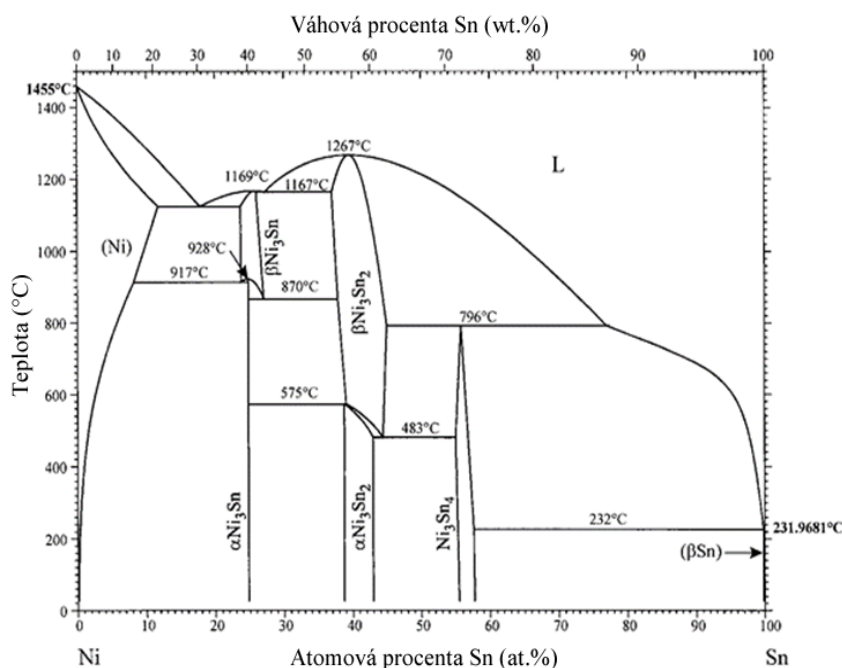


Obrázek 10: Fázový diagram Au-Sn [36]

Fázový diagram Au-Sn ukazuje několik intermetalických vrstev, které mohou vzniknout na rozhraní cín – zlato. Jsou to fáze: δ = AuSn, ε = AuSn₂, η = AuSn₄ a ζ =

Au_5Sn , viz obrázek č. 10. Hlavní příčina špatné spolehlivosti spojů po pájení může být fáze $\eta(\text{AuSn}_4)$, která je extrémně křehká. Pájení zlatých povrchů velké tloušťky může být riskantní, protože intermetalické fáze AuSn zkřehčují spoj, což může vést k předčasnému selhání. Abychom využili lepší pájitelnosti poskytované zlatým povrchem, je důležité kontrolovat tloušťku zlaté vrstvy. Přičemž tenká vrstva nemůže poskytnout dlouhotrvající ochranu pájitelnosti kvůli pórovitosti [29].

3.4.4 Ni–Sn rozhraní



Obrázek 11: Fázový diagram Ni-Sn [37]

Na obrázku č. 11 je vidět fázový diagram Ni-Sn, který zobrazuje tři důležité fáze: $\beta = \text{Ni}_3\text{Sn}$, $\gamma = \text{Ni}_3\text{Sn}_2$, $\delta = \text{Ni}_3\text{Sn}_4$. Vědci zabývající se pozorováním IMC na rozhraní Ni-Sn zjistili, že sloučenina s obsahem niklu mezi 10–15 % hmoty je blízká NiSn_3 . Tato intermetalická sloučenina byla pozorována na rozhraní mezi Ni a Ni_3Sn_4 . Nikl bývá často používán jako bariérová vrstva pájek, které jsou založeny na cínu, mědi či jiných slitinách. Vrstvená struktura intermetalických látek NiSn se formuje při relativně nízké teplotě srovnatelnou rychlostí jako vrstvy CuSn , ale při vyšších teplotách je jejich poměrný růst značně nižší [22,29,38].

Zeng (2002) zaznamenal degradaci spojů s povrchovou úpravou obsahující nikl ve strukturách flip-chip pájených SAC pájkou. Na rozhraní pájka-nikl nejčastěji vzniká trojná IMC $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$, která je po pájení velmi tenká a během stárnutí narůstá do tloušťky 4–5 μm . To je pravděpodobně způsobeno vrstvou niklu, která zabraňuje

rozpuštění mědi ze substrátu a k mezifázovému rozhraní tak migruje pouze měď obsažená v pájecí slitině. IMC $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ roste výrazně rychleji v porovnání s Ni_3Sn_4 . Formování ternárních intermetalických sloučenin $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ nebo $(\text{Cu,Ni})_3\text{Sn}_4$ na mezifázovém rozhraní narušují spolehlivost pájeného spoje [22,29].

V tabulce 6 je přehled vlastností nejčastěji se vyskytujících intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji v porovnání s mědí.

Tabulka 6: Vlastnosti IMC v porovnání s Cu [39-42]

Vlastnost	Cu_6Sn_5	Cu_3Sn	Ni_3Sn_4	Ag_3Sn	Cu
Tvrдость podle Vickerse (kg/mm^2)	387,00	343,00	365,00	126,50	50,00
Mechanický charakter	křehký	křehký	křehký		houževnatý
Poissonovo číslo	0,31	0,30	0,33	0,35	0,34
Tepelná roztažnost ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$)	16,30	19,00	13,70		16,00
Tepelná vodivost ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	34,10	70,40	19,60		385,00
Rezistivita ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	17,50	8,93	28,50	7,70	1,70
Hustota (g/cm^3)	8,30	8,90	8,65	10,00	8,90

Odolnost komponent proti poruchám způsobeným vibracemi, mechanickým otřesům a teplotním šokům závisí především na pevnosti pájeného spoje. Intermetalické sloučeniny, které vznikají ve struktuře pájeného spoje, se významně podílí na vzniku funkčního a pevného kovového spojení. Nicméně tyto vrstvy intermetalických sloučenin jsou obecně křehčí a největší pnutí se obvykle vyskytuje na rozhraní pájecí plošky a pájky. Proto velké tloušťky intermetalické vrstvy znatelně zhoršují spolehlivost pájeného spoje. Již bylo provedeno a zveřejněno několik studií o vzájemných vazbách a interakcích na mezifázovém rozhraní pájky a povrchových úprav. Tyto studie se zaměřují na vývoj a růst vrstvy IMC za různých tepelných podmínek zatížení, jako je izotermická, tepelné cyklování (TC) nebo teplotní šoky (TS). Bylo zjištěno, že jednotlivé faktory jako je teplota nebo pnutí plynoucí z rozdílných součinitelů teplotní roztažnosti ovlivňují růst IMC. Bylo konstatováno, že teplotní šoky a teplotní cyklování může zrychlit růst IMC v pájeném spoji v porovnání s izotermickým namáháním. Ačkoli bylo zjištěno, že pnutí přispívá k růstu IMC, vztah mezi pnutím a růstem IMC zatím není dobře znám. Navzdory těmto studiím, zabývajícím se zkoumáním IMC v pájených spojích, je predikce vlivů a tvorby intermetalických sloučenin v rozdílných materiálových kombinacích stále předmětem intenzivního zkoumání[31,49-55].

Experimentální část

Analýzou pájeného spoje je možné odhalit vady, jako jsou například dutiny (voidy) nebo praskliny ve spoji (cracks). Intermetalické sloučeniny a jejich vliv na vlastnosti pájeného spoje, jejich tvorba a růst nejsou doposud zcela jednoznačně prozkoumány. Na základě rešeršní činnosti popsané v předchozích kapitolách byl navržen a realizován experiment. Cílem tohoto experimentu bylo pozorování materiálových a procesních faktorů ovlivňujících tvorbu a růst intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji. Dalším cílem bylo zjistit, jaký mají vliv intermetalické sloučeniny na pevnost a životnost bezolovnatého pájeného spoje, a provést prvkovou analýzu těchto intermetalických sloučenin. Pro zkoumání struktury pájeného spoje a jeho vlastností bylo nutné vytvořit testovací vzorky. Na testovacím vzorku byl vytvořen pájený spoj za přesně daných a opakovatelných podmínek, a to z důvodu možnosti různé vzorky porovnávat a vyhodnocovat. Také je důležité stanovit metody, jimiž bude pájený spoj a jeho vlastnosti analyzovány.

Jelikož se na trh stále dostávají nově vyvíjené bezolovnaté pájecí slitiny, je důležité znát jejich vlastnosti. To je hlavním důvodem, proč je zkoumání struktury pájeného spoje a faktorů ovlivňující jeho kvalitu a spolehlivost, mezi které neodmyslitelně patří intermetalické sloučeniny, předmětem stálého zájmu.

V experimentální části práce je uveden popis použitých materiálů na výrobu testovacích vzorků, aplikovaných testovacích metod a metody analyzování testovaných vzorků. Také představuje kódové označení jednotlivých použitých materiálů pro snazší orientaci při prezentaci výsledků. Experimentální část práce je zaměřena na materiálové vlivy, jako jsou drsnost povrchu, povrchová úprava desek plošných spojů nebo prvkové složení pájecích past, a na procesní vlivy, např.: tepelné namáhání při různých teplotách po různě dlouhou dobu, nastavení teplotního pájecího profilu nebo množství pájecí pasty ve spoji.

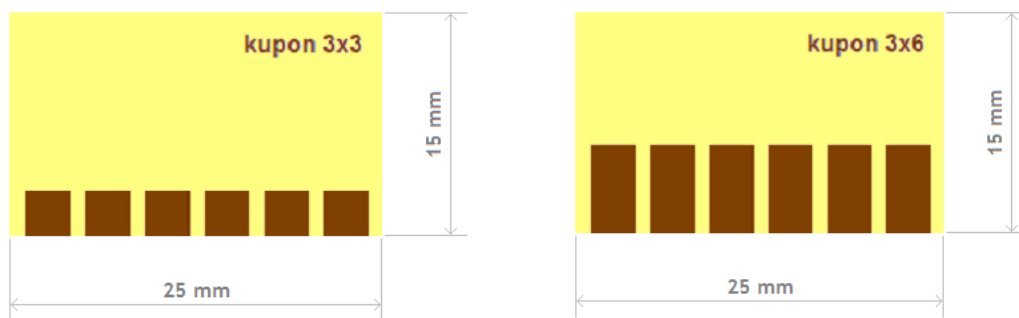
4 Materiály a metody použité při experimentu

Pro zkoumání tvorby a růstu IMC v bezolovnatém pájeném spoji a stanovení procesních faktorů ovlivňujících růst IMC byly vytvořeny testovací vzorky. Jednalo se o vzorky s různými povrchovými úpravami, které měly jako základní materiál typ FR4 oboustranně plátovaný čistou mědí. Na vzorcích byly vytvořeny pájené spoje technologií pájení přetavením. K pájení byly vybrány nejčastěji používané pájecí pasty

různých složení. Profil pájení byl volen optimálně k dodržení výrobcem (dodavatelem) doporučených pájecích profilů. Testované vzorky byly analyzovány pomocí mikroskopie. Konkrétně to byly mikroskopy: metalografický, laserový konfokální a elektronový rastrovací.

4.1 Testovací vzorky

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2, nejčastěji používaným materiálem pro pájecí plošky je měď. Z tohoto důvodu a pro její dobré vlastnosti byla vybrána pro tvorbu testovacích vzorků. Všechny testovací vzorky byly vytvořeny z desek plošných spojů. Jako základní substrát byl použit materiál FR4 o tloušťce 1,5 mm, který byl oboustranně plátovaný mědí tloušťky 35 μm . Takto připravené vzorky byly dále povrchově upraveny. Použité povrchové úpravy byly: organický inhibitor oxidace mědi (OSP), galvanický cín (Sn_galv), imerzní cín (Sn_im), imerzní zlato (ENIG - Electroless Nickel Immersion Gold) a jako poslední povrchová úprava byla ponechána čistá měď (Cu). Testovací vzorky byly vytvořeny ve dvou typech. Jeden typ vzorků byl vytvořen ke zkoumání růstu intermetalických sloučenin v pájeném spoji. Jde o desku plošných spojů o rozměrech 25 mm x 15 mm. Na obou stranách je vytvořen motiv šesti polí o rozměrech 3 mm x 3 mm nebo 3 mm x 6 mm, viz obrázek č. 12.



Obrázek 12: Testovací vzorek – kupon 3x3 a kupon 3x6

Druhý typ vzorku byl vytvořen ke zkoumání mechanické pevnosti pájených spojů. Jde o desku plošných spojů o rozměrech 50 mm x 25 mm. Na jedné straně je vytvořen motiv pro připájení deseti povrchově montovaných součástek typu pouzdra 1206, viz obrázek č. 13.



Obrázek 13: Testovací vzorek - vzorek 1206

4.2 Vybrané pájecí pasty

Pro vytvoření testovacího vzorku je také nutné určit, které pájecí pasty budou podrobeny výzkumu. Výběr pájecích past byl volen s ohledem na snahu zcela vyloučit toxické materiály z elektronického a elektrotechnického průmyslu v souladu s ochranou životního prostředí a ochrany lidského zdraví, jak již bylo zmíněno výše. Abychom měli možnost porovnat nové bezolovnaté pájecí pasty a jejich vlastnosti s již dlouhodobě prověřenou pájecí pastou, byla vybrána také jedna olovnatá pájecí pasta. Vybrané pájecí pasty lze tedy rozdělit do dvou skupin – bezolovnaté a olovnaté. V tabulce 7 jsou uvedeny vybrané pájecí pasty, jejich složení, teplota tavení, obsah tavidla a velikost kovových částic v pastě. Tyto pasty byly vybrány proto, že zastupují vždy jednu z nejčastěji používaných kombinací prvků v bezolovnatých pájecích pastách – SnAgCu, SnCu, SnAg, BiSn. Také proto, že zastupují nejčastěji používané pájecí pasty při výrobě elektronických zařízení [39].

Tabulka 7: Vybrané pájecí slitiny [43,44]

Pájecí pasta	Složení	Teplota tání (°C)	Obsah tavidla (%)	Velikost částic (µm)
SAC-3-XF3+ (SAC)	Sn-3,0wt.% Ag-0,5wt.% Cu	217 – 219	12	25-45
RMA-223-LF35 (SnAg)	Sn-3,5wt.% Ag	221	14	25-45
SN100C-XF3+ (SnCu)	Sn-0,7wt.% Cu-0,05wt.% Ni	227	12,07	25-45
BSA04-XSP (BiSn)	Sn-57,6wt.% Bi-0,4wt.% Ag	138	10,2	25-45
Sn62-325-GM5 (SnPb)	Sn-36wt.% Pb-2,0wt.% Ag	179	13,5	25-38

Doporučené nastavení teplotních pájecích profilů použitých pájecích past je uvedeno v tabulce 8.

Tabulka 8: Dodavatelem doporučené nastavení teplotního pájecího profilu pájecích past

Pájecí pasta	Teplota peaku (°C)	Čas nad bodem liquidu (s)	Teplota přehřevu (°C)	Čas přehřevu (s)
SAC-3-XF3+ (SAC)	235 - 250	30 - 50	155 - 195	45 - 100
RMA-223-LF35 (SnAg)	230 - 249	30 - 60	140 - 200	60 - 90
SN100C-XF3+ (SnCu)	240 - 250	30 - 60	175 - 190	45 - 100
BSA04-XSP (BiSn)	160 - 180	30 - 60	100	100
Sn62-325-GM5 (SnPb)	217 - 225	35 - 50	155 - 175	45 - 60

4.3 Testovací metody a analýzy

V průběhu experimentu byly testované vzorky podrobeny různým zkouškám. V této podkapitole je nastíněn popis vybraných testovacích metod a analýz použitých při experimentu na testovacích vzorcích.

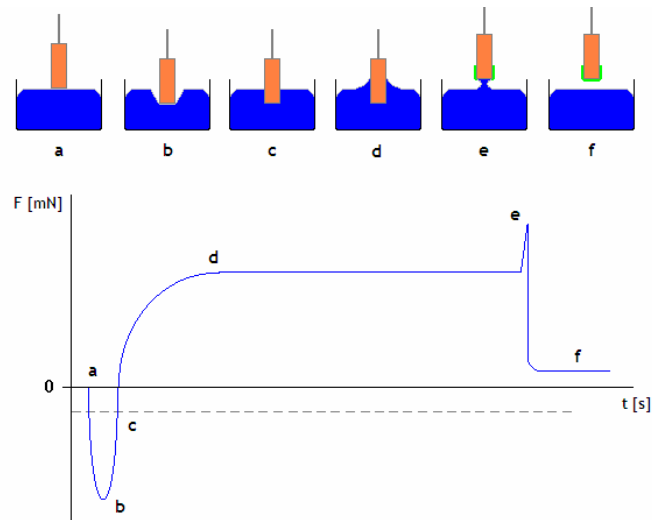
Metoda smáčecích vah

Test, který využívá smáčecích vah, lze objektivně považovat za velmi přesnou měřicí metodu. Přesná nastavení testu či definice metody smáčecích vah jsou definovány v normách ČSN EN 60068-2-69 a ČSN 34 5791-2-54, rovněž zahraniční normy IPC a MIL stanovují podmínky testu.

Metoda smáčecích vah umožňuje měřit svislé síly na testovaný vzorek během ponoru do pájecí lázně jako funkci času. Princip metody je znázorněn na obrázku č. 14. Testovaný vzorek je opatřen tavidlem (podle normalizovaného postupu) a zavěšen do citlivého siloměru. Ten je umístěn nad středem nádoby obsahující lázeň s roztavenou pájkou. Nádoba je následně zvedána kolmo směrem ke vzorku. Posuv nesmí být příliš pomalý ani příliš rychlý, aby se netvořily rázové vlny na hladině roztavené pájky. Posuv je realizován pomocí krokového motorku. Vše je řízeno elektronicky a to nám dovoluje nastavit přesné hodnoty rychlosti ponoru vzorku. Siloměr zaznamenává velikost síly a hodnotu času po dobu testu. Před samotným stykem testovaného vzorku s roztavenou pájkou se musí odstranit oxidy a zbytky tavidla po předchozím vzorku na povrchu pájecí lázně. Lázeň musí mít dostatečnou tepelnou kapacitu, aby při ponoru vzorku nedošlo k velkému kolísání teplot. Teplota lázně se při zkoušce musí udržovat

s požadovanou přesností. Po dostatečně dlouhém kontaktu vzorku s lázní se nádoba s lázní vrátí do výchozí pozice [14,45].

Testování metodou smáčecích vah bylo provedeno na testeru pájitelnosti MUST System II Plus.



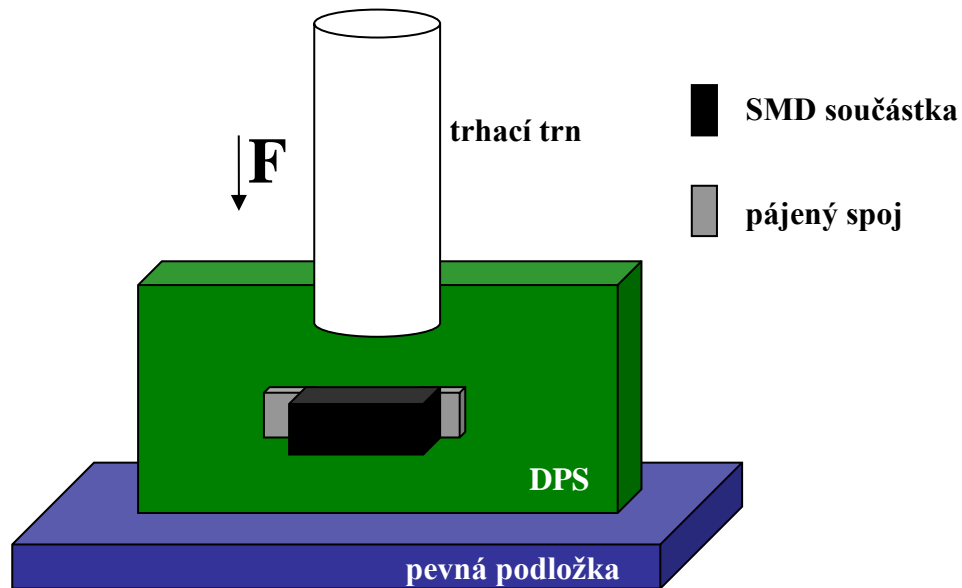
Obrázek 14: Princip metody smáčecích vah [24]

Měření mechanické pevnosti pájeného spoje ve smyku

Na mechanickou pevnost pájeného spoje má vliv mnoho faktorů. Mezi tyto faktory patří např.: materiál a povrchová úprava pájecích plošek, velikost pájecích plošek, složení a množství pájecí slitiny, složení tavidla, nastavení teplotního pájecího profilu a v neposlední řadě také tvorba intermetalických sloučenin, výskyt dutin nebo prasklin ve struktuře pájeného spoje. Z tohoto důvodu a pro možnost porovnání jednotlivých testovacích vzorků byly vzorky vyrobeny procesem se snahou udržet co nejvíce vstupních vlivů konstantních pro všechny vzorky. V případě udržení stálé hodnoty faktorů ovlivňujících mechanickou pevnost pájeného spoje lze při porovnání vzorků tyto faktory částečně zanedbat.

Postup měření mechanické pevnosti pájeného spoje (pevnost ve smyku) je znázorněn na obrázku č. 15. Měření spočívá v působení trhacího trnu na připájenou součástku, než dojde k porušení spoje. To má za následek utržení součástky. Protože nebyla měřena plocha, na kterou působila síla, nejde o přímé měření pevnosti ve smyku. Pevnost pájeného spoje představuje hodnota maximální síly zaznamenané při zkoušce, tj. síla při utržení součástky.

Mechanická pevnost pájeného spoje byla testována na trhacím zařízení LabTest 3.030.



Obrázek 15: Princip měření pevnosti ve smyku pájeného spoje

Mikroskopie a prvková analýza

Struktura pájeného spoje je nejčastěji analyzována využitím metod mikroskopie. Jedná se o mikroskopii optickou nebo rastrovací (skenovací) elektronovou (SEM - Scanning Electron Microscopy).

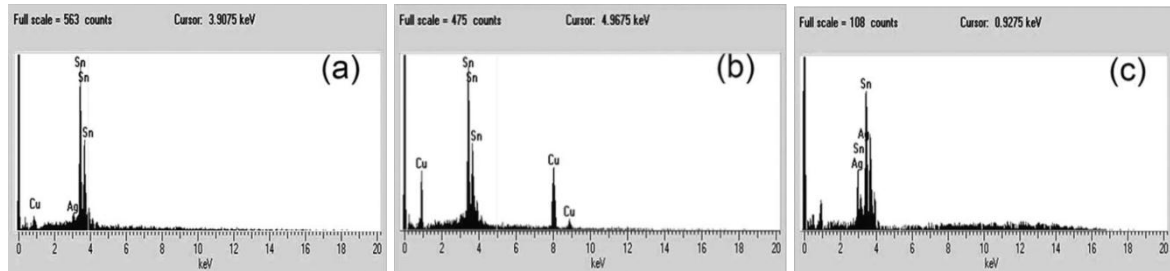
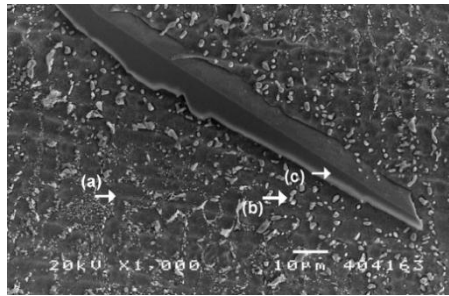
Skenovací elektronová mikroskopie je instrumentální metoda, která je zejména určená k pozorování zvětšených povrchů nejrůznějších objektů. K pozorování předmětu touto metodou lze využít buď sekundární elektrony (metoda SEI, Secondary Electron Imaging) nebo odražené elektrony (metoda BEI či BSE, Back Scattered Electron Imaging). Přístroj pracující s touto metodou nazýváme elektronový mikroskop. Díky tomuto principu je zobrazení v SEM považováno za nepřímou metodu. Velkou předností SEM v porovnání se světelným mikroskopem je jeho velká hloubka ostrosti. Další předností těchto mikroskopů je, že v prostoru, kde jsou vzorky zkoumány (přetlaková komora), vzniká při interakci urychlených elektronů s hmotou vzorku kromě výše zmíněných signálů ještě řada dalších, např. rentgenové záření, Augerovy elektrony, katodoluminiscence, které nesou mnoho dalších informací o vzorku. Při jejich detekci je možné určit např. prvkové složení preparátu v dané oblasti a při porovnání s vhodným standardem určit i kvantitativní zastoupení jednotlivých prvků.

Další důležitou částí analýzy struktury pájeného spoje je přesné určení složení všech intermetalických sloučenin, které se v něm vytvoří. Složení těchto sloučenin je možné určit prvkovou analýzou. Prvková analýza (EDX, Energy Dispersive X-ray spectroscopy) využívá emise rentgenového záření, které vzniká po dopadu proudu rychlých elektronů na pevný materiál, a dále se využívá k identifikaci chemického složení tohoto materiálu.

Testované vzorky, které chceme podrobně analyzovat elektronovou mikroskopií a prvkovou analýzou, musí být metalograficky upraveny. Konkrétně se jedná o vytvoření materiálografických výbrusů, které musí být pro analýzu suché, stabilní ve vakuu a při ozařování svazkem elektronů [46].

Analyzování povrchové drsnosti se nejčastěji provádí mikroskopem atomárních sil AFM (Atomic Force Microscopy). U mikroskopie atomové síly jsou k detekci vzdálenosti sondy (hrot délky několika mikrometrů, který je upevněn na volném konci pružného držáku) od povrchu využity meziatomární síly, které způsobují nepatrné deformace držáku sondy. Pomocí optické detekce laserovým paprskem je pak vyhodnocována poloha této sondy a topografie povrchu je dále softwarově zpracovávána [47].

Testované vzorky byly analyzovány za použití metalografického optického mikroskopu Olympus GX 71, laserového konfokálního mikroskopu Olympus OLS 3000 a rastrovacího elektronového mikroskopu s prvkovou analýzou Philips XL 30 + EDAX. Za tímto účelem byly z testovacích vzorků vytvořeny materiálografické výbrusy. Výbrusy byly vytvořeny na materiálografické brusce MTH KOMPACT 1031 za použití brusných papírů s označením hrubosti 80 až 2500. Hrubost představuje číslo zrnitosti použitého brusného papíru. Zrnitost je dána počtem ok síta na délce jednoho palce (zrno musí propadnout), detailnější popis je uveden v ČSN ISO 525. Vzorky, které byly podrobeny prvkové analýze, byly navíc chemicky zaleptány dolešťovací suspenzí pro dosažení co nejpřesnějšího určení hranic mezi jednotlivými materiálovými fázemi (měď, intermetalické sloučeniny, cín, olovo, bizmut apod.) ve struktuře pájeného spoje. Obrázek č. 16 ukazuje příklad analyzovaného povrchu pájeného spoje při použití elektronové mikroskopie a prvkové analýzy.



Obrázek 16: Intermetalické sloučeniny a prvková analýza bezolovnatého pájeného spoje: a) cín, b) Cu_6Sn_5 , c) Ag_3Sn [48]

Zrychlené stárnutí

Pájené spoje se také posuzují z hlediska jejich dlouhodobé životnosti. Abychom mohli pozorovat tvorbu a růst intermetalických sloučenin v pájeném spoji z dlouhodobého hlediska, byly vzorky vystaveny zrychlenému stárnutí. Zrychlené stárnutí bylo zajištěno tepelným namáháním testovaných vzorků v horkovzdušné peci při různých teplotách. Po dobu 1, 2, 4, 8, 16 a 32 dní byly vzorky tepelně namáhány při teplotách 80 °C a 150 °C. Po dobu 4 a 32 dní byly vzorky ještě vystaveny teplotám 100 °C a 125 °C.

Pájený spoj a nastavení teplotního pájecího profilu

Pájené spoje byly vytvořeny na základním materiálu s různými povrchovými úpravami technologií pájení přetavením. Na základní materiál bylo nanášeno přesně definované množství pájecí pasty disperzerem JBE 1113 a následně byla pájecí pasta přetavena v přetavovací peci HR 21. Pájené spoje na testovacích vzorcích „*kupon 3x3*“ (viz kapitola 4.1) byly vytvořeny jako kapičky pájky, pro lepší možnost zkoumání struktury spoje a růstu intermetalických sloučenin. Na testovacích vzorcích „*vzorek 1206*“ byly připájeny povrchově montované součástky. Konkrétně se jednalo o keramické rezistory (LCCC - Leadless Ceramic Chip Carrier) s typem pouzdra 1206. Takto vytvořené pájené spoje jsou klíčové především při analýze mechanických vlastností pájeného spoje.

Pro zkoumání všech procesních vlivů, kam patří také nastavení teplotního pájecího profilu, byla část testovacích vzorků zapájena s různými nastaveními teploty pájení a teploty předehřevu. V tabulce 8 jsou uvedeny nastavené hodnoty pro pájení v přetavovací peci HR 21. Tyto hodnoty byly voleny s ohledem na doporučení výrobce (dodavatele).

Tabulka 9: Nastavení přetavovací pece HR 21

Číslo profilu	Pájecí pasta	Teplota předehřevu (°C)	Čas předehřevu (s)	Teplota pájení (°C)	Čas pájení (s)
1	SAC	175	70	240	40
2	SAC	175	70	245	40
3	SAC	185	70	245	40
4	SnPb	165	60	225	50
5	SnPb	165	60	235	50
6	SnPb	175	60	235	50
7	SnAg	170	80	245	50
8	SnCu	180	60	250	60
9	BiSn	100	100	170	50

Statistická analýza naměřených hodnot

Naměřené a následně vypočtené hodnoty byly dále statisticky zpracovány pomocí softwaru MATLAB. Naměřené hodnoty maximální síly při měření smykové síly byly analyzovány pomocí analýzy malých výběrů – Hornova metoda.

Analýza malých výběrů je zatížena vysokou mírou statistické nejistoty. Hornův postup je založený na pořádkových statistikách $x_{(i)}$, kdy vychází z hloubek pivotů H odpovídajících přibližně výběrovým kvartilům. Hloubka pivotu je $H = \frac{int \frac{n+1}{2}}{2}$, když n je liché a $H = \frac{int \frac{n+1}{2} + 1}{2}$, když n je sudé. Dolní pivot $X_{dol} = X_{(H)}$ a horní pivot $X_{hor} = X_{(n+1-H)}$. Odhadem parametru polohy je *pivotová polosuma* $P_L = (X_{dol} + X_{hor})/2$ a odhadem parametru rozptýlení je *pivotové rozpětí* $R_L = X_{dol} - X_{hor}$. Náhodná veličina použitelná k testování $T_L = \frac{P_L}{R_L} = \frac{X_{dol} + X_{hor}}{2(X_{hor} - X_{dol})}$ má přibližně symetrické rozdělení, jehož vybrané kvantily jsou uvedeny v tabulce v příloze č. 10.4. Dle vztahu rovnice (16) se vypočte 95% interval spolehlivosti střední hodnoty[56]:

$$P_L - R_L t_{L;0,975}(n) \leq \mu \leq P_L + R_L t_{L;0,975}(n). \quad (16)$$

Vlivy materiálových a procesních faktorů byly analyzovány softwarem MATLAB s použitím analýzy rozptylu ANOVA. ANOVA se používá jako samostatná technika umožňující posouzení významnosti jednotlivých zdrojů variability v datech. Podstatou analýzy rozptylu je rozklad celkového rozptylu dat na složky objasněné (známé zdroje variability) a složku neobjasněnou (o níž předpokládáme, že je náhodná). Následně se testují hypotézy o významnosti jednotlivých zdrojů variability[57,58].

V obecném případě má daný faktor A celkem K různých úrovní A_1, \dots, A_K . Na každé úrovni A_i je provedeno n_i měření $\{y_{ij}\}$, $j=1, \dots, n_i$. Základním předpokladem statické analýzy je, že náhodné chyby ε_{ij} jsou nezávislé náhodné veličiny s normálním rozdělením $N(0, \sigma^2)$. To znamená, že střední hodnota chyb je rovna nule a rozptyl σ^2 je konstantní. Součet čtverců odchylek od celkového průměru $\hat{\mu}$ definovaný vztahem

$$S_C = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \hat{\mu})^2 \quad (17)$$

lze rozdělit na dvě složky $S_C = S_A + S_R$, kde S_A představuje součet čtverců odchylek mezi jednotlivými úrovněmi daného faktoru

$$S_C = \sum_{i=1}^K n_i (\hat{\mu}_i - \hat{\mu})^2 \quad (18)$$

a S_R je součet čtverců odchylek uvnitř jednotlivých úrovní

$$S_R = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \hat{\mu}_i)^2. \quad (19)$$

Jednotlivé součty čtverců odchylek a složky rozptylu spočtené v průběhu analýzy rozptylu jsou systematicky zaznamenávány v tabulce ANOVA, viz tabulka č. 10[57,58].

Tabulka 10: Tabulka analýzy rozptylu - ANOVA [57,58]

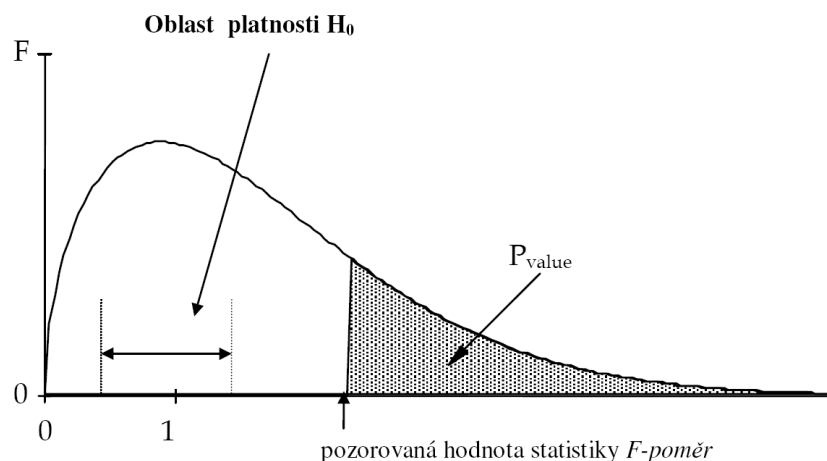
Součet čtverců	Počet stupňů volnosti	Průměrný čtverec	F - poměr	p - hodnota
Mezi úrovněmi S_A	K-1	$\frac{S_A}{K-1}$	$\frac{S_A(N-K)}{S_R(K-1)}$	
Reziduální S_R	N-K	$\frac{S_R}{N-K}$		
Celkový S_C	N-1			

Cílem takovéhoho třídění je především testování, zda jednotlivé úrovně daného faktoru vedou ke statisticky nevýznamným rozdílům ve výsledcích. Nulová hypotéza $H_0: \alpha_i = 0, i=1, \dots, K$, se ověřuje proti alternativní hypotéze $H_A: \alpha_i \neq 0, i=1, \dots, K$. Test

využívá faktu, že veličina S_A/σ_e^2 má χ^2 rozdělení s $K-1$ stupni volnosti a veličina S_R/σ_e^2 má nezávislé χ^2 rozdělení s $N-K$ stupni volnosti. Jejich podíl má pak F -rozdělení (F -poměr) s $K-1$ a $N-K$ stupni volnosti. Testovací statistika F_e má tvar

$$F_e = \frac{S_A(N-K)}{S_R(K-1)}. \quad (20)$$

Při platnosti nulové hypotézy H_0 má pak F_e statistika F -rozdělení s $K - 1$ a $N - K$ stupni volnosti. Vyjde-li F_e větší než kvantil $F_{1-\alpha}(K - 1, N - K)$, je nutné na hladině významnosti α nulovou hypotézu H_0 vyloučit a efekty považovat za nenulové čili statisticky významné. Následující obrázek č. 17 ilustruje použití F -poměru pro účely rozhodování o platnosti hypotézy H_0 . Stejně tak p -hodnota, která je obvyklým výstupem počítačových programů na testování hypotéz, je kritériem pro rozhodnutí, zda zamítáme, nebo nezamítáme nulovou hypotézu H_0 na hladině významnosti α . Z definice p -hodnota (p -value), viz obrázek č. 10, je zřejmé, že $p\text{-value} = 1 - F(F_e)$ [57,58].



Obrázek 17: F-poměr a p-hodnota[58]

P -hodnota tedy znamená, zjednodušeně řečeno, jaká je pravděpodobnost, že by testovací kritérium dosáhlo své hodnoty, případně hodnot ještě více svědčících proti H_0 , pokud by H_0 opravdu platila. P -hodnota je nejnížší hladina významnosti, na níž zamítáme nulovou hypotézu, a zároveň nejvyšší hladina významnosti, na níž se nulová hypotéza nezamítá. Nulová hypotéza zní „vstupní faktor nemá vliv na výstupní hodnotu“. Hladina významnosti α je pro 95% interval rovna hodnotě 0,01 a pro 97,5% interval rovna hodnotě 0,05. Čili pokud je p -hodnota pro daný interval menší než hladina významnosti α , zamítáme hypotézu[56,61].

4.4 Značení vzorků

Pro snadnější a přehlednější orientaci v legendách grafů a v tabulkách bylo zavedeno následující značení, viz tabulky 10 až 13. Formát značení vzorku „vzorek 1206“ je: A-B-C-D-E-F, kde jednotlivá písmena představují:

- A – povrchová úprava vzorku
- B – pájecí pasta
- C – teplota zrychleného stárnutí
- D – doba zrychleného stárnutí
- E – pájecí profil
- F – množství pájecí pasty.

Různé množství pájecí pasty (značení „M1“ a „M2“) bylo nanášeno na část vzorků „vzorek 1206“. Tyto vzorky byly následně podrobeny měření mechanické pevnosti a dále byly analyzovány pomocí mikroskopie. Účelem bylo zkoumání tvorby intermetalických sloučenin v závislosti na množství pájecí pasty ve spoji.

Značení použitého teplotního profilu pájení vychází z tabulky 8 a je převzato jako číslo profilu, tj. 1 až 9.

Při experimentu zkoumání vlivu drsnosti na smáčivost povrchu byly vzorky označeny v kódu tří znaků, např.: Cu_V_120. První znak představuje povrchovou úpravu, druhý znak představuje směr vrypů na povrchu – svislý „V“ (vertikální), tj. kolmý na hladinu roztavené pájky, nebo vodorovný „H“ (horizontální) s hladinou roztavené pájky. Třetí znak zastupuje úroveň hrubosti, kterou představuje číslo zrnitosti.

Tabulka 11: Povrchové úpravy

Kód značení	Povrchová úprava vzorku
Cu	čistá měď
OSP	ochranná organická vrstva
Sn_galv	galvanický cín
Sn_im	imerzní cín
ENIG	imerzní zlato

Tabulka 12: Pájecí pasty

Kód značení	Pájecí pasta
SAC	SAC-3-XF3+
SnAg	RMA-223-LF35
SnCu	SN100C-XF3+
BiSn	BSA04-XSP
SnPb	Sn62-325-GM5

Tabulka 13: Teplota zrychleného stárnutí

Kód značení	Teplota stárnutí (°C)
0	nestárnutý
80	80
100	100
125	125
150	150

Tabulka 14: Doba zrychleného stárnutí

Kód značení	Doba stárnutí (dny)
0	nestárnutý
1	1
2	2
4	4
8	8
16	16
32	32

5 Závislost smáčivosti na drsnosti povrchu

K dosažení kvalitního a dlouhodobého pájeného spoje je žádoucí, aby spojované materiály měly co nejlepší pájitelnost. Pájitelnost je podle standardů mezinárodního elektrotechnického výboru (IEC - International Electrotechnical Commission) definována jako soubor několika vlastností, které ukazují, jak je který materiál vhodný pro metody průmyslového pájení. Jednou z těchto vlastností je smáčivost. Jak již bylo řečeno v kapitole 2.4, důležitým faktorem při smáčení a roztékání pájky po povrchu pájecí plošky je drsnost povrchu.

5.1 Použité materiály a procesní podmínky

Vzorky desek plošných spojů:

- kupon 3x6 s povrchovou úpravou čistá měď
- brusné papíry s různou úrovní hrubosti - 120, 180, 240, 320 a 400

Použitá pájecí slitina:

- SAC 305 – 96,5wt.%Sn-3,0wt.%Ag-0,5wt.%Cu

Měření smáčecích charakteristik metodou smáčecích vah (viz kapitola 4.3)

a parametry testu byly:

- teplota lázně s roztavenou pájkou 245 °C
- hloubka ponoru vzorku do lázně 2 mm
- doba vzorku v lázni 10 s
- rychlost ponoru vzorku 10 mms^{-1}
- rychlost vytažení vzorku 20 mms^{-1}

Měřeno na testeru pájitelnosti MUST Systém II Plus, od každého typu bylo testováno 5 vzorků.

Měření parametrů drsnosti povrchu konfokálním mikroskopem Olympus OLS 3000, zvětšení 1200x, plocha 760 μm x 190 μm .

K zjištění vlivu drsnosti na smáčivost byly testované vzorky s povrchovou úpravou čistá měď testovány metodou smáčecích vah. Testované vzorky se od sebe odlišovaly svou povrchovou drsností. Drsnost povrchu jednotlivých vzorků byla vytvořena brusnými papíry odlišné hrubosti. Brusným papírem byly na povrchu vzorku

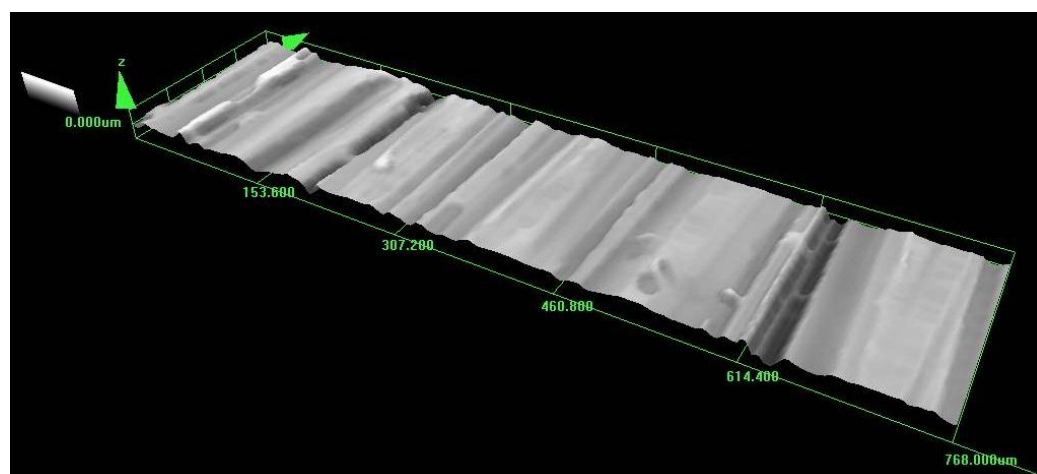
vytvořeny vrypy. Pro jednu skupinu vzorků byly vrypy orientovány vodorovně a pro druhou skupinu svisle. Orientace vrypů je vztažena vzhledem k umístění vzorku v testeru pájitelnosti a vzhledem ke směru ponoření do roztavené pájky. Abychom mohli určit míru vlivu drsnosti povrchu, byly pro porovnání také testovány vzorky nezdrsněné (označeny „Cu“). Označení vzorků, směr vrypů na povrchu testovaných vzorků a označení hrubosti použitých brusných papírů jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15: Značení vzorků s orientací vrypů a zrnitosti brusných papírů

Označení	H_400	V_400	H_320	V_320	H_240	V_240	H_180	V_180	H_120	V_120
Vodorovná orientace	ano	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne
Svislá orientace	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne	ano
Brusný papír	400	400	320	320	240	240	180	180	120	120

5.2 Vyhodnocení a diskuze naměřených dat

V tabulce 16 jsou uvedeny naměřené hodnoty povrchové drsnosti testovaných vzorků. Průběhy smáčecích sil testovaných vzorků jsou na obrázku č. 24. Na obrázcích č. 18 až 23 jsou ukázky povrchů testovaných vzorků s různou mírou povrchové drsnosti.

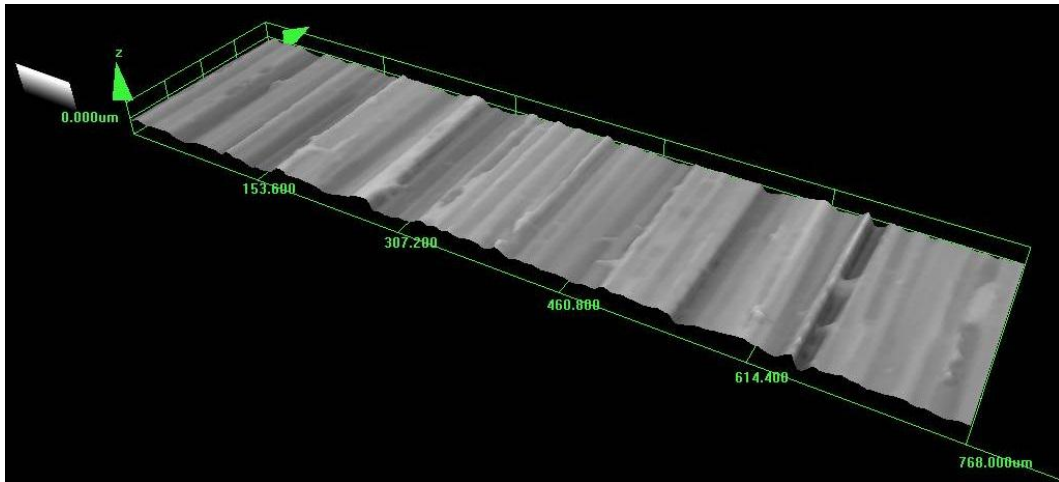


a)

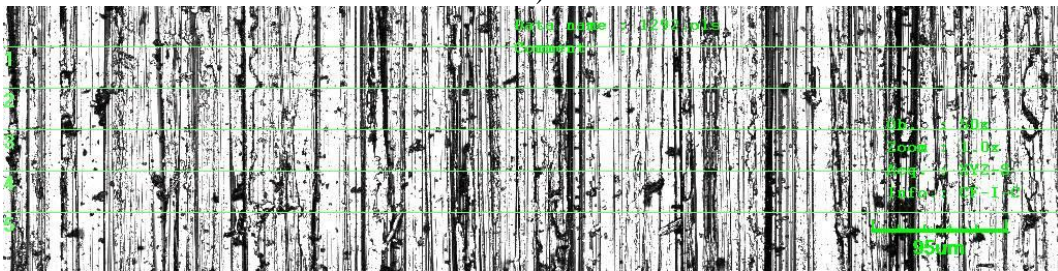


b)

Obrázek 18: Profil testovaného povrchu – a) 3D profil Cu_120, b) 2D profil Cu_120

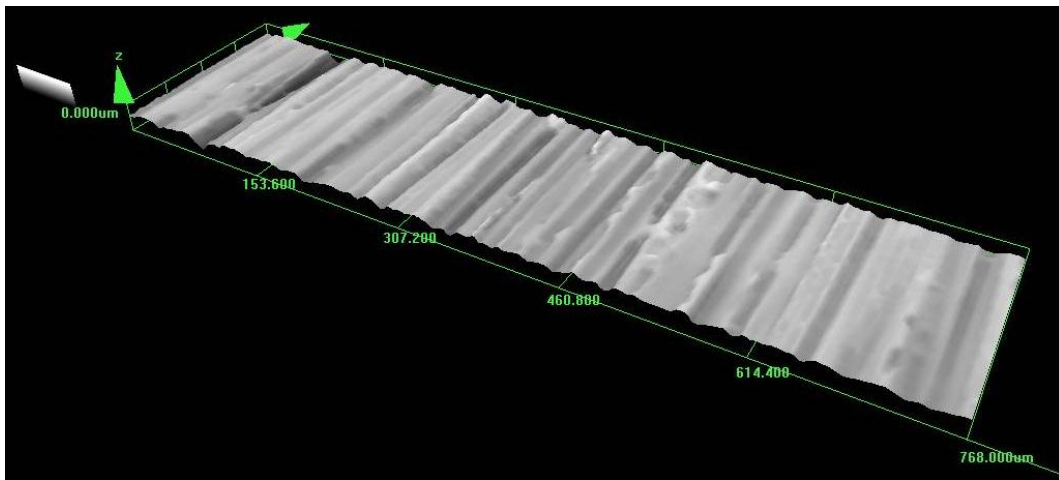


a)

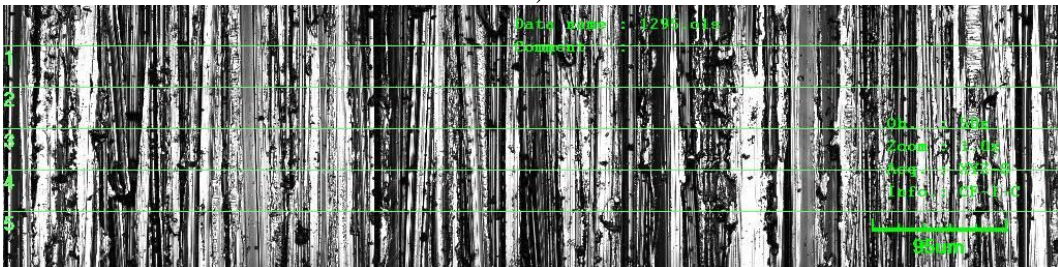


b)

Obrázek 19: Profil testovaného povrchu – a) 3D profil Cu_180, b) 2D profil Cu_180

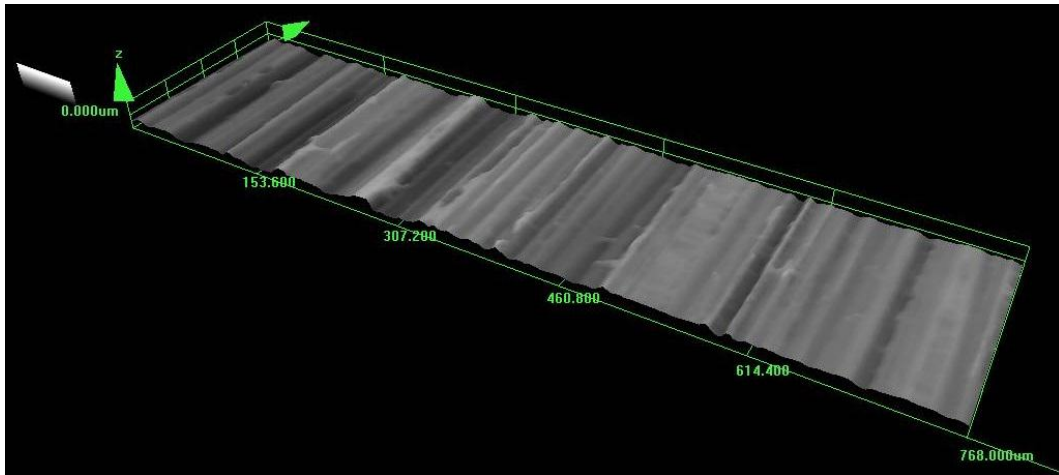


a)

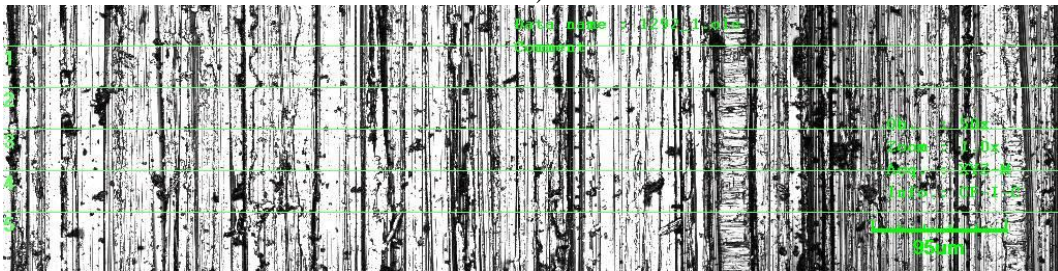


b)

Obrázek 20: Profil testovaného povrchu – a) 3D profil Cu_240, b) 2D profil Cu_240

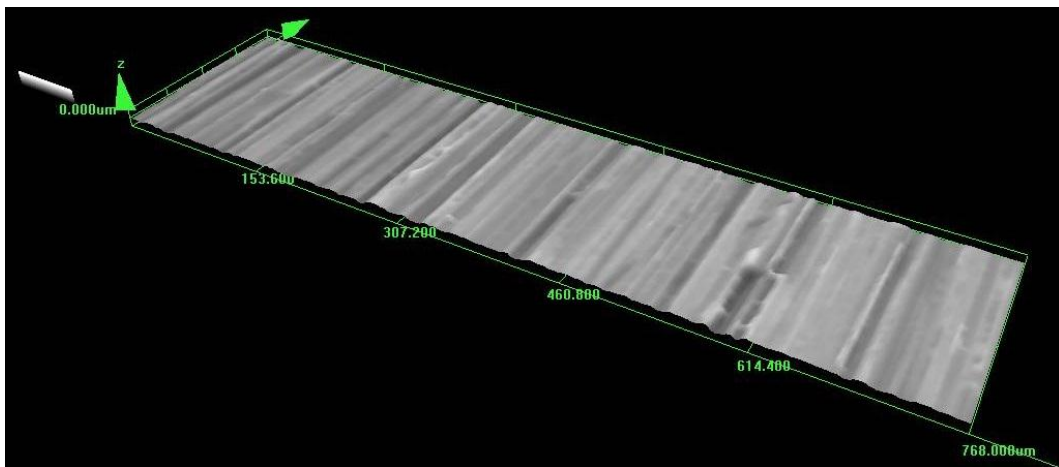


a)

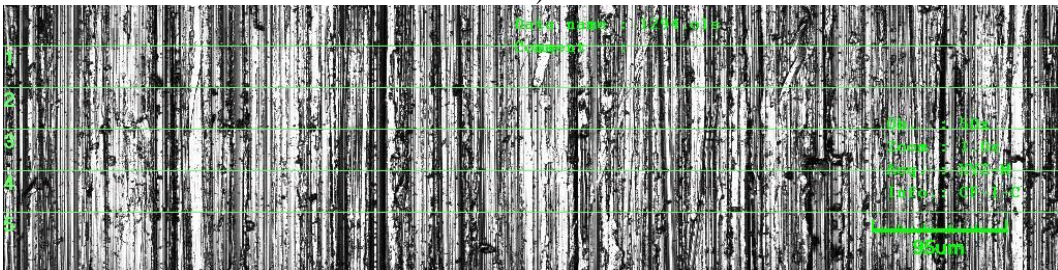


b)

Obrázek 21: Profil testovaného povrchu – a) 3D profil Cu_320, b) 2D profil Cu_320

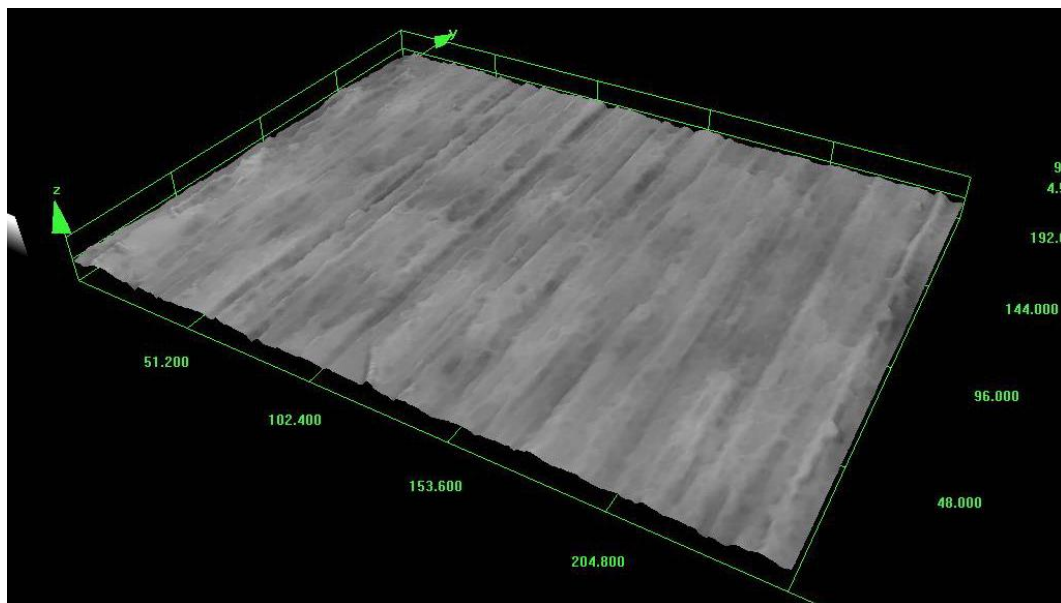


a)

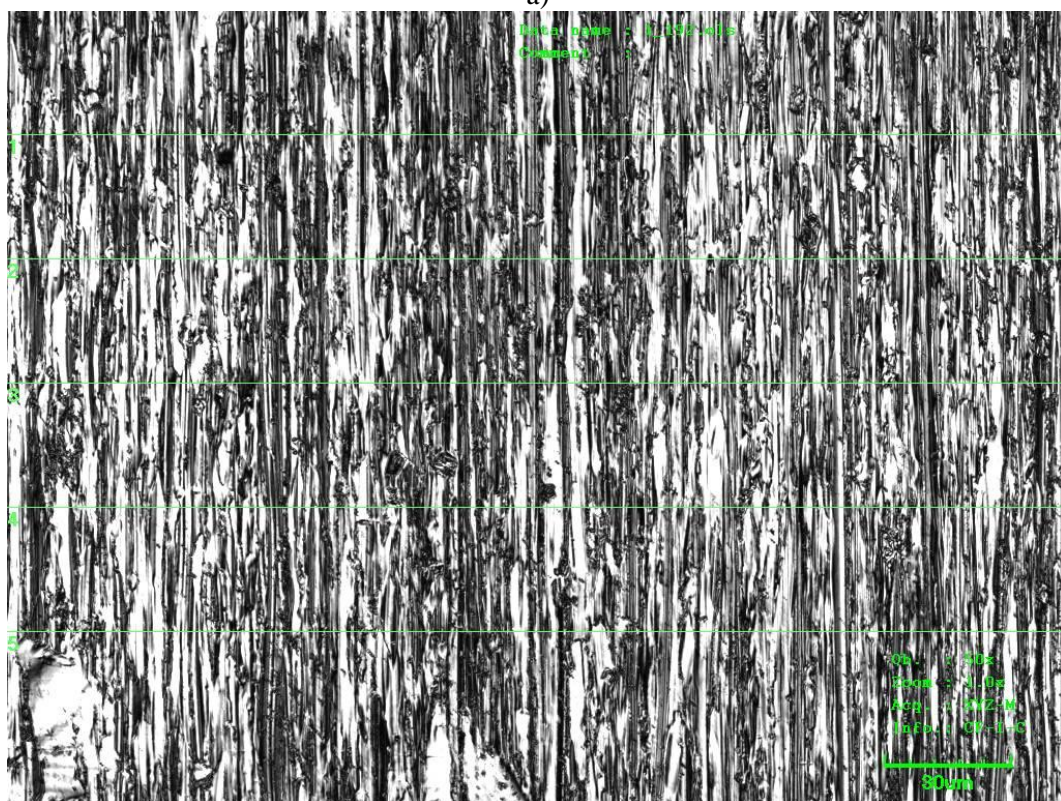


b)

Obrázek 22: Profil testovaného povrchu – a) 3D profil Cu_400, b) 2D profil Cu_400



a)

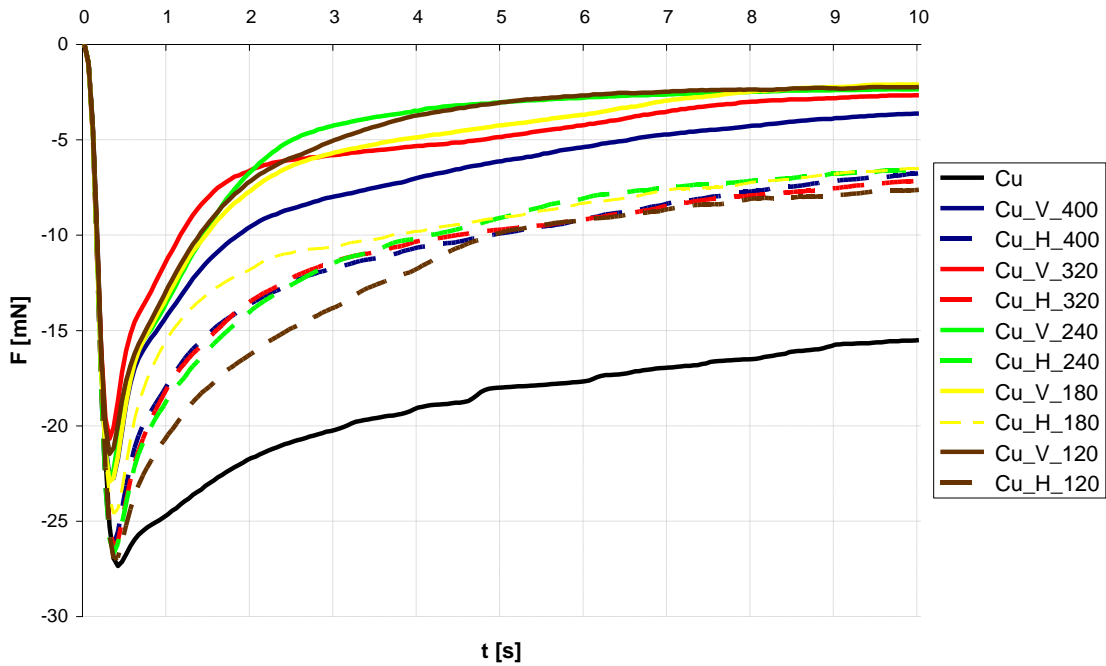


b)

Obrázek 23: Profil testovaného povrchu – a) 3D profil Cu, b) 2D profil Cu

Tabulka 16: Povrchová drsnost testovaných vzorků

Povrchová drsnost	Cu	Cu_400	Cu_320	Cu_240	Cu_180	Cu_120
R_a (μm)	0,2741	0,7015	1,4229	1,5443	1,7001	1,9480
R_q (μm)	0,3395	0,8994	1,7907	2,0408	2,1771	2,6044



Obrázek 24: Průběhy smáčecích sil testovaných vzorků

Z naměřených hodnot je patrné, že vodorovně orientovaná povrchová drsnost snižuje smáčecí sílu v porovnání se svisle orientovanými vrypy. Větší úroveň drsnosti způsobuje větší rozdíl mezi naměřenými hodnotami u vzorků s vodorovně a svisle orientovanou drsností povrchu. Výsledné hodnoty povrchové drsnosti a průběhy smáčecích sil testovaných vzorků jsou průměrné hodnoty spočtené z měření pěti totožných vzorků. U testovaných vzorků se svisle orientovanými vrypy je vidět, že se vzrůstající úrovní povrchové drsnosti vzrůstá i maximální smáčecí síla. Nejvyšší hodnoty smáčecí síly u vzorků se svisle orientovanými vrypy dosáhly vzorky s drsností povrchu $R_a = 1,95 \mu\text{m}$ a $R_a = 1,70 \mu\text{m}$ (Cu_V_120 a Cu_V_180), naopak nejhorší průběh smáčecí síly je u vzorku s drsností povrchu $R_a = 0,70 \mu\text{m}$ (Cu_V_400). Průměrné hodnoty maximální smáčecí síly u vzorků se svisle orientovanými vrypy jsou v rozmezí od -5,94 mN (Cu_V_400) do -2,85 mN (Cu_V_120). U vzorků s vodorovně orientovanými vrypy dosáhl nejlepšího smáčení vzorek s označením Cu_H_180, nejhorší smáčení vykazuje vzorek s označením Cu_H_120. Rozmezí průměrných hodnot maximálních smáčecích sil pro vzorky s vodorovně orientovanými vrypy je -9,71 mN až -8,89 mN. Vzorek, na kterém nebyly vytvořeny žádné vrypy brusným papírem, má povrchovou drsnost $R_a = 0,27 \mu\text{m}$ a průměrnou hodnotu maximální smáčecí síly má -21,52 mN. Z grafu průběhů smáčecích sil testovaných vzorků je zřejmé, že vzorek s nejmenší povrchovou drsností vykazuje nejhorší smáčení ze všech testovaných vzorků. Vzorek Cu_V_320 vykazuje nejrychlejší stupeň smáčení v porovnání

s ostatními vzorky. Výsledné průběhy smáčecí síly jsou v záporných hodnotách (pod osou x na obrázku č. 24). To je zapříčiněno tvarem a velikostí testovaného vzorku, viz kapitola 4.1. V průběhu testu smáčecí síla působí tedy pouze na metalizované části vzorku. Na bočních stranách vzorku a plochách mezi metalizovanými poli však působí síly proti smáčení.

6 Prvková analýza intermetalických sloučenin

Prvková analýza je důležitou částí při pozorování intermetalických sloučenin v pájeném spoji. Testované vzorky byly podrobeny prvkové analýze, aby bylo možné přesně stanovit složení intermetalických sloučenin v pájeném spoji a zkoumat celou strukturu pájeného spoje.

6.1 Použité materiály a procesní podmínky

Vzorky desek plošných spojů:

- kupon 3x3 s povrchovou úpravou čistá měď
- kupon 3x3 s povrchovou úpravou galvanický cín
- kupon 3x3 s povrchovou úpravou OSP
- kupon 3x3 s povrchovou úpravou ENIG

Použité pájecí pasty:

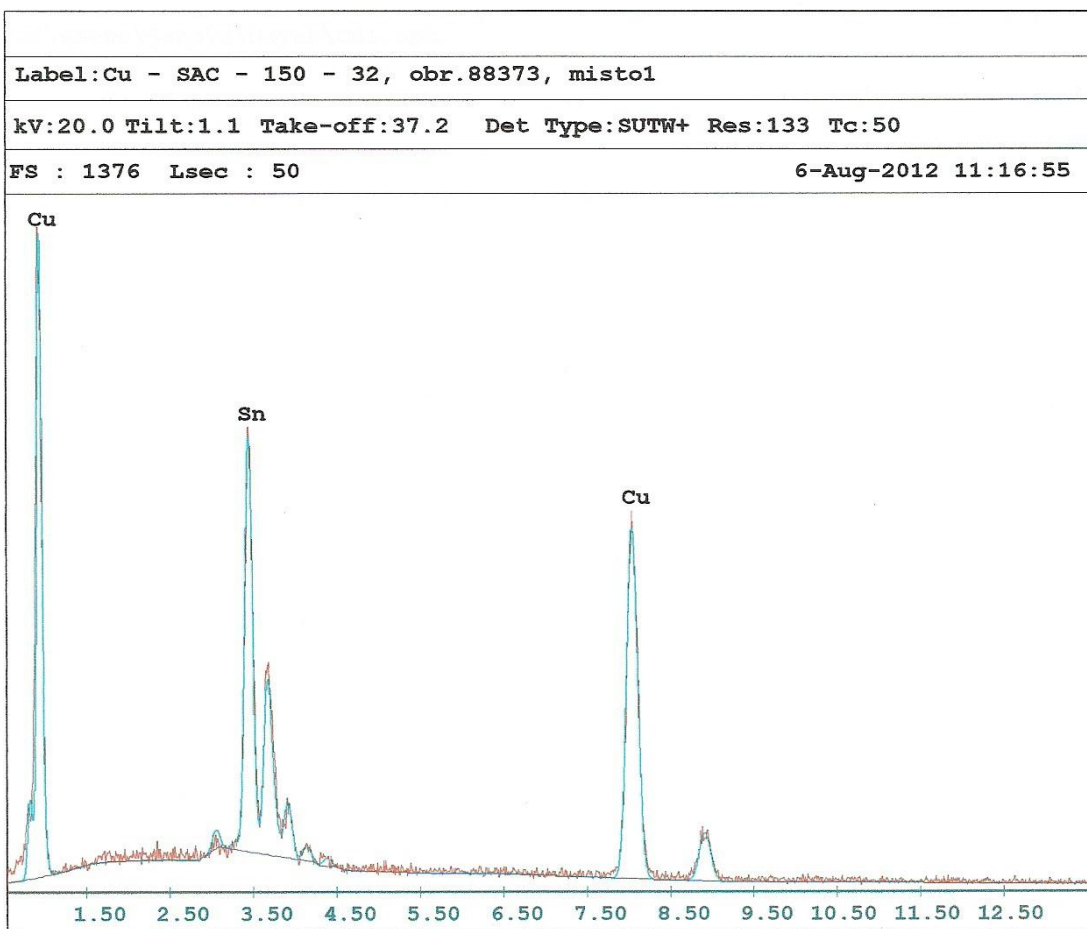
- SAC
- SnPb
- SnAg
- SnCu
- BiSn

Mikroanalýzy povrchu byly provedeny na analytickém komplexu PHILIPS-EDAX. Skenovací elektronový mikroskop Philips XL 30 a detektor EDAX – CDU “LEAP“ DETECTOR s:

- dobou načítání spektra 50 s
- urychlovacím napětím 20 kV
- zvětšením 2000x

6.2 Vyhodnocení a diskuze naměřených dat

Prvková analýza detailněji určuje rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje (EDX spektrum). Výsledky měření jsou uvedeny v následujících tabulkách č. 17 až 30 a na obrázcích č. 26 až 39. Na obrázku č. 25 je ukázka výstupu prvkové analýzy (spektrum prvků). EDX spektra jednotlivých prvkových analýz jsou v příloze 10.1.



EDAX ZAF Quantification (Standardless)

Element Normalized

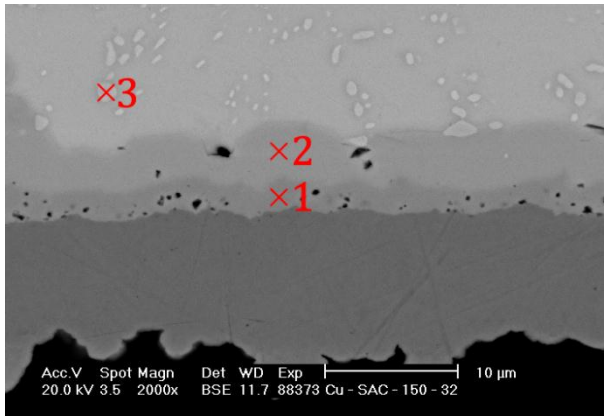
SEC Table : Default

Coating Correction Used : Element : C , Factor : 14.00

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
SnL	38.11	24.80	0.3443	0.9312	0.9700	1.0000
CuK	61.89	75.20	0.6291	1.0462	0.9716	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
SnL	155.04	16.96	1.25	9.14
CuK	180.20	5.08	1.08	35.47

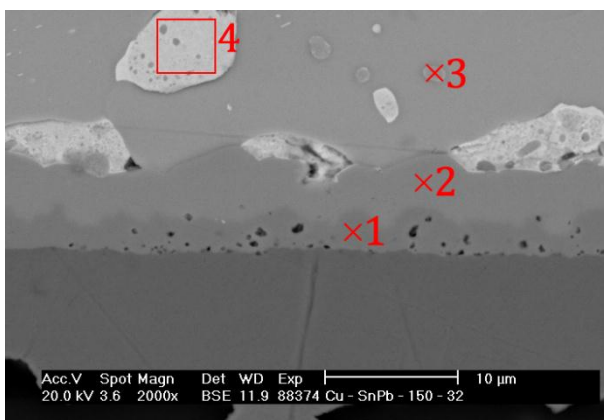
Obrázek 25:Prvková analýza vzorku Cu-SAC-150-32



Obrázek 26:SEM fotografie vzorku Cu-SAC-150-32

Tabulka 17: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 26

at%	Cu	Sn	Ag
měření v bodě 1	75,20	24,80	
měření v bodě 2	54,07	45,93	
měření v bodě 3		50,91	49,09

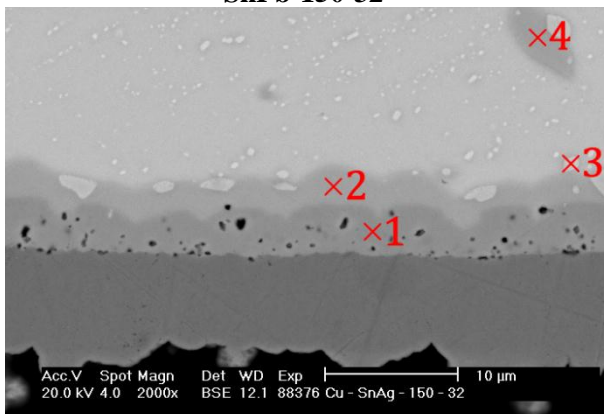


Obrázek 27:SEM fotografie vzorku Cu-SnPb-150-32

Tabulka 18: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 27

at%	Cu	Sn	Ag	Pb
měření v bodě 1	74,44	25,56		
měření v bodě 2	54,75	45,25		
měření v bodě 3		41,80	58,20	
měření v bodě 4		11,82		88,18

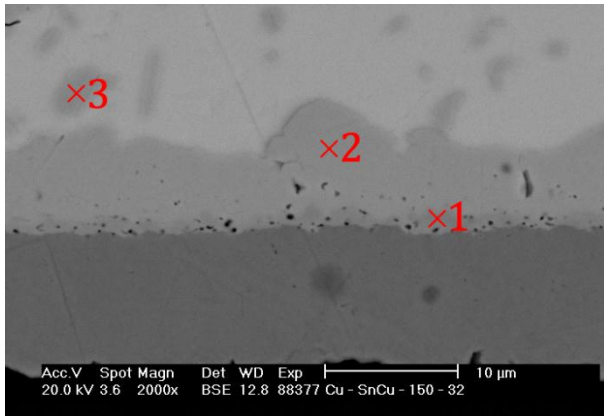
V bodě měření 4 byla provedena plošná analýza se zvětšením 16000x



Obrázek 28:SEM fotografie vzorku Cu-SnAg-150-32

Tabulka 19: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 28

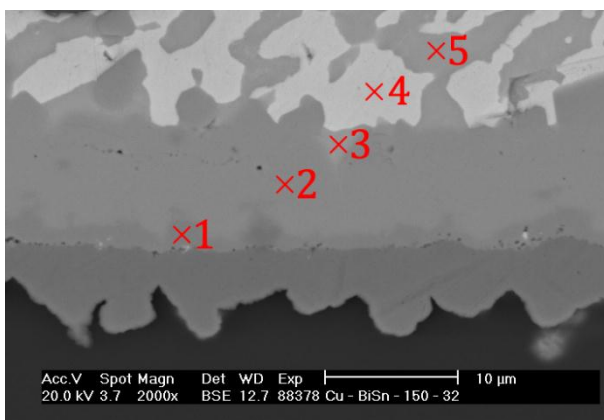
at%	Cu	Sn	Ag
měření v bodě 1	75,29	24,71	
měření v bodě 2	55,29	44,71	
měření v bodě 3		45,27	54,73
měření v bodě 4	53,48	46,52	



Obrázek 29:SEM fotografie vzorku Cu-SnCu-150-32

Tabulka 20: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 29

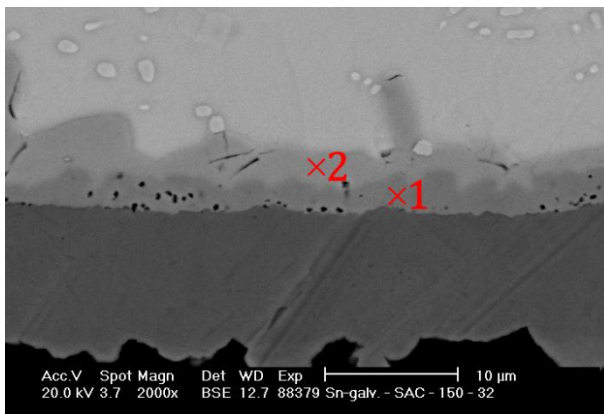
at%	Cu	Sn
měření v bodě 1	75,68	24,32
měření v bodě 2	54,21	45,79
měření v bodě 3	52,31	47,69



Obrázek 30:SEM fotografie vzorku Cu-BiSn-150-32

Tabulka 21: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 30

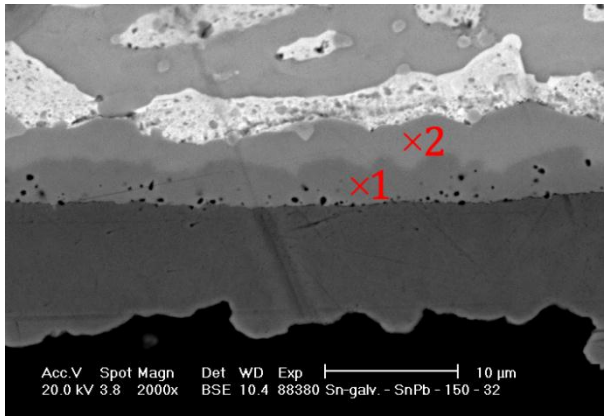
at%	Cu	Sn	Bi
měření v bodě 1	74,83	25,17	
měření v bodě 2	54,70	45,30	
měření v bodě 3	7,70	89,71	2,59
měření v bodě 4		7,24	92,76
měření v bodě 5		96,86	3,14



Obrázek 31:SEM fotografie vzorku Sn_galv-SAC-150-32

Tabulka 22: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 31

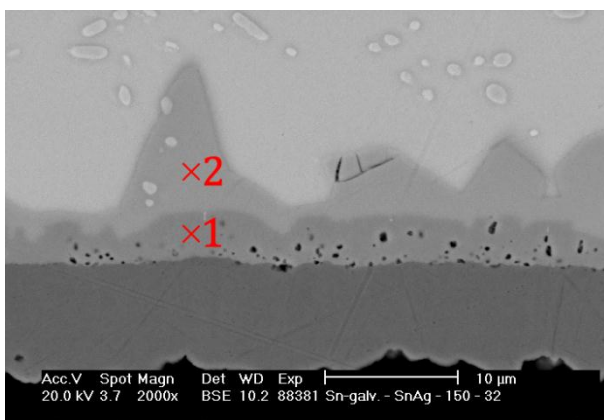
at%	Cu	Sn
měření v bodě 1	75,42	24,58
měření v bodě 2	53,74	46,26



Obrázek 32:SEM fotografie vzorku Sn_galv-SnPb-150-32

Tabulka 23: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 32

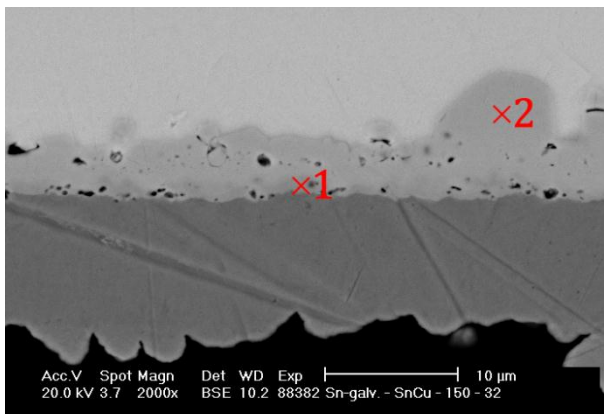
at%	Cu	Sn
měření v bodě 1	74,52	25,48
měření v bodě 2	53,75	46,25



Obrázek 33:SEM fotografie vzorku Sn_galv-SnAg-150-32

Tabulka 24: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 33

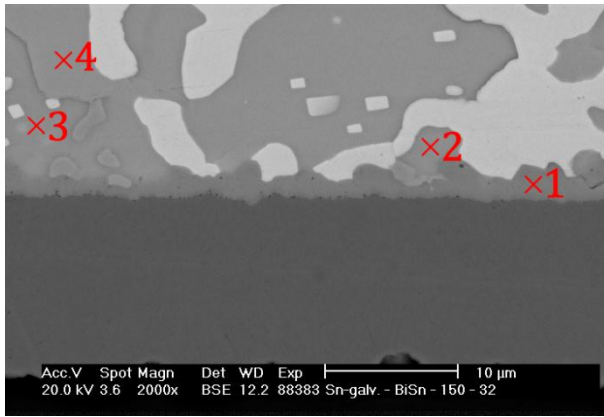
at%	Cu	Sn
měření v bodě 1	74,31	25,69
měření v bodě 2	53,67	46,33



Obrázek 34:SEM fotografie vzorku Sn_galv-SnCu-150-32

Tabulka 25: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 34

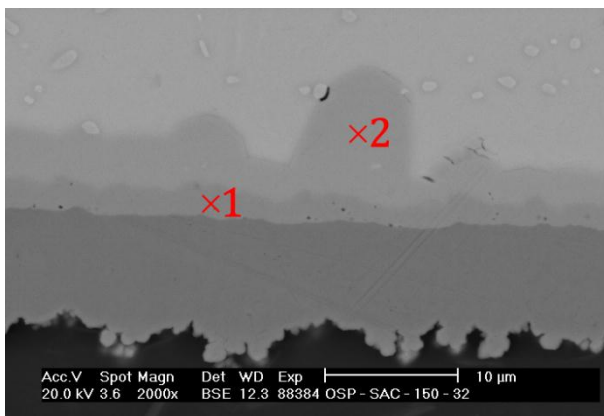
at%	Cu	Sn
měření v bodě 1	72,13	27,87
měření v bodě 2	52,99	47,01



Obrázek 35:SEM fotografie vzorku Sn_galv-BiSn-150-32

Tabulka 26: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 35

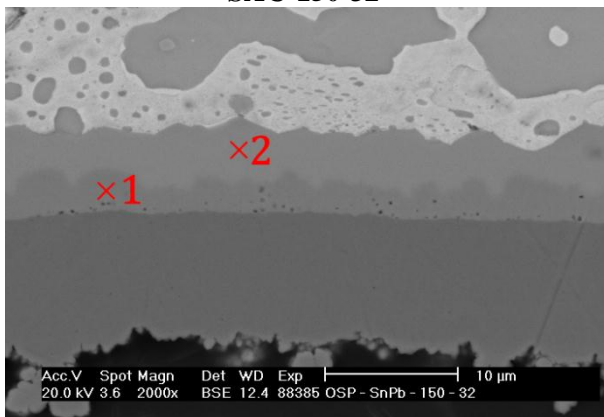
at%	Cu	Sn	Bi
měření v bodě 1	55,94	44,06	
měření v bodě 2	4,81	92,76	2,43
měření v bodě 3		94,93	5,07
měření v bodě 4		96,49	3,51



Obrázek 36:SEM fotografie vzorku OSP-SAC-150-32

Tabulka 27: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 36

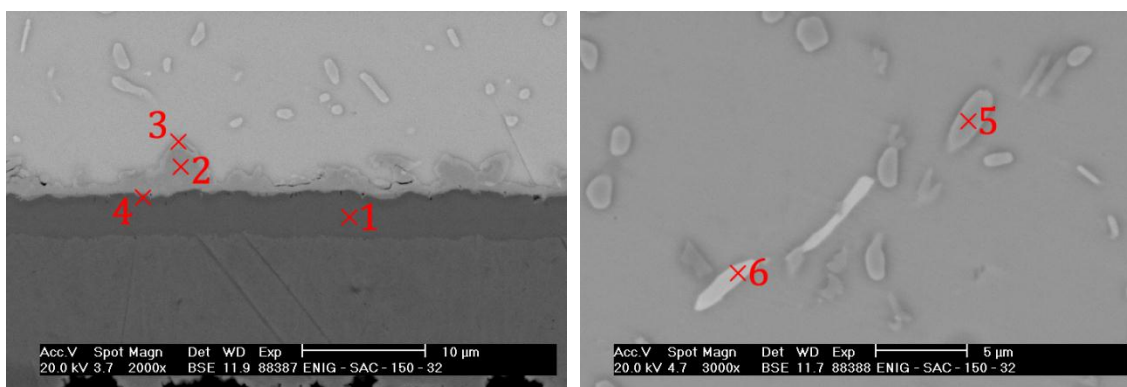
at%	Cu	Sn
měření v bodě 1	75,29	24,71
měření v bodě 2	53,72	46,28



Obrázek 37:SEM fotografie vzorku OSP-SnPb-150-32

Tabulka 28: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 37

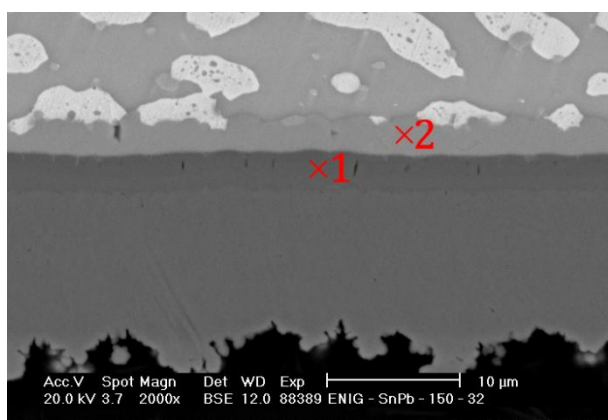
at%	Cu	Sn
měření v bodě 1	74,48	25,52
měření v bodě 2	55,50	44,50



Obrázek 38:SEM fotografie vzorku ENIG-SAC-150-32_a

Tabulka 29: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 38

at%	Cu	Sn	Ag	Au	Ni	P
měření v bodě 1					81,31	18,69
měření v bodě 2	34,77	44,78			20,45	
měření v bodě 3	26,71	59,00		2,99	11,30	
měření v bodě 4		6,12			69,48	24,40
měření v bodě 5		28,14	71,86			
měření v bodě 6		81,47		18,53		



Tabulka 30: Rozložení prvků ve struktuře pájeného spoje dle obrázku č. 39

at%	Cu	Sn	Ni	P
měření v bodě 1			76,56	23,44
měření v bodě 2	4,04	54,78	41,18	

Obrázek 39:SEM fotografie vzorku ENIG-SnPb-150-32

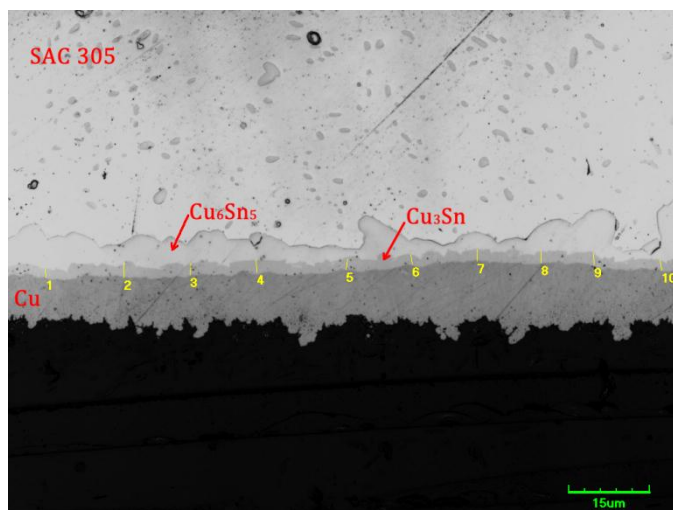
Z výsledků měření pomocí SEM-EDX je možné vyčíst přesné složení intermetalických sloučenin a jednotlivých fází ve struktuře sledovaných pájených spojů. Prvková analýza pájených spojů vytvořených pájecími pastami SAC, SnPb, SnCu a SnAg na površích čistá měď, galvanický cín a OSP potvrzuje výskyt vrstev intermetalických sloučenin Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 na rozhraní mezi pájecí ploškou a pájkou, zatímco intermetalická sloučenina Ag_3Sn netvoří souvislou vrstvu a vyskytuje se ve spoji v malých objemech (malé ostrůvky). Z tohoto důvodu není jednoduché přesně

zaciit proud elektronů při prvkové analýze a při vyhodnocení takto malých míst jsou do EDX spektra zařazovány atomy prvků těsně sousedících. V případě analýzy intermetalické sloučeniny Ag_3Sn je to právě cín z cínové matrice. U vzorku ENIG-SAC-150-32 (obrázek č. 38) se vyskytovala intermetalická sloučenina Ag_3Sn ve větším objemu, a proto byla snáze identifikovatelná, měření v bodě 5. Intermetalická sloučenina Cu_3Sn se formuje na rozhraní měděného povrchu pájecí plošky a intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 . Cu_6Sn_5 se formuje na rozhraní mezi pájecí pastou a intermetalickou sloučeninou Cu_3Sn . Jak je vidět např. na obrázku č. 28 a 29, intermetalická sloučenina Cu_6Sn_5 se netvoří pouze na tomto rozhraní, ale také se formuje v objemu struktury pájeného spoje. Testované pájené spoje vytvořené pájecími pastami, které obsahují olovo (SnPb) nebo bismut (BiSn), vykazují tvorbu bariéry na rozhraní mezi intermetalickou sloučeninou Cu_6Sn_5 a pájecí pastou. Vznik těchto bariér je důsledkem vzniku intermetalických sloučenin CuSn . Intermetalické sloučeniny CuSn jsou tvořeny atomy mědi z pájecí plošky a atomy cínu z pájecí pasty. V místě tvorby intermetalických sloučenin CuSn je pájecí pasta ochuzována o cín, což vede ke vzniku olověné či bizmutové bariéry. Vytvořením těchto bariér se redukuje difúze atomů mědi do pájky, a tím výrazně ovlivňuje další růst intermetalických sloučenin. Struktura pájených spojů vytvořených na povrchové úpravě ENIG vykazuje odlišné složení intermetalických sloučenin v porovnání s ostatními testovanými povrchovými úpravami. To vychází z podstaty povrchové úpravy ENIG. Při vytváření pájeného spoje dochází k rozpouštění velmi tenké zlaté vrstvy a roztavená pájka smáčí niklovou vrstvu. Struktura pájeného spoje na povrchové úpravě ENIG s pájecí pastou SAC má podle Shon a kol. [59,60] následující vrstvy Cu ; Ni_3P ; NiSnP ; $(\text{NiCu})_6\text{Sn}_5$ a $(\text{NiCu})_3\text{Sn}_4$. Tato struktura je potvrzena provedenou prvkovou analýzou (viz tabulka č. 29). Dále bylo prvkovou analýzou zjištěno malé množství zlata ve vrstvě $(\text{NiCu})_3\text{Sn}_4$ a v objemu pájky byly analyzovány ještě dvě intermetalické sloučeniny: Ag_3Sn a AuSn_4 .

Tvorba difúzních bariér, které snižují přechod atomů mědi z pájecí plošky do pájky ve struktuře pájených spojů, je způsobena vyčerpáním atomů cínu z pájecích past v oblasti tvorby intermetalických sloučenin. U pájecích past SAC, SnAg a SnCu není tento jev pozorován. Důvodem je poměrné zastoupení prvků v pájecích pastách. Pájecí pasty SAC, SnAg a SnCu obsahují většinou více jak 90 wt.% cínu, zatímco u pájecí pasty SnPb je obsah cínu 62 wt.% a u pasty BiSn je obsah cínu ještě menší, a to 57,6 wt.%.

7 Měření tloušťky vrstev intermetalických sloučenin

Tloušťka vrstev intermetalických sloučenin byla měřena laserovým konfokálním mikroskopem Olympus OLS 3000, zvětšení 2400x. Jelikož tvar vrstvy intermetalické sloučeniny není lineární, bylo pro každý vzorek změřeno 10 hodnot tloušťky intermetalické sloučeniny. Tyto hodnoty byly následně aritmeticky zprůměrovány. Struktura pájeného spoje a princip měření tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin je znázorněn na obrázku č. 40.



Obrázek 40: Struktura pájeného spoje a princip měření tloušťky IMC

7.1 Materiálové vlivy na tloušťku vrstev IMC v pájeném spoji

V této kapitole jsou prezentovány výsledky měření tloušťky vrstev intermetalických sloučenin pro různé povrchové úpravy testovaných vzorků a různé složení pájecích past. Testované vzorky byly rozděleny do několika skupin, přičemž jednotlivé skupiny testovaných vzorků byly vystaveny tepelnému namáhání při teplotě 80 °C nebo 150 °C po dobu 4 nebo 32 dnů.

7.1.1 Vliv povrchové úpravy desek plošných spojů

Vzorky desek plošných spojů:

- kupon 3x3 s povrchovou úpravou čistá měď
- kupon 3x3 s povrchovou úpravou galvanický cín
- kupon 3x3 s povrchovou úpravou imerzní cín
- kupon 3x3 s povrchovou úpravou OSP
- kupon 3x3 s povrchovou úpravou ENIG

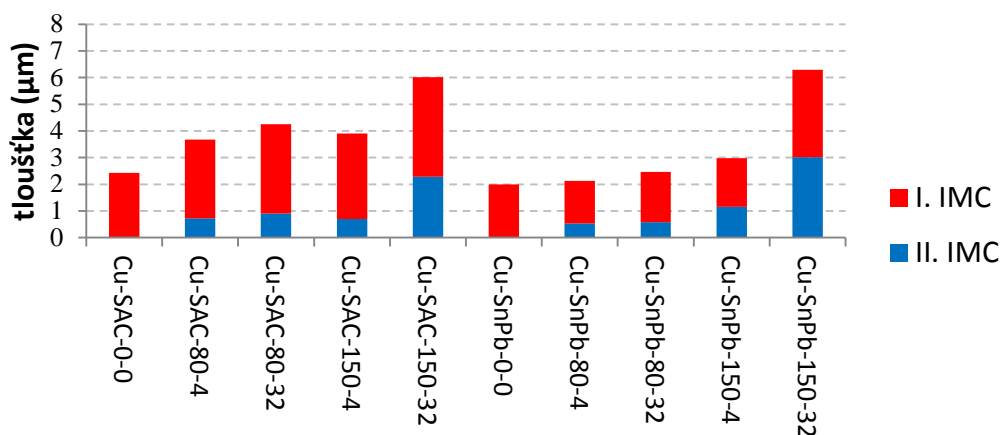
Použité pájecí pasty:

- SAC
- SnPb

Měřeno laserovým konfokálním mikroskopem Olympus OLS 3000:

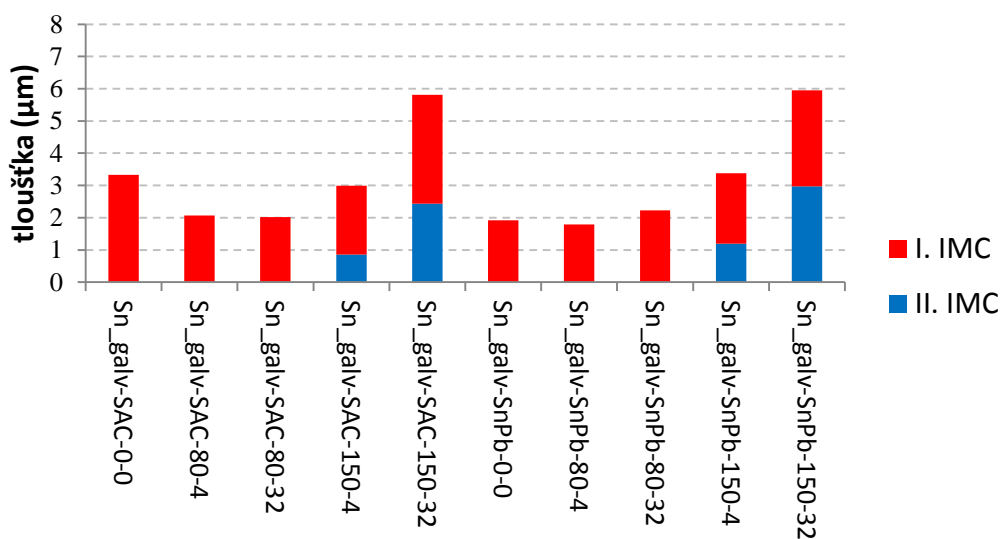
- zvětšení 2400x
- velikost plochy 125 μm x 95 μm .

Povrchová úprava - čistá měď; pájecí pasty SAC a SnPb



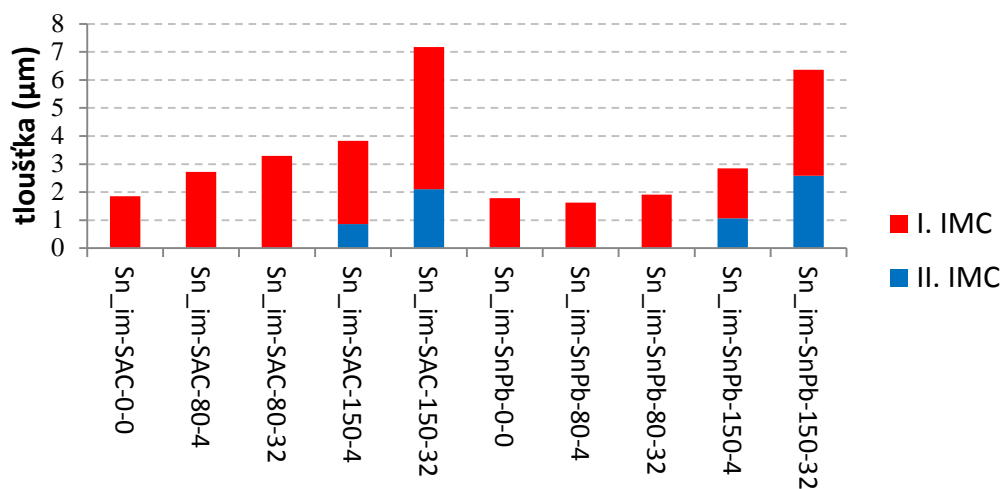
Obrázek 41: Hodnoty tloušťky vrstev IMC na povrchové úpravě čistá měď – I. IMC = Cu_6Sn_5 ; II. IMC = Cu_3Sn

Povrchová úprava - galvanický cín; pájecí pasty SAC a SnPb



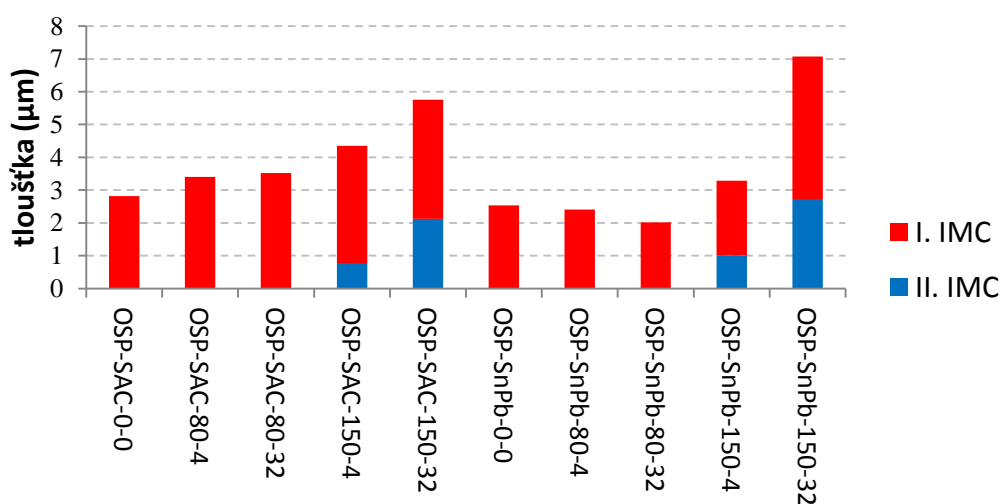
Obrázek 42: Hodnoty tloušťky vrstev IMC na povrchové úpravě galvanický cín – I. IMC = Cu_6Sn_5 ; II. IMC = Cu_3Sn

Povrchová úprava - imerzní cín; pájecí pasty SAC a SnPb



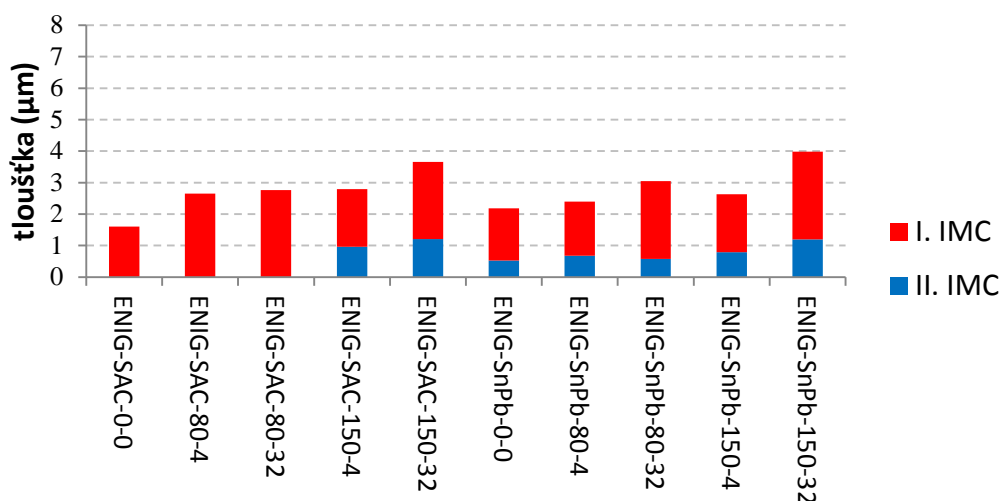
Obrázek 43: Hodnoty tloušťky vrstev IMC na povrchové úpravě imerzní cín – I. IMC = Cu_6Sn_5 ; II. IMC = Cu_3Sn

Povrchová úprava - OSP; pájecí pasty SAC a SnPb



Obrázek 44: Hodnoty tloušťky vrstev IMC na povrchové úpravě OSP – I. IMC = Cu_6Sn_5 ; II. IMC = Cu_3Sn

Povrchová úprava - ENIG; pájecí pasty SAC a SnPb



Obrázek 45: Hodnoty tloušťky vrstev IMC na povrchové úpravě ENIG –
 I. IMC = $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$; II. IMC = Ni_3Sn

Intermetalická sloučenina Cu_6Sn_5 se tvoří na všech testovaných površích během procesu pájení. V případě povrchu ENIG se jedná o intermetalickou sloučeninu $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$. Intermetalická sloučenina Cu_3Sn se formuje až při zrychleném stárnutí pájeného spoje. Na povrchu čistá měď se Cu_3Sn vytvoří na všech testovaných kombinacích pájecích past (SAC; SnPb), teploty stárnutí (80 °C; 150 °C) a doby stárnutí (4; 32). Oproti povrchům galvanický cín, imerzní cín a OSP, kde se Cu_3Sn formuje pouze při teplotě stárnutí 150 °C. Tepelné namáhání při teplotě 80 °C nevykazuje tvorbu Cu_3Sn na rozhraní měď a Cu_6Sn_5 u povrchů galvanický cín, imerzní cín a OSP nebo je tato vrstva natolik tenká, že není možné přesně definovat její hranice a provést měření tloušťky této vrstvy (viz Příloha B). Trend růstu tloušťky intermetalických sloučenin v závislosti na čase a teplotě zrychleného stárnutí se potvrdil skoro u všech povrchových úprav. Pouze u povrchu OSP se trend růstu intermetalických sloučenin nepotvrdil u vzorků pájených olovnatou pájkou a stárnutých při teplotě 80 °C. V tomto případě byla průměrná tloušťka vrstev intermetalických sloučenin u 32 dnů tepelně namáhaného vzorku o 0,39 μm menší než u vzorku tepelně namáhaného po dobu 4 dnů. Vrstva intermetalických sloučenin je dosti nerovnoměrná, jak je vidět na obrázcích v příloze 10.2. Rozdíl v tloušťce vrstev intermetalických sloučenin je velmi malý (0,39 μm), a proto lze usuzovat, že tloušťka vrstvy intermetalických sloučenin ve spoji se nezmenšuje, ani nedochází k jejímu rozpouštění, ale zůstává na přibližně stejné hodnotě po dobu stárnutí 4 až 32 dnů. Důvodem naměření menší tloušťky vrstvy intermetalické sloučeniny může být rozptyl hodnot u jednotlivých vzorků. Pro každé

měření byl vytvořen samostatný testovací vzorek, a tudíž nebyla vrstva intermetalických sloučenin pozorována pouze na jednom vzorku, který by byl vystaven zrychlenému stárnutí po všechny nastavené časové intervaly. Největší hodnoty tloušťky vrstev intermetalických sloučenin ve spojích pájených SAC pájkou byly naměřeny u povrchů čistá měď a OSP, nejnižší hodnoty byly naměřeny u povrchu ENIG.

7.1.2 Vliv složení pájecí pasty

Vzorčky desek plošných spojů:

- kupon 3x3 s povrchovou úpravou čistá měď
- kupon 3x3 s povrchovou úpravou galvanický cín

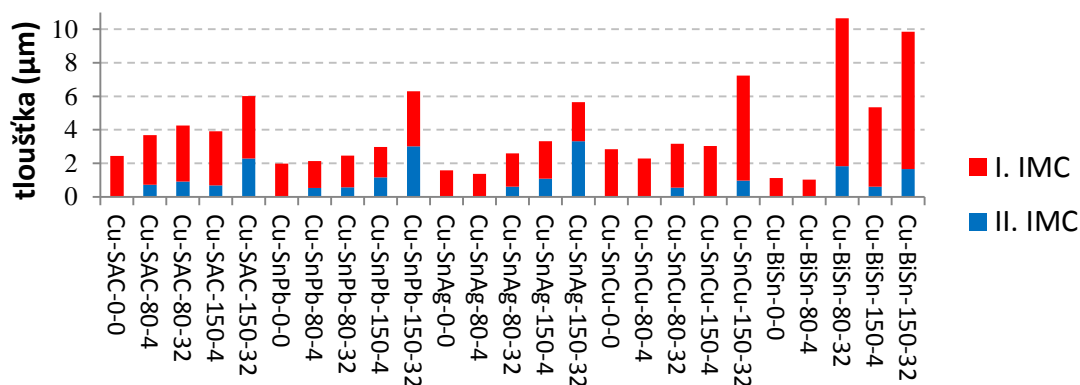
Použité pájecí pasty:

- SAC
- SnPb
- SnAg
- SnCu
- BiSn

Měřeno laserovým konfokálním mikroskopem Olympus OLS 3000:

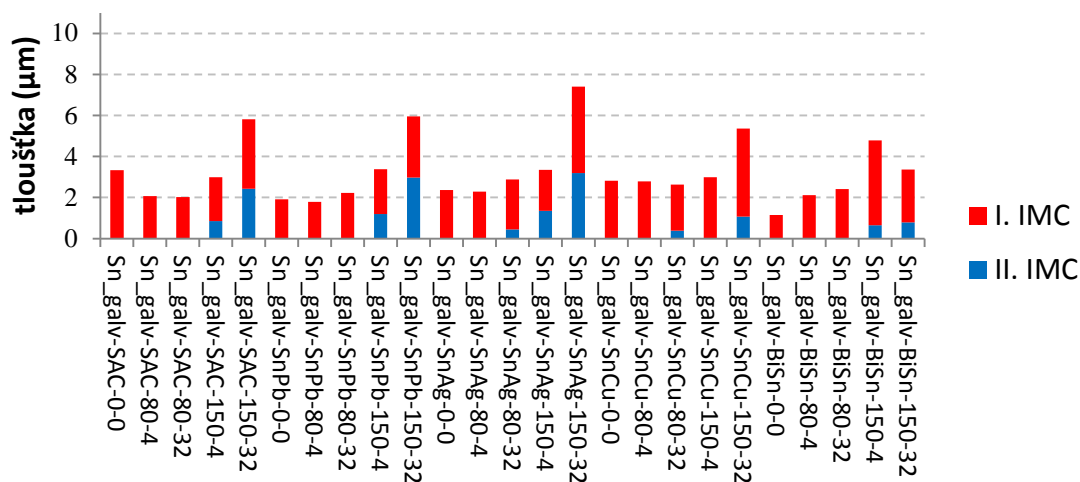
- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (7.1.1)

Povrchová úprava - čistá měď; pájecí pasty SAC, SnPb, SnAg, SnCu, BiSn



Obrázek 46: Hodnoty tloušťky vrstev IMC na povrchové úpravě čistá měď pro různé pájecí pasty – I. IMC = Cu_6Sn_5 ; II. IMC = Cu_3Sn

Povrchová úprava - galvanický cín; pájecí pasty SAC, SnPb, SnAg, SnCu, BiSn



Obrázek 47: Hodnoty tloušťky vrstev IMC na povrchové úpravě galvanický cín pro různé pájecí pasty – I. IMC = Cu_6Sn_5 ; II. IMC = Cu_3Sn

Z naměřených údajů je opět patrný trend růstu tloušťky intermetalických sloučenin v závislosti na čase a teplotě zrychleného stárnutí, který se potvrzuje skoro u všech použitých pájecích past. To potvrzuje i statistické vyhodnocení v tabulce č. 31, kde nezamítáme hypotézu, že vstupní faktory nemají vliv na tloušťku vrstev intermetalických sloučenin ve spoji. Na měděném povrchu dosahuje největších hodnot tloušťky intermetalických sloučenin po zrychleném stárnutí pájecí pasta s obsahem bismutu (BiSn) následována pájecí pastou SAC. Nejmenší hodnoty tloušťky intermetalických sloučenin po zrychleném stárnutí vykazuje pájecí pasta SnAg. Největší růst vrstev intermetalických sloučenin je patrný u pájecí pasty BiSn při teplotě stárnutí 80 °C a době zrychleného stárnutí 4 a 32 dnů, zde je nárůst tloušťky vrstev o 9,62 μm. Je důležité brát v úvahu, že se jedná o průměrné hodnoty deseti měření na značně nerovnoměrných vrstvách. Na povrchové úpravě galvanický cín byly naměřeny největší hodnoty tloušťky intermetalických sloučenin po zrychleném stárnutí u pájecí pasty SnAg, to je přímo v protikladu s povrchovou úpravou čistá měď. Tloušťky intermetalických vrstev ve spojkách s pájecími pastami SAC a SnCu jsou srovnatelné s tloušťkami intermetalických vrstev ve spoji s olovnatou pájecí pastou. Spoje pájené pájecí pastou BiSn dosahovaly nejmenších hodnot tlouštěk intermetalických sloučenin. V grafech průměrných hodnot tlouštěk vrstev intermetalických sloučenin (obrázek č. 46 a 47) je také možné vidět, při jakých kombinacích použitých pájecích past, teploty a doby zrychleného stárnutí se vytváří nesmáčivá intermetalická sloučenina Cu_3Sn .

7.2 Vlivy procesních faktorů na tloušťku vrstev IMC v pájeném spoji

Výsledky měření tloušťky vrstev intermetalických sloučenin pro šest časových úseků (1, 2, 4, 8, 16 a 32 dní) tepelného namáhání (zrychleného stárnutí) a čtyři hodnoty teplot (80 °C, 100 °C, 125 °C a 150 °C) tepelného namáhání, jsou znázorněny v následujících grafech.

7.2.1 Vliv doby zrychleného stárnutí

Vzorky desek plošných spojů:

- kupon 3x3 s povrchovou úpravou čistá měď

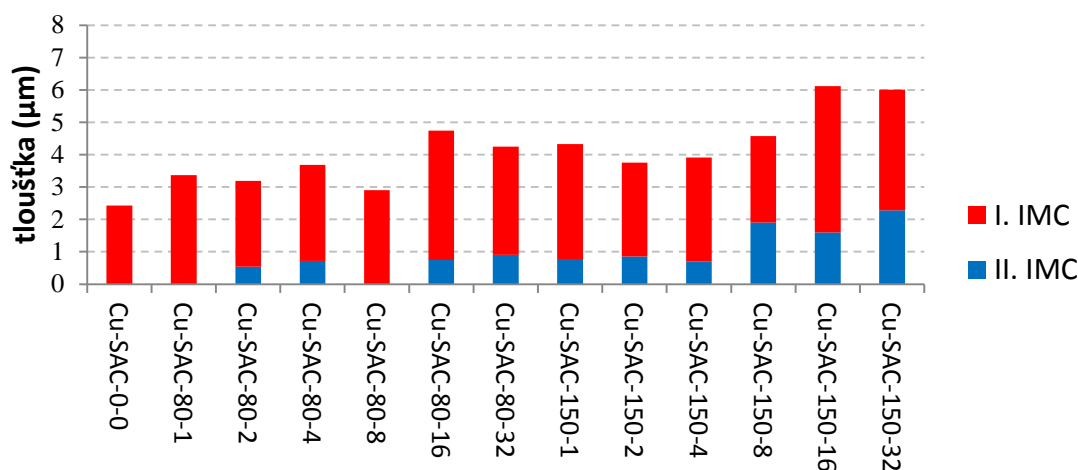
Použité pájecí pasty:

- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (7.1.1)

Měřeno laserovým konfokálním mikroskopem Olympus OLS 3000:

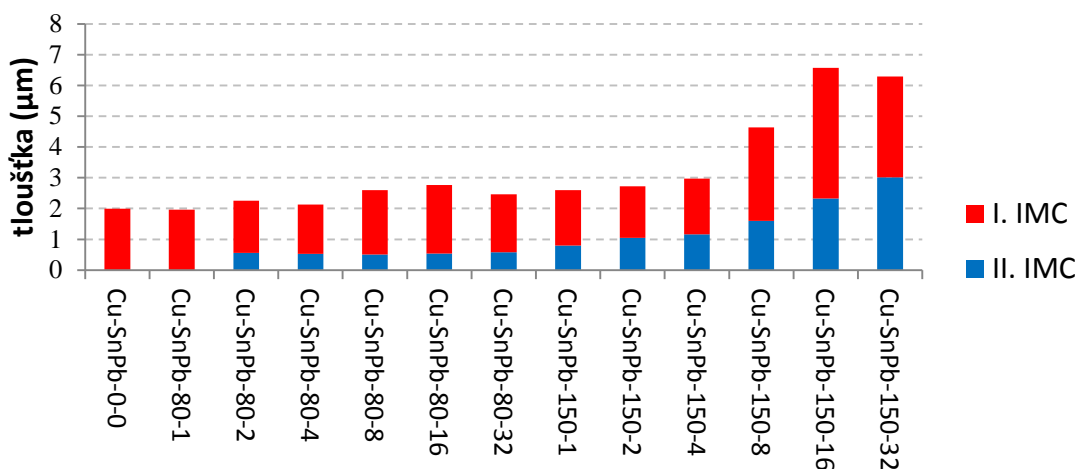
- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (7.1.1)

Povrchová úprava - čistá měď; doba stárnutí 0, 1, 2, 4, 8, 16 a 32 dní



Obrázek 48: Hodnoty tloušťky vrstev IMC na povrchové úpravě čistá měď s pájecí pastou SAC pro různé časové úseky zrychleného stárnutí – I. IMC = Cu_6Sn_5 ; II. IMC = Cu_3Sn

Povrchová úprava - čistá měď; doba stárnutí 0, 1, 2, 4, 8, 16 a 32 dní



Obrázek 49: Hodnoty tloušťky vrstev IMC na povrchové úpravě čistá měď s olovnatou pájecí pastou pro různé časové úseky zrychleného stárnutí – I. IMC = Cu_6Sn_5 ; II. IMC = Cu_3Sn

Pájené spoje vytvořené na měděném povrchu tepelně namáhané při teplotě 80 °C vykazují tvorbu intermetalické sloučeniny Cu_3Sn od druhého dne zrychleného stárnutí. U vzorku Cu-SAC-80-8 byla vrstva Cu_3Sn na rozhraní pájecí plošky a intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 velice tenká, a tak nebylo možné přesně definovat její hranice a změřit její tloušťku. Při teplotě zrychleného stárnutí 150 °C se tvoří vrstva Cu_3Sn již po prvním dni stárnutí. V časových úsecích 1 až 4 dny se jedná především o nárůst právě intermetalické sloučeniny Cu_3Sn . V dlouhodobějším horizontu 8 až 32 dnů dochází k nárůstu obou vrstev intermetalických sloučenin Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 . Se vzrůstajícím počtem dnů zrychleného stárnutí vzrůstá i tloušťka intermetalických sloučenin.

7.2.2 Vliv hodnoty teploty zrychleného stárnutí

Vzorky desek plošných spojů:

- viz kapitola „Vliv složení pájecí pasty“ (7.1.2)

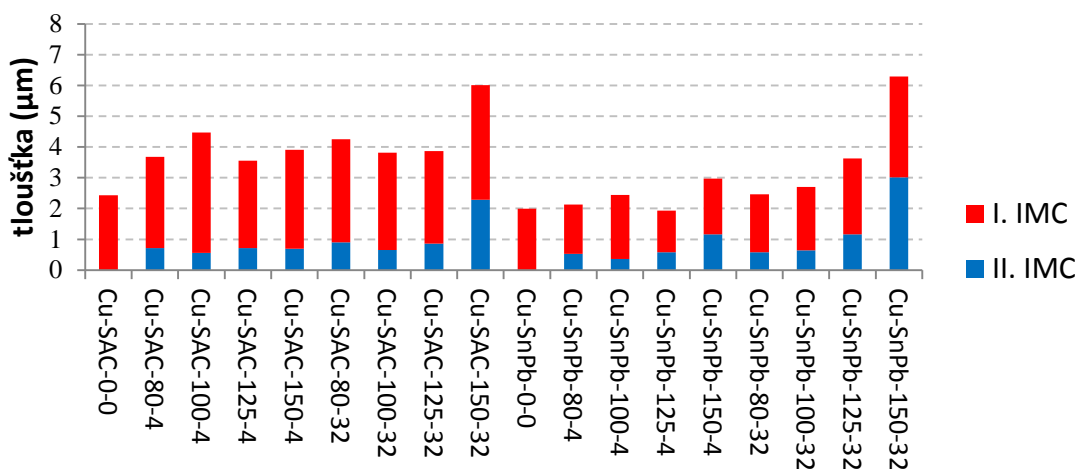
Použité pájecí pasty:

- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (7.1.1)

Měřeno laserovým konfokálním mikroskopem Olympus OLS 3000:

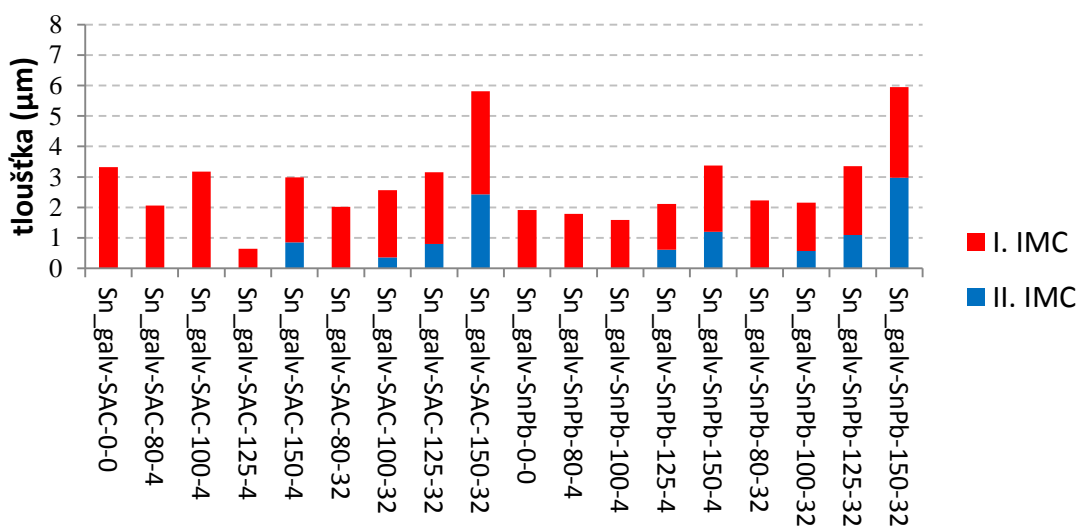
- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (7.1.1)

Povrchová úprava - čistá měď; teplota zrychleného stárnutí 80 °C, 100 °C, 125 °C a 150 °C



Obrázek 50: Hodnoty tloušťky vrstev IMC na povrchové úpravě čistá měď pro různé hodnoty teploty zrychleného stárnutí – I. IMC = Cu_6Sn_5 ; II. IMC = Cu_3Sn

Povrchová úprava - galvanický cín; teplota zrychleného stárnutí 80 °C, 100 °C, 125 °C a 150 °C



Obrázek 51: Hodnoty tloušťky vrstev IMC na povrchové úpravě galvanický cín pro různé hodnoty teploty zrychleného stárnutí – I. IMC = Cu_6Sn_5 ; II. IMC = Cu_3Sn

U vzorků s povrchovou úpravou galvanický cín je vidět, že vrstva intermetalické sloučeniny Cu_3Sn se nevytvoří nebo je příliš tenká, aby bylo možné ji měřit, při teplotě stárnutí 80 °C. Dále pak při teplotě 100 °C a době zrychleného stárnutí 4 dny. Pro pájecí pastu SAC je to navíc ještě při teplotě 125 °C. Na měděném povrchu je vrstva intermetalické sloučeniny zřejmá a měřitelná pro všechna nastavení teploty zrychleného stárnutí. Z naměřených hodnot tloušťky vrstev intermetalických sloučenin není možné jednoznačně určit vliv nastavení teploty stárnutí, lze však usoudit, že se vzrůstající

teplotou stárnutí vzrůstá i tloušťka vrstev intermetalických sloučenin. Největší vliv má hodnota teploty zrychleného stárnutí na tvorbu a růst intermetalické sloučeniny Cu_3Sn .

7.3 Statistická analýza naměřených hodnot

Statistická analýza všech vstupních faktorů (5x povrchová úprava, 5x pájecí pasta, 4x teplota zrychleného stárnutí, 7x doba zrychleného stárnutí) ukazuje míru vlivu jednotlivých faktorů na tloušťku vrstvy intermetalických sloučenin. Největší vliv na tloušťku vrstvy intermetalické sloučeniny má teplota zrychleného stárnutí. Dalším významným faktorem je doba zrychleného stárnutí. Nulovou hypotézu H_0 , že vstupní faktor nemá vliv na tloušťku vrstvy intermetalické sloučeniny, nezamítáme pro faktory povrchová úprava a pájecí slitina na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

Tabulka 31: Statistické vyhodnocení vlivu vstupních faktorů na tloušťku IMC

Vstupní faktor	Součet čtverců S_A	Počet stupňů volnosti	Průměrný čtverec	F - poměr	p - hodnota
Povrchová úprava	12,4355	4	3,10887	1,04249	0,38887
Pájecí slitina	13,9579	4	3,48947	1,17573	0,32568
Teplota stárnutí	98,4808	4	24,6202	11,30407	$1,09 * 10^{-7}$
Počet dní stárnutí	86,7194	6	14,4532	6,19913	$1,35 * 10^{-5}$

8 Měření mechanické pevnosti pájených spojů

Měření mechanické pevnosti povrchově montovaných pájených spojů s LCCC rezistory bylo provedeno na trhacím zařízení LabTest 3.030, viz kapitola 4.3. Pro každý testovaný vzorek bylo měřeno nejméně 8 hodnot maximální síly zaznamenané při zkoušce. Tyto hodnoty byly následně statisticky zpracovány pomocí analýzy malých výběrů (dle Horna). Průměrné hodnoty jsou tedy zatíženy chybou dle použité statistické analýzy, viz kapitola 4.3, ale také strukturou pájeného spoje. Konkrétně se jedná o množství dutin ve spoji, které mají velký vliv na pevnost pájeného spoje. V příloze č. 10.3 jsou uvedeny ukázky materiálových výbrusů testovaných spojů po měření mechanické pevnosti ve smyku. Na obrázcích jsou vidět místa, kde došlo k selhání spoje.

8.1 Vlivy materiálového systému na mechanickou pevnost pájeného spoje

V této kapitole jsou prezentovány výsledky měření mechanické pevnosti ve smyku pájených spojů pro různé povrchové úpravy testovaných vzorků a různé složení pájecích past.

8.1.1 Vliv povrchové úpravy desek plošných spojů

Vzorok desek plošných spojů:

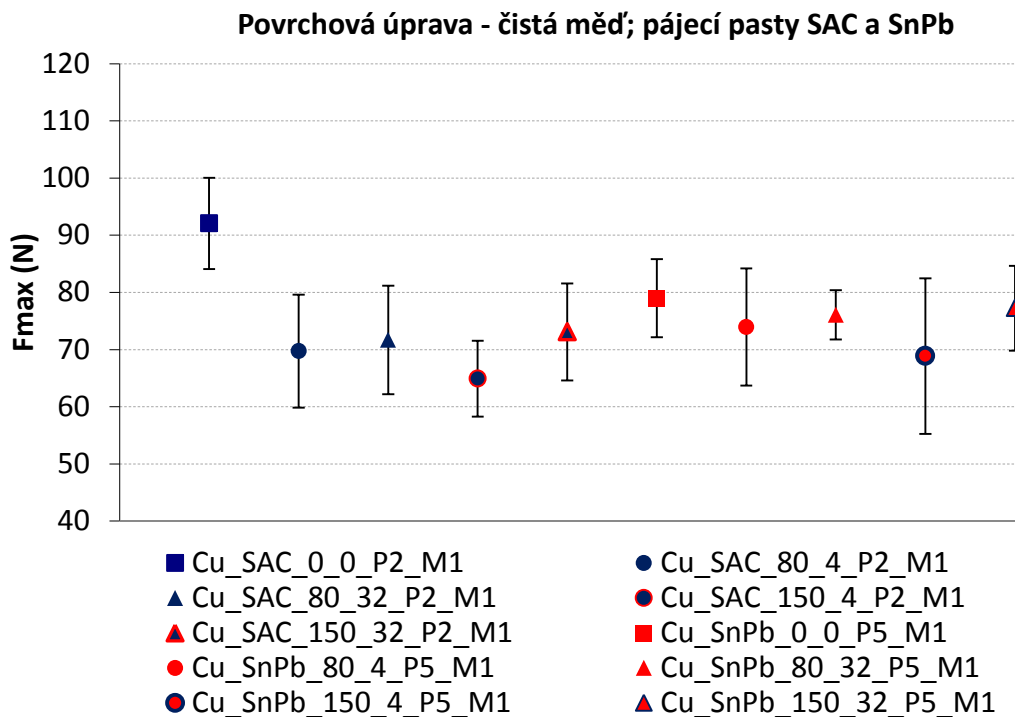
- vzorek 1206 s povrchovou úpravou čistá měď
- vzorek 1206 s povrchovou úpravou galvanický cín
- vzorek 1206 s povrchovou úpravou imerzní cín
- vzorek 1206 s povrchovou úpravou OSP
- vzorek 1206 s povrchovou úpravou ENIG

Použité pájecí pasty:

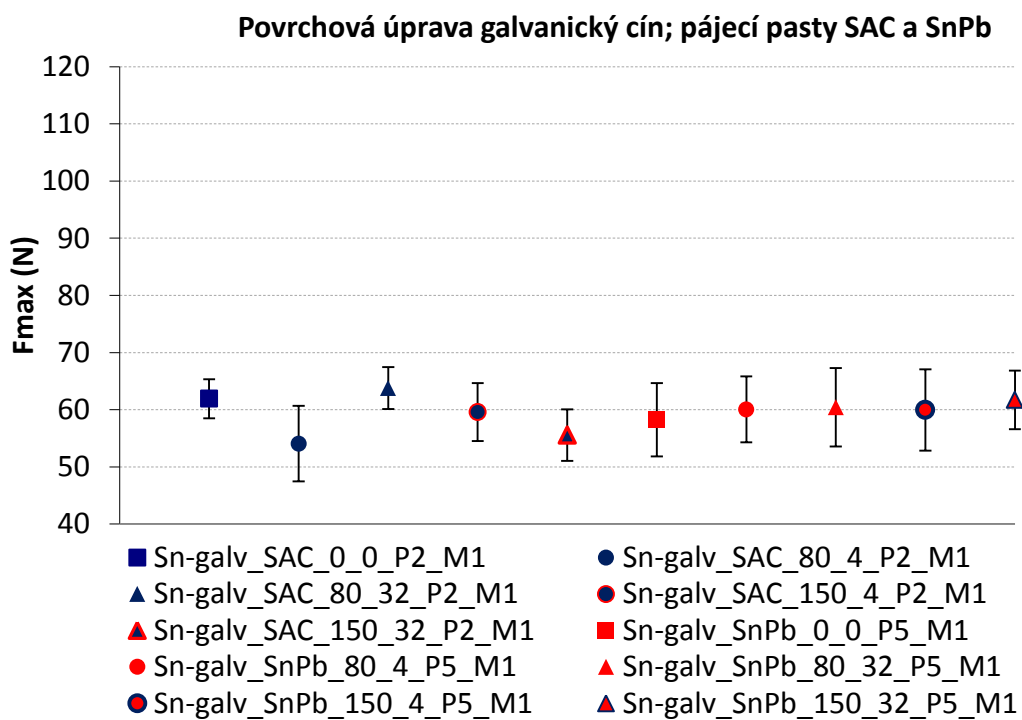
viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (7.1.1)

Měřeno na trhacím zařízení LabTest 3.030:

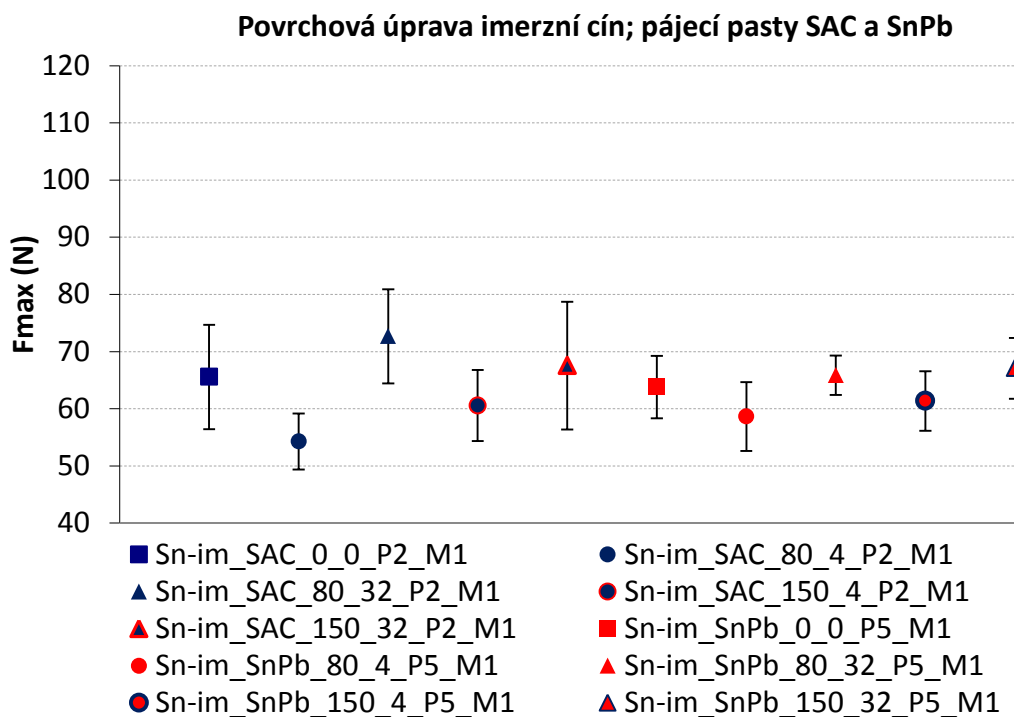
- rychlost posunu trhacího trnu 20mm/min
- návrat čelistí 200 mm/min
- kritérium ukončení testu při dosažení 70 % maximální síly (F_{\max})



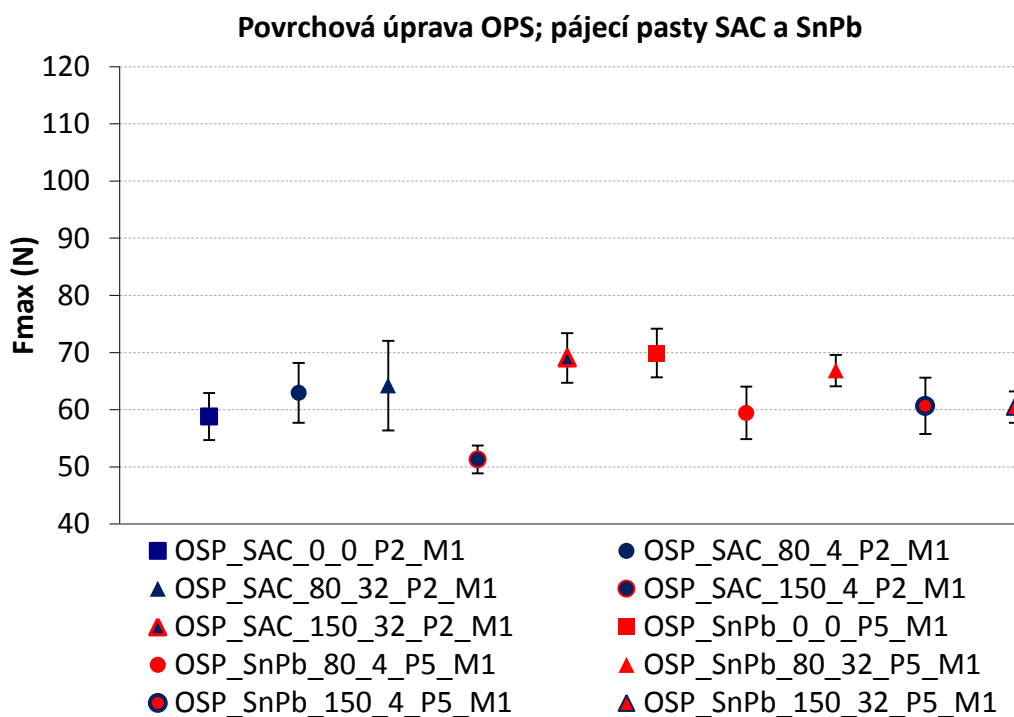
Obrázek 52: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě čistá měď



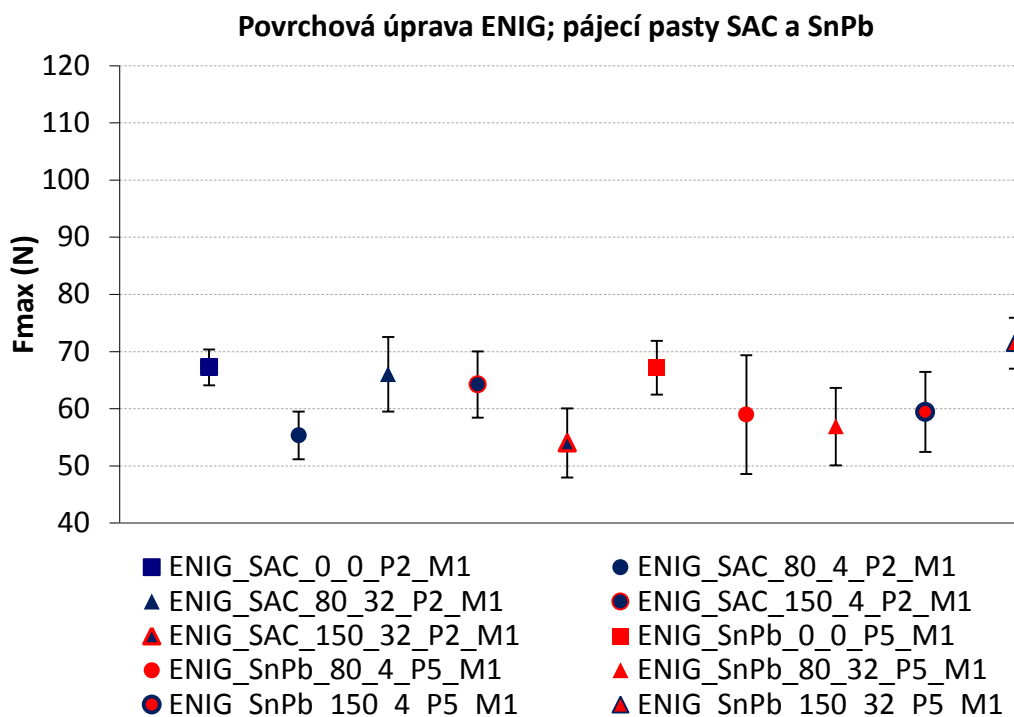
Obrázek 53: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě galvanický cín



Obrázek 54: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě imerzní cín



Obrázek 55: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě OPS



Obrázek 56: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě ENIG

U testovaných vzorků s povrchovou úpravou čistá měď dosahují nejvyšších hodnot maximální síly pro odtržení součástky (dále – F_{max}) vzorky nestárnuté, což potvrzuje teoretický předpoklad. Bezolovnatá pájecí pasta má nejvyšší hodnotu F_{max} u nestárnutého vzorku, avšak po zrychleném stárnutí je hodnota F_{max} nižší než u vzorků s olovnatou pájecí pastou. Na povrchu galvanický cín jsou hodnoty F_{max} pro všechny testované kombinace vstupních faktorů téměř shodné. F_{max} se pohybuje v rozmezí od 54,06 N do 63,81 N. U vzorků s povrchovými úpravami chemický cín, OSP a ENIG je ve většině případů vyšší F_{max} u vzorků stárnutých 32 dnů než u vzorků stárnutých 4 dny, přičemž nestárnuté vzorky většinou dosahují nejvyšší hodnoty F_{max} . Porovnání povrchových úprav ukazuje, že nejpevnější pájené spoje jsou na povrchové úpravě čistá měď.

8.1.2 Vliv složení pájecí pasty

Vzorky desek plošných spojů:

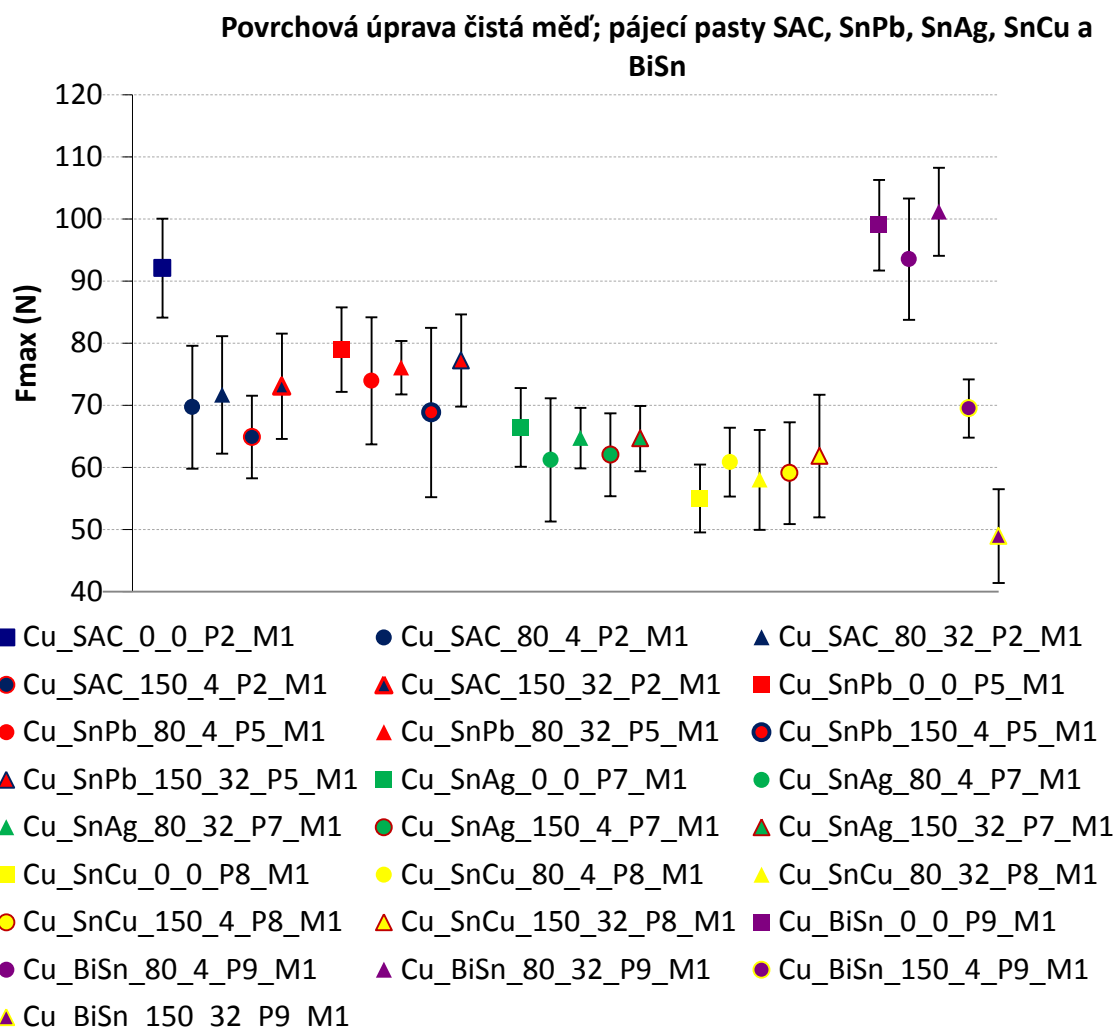
- vzorek 1206 s povrchovou úpravou čistá měď
- vzorek 1206 s povrchovou úpravou galvanický cín

Použité pájecí pasty:

- viz kapitola „Vliv složení pájecí pasty“ (7.1.2)

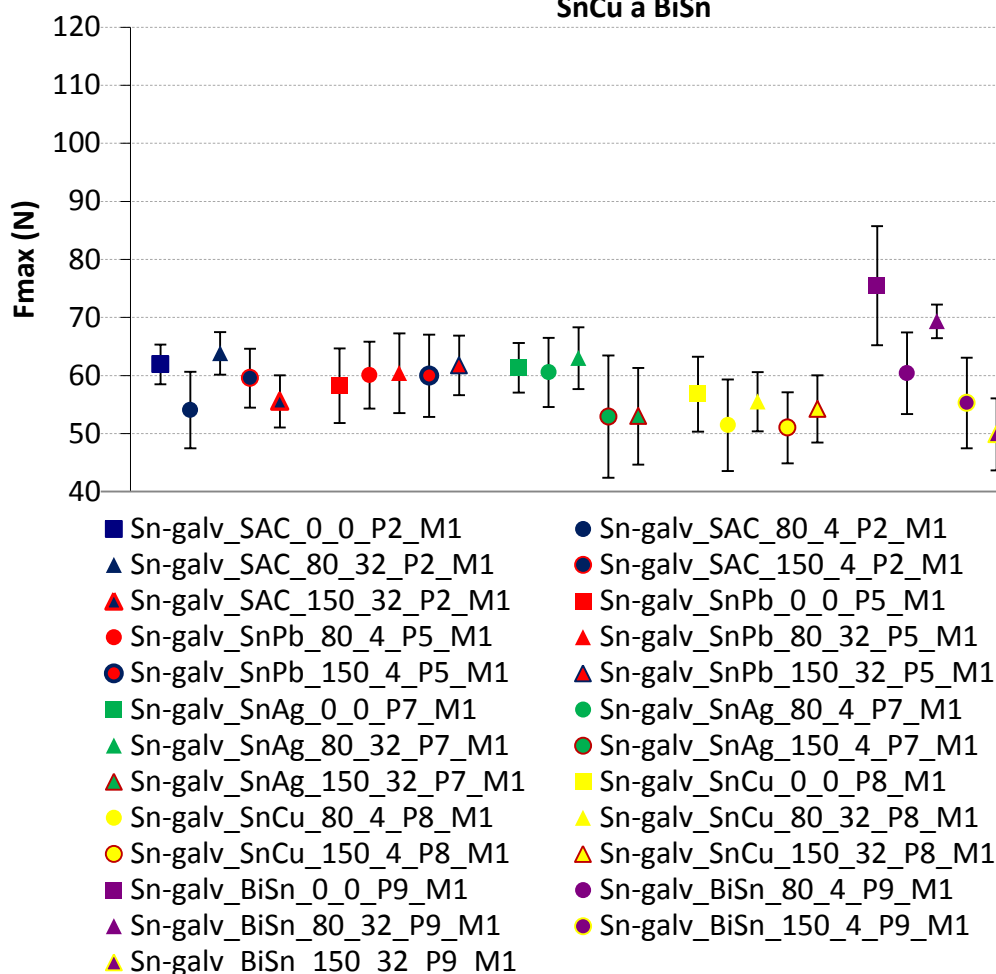
Měřeno na trhacím zařízení LabTest 3.030:

- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (8.1.1)



Obrázek 57: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě čistá měď pro různé pájecí pasty

Povrchová úprava galvanický cín; pájecí pasty SAC, SnPb, SnAg, SnCu a BiSn



Obrázek 58: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě galvanický cín pro různé pájecí pasty

Z porovnání vlivu složení pájecí pasty na povrchové úpravě čistá měď je zřejmé, že nejnižších hodnot F_{max} dosáhla pájecí pasta SnCu, následována je pájecí pastou SnAg. Jak již bylo zmíněno v kapitole 8.1.1, rozdíly v naměřených hodnotách F_{max} pro pájecí pasty SAC a SnPb jsou relativně malé. Nejvyšší hodnota F_{max} byla naměřena u pájecí pasty BiSn pro oba testované povrchy, čistá měď i galvanický cín. Z naměřených dat pro pájecí pastu BiSn je patrný velký pokles mechanické pevnosti u vzorků zrychleně stárnutých při teplotě 150 °C. To je zapříčiněno velkými změnami ve struktuře pájených spojů BiSn pájecí pastou, jelikož její teplota liquidu je 138 °C, tudíž byly vzorky stárnuty při teplotě nad bodem tání pasty. U vzorků s povrchovou úpravou galvanický cín opět nejnižších hodnot F_{max} dosáhla pájecí pasta SnCu, srovnatelných hodnot také dosáhla pájecí pasta SnAg u vzorků stárnutých při teplotě 150 °C. U ostatních vzorků s pájecí pastou SnAg byly hodnoty F_{max} srovnatelné s pájecími pastami SAC a SnPb.

8.2 Vlivy procesních faktorů na mechanickou pevnost pájeného spoje

Výsledky měření mechanické pevnosti ve smyku pájených spojů pro tři různá nastavení teplotních pájecích profilů, šest časových úseků (1, 2, 4, 8, 16 a 32 dny) tepelného namáhání (zrychlené stárnutí), čtyři hodnoty teplot (80 °C, 100 °C, 125 °C a 150 °C) tepelného namáhání nebo dvou různých úrovní množství pájecí pasty v pájeném spoji jsou znázorněny v následujících grafech.

8.2.1 Vliv nastavení teplotního pájecího profilu

Vzorky desek plošných spojů:

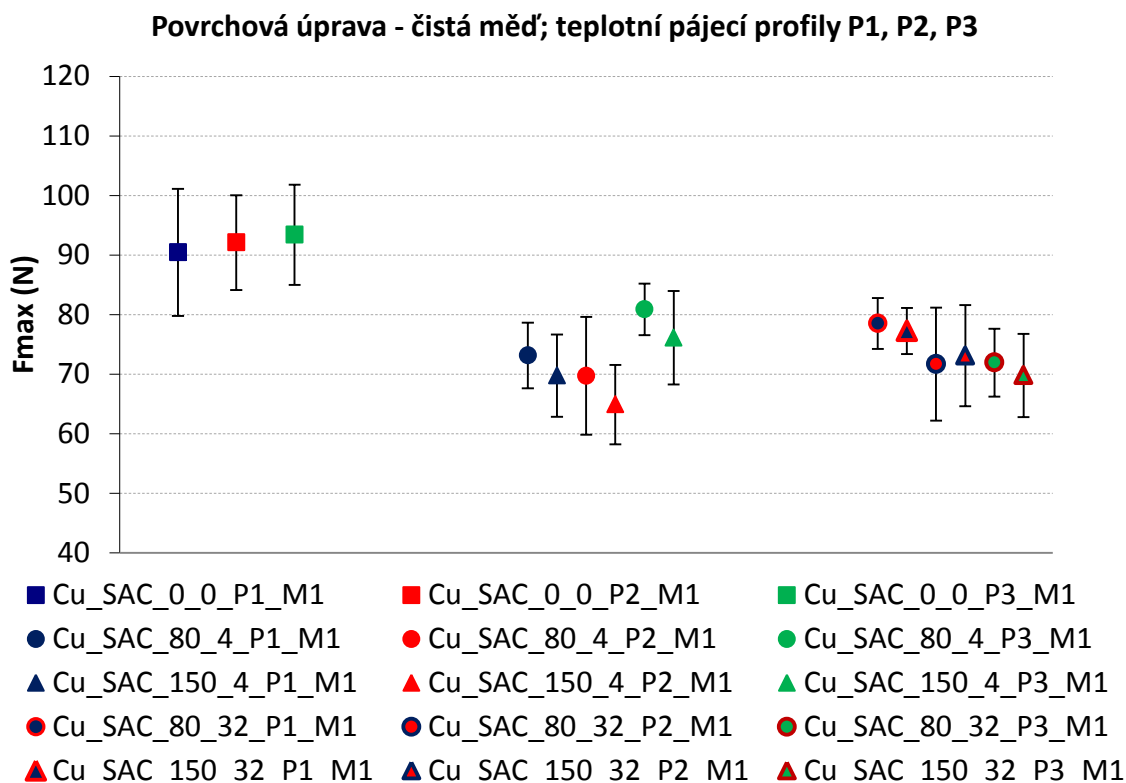
- vzorek 1206 s povrchovou úpravou čistá měď

Použité pájecí pasty:

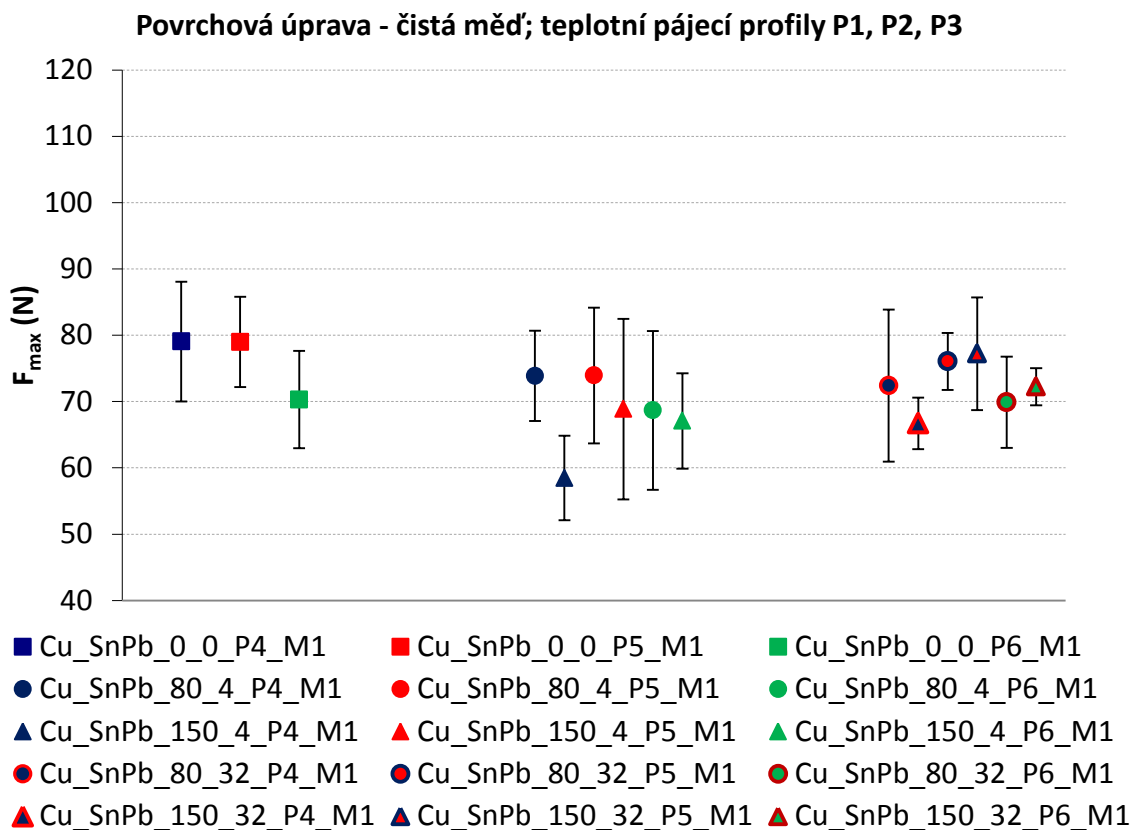
- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (7.1.1)

Měřeno na trhacím zařízení LabTest 3.030:

- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (8.1.1)



Obrázek 59: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě čistá měď s pájecí pastou SAC pro různé teplotní profily pájení



Obrázek 60: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě čistá měď s olovnatou pájecí pastou pro různé teplotní profily pájení

Nejvyšší pevnost pájených spojů ve smyku u testovaných vzorků s povrchem čistá měď a pájecí pastou SAC vykazovaly vzorky pájené teplotním pájecím profilem č. 3, avšak u vzorků stárnutých po dobu 32 dnů měly nejmenší hodnotu F_{max} . Spoje pájené podle teplotního profilu č. 2 měly nejnižší hodnotu F_{max} po zrychleném stárnutí po dobu 4 dnů, v ostatních případech byla hodnota F_{max} mezi testovanými vzorky se spoji pájenými podle teplotního profilu č. 1 a 3. Spoje pájené podle teplotního profilu č. 1 měly nejvyšší hodnotu F_{max} u vzorků vystavených zrychlenému stárnutí po dobu 32 dnů a nejnižší hodnotu F_{max} pro vzorky nestárnuté. U olovnatých spojů pájených na čisté mědi (viz obrázek č. 60) je patrné, že nejlepších výsledků mechanické pevnosti dosáhly vzorky pájené podle teplotního pájecího profilu č. 5. Nejnižší hodnoty F_{max} byly naměřeny u vzorků s olovnatými spoji pájenými podle teplotního profilu č. 6.

8.2.2 Vliv doby zrychleného stárnutí

Vzorky desek plošných spojů:

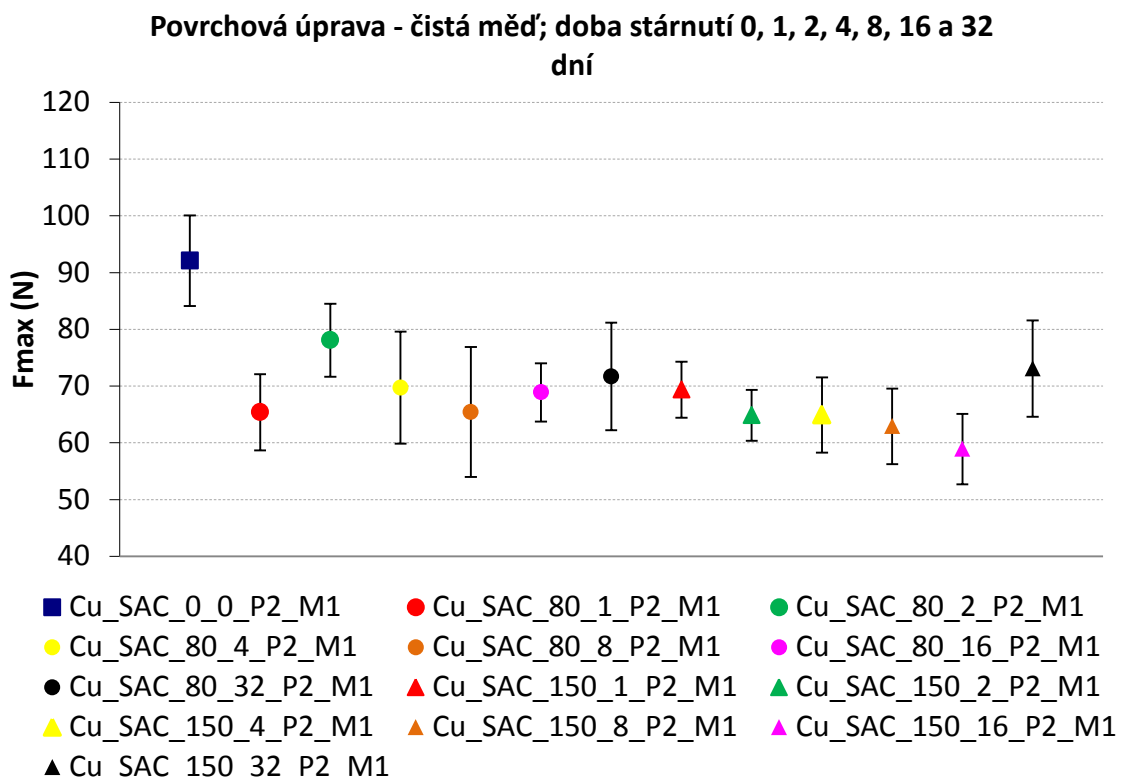
- viz kapitola „Vliv nastavení teplotního pájecího profilu“ (8.2.1)

Použité pájecí pasty:

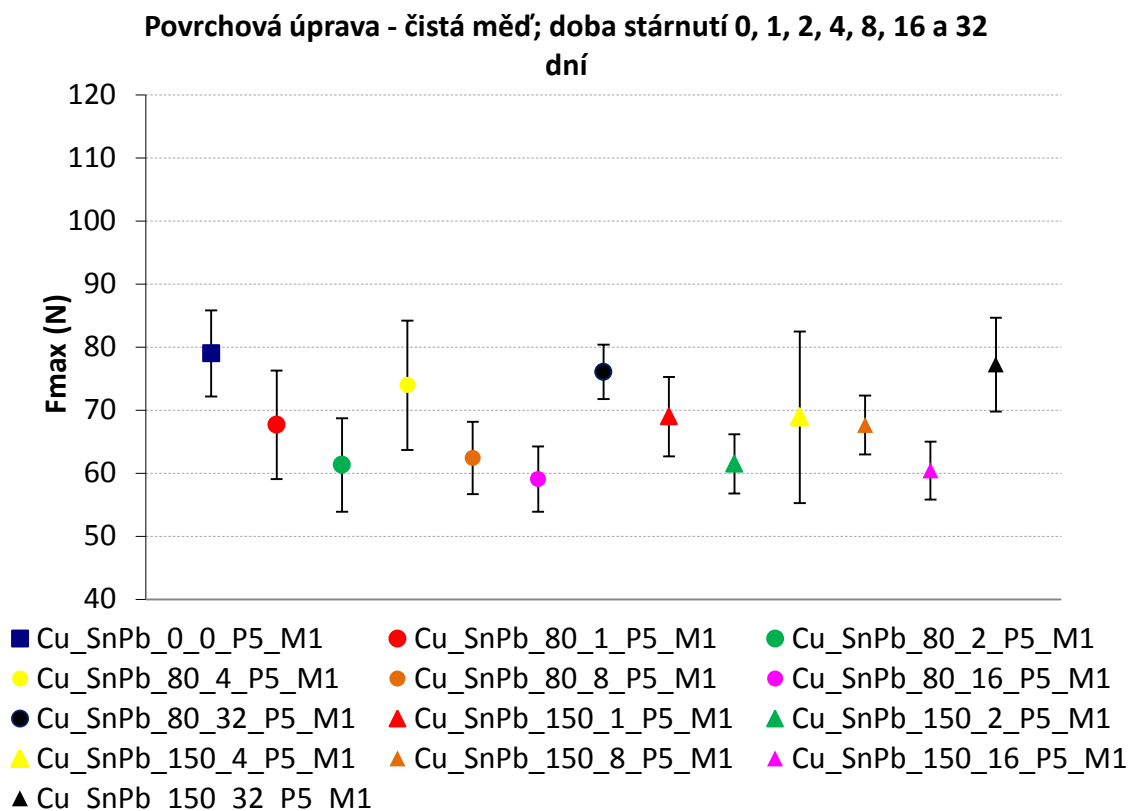
- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (7.1.1)

Měřeno na trhacím zařízení LabTest 3.030:

- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (8.1.1)



Obrázek 61: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě čistá měď s pájecí pastou SAC pro různé časové úseky zrychleného stárnutí



Obrázek 62: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě čistá měď s olovnatou pájecí pastou pro různé časové úseky zrychleného stárnutí

Testované vzorky s pájecí slitinou SAC na měděném povrchu stárnuté při teplotě 150 °C vykazují trend, že se stoupajícím počtem dnů zrychleného stárnutí dochází ke snižování mechanické pevnosti pájeného spoje. Výjimkou je hodnota F_{max} pro vzorek stárnutý po dobu 32 dnů, který má hodnotu F_{max} větší než u vzorku stárnutého 1 den. Vzorky stárnuté při teplotě 80 °C po dobu 1, 4, 8 a 16 dnů mají hodnotu F_{max} relativně stejnou, vzorky stárnuté po dobu 2 a 32 dnů mají hodnotu F_{max} vyšší. U vzorků s olovnatou pájecí slitinou je možné pozorovat závislost mezi počtem dnů stárnutí a různými teplotami stárnutí. Hodnoty F_{max} pro určitý počet dnů stárnutí jsou relativně stejné pro obě teploty stárnutí, 80 °C a 150 °C. Největší rozdíly jsou u vzorků stárnutých po dobu 4 a 16 dnů, a to cca 5 N.

8.2.3 Vliv hodnoty teploty zrychleného stárnutí

Vzorky desek plošných spojů:

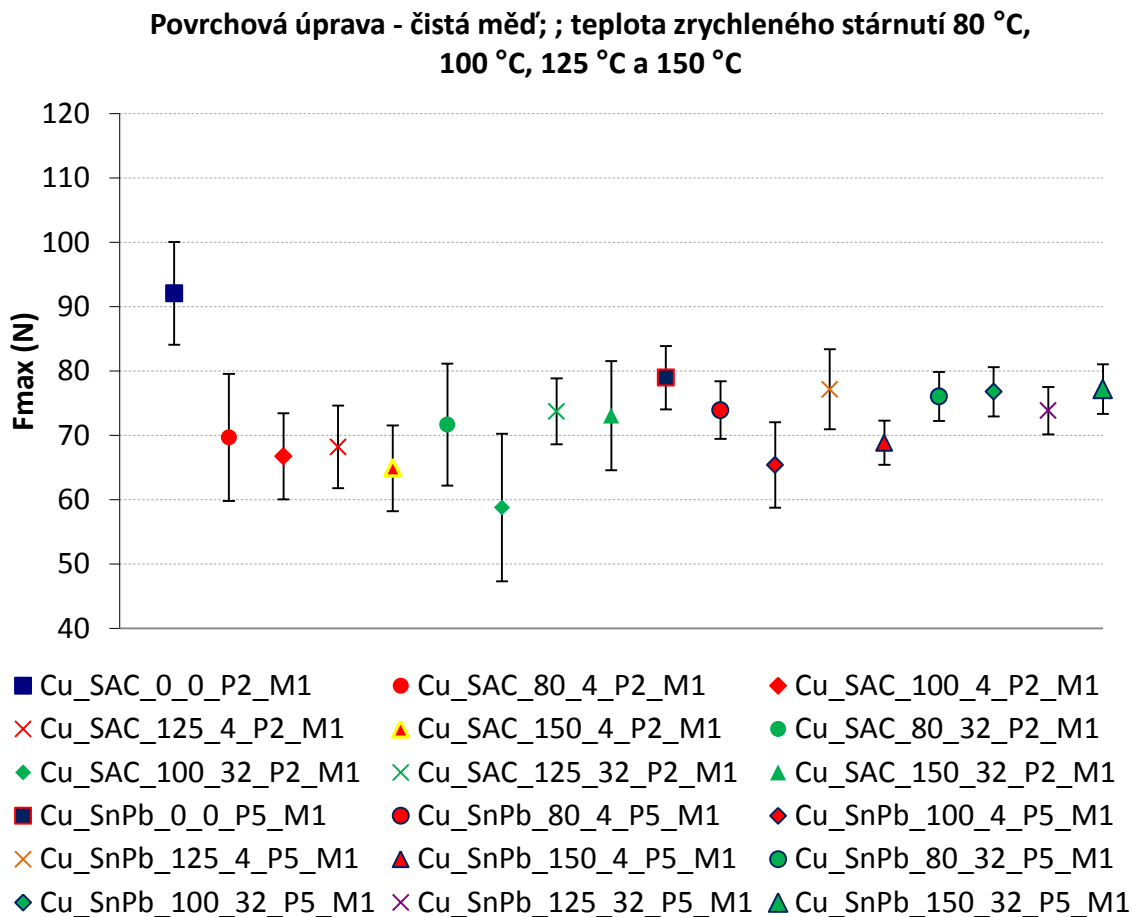
- viz kapitola „Vliv nastavení teplotního pájecího profilu“ (8.2.1)

Použité pájecí pasty:

- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (7.1.1)

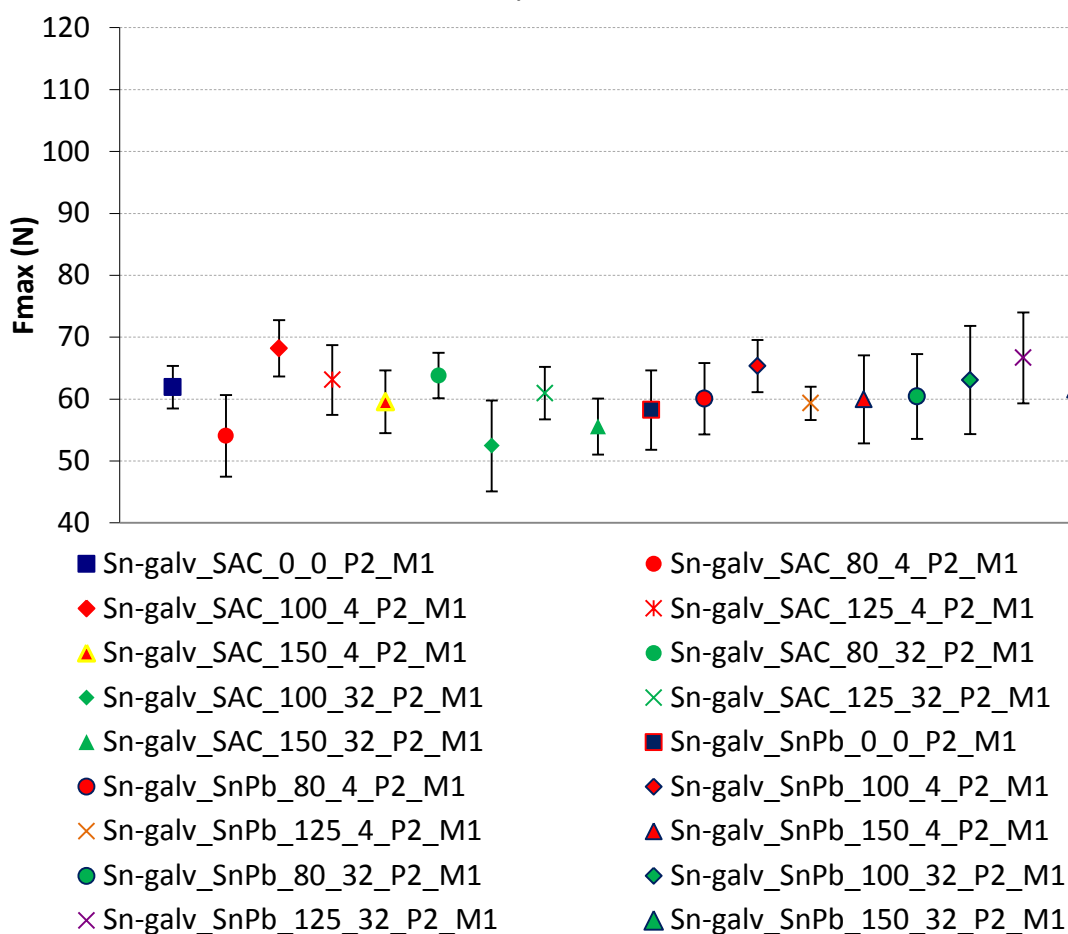
Měřeno na trhacím zařízení LabTest 3.030:

- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (8.1.1)



Obrázek 63: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě čistá měď pro různé hodnoty teploty zrychleného stárnutí

**Povrchová úprava - čistá měď; teplota zrychleného stárnutí 80 °C,
100 °C, 125 °C a 150 °C**



Obrázek 64: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě galvanický cín pro různé hodnoty teploty zrychleného stárnutí

Na povrchu čistá měď byly naměřeny relativně stejné hodnoty F_{max} u vzorků s SAC pájecí pastou stárnutých po dobu 4 dnů a u vzorků s SnPb pájecí pastou stárnutých po dobu 32 dnů. U vzorků s SAC pájecí pastou stárnutých 32 dnů byly hodnoty také relativně stejné, pouze u teploty stárnutí 100 °C je patrný značný pokles hodnoty F_{max} . Testované vzorky s pájenými spoji pastou SAC na povrchu galvanický cín vykazují pro teploty 100 °C, 125 °C a 150 °C trend poklesu hodnoty F_{max} se vzrůstající dobou stárnutí. Olovnaté spoje na povrchu galvanický cín mají hodnotu F_{max} relativně stejnou pro všechny hodnoty teploty stárnutí při době 4 a 32 dnů stárnutí, pouze u teploty 125 °C dojde ke zvýšení hodnoty F_{max} u 32 dnů stárnutého vzorku o 7,34 N.

8.2.4 Vliv množství pájky ve spoji

Vzorky desek plošných spojů:

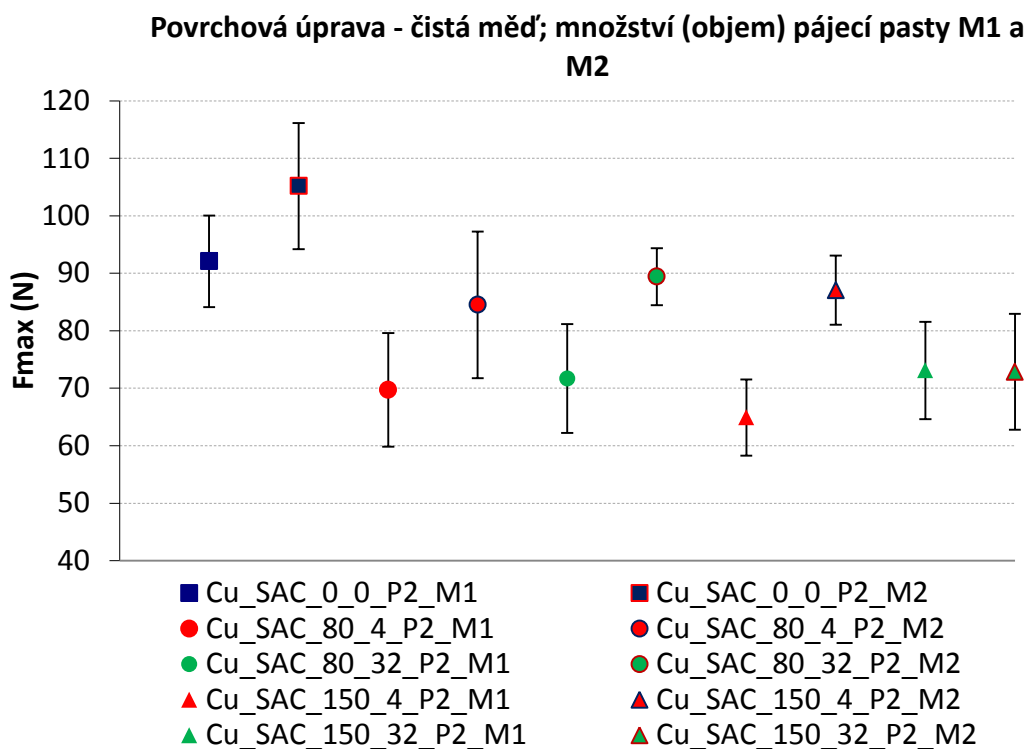
- viz kapitola „Vliv nastavení teplotního pájecího profilu“ (8.2.1)

Použité pájecí pasty:

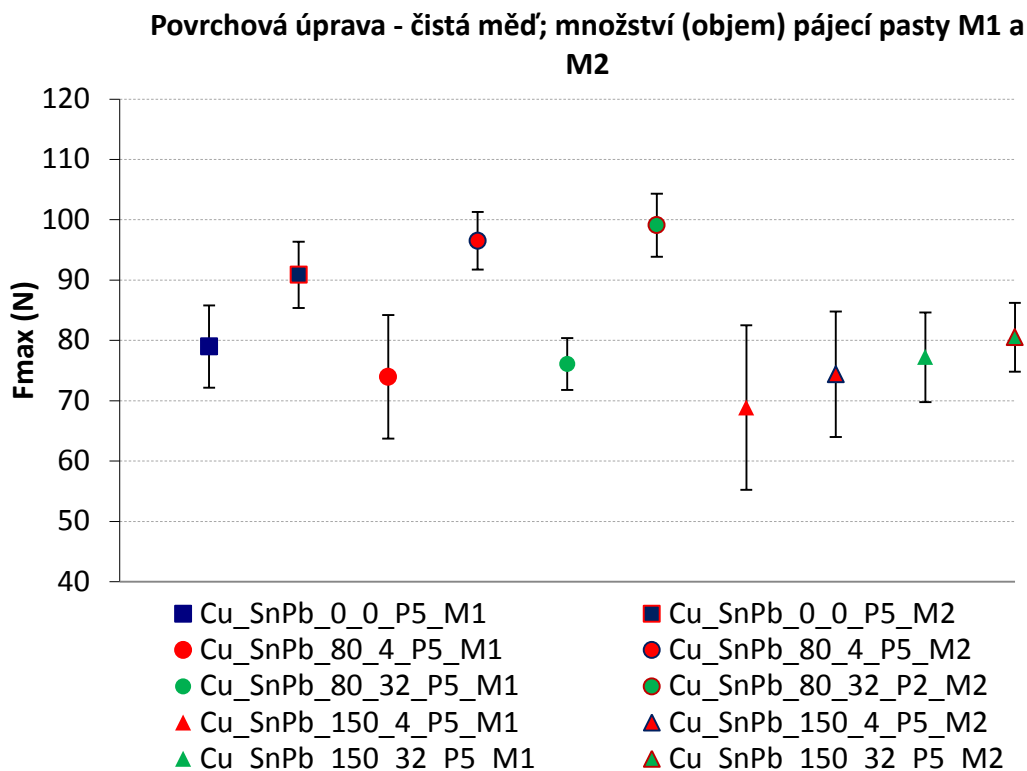
- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (7.1.1)

Měřeno na trhacím zařízení LabTest 3.030:

- viz kapitola „Vliv povrchové úpravy testovaných vzorků“ (8.1.1)



Obrázek 65: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě čistá měď s odlišným množstvím pájecí pasty SAC v pájeném spoji



Obrázek 66: Hodnoty maximální síly na povrchové úpravě čistá měď s odlišným množstvím olovnaté pájecí pasty v pájeném spoji

Množství pájecí pasty na jedné pájecí plošce pro SAC pastu bylo průměrně $M1 = 1,041$ g a $M2 = 1,046$ g, pro SnPb pastu $M1 = 1,044$ g a $M2 = 1,047$ g. Z naměřených údajů prezentovaných v grafech na obrázcích č. 64 a 65 je zřejmé, že hodnota F_{max} je pro větší množství pájecí pasty ve spoji vyšší v porovnání se spojením s menším množstvím pájecí pasty. U vzorků stárnutých při teplotě 80 °C jsou patrně větší rozdíly oproti vzorkům stárnutým při teplotě 150 °C.

8.3 Statistická analýza naměřených hodnot

Statistická analýza všech vstupních faktorů, viz tabulka č. 32, ukazuje míru vlivu jednotlivých faktorů na průměrnou hodnotu maximální síly F_{max} potřebné pro odtržení součástky z pájeného spoje. Největší vliv na hodnotu F_{max} mají vstupní faktory povrchová úprava a množství pájky ve spoji. Dalším významným faktorem je pájecí slitina. Hypotézu H_0 , že vstupní faktor nemá vliv na hodnotu F_{max} , zamítáme také pro faktory teplota stárnutí a profil pájení na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Pouze pro vstupní faktor počet dnů stárnutí hypotézu H_0 nezamítáme, avšak ho také budeme uvažovat do faktorů, které ovlivňují hodnotu F_{max} , jelikož je blízko hranici zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

Tabulka 32: Statistické vyhodnocení vlivu vstupních faktorů na hodnotu F_{\max}

Vstupní faktor	Součet čtverců S_A	Počet stupňů volnosti	Průměrný čtverec	F - poměr	p - hodnota
Povrchová úprava	4863,253	4	1215,8130	13,3010	$3,50 * 10^{-9}$
Pájecí slitina	2049,914	4	512,4784	4,5780	0,001682
Teplota stárnutí	1605,313	4	401,3283	3,4840	0,009612
Počet dní stárnutí	1318,279	6	219,7132	1,8460	0,094732
Profil pájení	987,917	8	493,9585	4,1870	0,017151
Množství pájky	3337,381	1	3337,3810	33,257	$4,95 * 10^{-8}$

9 Výsledky experimentu a doporučení pro praxi

K vytvoření mechanicky pevného a dlouhodobě spolehlivého pájeného spoje je důležité dobře znát jednotlivé faktory ovlivňující proces pájení a také strukturu pájeného spoje. V procesu pájení se při výrobě elektronických zařízení používají různé materiály na povrchovou úpravu pájecích plošek, odlišná složení pájecích slitin, různé složení a aktivita tavidla apod. Stejně tak nastavení pájecího procesu nejsou stejná pro různé kombinace použitých materiálů. Proto je pro praxi důležité znát strukturu pájeného spoje, proces tvorby spoje a faktory, které mají vliv na vlastnosti pájeného spoje.

V této kapitole bude proveden souhrn všech poznatků z provedených experimentů, přičemž v závěru jednotlivých kapitol jsou podrobněji prezentovány dílčí závěry.

9.1 Materiálové vlivy na vlastnosti pájeného spoje

9.1.1 Závislost smáčivosti na drsnosti povrchu

Povrch substrátu se vyznačuje určitou drsností, která je odvozena od výrobního procesu. Experimentálně byl sledován průběh smáčecí síly na měděném substrátu s odlišnou povrchovou drsností. Z výsledků je patrné, že velikost i orientace povrchové drsnosti výrazně ovlivňují smáčení substrátu. Proces testování metodou smáčecích vah svým principem, ponořováním testovaného vzorku do lázně s roztavenou pájkou, koresponduje s technologií pájení vlnou používanou v praxi při výrobě elektronických zařízení. Lze tedy konstatovat, že povrchová drsnost orientovaná ve směru toku pájky (pájecí vlny) napomáhá k dosažení lepších smáčecích charakteristik, a tím i k dosažení lepší spolehlivosti pájených spojů. Nejlepší smáčecí charakteristiky byly experimentálně zjištěny u drsnosti povrchu $R_a = 1,54 \mu\text{m}$ a poté u povrchové drsnosti $R_a = 1,95 \mu\text{m}$. Lze tedy usuzovat, že pro proces pájení vlnou jsou vhodnější materiály s takovouto povrchovou drsností orientovanou ve směru pájecí vlny, v porovnání s povrchy hladšími ($R_a = 1,42 \mu\text{m}$, nebo $R_a = 0,70 \mu\text{m}$).

9.1.2 Vliv povrchové úpravy DPS na vlastnosti pájeného spoje

Na testovaných vzorcích *kupon 3x3* a *vzorek 1206* byly vytvořeny pájené spoje bezolovnatou pájecí pastou SAC a olovnatou pájecí pastou SnPb. Pájené spoje byly vytvořeny na pěti různých povrchových úpravách testovaných vzorků. Testované

vzorky byly vystaveny zrychlenému stárnutí (tepelnému namáhání) při teplotě 80 °C nebo 150 °C po dobu 4 nebo 32 dnů.

Čistá měď

Bezolovnaté pájené spoje vytvořené pájecí pastou SAC na povrchové úpravě čistá měď mají větší tloušťku intermetalických sloučenin v porovnání s olovnatými pájenými spoji na stejném povrchu, viz obrázek č. 41. Z obrázku č. 52 je patrný větší rozdíl v mechanické pevnosti ve smyku u bezolovnatých pájených spojů oproti olovnatým pájeným spojům. V průběhu zrychleného stárnutí vzorků s povrchovou úpravou čistá měď dochází k růstu tloušťky vrstev intermetalických sloučenin, především intermetalické sloučeniny Cu_3Sn , a to u obou testovaných pájecích past SAC a SnPb. Naměřené hodnoty mechanické pevnosti prokazují nepříznivý vliv změny struktury pájeného spoje tvorbou a růstem intermetalických sloučenin na mechanickou pevnost pájených spojů. Intermetalická sloučenina Cu_3Sn se formuje až při zrychleném stárnutí pájeného spoje, kdy dochází ke snížení hodnot maximální síly pro odtržení součástky – F_{max} . Z ukázky obrázků pájených spojů po testu mechanické pevnosti (Příloha C) je vidět, že naměřené hodnoty F_{max} nejvíce ovlivňuje výskyt dutin ve spoji, dále pak také metalizace použitých povrchově montovaných součástek.

Galvanický cín

U povrchové úpravy galvanický cín je u pájených spojů patrný velký vliv teploty stárnutí na tvorbu a růst intermetalických sloučenin ve struktuře spoje. Vrstva intermetalických sloučenin u spojů zrychleně stárnutých při teplotě 150 °C po dobu 4 dnů dosahuje tloušťky 2,98 μm u bezolovnatého spoje a 3,4 μm u olovnatého spoje. Po době stárnutí 32 dnů dochází k nárůstu tloušťky vrstev intermetalických sloučenin o přibližně 3 μm . Vzorky stárnuté při teplotě 80 °C nevykazují takový nárůst tloušťky intermetalických sloučenin. U olovnatých pájených spojů na povrchové úpravě galvanický cín není prokázán vliv změny struktury formováním intermetalických sloučenin na F_{max} , hodnoty F_{max} jsou v rozmezí 58,2 N až 61,7 N. U spojů pájených pastou SAC je patrný pokles F_{max} u vzorků stárnutých při teplotě 150 °C, kdy došlo k nárůstu tloušťky intermetalických sloučenin o cca 3 μm .

Imerzní cín

Bezolovnaté pájené spoje na povrchu imerzní cín jednoznačně potvrzují trend růstu vrstev intermetalických sloučenin v závislosti na teplotě a době stárnutí. Stejně

jako u povrchové úpravy galvanický cín je ze struktury spojů patrná tvorba sloučeniny Cu_3Sn při teplotě stárnutí vzorků $150\text{ }^\circ\text{C}$ a také mnohem větší nárůst tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin ve srovnání se vzorky stárnutými při teplotě $80\text{ }^\circ\text{C}$, viz obrázek č. 43. Hodnoty F_{max} u testovaných vzorků nereflektují předpokládaný vliv změny struktury pájeného spoje růstem tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin. Vzorky stárnuté delší dobu dosahují větších hodnot F_{max} než vzorky stárnuté kratší dobu. Ze statistické analýzy naměřených hodnot F_{max} je patrný překryv intervalů rozptylu (chybové úsečky v grafech) jednotlivých vzorků pro určité nastavení všech sledovaných parametrů, např. doba zrychleného stárnutí. Jak bylo zmíněno u vzorků s měděným povrchem, je nutno zohlednit u všech měření pevnosti pájených spojů ve smyku vliv výskytu dutin ve spoji a povrchovou úpravu použitých součástek.

OSP - Organic Solderability Preservative

Analýza struktury pájených spojů na povrchové úpravě OSP se velmi podobá struktuře pájených spojů na povrchové úpravě imerzní cín. Tloušťka vrstvy intermetalických sloučenin je ve srovnání s povrchovou úpravou imerzní cín přibližně o 1 až $2\text{ }\mu\text{m}$ větší. U bezolovnatých spojů je tloušťka vrstvy intermetalických sloučenin u vzorků stárnutých při teplotě $80\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 4 a 32 dnů přibližně stejná, a také hodnoty F_{max} naměřené u těchto vzorků jsou téměř totožné. Vyšším nárůstem tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin u bezolovnatých spojů stárnutých při teplotě $150\text{ }^\circ\text{C}$ dochází ke větším změnám ve struktuře pájeného spoje, což představuje snížení hodnoty F_{max} u vzorků stárnutých 32 dnů oproti vzorkům stárnutým pouze 4 dny.

ENIG - Electroless Nickel Immersion Gold

Struktura pájeného spoje vytvořeného na povrchové úpravě ENIG je od předchozích povrchových úprav odlišná především díky niklové vrstvě, která je nanesená na mědi, a velmi tenké vrstvě zlata, která je nanesena na niklu. Ve struktuře spoje se tvoří velmi tenká vrstva Ni_3P na rozhraní mezi niklem a intermetalickou sloučeninou $(\text{NiCu})_6\text{Sn}_5$. Na rozhraní mezi $(\text{NiCu})_6\text{Sn}_5$ a pájkou se tvoří intermetalická sloučenina $(\text{NiCu})_3\text{Sn}_4$. V objemu spoje se pak tvoří další intermetalické sloučeniny Ag_3Sn a AuSn_4 . Na povrchu ENIG byly naměřeny nejnižší hodnoty tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin v porovnání se všemi testovanými povrchy. Vliv teploty stárnutí u povrchové úpravy ENIG na tloušťku vrstvy intermetalických sloučenin není tak výrazný jako u ostatních testovaných povrchů. Mechanickou pevnost pájeného spoje ovlivňují všechny výše uvedené intermetalické sloučeniny. Nejvyšší hodnoty F_{max} byly

naměřeny u nestárnutých spojů. Nejnižší hodnota F_{\max} byla naměřena u bezolovnatého pájeného spoje pájecí pastou SAC stárnutého 32 dnů při teplotě 150 °C, viz obrázky č. 56.

9.1.3 Vliv složení pájecí pasty na vlastnosti pájeného spoje

Při zkoumání vlivu složení pájecí pasty na tvorbu a růst intermetalických sloučenin ve struktuře pájeného spoje a vlivu na mechanickou pevnost pájeného spoje ve smyku byly vybrány testované vzorky s povrchovou úpravou čistá měď a galvanický cín. Na těchto povrchových úpravách byly vytvořeny pájené spoje s použitím pěti různých pájecích past. Testované vzorky byly vystaveny zrychlenému stárnutí při teplotě 80 °C nebo 150 °C po dobu 4 nebo 32 dnů.

SAC

Pájené spoje vytvořené na měděném povrchu pastou SAC mají nejvyšší tloušťku vrstvy intermetalických sloučenin při teplotě stárnutí vzorků 80 °C v porovnání s ostatními testovanými pájecími pastami. Hodnocení vlivu změny struktury pájeného spoje tvorbou a růstem intermetalických sloučenin na mechanickou pevnost spoje ve smyku je zmíněna výše v kapitole 9.1.2.

SnPb

Trend růstu a tvorby intermetalických sloučenin u olovnatých pájených spojů se nejvíce podobá spojům pájeným pastami SnAg a SnCu, což potvrzují také naměřené hodnoty mechanické pevnosti pájených spojů pastami SnPb, SnAg a SnCu. Podrobnější závěr z naměřených údajů o testovaných vzorcích s olovnatými pájenými spoji jsou uvedeny v kapitole 9.1.2.

SnAg

SnAg pájecí pastou vytvořené spoje na měděném povrchu nestárnuté a stárnuté 4 dny při teplotě 80 °C vykazují druhé nejnižší hodnoty tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin po spojích pájených pastou BiSn. U těchto vzorků je také vidět, že se nevytváří intermetalická sloučenina Cu_3Sn . Z porovnání testovaných vzorků s SnAg pastou vyplývá, že u povrchu galvanický cín dosahuje tloušťka vrstvy intermetalických sloučenin vyšších hodnot než u povrchu čistá měď. Větší výška tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin u povrchu galvanický cín způsobuje větší změny ve struktuře spoje a dochází ke snížení hodnoty mechanické pevnosti F_{\max} v porovnání s měděným povrchem, kde jsou naměřené hodnoty F_{\max} vyšší.

SnCu

Testované vzorky s pájenými spoji SnCu pájecí pastou na obou testovaných površích galvanický cín i čistá měď vykazují shodný trend růstu vrstvy intermetalických sloučenin. Z dlouhodobého hlediska je patrná tvorba intermetalické sloučeniny Cu_3Sn , která se tvoří pouze u vzorků stárnutých po dobu 32 dnů. Podle teploty stárnutí vzorků je zřejmý větší nárůst tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin při teplotě 150 °C oproti stárnutým vzorkům při teplotě 80 °C. Na povrchu čistá měď pájené spoje SnCu pastou vykazují nejmenší hodnoty mechanické pevnosti ze všech testovaných pájecích past. Výjimkou je vzorek 32 dnů stárnutý při teplotě 150 °C s pájeným spojem pomocí BiSn pasty. Na povrchové úpravě galvanický cín jsou hodnoty F_{\max} u vzorků stárnutých při teplotě 150 °C srovnatelné s pájecí pastou SnAg, avšak při teplotě stárnutí 80 °C dosahují nejnižších hodnot F_{\max} ze všech testovaných pájecích past.

BiSn

Pájené spoje bizmutovou pastou vykazují největší nárůst tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin na povrchové úpravě čistá měď. Díky velkému nárůstu tloušťky intermetalických sloučenin dochází k velkým změnám ve struktuře pájeného spoje a to koreluje s velkým poklesem mechanické pevnosti pájených spojů bizmutovou pájecí pastou, jak je vidět na obrázku č. 57. U povrchové úpravy galvanický cín nedosahuje tloušťka vrstvy intermetalických sloučenin takových hodnot jako u čisté mědi. Negativní vliv změny struktury pájeného spoje růstem tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin na hodnoty F_{\max} je patrný také na povrchu galvanický cín.

9.1.4 Doporučení pro praxi

Z pohledu testovaných povrchových úprav s požadavkem na co největší mechanickou pevnost bezolovnatého pájeného spoje ve smyku je nejvhodnější použít povrchovou úpravu čistá měď. Povrchová úprava galvanický cín je dle provedených experimentů vhodná pro aplikaci při požadavcích na strukturu bezolovnatého pájeného spoje (malá tloušťka vrstvy intermetalických sloučenin), kdy nedochází k velkému tepelnému namáhání do 80 °C. Tepelným namáháním 150 °C dochází k výraznému nárůstu tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin. Pro zařízení, ve kterých jsou bezolovnaté pájené spoje dlouhodobě tepelně namáhané, lze z hlediska struktury pájeného spoje jednoznačně doporučit povrchovou úpravu ENIG, zatímco z hlediska mechanické pevnosti ve smyku je lepší použití povrchové úpravy čistá měď nebo imerzní cín.

K dosažení bezolovnatého pájeného spoje s co největší mechanickou pevností ve smyku je z hlediska zkoumaných bezolovnatých pájecích past nejvhodnější použít bizmutovou pájecí pastu BiSn. To však pouze v případě, že pájené spoje nebudou vystaveny většímu tepelnému namáhání než 80 °C. Což vyplývá také z vlastností bizmutové pájecí pasty, především její teploty tání 138 °C. Pro bezolovnaté pájené spoje, které jsou vystaveny tepelnému namáhání nad 80 °C, lze doporučit pájecí pastu SAC, poté SnAg a nakonec SnCu. Ve stejném pořadí lze doporučit jednotlivé pájecí pasty do praxe i pro bezolovnaté pájené spoje tepelně namáhané pod 80 °C, pokud není zvolena bizmutová pájecí pasta. Z pohledu struktury bezolovnatého pájeného spoje je možné navrhnout použití pájecích past SnAg a SnCu na povrchu čistá měď. Tyto pájecí pasty vykazují nejmenší nárůst tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin. Z pohledu praxe je použití povrchové úpravy čistá měď komplikovanější, jelikož čistá měď na vzduchu rychle oxiduje, a tím je doba skladovatelnosti desek plošných spojů s povrchovou úpravou čistá měď v porovnání s ostatními povrchovými úpravami kratší. U povrchové úpravy galvanický cín je dle naměřených údajů lepší volit pájecí pastu SAC.

9.2 Procesní vlivy na vlastnosti pájeného spoje

9.2.1 Vliv doby zrychleného stárnutí na vlastnosti pájeného spoje

Pozorovány byly pájené spoje vytvořené pájecími pastami SAC a SnPb na testovaných vzorcích s povrchovou úpravou čistá měď. Testované vzorky byly vystaveny zrychlenému stárnutí při teplotě 80 °C nebo 150 °C po dobu 1, 2, 4, 8, 16 nebo 32 dnů. Z analýz těchto vzorků, jež jsou uvedeny v kapitole 7.2.1 a 8.2.2, je patrná korelace mezi hodnotami mechanické pevnosti F_{max} a hodnotami tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin. Se vzrůstajícím počtem dnů stárnutí vzorků se ve většině případů zvyšuje hodnota tloušťky vrstev intermetalických sloučenin a snižuje hodnota F_{max} pájených spojů. V grafech naměřených a spočtených údajů jsou zřejmé výjimky, které tento trend poklesu F_{max} a růstu tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin nepotvrzují. To je opět způsobeno rozptylem měřených hodnot (nepravidelný tvar intermetalických sloučenin), zohlednit se musí také chyby vnesené do výpočtů použitím statistických analýz a také rozptylem měřených hodnot použitých vzorků, kdy byl pro každé měření použit jiný vzorek.

9.2.2 Vliv teploty zrychleného stárnutí na vlastnosti pájeného spoje

Na testovaných vzorcích byly vytvořeny pájené spoje pomocí pájecí pasty SAC a SnPb na povrchových úpravách čistá měď a galvanický cín. Testované vzorky byly vystaveny zrychlenému stárnutí při teplotě 80 °C, 100 °C, 125 °C nebo 150 °C po dobu 4 nebo 32 dnů. Podle analýzy naměřených údajů v kapitole 7.2.2 a 8.2.3 lze usoudit, že se vrůstající teplotou zrychleného stárnutí dochází k růstu vrstvy intermetalických sloučenin a dle naměřených hodnot F_{\max} k poklesu mechanické pevnosti pájených spojů. Toto tvrzení nelze jednoznačně považovat za korektní, jelikož ne úplně všechny testované vzorky ho potvrzují. Např. hodnoty testovaných vzorků s SAC a SnPb pájecími pastami na povrchu čistá měď mají přibližně dvojnásobnou hodnotu tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin při teplotě stárnutí 150 °C oproti vzorkům stárnutým při teplotě 125 °C při době stárnutí 32 dnů. Přičemž hodnota F_{\max} na povrchu čistá měď u vzorku s olovnatým spojem a stárnutým při teplotě 125 °C je o 3,35 N vyšší než u vzorku stárnutého při teplotě 150 °C, u vzorků s bezolovnatým spojem je hodnota F_{\max} téměř totožná při stejném nastavení teplot zrychleného stárnutí (125 °C a 150 °C). Na povrchu galvanický cín je tloušťka vrstvy intermetalických sloučenin téměř shodná u totožných vzorků stárnutých po dobu 32 dnů jako u povrchu čistá měď, avšak v případě galvanického cínu je hodnota F_{\max} u vzorku s bezolovnatým pájeným spojem stárnutým při teplotě 125 °C vyšší o 5,41 N oproti vzorku stárnutém při teplotě 150 °C.

Závěr

Tato práce se zabývá problematikou pájení se zaměřením na strukturu pájeného spoje. Struktura pájeného spoje významně ovlivňuje jeho vlastnosti, kvalitu a spolehlivost. V průběhu procesu pájení a následném stárnutí pájeného spoje dochází v jeho struktuře k výrazným změnám. Hlavním zaměřením práce je studium tvorby a růstu intermetalických sloučenin, které ovlivňují zejména mechanické vlastnosti pájeného spoje.

Zkoumat faktory ovlivňující proces pájení a kvalitu pájeného spoje je důležité z důvodu neustálého vývoje nových bezolovnatých pájecích slitin a materiálů pro pájení. Na základě teoretické části zaměřené na problematiku pájení, tvorbu pájeného spoje a vzniku intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji byl navržen rozsáhlý experiment.

Cílem experimentální části práce bylo zkoumat tvorbu a růst intermetalických sloučenin v závislosti na faktorech jako jsou např.: teplota, složení pájecí slitiny či druh pájeného materiálu, které ovlivňují strukturu bezolovnatého pájeného spoje. Pro možnost přesného určení intermetalických sloučenin formujících se ve struktuře bezolovnatých pájených spojů byla provedena prvková analýza materiálografických výbrusů těchto spojů. Dále byl zkoumán vliv změny struktury spoje způsobené tvorbou a růstem intermetalických sloučenin na mechanickou pevnost pájeného spoje. Korelace neboli vzájemný vztah mezi dvěma veličinami, v tomto případě tloušťkou vrstvy intermetalických sloučenin a hodnotou F_{\max} , se potvrdila například u bezolovnatých pájených spojů s pájecí pastou SAC na povrchové úpravě čistá měď. Výsledky jednotlivých experimentů jsou uvedeny u jednotlivých testů a v kapitole č. 9. Na základě korelace nelze rozhodnout, zda změna tloušťky vrstvy intermetalických sloučenin je příčinou a změna hodnoty F_{\max} je následkem. Z analýzy materiálografických výbrusů pájených spojů po měření mechanické pevnosti ve smyku je patrné, že k selhání spoje dochází nejčastěji v oblasti, kde se ve struktuře pájeného spoje vyskytují dutiny. K selhání spoje tedy nedochází v oblasti pájecí plošky na desce plošného spoje, kde se tvoří souvislá vrstva intermetalických sloučenin. Z vyhodnocení experimentu lze říct, že vrstva intermetalických sloučenin ve struktuře pájeného spoje na rozhraní pájecí plošky a pájky není nejslabším místem, avšak intermetalické sloučeniny se formují také v objemu pájeného spoje a tím dochází ve struktuře pájeného spoje ke změnám, které výrazně ovlivňují jeho pevnost.

Otázky často spjaté se správnou volbou materiálu a nastavením procesních parametrů je možné podstatně redukovat, pokud dobře pochopíme a budeme-li správně optimalizovat proměnné vstupní faktory v pájecím procesu, což vede ke snaze vytvoření optimálního bezolovnatého pájeného spoje.

Zhodnocení cílů

V teoretické části práce byly diskutovány a popsány faktory ovlivňující tvorbu pájeného spoje a v současnosti nejčastěji používané materiály pro vytvoření bezolovnatých pájených spojů v elektronických zařízeních. Je zde uveden význam intermetalických sloučenin a analýza principu jejich tvorby a růstu ve struktuře bezolovnatých pájených spojů v různých materiálových kombinacích. Dle teoretické části práce byly vybrány materiály, které byly použity při testech v experimentální části práce.

Dílčí cíl 1) Experimentální ověření materiálových vlivů na strukturu bezolovnatého pájeného spoje a jeho vlastnosti

Hlavní přínos práce je získání informací a stanovení doporučení z experimentálního zkoumání působení materiálových vlivů na tvorbu a růst intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji. Také studium působení tvorby intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji na jeho mechanickou pevnost. Doporučení vhodných materiálů pro použití v praxi je uvedeno v kapitole č. 9.1.4. Neméně důležitou částí práce je přesné určení složení intermetalických sloučenin pomocí skenovací elektronové mikroskopie s prvkovou analýzou.

Dílčí cíl 2) Experimentální ověření procesních vlivů na strukturu bezolovnatého pájeného spoje a jeho vlastnosti

Další přínos práce spočívá v objasnění procesních vlivů na formování intermetalických sloučenin v bezolovnatém pájeném spoji prostřednictvím navržených experimentů. Rovněž také v pozorování procesních vlivů na mechanickou pevnost ve smyku bezolovnatého pájeného spoje.

Dílčí cíl 3) Definice závěrů z provedených experimentů vhodných pro využití v praxi a při vývoji nových pájecích slitin

Dílčí výsledky, které jsou uvedeny vždy v závěru jednotlivých kapitol a v kapitole č. 9, lze doporučit pro oblasti vývoje nových pájecích slitin a materiálů pro pájení a také pro použití do praxe. Výsledky získané analyzováním struktur bezolovnatých pájených spojů a výsledky zkoumání účinků materiálových a procesních faktorů na tvorbu

intermetalických sloučenin ve struktuře pájeného spoje, ale i na mechanické vlastnosti bezolovnatého pájeného spoje vedou k závěru, že k dosažení kvalitního a dlouhodobě spolehlivého pájeného spoje je velmi důležité znát jednotlivé vlivy a interakce materiálových a procesních faktorů při procesu pájení.

Literatura

- [1] Mach, Skočil, Urbánek: „*Montáž v elektronice*“, vydavatelství ČVUT, Praha 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] Mach, Duraj: „*Náhrada olova v pájkách Výhody a nevýhody alternativních řešení*“ < <http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Nahrada%20olova%20v%20pajkach.pdf> >, červen 2012.
- [3] Liu: „*Conductive adhesives for Electronics Packaging*“, Electrochemical Publications Ltd, UK 1999, ISBN 0-901-150-37-1.
- [4] Skalský: „*Technologie propojování v elektronice*“, bakalářská práce, Západočeská Univerzita v Plzni, Plzeň 2011.
- [5] Wikipedia, the free encyclopedia: „*Copper*“, < <http://en.wikipedia.org/wiki/Copper> >, květen 2011.
- [6] Lačný: „*Elektrická vodivost pájeného spoje a vliv na spolehlivost*“, diplomová práce, Vysoké Učení Technické v Brně, Brno 2010.
- [7] Gupta: „*Effect of intermetallic compounds on thermomechanical reliability of lead-free solder interconnects for FLIP-CHIPS*“, < http://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/4800/gupta_piyush_200412_master.pdf?sequence=1 >, květen 2011.
- [8] Duba: „*Geometrie zapájených vývodů miniaturních elektronických součástek*“, disertační práce, Západočeská Univerzita v Plzni, Plzeň 2007.
- [9] < <http://www.lamirel.cz/povrchoveupravy.aspx> >, červen 2011.
- [10] Libich: „*Návrh koncepce výrobní linky pro výrobu vícevrstevných desek plošných spojů s mikropropojí*“, bakalářská práce, Vysoké Učení Technické v Brně, Brno 2009.
- [11] < <http://printed.cz/osp-947> >, červen 2011.
- [12] < http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0158_emgr/index.html >, duben 2012.
- [13] Paško: „*Analýza změn v pájených spojkách vzniklých vlivem stárnutí*“, diplomová práce, Vysoké Učení Technické v Brně, Brno 2011.
- [14] Abel, Cimburek: „*Bezolovnaté pájení v legislativě a v praxi*“, vydavatelství ABE.TEC, Pardubice 2005. ISBN 80-903597-0-1.
- [15] Novák: „*Využití inertních atmosfér při testování pájitelnosti*“, diplomová práce, Západočeská Univerzita v Plzni, Plzeň 2008.
- [16] Podzemský: „*Degradace spojů pájených pájkami bez olova*“, odborná studie, České vysoké učení technické, Praha.

- [17] Mikulčák, Klimeš, Široký, Šůla, Zemánek: „*Matematické fyzikální a chemické tabulky*“, vydavatelství Prometheus, Praha 1997. ISBN 80-85849-84-4.
- [18] Ganesan, Pecht: „*Lead-free electronics*“, A John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. ISBN 13-978-0-471-78617-7.
- [19] < http://www.koki.org/Czech/lf_zaklady.htm >, červenec 2011.
- [20] Abel: „*SMT - Technologie povrchové montáže*“, Nakladatelství Platan, Pardubice 2000, ISBN 80-902733-1-9.
- [21] Ulichová: „*Intermetalika a uspořádané fáze v konstrukčních materiálech*“, bakalářská práce, Masarykova univerzita, Brno 2006.
- [22] Starý: „*Bezolovnaté pájení – materiálová a procesní kompatibilita v inertní a inertně/redukční atmosféře*“, disertační práce, Vysoké Učení Technické v Brně, Brno 2005.
- [23] Růža: „*Pájení 2*“, upravené vydání, Praha: SNTL/Alfa n. p. 1988.
- [24] Harant, Steiner: „*Double-sided Preheating Influence on Solderability*“, 31st International Spring Seminar on Electronics Technology, Reliability and Life-time Prediction, ISSE 2008., 7-11 May 2008, ISBN: 978-1-4244-3973-7.
- [25] Viková: „*studijní materiály*“, Katedra textilní chemie, Technická univerzita v Liberci <http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/include/osobni_stranky/vikova.martina/teaching/9s_mac1.pdf>, květen 2012
- [26] Zheng, Hillman, McCluskey: „*Intermetallic Growth on PWB's Soldered with Sn3.8Ag0.7Cu*“, CALCE Electronic Products and Systems Center. A. James Clark School of Engineering University of Mariland <http://www.dfrsolutions.com/pdfs/2002_Intermetallic_Hillman-McCluskey.pdf>, červen 2012
- [27] Humpston, Jacobson: „*Principles of Soldering*“, ASM International, 2.vydání, 2004, ISBN 0-87170-792-6.
- [28] Degarmo, Black, Kohser, Klamecki: „*Principles of Soldering*“, John Wiley & Sons Inc, 2003, ISBN 0-471-65653-4.
- [29] J. W. Evans, Kwon, J. Y. Evans: „*A guide to lead-free solders*“, Springer-Verlag London Limited 2007. ISBN 978-1-84628-309-3.
- [30] Flanders, Jacobs, Pinizzotto: „*Activation energies of intermetallic growth of Sn-Ag eutectic solder on copper substrates*“, Journal of Electronic Materials, Volume 26, No. 7, March 1997, Pages 883-887, ISSN 0361-5235, DOI: 10.1007/s11664-997-0268-4.

- [31] Kumar, Chen: „*Interdependent intermetallic compound growth in an electroless Ni-P/Sn-3.5Ag reaction couple*“, Journal of Electronic Materials, Volume 40, No. 2, 2011, Pages 213-223, ISSN 0361-5235, DOI: 10.1007/s11664-010-1447-2.
- [32] „*peritektická přeměna*“, < <http://leccos.com/index.php/clanky/peritekticka-premena> >, červen 2011
- [33] Shim, Oh, B. Lee, D. Lee, Metallkde: „*Cu-Sn System*“, < <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cusn.html> >, červen 2011.
- [34] Kruml, Michel: „*Krystalová struktura pevných látek*“, Vysoké Učení Technické v Brně, 2009, < <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/WDD/krystalografie09.pdf> >.
- [35] Shim, Oh, B. Lee, D. Lee, Metallkde: „*Ag-Sn System*“, < <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agsn.html> >, červen 2011.
- [36] Okamoto: „*Au-Sn (Gold-Tin)*“, < <http://resources.metapress.com/pdf-preview.axd?code=811571872u2x8676&size=largest> >, červen 2011.
- [37] Okamoto: „*Ni-Sn (Nickel-Tin)*“, < <http://resources.metapress.com/pdf-preview.axd?code=flv327r517mx7131&size=largest> >, červen 2011.
- [38] Shanguang: „*Lead-free solder interconnect reliability*“, ASM International, USA 2005, ISBN 0-87170-816-7.
- [39] Podzemský: „*Struktura spojů pájených pájkami bez olova a její vliv na vnější vzhled spoje*“, < <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/podzemsky.pdf> >, červenec 2011.
- [40] Tian, Kutilainen: „*Microstructures in solder joints between Sn95.5Ag4Cu0.5 solder and Ag/Pd thick film*“, Journal of Electronic Materials, Volume 32, No. 03, 2008, Pages 152-158, ISSN 0361-5235, DOI: 10.1007/s11664-003-0186-z.
- [41] Kang, Choi, Shih, Henderson, Gosselin, Sarkhel, Goldsmith, Puttlitz: „*Ag₃Sn Plate Formation in the Solidification of Near-Ternary Eutectic Sn-Ag-Cu*“, Journal of the Minerals Metals & Materials Society, June 2003, Pages 61-65, ISSN 1543-1851.
- [42] Lee, Kutilainen: „*Electrical conductivity changes of bulk tin and Sn-3.0Ag-0.5Cu in bulk and in joints during isothermal aging*“, Journal of Materials Research, Volume 20, No. 02, 2005, Pages 364-374, ISSN 2044-5326, DOI: 10.1557/JMR.2005.0064.
- [43] „*Měkké pájky*“, < http://www.kovopb.cz/userdata/pages/12/dp-solders_lf.pdf >, červen 2011.

- [44] „Lead free alloy chart“, < <http://www.qualitek.com/lfalloyc.html> >, červenec 2011.
- [45] Hložek: „Chemické analýzy drobných kovových ozdob“, < http://mck.technicalmuseum.cz/images/stories/clanky/metodika/drobne_kovove_ozdoby.pdf >, červenec 2012.
- [46] Wassink: „Soldering in electronics, Second edition“, Electrochemical Publications Limited, 1989, ISBN 0-901150-24-X.
- [47] Šafářová: „Skenovací (rastrovací) elektronová mikroskopie“, Olomouc, < http://nanosystemy.upol.cz/upload/18/safarova_sem.pdf >, červenec 2011.
- [48] „AFM - ATOMIC FORCE MICROSCOPE“ < <http://www.cmi.cz/index.php?lang=1&wdc=37> >, červenec 2011.
- [49] Pang, Xu, Shi, Zhou, Ngho: „Intermetallic growth studies on Sn-Ag-Cu Lead-free solder joints“, Journal of Electronic Materials, Volume 33, No. 10, 2004, Pages 1219-1226, ISSN 0361-5235, DOI: 10.1007/s11664-004-0125-7.
- [50] Wang, Zhao, Sekulic, Qian: „A Comparative Study of Reactive Wetting of Lead and Lead-Free Solders on Cu and (Cu₆Sn₇/Cu₃Sn)/Cu Substrates“, Journal of Electronic Materials, Volume 37, No. 10, 2008, Pages 1640-1647, ISSN 0361-5235, DOI: 10.1007/s11664-008-0502-8.
- [51] Sivasubramaniam, Bosco, Janczak-rusch, Cugnoni, Botsis: „Interfacial Intermetallic Growth and Strength of Composite Lead-Free Solder Alloy Through Isothermal Aging“, Journal of Electronic Materials, Volume 37, No. 10, 2008, Pages 1598-1604, ISSN 0361-5235, DOI: 10.1007/s11664-008-0524-2.
- [52] Zhou, Liu, Li, Wu: „Effect of Intermetallic on Electromigration and Atomic Diffusion in Cu/SnAg_{3.0}Cu_{0.5}/Cu Joints: Experimental and First-Principles Study“, Journal of Electronic Materials, Volume 38, No. 6, 2009, Pages 866-872, ISSN 0361-5235, DOI: 10.1007/s11664-009-0760-0.
- [53] B. Kim, Lim, J Kim, K. Lee, Park, H. Lee, Joo: „Intermetallic Compound Growth and Reliability of Cu Pillar Bumps Under Current Stressing“, Journal of Electronic Materials, Volume 39, No. 10, 2010, Pages 2281-2285, ISSN 0361-5235, DOI: 10.1007/s11664-010-1324-z.
- [54] Ngho, Zhou, Pang: „Effect of Stress State on Growth of Interfacial Intermetallic Compounds Between Sn-Ag-Cu Solder and Cu Substrates Coated with Electroless Ni Immersion Au“, Journal of Electronic Materials, Volume 37, No. 12, 2008, Pages 1843-1850, ISSN 0361-5235, DOI: 10.1007/s11664-008-0540-2.

- [55] Jeong, Kim, Lee: „*Effect of cooling rate on growth of the intermetallic compound and fracture mode of near-eutectic Sn-Ag-Cu/Cu pad: Before and after aging*“, Journal of Electronic Materials, Volume 33, No. 12, 2004, Pages 1530-1544, ISSN 0361-5235, DOI: 10.1007/s11664-004-0095-9.
- [56] „*Analýza malých výběrů*“,
< <http://meloun.upce.cz/docs/research/chemometrics/methodology/3horn.pdf> >,
únor 2012.
- [57] Meloun, Militký: „*Statistická analýza experimentálních dat*“, Academia, vydání 2., upravené a rozšířené, Praha 2004. ISBN 80-200-1254-0.
- [58] Anova - < <http://homel.vsb.cz/~bri10/Teaching/Statistika%201/Kapitola%2010.PDF> >,
>, červenec 2012.
- [59] Sohn, Yu, Kang, Shih, Lee: „*Effect of Intermetallics Spalling on the Mechanical Behavior of Electroless Ni(P)/Pb-free Solder Interconnection*“,
< <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01441250> >,
>, červen 2012.
- [60] Sohn, Yu, Kang, Shih, Lee: „*Spalling of intermetallic compounds during the reaction between lead-free solders and electroless Ni-P metallization*“,
< <http://epl.kaist.ac.kr/main/research/papers/paper/foreign/61.pdf> >,
>, červen 2012.
- [61] „*Testování statistických hypotéz*“,
< http://cs.wikipedia.org/wiki/Testování_statistických_hypotéz >,
>, červen 2012.

Seznam publikací autora

Publikace vztahující se k předmětu disertační práce

Vysokoškolské kvalifikační práce (rigorozní práce)

- [1] Novák, T.: „*Intermetalické sloučeniny v bezolovnatém pájeném spoji*“, písemná práce ke státní doktorské zkoušce, ZČU Plzeň, 2011, 37 s.

Statě ve sborníku

- [2] Novák, T.: „*Závislost pájitelnosti na drsnosti DPS*“, In Elektrotechnika a informatika 2009. Část 2., Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009, s. 101-104. ISBN: 978-80-7043-809-1.
- [3] Novák, T., Steiner, F.: „*Surface Roughness Influence on Solderability*“. In 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology. Brno: Brno University of Technology, 2009, s. 280-281. ISBN: 978-80-214-3874-3.
- [4] Novák, T., Steiner, F., Starý, J., Stejskal, P.: „*Solderability Dependence on Surface Roughness*“. In 16th Electronic Devices and Systems. Brno: Brno University of Technology, 2009, s. 271-276. ISBN: 978-80-214-3874-3.
- [5] Novák, T., Steiner, F.: „*Vliv drsnosti povrchu na pájitelnost desek plošných spojů*“. In Diagnostika '09. Srní: Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2009, s. 183-186. ISBN: 978-80-7043-793-3.
- [6] Novák, T., Steiner, F.: „*The area of spread solderability test use for roughness influence assessment*“. In 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology. Warsaw: Warsaw University of Technology, 2010. ISBN: 978-83-7207-874-2.
- [7] Novák, T.: „*Zkoumání růstu IMC v pájeném spoji*“. In Elektrotechnika a informatika 2010. Část 2., Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. s. 97-100. ISBN: 978-80-7043-914-2.
- [8] Novák, T., Steiner, F.: „*Effect of Thermal Stress and Constitution of Lead-Free Soldering Alloys on Creation and Growth of IMC*“. In EDS '10 IMAPS CS International conference proceedings. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. s. 229-234. ISBN: 978-80-214-4138-5.
- [9] Novák, T., Hujer, T., Steiner, F.: „*Long-term behavior of IMCs in lead-free solder joints*“. In 34th International Spring Seminar on Electronics Technology 2011. Hihg Tatraš: Technical University of Košice, 2011. ISBN: 978-80-553-0646-9.

[10] Novák, T., Steiner, F.: „*Influence of Intermetallic Compounds Growth on Properties of Lead-free Solder Joints*“. In 35th International Spring Seminar on Electronics Technology 2012. Bad Aussee, Austria: Vienna University of Technology, Austria, 2012. s. 213-217 E-ISBN: 978-1-4673-2239-3, DOI: 10.1109/ISSE.2012.6273075.

[11] Novák, T., Steiner, F.: „*Usage of inert atmosphere for solderability testing*“. In EDS '12 IMAPS CS International conference proceedings. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. s. 77-82. ISBN: 978-80-214-4539-0.

Článek

[12] Novák, T., Steiner, F., Starý, J., Stejskal, P.: „*Solderability Dependence on Surface Roughness*“. In konference EDS 2009, Electroscope. ISBN: 1802-4564.

[13] Novák, T., Steiner, F.: „*Effect of Thermal Stress and Constitution of Lead-Free Soldering Alloys on Creation and Growth of IMC*“. In Číslo 3. 2010 - EDS 2010, Electroscope. ISBN: 1802-4564.

Ostatní publikace

[1] Novák, T.: „*Testování pájitelnosti v inertní atmosféře*“. In Elektrotechnika a informatika 2008. Část 2., Elektronika. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008, s. 81-84. ISBN: 978-80-7043-701-8.

[2] Hujer, T., Konárek, Z., Novák, T., Steiner, F.: „*Building of web-enable expert system for solderability testing*“. In 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology. Warsaw: Warsaw University of Technology, 2010. ISBN: 978-83-7207-874-2.

[3] Hujer, T., Konárek, Z., Novák, T., Steiner, F.: „*Solderability Testing Expert System*“. In EDS '10 IMAPS CS International conference proceedings. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. s. 110-114. ISBN: 978-80-214-4138-5.

[4] Wirt, V., Hujer, T., Novák, T., Rendl, K., Steiner, F.: „*Comparison of solderability testing methods of PCBs with different surface finishes*“. In EDS '11 IMAPS CS International conference proceedings. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. s. 229-234. ISBN: 978-80-214-4138-5.

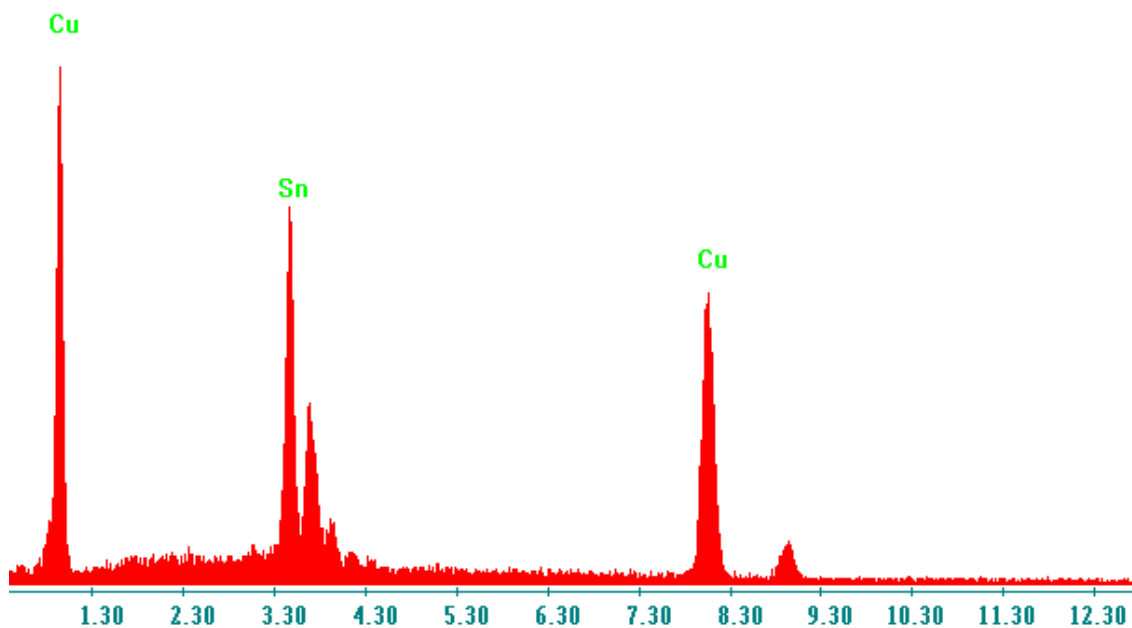
Prototyp, funkční vzorek

[5] Steiner, F., Novák, T.: „*Zařízení pro zajištění inertní atmosféry při testování pájitelnosti*“. Západočeská univerzita, 2008.

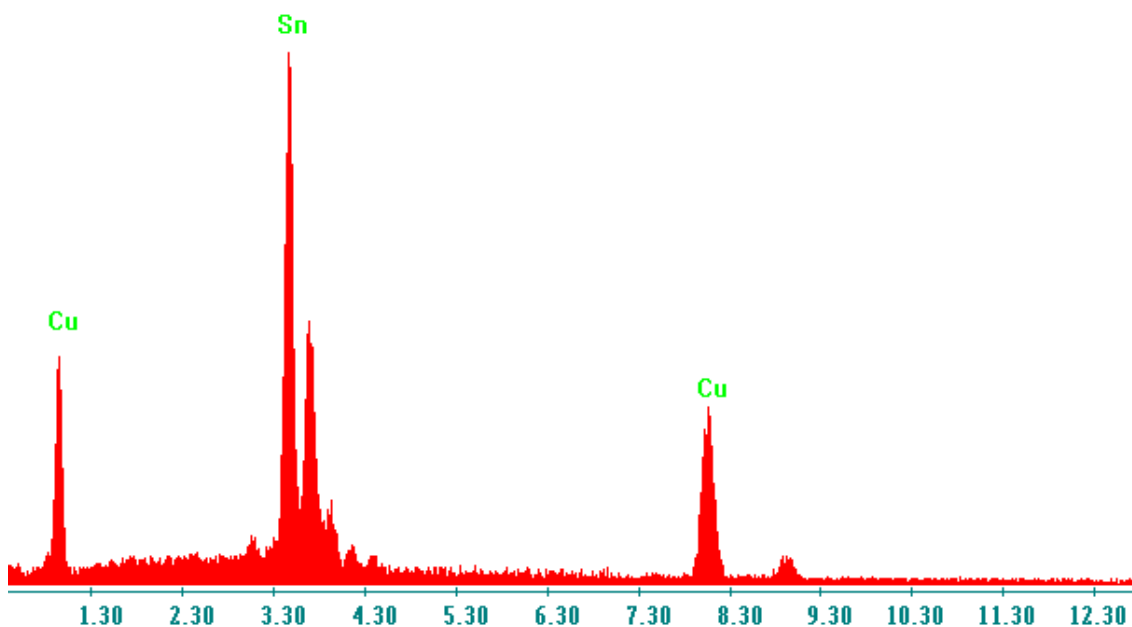
Přílohy

Příloha A. Prvková analýza – EDX spektra analyzovaných vzorků

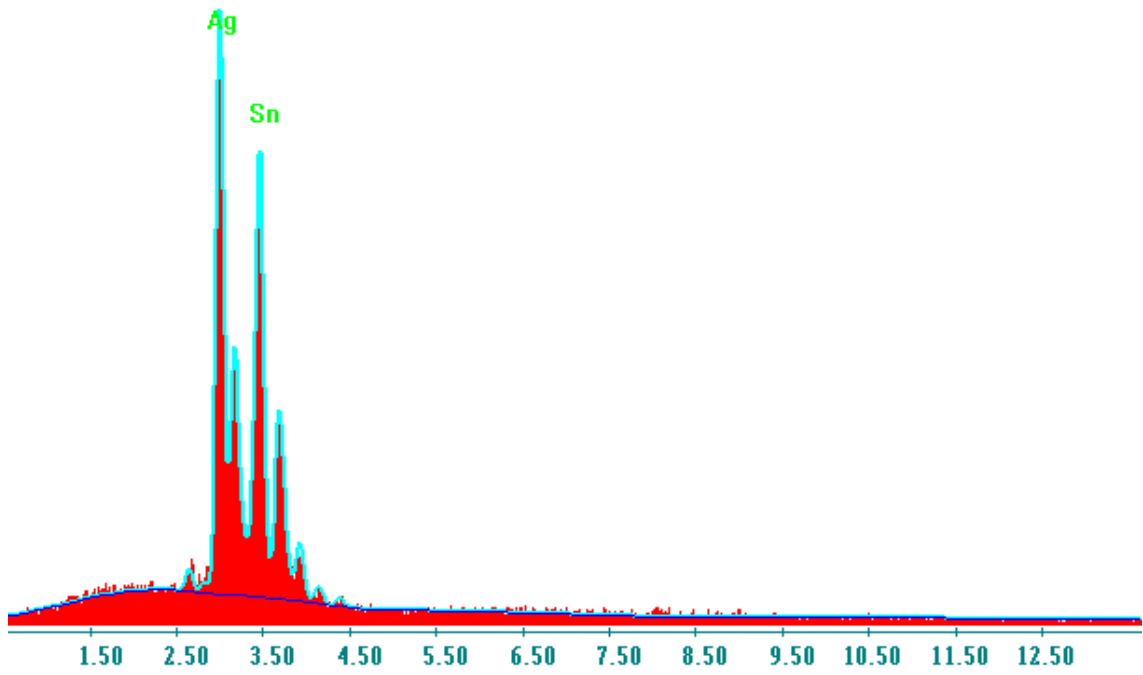
Popis vzorků je následující: povrchová úprava - pájecí pasta - teplota zrychleného stárnutí - počet dnů zrychleného stárnutí - místo měření (viz obrázky č. 25 až 38 v kapitole 6.2). Čili např. Cu-SAC-150-32-1 je pájený spoj na měděném povrchu, pájecí pastou SAC a stárnutý 32 dnů při teplotě 150 °C, v místě měření č. 1.



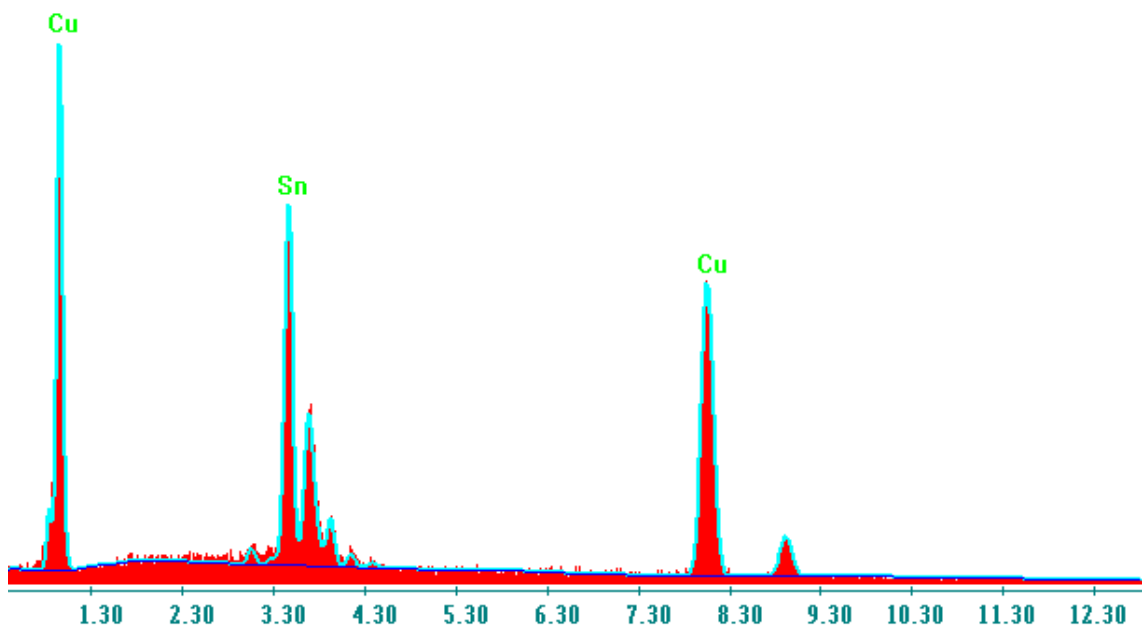
Obrázek 67: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SAC-150-32-1



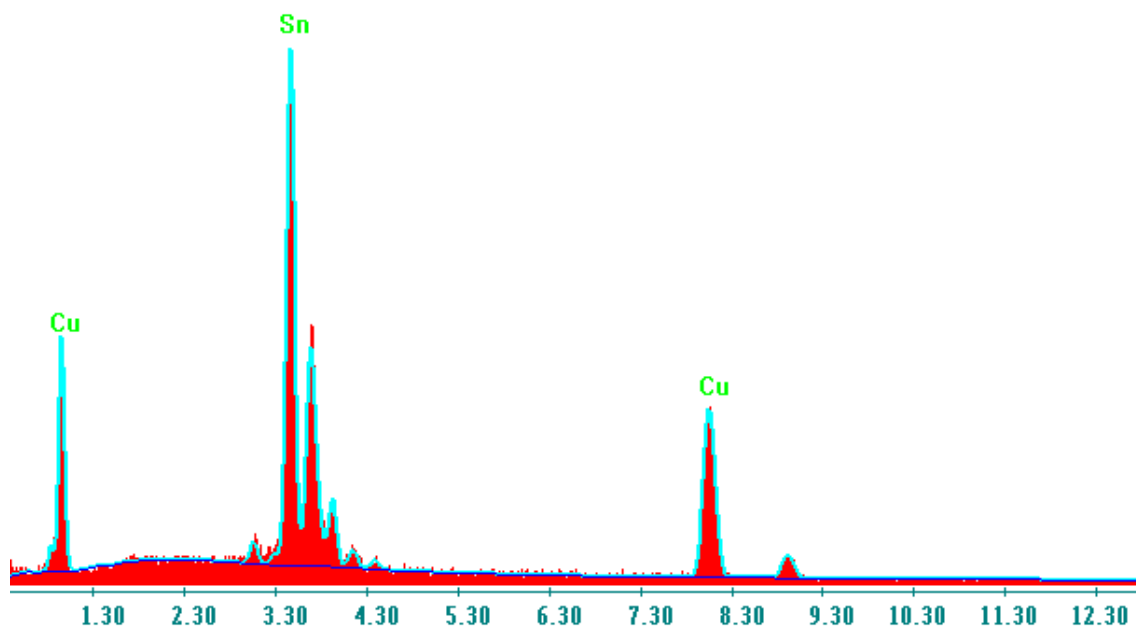
Obrázek 68: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SAC-150-32-2



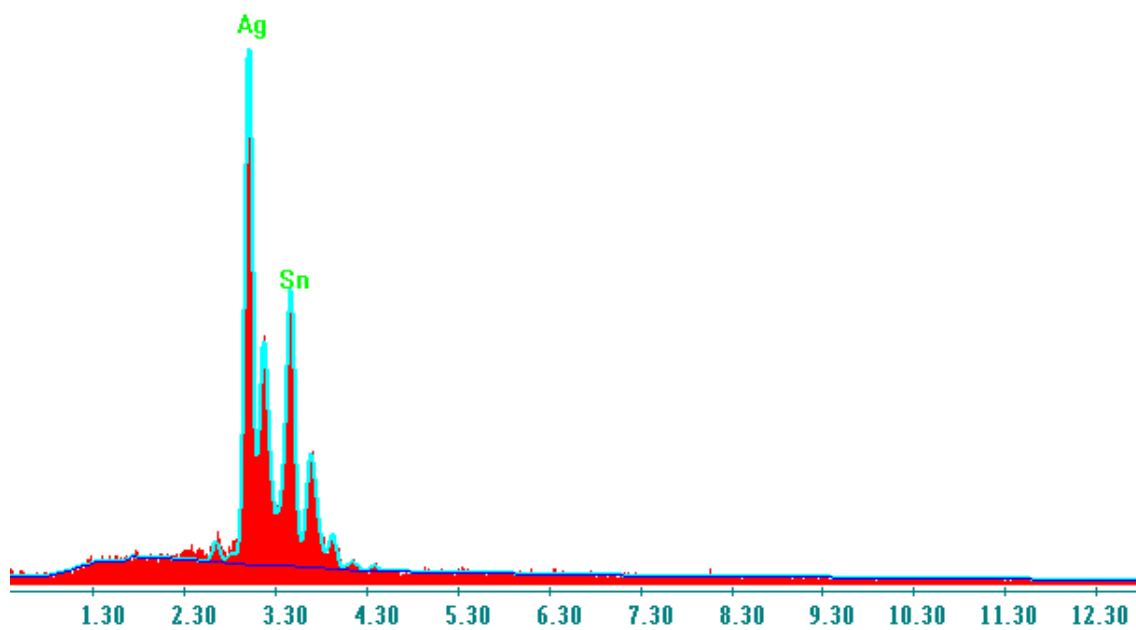
Obrázek 69: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SAC-150-32-3



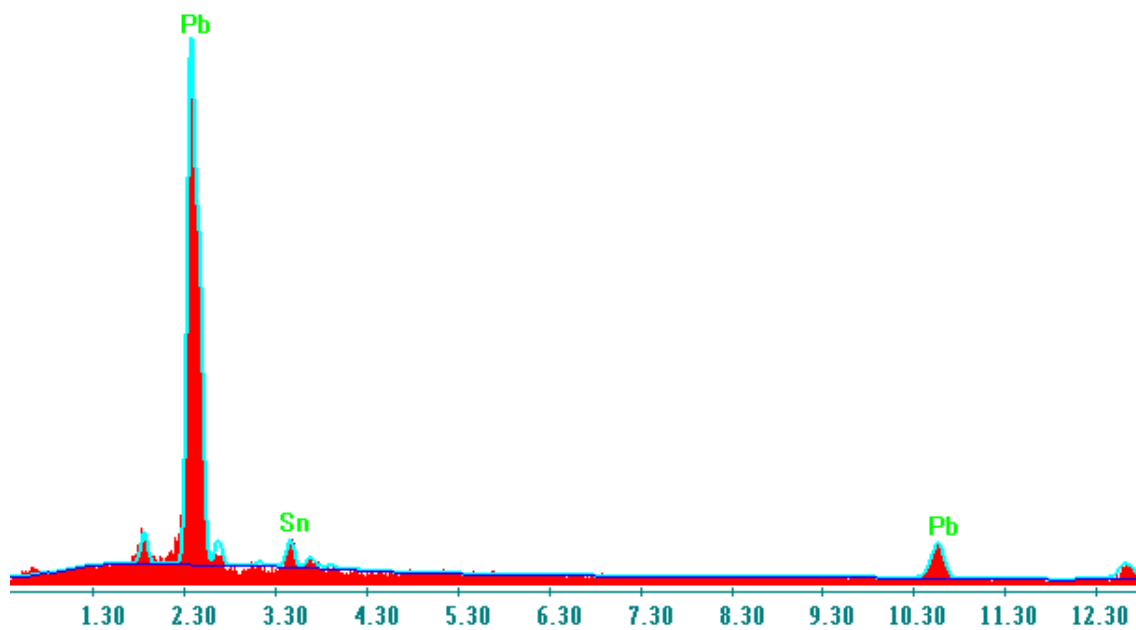
Obrázek 70: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SnPb-150-32-1



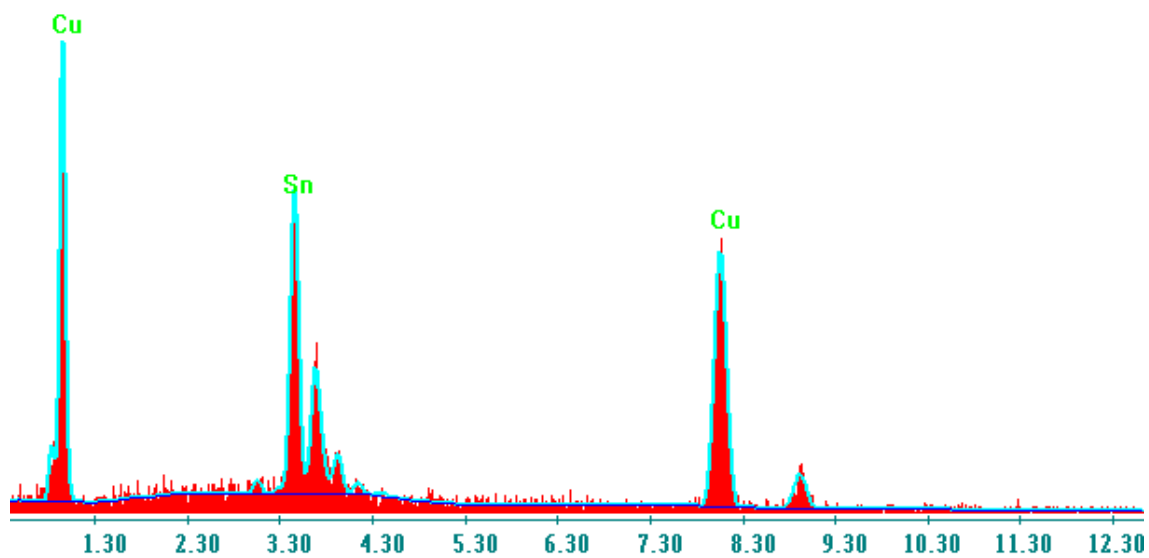
Obrázek 71: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SnPb-150-32-2



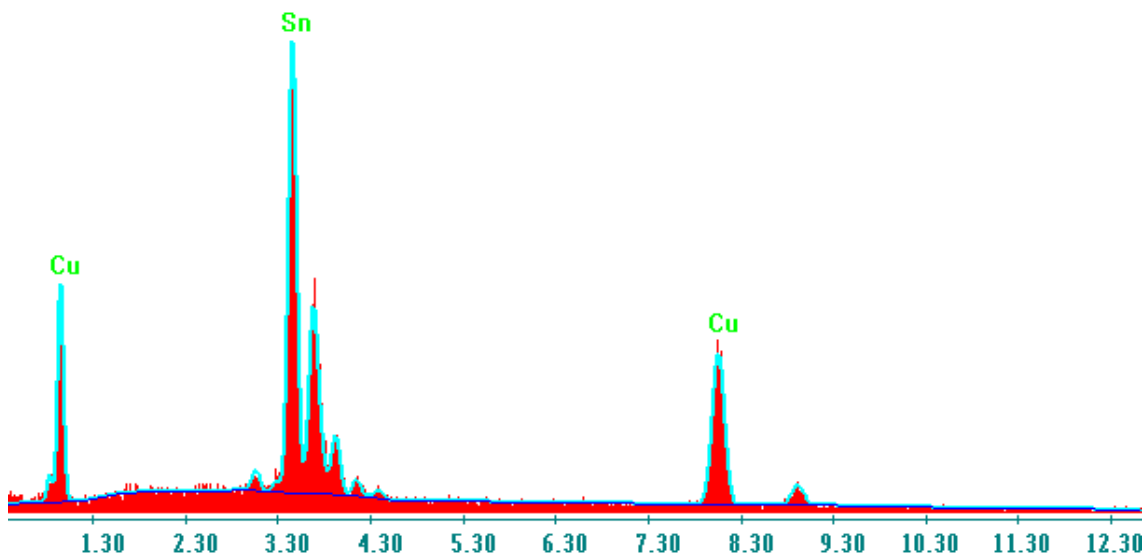
Obrázek 72: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SnPb-150-32-3



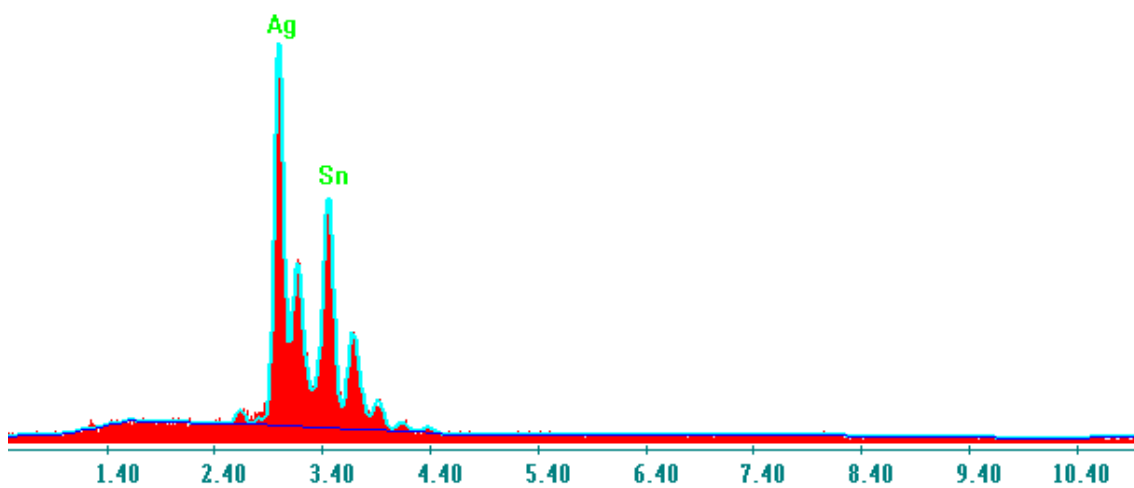
Obrázek 73: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SnPb-150-32-4



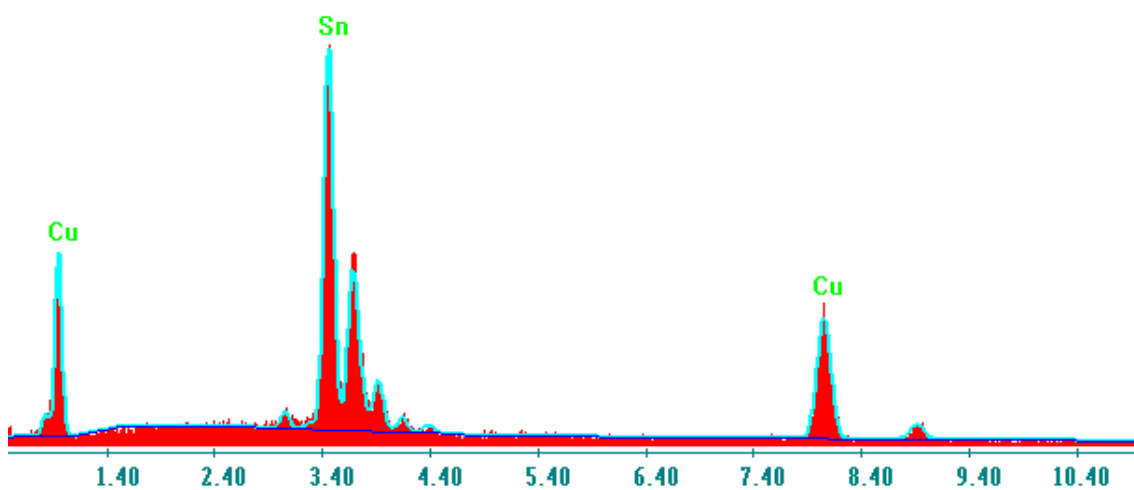
Obrázek 74: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SnAg-150-32-1



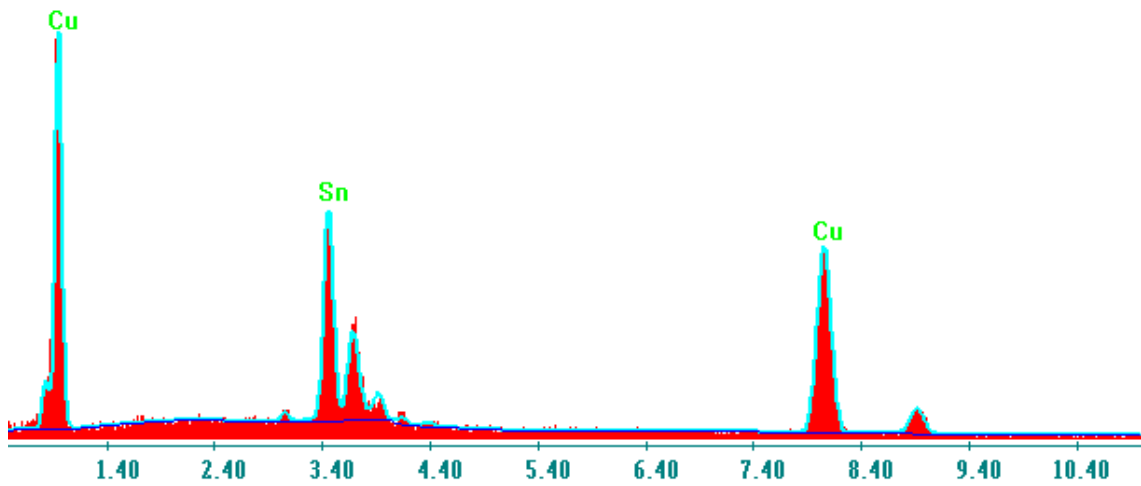
Obrázek 75: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SnAg-150-32-2



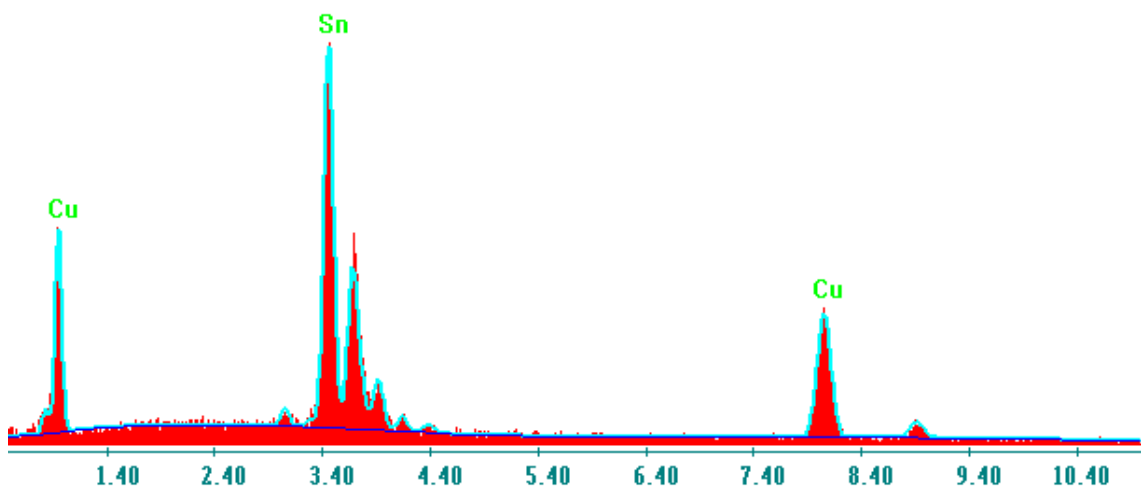
Obrázek 76: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SnAg-150-32-3



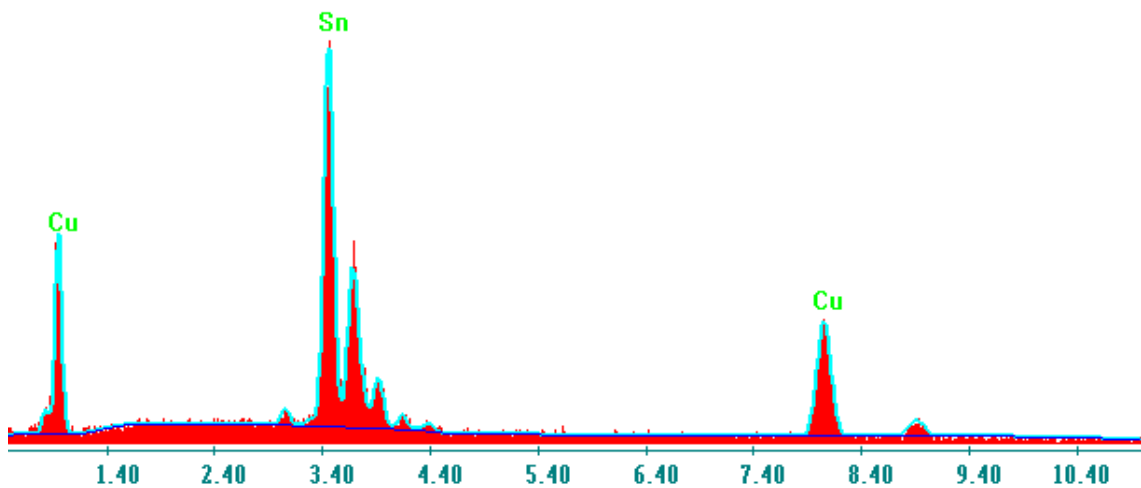
Obrázek 77: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SnAg-150-32-4



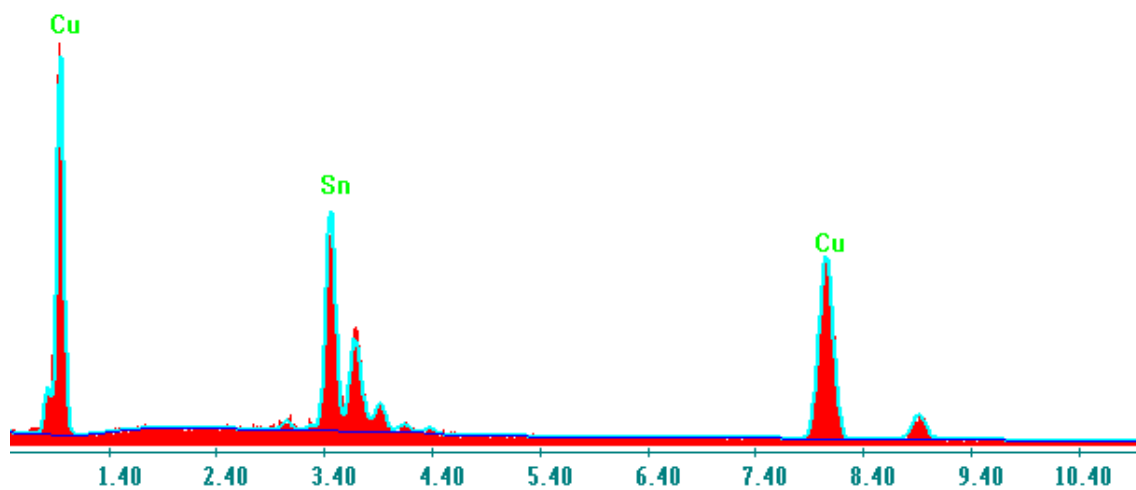
Obrázek 78: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SnCu-150-32-1



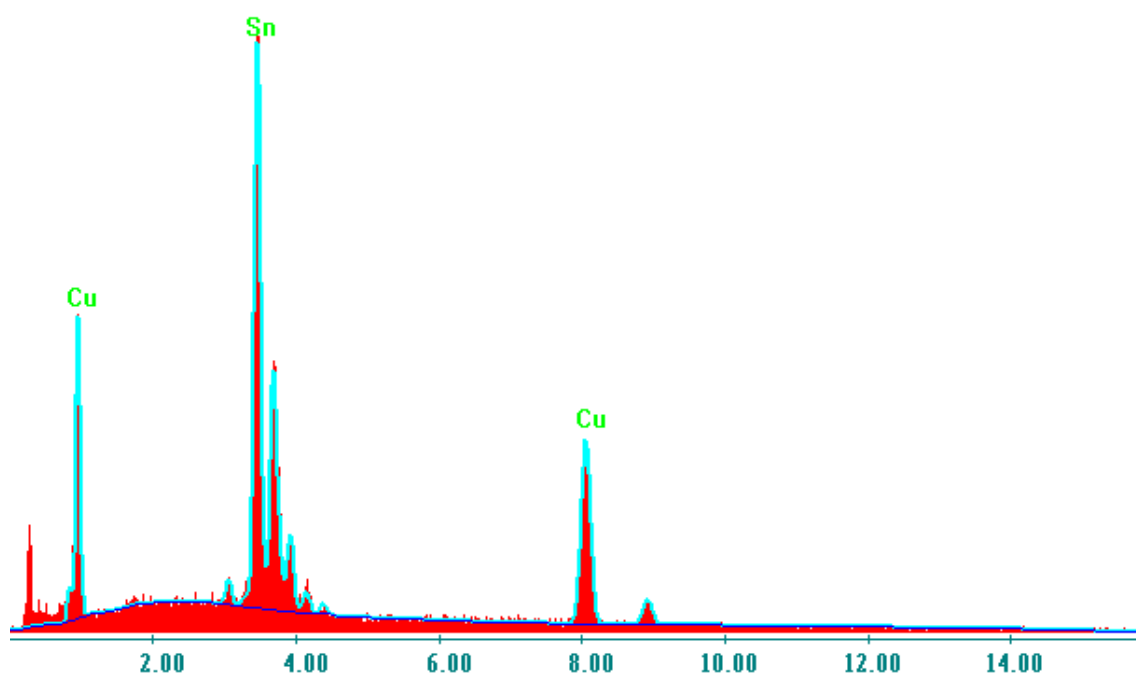
Obrázek 79: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SnCu-150-32-2



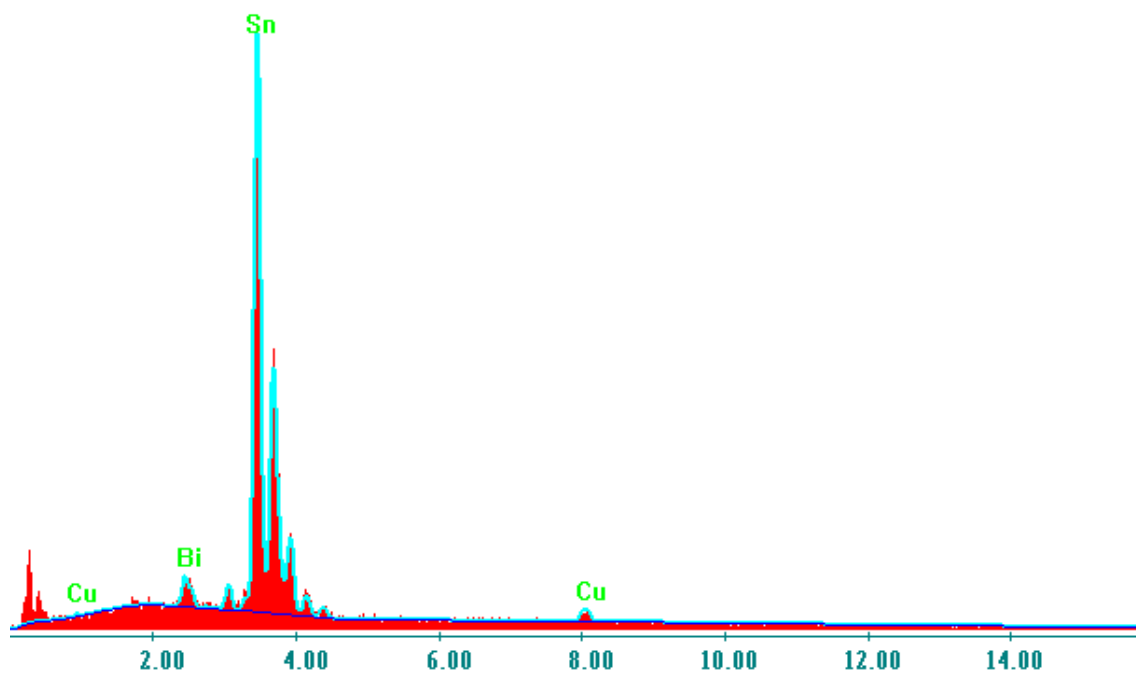
Obrázek 80: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-SnCu-150-32-3



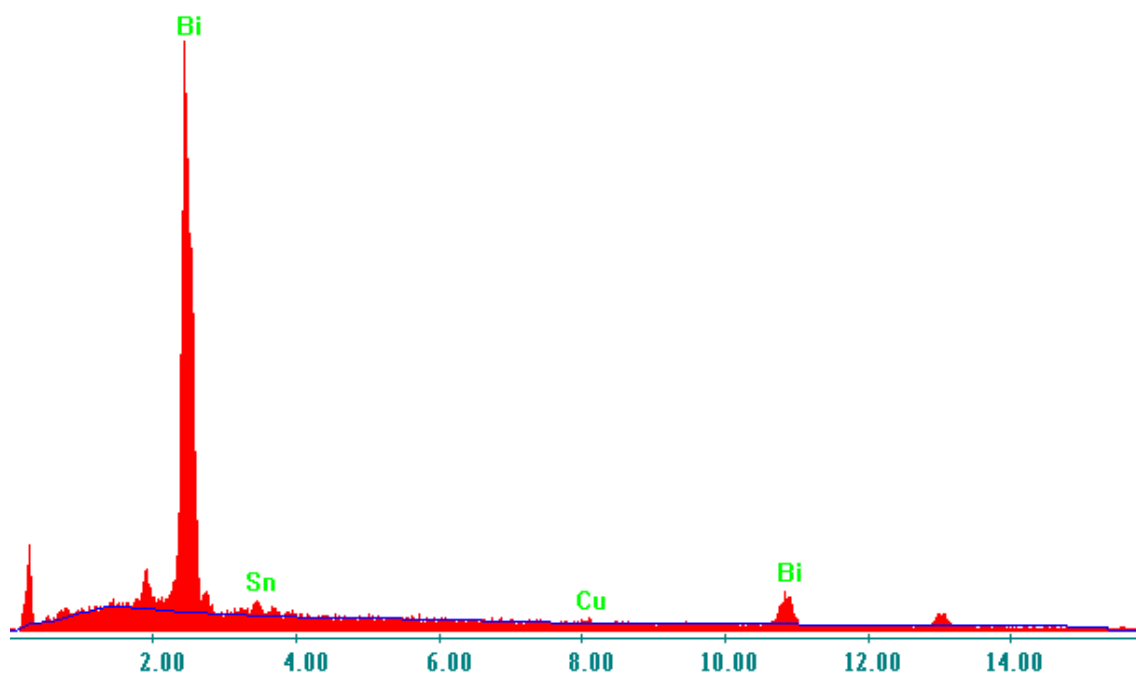
Obrázek 81: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-BiSn-150-32-1



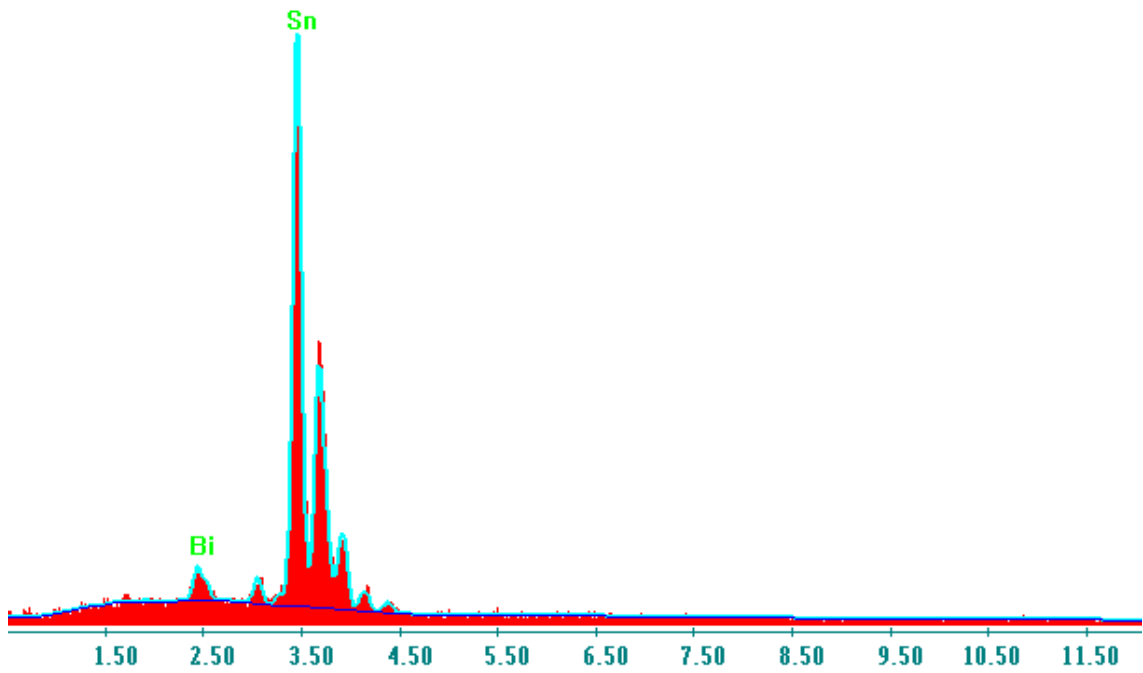
Obrázek 82: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-BiSn-150-32-2



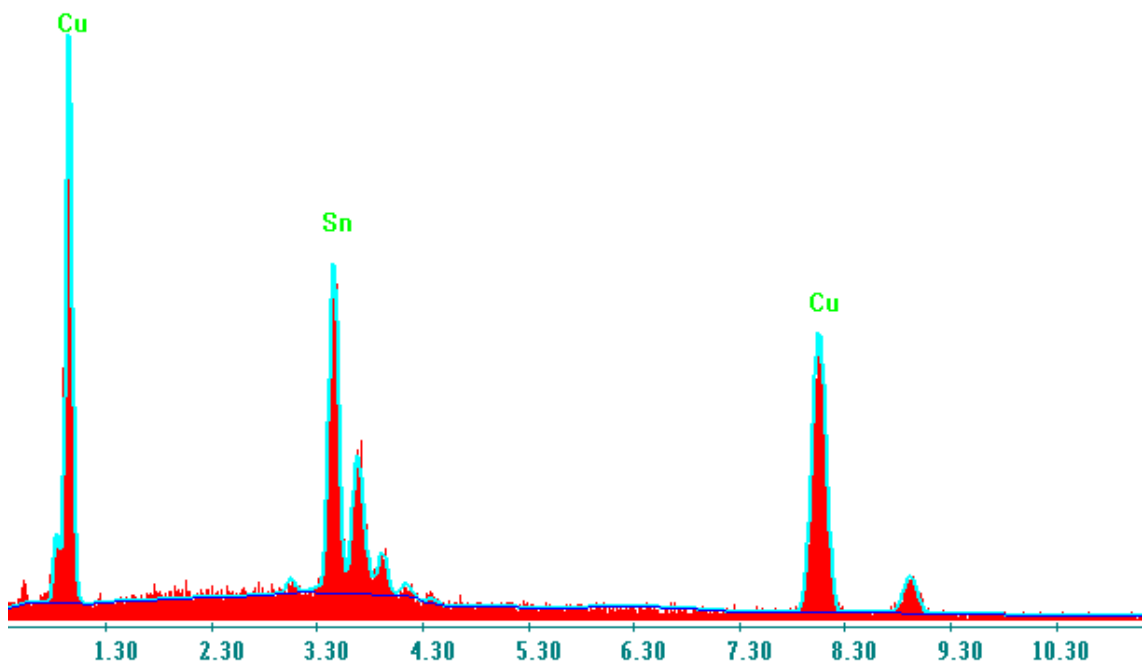
Obrázek 83: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-BiSn-150-32-3



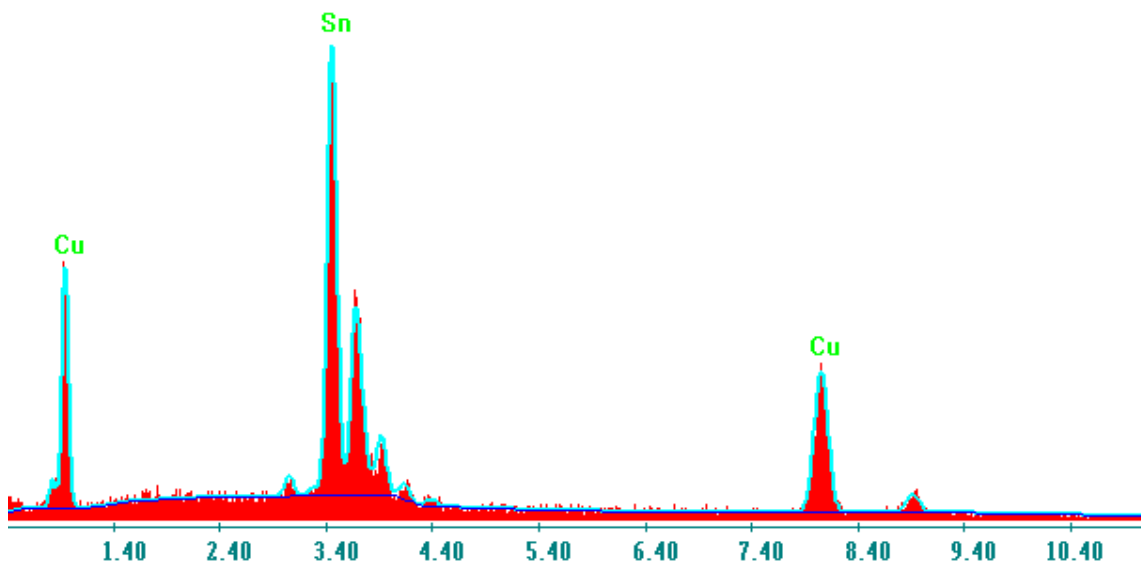
Obrázek 84: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-BiSn-150-32-4



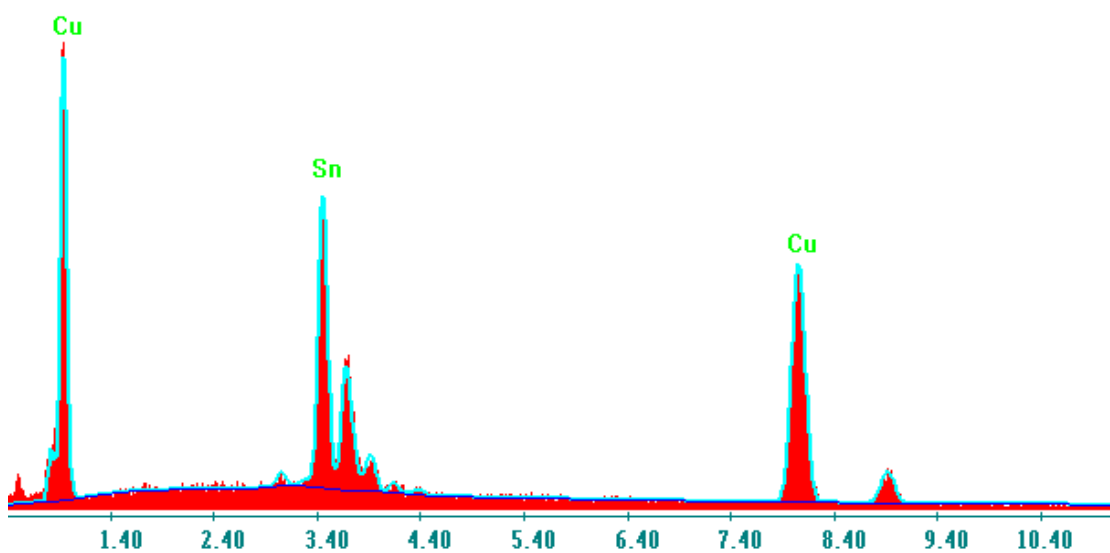
Obrázek 85: EDX spektrum testovaného vzorku Cu-BiSn-150-32-5



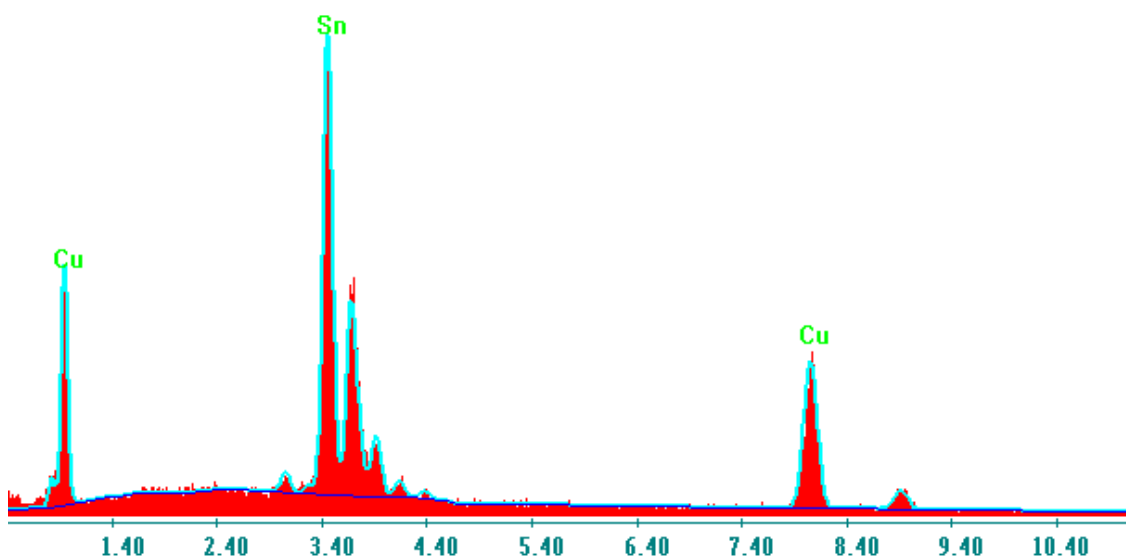
Obrázek 86: EDX spektrum testovaného vzorku Sn_galv-SAC-150-32-1



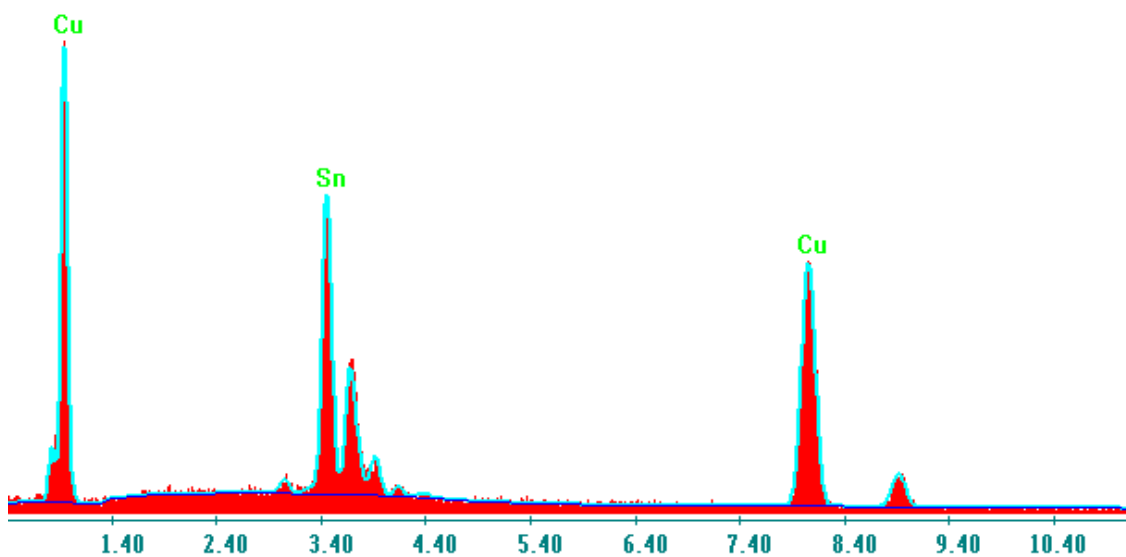
Obrázek 87: EDX spektrum testovaného vzorku Sn_galv-SAC-150-32-2



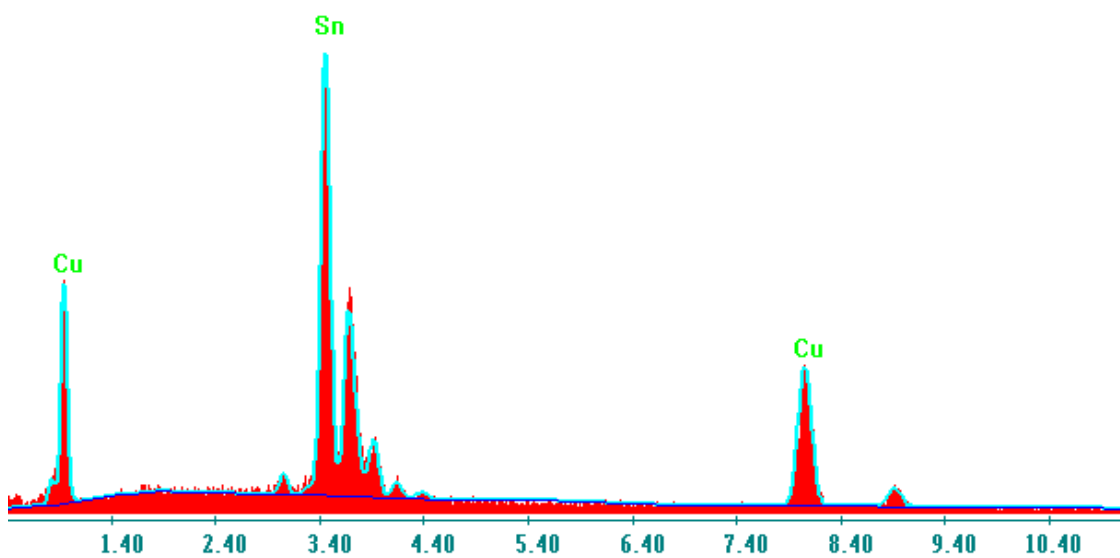
Obrázek 88: EDX spektrum testovaného vzorku Sn_galv-SnPb-150-32-1



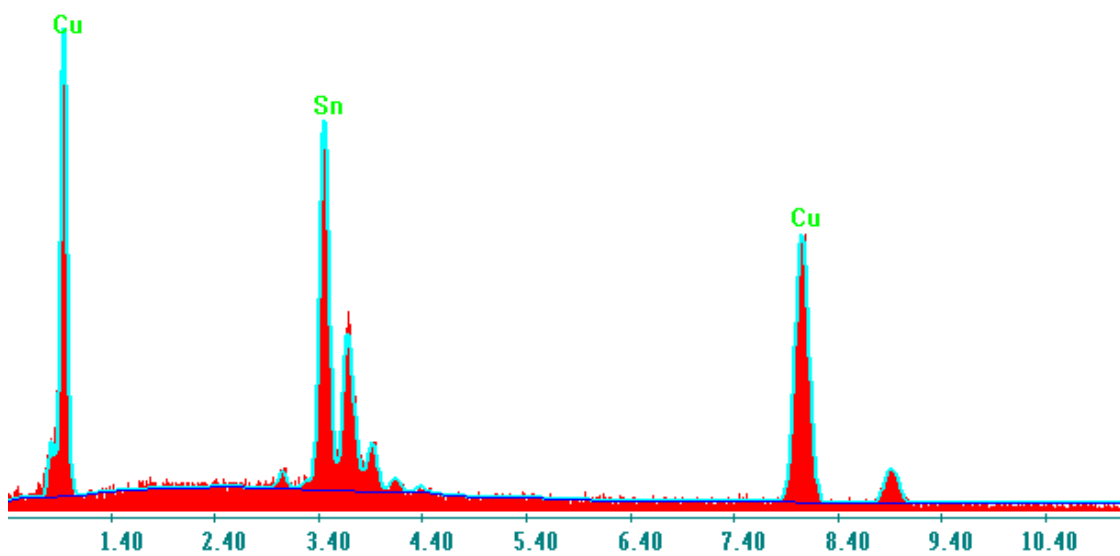
Obrázek 89: EDX spektrum testovaného vzorku Sn_galv-SnPb-150-32-2



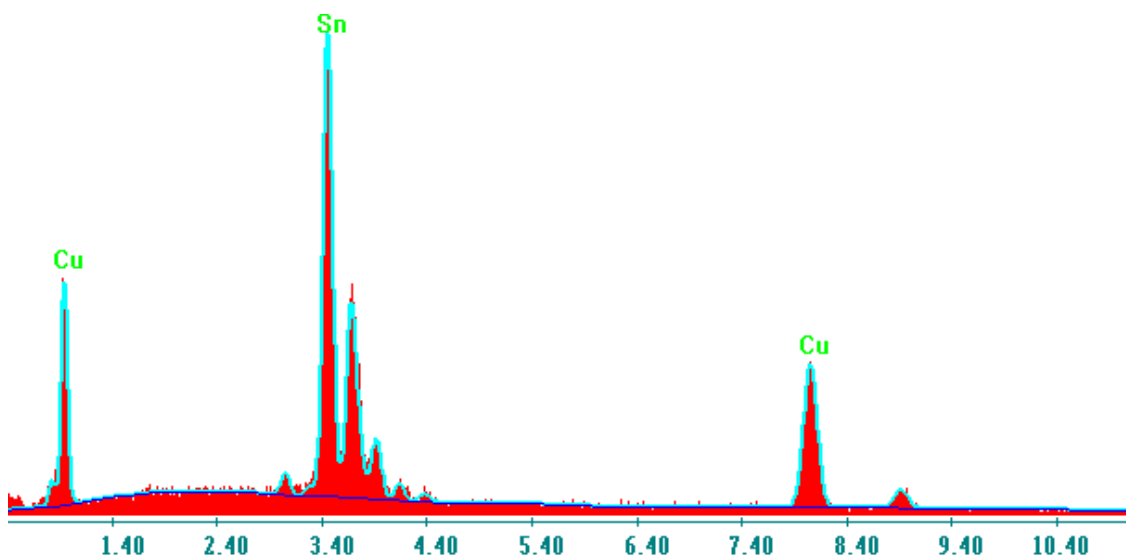
Obrázek 90: EDX spektrum testovaného vzorku Sn_galv-SnAg-150-32-1



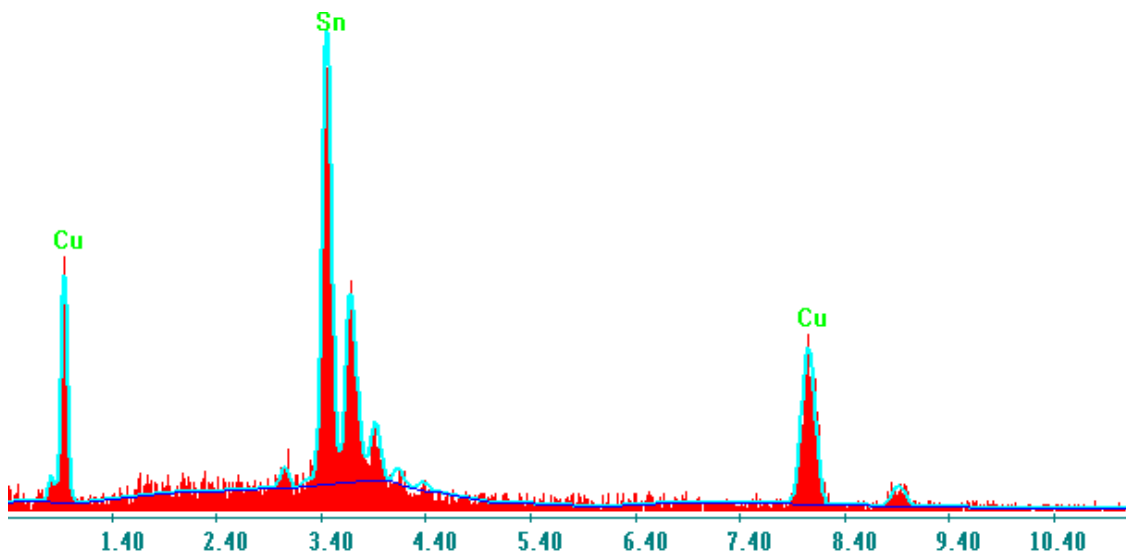
Obrázek 91: EDX spektrum testovaného vzorku Sn_galv-SnAg-150-32-2



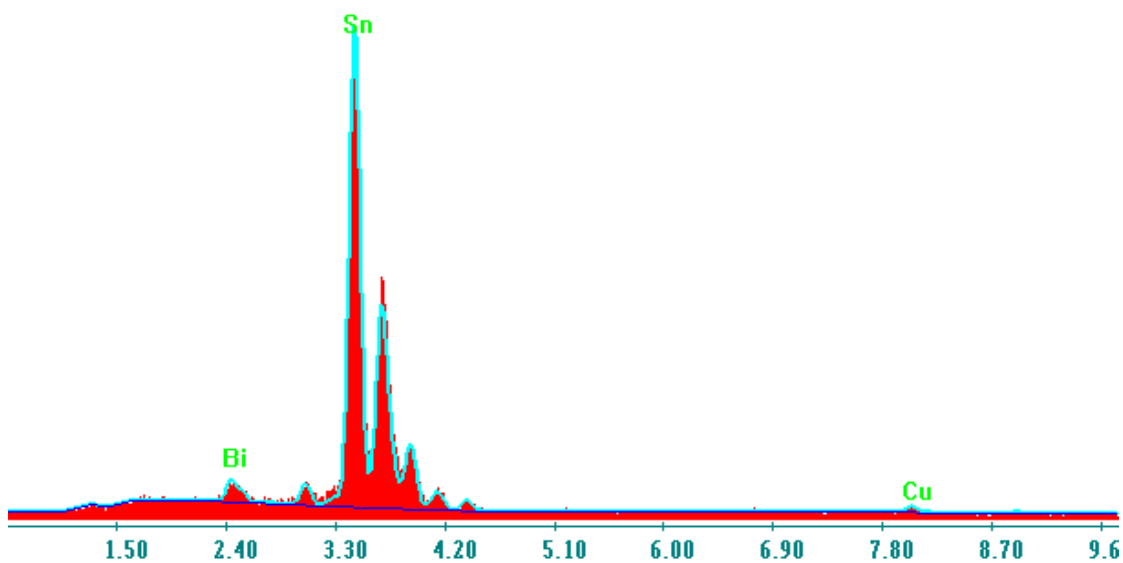
Obrázek 92: EDX spektrum testovaného vzorku Sn_galv-SnCu-150-32-1



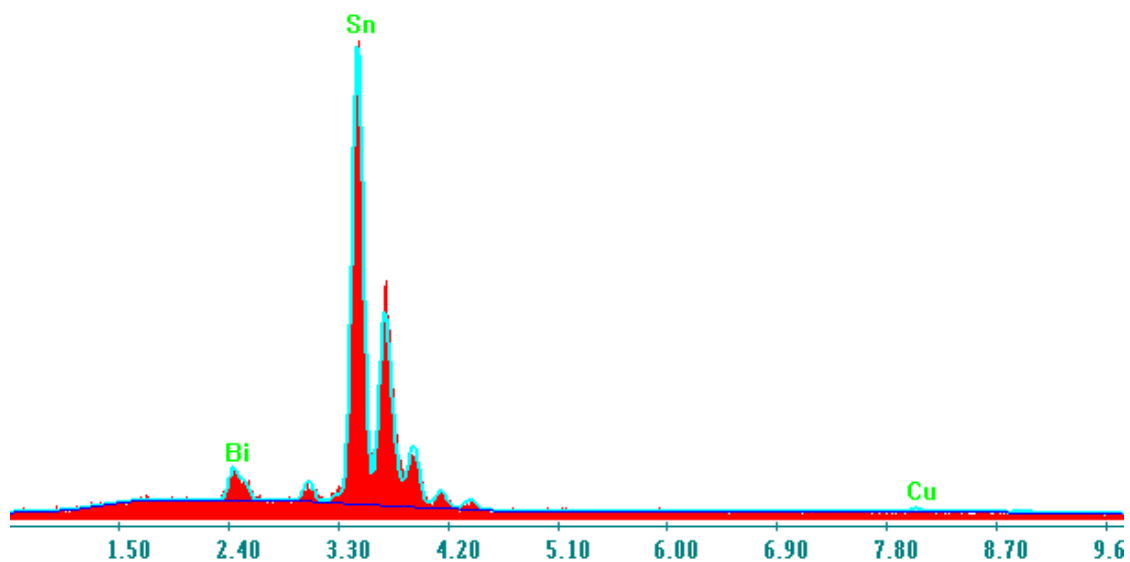
Obrázek 93: EDX spektrum testovaného vzorku Sn_galv-SnCu-150-32-2



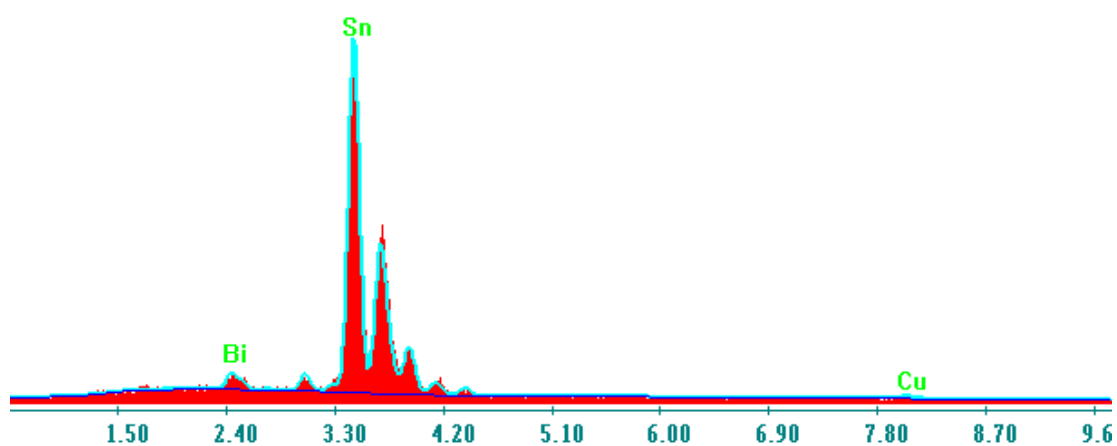
Obrázek 94: EDX spektrum testovaného vzorku Sn_galv-BiSn-150-32-1



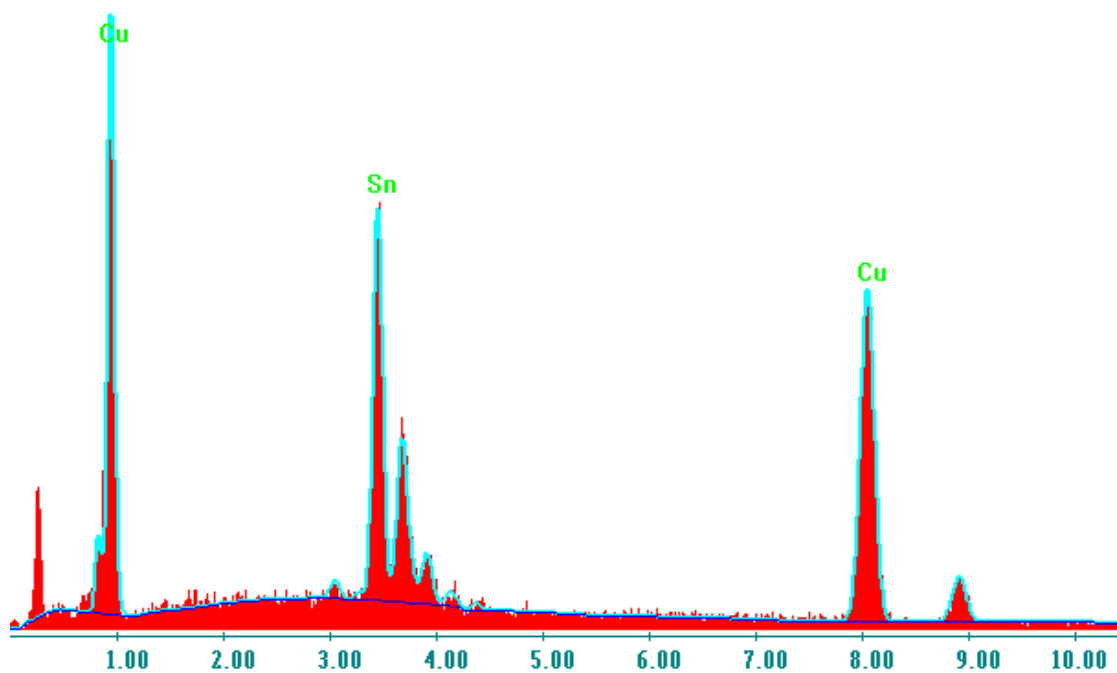
Obrázek 95: EDX spektrum testovaného vzorku Sn_galv-BiSn-150-32-2



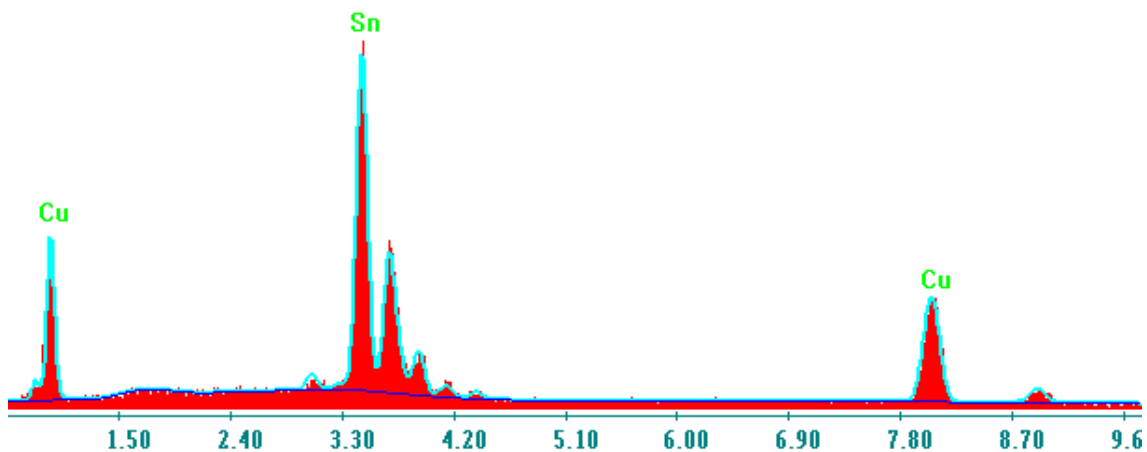
Obrázek 96: EDX spektrum testovaného vzorku Sn_galv-BiSn-150-32-3



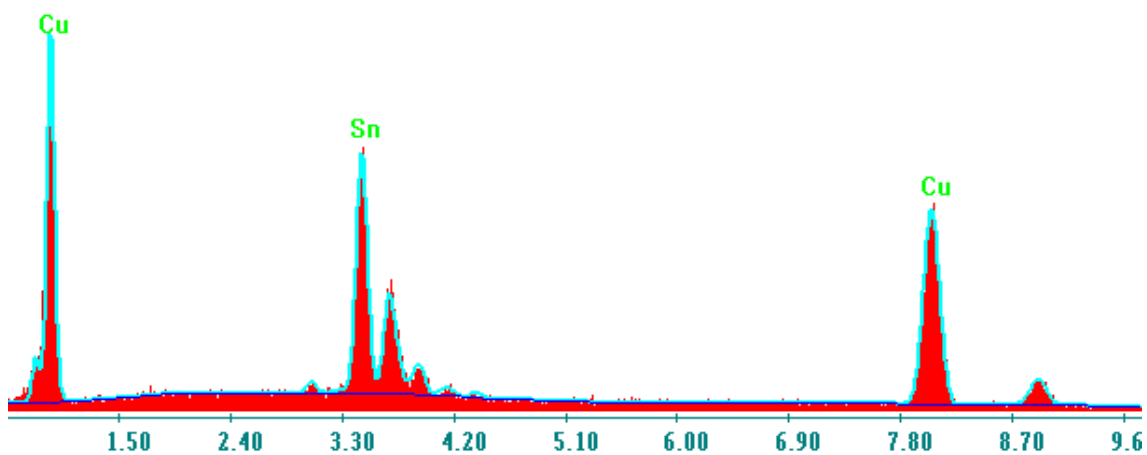
Obrázek 97: EDX spektrum testovaného vzorku Sn_galv-BiSn-150-32-4



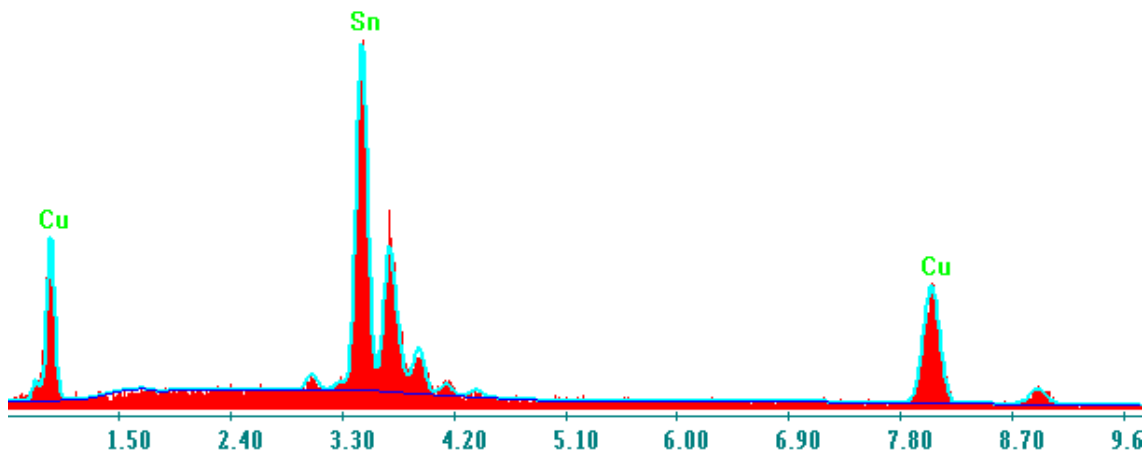
Obrázek 98: EDX spektrum testovaného vzorku OSP-SAC-150-32-1



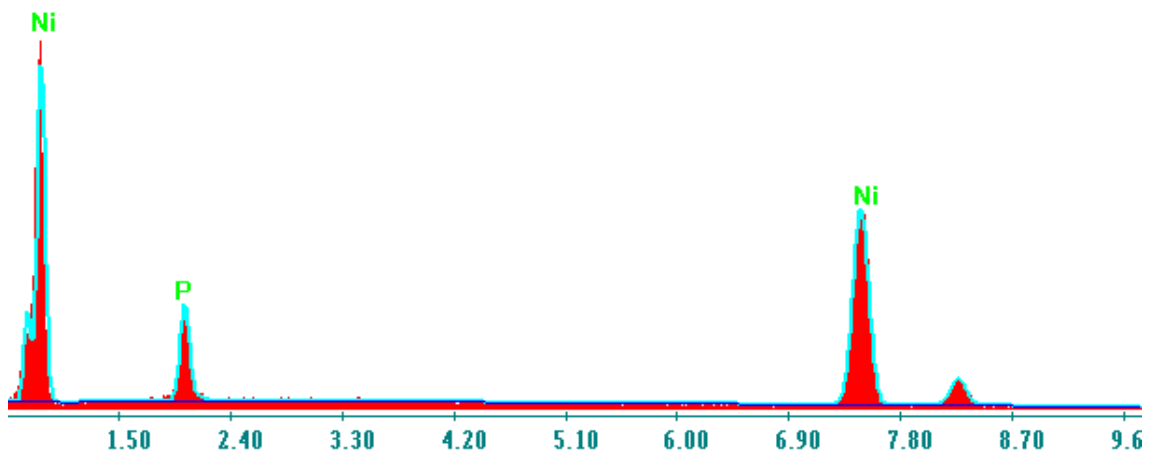
Obrázek 99: EDX spektrum testovaného vzorku OSP-SAC-150-32-2



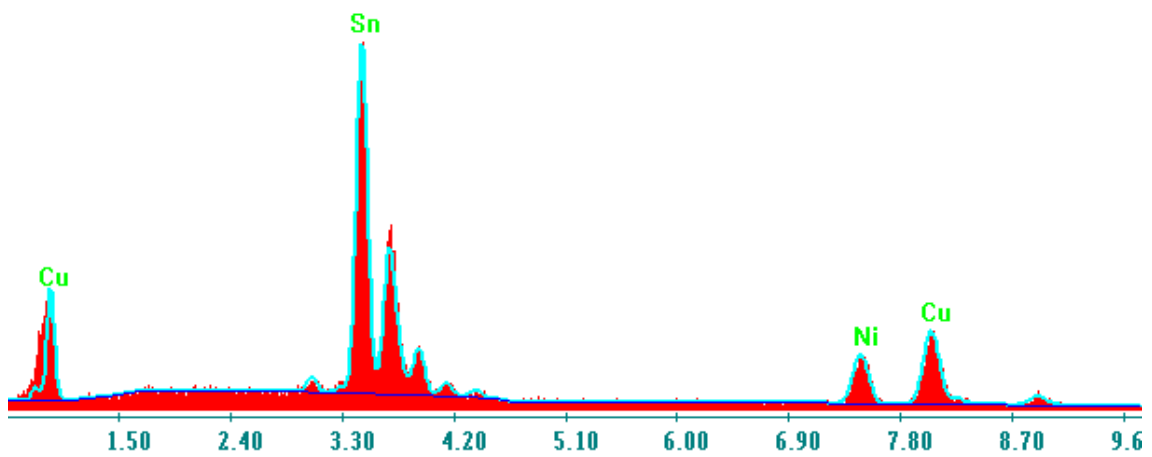
Obrázek 100: EDX spektrum testovaného vzorku OSP-SnPb-150-32-1



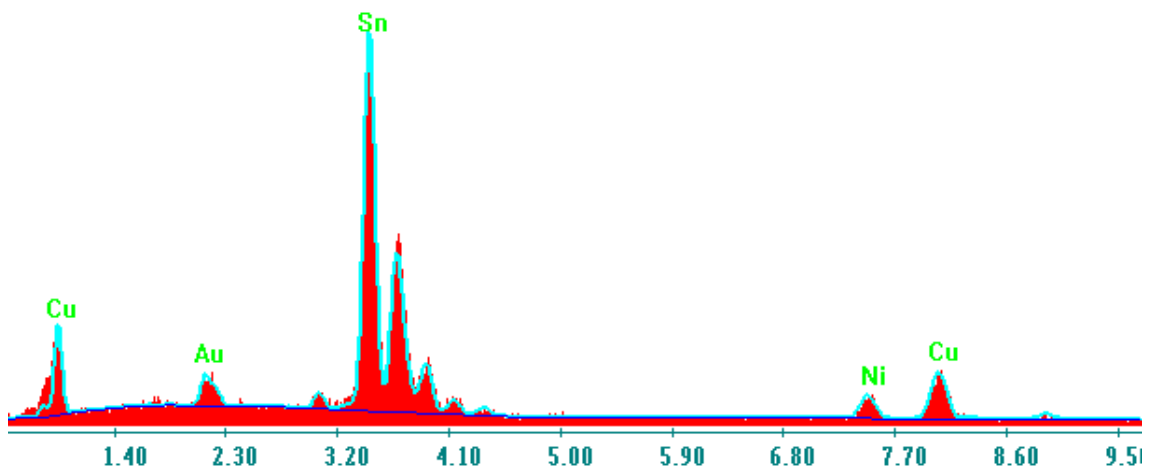
Obrázek 101: EDX spektrum testovaného vzorku OSP-SnPb-150-32-2



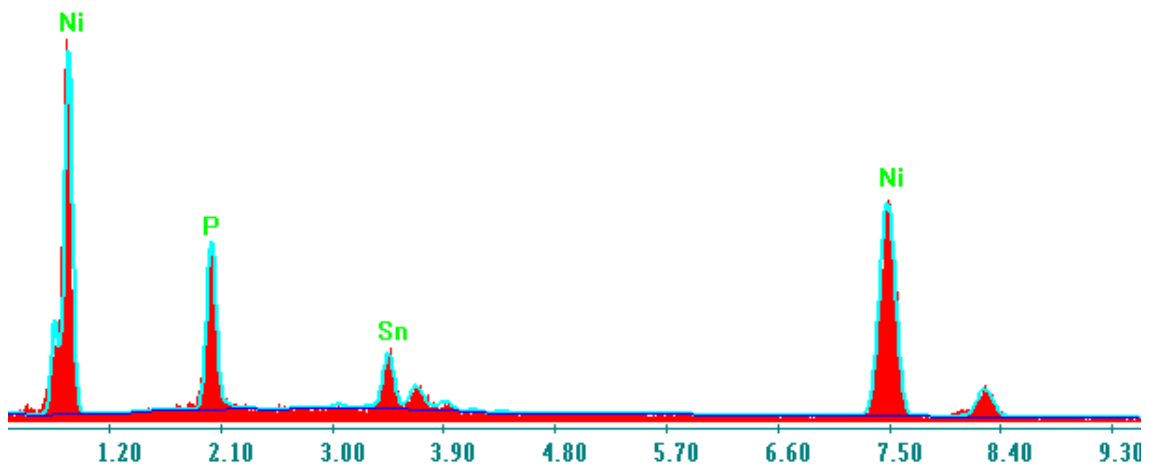
Obrázek 102: EDX spektrum testovaného vzorku ENIG-SAC-150-32-1



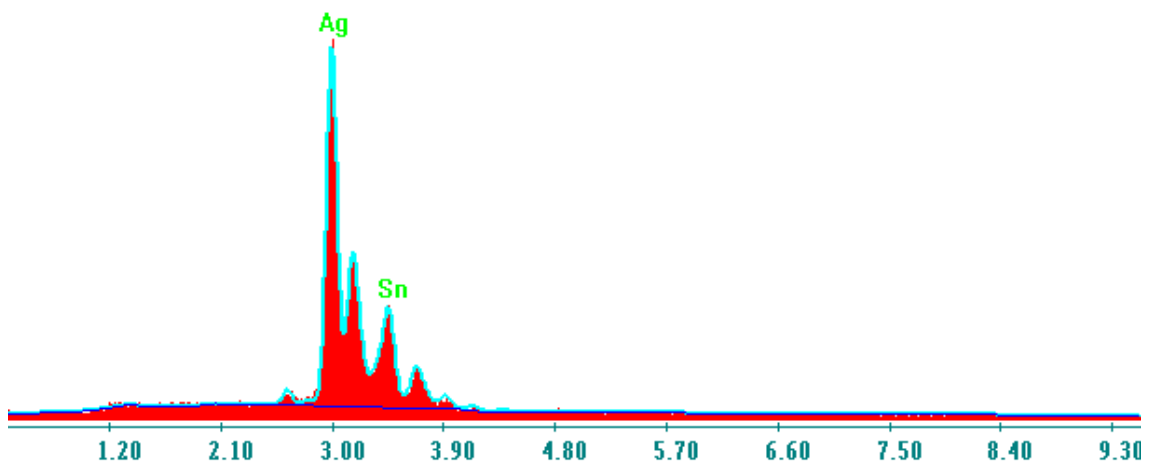
Obrázek 103: EDX spektrum testovaného vzorku ENIG-SAC-150-32-2



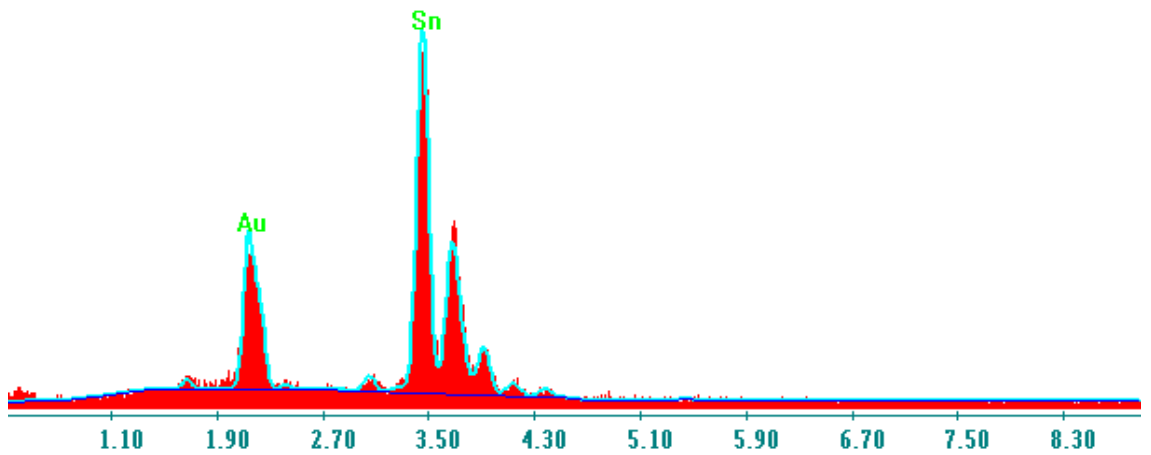
Obrázek 104: EDX spektrum testovaného vzorku ENIG-SAC-150-32-3



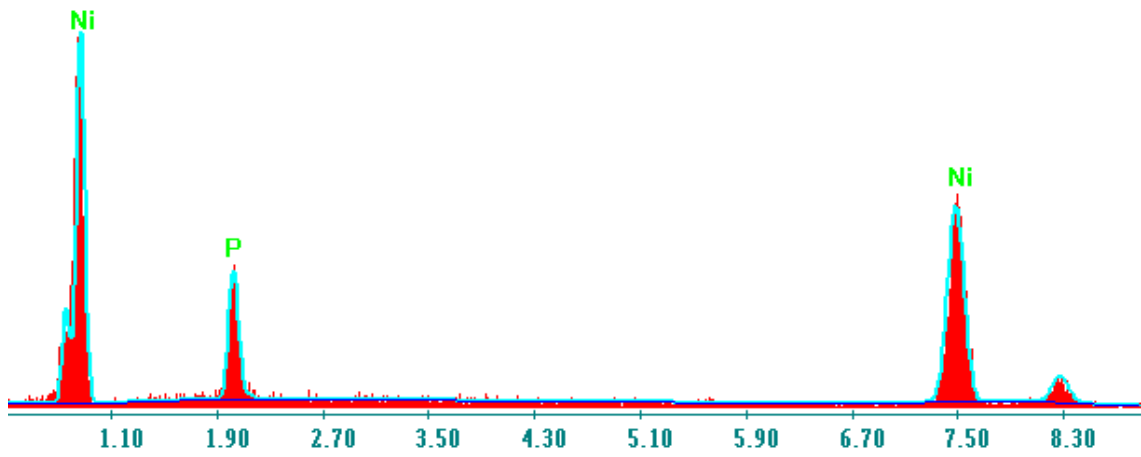
Obrázek 105: EDX spektrum testovaného vzorku ENIG-SAC-150-32-4



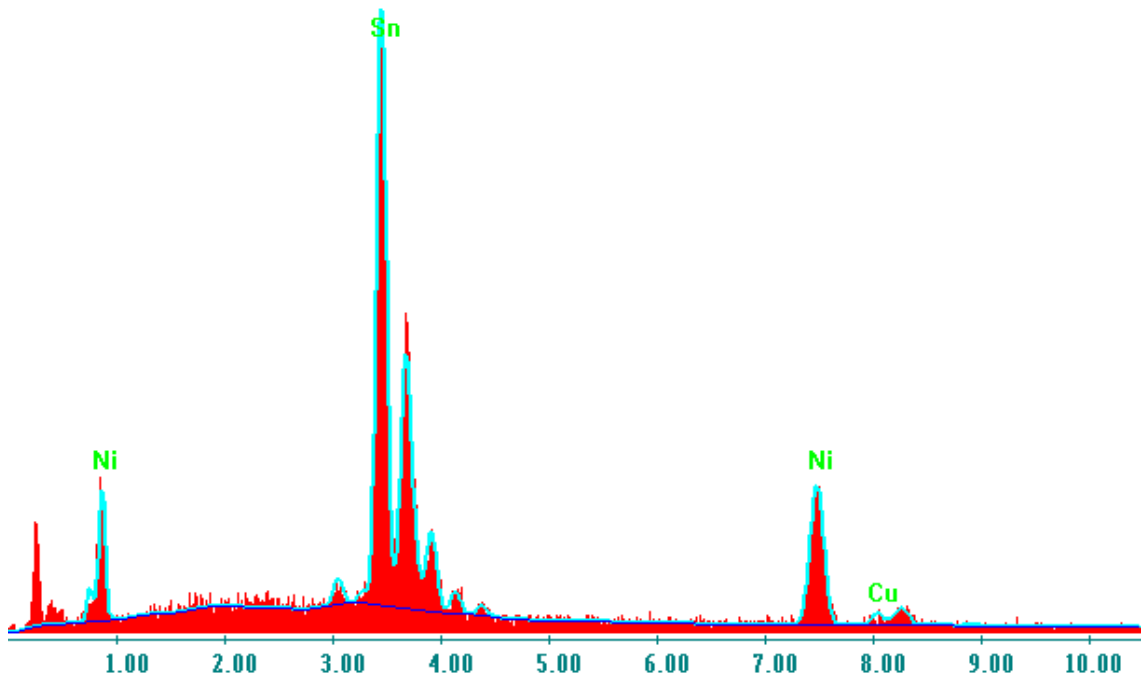
Obrázek 106: EDX spektrum testovaného vzorku ENIG-SAC-150-32-5



Obrázek 107: EDX spektrum testovaného vzorku ENIG-SAC-150-32-6



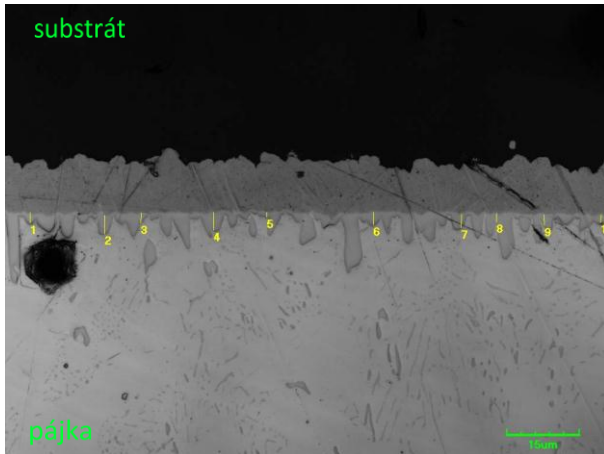
Obrázek 108: EDX spektrum testovaného vzorku ENIG-SnPb-150-32-1



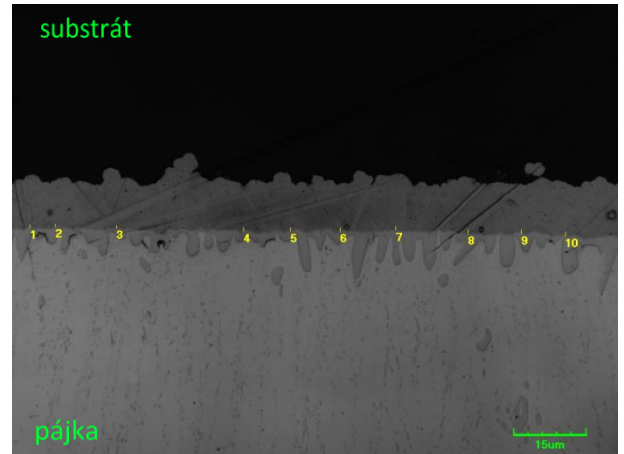
Obrázek 109: EDX spektrum testovaného vzorku ENIG-SnPb-150-32-2

Příloha B. Měření tloušťky intermetalických sloučenin

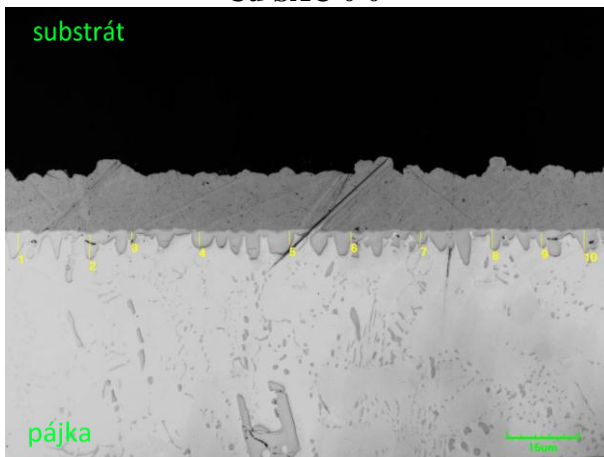
Značení vzorků představuje: povrchovou úpravu - pájecí pastu - teplotu zrychleného stárnutí - počet dnů zrychleného stárnutí. Např. Cu-SAC-0-0 je pájený spoj na měděném povrchu, pájecí pastou SAC a nestárnutý, Cu-SnPb-150-4 je pájený spoj na měděném povrchu, olovnatou pájecí pastou a stárnutý 4 dny při teplotě 150 °C.



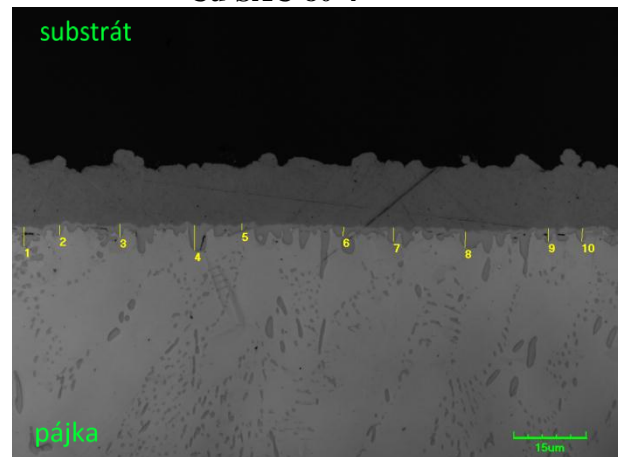
Obrázek 110: Řez testovaného vzorku Cu-SAC-0-0



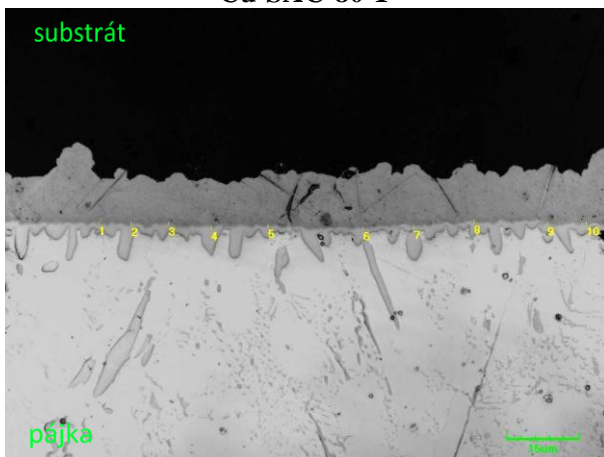
Obrázek 113: Řez testovaného vzorku Cu-SAC-80-4



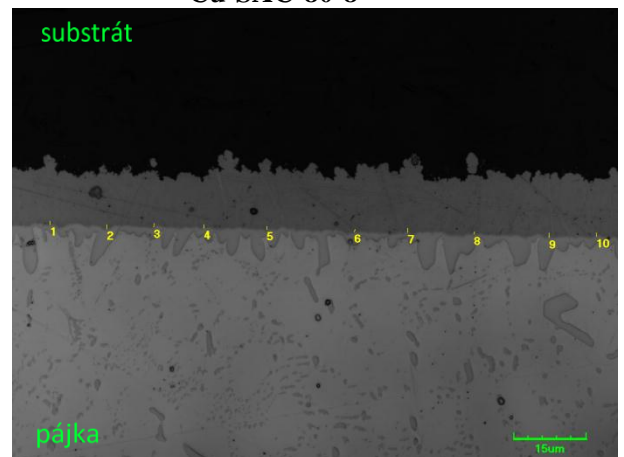
Obrázek 111: Řez testovaného vzorku Cu-SAC-80-1



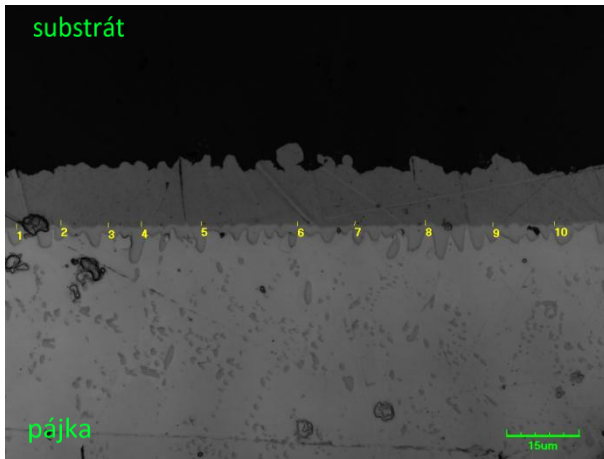
Obrázek 114: Řez testovaného vzorku Cu-SAC-80-8



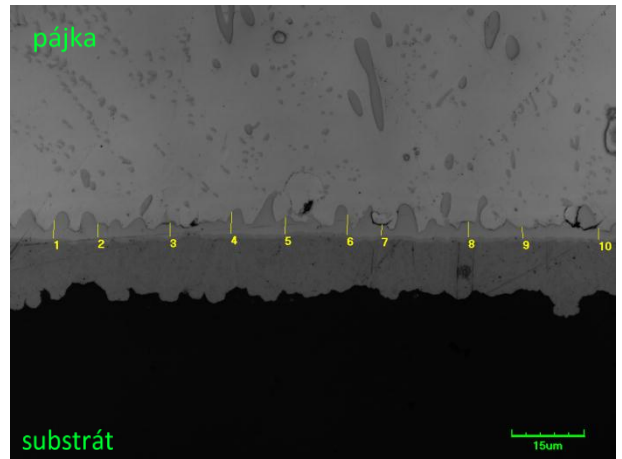
Obrázek 112: Řez testovaného vzorku Cu-SAC-80-2



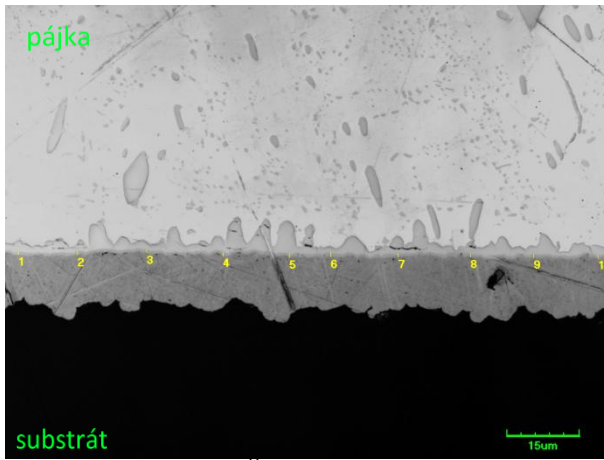
Obrázek 115: Řez testovaného vzorku Cu-SAC-80-16



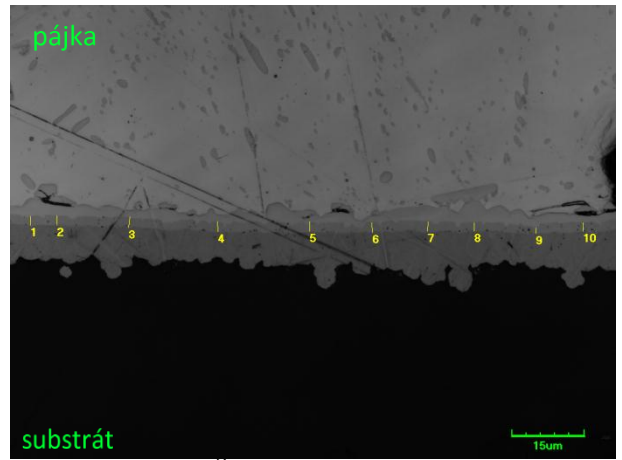
Obrázek 116: Řez testovaného vzorku
Cu-SAC-80-32



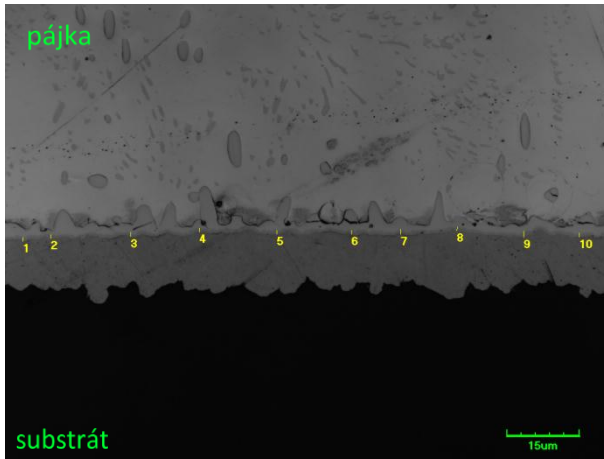
Obrázek 119: Řez testovaného vzorku
Cu-SAC-150-4



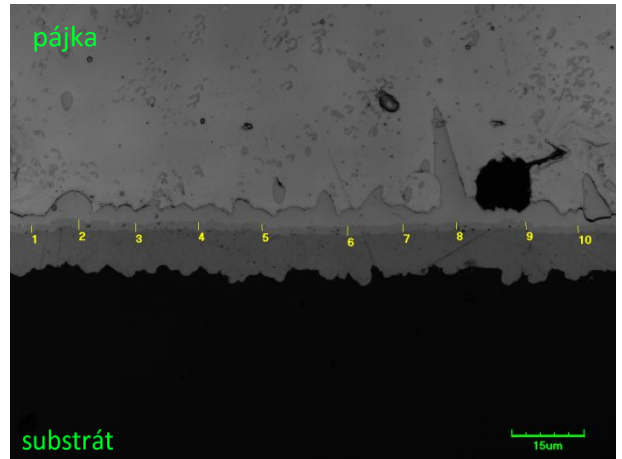
Obrázek 117: Řez testovaného vzorku
Cu-SAC-150-1



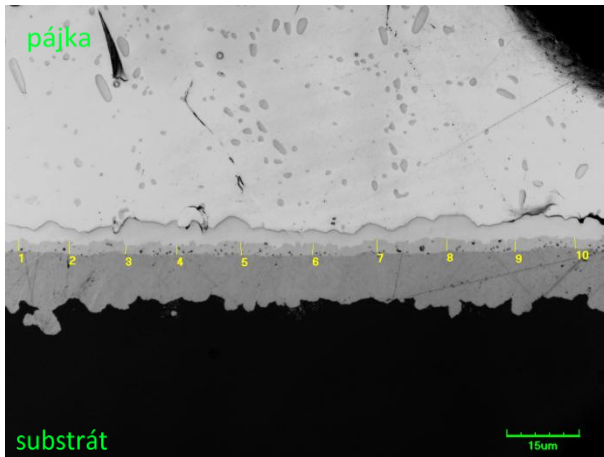
Obrázek 120: Řez testovaného vzorku
Cu-SAC-150-8



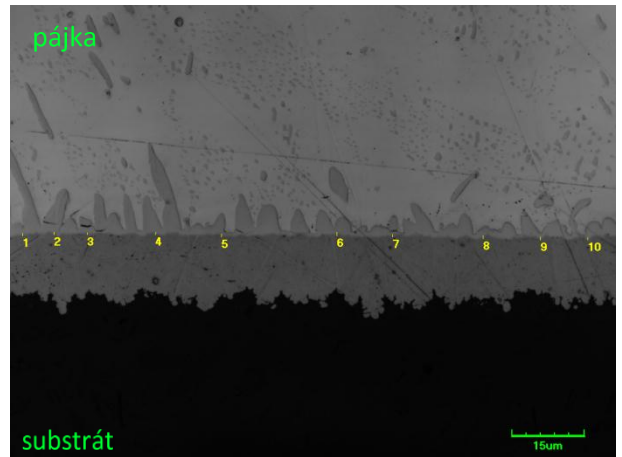
Obrázek 118: Řez testovaného vzorku
Cu-SAC-150-2



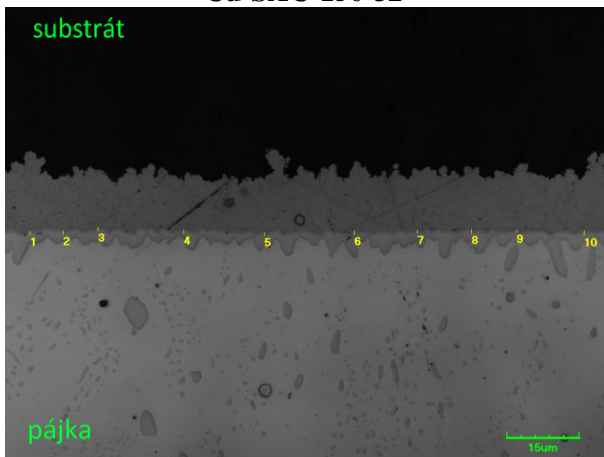
Obrázek 121: Řez testovaného vzorku
Cu-SAC-150-16



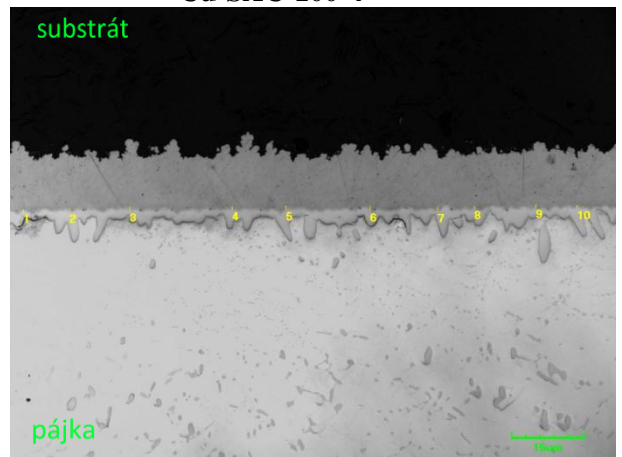
Obrázek 122: Řez testovaného vzorku
Cu-SAC-150-32



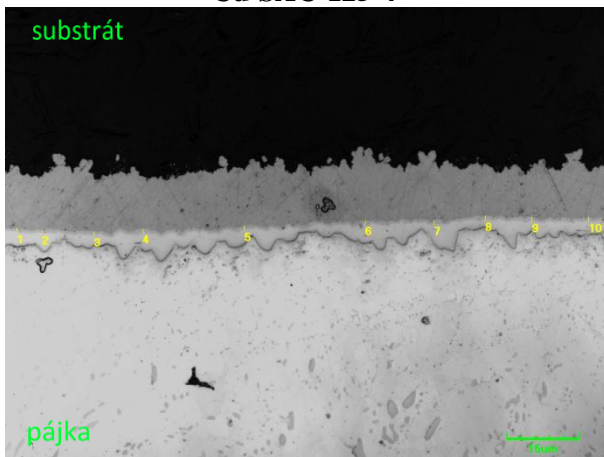
Obrázek 125: Řez testovaného vzorku
Cu-SAC-100-4



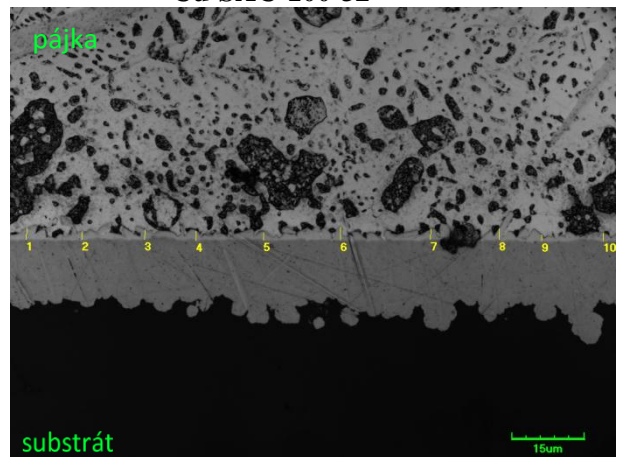
Obrázek 123: Řez testovaného vzorku
Cu-SAC-125-4



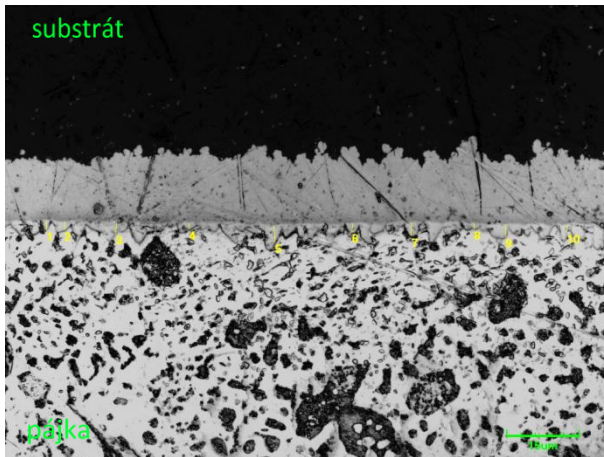
Obrázek 126: Řez testovaného vzorku
Cu-SAC-100-32



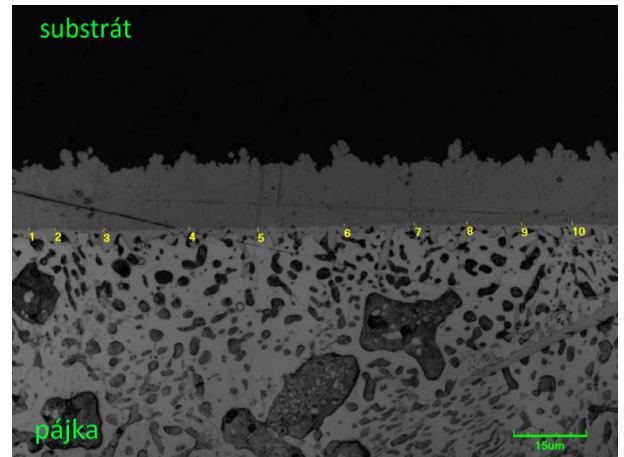
Obrázek 124: Řez testovaného vzorku
Cu-SAC-125-32



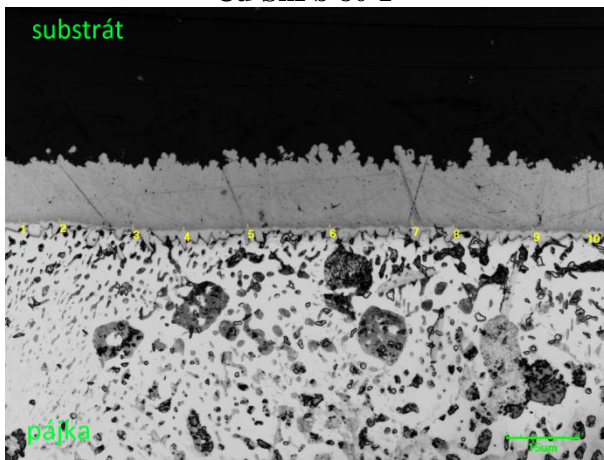
Obrázek 127: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-0-0



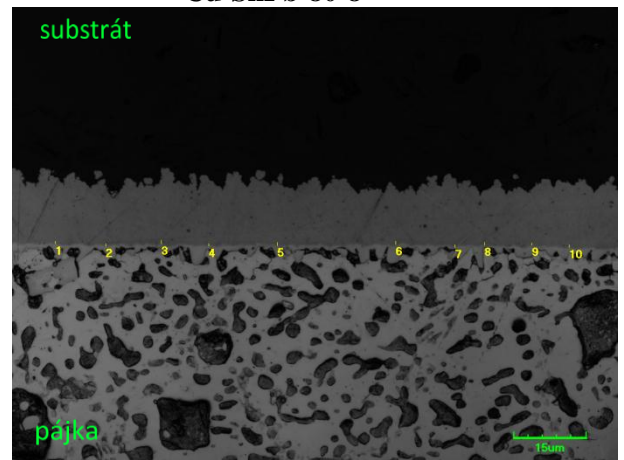
Obrázek 128: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-80-1



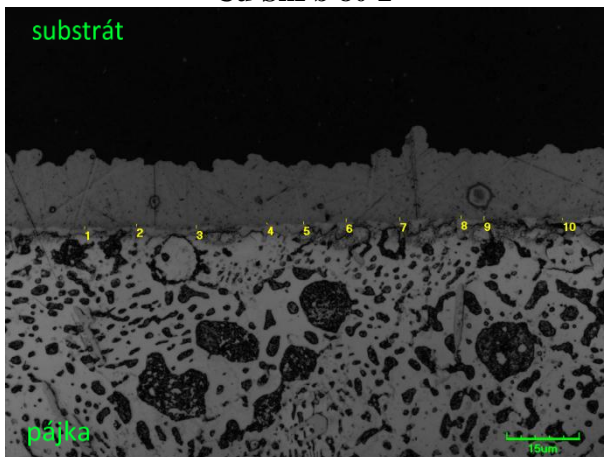
Obrázek 131: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-80-8



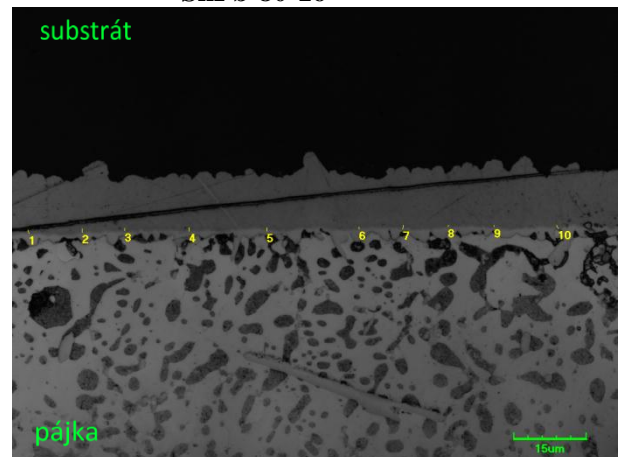
Obrázek 129: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-80-2



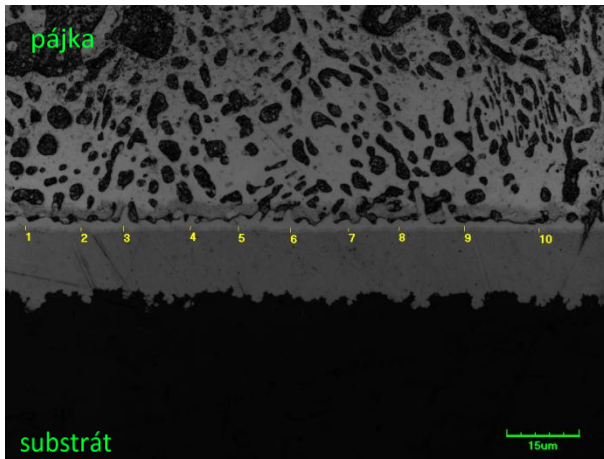
Obrázek 132: Řez testovaného vzorku Cu-
SnPb-80-16



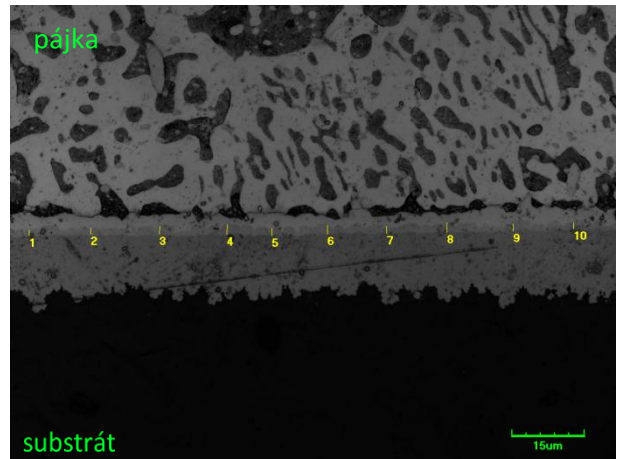
Obrázek 130: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-80-4



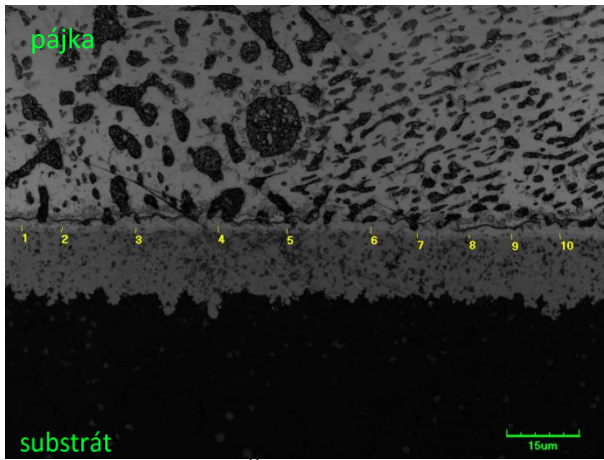
Obrázek 133: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-80-32



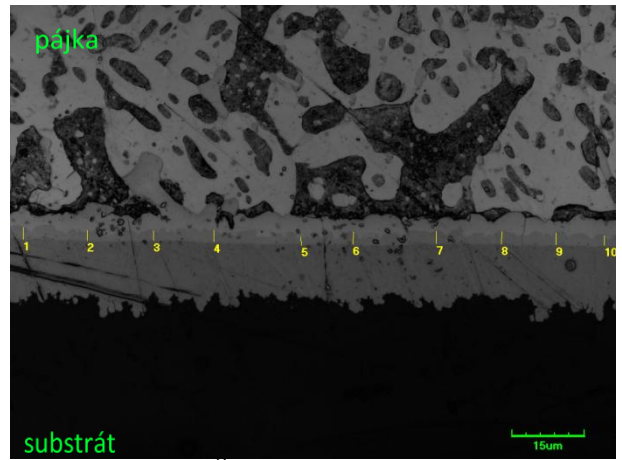
Obrázek 134: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-150-1



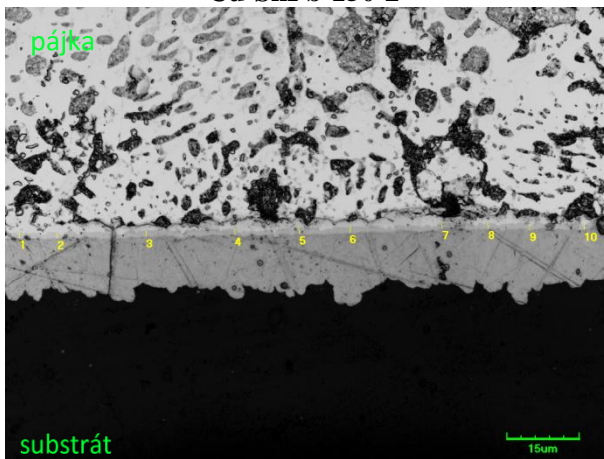
Obrázek 137: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-150-8



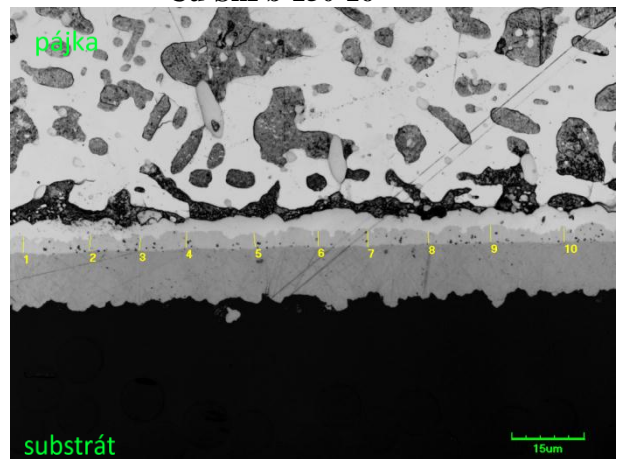
Obrázek 135: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-150-2



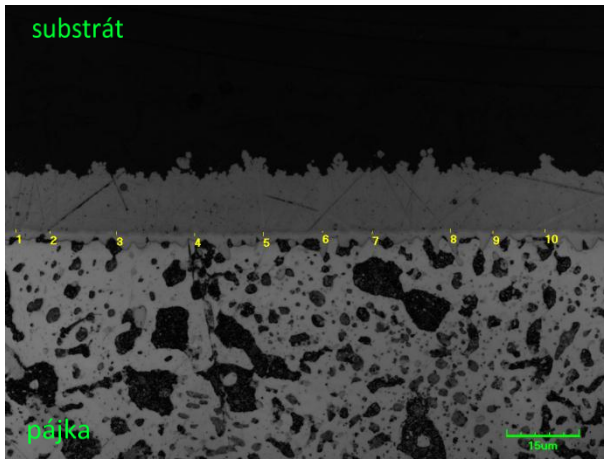
Obrázek 138: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-150-16



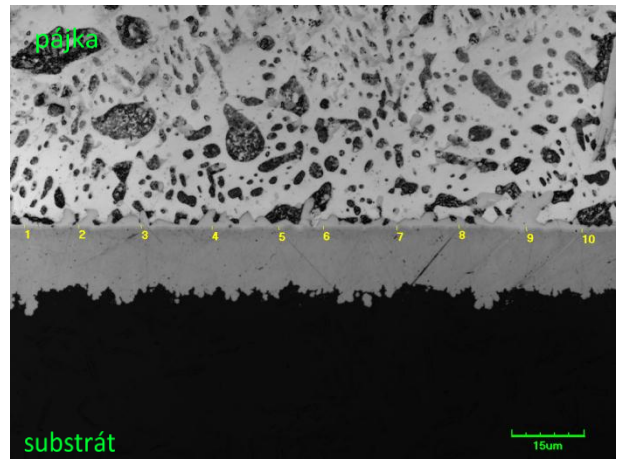
Obrázek 136: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-150-4



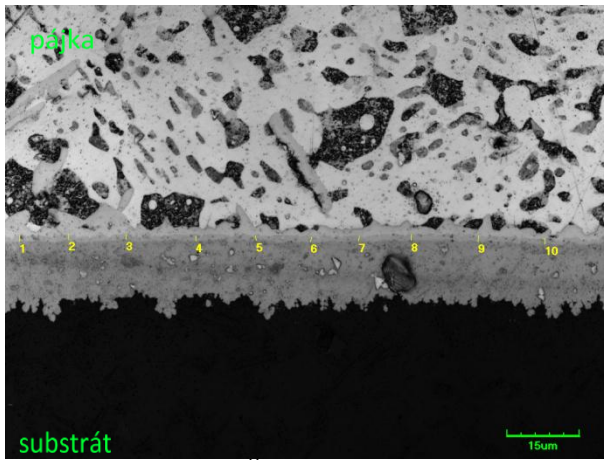
Obrázek 139: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-150-32



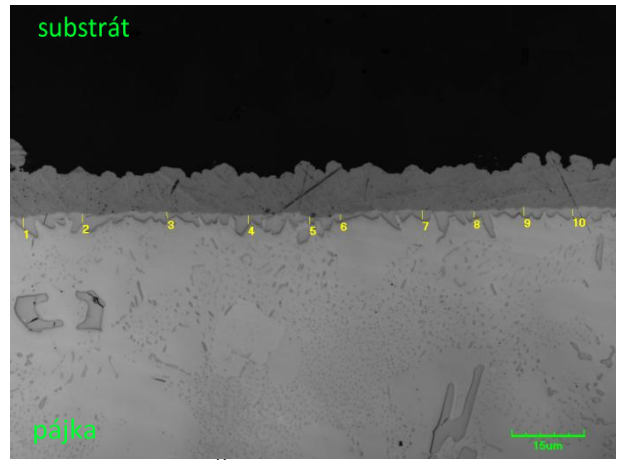
Obrázek 140: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-125-4



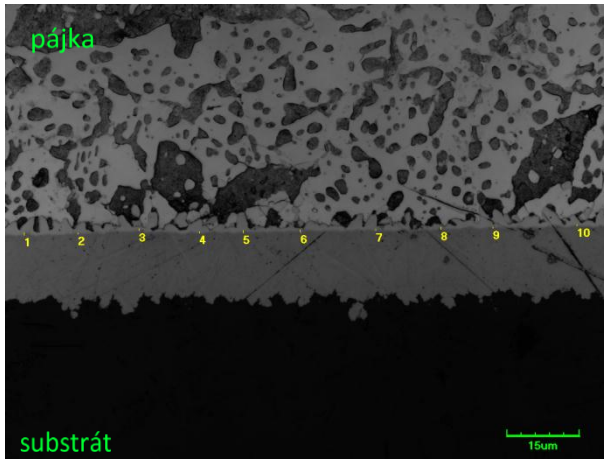
Obrázek 143: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-100-32



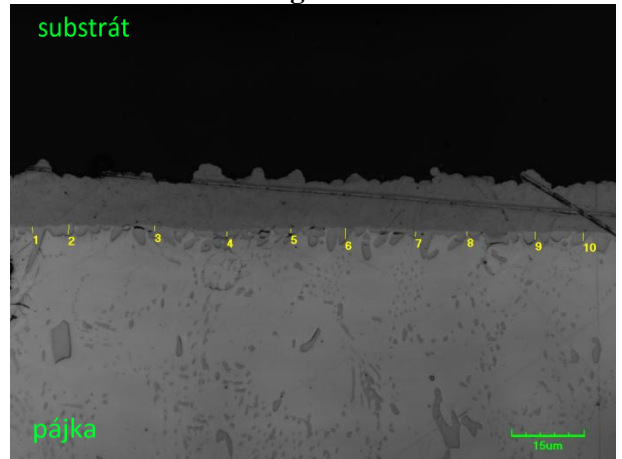
Obrázek 141: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-125-32



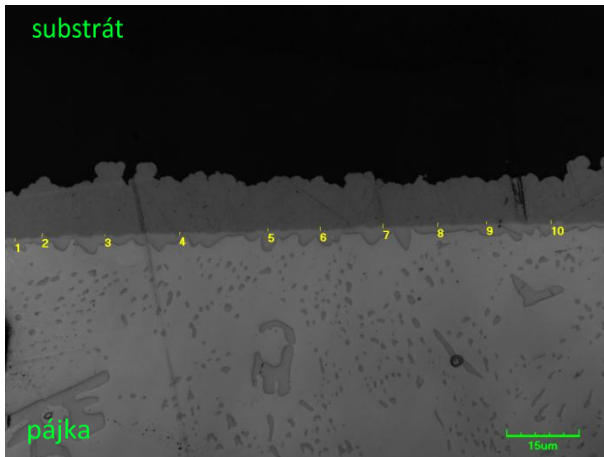
Obrázek 144: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-0-0



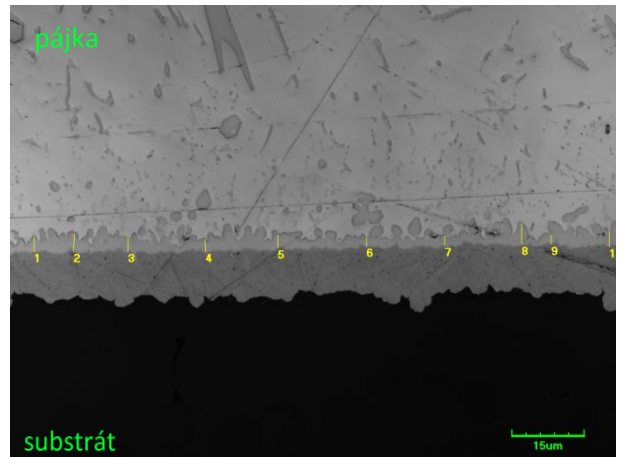
Obrázek 142: Řez testovaného vzorku
Cu-SnPb-100-4



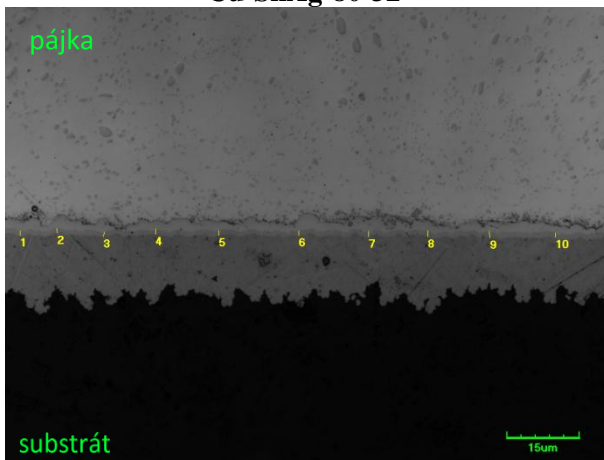
Obrázek 145: Řez testovaného vzorku
Cu-SnAg-80-4



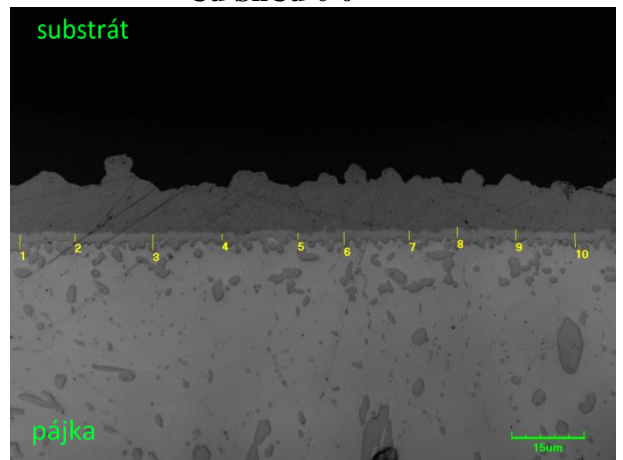
Obrázek 146: Řez testovaného vzorku
Cu-SnAg-80-32



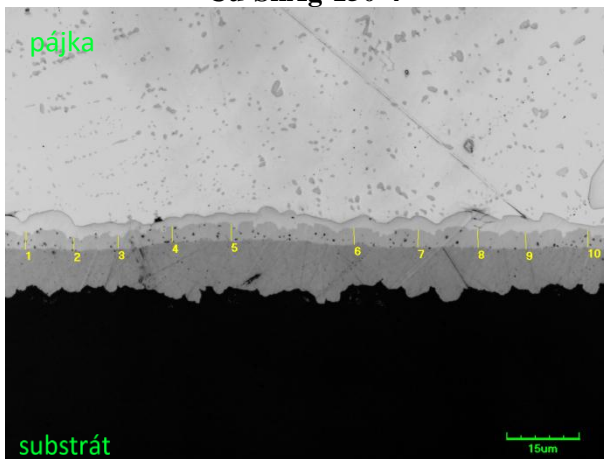
Obrázek 149: Řez testovaného vzorku
Cu-SnCu-0-0



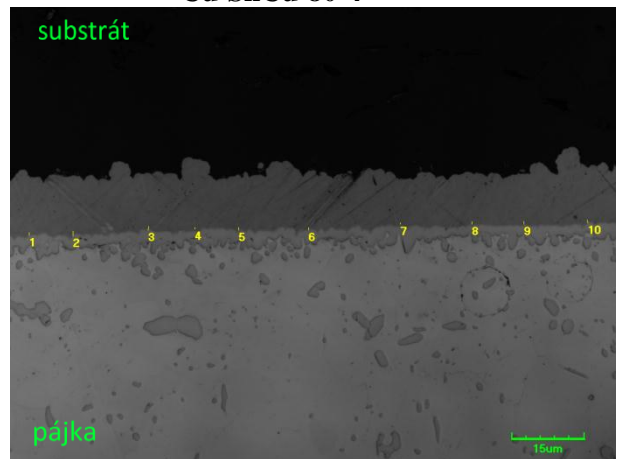
Obrázek 147: Řez testovaného vzorku
Cu-SnAg-150-4



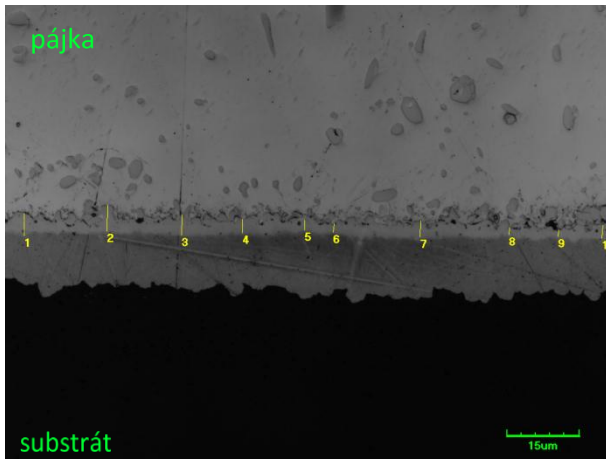
Obrázek 150: Řez testovaného vzorku
Cu-SnCu-80-4



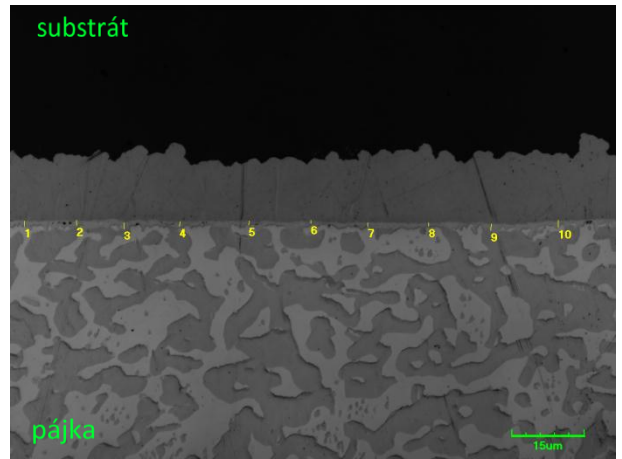
Obrázek 148: Řez testovaného vzorku
Cu-SnAg-150-32



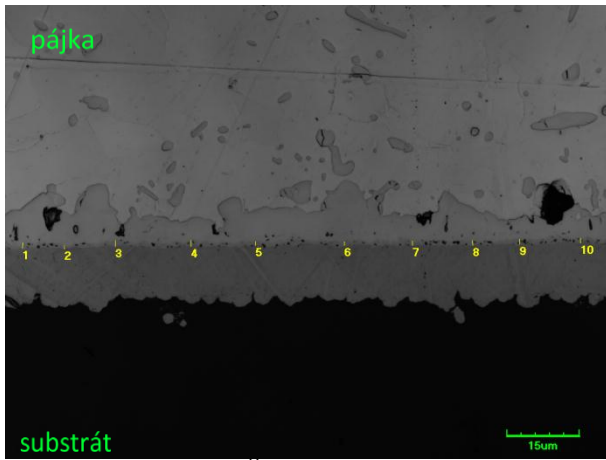
Obrázek 151: Řez testovaného vzorku
Cu-SnCu-80-32



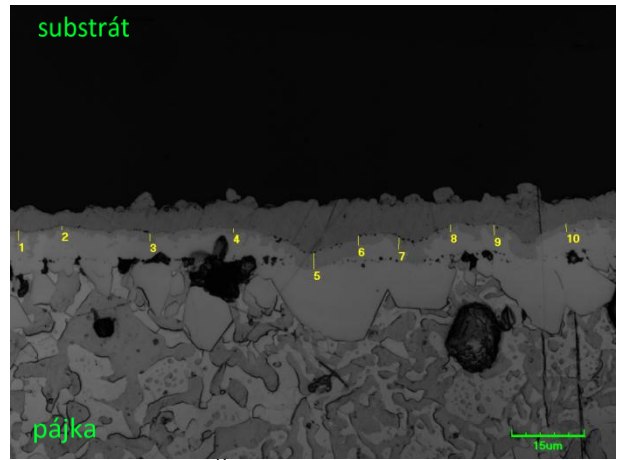
Obrázek 152: Řez testovaného vzorku
Cu-SnCu-150-4



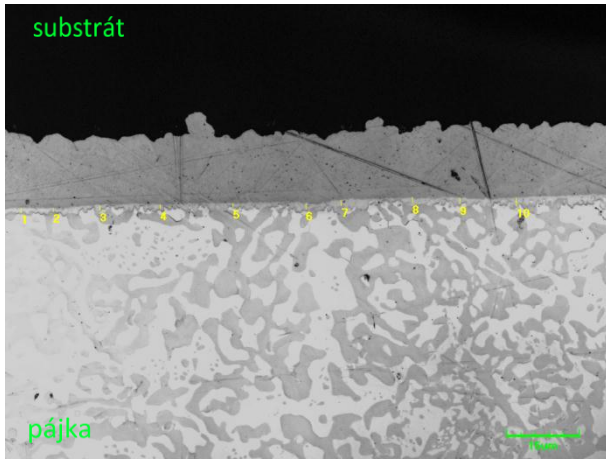
Obrázek 155: Řez testovaného vzorku
Cu-BiSn-80-4



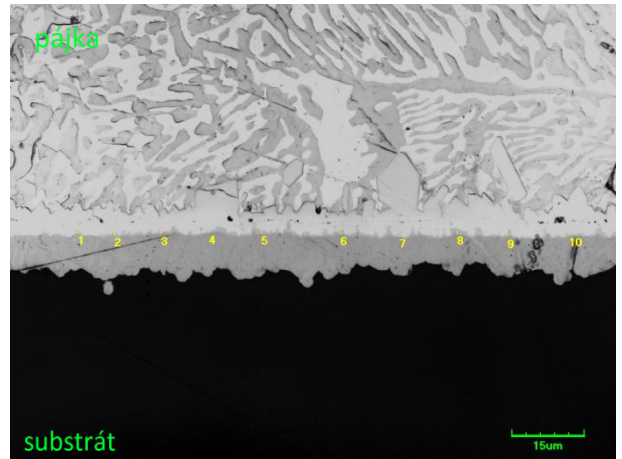
Obrázek 153: Řez testovaného vzorku
Cu-SnCu-150-32



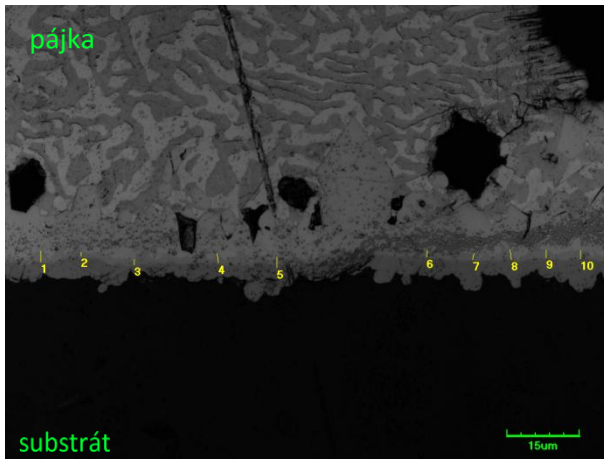
Obrázek 156: Řez testovaného vzorku
Cu-BiSn-80-32



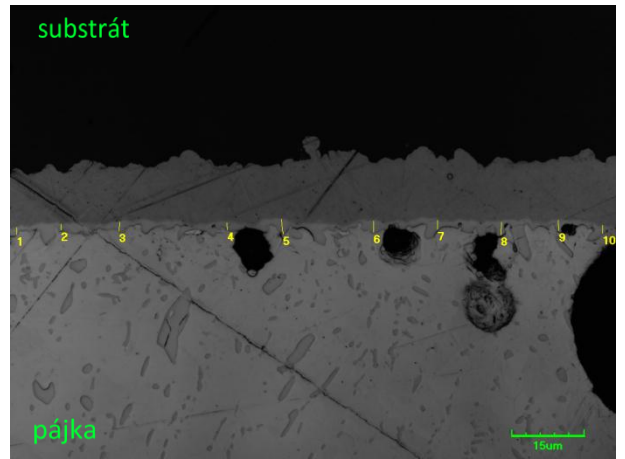
Obrázek 154: Řez testovaného vzorku
Cu-BiSn-0-0



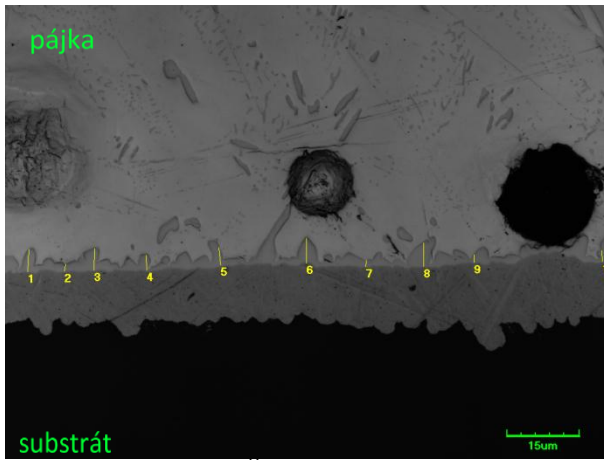
Obrázek 157: Řez testovaného vzorku
Cu-BiSn-150-4



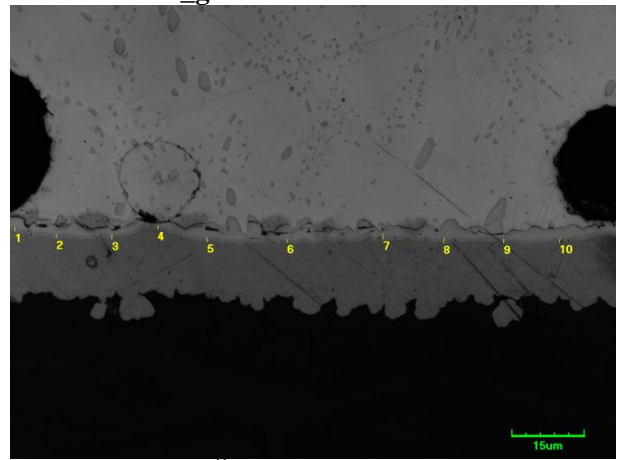
Obrázek 158: Řez testovaného vzorku
Cu-BiSn-150-32



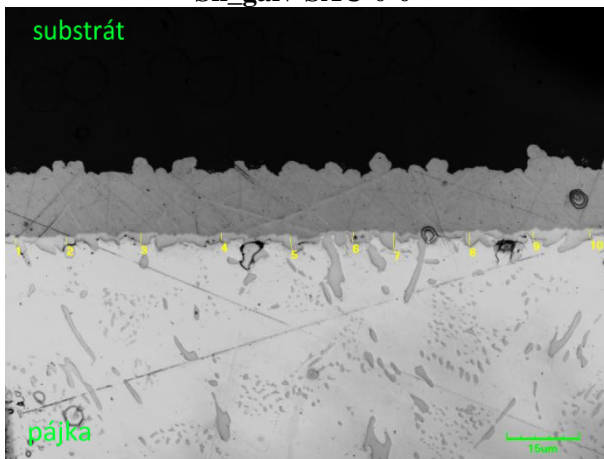
Obrázek 161: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SAC-80-32



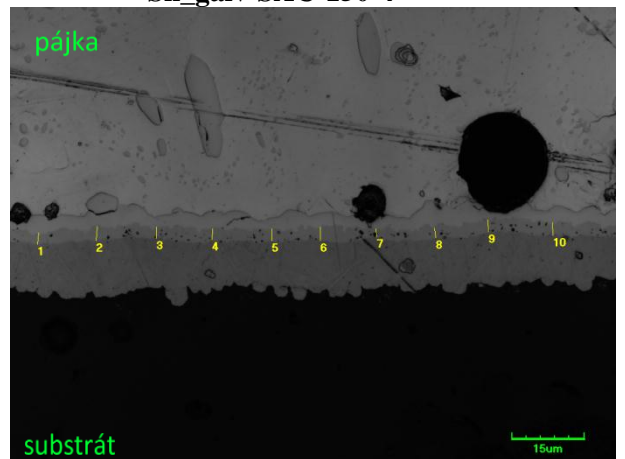
Obrázek 159: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SAC-0-0



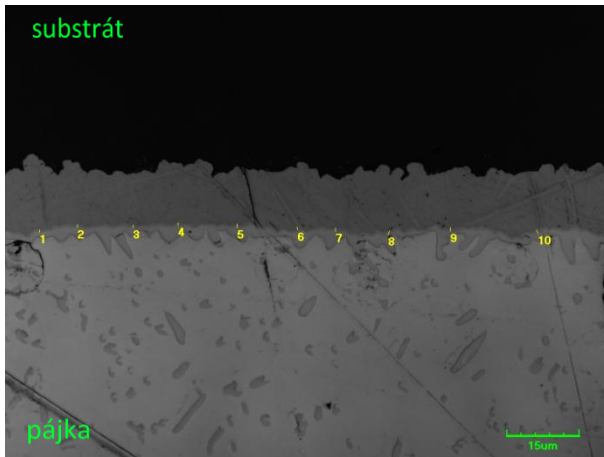
Obrázek 162: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SAC-150-4



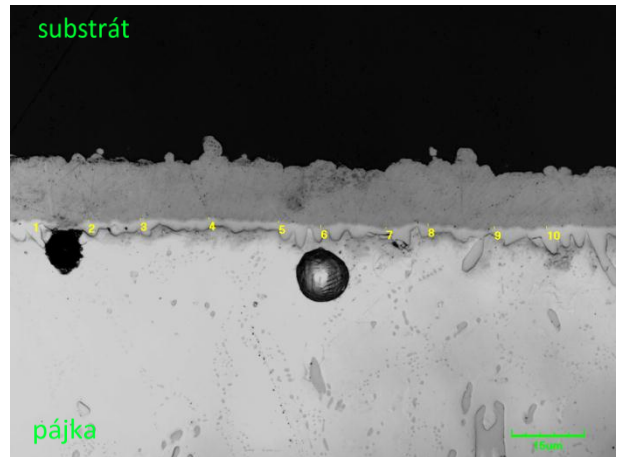
Obrázek 160: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SAC-80-4



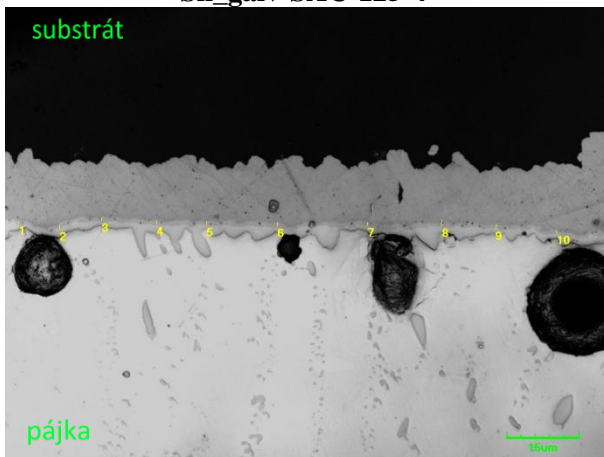
Obrázek 163: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SAC-150-32



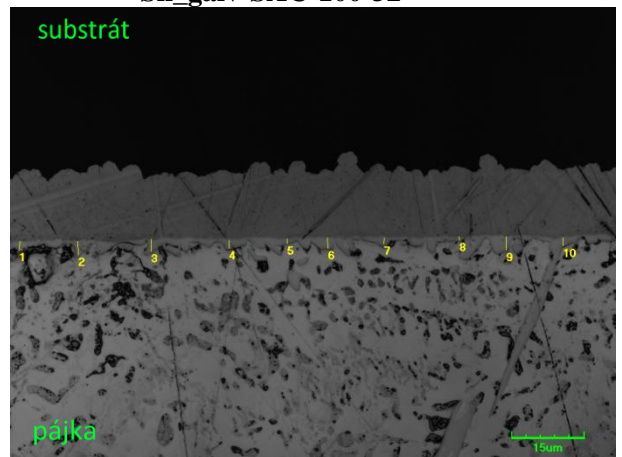
Obrázek 164: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SAC-125-4



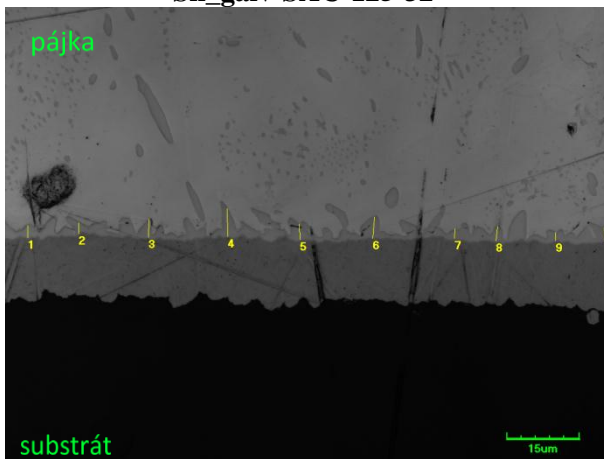
Obrázek 167: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SAC-100-32



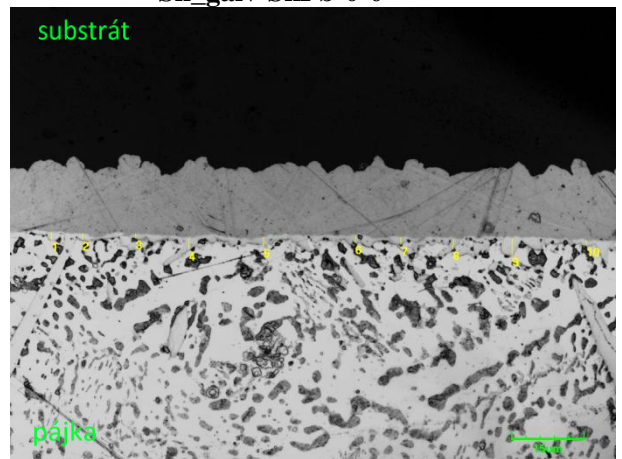
Obrázek 165: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SAC-125-32



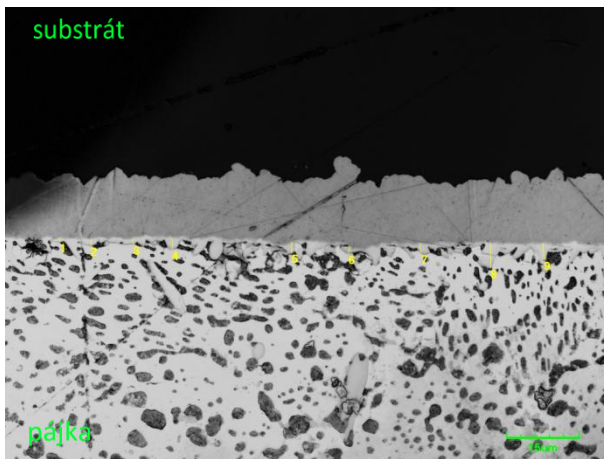
Obrázek 168: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnPb-0-0



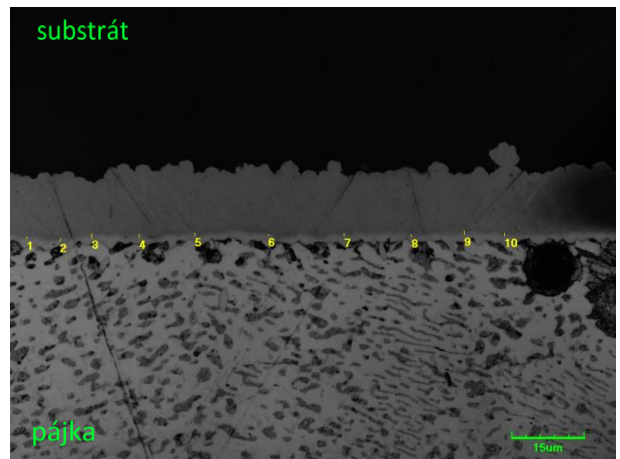
Obrázek 166: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SAC-100-4



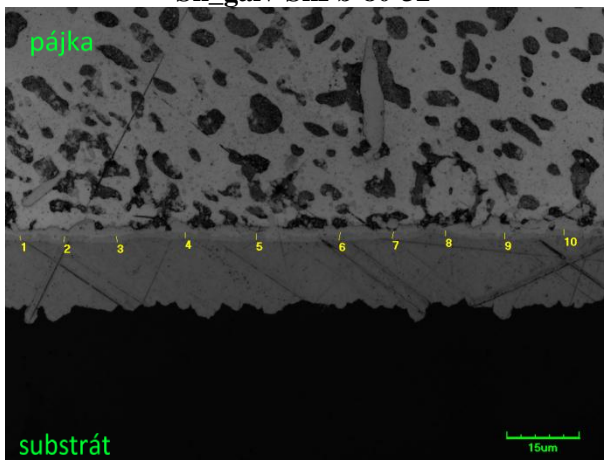
Obrázek 169: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnPb-80-4



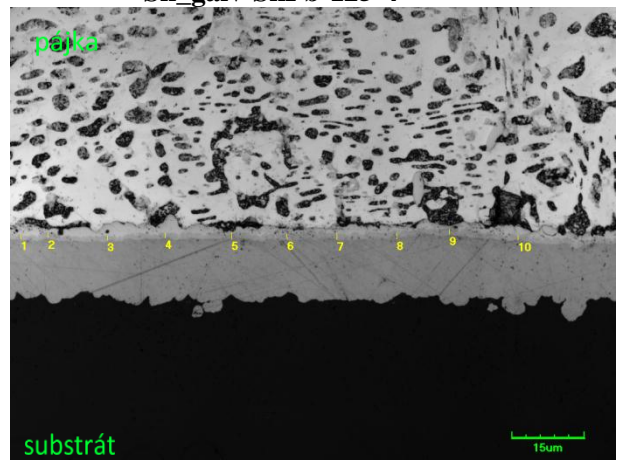
Obrázek 170: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnPb-80-32



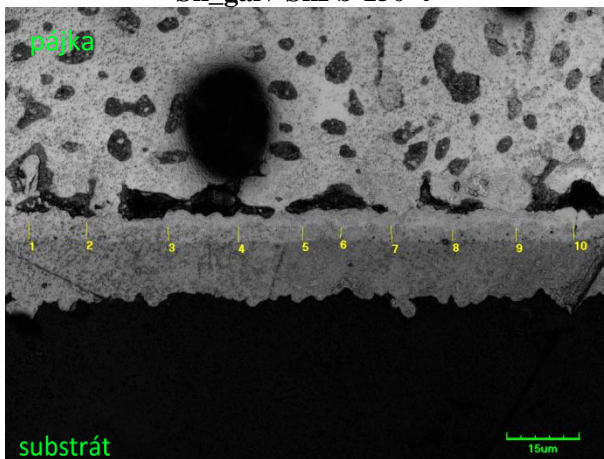
Obrázek 173: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnPb-125-4



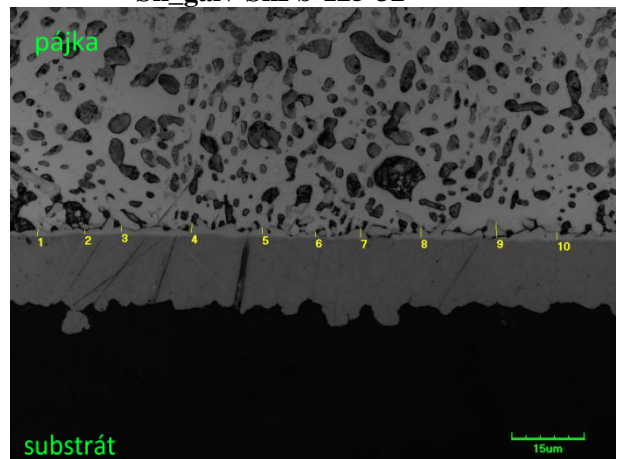
Obrázek 171: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnPb-150-4



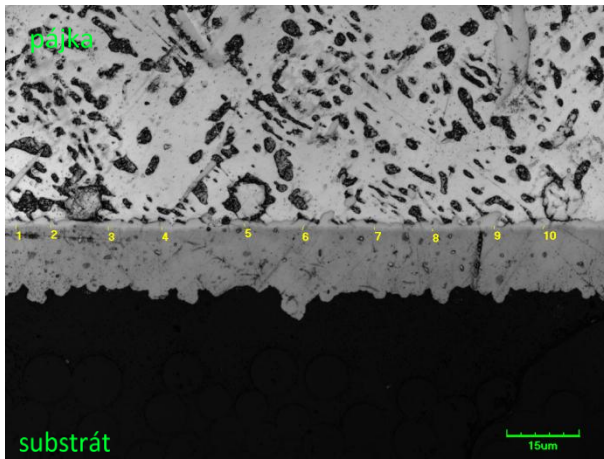
Obrázek 174: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnPb-125-32



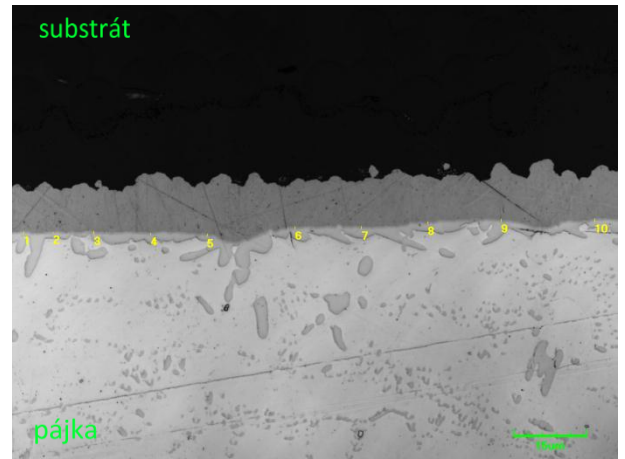
Obrázek 172: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnPb-150-32



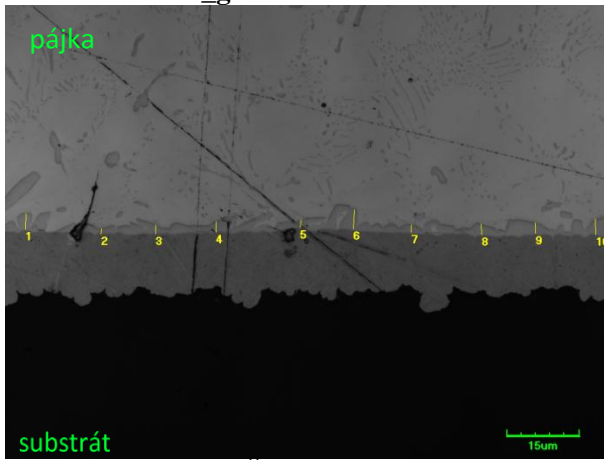
Obrázek 175: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnPb-100-4



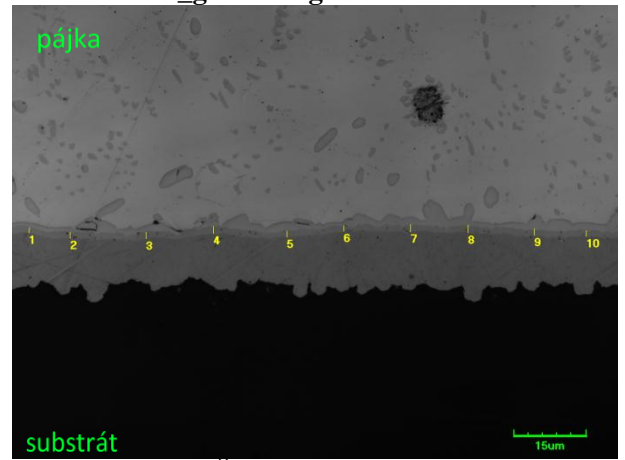
Obrázek 176: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnPb-100-32



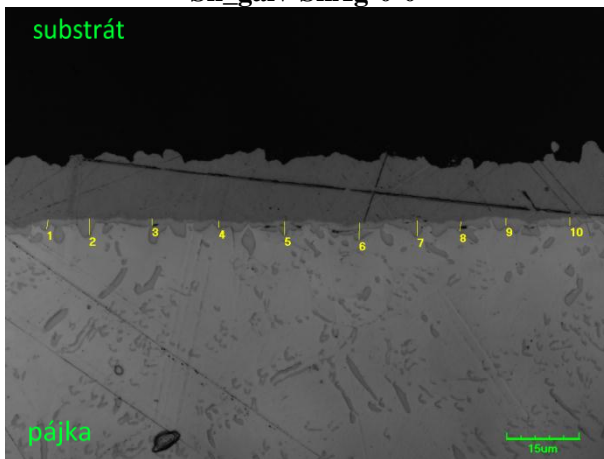
Obrázek 179: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnAg-80-32



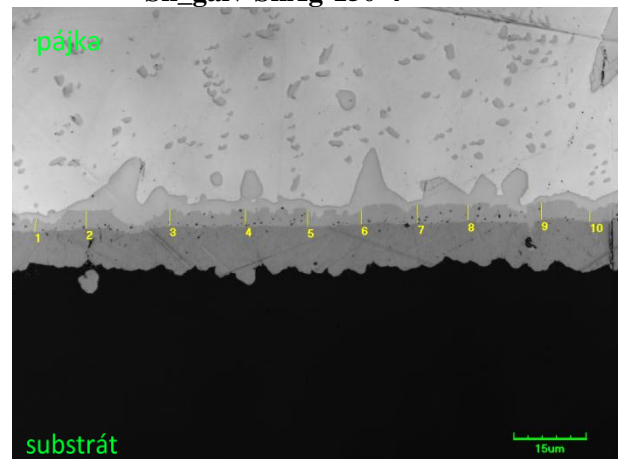
Obrázek 177: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnAg-0-0



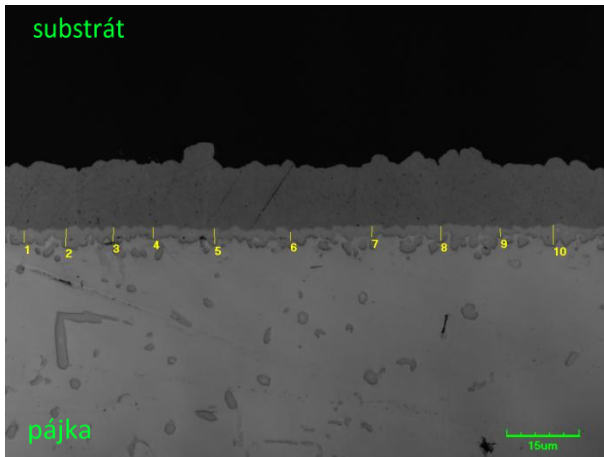
Obrázek 180: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnAg-150-4



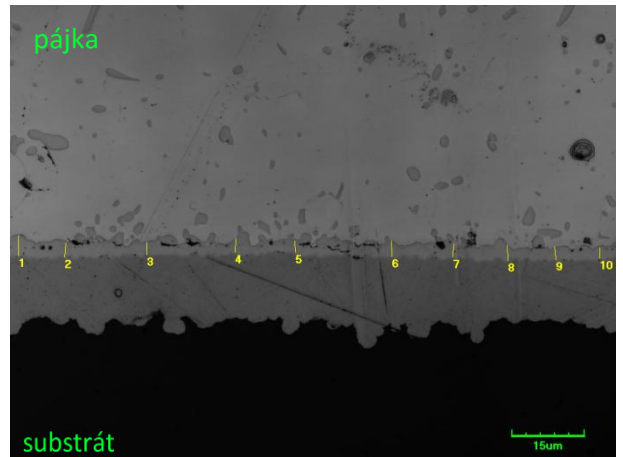
Obrázek 178: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnAg-80-4



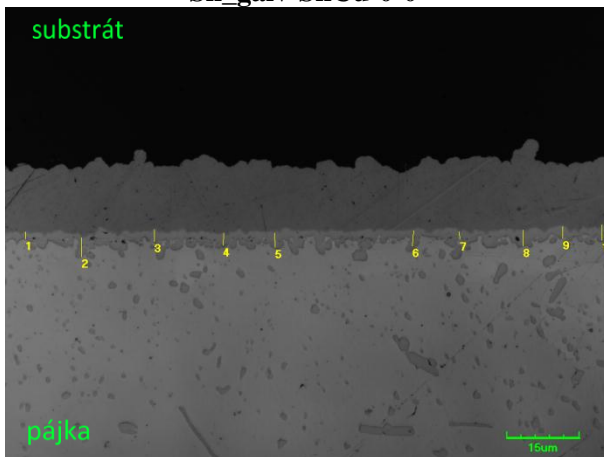
Obrázek 181: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnAg-150-32



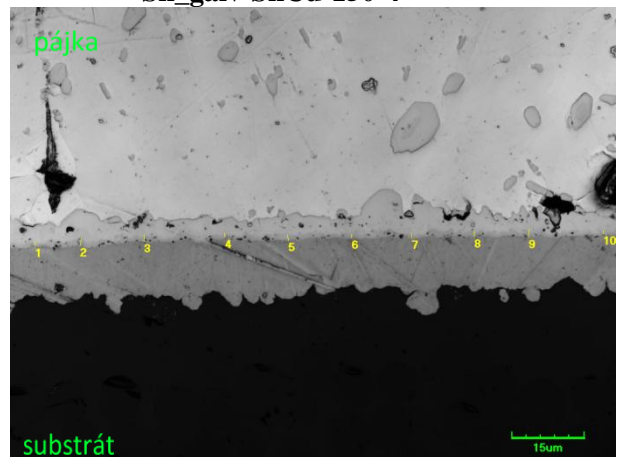
Obrázek 182: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnCu-0-0



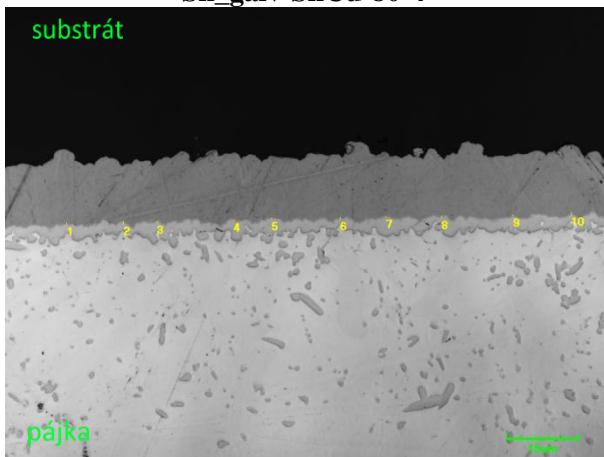
Obrázek 185: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnCu-150-4



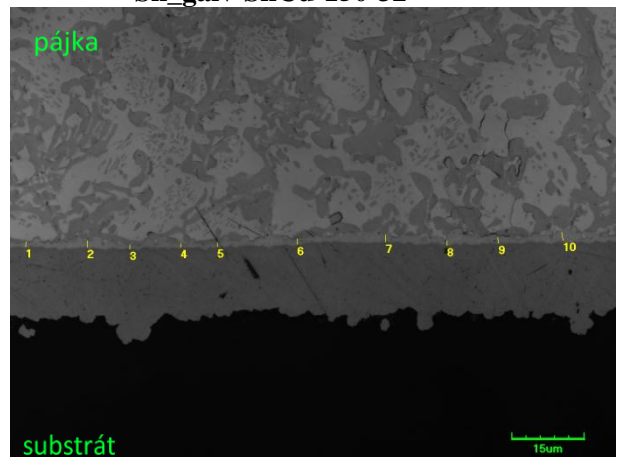
Obrázek 183: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnCu-80-4



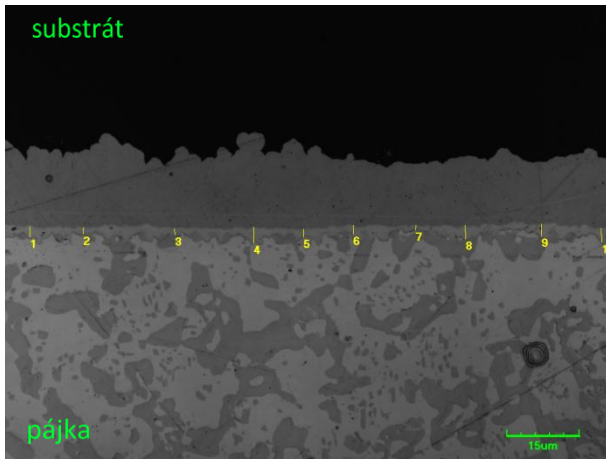
Obrázek 186: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnCu-150-32



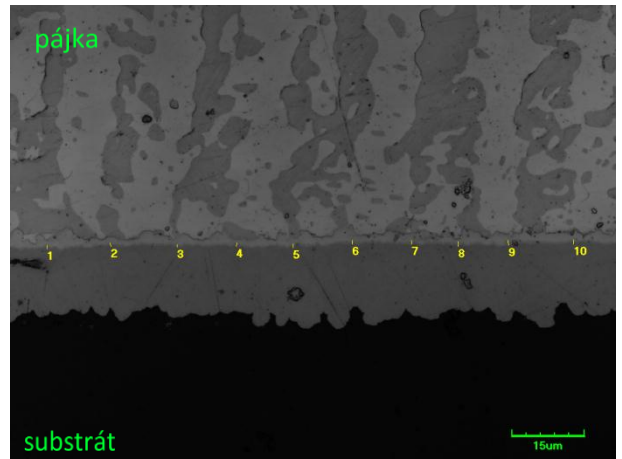
Obrázek 184: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-SnCu-80-32



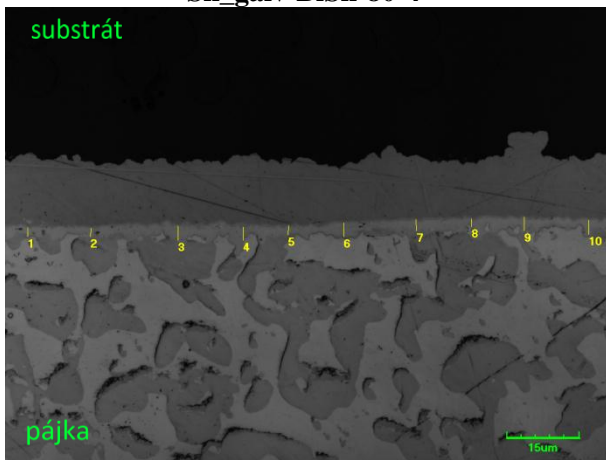
Obrázek 187: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-BiSn-0-0



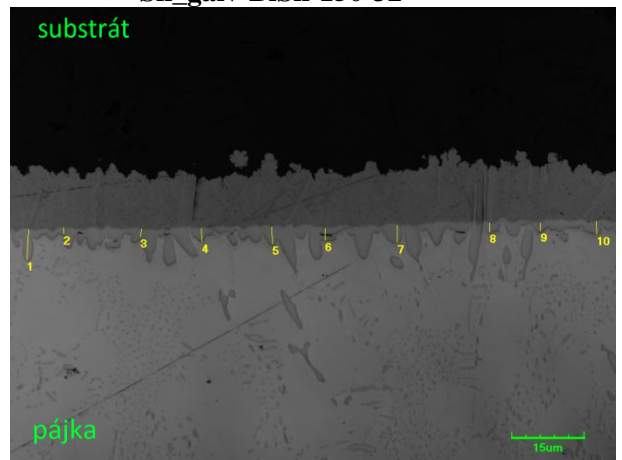
Obrázek 188: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-BiSn-80-4



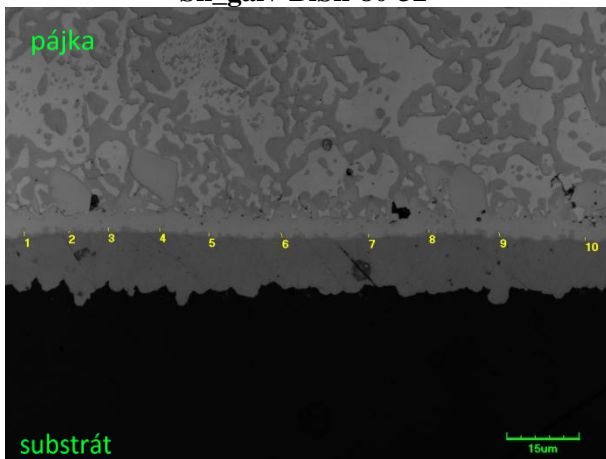
Obrázek 191: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-BiSn-150-32



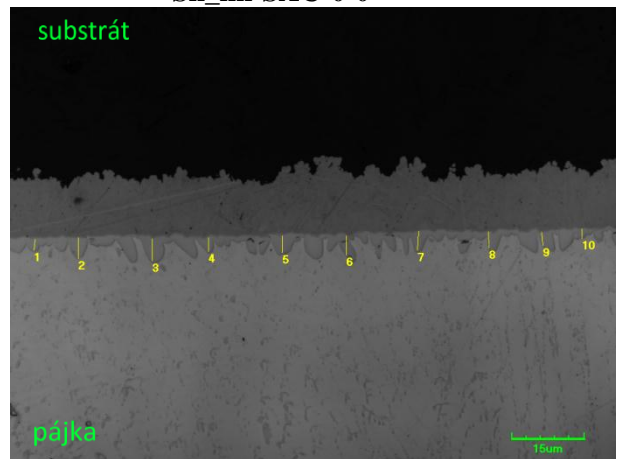
Obrázek 189: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-BiSn-80-32



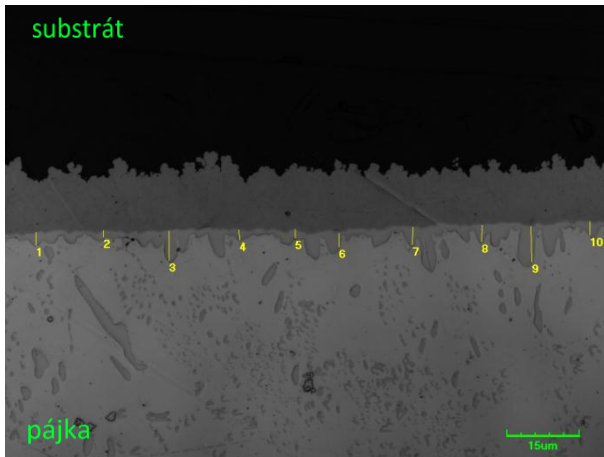
Obrázek 192: Řez testovaného vzorku
Sn_im-SAC-0-0



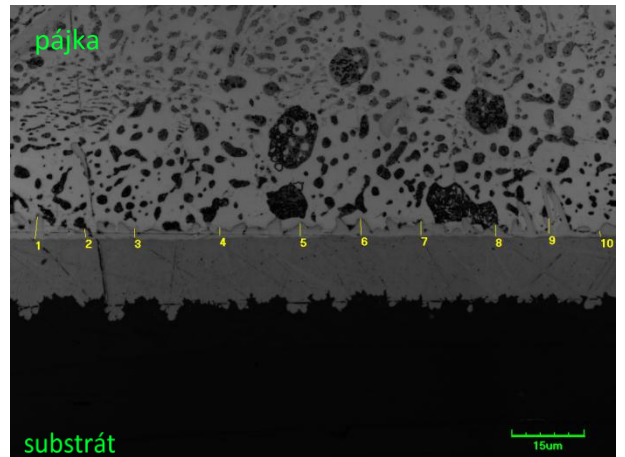
Obrázek 190: Řez testovaného vzorku
Sn_galv-BiSn-150-4



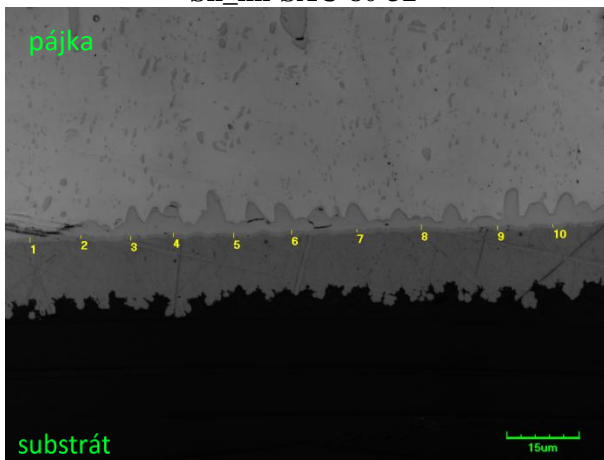
Obrázek 193: Řez testovaného vzorku
Sn_im-SAC-80-4



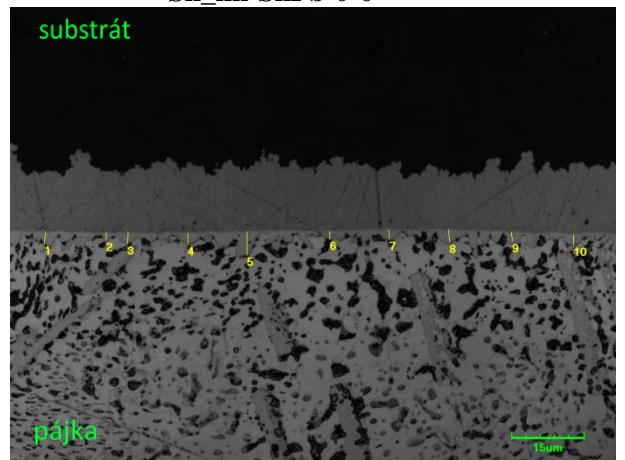
Obrázek 194: Řez testovaného vzorku
Sn_im-SAC-80-32



Obrázek 197: Řez testovaného vzorku
Sn_im-SnPb-0-0



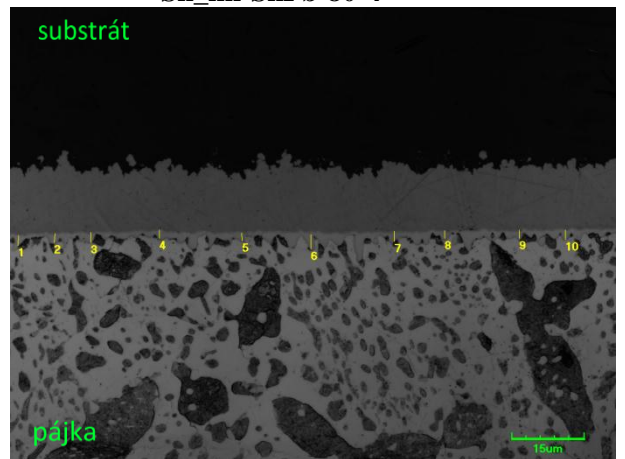
Obrázek 195: Řez testovaného vzorku
Sn_im-SAC-150-4



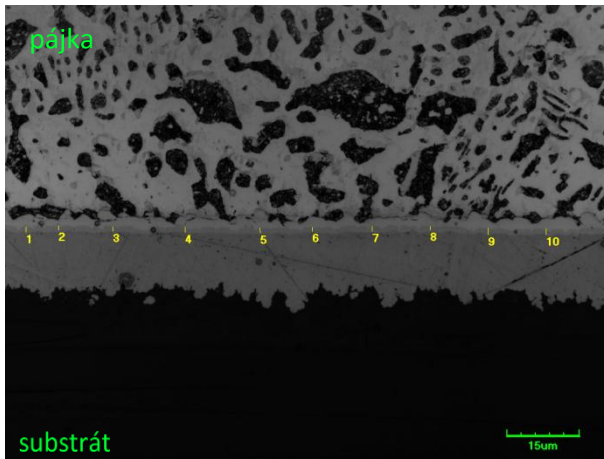
Obrázek 198: Řez testovaného vzorku
Sn_im-SnPb-80-4



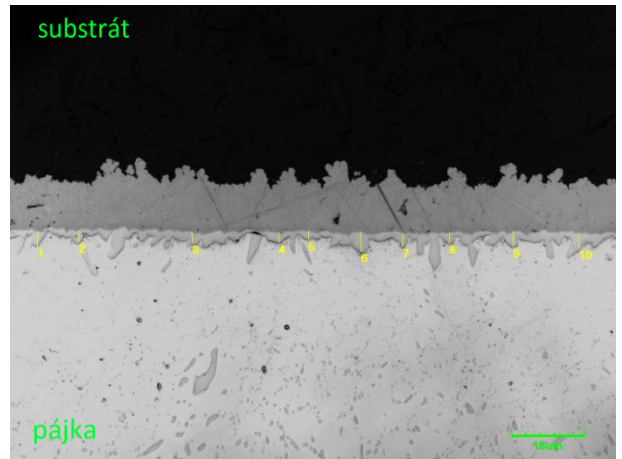
Obrázek 196: Řez testovaného vzorku
Sn_im-SAC-150-32



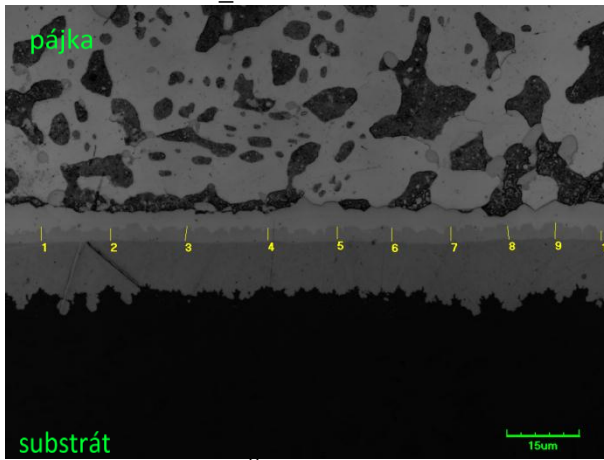
Obrázek 199: Řez testovaného vzorku
Sn_im-SnPb-80-32



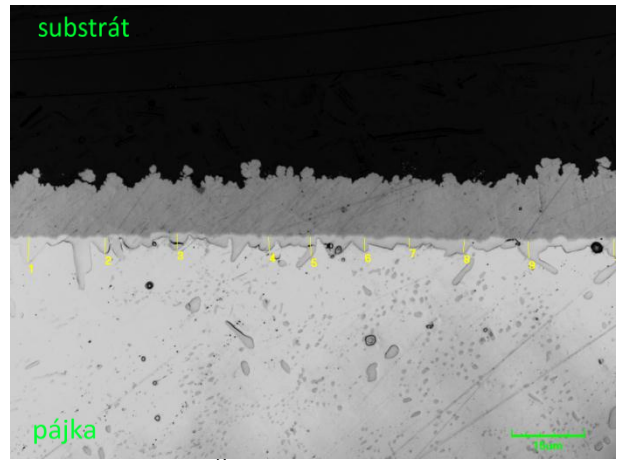
Obrázek 200: Řez testovaného vzorku
Sn_{im}-SnPb-150-4



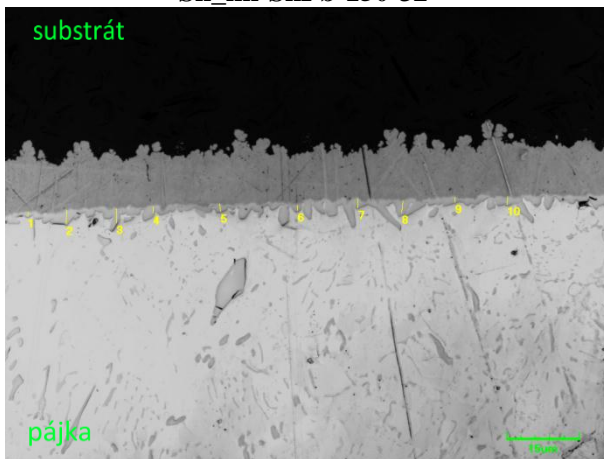
Obrázek 203: Řez testovaného vzorku
OSP-SAC-80-4



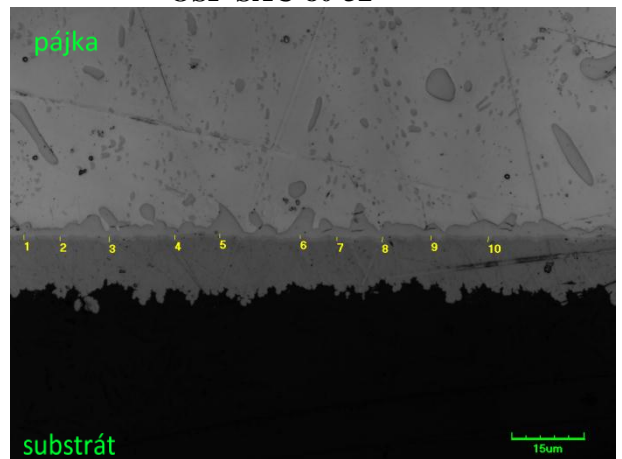
Obrázek 201: Řez testovaného vzorku
Sn_{im}-SnPb-150-32



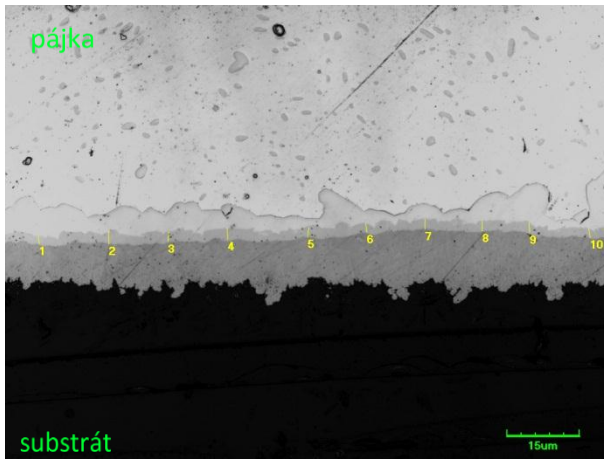
Obrázek 204: Řez testovaného vzorku
OSP-SAC-80-32



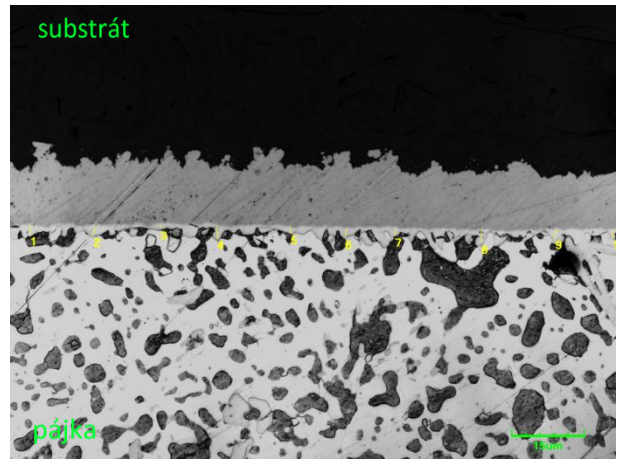
Obrázek 202: Řez testovaného vzorku
OSP-SAC-0-0



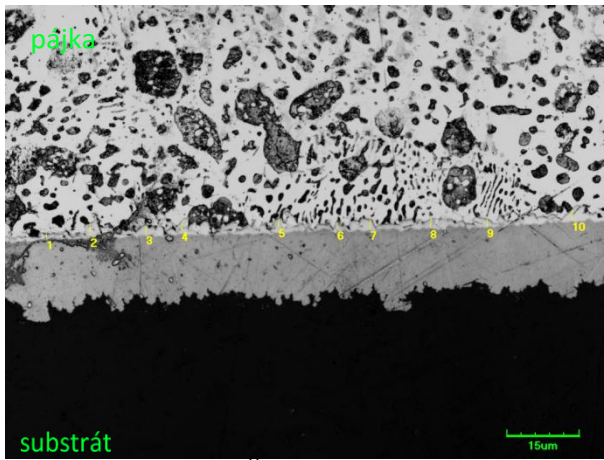
Obrázek 205: Řez testovaného vzorku
OSP-SAC-150-4



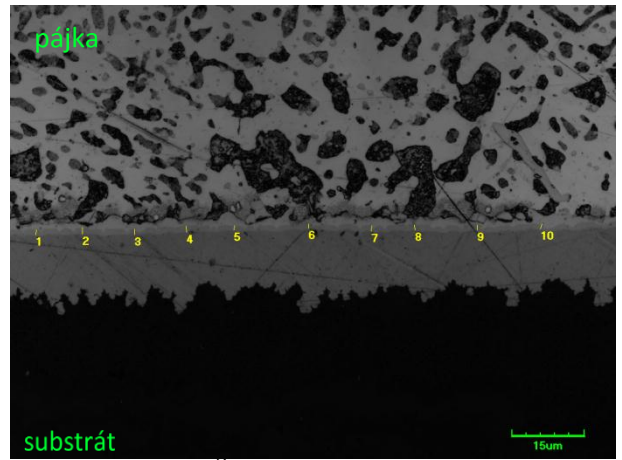
Obrázek 206: Řez testovaného vzorku
OSP-SAC-150-32



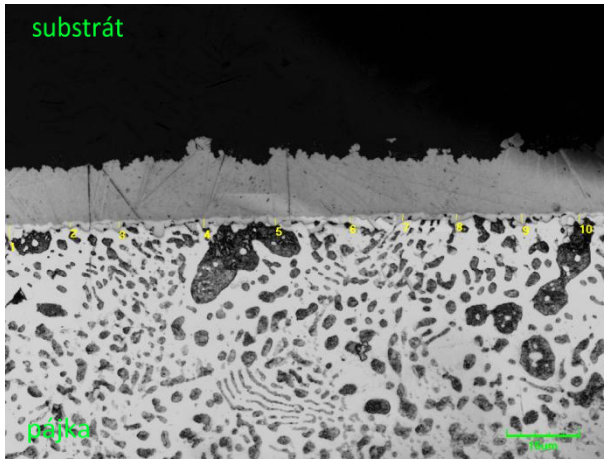
Obrázek 209: Řez testovaného vzorku
OSP-SnPb-80-32



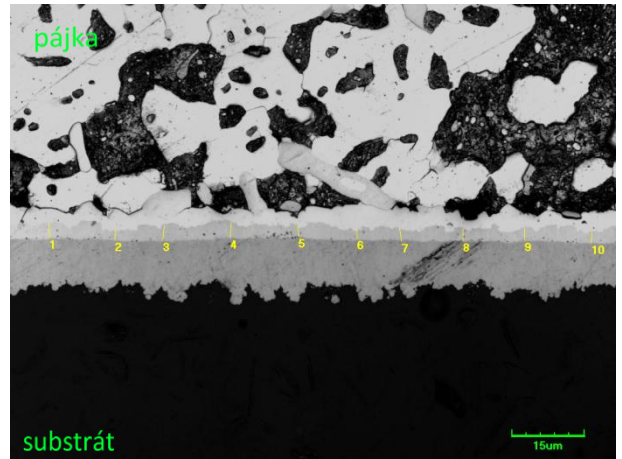
Obrázek 207: Řez testovaného vzorku
OSP-SnPb-0-0



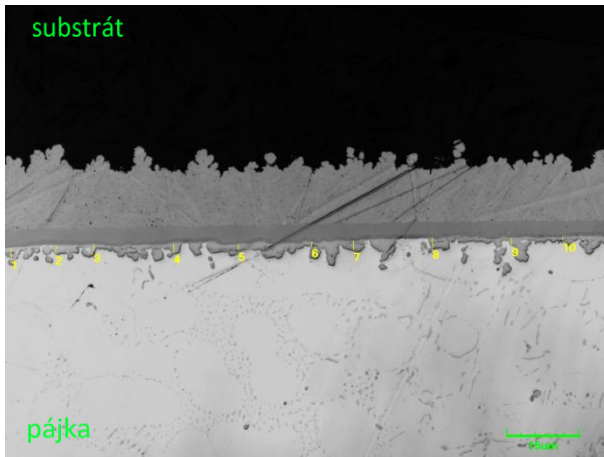
Obrázek 210: Řez testovaného vzorku
OSP-SnPb-150-4



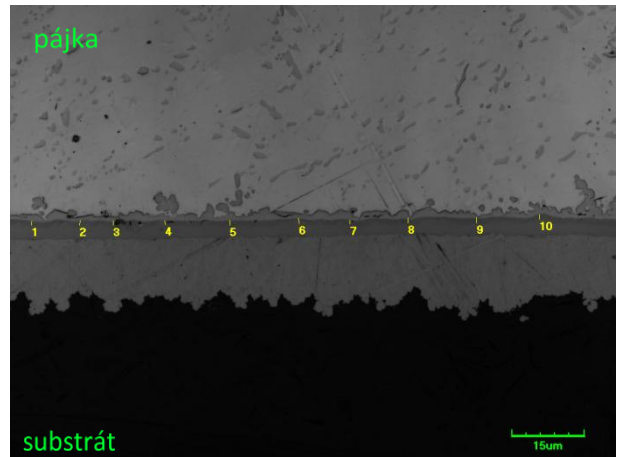
Obrázek 208: Řez testovaného vzorku
OSP-SnPb-80-4



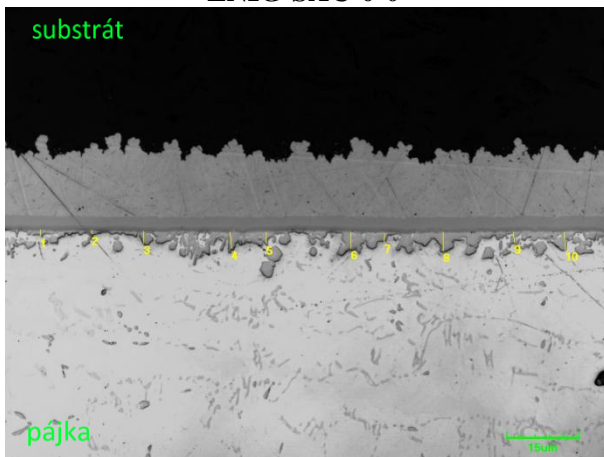
Obrázek 211: Řez testovaného vzorku
OSP-SnPb-150-32



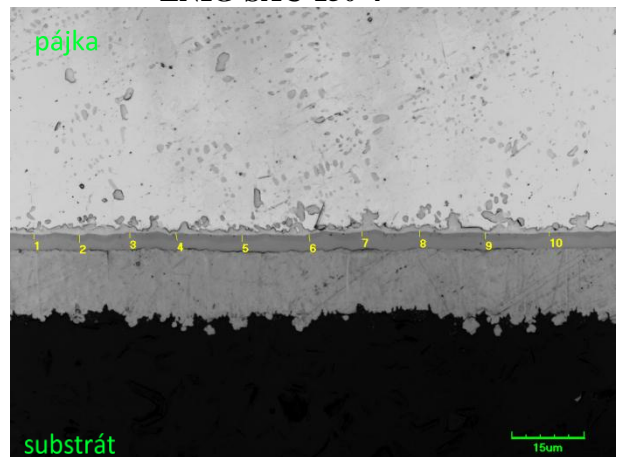
Obrázek 212: Řez testovaného vzorku
ENIG-SAC-0-0



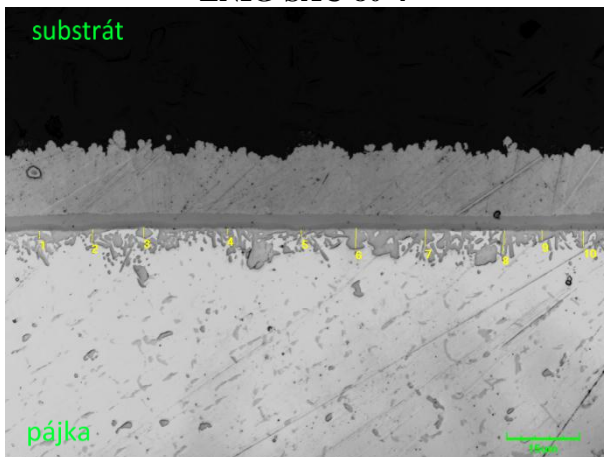
Obrázek 215: Řez testovaného vzorku
ENIG-SAC-150-4



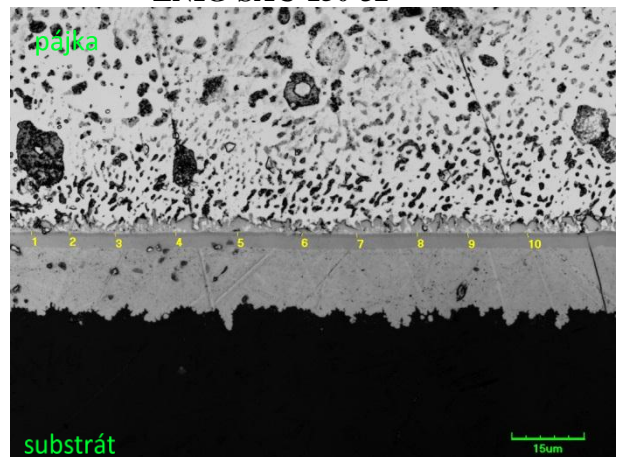
Obrázek 213: Řez testovaného vzorku
ENIG-SAC-80-4



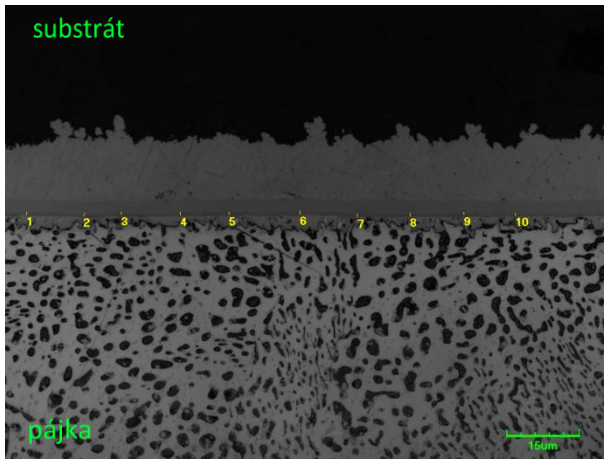
Obrázek 216: Řez testovaného vzorku
ENIG-SAC-150-32



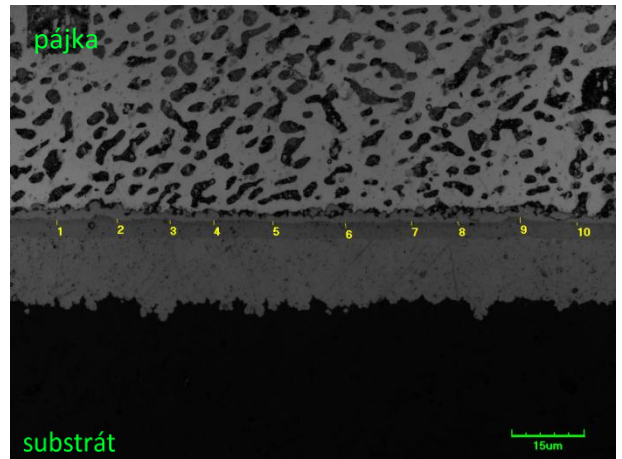
Obrázek 214: Řez testovaného vzorku
ENIG-SAC-80-32



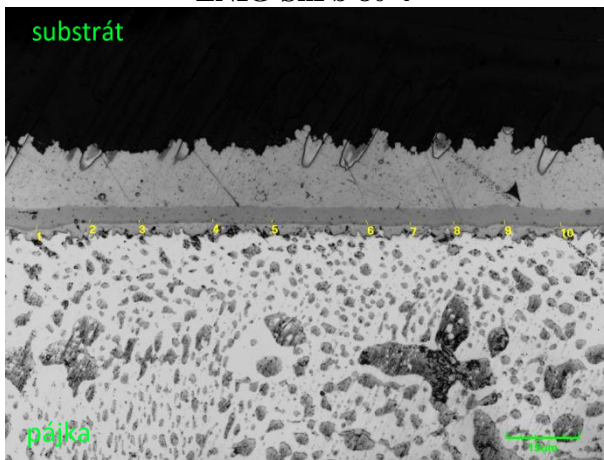
Obrázek 217: Řez testovaného vzorku
ENIG-SnPb-0-0



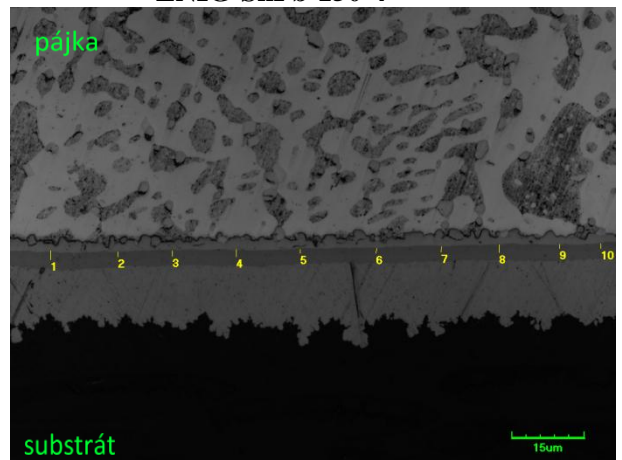
Obrázek 218: Řez testovaného vzorku
ENIG-SnPb-80-4



Obrázek 220: Řez testovaného vzorku
ENIG-SnPb-150-4



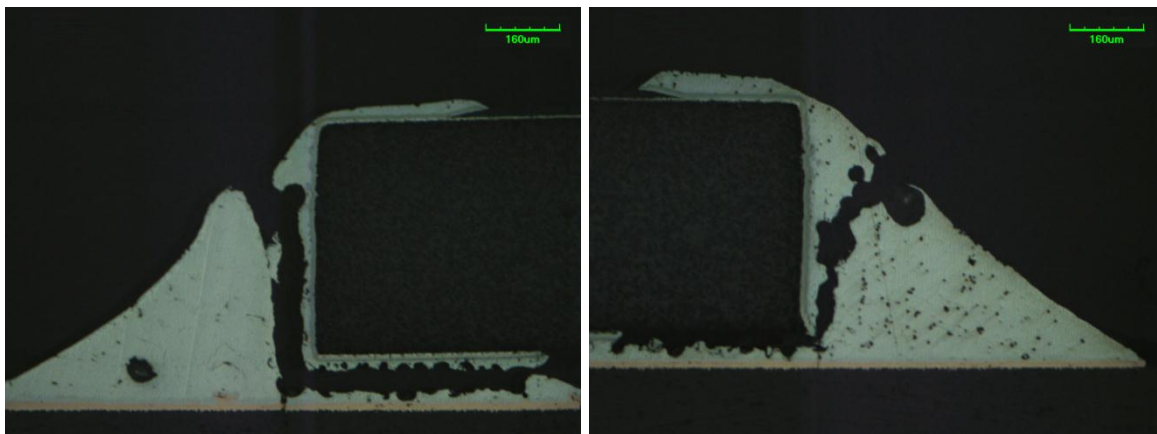
Obrázek 219: Řez testovaného vzorku
ENIG-SnPb-80-32



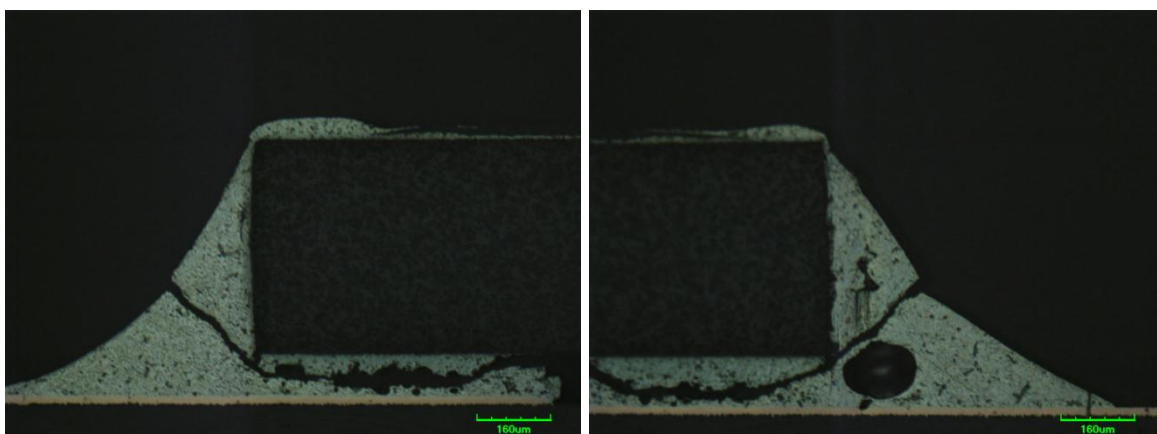
Obrázek 221: Řez testovaného vzorku
ENIG-SnPb-150-32

Příloha C. Materiálografické výbrusy pájených spojů

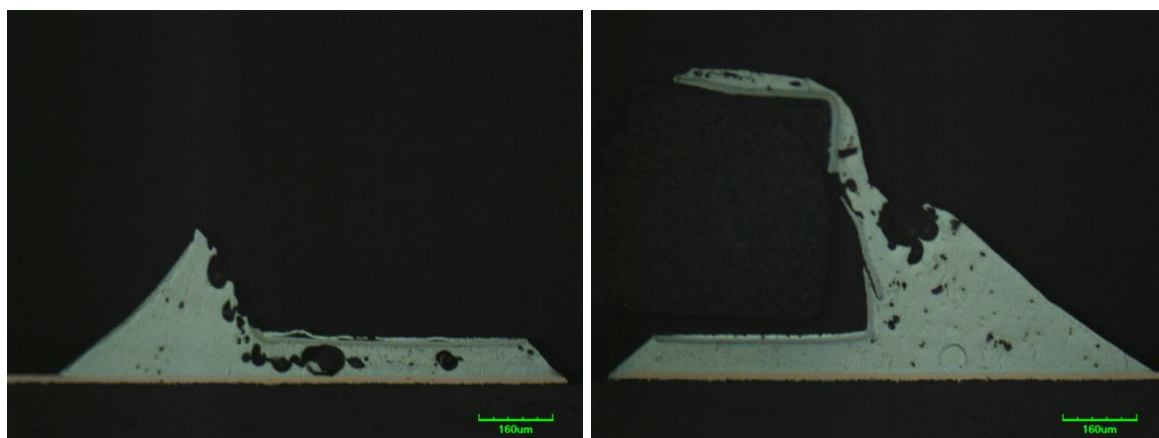
V této příloze je ukázka materiálografických výbrusů pájených spojů po měření mechanické pevnosti ve smyku. Značení vzorků vychází z kapitoly č. 4.4 a je stejné jako v kapitole č. 8.



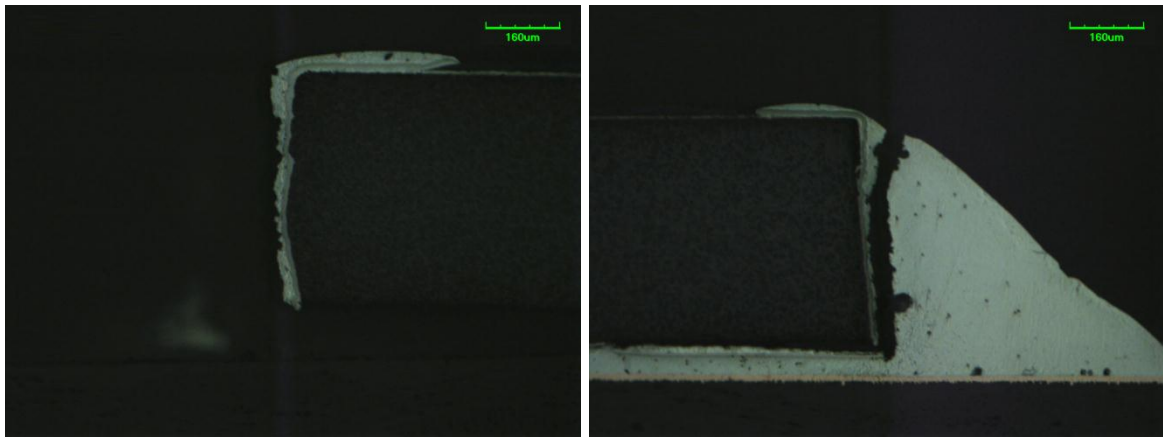
Obrázek 222: Řez pájeným spojem vzorku Cu-SAC-80-4-2-1 po odtržení součástky



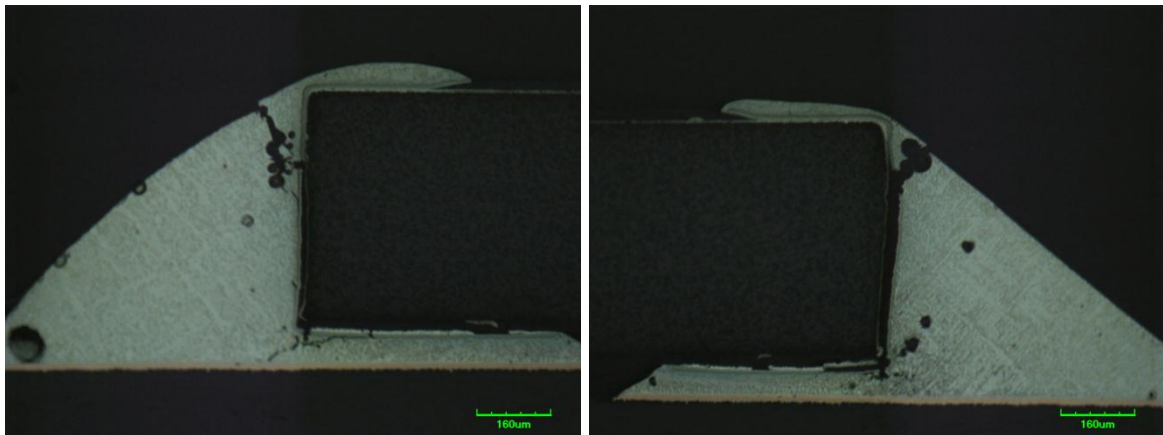
Obrázek 223: Řez pájeným spojem vzorku Cu-SnPb-80-4-1-1 po odtržení součástky



Obrázek 224: Řez pájeným spojem vzorku Cu-SnAg-80-4-2-1 po odtržení součástky



Obrázek 225: Řez pájeným spojem vzorku Cu-SnCu-80-32-2-1 po odtržení součástky



Obrázek 226: Řez pájeným spojem vzorku Cu-BiSn-80-32-2-1 po odtržení součástky

Příloha D. Hornovy kvantily

n	$1 - \alpha$	0.9	0.95	0.975	0.99	0.995
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

Obrázek 227: Hornovy kvantily $t_{L, 1-\alpha}(n)$ rozdělení T_L