

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

STUDIUM SPOLEHLIVOSTI BEZOLOVNATÉHO PÁJENÍ

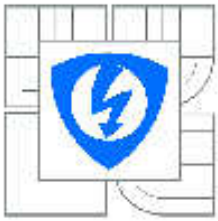
STUDY OF LEAD-FREE SOLDER RELIABILITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER´S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. JAN PÍCHA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student:	Bc. Jan Pícha	***ID:***	83311
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Studium spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte přehled perspektivních kompozic pro pájení přetavením, uveďte jejich výhody a nevýhody. Stanovte metodiku pro vyhodnocování jakosti pájených spojů na základě studia jejich struktury a ověřte ji experimentálně pro vybrané typy past v závislosti na průběhu chlazení.
Zrealizujte proces přidávání vibračních energií do procesu pájení a ověřte vliv na konečnou strukturu spojů a jejich mechanické vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Szendiuch,I.: Základy technologie mikroelektronických obvodů, VUTIUM, 2007

Termín zadání:	8.2.2010	***Termín odevzdání:***	27.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Práce řeší problematiku bezolovnatého pájení se zaměřením na studium struktury spojů a jejich spolehlivost. V práci byly shrnuty používané bezolovnaté pájecí slitiny. V teoretické části jsou zahrnuty jevy pro pochopení pájení a metody zkoumání spolehlivosti pro pájené spoje.

Experimentální část zahrnuje vliv vodního chlazení a přídavných energií na strukturu spoje. Obě tyto metody jsou testovány a jsou vyhodnoceny z hlediska spolehlivosti. Mezi prováděnými testy byla rentgenová diagnostika, optické pozorování povrchu spojů, mechanické testy a zkoumání struktur na elektronovém mikroskopu.

Abstract:

The thesis deals with problems concerning lead free soldering especially the study of the structure of solder joints and their reliability. The thesis evaluates lead free solder alloys. The theoretical part includes basic principles of soldering and methods of investigating solder joints reliability.

The experimental part deals with the impact of water cooling and vibration on solder joint structure. Both methods are tested and are evaluated with regard to their reliability. The used tests include X-ray inspection, optical inspection, mechanical tests, investigating joint structure with electrone microscope.

Klíčová slova:

bezolovnaté pájení, struktura pájeného spoje, spolehlivost a životnost

Key words:

Lead free soldering, Structure of solder joints, reliability and life-time

PÍCHA, J. *Studium spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 82 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..

PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Studium spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 26. května 2010 .....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji pedagogickému vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi CSc. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných.

Děkuji Davidu Kafkovi z firmy Continental Automotive System Czech Republic s.r.o. za umožnění práce na rentgenu a realizaci urychleného stárnutí.

Taktéž děkuji zaměstnancům Akademie věd České republiky za veškerou pomoc při řešení praktických částí diplomové práce, především Ing. Adéle Zemanové, Ph.D.

OBSAH

ÚVOD **10**

1 PŘEHLED NEJČASTĚJŠÍCH DRUHŮ SLITIN BEZOLOVNATÝCH PÁJEK **11**

1.1 SAC - PÁJKY 12
1.2 SC - PÁJKY 12
1.3 SA - PÁJKY 12
1.4 SB – PÁJKY 13

2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI PÁJENÝCH SPOJŮ **14**

2.1 TAVENÍ A TUHNUTÍ PÁJEK 14
2.2 FÁZOVÉ DIAGRAMY 15
2.3 INTERMETALICKÉ FÁZE 16
2.4 SMÁČIVOST [1] 16
2.5 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ [3] 18
2.6 DIFÚZE [3] 19
2.7 PÁJENÍ SPOJE [3] 20

3 ÚPRAVY DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ PRO BEZOLOVNATÉ PÁJENÍ **22**

3.1 HASL 22
3.2 OSP 23
3.3 ENIG 23

4 ZKOUMÁNÍ STRUKTUR PÁJENÝCH SPOJŮ **24**

4.1 METALOGRAFIE 24
4.2 ZKOUMÁNÍ STRUKTURY POMOCÍ SEM 25
4.2.1 Skenovací elektronový mikroskop JEOL 6460LV *25*
4.2.2 Detekce sekundárních elektronů (SE) *26*
4.2.3 Detekce zpětně rozptýlených elektronů (BSE) *27*
4.2.4 Detekce difrakce zpětně rozptýlených elektronů (EBSD) *27*

5 SLEDOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI PÁJENÝCH SPOJŮ **28**

5.1 URYCHLENÉ STÁRNUTÍ 28
5.2 ISHIKAWA DIAGRAM [11] 30
5.3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY 31
5.4 VYHODNOCENÍ PÁJENÝCH SPOJŮ RENTGENEM 32
5.4.1 Princip rentgenu *32*
5.4.2 Rentgenové zařízení Phoenix X-ray – VtomeX *32*

6 EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠŤOVÁNÍ VLIVU VODNÍHO CHLAZENÍ NA STRUKTURU SPOJE **34**

6.1 CHLAZENÍ TESTOVACÍCH VZORKŮ 34
6.2 PÁJENÍ TESTOVACÍCH VZORKŮ 35
6.3 TVORBA METALOGRAFICKÉHO VÝBRUSU 37
6.4 POUŽITÉ PÁJKY, OZNAČENÍ VZORKŮ A STRUKTURY PÁJENÝCH SPOJŮ 38
6.4.1 Označení vzorků *38*
6.4.2 Sn60Pb40 ..... *38*
6.4.3 Struktura pájky Sn95,5Ag3,8Cu0,7 ..... *38*
6.4.4 Struktura pájky Sn96Ag4 ..... *40*
6.4.5 Struktura pájky SN100C *42*
6.4.6 Struktura pájky Sn99Ag+ *42*
6.5 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU 43
6.5.1 Porovnání struktury pájených spojů Sn60Pb40 při rozdílné době chladnutí *43*
6.5.2 Porovnání struktury pájených spojů SAC při změně chlazení *44*

7 EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠŤOVÁNÍ VLIVU PŘÍDAVNÝCH ENERGIÍ NA STRUKTURU SPOJE **46**

7.1 POUŽITÉ PÁJECÍ PASTY 46
7.2 NÁVRH A VÝROBA TESTOVACÍ DESKY 46

7.2.1 Požadavky a návrh testovací desky ... 46
7.2.2 Postup při výrobě testovací desky ... 47
7.3 ZNAČENÍ A VÝROBA VZORKŮ ... 49
7.3.1 Značení vzorků ... 49
7.3.2 Zhotovení vzorků ... 50
7.4 SLEDOVÁNÍ HMOTNOSTI DESKY BĚHEM ZHOTOVENÍ ... 51
7.5 VLIV PÁJECÍ METODY NA POVRCH PÁJENÉHO SPOJE ... 52
7.5.1 Povrch pájky SAC305 při různých pájecích metodách ... 52
7.5.2 Povrch pájky SN100C při jiných pájecích metodách ... 53
7.6 ZKOUMÁNÍ PÁJENÝCH SPOJŮ RENTGENEM ... 54
7.7 URYCHLENÉ STÁRNUTÍ ... 57
7.8 VLIV PÁJECÍ METODY NA VÝSLEDNOU STRUKTURU ... 58
7.8.1 Struktura pájeného spoje 3A4N - pájka SAC305 zapájená za běžných podmínek ... 58
7.8.2 Struktura pájeného spoje 3A6V - pájka SAC305 zapájená za použití vibrací ... 59
7.8.3 Struktura pájeného spoje 3A7W - pájka SAC305 zapájená s vodním chlazením ... 60
7.8.4 Struktura pájeného spoje 3B6N - pájka SN100C zapájená za běžných podmínek ... 61
7.8.5 Struktura pájeného spoje 3B7V - pájka SN100C zapájená za použití vibrací ... 62
7.8.6 Struktura pájeného spoje 3B8W - pájka SN100C zapájená s vodním chlazením ... 63
7.9 MECHANICKÉ ZKOUŠKY ... 64
7.10 VYHODNOCENÍ URYCHLENÉHO STÁRNUTÍ ... 65
7.10.1 Vyhodnocení povrchu spoje ... 65
7.10.2 Vyhodnocení spojů rentgenem ... 66
7.10.3 Vyhodnocení struktur spojů ... 69
7.10.4 Vyhodnocení mechanických testů ... 75
7.11 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU ... 77
8 ZÁVĚR ... 80

Seznam obrázků:

Obrázek 1-1: Alternativy pájecích slitin 11
Obrázek 2-1: Změna stavu seskupení materiálu 14
Obrázek 2-2: Fázové diagramy pájek. 15
Obrázek 2-3: Vznik intermetalických sloučenin v závislosti na složení pájky[1] 16
Obrázek 2-4: Definice smáčecího úhlu 17
Obrázek 2-5: Vliv difúze při různých teplotách, ... 20
Obrázek 2-6: Vznik intermetalických fázi a oxidů 21
Obrázek 3-1: Zastoupení povrchových úprav v celosvětové produkci 22
Obrázek 4-1: Postup tvorby metalografického výbrusu [4] 25
Obrázek 4-2: Elektronový mikroskop JEOL 6460LV 26
Obrázek 5-1: Příklad Ishikawa diadramu 30
Obrázek 5-2: Zařízení DAGE PC2400 31
Obrázek 5-3: Rentgenové zařízení Phoenix X-ray – VtomeX [x] 33
Obrázek 6-1: Přípravek pro chlazení pájených spojů 34
Obrázek 6-2: Soustava pro chlazení pájených spojů 35
Obrázek 6-3: Příprava vzorku před zapájením 35
Obrázek 6-4: Zapájení testovacích vzorků ve vsázkové teplotní komoře HR-21 36
Obrázek 6-5: Teplotní profil bezolovnatých pájek 36
Obrázek 6-6: Teplotní profil olovnatých pájek 36
Obrázek 6-7: Broušení vzorků 37
Obrázek 6-8: Vzorky po vybroušení 37
Obrázek 6-9: Struktura pájky Sn60Pb40, zvětšeno 2000x 39
Obrázek 6-10: Struktura pájeného spoje Sn60Pb40 na rozhraní s mědí, zvětšeno 2000x 39
Obrázek 6-11: Struktura SAC pájky, zvětšeno 2000x 40
Obrázek 6-12: Struktura pájky SA, zvětšeno 2000x 41
Obrázek 6-13: Struktura pájky SA na rozhraní měď - pájka, zvětšeno 2000x 41
Obrázek 6-14: Struktura pájky na rozhraní SN100C, zvětšeno 2000x 42
Obrázek 6-15: Struktura pájky Sn99Ag+, zvětšeno 2000x 43
Obrázek 6-16: Porovnání struktury pájených spojů Sn60Pb40 při zvětšení 2000x 43
Obrázek 6-17: Struktury pájených spojů Sn60Pb40 44
Obrázek 6-18: - Porovnání struktury pájených spojů SAC při zvětšení 2000x 44
Obrázek 6-19: Struktura pájky SAC chlazené vodou zvětšeno 2000x 45
Obrázek 7-1: Maska pro výrobu testovací desky 47
Obrázek 7-2: Čištění desky plošného spoje kartáčem 47
Obrázek 7-3: Ruční sítotisk fotocitlivé nepájivé masky 48
Obrázek 7-4: a) Expoziční jednotka AY218 , b) teplotní komora HS 157A 48
Obrázek 7-5: a) Expozice motivu na desku, b) desky během vyvolání 49
Obrázek 7-6: Pracoviště ručního šablonového tisku 50
Obrázek 7-7: Teplotní profil běžně pájených a vibrovaných spojů 50
Obrázek 7-8: Vibrační stolice určená pro tvorbu spojů s použitím vibrací 51
Obrázek 7-9: Porovnání povrchu pájky SAC305 při různých pájecích metodách 53
Obrázek 7-10: Porovnání povrchu pájky SN100C při různých pájecích metodách 54
Obrázek 7-11: 3A3N - SAC305 běžně zapájeny 55
Obrázek 7-12: 3A5V - SAC305 s vibracemi 55
Obrázek 7-13: 3A7W SAC s vodním chlazením 55
Obrázek 7-14: 3B3N - SN100C běžně zapájeny 56
Obrázek 7-15: 3B5V – SN100C s vibracemi 56
Obrázek 7-16: 3B4W – SN100C s vodním chlazením 56

Obrázek 7-17: Teplotní profil teplotního šoku 57
Obrázek 7-18: Běžně pájený spoj SAC305 58
Obrázek 7-19: Pájený spoj SAC305 s použitím vibrací 59
Obrázek 7-20: Vodou chlazený spoj SAC305 60
Obrázek 7-21: Běžně pájený spoj SN100C 61
Obrázek 7-22: Pájený spoj SN100C s použitím vibrací 62
Obrázek 7-23: Vodou chlazený spoj SN100C 63
Obrázek 7-24: Grafické znázornění průměrného mechanického zatížení vzorků 64
Obrázek 7-25: Praskliny u stárnutých SAC305 spojů 65
Obrázek 7-26: Praskliny u stárnutých SN100C spojů 66
Obrázek 7-27: Vyhodnocení rentgenových snímku pájky SAC305 zapájené různými metodami 67
Obrázek 7-28: Vyhodnocení rentgenových snímku pájky SAC305 zapájené různými metodami 68
Obrázek 7-29: Běžně pájený spoj SAC305 69
Obrázek 7-30: Pájený spoj SAC305 s použitím vibrací 70
Obrázek 7-31: Vodou chlazený pájený spoj SAC305 71
Obrázek 7-32: Běžně pájený spoj SN100C 72
Obrázek 7-33: Pájený spoj SN100C s použitím vibraci 73
Obrázek 7-34: Vodou chlazený pájený spoj SN100C 74
Obrázek 7-35: Grafické znázornění průměrného mechanického zatížení jednotlivých stárnutých vzorků pájky SAC305 76
Obrázek 7-36: Grafické znázornění průměrného mechanického zatížení jednotlivých stárnutých vzorků pájky SN100C 77
Obrázek 7-37: Porovnání struktur pájených spojů u pájky SAC305 v závislosti na pájecí metodě: 78

Seznam tabulek:

Tabulka 1-1: Vlastnosti prvků v pájkách 11
Tabulka 1-2: Závislost teploty tavení a teploty pájky na použité slitině 13
Tabulka 2-1: Popis stavů v binárním diagramu na obrázku 2 2 15
Tabulka 2-2: Závislost úhlu smáčení na pájitelosti 17
Tabulka 5-1: Teplotní profily jednotlivých cyklů 28
Tabulka 6-1: Označení jednotlivých vzorků 38
Tabulka 7-1: Použité pájecí pasty a jejich slitiny 46
Tabulka 7-2: Seznam vyrobených vzorků 49
Tabulka 7-3: Sledování hmotnosti desky během výrobního procesu 52
Tabulka 7-4: Seznam vzorků pro urychlené stárnutí 57
Tabulka 7-5: Výsledky mechanických testů nestárnutých vzorků 64
Tabulka 7-6: Hodnoty mechanického zatížení stříhaných spojů s pájkou SAC305 75
Tabulka 7-7: Hodnoty mechanického zatížení stříhaných spojů s pájkou SN100C 76

Úvod

Pro zlepšení ochrany životního prostředí bylo do elektroniky zavedeno bezolovnaté pájení (Lead-Free Soldering). Na základě směrnic Evropské unie RoHS (Restriction of Hazardous Substances*)* a WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) se od 1. 7. 2006 musí používat bezolovnaté pájky, až na výjimku některých odvětví průmyslu (zdravotnictví, doprava). Bezolovnatá pájka byla objevena již v polovině 20. století. Rozvoj technologie bezolovnatého pájení však nastává až počátkem 21. století. Jelikož je bezolovnaté pájení ve stádiu rozvoje, není plnohodnotnou náhražkou olovnatého pájení. Nelze garantovat spolehlivost spoje, proto jsou v elektrotechnice uděleny stále výjimky.

Z požadavku zlepšit spolehlivost bezolovnatého pájení je nutné vybrat vhodné pájecí slitiny, definovat a sledovat podmínky pájecího procesu, zkoumat struktury jednotlivých pájených spojů, provádět mechanické zkoušky, provést experiment za účelem zlepšení procesu. Struktury je možné porovnat ve fázích urychleného stárnutí a pozorovat změny ve struktuře a případný růst intermetalických sloučenin. Mechanickými zkouškami je možné vyhodnotit mechanické vlastnosti pájených spojů. Tento údaj vypovídá i o životnosti pájeného spoje.

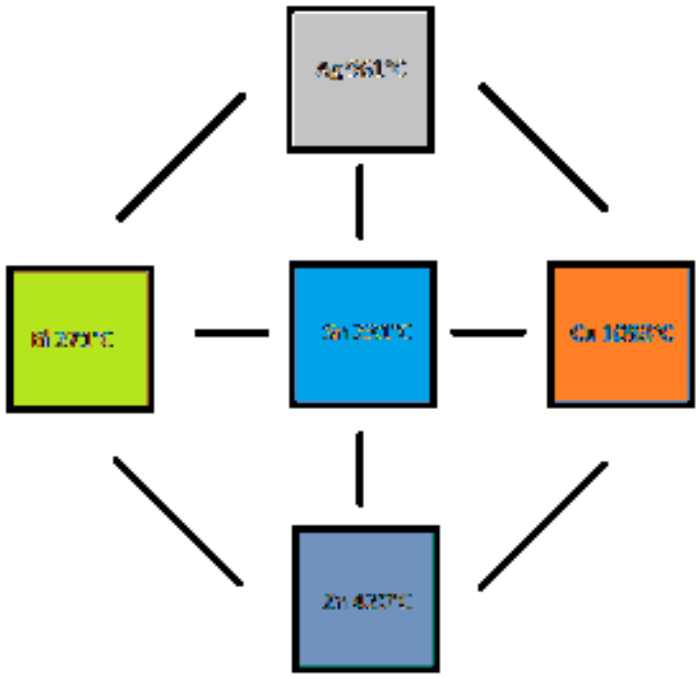
Mezi provedené experimenty pro výzkum spolehlivosti bezolovnatého pájení patří úprava teplotního profilu ve fázi chladnutí spoje a použití přídavných energií během procesu pájení. Úprava teplotního profilu pájeného spoje je realizována vodním chlazením. Přídavné energie během pájecího procesu jsou realizovány pomocí zdroje ultrazvukového vlnění.

Tato práce se zaměřuje na používané slitiny bezolovnatých pájek, analýzu jejich struktur a provedení jednotlivých experimentů.

1 Přehled nejčastějších druhů slitin bezolovnatých pájek

V elektrotechnice se využívá více druhů slitin bezolovnatých pájek. Mezi nejčastěji používané slitiny pájek patří SAC (Sn-Ag-Cu), SC (Sn-Cu), SA (Sn-Ag). Perspektivní slitinou se jeví také SCNi (Sn -Cu-Ni), tato slitina se řadí pod slitiny SC, protože zastoupení niklu v pájce je minimální.

Pro bezolovnaté pájky se používají nejen zmíněné slitiny, ale i různé alternativy. Na obrázku 1-1 jsou znázorněny kombinace prvků pájecích slitin. U každého prvku je uvedena i teplota tavení. Každý prvek v pájecí slitině má svůj význam. Vlivy jednotlivých prvků na vlastnosti pájecí slitiny jsou popsány v tabulce 1-1.



Obrázek 1-1: Alternativy pájecích slitin

Prvek	Vlastnosti
Stříbro (Ag)	snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost a pevnost
Bismut (Bi)	snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost
Měď (Cu)	zvyšuje pevnost
Zinek (Zn)	nízký bod tání, nízká cena
Antimon (Sb)	zvyšuje pevnost, snižuje povrchové napětí
	pro lepší roztékavost a menší pravděpodobnost tombstoningu
Indium (In)	snižuje bod tání
Nikl (Ni)	zabraňuje odsmáčení

Tabulka 1-1: Vlastnosti prvků v pájkách

1.1 SAC - pájky

Jedná se o slitinu cínu, stříbra a mědi. Reprezentantem této slitiny je pájka s označením SAC 305, která obsahuje 96,5% cínu, 3% stříbra a 0,5% mědi. Eutektická teplota tavení SAC pájek je v rozsahu 216 - 217 °C. Tato teplota je nižší o 10 °C narozdíl od pájek SC. Tento pokles teploty tavení způsobuje stříbro. Pájek SAC je více druhů, odlišných podle poměrů jednotlivých složek. Poměr jednotlivých složek SAC slitin se neprovádí z důvodu snížení teploty přetavení, ale za účelem změny mechanických vlastností. V SAC pájkách dochází ke vzniku intermetalických sloučenin, které mají vliv na životnost pájeného spoje. Tyto intermetalické sloučeniny zastupují Cu_6Sn_5, Cu_3Sn a Ag_3Sn. Více informací k jednotlivým slitinám je možno naleznout v literatuře [1].

1.2 SC - pájky

Jedná se o slitinu cínu a mědi. Nejčastěji používaná slitina pájek SC je při složení 99,3% cínu a 0,7%. Eutektická teplota tavení SC pájek je v rozsahu 227 °C. Tato teplota je nižší pouze o 5 °C než teplota tavení cínu. V SC pájkách dochází také ke vzniku intermetalických sloučenin Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn.Více informací k pájkám SC je možno naleznout v literatuře [1].

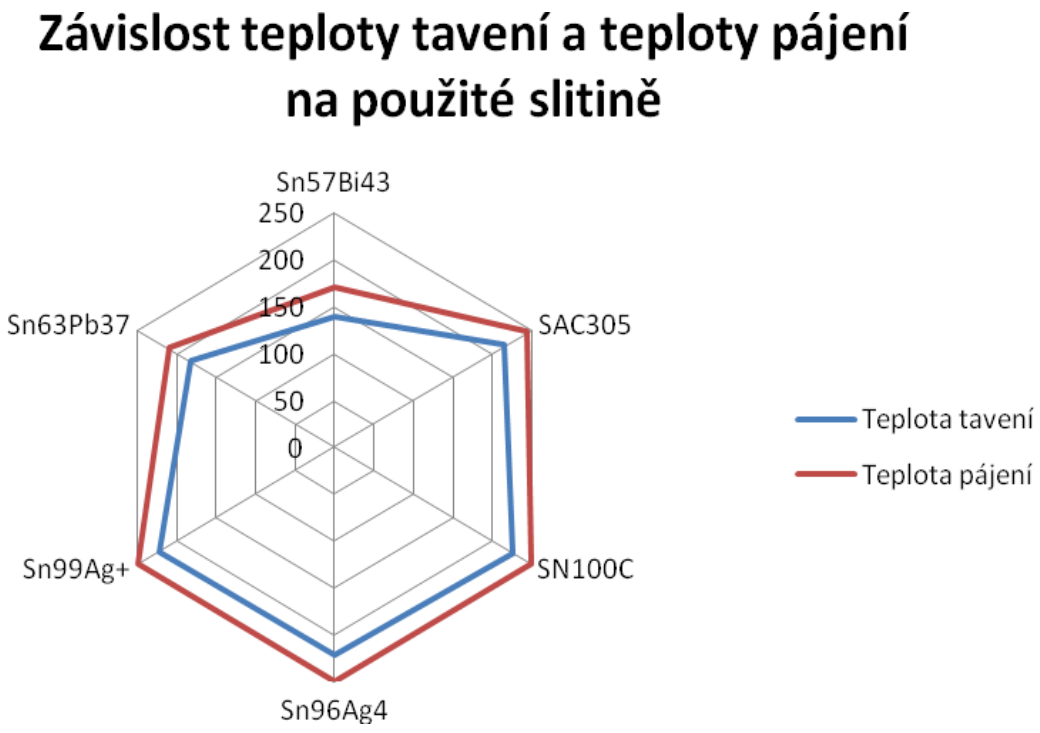
SCNi- Jedná se o perspektivní bezolovnatou slitinu. Slitina je složena z cínu, stříbra, mědi a niklu. Obsah cínu v těchto pájkách se pohybuje v rozsahu 92,5 - 99%, obsah mědi 0,4 - 5%, obsah niklu 0,05 - 2%. Teplota tavení u těchto slitin se pohybuje v rozmezí 216 - 238 °C. Zástupce této slitiny je pájka SN100C od společnosti Nihonsuperior. U pájky SN100C je bod tavení 227 °C. Složení pájky je stejné jako u eutektické pájky SC, ale jsou přidány stopové prvky niklu a germania. SN100C obsahuje 0,01%Ni a 0,005%Ge. Tyto prvky jsou obsaženy v pájce zdánlivě v zanedbatelném množství, ale ovlivňují vlastnosti pájky jako např. smáčivost. Více informací k pájkám SCNi je možno naleznout v literatuře [1] a [10].

1.3 SA - pájky

Jedná se o slitinu cínu a stříbra. Nejčastěji používaná slitina pájek SA je při složení 96% cínu a 4% stříbra. U těchto pájek dochází ke vzniku intemetalických sloučenin ve struktuře pájeného spoje. Vzniklou intermetalickou sloučeninou je Ag_3Sn. Teplotou tavení u těchto pájek je 221 °C. Více informací k pájkám SA je možno naleznout v literatuře [1].

1.4 SB – pájky

Jedná se o slitinu cínu a bizmutu. Tyto pájky se vyznačují nízkým bodem tavení. Teplota bodu tavení je nižší než 180°C. Těchto pájek se využívá u spotřební elektroniky. Pájky SB jsou levnější než předchozí typy bezolovnatých slitin, ale mají horší mechanické vlastnosti. Eutektická slitina pájek SB je při složení 57% cínu a 43% bizmutu. U těchto pájek nedochází ke vzniku intemetalických sloučenin ve struktuře pájeného spoje a struktura se podobá olověným pájkám. Teplotou tavení u těchto pájek je 139°C. Více informací k pájkám SB je možno naleznout v literatuře [1] a [2]



Tabulka 1-2: Závislost teploty tavení a teploty pájky na použité slitině

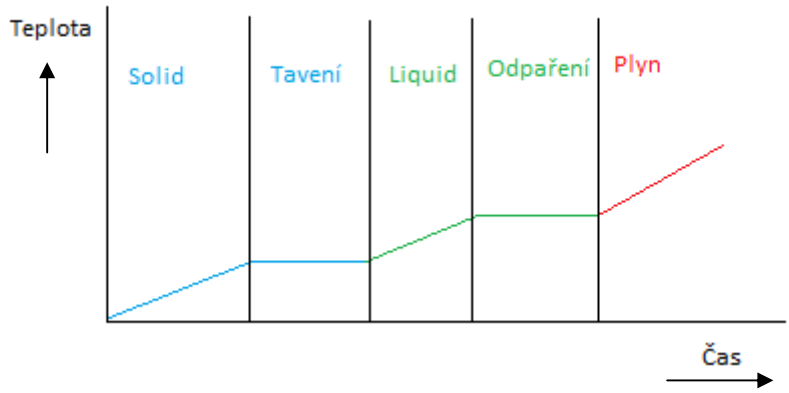
2 Základní vlastnosti pájených spojů

Pro studium spolehlivosti pájených spojů je nutné mít znalosti z oblasti pájení. Faktorů, které ovlivňují spolehlivost spojů, je mnoho. Proto je potřeba zkoumat každou část pájecího procesu zvlášť a mít o dané problematice přehled. Tato kapitola se zaměřuje na základní vlastnosti pájených spojů a na povrchové úpravy desek plošných spojů.

2.1 Tavení a tuhnutí pájek

Proces přetavení je úzce spojený se shlukováním materiálu (pevný stav, kapalný stav a plynná fáze). Je-li konstantní množství energie, ve formě tepla, dodáno do krystalického materiálu, v nejjednodušších případech dochází k počátečnímu ohřevu a lineárnímu chování v čase. Ke stabilnímu přetavení dochází až tehdy, je-li dodáno více energie. Po určitém čase je roztavený materiál opět zahříván, dokud není dosažena teplota odpaření. Teplota zůstává nezměněna, dokud všechna tavenina není odpařena. Další vstup energie do soustavy způsobí pouze lineární zahřívání páry. Změna stavu seskupení materiálu je znázorněna na obrázku 2-1.

Zhodnocení tohoto chování je následující. Když je materiál přetaven, změní se jeho stav seskupení. Tímto je myšleno, že atomy materiálu začínají intenzivně kmitat a krystalická struktura materiálu se rozpadá. Atomy se mohou po rozpadnutí krystalické struktury pohybovat volněji. To způsobuje nárůst entropie a proces přetavení je závislý na množství dodané energie. Tyto jevy popisuje zákon termodynamiky.



Obrázek 2-1: Změna stavu seskupení materiálu

Proces tuhnutí pájeného spoje nastává po přechodu pájky do tekutého stavu a přerušení dodávek tepelné energie. Spoj se začne ochlazovat a obnovují se vazby mezi jednotlivými atomy a formuje se struktura spoje. Struktura je opět závislá na energii, která je ze spoje odebírána. Fáze chlazení spoje je velmi důležitá část teplotního profilu obdobně jako předehřev a samotné přetavení.

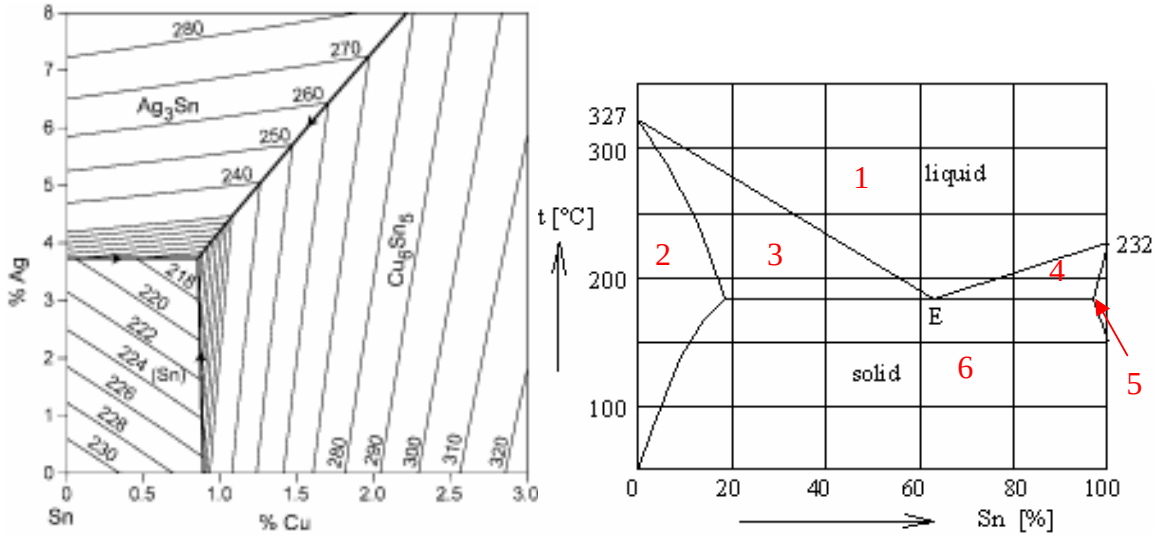
2.2 Fázové diagramy

Fázové diagramy vyjadřují fázi (skupenství) látek v závislosti na teplotě. U eutektických binárních směsí má v tomto diagramu křivka rozhraní mezi kapalným a pevným skupenstvím typický vzhled připomínající písmeno V,. kde takzvaný eutektický bod (bod s nejnižší teplotou tání) leží na ose teploty nejníže, níže než teploty tání obou čistých složek. Pokud alespoň jedna ze složek směsi je kov, nazýváme takovou soustavu namísto obecnějšího pojmu směs pojmem slitina.

Binární diagram pájky SnPb a ternární diagram pájky SAC je znázorněn na obrázku 2-2. Terciální diagram popisuje závislost teploty přetavení pájky v závislosti na jejím složení. V binárním diagramu se vyskytuje 6 stavů, které popisuje Tabulka 2-1.

1	Oblast, kde je slitina v kapalném skupenství (křivka ve tvaru širokého V ohraničující tuto oblast zespoda se nazývá křivka liquidu)
2	Atomy olova jsou plně rozpuštěny v krystalové mřížce cínu (levá část diagramu)
3	Kapalná slitina, ve které se tvoří pevné krystalky tuhého roztoku olova v cínu
4	Kapalná slitina, ve které se tvoří pevné krystalky tuhého roztoku cínu v olovu
5	Atomy cínu jsou plně rozpuštěny v krystalové mřížce olova
6	Obě látky jsou v pevném stavu ve formě vzájemně promíchaných krystalků (křivka typicky ve tvaru obráceného U pod touto oblastí se nazývá křivka solidu)

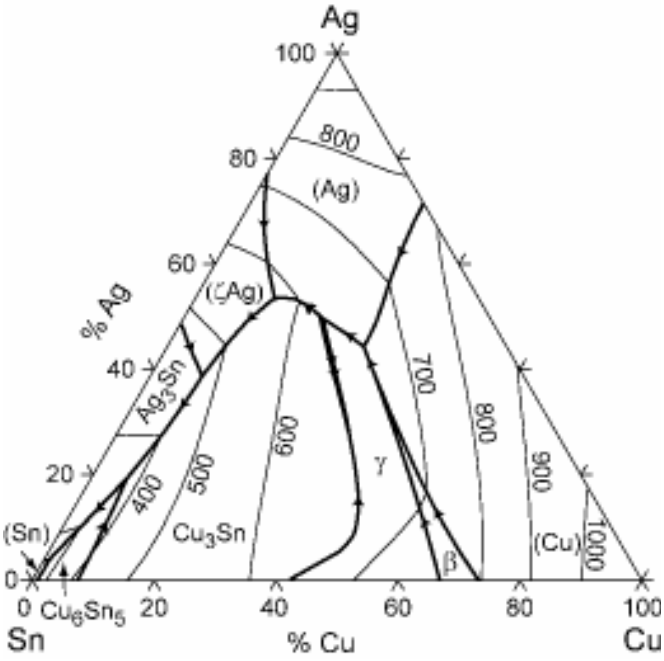
Tabulka 2-1: Popis stavů v binárním diagramu na obrázku 2 2



Obrázek 2-2: Fázové diagramy pájek. (a - bezolovnaté pájky SAC, b - olovnatá pájka SnPb) [1]

2.3 Intermetalické fáze

Intermetalická fáze je homogenní chemická sloučenina tvořená z dvou nebo více kovů. Intermetalické fáze vznikají z důvodu rozdílných struktur mřížky, které se liší od vedlejšího kovu ve fázovém diagramu. To je způsobeno sloučením různých chemických vazeb (kovová, iontová a kovalentní). Sloučenina intermetalické fáze vzniká v souladu nastavení poměru slitin kovů. Závislost vzniku intermetalických sloučenin na složení pájky je znázorněna na obrázku 2-3.



Obrázek 2-3: Vznik intermetalických sloučenin v závislosti na složení pájky[1]

2.4 Smáčivost [1]

Smáčivost plochy je vlastnost vyjadřující schopnost vytvořit na jejím povrchu při styku s roztavenou pájkou souvislou vrstvu pájecího materiálu. Pájka musí mít při pájení dobrou vzlínavost a přilnavost, aby se po celém povrchu pájeného materiálu vytvořila tenká a souvislá vrstva. Pro hodnocení smáčivosti povrchu roztavenou pájkou jsou důležité dva hlavní faktory:

1. Stupeň smáčivosti, který udává jak daleko se pájka po povrchu rozteče.

2. Rychlost smáčení, což je rychlost roztavení a roztečení pájky. Závisí na účinnosti použitého zdroje tepla, typu použitého tavidla a na probíhajících chemických reakcích.

Samotná roztavená pájka má vlastnosti kapaliny, což znamená, že v důsledku malých středních vzdáleností mezi molekulami působí relativně velké přitažlivé síly. Proto se pájka

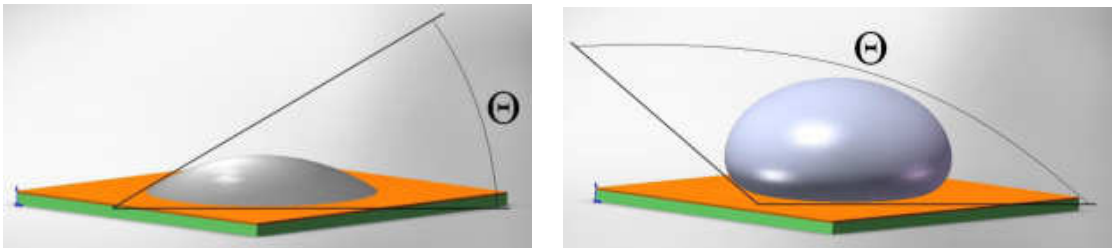
snaží zaujmout kulový tvar, protože při tomto uspořádání je při daném objemu nejmenší střední hodnota vzájemných vzdáleností libovolných dvojic bodů - má nejmenší povrch.

Roztavená pájka se chová, jako by byl její povrch tvořen tenkou, napnutou blánou snažící se neustále o zmenšování svého celkového povrchu. Síla působící v tomto smyslu na délkovou jednotku se nazývá povrchové napětí. Je vždy kolmá na délku, na které působí. Obrys povrchu pájky se snaží zaujmout rovnovážný stav odpovídající minimální hodnotě energie nahromaděné na povrchu pájky.

Přijde-li roztavená pájka do styku s pájecí plochou, pak v důsledku smáčivosti dochází k interakci povrchového napětí v pájce s povrchovým napětím vznikajícím mezi pájkou a pájecí plochou. Je-li povrch smáčivý, je adhezní konstanta kladná, nastává kapilární elevace a tvar menisku je dutý. V případě nesmáčivosti je naopak vypouklý. Pro vytvoření spolehlivého pájeného spoje je nezbytné dosáhnout dobré smáčivosti jak na součástce, tak na kontaktní ploše.

Smáčivost je ovlivňována kromě typu smáčeného materiálu celou řadou dalších faktorů, jako je například složení pájecí slitiny a obsah nečistot v ní obsažených, drsnost pájených povrchů, stupeň oxidace pájených ploch apod.

Definice smáčecího úhlu je znázorněn na obrázku 2-4. V tabulce 2-2 je znázorněna závislost klasifikace pájitelnosti v závislosti na smáčecím úhlu.



Obrázek 2-4: Definice smáčecího úhlu

Velikost úhlu smáčení	Klasifikace pájitelnosti
0° < Θ ≤ 20°	výborné až dokonalé smáčení
20° < Θ ≤ 40°	dobré až velmi dobré smáčení
40° < Θ ≤ 55°	postačující smáčení
55° < Θ ≤ 90°	špatné smáčení
90° < Θ	nesmáčivost

Tabulka 2-2: Závislost úhlu smáčení na pájitelosti

2.5 Povrchové napětí [3]

Jestliže je tekutina umístěna na nějakém povrchu, zmenší se její tvar. V závislosti na převládajících obecných podmínkách (typ kapaliny, substrátu, prostředí, teplotě) se kapka (kapaliny) zužuje nebo roztahuje. Kapka nemusí být tvarována jako kulovitý vrchlík, ale může se skládat ze dvou poloměrů.

Aby bylo možné vytvoření objemu s klenutým povrchem na substrátu, musí existovat rozdíl tlaku mezi vnitřním objemem kapaliny a vnějším prostředím. Tlak vnitřního objemu kapaliny musí být větší než tlak prostředí, protože jinak by se kapka rozpadla.

Povrchové napětí γ je definováno prostřednictvím kvality materiálu a je měřeno jako energetický stav atomů na rozhraní povrchů, vyjádřené měrnými jednotkami J/m2.

Příčinou povrchového napětí je, že daný atom v objemu materiálu je obklopen ve všech směrech jinými atomy převážně téhož prvku v krystalické mřížce kovu. Zde neexistují žádná pouta s atomy na povrchu. Ty jsou nahrazeny vazbami atomu s okolním prostředím, které se liší od těch v objemu materiálů. To je důvod, proč atomy na povrchu vykazují jiný energetický stav než v objemu materiálu.

Atomy v objemu materiálu jsou obklopeny sousedními atomy ve všech směrech, se kterými jsou vázány.

Energetický stav na hranici plochy může být popsán následujícími rovnicemi.

$$E = \gamma \cdot A \Rightarrow \gamma = \frac{E}{A} \qquad (2.1)$$

E – povrchová energie [J]
γ - povrchové napětí [J/m^2]
A – plocha povrchu [m^2]

Každá hranice plochy má své vlastní povrchové napětí:

γ_{SP} (substrát - prostředí) pokovená DPS – tavidlo
γ_{SK} (substrát - kapalina) pokovená DPS – pájka
γ_{KP} (kapalina - prostředí) pájka – tavidlo

Podle přírodního zákona se každý systém snaží minimalizovat volnou energii, proto se snaží systém substrát - pájka - prostředí snížit povrchovou energii, což představuje interakce okrajových povrchů všech zúčastněných materiálů:

$$\gamma_{SP} \cdot A_{SP} + \gamma_{SK} \cdot A_{SK} + \gamma_{KP} \cdot A_{KP} = \min._ energie \qquad (2.2)$$

γ - povrchové napětí [J/m^2]
A – plocha povrchu [m^2]

Je-li rozšíření a pokles kapky vnímán jako interakce sil způsobených povrchovým napětím následující výsledky vyplývají ze vztahu:

$$\gamma_{SP} = \gamma_{SK} \cdot \gamma_{KP} \cdot \cos\Theta \text{ (Youngova rovnice)} \qquad (2.3)$$

γ - povrchové napětí [J/m^2]
Θ - smáčecí úhel [°]

Kapky pájky vykazují vyklenuté plochy. Nejen systém substrát – pájka ovlivňuje smáčení. Prostředí, jako mezní vrstva mezi substrátem a tavidlem, je velmi důležité. To vysvětluje vliv složení tavidla a atmosféry na smáčivost při procesu pájení.

2.6 Difúze [3]

Difúze je řídící mechanizmus pájecího procesu umožňující vzájemné spojení mezi pevnými materiály bez potřeby tavení. Souvisí s pohybem atomů. S rostoucí teplotou materiálů vzrůstá i kinetická energie atomů. Při teplotě absolutní nuly (0 Kelvinů) je pohyb atomů zastaven. S narůstající teplotou začnou atomy kmitat kolem svých rovnovážných poloh v krystalové mřížce. Pokud teplota neustále roste, kinetická energie atomů dospěje k bodu, kdy jsou vazební síly mezi atomy překonány, atomy se začnou pohybovat po náhodných drahách, omezených hranicemi systému. Nastane podobný stav, k jakému dochází při pohybu atomů v kapalině nebo plynu. Materiál změní skupenství.

Jestliže by byl pozorovaný materiál uzavřen v nádobě s víkem s otvory, vlivem difúze by některé atomy procházely ven a zase dovnitř. Po určitém čase by se počet atomů na jednotku objemu uvnitř i vně nádoby ustálil na stejné průměrné hodnotě. Propustnost víka lze tedy charakterizovat počtem atomů, které projdou určitým průřezem za jednotku času. Takto lze popisovat propustnost clonky nebo difúzní koeficient D uvnitř pevných látek.

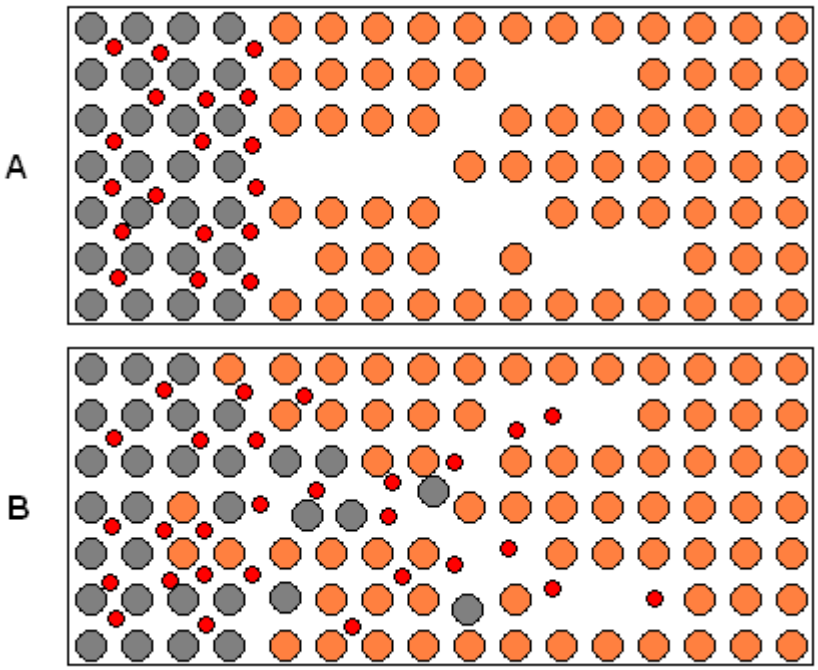
Se zvyšující se teplotou roste i pravděpodobnost, že atomy uniknou skrz otvory ve víku. Difúzní koeficient je tedy závislý na teplotě. Z fyzikálních zákonů lze potom odvodit vztah pro difúzní koeficient závislý na teplotě.

$$D(J) = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \qquad (2.4)$$

D(J) - difúzní koeficient jako funkce teploty
D0 - difúzní koeficient konkrétního materiálu
R - universální plynová konstanta [J/mol .K]
T - teplota [K]
Q - aktivační energie [J/mol]

Propustnost víka lze zevšeobecnit do oblasti pevných látek. Pevné látky jsou na atomové úrovni tvořeny krystalickou mřížkou, která prochází neustálými změnami, atomy se mohou volně pohybovat z místa na místo.

Jakmile se pájka dostane do kapalné fáze, prvky obsažené v ní se vlivem difúze začnou šířit do struktury základního substrátu a některé atomy základního substrátu se rozpustí v pájce. Pájka se skládá z atomů o různých velikostech, v důsledku toho mohou některé atomy pronikat hlouběji ve větším množství do základního materiálu (pájené plochy) než atomy jiné



Obrázek 2-5: Vliv difúze při různých teplotách, A) Pájka při pokojové teplotě, B) pájka při teplotě vyšší než bod tavení

2.7 Pájení spoje [3]

Předchozí kapitoly popisovaly jednotlivé jevy v pájení a nyní budou objasněny na skutečném pájení (reflow, pájení vlnou). V první řadě je třeba předpokládat, že kovový povrch základního materiálu oxiduje. Této oxidaci nelze zabránit, vzniká okamžitě za přítomnosti kyslíku. Vzhledem k tomu, že povrch základního materiálu je zoxidovaný, pájecí slitina se špatně smáčí a nemůže vytvořit dostatečně kvalitní spojení. Proto se přímo do pájky

přidávají další materiály, které napomáhají odstraňovat některé negativní vlivy. U reflow technologie je pájecí pasta nanesena na zoxidovaný povrch. Pasta je tvořena z tavidla, aktivátorů, pájky v podobě zrn a několika dalších technologicky nezbytných látek.

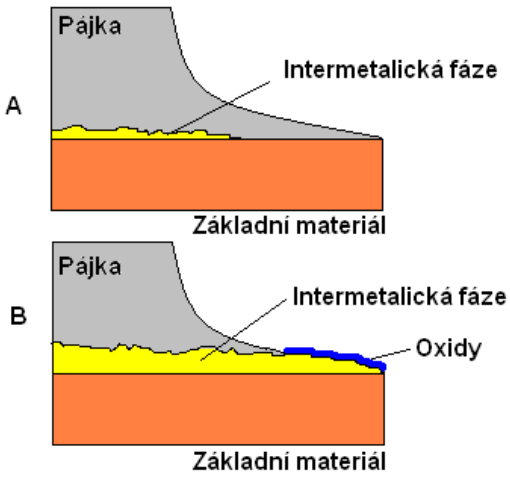
V případě pájení vlnou je tavidlo na kovový povrch nastříknuto nebo naneseno ve formě pěny. Tavidlo obsahuje složky, které při určité teplotě začínají být chemicky aktivní. Přírodní formy tavidla (např. kalafuna) jsou chemicky aktivní stále. Činnost syntetických tavidel je závislá na charakteru přídavných látek. Konkrétní složení přídavných látek si každý výrobce pečlivě chrání. Jsou používány např. kyselina fosforečná nebo jantarová. Tavidlo chrání pájecí pastu před oxidací.

Po osazení je DPS předehřátá na stanovenou teplotu. Výsledkem je aktivace tavidla, které začne reagovat s oxidy na povrchu materiálu, a také zahřátí celého systému na teplotu blízkou přetavení. Molekuly tavidla tvoří vazby, na které se začne vázat kyslík, obsažený v základním materiálu. Kromě toho, tavidlo chrání pájený povrch před opětovnou reoxidací.

V závislosti na agresivitě aktivačních příměsí mohou na povrchu základního materiálu vznikat oxidy mědi a niklu. Vytvářejí se tak intermetalické fáze, které se dají jen velice těžko odstranit. Proto některá tavidla obsahují halogeny.

V roztaveném stavu je pájka vysoce reaktivní, velmi snadno oxiduje, pokud není chráněna tavidlem. Vlivem difúze atomů pájky do základního materiálu a stejně tak i atomů základního materiálu do pájky, se vytvoří pevná slitina. Během tohoto procesu vzniká intermetalická fáze. Čím vyšší je teplota, tím kratší je doba potřebná pro tuto reakci.

Během pájecího procesu se pájka roztéká po základním materiálu. Intermetalické fáze se formují se zpožděním oproti smáčivosti pájky. Avšak je-li čas pájení příliš dlouhý, intermetalické fáze začnou „prorůstat“ do pájky a budou růst tak dlouho, dokud se povrchové napětí pájky nedostane do rovnovážného stavu nebo neskončí pájecí proces. Tento jev je znázorněn na obrázku 2-6



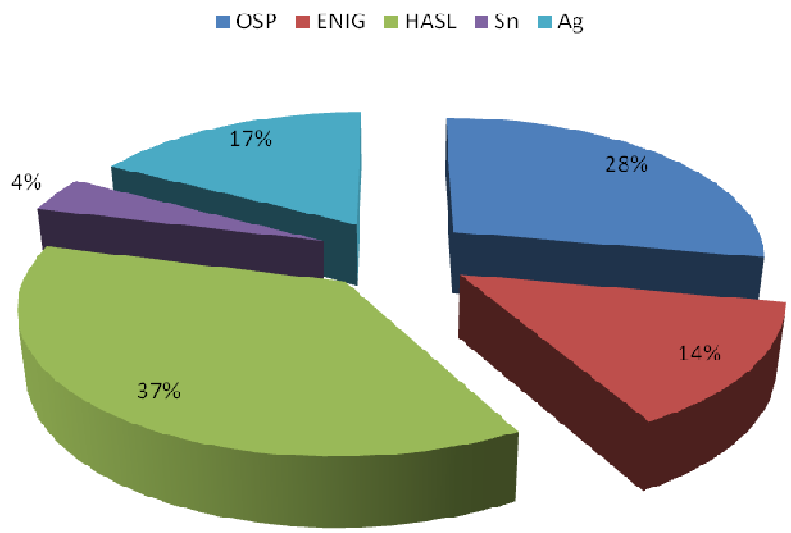
Obrázek 2-6: Vznik intermetalických fázi a oxidů

3 Úpravy desek plošných spojů pro bezolovnaté pájení

Úpravy desek plošných spojů tvoří nedílnou součást povrchové montáže. Povrchová úprava desek plošných spojů ovlivní výslednou spolehlivost pájených spojů. Mezi funkce povrchové úpravy desek plošných spojů patří:

- Zamezit oxidaci mědi
- Zajistit dlouho dobu skladovatelnosti
- Zlepšit pájitelnost

Mezi nejčastější využívané povrchové úpravy desek plošných spojů patří: HASL, OSP, ENIG, imerzní stříbro a imerzní cín. Celosvětový trend zastoupení jednotlivých povrchových úprav je znázorněn na obrázku 3-1.



Obrázek 3-1: Zastoupení povrchových úprav v celosvětové produkci

3.1 HASL

HASL (Hot Air Solder Leveling) je nejrozšířenější povrchová úprava desek plošných spojů, kdy deska je ponořena do roztavené pájky, která navzlíná na plošky. Přebytečná pájka je odstraněna proudem horkého vzduchu. Jelikož smáčecí úhel pájky není nulový, dochází k nerovnosti nanesené vrstvy.

Výhody: - Možné teplotní zatížení desky před pájením

- Cena

Nevýhody: - Špatná rovinnost pájecí plošky

- Teplotní šok pro desku plošného spoje

- Nemožnost kontaktování

- Snížená spolehlivost vlivem deformace desky plošného spoje

3.2 OSP

OSP (Organic Surface Protectives) - působením ultrazvuku se měděný povrch zbaví prachových nečistot, poté dojde k mikrozaleptání, kde se měděné povrchy dočistí a následně se ponoří do lázně organických inhibitorů na bázi benzoimidazolu. Takto vytvořená povrchová úprava disponuje lepší rovinatostí, DPS nejsou vystaveny tepelnému namáhání, jako u HASL. Povrchová úprava vydrží asi šest měsíců, v závislosti na skladovacích podmínkách. Pak ji lze stejným procesem obnovit.

3.3 ENIG

ENIG (Electroless Nikle Immersion Gold) - chemické nanášení zlata přes vrstvu niklu. Vyznačuje dobrou pájitelností i pro bezolovnaté slitiny. ENIG je svou povahou sofistikovanější metoda, která vyžaduje pečlivou údržbu, jinak dojde k vytváření vadných pájených spojů prostřednictvím nedokonalé povrchové úpravy.

Imerzní stříbro a cín, jedná se o metodu pocínování nebo postříbření ponorem. Upravené povrchy jsou perspektivní především pro bezolovnaté pájky. Postupem času však vytvářejí intermetalické vrstvy.

4 Zkoumání struktur pájených spojů

Vědní obor, který se zabývá zkoumáním struktur, se nazývá metalografie. Zkoumání struktury se provádí na elektronovém mikroskopu JEOL 6460LV, který je k dispozici na Akademii věd České republiky. Z tohoto důvodu je nutné dobře připravit zkoumaný vzorek.

4.1 Metalografie

Metalografie je nauka, která pojednává o vnitřní stavbě kovů a slitin. Jejím cílem je zviditelnění struktury materiálu a následné studium pomocí optického či elektronového mikroskopu.

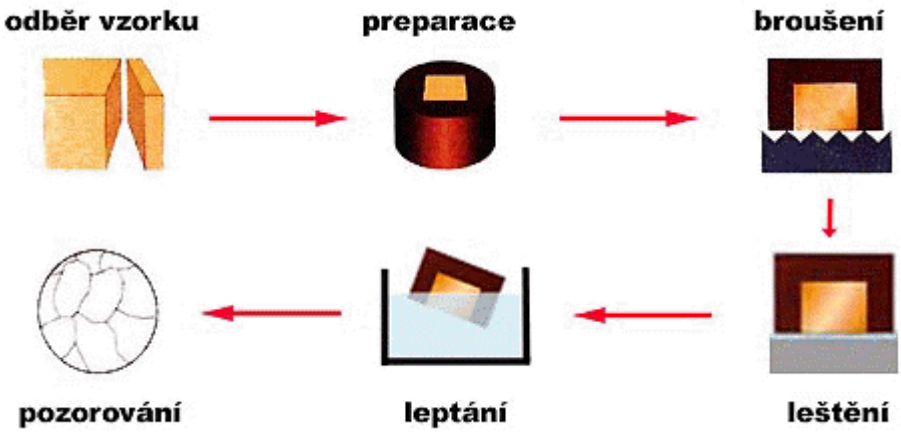
Metalografie umožňuje:

- zjišťovat souvislosti mezi strukturou materiálu a jeho vlastnostmi
- sledovat a kontrolovat vlastnosti materiálu při jeho výrobě a zpracování (průběžná mezioperační kontrola)
- hledat příčiny vad materiálu nevyhovujících výrobků nebo vysvětlit důvody selhání nějakého zařízení

Kovy a jejich slitiny jsou materiály neprůhledné a k jejich pozorování tedy používáme optické mikroskopy v režimu odrazu. A protože nejvyšší odrazivost mají plochy dokonale rovné a hladké, naším cílem bude připravit vzorek právě s takovou plochou. Postup přípravy vzorku pro pozorování (tzv. metalografického výbrusu) se skládá z několika na sebe navazujících kroků:

- odběr vzorku
- preparace vzorku (pouze u některých vzorků)
- broušení
- leštění
- leptání

Jednoduché schéma postupu je na obrázku 4-1. Každý z uvedených kroků velmi výrazně ovlivňuje kvalitu výsledného metalografického výbrusu, a proto se preciznost provedení každého kroku projeví na budoucích možnostech pozorování vzorku. V případě, že při zkoumání vzorku dochází k jeho nabíjení, provádí se zvodivění povrchu vzorku napařením uhlíku. [4]



Obrázek 4-1: Postup tvorby metalografického výbrusu [4]

4.2 Zkoumání struktury pomocí SEM

4.2.1 Skenovací elektronový mikroskop JEOL 6460LV

JEOL 6460LV je SEM elektronový mikroskop s nízkým vakuem (1-270Pa). V tomto typu SEM je elektronový paprsek vyzařovaný z termoionizačního elektronového děla, které obsahuje katodu z wolframového (tungstenového) vlákna. Tento typ katody se běžně používá v termoionizačním elektronových dělech, protože má nejvyšší teplotu tavení a nejnižší tlak par ze všech kovů, což umožňuje zahřátí až na elektronovou emisi. Vyprodukovaný elektronový paprsek má energii nastavitelnou od stovek eV až do 40keV, je zaměřený dvěma dělícími objektivy na místě do 3nm. Paprsek prochází dvěma vychylovacími deskami, které vychylují paprsek v směru os x a y tak, že skenuje raster ve tvaru obdélníkové oblasti na povrchu vzorku.

Když primární elektronový paprsek reaguje se vzorkem, elektrony ztrácejí energii opakovaným náhodným rozptylem a absorpcí v objemu v tvaru kapek ve vzorku, známe jako objemová interakce, která sahá od méně než 100nm do 5μm do povrchu. Rozsah objemové interakce závisí od energie dopadajícího elektronu, atomového čísla a hustoty vzorku. Při výměně energií mezi elektronovým svazkem a vzorkem dochází k odrazu elektronu s vysokou energií elastického rozptylu, emisí sekundárních elektronů nepružným rozptylem a emisí elektromagnetického záření, přičemž každé je zachycené specializovanými detekčními zesilovači, zobrazené jako změny jasu na digitálním snímači. Rastrové snímání na CRT obrazovce je synchronizované se svazkem dopadajícím na vzorek v mikroskopu a proto je výsledný obraz distribuční mapa intenzity signálu, emitovaného ze skenované oblasti vzorku. Obrázek je zachytávaný jako fotografie a zobrazená na monitorech počítačů. Zvetšení je možné nastavovat v rozsahu od x5 až do x300000. Mikroskop je vybavený EDS, kterým je

možné vykonávat chemickou analýzu vzorků v rozmezí C – U, a podobné mapovaní rentgenovým zářením. Mimo detekci BE a BSD je k dispozici také EBSD kamera na zobrazování krystalografických detailů např. rozložení zrnitosti, pólový profil a orientace krystalů. Elektronový mikroskop JEOL 6460LV je znázorněn na obrázku 4-2



Obrázek 4-2: Elektronový mikroskop JEOL 6460LV

4.2.2 Detekce sekundárních elektronů (SE)

Nejpoužívanější metoda zobrazení, zobrazuje elektrony s nízkou energií (<50eV), zvané sekundární elektrony, které jsou vystřelované ke k-orbitalům atomů vzorků nepružným rozptylem interakcí s paprskem elektronů. Díky jejich nízkým energiím se tyto elektrony nachází několik nanometrů od povrchu vzorku. Elektrony jsou detekované pomocí Everhar-Thornley detektoru. Sekundární elektrony jsou z počátku sbírány přitahováním na elektrickou mřížku s předpětím 400V a potom dále ke kladně nabitému scintilátoru na +2000V. Takto urychlené sekundární elektrony jsou dostatečně nabité, aby mohly zapříčinit emisi světelných záblesků (katodoluminiscenci), které jsou vedené fotonásobičem mimo blok SEM přes světelnou trubičku a okénko na stěně vzorkové komory. Zesílený elektrický signál na výstupu fotonásobiče je zobrazován jako dvojrozměrné rozložení intenzity, které je možné sledovat, nebo zaznamenat digitálním snímačem. Tento proces závisí na rastrovo-skenovacím primárním paprsku. Jas signálu závisí na množství dopadajících sekundárních elektronu na detektor. Když paprsek elektronů dopadá na vzorek kolmo k jejich povrchu, potom je aktivní oblast rovnoběžná s osou paprsku a nějaký počet elektronů může uniknout směrem do vzorku.

Zvětšováním úhlu dopadu začne úniková vzdálenost z jedné strany paprsku klesat a bude více emitovaných elektronů. Proto strmé povrchy a okraje můžou být světlejší než ploché povrchy, což se na obrázcích jeví jako třírozměrné zobrazení. Použitím této techniky je možné dosáhnout rozlišení do 3nm.

4.2.3 Detekce zpětně rozptýlených elektronů (BSE)

Zpětně rozptýlené elektrony zůstávají z elektronů s vysokou energií, vznikajících v elektronovém paprsku, které jsou odražené, nebo zpětně rozptýlené z interakční oblasti vzorku, interakčním pružným rozptylem s atomy vzorku. Prvky (s vysokým atomovým číslem) zpětně odrážejí elektrony silnější jako lehčí prvky (nízké atomové číslo), a proto se jeví jasnější na obrázku, BSE se používá na zjišťování odlišnosti mezi oblastmi s různým chemickým složením. Everhart-Thornley detektor, který je běžně umístěný na straně vzorku, je nepoužitelný pro detekci zpětně rozptýlených elektronů, protože jen málo elektronů je emitovaných v pevném úhlu opačným k detektoru, a protože kladně nabitá detekční mřížka má malou možnost přitahovat elektrony s vysokou energií. Detektory určené na detekci BSE jsou umístěné nad vzorkem v kruhovém uspořádaní, soustředěné k elektronovému paprsku, pro maximalizaci pevného úhlu pro sběr BSE. Detektory jsou scintilačného typu. Když jsou všechny části detektoru symetricky použité na sběr elektronů nad paprskem, vytvoří se rozdíl v atomových číslech prvků vzorku. Navzdory tomuto, se sběrem SEM vytvoří silný topografický rozdíl na jedné straně nad vzorkem, při použití asymetrického směrového detektoru BSE, a vzniknutý rozdíl se jeví jako osvětlení topografie z této strany.

4.2.4 Detekce difrakce zpětně rozptýlených elektronů (EBSD)

EBSD je vykonávaná pomocí SEM, který je vybavený kamerami zachytávající difrakci zpětných rozptylů. Kamera je sestavena z fosforové obrazovky, která je vložená do komory se vzorky, pod úhlem rovným 90° ke vzorku a CCD kamery na konci světelné trubice, na zachytávání obrazu na fosforové obrazovce. Na plocho vybroušený krystalický vzorek je vložený do komory, ale je nakloněný (horizontálně o 70°) směrem k difrakční kameře. Když začnou elektrony dopadat na vzorek, reagují s jejich hladinami atomové mřížky krystalické mikrostruktury, většina těchto interakcí splňuje Braggovu podmínku a přejde k zpětně rozptylové difrakci. Kvůli úhlu postavení vzorku můžou odrazené elektrony uniknout z materiálu a jsou nasměrované směrem na fosforovou obrazovku, která po nárazu vyzáří světlo, které je zachycené nízkosvětelným CCD snímačem.

5 Sledování spolehlivosti pájených spojů

Sledování spolehlivosti pájených spojů je následující. V prvním kroku je nutné vyrobit určité množství testovaných vzorků za stejných procesních podmínek (stejná pájka, stejný teplotní profil, stejné množství pájky a tavidla), nejlépe vyrobit všechny vzorky během jednoho pájecího procesu. Poté je nutno prozkoumat prvotní strukturu pájeného spoje po zapájení na elektronovém mikroskopu. To znamená provést mikrovýbrus, viz kapitola 3. Zbylé vzorky je nutné nechat uměle zestárnout z důvodu simulace běžných pracovních podmínek pájeného spoje. Po části umělého stárnutí je možně prozkoumat změnu struktury pájených spojů a porovnat s předchozími výsledky.

Další možností je provádět mechanické zkoušky během umělého stárnutí. Mezi tyto zkoušky patří mechanické namáhání v tahu nebo ve střihu. Následně je možné vyhodnocovat místo praskliny pájeného spoje a sílu, při které k prasklině došlo.

5.1 Urychlené stárnutí

Urychlené stárnutí je realizované pomocí teplotního cyklování nebo teplotního šokování. Výběr režimu teplotního cyklování používaného k vyhodnocení spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů je kritický, neboť relativní schopnosti různých pájecích slitin se mohou změnit s hodnotami teplotního cyklu (ustálené teploty, čas, poměry sklonů mezi jednotlivými teplotními charakteristikami). Čím větší teplotní rozsah a čím větší počet cyklů, tím větší je výsledné poškození pájeného spoje. Velice podstatné je, aby zvolený režim teplotního cyklování odpovídal co nejvěrohodněji předpokládanému pracovnímu prostředí zkoumaného produktu, například armáda, automobilový průmysl, spotřební průmysl atd.

V posledních letech automobilový a letecký průmysl preferoval používání stejných cyklovacích režimů -55 až 125 °C. V současné době se toto cyklování jeví vhodné pro většinu aplikací. Tabulka 5-1 znázorňuje šest nejpoužívanějších teplotních cyklů.

Cyklus	Min. teplota [ºC]	Max. teplota [ºC]	Sklon [ºC/min]	Chlazení [min]	Perioda [min]
A	-55	125	10	5	45
B	-55	125	18	10	40
C	-20	125	10	5	40
D	-12	125	65	5	11
E	-20	80	10	5	60
F	-55	125	55	0	6,6

Tabulka 5-1: Teplotní profily jednotlivých cyklů

Cyklus A – Tento režim cyklování je využíván především k testování armádních aplikací a z tohoto důvodu je zde použit veliký rozsah teplot. Sklon 10 °C / min je střední, pomalejší než režim teplotního šoku, který je nad 20 °C / min. Relativně krátká doba ustálení, pět minut, je kvůli zkrácení periody cyklu.

Cyklus B – Tento typ cyklu je obvyklý pro automobilový průmysl, a proto má široký rozsah teplot cyklu. Sklon 18 °C / min je sklon na hranici pod oblastí teplotního šoku. Ušetřený čas na sklonu je kompenzován prodloužením časů ustálení na 10 minut, takže celková doba periody se přibližuje k času teplotního cyklu A.

Cyklus C – Tento typ cyklu je obvyklý pro testování v telekomunikační technice. Sklon 10 °C / min je středně spolehlivý pod úrovní teplotního šoku.

Cyklus D – Tento typ cyklu je obvyklý testovací režim používaný v automobilovém průmyslu, proto je zde použit extrémní rozsah teplot se sklonem 65 °C / min a čas ustálení je pět minut, což je rychlejší než cykly A, B a C.

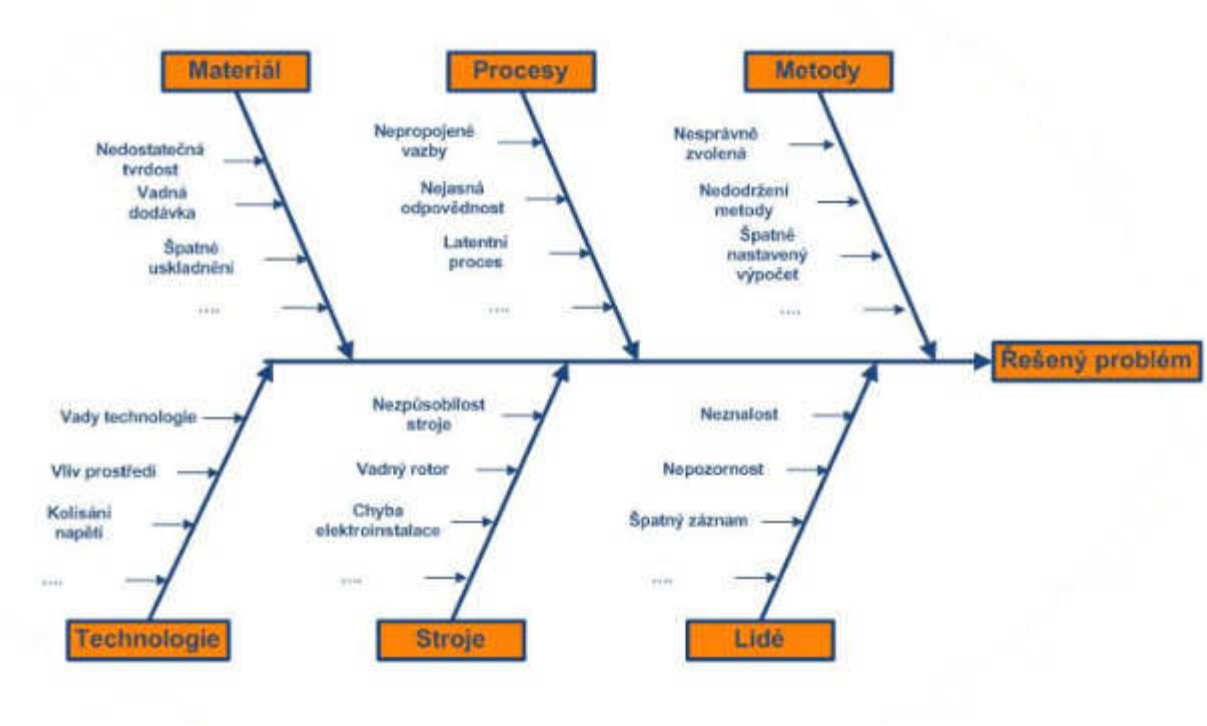
Cyklus E – Tento cyklus je velmi šetrný a je používán především k testování ve spotřební elektronice. Sklon 10 °C / min je střední. Celková doba periody cyklu je střední mezi krátkým cyklem D a dlouhým cyklem A.

Cyklus F – Tento cyklovací režim má za úkol simulovat teplotní šok. Poškození pájeného spoje není způsobeno pouze strmým sklonem teplotní charakteristiky, ale také teplotním gradientem mezi podložkou a součástkami. Tento gradient generuje pnutí ve spoji, které může odhalit krátkodobé výrobní defekty v pájeném spoji.

Často se místo teplotního cyklování využívá teplotního šokováni. To se provádí v šokové teplotní komoře. Šoková teplotní komora se skládá ze dvou teplotních komor. První komora je určena k ohřevu. Druhá komora je určena k chlazení. Vzorky určeny k šokování zůstávají definovaný čas na určené teplotě v první komoře a poté v řádu desítek sekund jsou přesunuty do druhé komory. Tímto lze dosáhnout strmého sklonu teplotního profilu. Šokování je účinnější než teplotní cyklování, ale i nákladnější.

5.2 Ishikawa diagram [11]

Ishikawa diagram, je diagram příčin a následků. Cílem Ishikawa diaramu je nalezení nejpravděpodobnější příčiny řešeného problému. Diagram popsal a zavedl Kaoru Ishikawa. Někdy je nazýván jako diagram rybí kosti (Fishbone) pro jeho vzhled. V oboru „kvalita“ je hodně využíván. Dnes by se žádné poradenství nemělo obejít bez hledání příčin problémů a nekvalit. Příklad Ishikawa diagramu je znázorněn na obrázku 5-1.



Obrázek 5-1: Příklad Ishikawa diadramu

Popis tvorby Ishikawa diagramu:

Na začátku je znám problém, který již vznikl, nebo je potenciální a je snaha mu předejít.

1. Sestavit tým pracovníků, kteří jsou zahrnuti do dané problematiky.
2. Nakreslit na papír obdélník, do kterého se vepíše řešený problém. Od něj se nakreslí vodorovná čára (páteř ryby).
3. K páteři připojují větve (kosti) a k nim obecné oblasti, kde se hledané příčiny mohou nacházet. (materiál, procesy, metody, technologie, stroje, lidé, prostředí)
4. Definice např. brainstormingem potenciální příčiny a připojení k jednotlivým kostem, tedy obecným oblastem.
5. Po vyčerpání všech možností a nápadů, se ohodnotí každý člen týmu příčiny váhovým koeficientem.

6. Analyzovat příčiny, které získaly největší váhové koeficienty.
7. Doplnit k analyzovaným příčinám data z reportingu nebo dash boardu (jsou-li k dispozici).
8. Využít Paretovy analýzy k určení, které příčiny budete řešit jako první.
9. Definice jasných úkolů k odstranění příčin.
10. Sledovat, zda se již problém nevyskytuje. Pokud ne, byla objevena skutečná příčina problému. Pokud ano, je potřeba hledat nové příčiny, vazby mezi jednotlivými příčinami apod.

5.3 Mechanické zkoušky

Mechanické zkoušky jsou realizovány zařízením DAGE PC2400, které umožňuje provádět zkoušky trhem nebo střihem. U testování pájených spojů se využívá metody střihu. Střihová hlava tlačí na součástku, dokud součástka není odtržena od desky plošného spoje. V okamžiku odtržení je výsledná síla změřena.

Výsledná síla je uváděna v jednotkách kg. Mechanické zkoušky střihem mají destruktivní charakter a jsou prováděny až po provedení ostatních testů. Porovnáním naměřených hodnot můžeme určit výslednou spolehlivost pájeného spoje. Zařízení DAGE PC2400 je zobrazeno na obrázku 5-2



Obrázek 5-2: Zařízení DAGE PC2400

Parametry zařízení DAGE PC2400:

- testovaní ve střihu až do 100kg
- testování v trhu až do 10kg
- pohyb v ose X 25 mm
- pohyb v ose Z 73 mm
- přesnost měření ± 0,5 %
- komunikace s počítačem
- možnost vyhodnocení protokolem

5.4 Vyhodnocení pájených spojů rentgenem

V elektrotechnickém průmyslu se vyhodnocuje správné provedení pájených spojů rentgenem. Rentgenem je možné odhalit tyto chyby: nezapájený spoj, void nebo mechanický narušený spoj (prasklina).

5.4.1 Princip rentgenu

Rentgenové záření je ionizující elektromagnetické záření dosahující vlnových délek v rozmezí 10^{-8} až 10^{-12} m. Rentgenové záření vzniká nárazem elektronu na kov. Princip vzniku rentgenového záření je založen na tepelné emisi elektronů z katody. Při nárazu elektronů na katodu vzniká rentgenové záření. Intenzita rentgenového záření závisí na přiloženém napětí a protékajícím proudu. Přiložené napětí se pohybuje v rozmezí 10 až 150 kV. Účinnost rentgenu je velmi malá, protože 99,9% energie se přemění na teplo a pouze 0,1% energie je přeměněna na rentgenové záření.

5.4.2 Rentgenové zařízení Phoenix X-ray – VtomeX

Phoenix X ray – VtomeX je univerzální rentgen určený nejen pro elektroniku a je zobrazen na obrázku 5-3. Tímto rentgenem byly zkoumány pájené spoje v praktické části této diplomové práce.

Vlastnosti rentgenu uváděné výrobcem jsou následující:

- 2D zobrazení
- Maximální rozlišení 2µm
- Maximální velikost zkoumaného předmětu (výška x průměr) 35 cm x 30 cm
- Maximální hmotnost zkoumaného předmětu do 10 kg
- Volitelné 2 rentgenové zdroje
- Maximální napětí mezi anodou a katodou 240kV
- Pokročilé zkoumání povrchu
- CAD polohování zkoumaného objektu v 3D souřadnicích s možnosti automatického nastavení polohy.
- Rychlé vyhodnocení dat s možnosti použití speciálního softwaru (vyhodnocení void, vyhodnocení zda jsou zapájeny pouzdra BGA)
- Doplňky: 3D vizualizace



Obrázek 5-3: Rentgenové zařízení Phoenix X-ray – VtomeX [13]

6 Experimentální zjišťování vlivu vodního chlazení na strukturu spoje

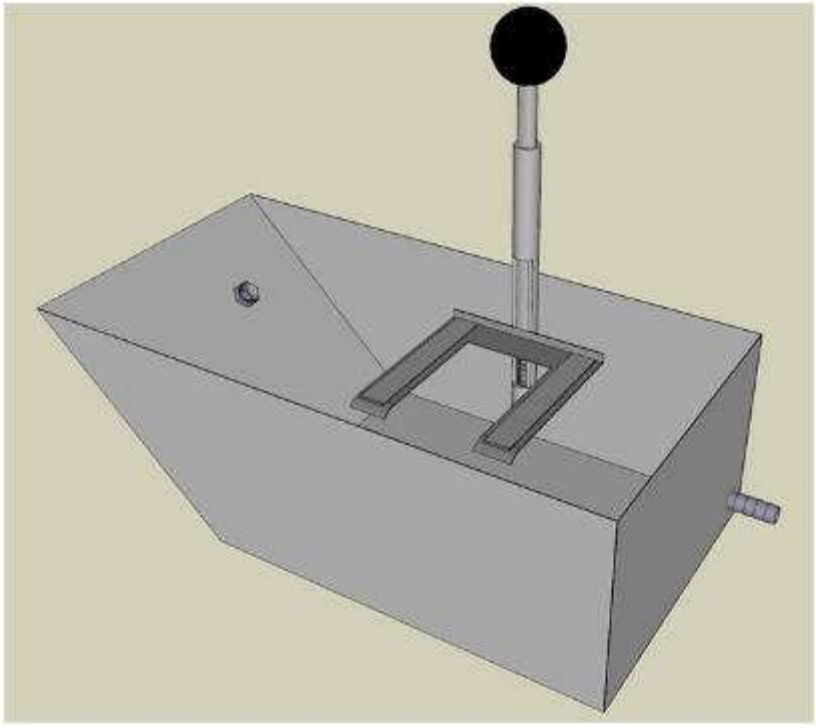
Byl proveden experiment na kontrolu struktury pájených spojů olovnatých i bezolovnatých pájek při rozdílném teplotním profilu během pájení. Konkrétně se jednalo o změnu fáze chlazení pájecího profilu, kde část vzorků byla chlazená vodou. Pro ověření byly použity trubičkové pájky.

Také bylo provedeno první prozkoumání struktur pájených spojů na elektronovém mikroskopu. Bylo možné pozorovat intermetalické sloučeniny v testovaných pájkách.

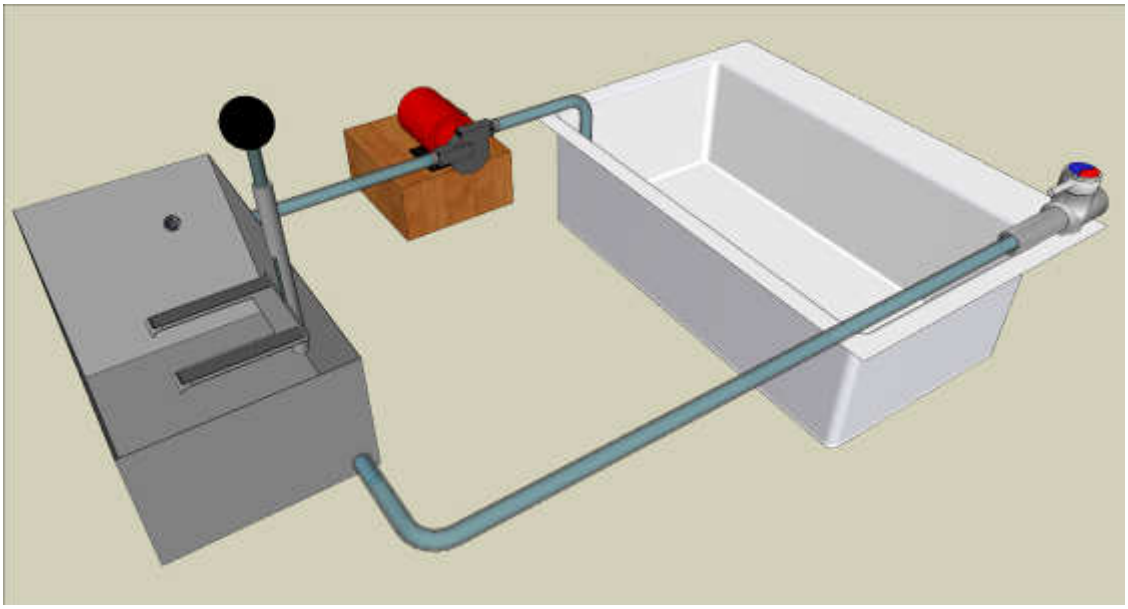
Vzorky byly vytvořeny na elektrotechnické mědi, z důvodu eliminace možného nabíjení vzorku při zkoumání struktury na elektronovém mikroskopu.

6.1 Chlazení testovacích vzorků

Chlazení vzorků probíhalo ve speciálním přípravku, který je znázorněn na obrázku 6-1. Do tohoto přípravku byl vložen vzorek ihned po zapájení a ponořen do cirkulující kapaliny. Jako chladící medium byla použita voda. Zobrazení celé chladící soustavy je na obrázku 6-2. Na tomto obrázku je znázorněný přípravek pro chlazení pájených spojů, čerpadlo, které zajišťuje cirkulaci chlazeného média a nádoba pro odtok přebytečného chladícího média. Při chlazení vodou bylo dosažení chladnutí o hodnotě 25°C/s.



Obrázek 6-1: Přípravek pro chlazení pájených spojů



Obrázek 6-2: Soustava pro chlazení pájených spojů

6.2 Pájení testovacích vzorků

Pájení probíhalo ve vsázkové teplotní komoře HR-21. Nejprve byla nanesena trubičková pájka na substrát a poté zapájená ve vsázkové teplotní komoře. Příprava vzorku před zapájením je znázorněna na obrázku 6-3. Samotné zapájení je znázorněno na obrázku 6-4. Na obrázku je možné pozorovat termočlánek určený k měření teplotního profilu.

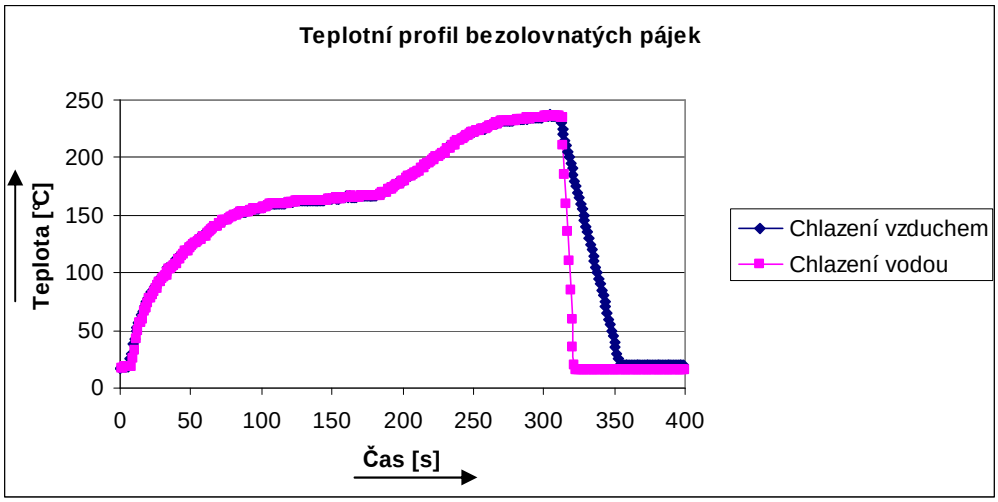
Podle typu pájky bylo nutné i nastavit teplotní profil. Pro bezolovnaté pájky chlazené vodou i vzduchem byl nastaven teplotní profil na obrázku 6-5. Pro olovnaté pájky chlazené vodou i vzduchem byl nastaven teplotní profil na obrázku 6-6.



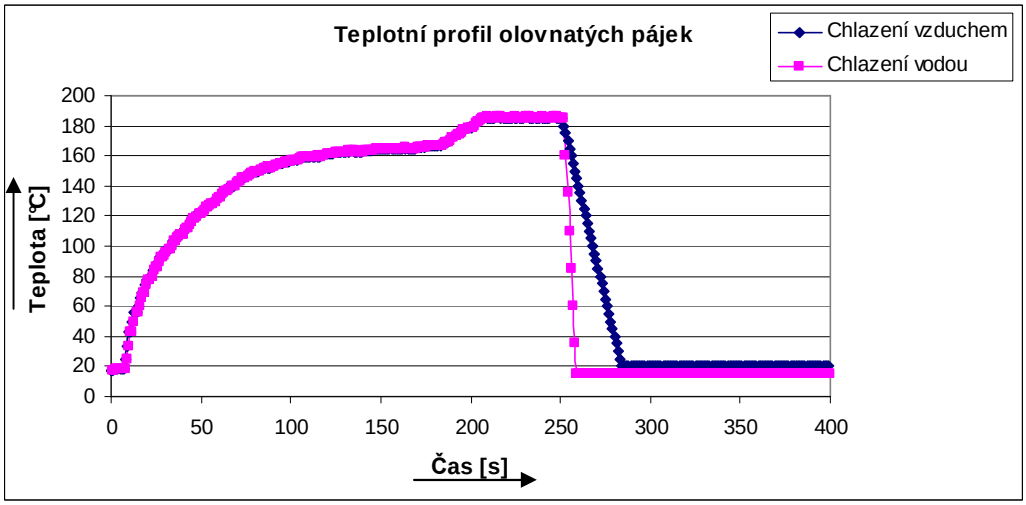
Obrázek 6-3: Příprava vzorku před zapájením



Obrázek 6-4: Zapájení testovacích vzorků ve vsázkové teplotní komoře HR-21



Obrázek 6-5: Teplotní profil bezolovnatých pájek



Obrázek 6-6: Teplotní profil olovnatých pájek

6.3 Tvorba metalografického výbrusu

Zapájené spoje byly potřebně upraveny na požadovaný tvar (zastřihnutí) a zality do technického dentacrylu. Jako forma pro zalévání sloužila jednorázová forma na led. Před zalitím do dentacrylu musel být vzorek upevněn a forma promazána vazelínou z důvodu lepšího vyjmutí vzorku z formy. Vytvrzení vzorku probíhá přibližně jeden den ve větraných prostorech. Po vyjmutí jednotlivých vzorků probíhalo broušení na brusce. Bruska je znázorněna na obrázku 6-7. Broušení bylo prováděno ve čtyřech fázích. Nejprve v první fázi se provádělo hrubé broušení pomocí brusného papíru s rozsahem zrnitosti 80. Poté se provedlo jemnější broušení a zahlazení brusnými papíry s rozsahem zrnitosti 400, 1200 a 2000. Vzorky po vybroušení byly předány na Akademii věd České republiky, kde byly vyleštěny pomocí diamantové pasty a byly podrobeny chemickému čištění. Po těchto operacích mohly být teprve vzorky pozorovány pomocí elektronového mikroskopu. Na obrázku 6-8 jsou znázorněny vzorky po vybroušení brusným papírem s rozsahem zrnitosti 2000.



Obrázek 6-7: Broušení vzorků



Obrázek 6-8: Vzorky po vybroušení

6.4 Použité pájky, označení vzorků a struktury pájených spojů

6.4.1 Označení vzorků

Pro tento experiment byly použity dvě pájky jako typičtí zástupci bezolovnatých pájek a dvě nové perspektivní slitiny. Jako referenční slitina byla zvolena olovnatá pájka SnPb.

Označení jednotlivých vzorků včetně použitých pájek je v tabulce 6-1.

	Pájka	Výrobce	Chlazení
A	Sn60Pb40	multicone solde	vzduch
B	Sn96Ag4	Kovohuť Příbram www.kovopb.cz	vzduch
C	SnCu0,7Ni (SN100C)	www. nihonsuperior.co.jp	vzduch
D	Sn95,5Ag3,8Cu0,7	www.kovopb.cz	vzduch
E	Sn99Ag+	www.felder.de	vzduch
N	Sn60Pb40	multicone solde	voda
O	Sn96Ag4	Kovohuť Příbram www.kovopb.cz	voda
P	SnCu0,7Ni (SN100C)	www. nihonsuperior.co.jp	voda
Q	Sn95,5Ag3,8Cu0,7	www.kovopb.cz	voda
R	Sn99Ag+	www.felder.de	voda
Vysvětlení: pájka	Sn99Ag+ je s obsahem cínu, stříbra, niklu a germánia		
	SN100C je tvořena cínem 0,7% mědí 0,05 % niklu a germániem		

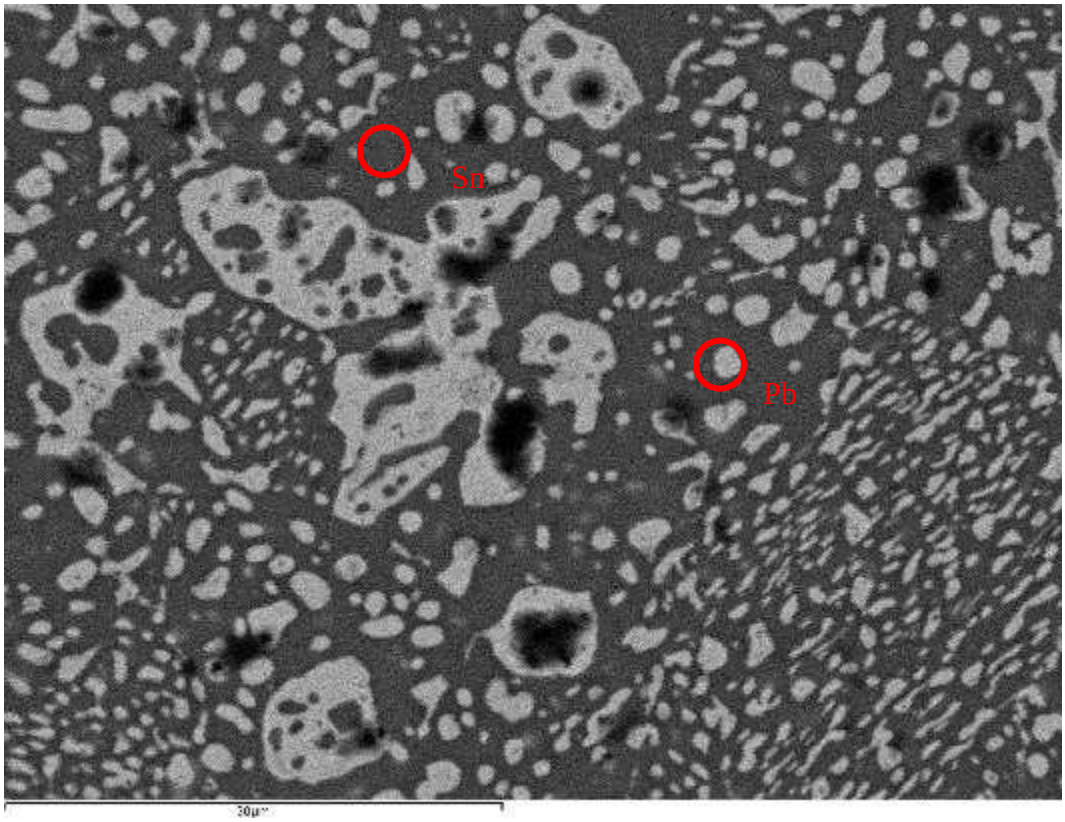
Tabulka 6-1: Označení jednotlivých vzorků

6.4.2 Sn60Pb40

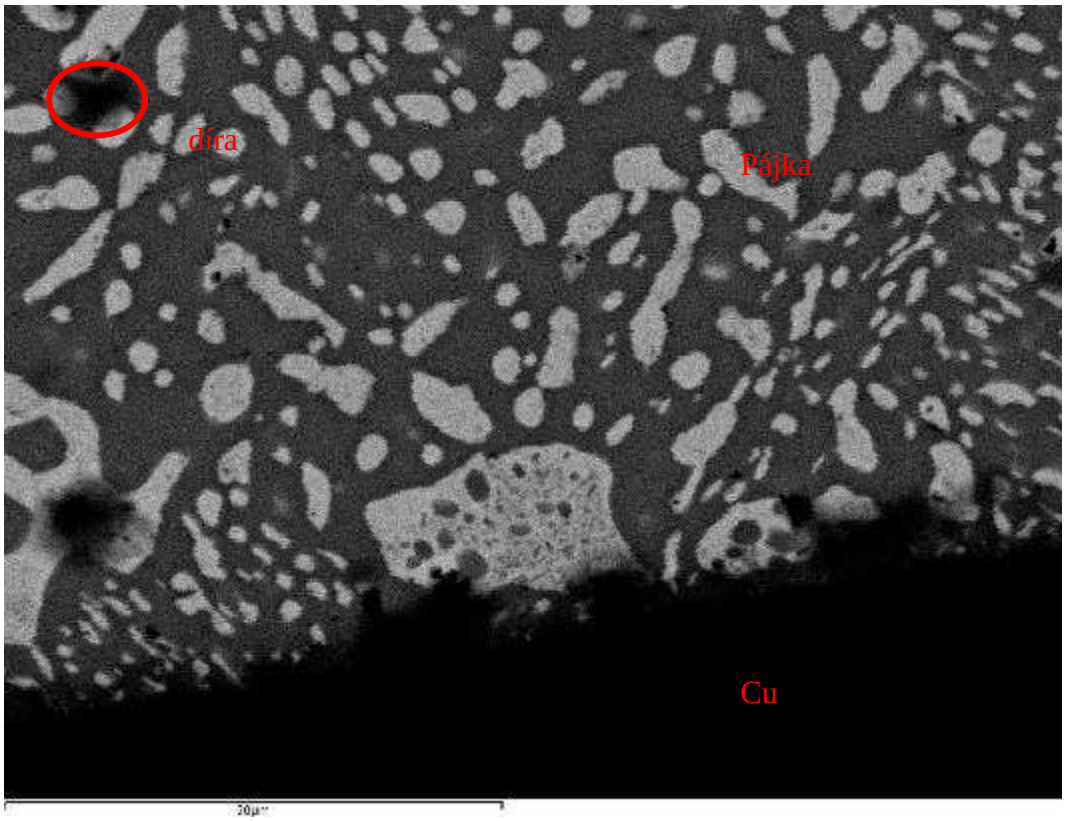
Struktura pájky Sn60Pb40 je zobrazena na obrázku 6-9 a obrázku 6-10. Ze struktury je patrné, že v cínové matrici vznikají pouze ostrůvky olova. Ostrůvky jsou malé a nepravidelné i jejich velikost není pravidelná. Černé obrazce na obrázcích jsou tzv. díry vzniklé při tvorbě metalografického výbrusu. U této pájky nebyl pozorován vznik intermetalických sloučenin.

6.4.3 Struktura pájky Sn95,5Ag3,8Cu0,7

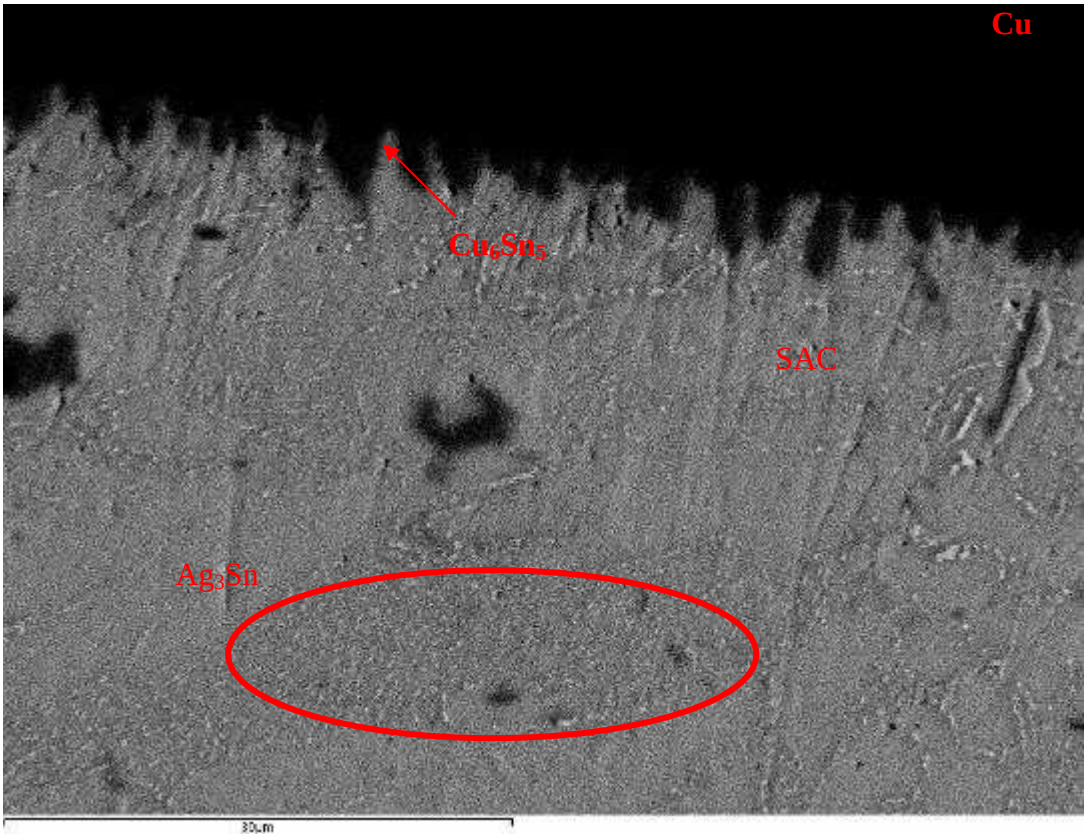
U pájky SAC byla identifikována intermetalická sloučenina na rozhraní mědi a pájky, ale pomoci prvkové analýzy (při předchozím měření byla viditelná i ve struktuře). V pájce se projevil výskyt intermetalické sloučeniny Ag_3Sn, která tvoří řetízky ve struktuře znázorněno na obrázku 6-11.



Obrázek 6-9: Struktura pájky Sn60Pb40, zvětšeno 2000x



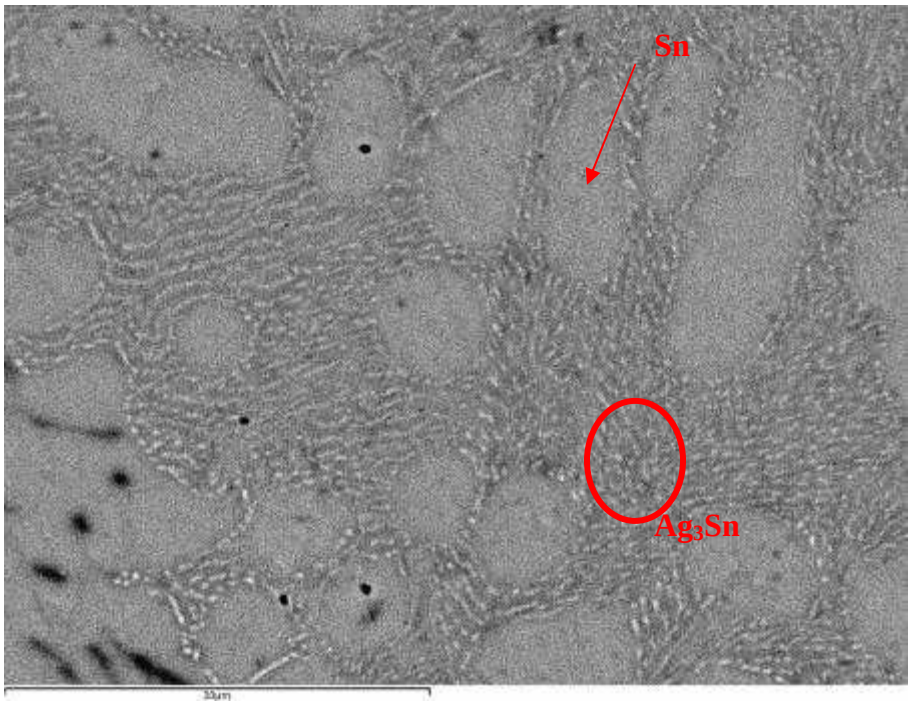
Obrázek 6-10: Struktura pájeného spoje Sn60Pb40 na rozhraní s mědí, zvětšeno 2000x



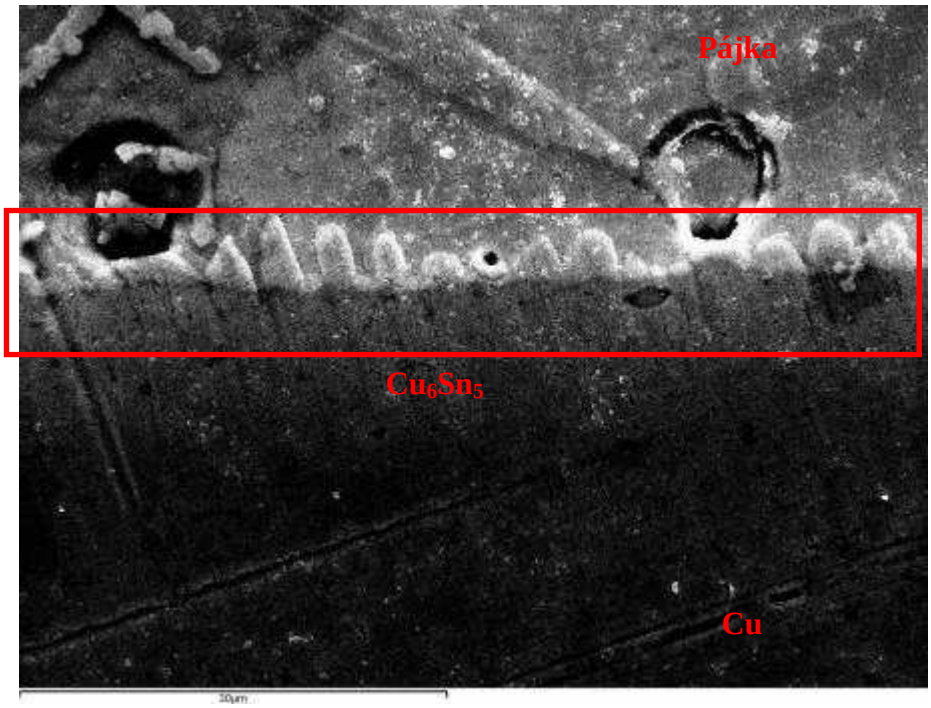
Obrázek 6-11: Struktura SAC pájky, zvětšeno 2000x

6.4.4 Struktura pájky Sn96Ag4

Strukturu pájky tvoří oválné plochy cínu, které jsou obklopeny intermetalickou sloučeninou Ag_3Sn. Na rozhraní pájky a mědi se vyskytla intermetalická sloučenina Cu_6Sn_5. Struktura pájky Sn96Ag4 je znázorněna na obrázku 6-12. Nárůst intermetalické sloučeniny je znázorněn na obrázku 6-13.



Obrázek 6-12: Struktura pájky SA, zvětšeno 2000x

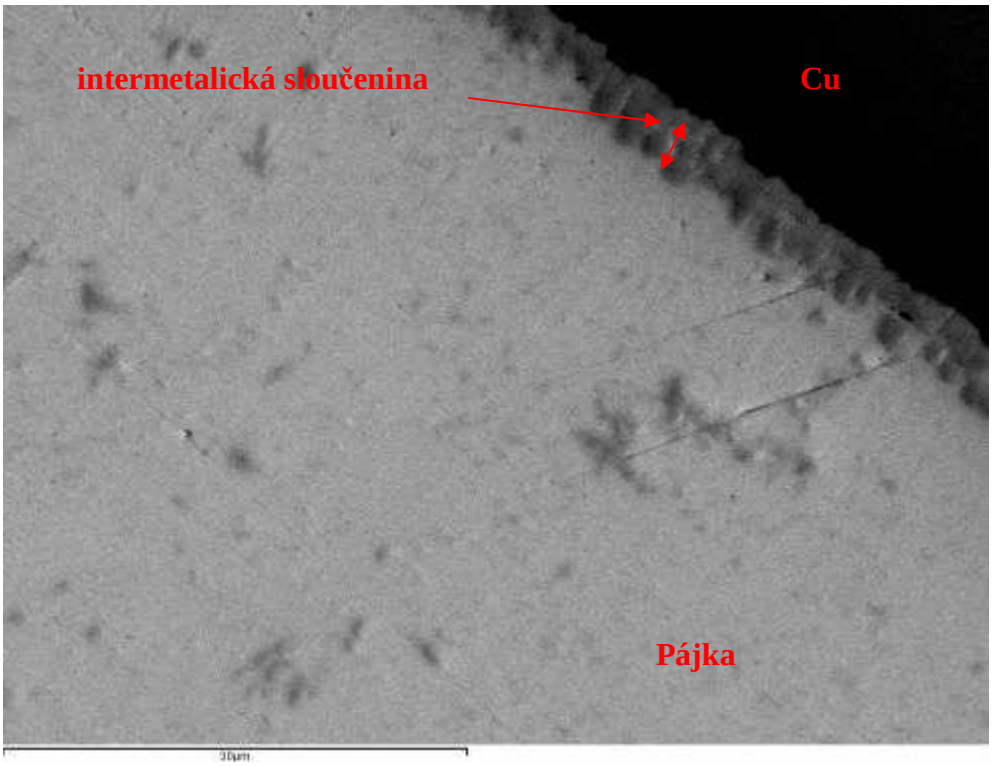


Obrázek 6-13: Struktura pájky SA na rozhraní měď - pájka, zvětšeno 2000x

6.4.5 Struktura pájky SN100C

Jedná se o perspektivní slitinu vyvinutou japonskou firmou Nihosuperior. Jedná se o slitinu cínu, mědi, niklu a germania. Teplota tavení této pájky je 227 °C. Zastoupení jednotlivých prvků je následující: cín 99,245%, měď 0,7%, nikl 0,05% a germanium 0,005%. Nikl s germaniem mají funkci zlepšení smáčecích charakteristik. Nikl dále vytváří zmiňovanou intermetalickou sloučeninu $Sn_XCu_XNi_X$.

Struktura pájeného spoje pájkou SN100C je tvořena pouze cínem a intermetalickými sloučeninami mědi, cínu a niklu. Na rozhraní měď - pájka je viditelná intermetalická vrstva. Struktura pájeného spoje je na obrázku 6-14.

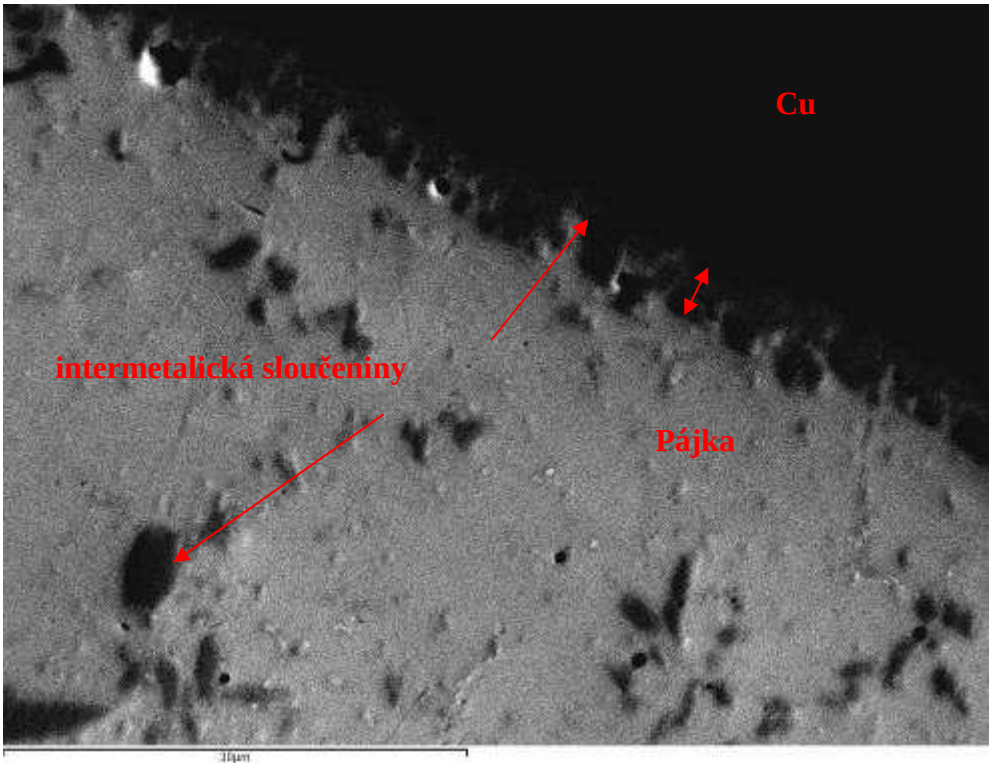


Obrázek 6-14: Struktura pájky na rozhraní SN100C, zvětšeno 2000x

6.4.6 Struktura pájky Sn99Ag+

Pájka Sn99Ag+ je obdoba pájky SN100C pouze neobsahuje měď. Má podobné vlastnosti. Nikl s germaniem zlepšují vlastnosti. Na rozhraní se vytváří intermetalická sloučenina $Sn_XCu_XNi_X$

U pájky Sn99Ag+ je složité definovat, protože obsah ostatních prvku je minimální. Intermetalická sloučenina je však obdobná jako u pájky SN100C a je tvořena mědí, cínem a niklem. Struktura spoje Sn99Ag+ je na obrázku 6-15.

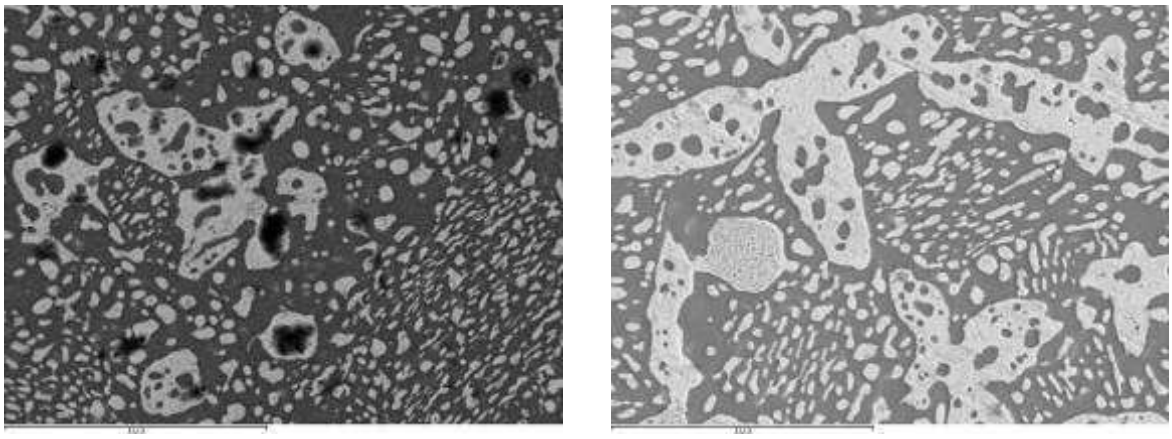


Obrázek 6-15: Struktura pájky Sn99Ag+, zvětšeno 2000x

6.5 Vyhodnocení experimentu

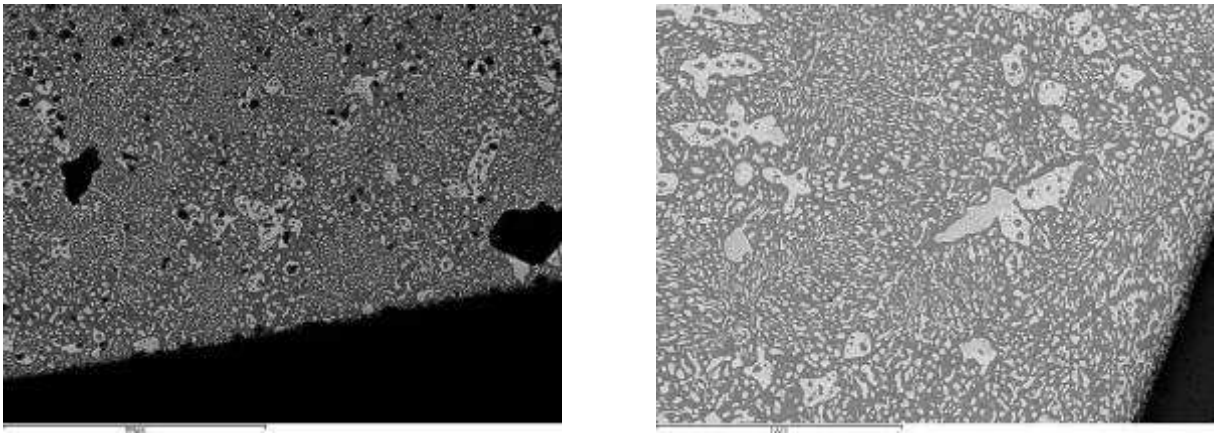
6.5.1 Porovnání struktury pájených spojů Sn60Pb40 při rozdílné době chladnutí

Při ochlazení spoje se ve struktuře vyskytly větší ostrůvky olova v cínové matrici. Struktura je homogennější i při rozhraní měď-pájka. Tyto struktury lze porovnat na obrázku 6-16 a 6-17



a) **b)**

Obrázek 6-16: Porovnání struktury pájených spojů Sn60Pb40 při zvětšení 2000x a) běžné chlazení, b) spoje chlazeny vodou

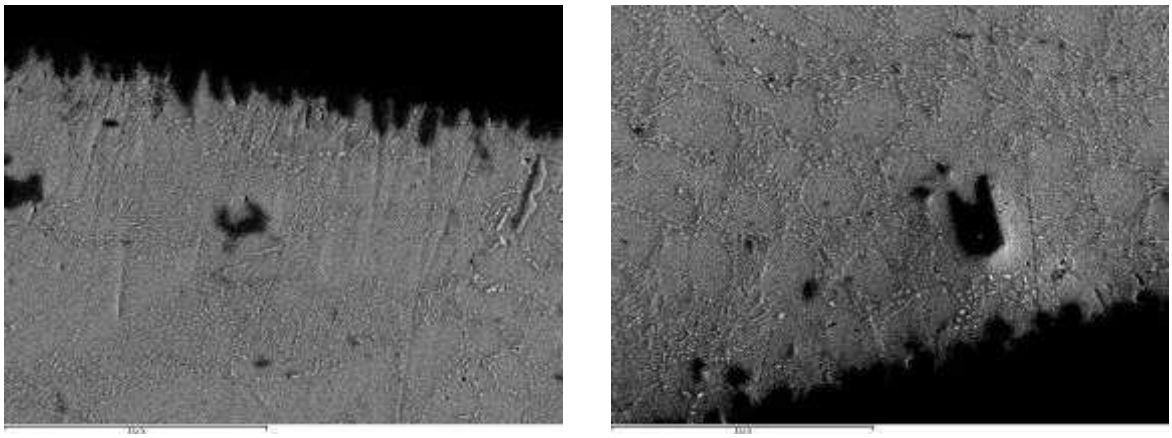


a) **b)**

Obrázek 6-17: Struktury pájených spojů Sn60Pb40 a) při zvětšení 600x - bežné chlazení, b) při zvětšení 200x - spoje chlazeny vodou

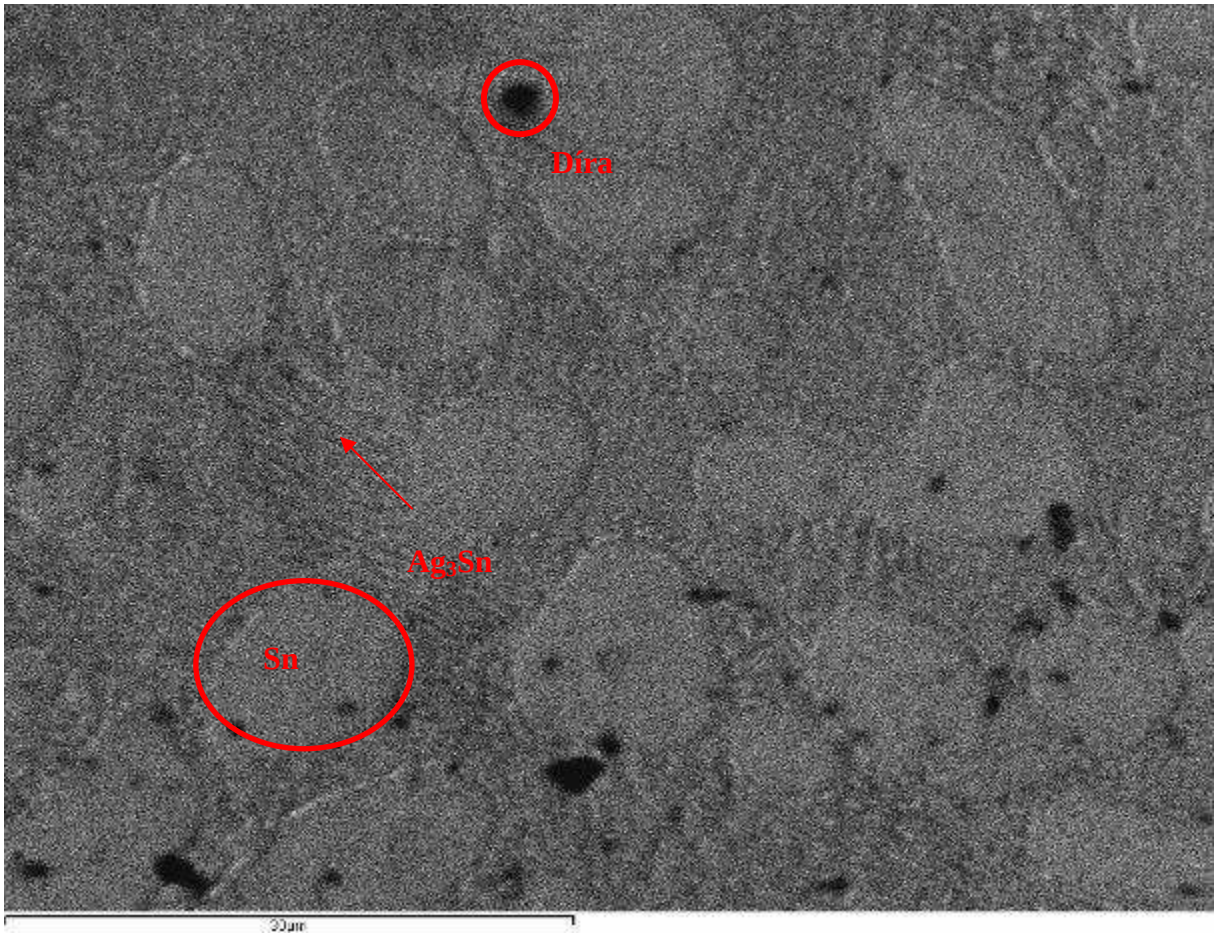
6.5.2 Porovnání struktury pájených spojů SAC při změně chlazení

Na obrázku 6-18 je znázorněno porovnání struktury pájeného spoje pájky SAC. Lze pozorovat rozdílnost struktury pájeného spoje. U vodou chlazeného vzorku vzniká uspořádaná struktura tvořena oválnými plochami cínu, které jsou vyplněny intermetalickou sloučeninou Ag_3Sn. Na obrázku 6-19 je znázorněna a struktura pájeného spoje SAC při chlazení vodou.



a) **b)**

Obrázek 6-18: - Porovnání struktury pájených spojů SAC při zvětšení 2000x a) bežné chlazení, b) spoje chlazeny vodou



Obrázek 6-19: Struktura pájky SAC chlazené vodou zvětšeno 2000x

7 Experimentální zjišťování vlivu přídavných energií na strukturu spoje

Pro zkoumání vlivu přídavných energií ve formě ultrazvuku se vycházelo ze znalostí předchozího experimentu, k čemuž byly použity pájecí pasty SAC305 a SN100C. Byla potřeba provést urychlené stárnutí, mechanické zkoušky a zkoumání struktur spoje, proto se musela vyvinout testovací deska.

Pájky oproti předchozímu experimentu byly eliminovány pouze na dvě varianty. U zapájených vzorků bylo provedeno převážení hmotnosti během výrobního procesu, rentgen, fotografická dokumentace, zkoumání struktury pájeného spoje pomocí elektronového mikroskopu a mechanické zkoušky.

7.1 Použité pájecí pasty

Pro experiment byly použité dvě pájecí slitiny SAC305 a SN100C. Výrobcem těchto past je Cobar. Vlastnosti jednotlivých past jsou znázorněny v tabulce 7-1.

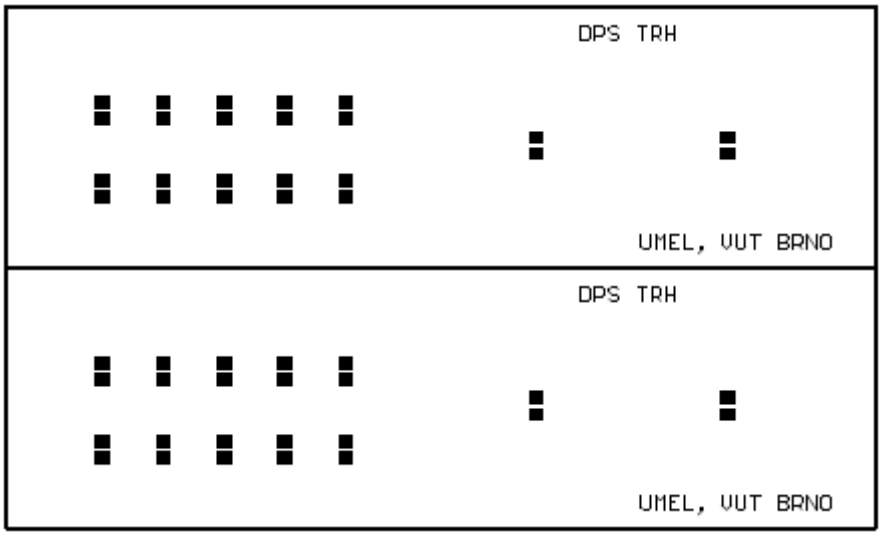
Pájecí slitina	SAC305	SN100C
Označení pasty	SAC3-XM3S	SN100C-XF3+
Složení	95,5% cínu	99,25% cínu
	3% stříbra	0,7% mědi
	0,5% mědi	0,05% niklu
Teplota liquidu	219 °C	227 °C
Teplota solidu	217 °C	227 °C
Teplota pájení	231 - 250°C	232 - 250°C
Použité tavidlo	REL1	REL0
Obsah tavidla	10,80%	12,07%

Tabulka 7-1: Použité pájecí pasty a jejich slitiny

7.2 Návrh a výroba testovací desky

7.2.1 Požadavky a návrh testovací desky

Testovací deska byla navržena v softwarovém prostředí pro návrh plošných spojů Eagle. Byla zvolena součástková základna, se kterou budou prováděny testy. Zvoleny byly rezistory rozměrové řady 0805 s libovolnou hodnotou elektrického odporu. Na desce je umístěno celkem 12 součástek. 10 součástek je určenou k mechanickým testům a 2 součástky jsou určeny ke zkoumání struktur. Maska pro výrobu testovací desky je znázorněna na obrázku 7-1.



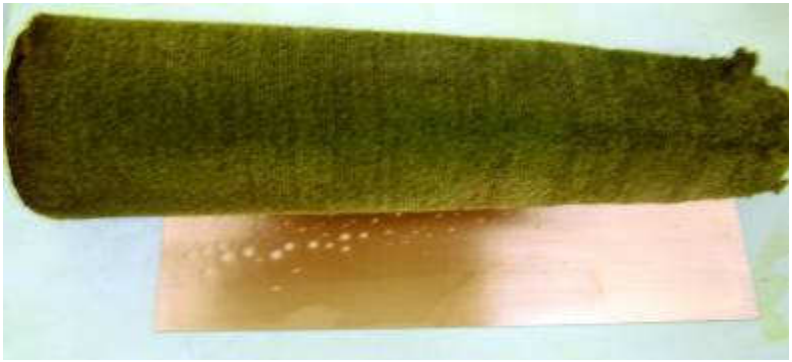
Obrázek 7-1: Maska pro výrobu testovací desky

Testovací deska byla vyrobena nejprve z FR-4 odleptáním přebytečné mědi, ale při pozdějších mechanických testech nebyla deska vhodná z důvodu odtržení pájených spojů včetně pájecích plošek od základního materiálu.

Proto byla technologie pozměněna. Měď nebyla odleptávána, ale na celou plochu FR-4 byla nanesena fotocitlivá nepájivá maska, na které byl vytvořen motiv z obrázku 7-1.

7.2.2 Postup při výrobě testovací desky

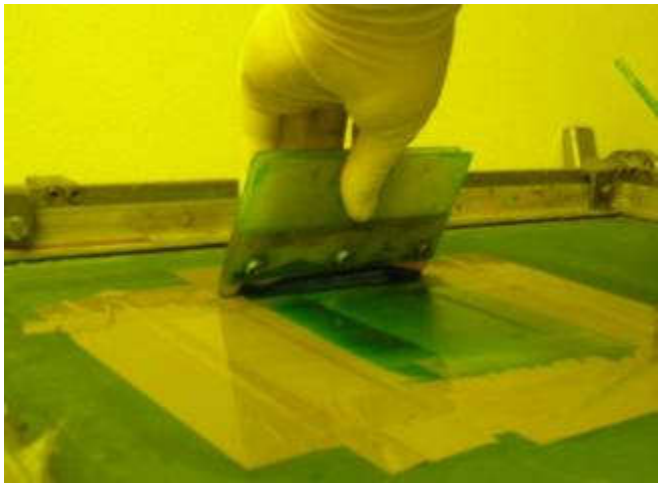
Nejprve deska plošného spoje musí být důkladně mechanicky očištěna, aby byla zbavena oxidu a nečistot, které by ovlivnily výslednou kvalitu přenášeného motivu a adhezi vrstvy. Čištění je prováděno ručně pomocí jemného kartáče. Deska je očištěna tehdy, je-li namočena a vytvoří se na ní souvislý vodní film po dobu 30s. Čištění desky je znázorněno na obrázku 7-2.



Obrázek 7-2: Čištění desky plošného spoje kartáčem

Po očištění je z desky otřena voda a deska je osušena. Po osušení je na desku nanesena souvislá vrstva fotocitlivé nepájivé masky (Sunchemical XV501-T4) sítotiskem. Síto je čisté,

bez motivu. Motiv je realizován expozicí pomocí filmové předlohy. Sítotisk je znázorněn na obrázku 7-3.



Obrázek 7-3: Ruční sítotisk fotocitlivé nepájivé masky

Nanášení nepájivé masky musí probíhat v prostředí bez UV záření. Pro tyto účely jsou nejvhodnější temné komory s osvětlením bez UV. Po nanesení fotocitlivé masky sítotiskem je deska vložena na 15 minut do teplotní komory, kde proběhne 1. vytvrzení nepájivé masky při teplotě 60 °C a zvýšení viskozity nanesené vrstvy. Po 1. vytvrzení je na desku přiložena filmová předloha a po expoziční dobu 80 sekund je deska osvěcována v expoziční jednotce UV zářením. Expoziční jednotka a teplotní komora jsou znázorněny na obrázku 7-4.



a) **b)**

Obrázek 7-4: a) Expoziční jednotka AY218 , b) teplotní komora HS 157A

.

Po expozici následuje vyvolání v 1,5% roztoku NaOH. Deska v expoziční jednotce včetně předlohy a při vyvolání je znázorněna na obrázku 7-5. Po vyvolání a zviditelnění požadovaného motivu se provede oplach desky pod vodou. Po oplachu je deska vložena do teplotní komory a po dobu 1 hodiny při teplotě 130 °C je provedeno konečné vytvrzení nepájivé masky.



a) **b)**

Obrázek 7-5: a) Expozice motivu na desku, b) desky během vyvolání

7.3 Značení a výroba vzorků

7.3.1 Značení vzorků

Při výrobě testovacích vzorků bylo zavedeno značení, ve kterém jsou zakódovány všechny podstatné informace o pájeném vzorku. Značení vypadá následovně. 0X1Y

0 – znamená měsíc výroby
X – znamená typ pájecí slitiny (A – SAC305, B – SN100C)
1 – číslo desky
Y – označuje pájecí metodu (N – klasicky, V – s vibracemi, W – s vodním chlazením)

Celkem bylo vyrobeno 12 vzorků určených k mechanickým testům a zkoumání struktury v závislosti na použité metodě. Z těchto 12 vzorků bylo 6 vzorků podrobeno urychlenému stárnutí. Seznam vyrobených vzorků je uveden v tabulce 7-2.

Označení	Označení
3A3N	3B3N
3A4N	3B4W
3A5V	3B5V
3A6V	3B6N
3A7W	3B7V
3A8W	3B8W

Tabulka 7-2: Seznam vyrobených vzorků

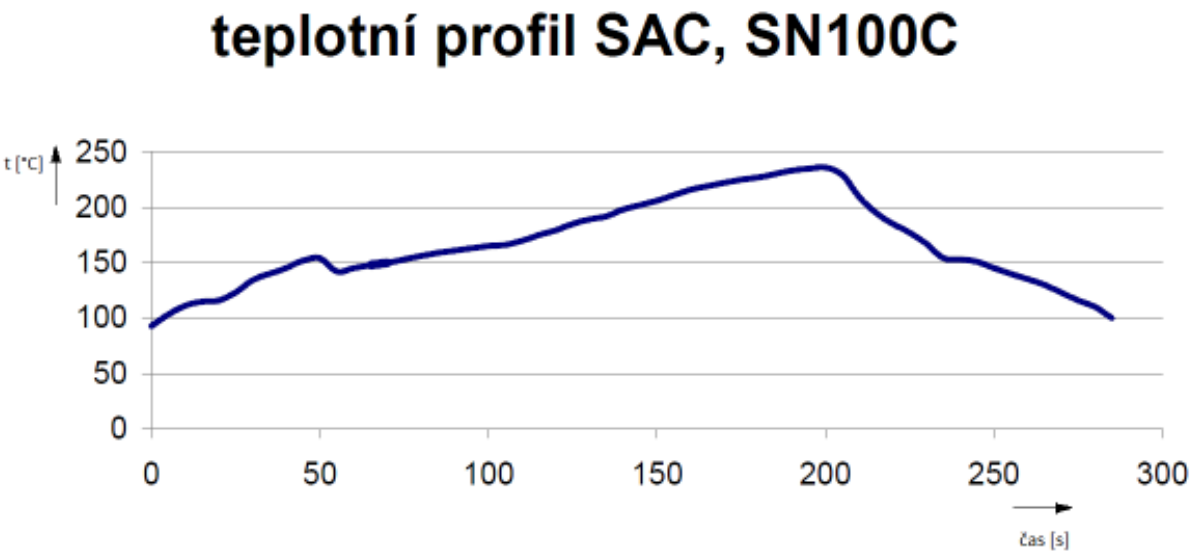
7.3.2 Zhotovení vzorků

Označené desky byly nejprve očištěny od oxidu a nečistot mechanicky. Na očištěné desky byla nanesena pájecí pasta ručním šablonovým tiskem. Šablonový tisk pro nanášení pájecí pasty včetně šablony je znázorněn na obrázku 7-6.



Obrázek 7-6: Pracoviště ručního šablonového tisku

Po nanesení pájecí pasty byly desky ručně osazeny a zapájeny ve vsázkové peci HR-21. Během pájení byl měřen teplotní profil, který je znázorněn na obrázku 7-7



Obrázek 7-7: Teplotní profil běžně pájených a vibrovaných spojů

Pájení spojů s použitím vibrací je realizováno přenesením desky, kdy je pájka přetavena na vibrační stolici. Z vibrační stolice jsou na desku přenášeny mechanické kmity po dobu dvě minuty.

Vibrační stolice je realizována piezoelektrickým elementem UAA008Q5, který má impedanci 59 Ω a kapacitu 18,7µF. Piezoelektrický element je buzen generátorem signálu UNA20322. Frekvence vibrační stolice je 37,028 kHz a přenášený výkon je 233 W. Vibrační stolice je znázorněna na obrázku 7-8.



Obrázek 7-8: Vibrační stolice určená pro tvorbu spojů s použitím vibrací

7.4 Sledování hmotnosti desky během zhotovení

Během výrobního procesu byla sledována hmotnost vzorků mezi jednotlivými operacemi. Nejprve byly desky zváženy po očištění. Další vážení proběhla po nanášení pájecí pasty sítotiskem, osazení rezistory 0805 a zapájením. Ze sledování hmotnosti je možné vyhodnotit množství nanesené pasty a množství odpařených látek.

Množství odpařených látek během pájení je téměř zanedbatelné, protože se pohybuje v desítkách µg na jeden pájený spoj. Hmotnost natisknuté pájky je přibližně 1,6mg na jeden pájený spoj. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7-3. U některých vzorků během manipulace při pájení došlo k odtržení pájené součástky, proto hmotnost po zapájení je nižší než u předchozích desek.

Označení	Hmotnost [g]			
	Před nanesením pasty	Po nanesení pasty	Po osazení SMD	Po zapájení
3A3N (S)	9,313	9,353	9,404	9,405
3A4N	10,353	10,399	10,447	10,436
3A5V (S)	10,715	10,755	10,811	10,81
3A6V	10,438	10,483	10,543	10,543
3A7W	9,508	9,55	9,607	9,603
3A8W (S)	8,983	9,028	9,085	9,08
3B3N (S)	10,604	10,643	10,702	10,648
3B4W (S)	10,8	10,84	10,899	10,885
3B5V (S)	10,181	10,222	10,281	10,273
3B6N	10,425	10,473	10,534	10,528
3B7V	9,468	9,511	9,572	9,57
3B8W	9,424	9,471	9,53	9,524

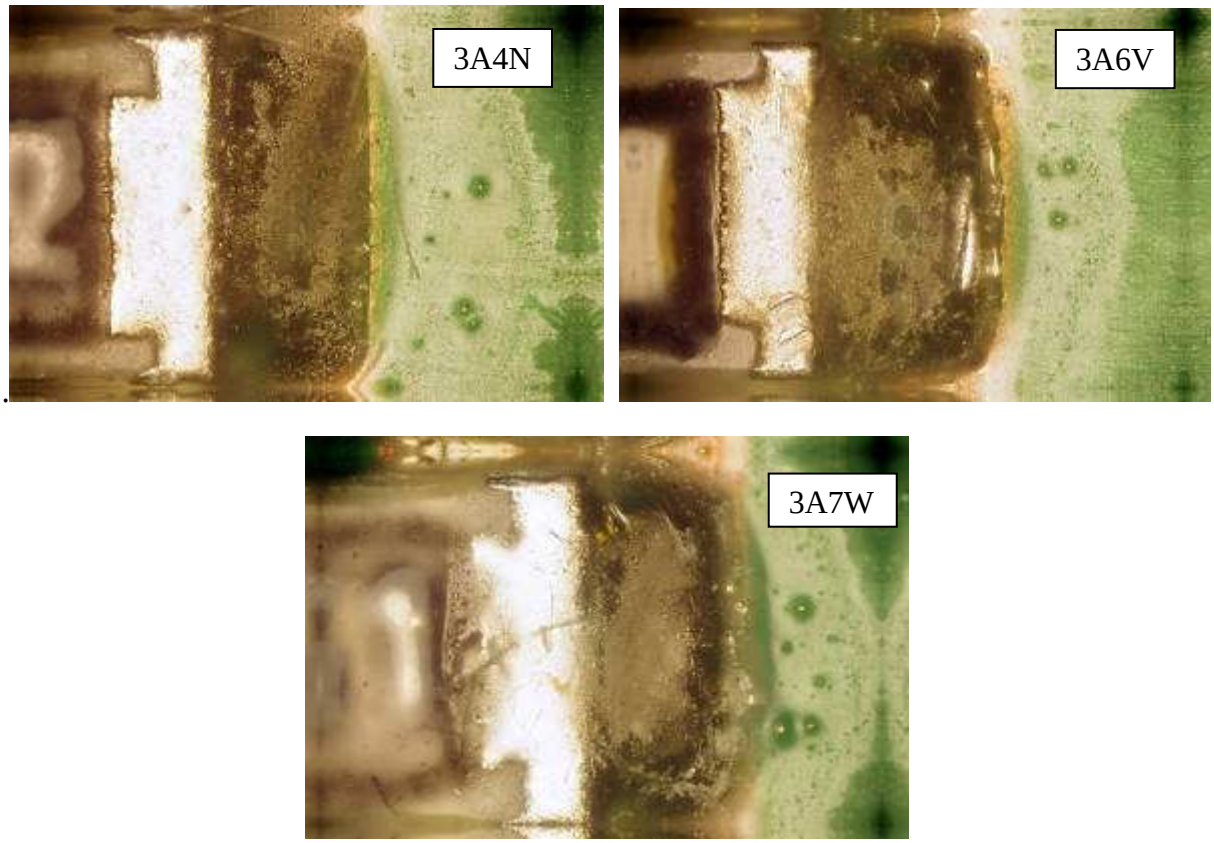
Tabulka 7-3: Sledování hmotnosti desky během výrobního procesu

7.5 Vliv pájecí metody na povrch pájeného spoje

Zapájené vzorky byly pozorovány pomocí mikroskopu a nafoceny ve více zaostřeních. Výsledná fotografie pájeného spoje byla složena z jednotlivých zaostření, což umožní pozorovat a zaznamenat povrch spoje.

7.5.1 Povrch pájky SAC305 při různých pájecích metodách

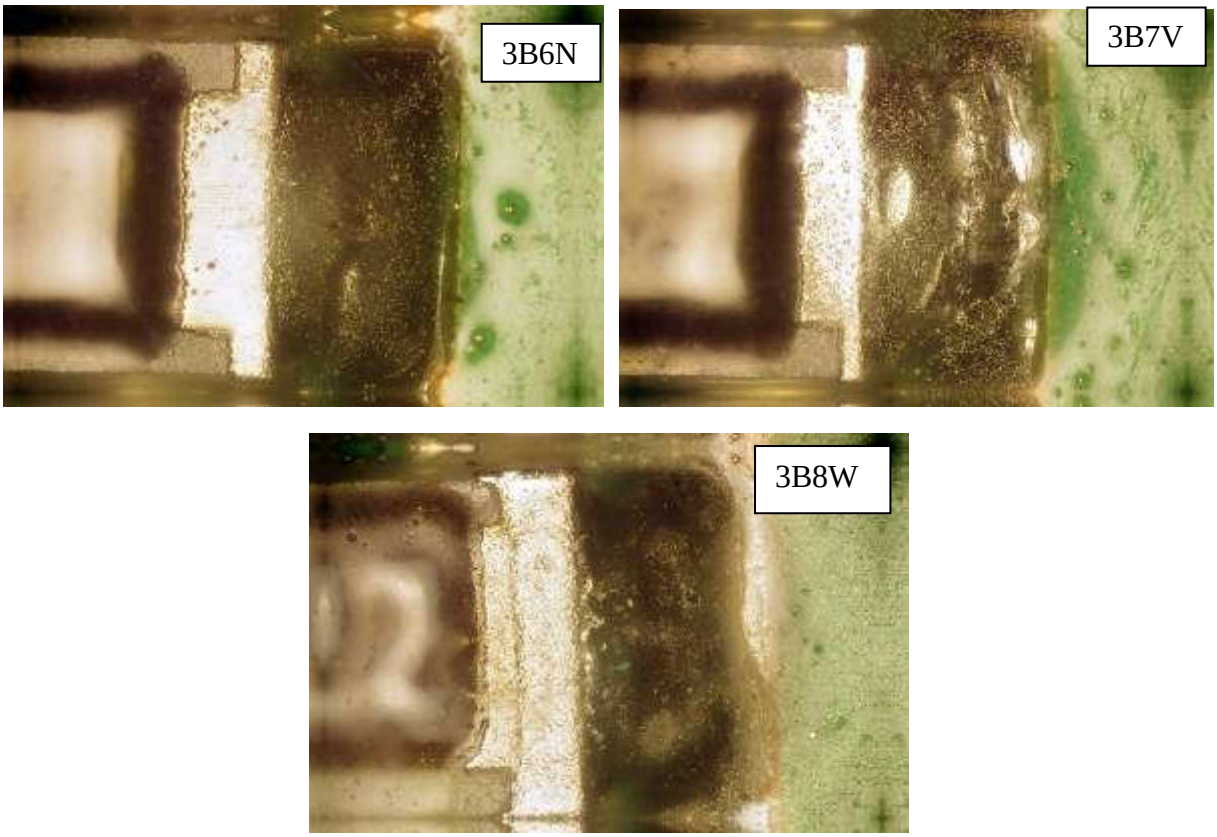
Při vodním chlazení a použití vibrací je jiná povrchová struktura spoje než u běžného zapájeného spoje. Běžně zapájený spoj má lesklý povrch a pájecí ploška je pájkou dobře smočena. Při pájení s vibracemi se ve spojích objevují mikropraskliny a výrazně zhoršuje smáčivost. U vodního chlazení se vyskytují mikropraskliny a smáčivost je mírně horší než u běžně zapájených vzorků. Fotografie jednotlivých pájených spojů jsou zobrazeny na obrázku 7-9.



Obrázek 7-9: Porovnání povrchu pájky SAC305 při různých pájecích metodách (N – Běžně zapájeno, V – Zapájeno s pomocí vibrací, W- Zapájeno s vodním chlazením)

7.5.2 Povrch pájky SN100C při jiných pájecích metodách

U pájky SN100C jsou výsledky obdobné jako u pájky SAC305, ale neprojevuje se tak výrazně zhoršení smáčivosti, protože pájka SN100C má lepší smáčivost než pájka SAC305. U vibrací i u vodního chlazení se však vyskytuje více mikroprasklin než u běžně zapájených spojů. Fotografie jednotlivých pájených spojů jsou zobrazeny na obrázku 7-10.



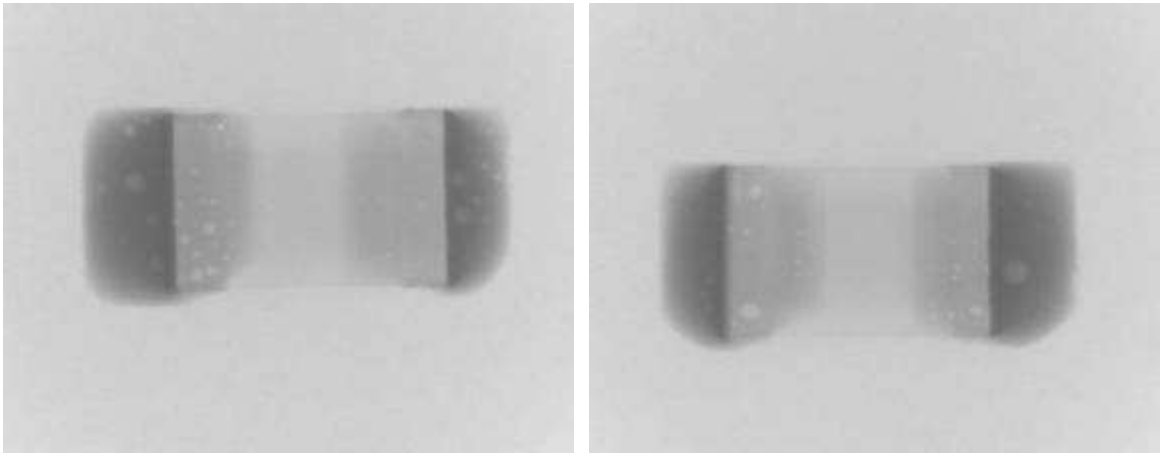
Obrázek 7-10: Porovnání povrchu pájky SN100C při různých pájecích metodách (N – Běžně zapájeno, V – Zapájeno s pomocí vibrací, W- Zapájeno s vodním chlazením

7.6 Zkoumání pájených spojů rentgenem

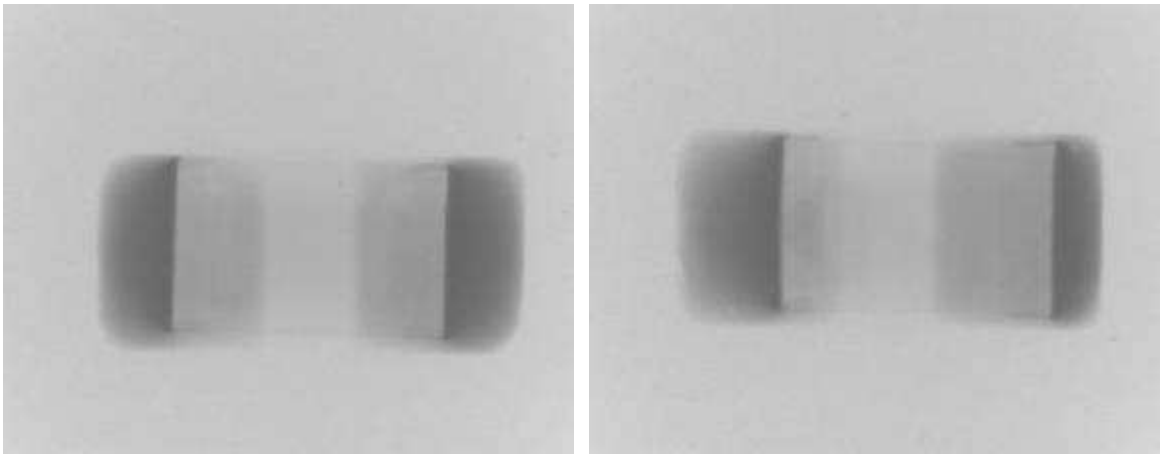
Všechny vyrobené vzorky byly analyzovány rentgenovým zářením ve firmě Continental Automotive Czech Republic s.r.o. ve Frenštátě pod Radhoštěm. Pomocí tohoto pozorování je možné odhalit nezapájený spoj, přítomnost voidů nebo praskliny spojů. Při pozorování vzorků ihned po výrobě nebyly pozorovány chyby nezapájení nebo praskliny. Projevila se zde pouze přítomnost voidu.

Z výsledku je možné určit, že metoda vibrací u pájky SAC305 pomohla odstranit voidy. Metoda vodního chlazení spoje má však negativní vliv a vznikají voidy o velké velikosti a četnosti. Přítomnost těchto voidů je nepřípustná. U pájky SN100C je možné pozorovat také úbytek a zmenšení voidů, při použití vibrací. U vodního chlazení se opět voidy zvětšily do nepřípustné meze.

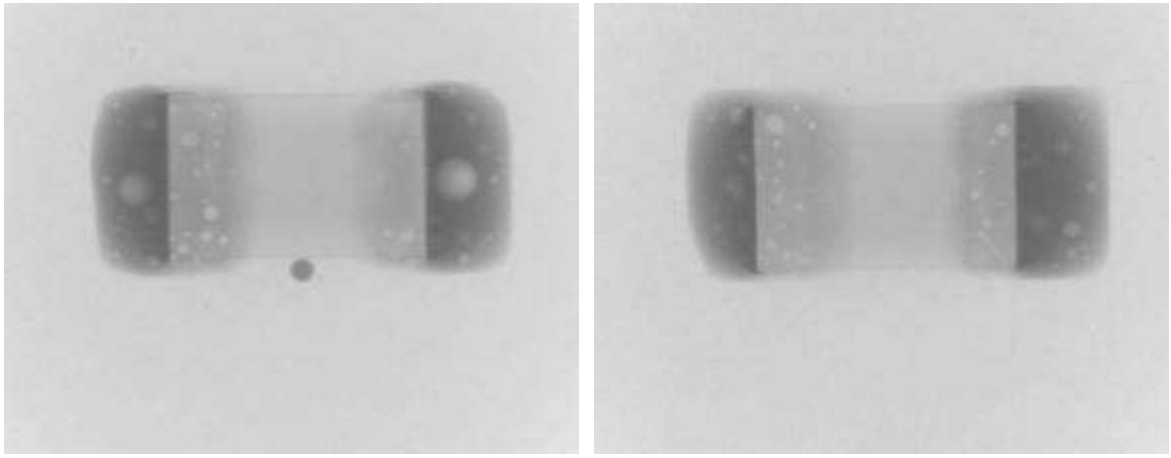
Rentgenové snímky jednotlivých spojů pro jednotlivé vzorky jsou zobrazeny na obrázcích níže.



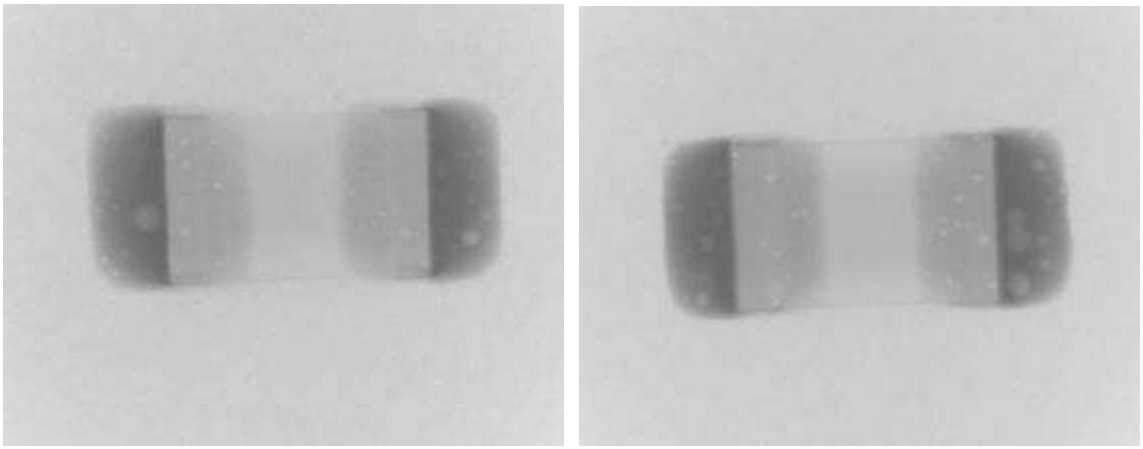
Obrázek 7-11: 3A3N - SAC305 běžně zapájeny



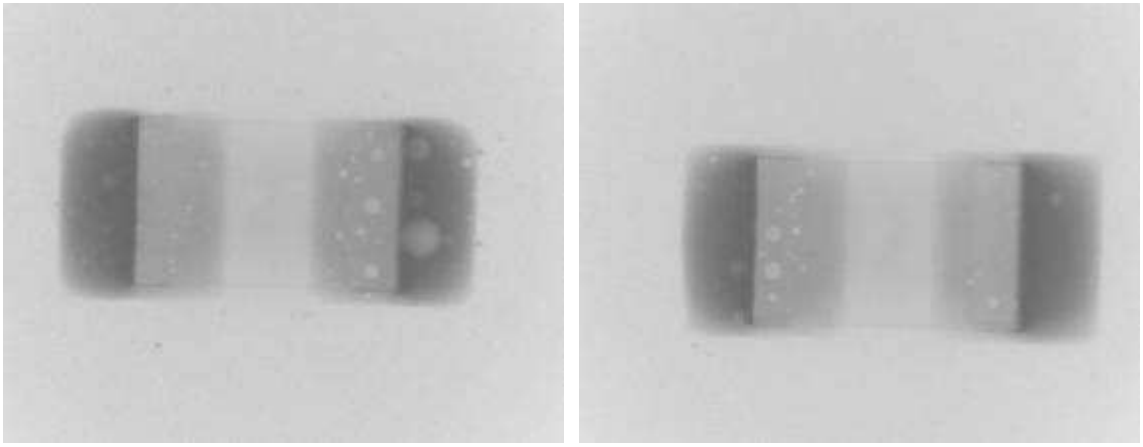
Obrázek 7-12: 3A5V - SAC305 s vibracemi



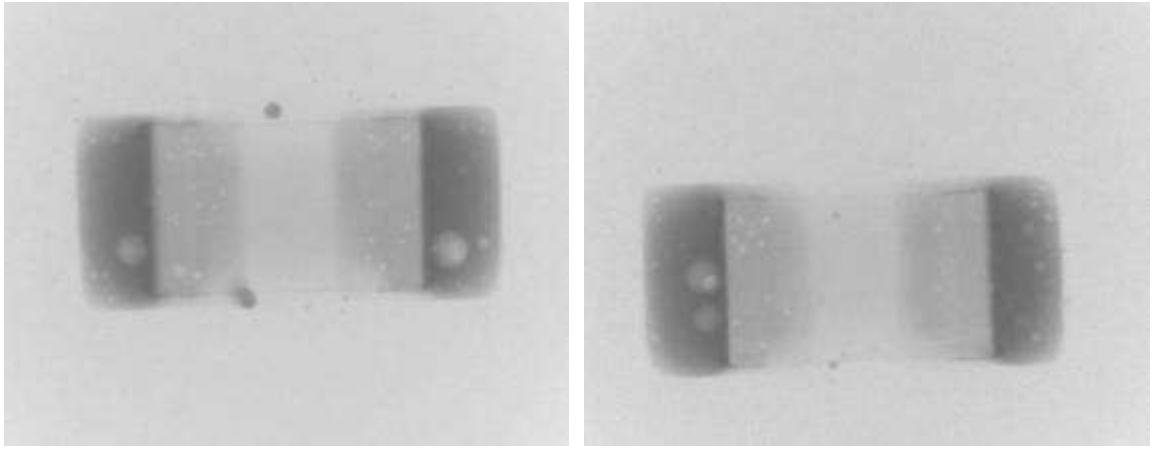
Obrázek 7-13: 3A7W SAC s vodním chlazením



Obrázek 7-14: 3B3N - SN100C běžně zapájeny



Obrázek 7-15: 3B5V – SN100C s vibracemi

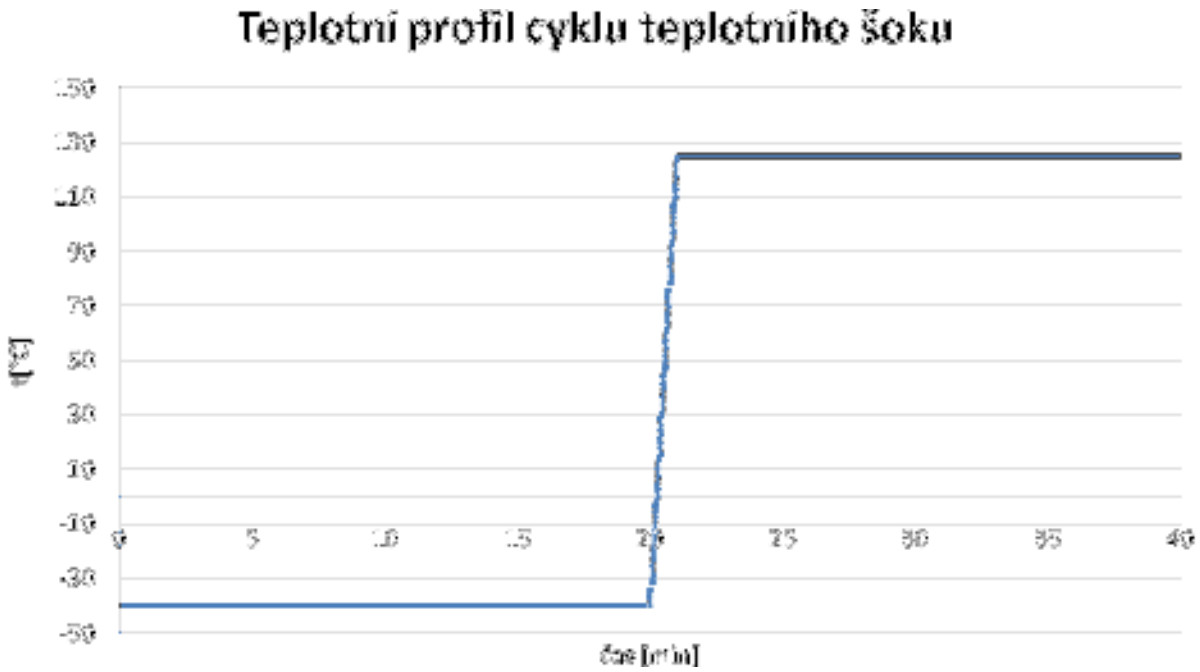


Obrázek 7-16: 3B4W – SN100C s vodním chlazením

7.7 Urychlené stárnutí

Urychlené stárnutí bylo provedeno ve firmě Continental Automotive Czech Republic s.r.o. ve Frenštátě pod Radhoštěm. Použitým zařízením pro urychlené stárnutí byla teplotní šoková komora Heraeus Vötsch VT 7012 S2 .

Teplotní šok byl nastaven v rozmezí teplot -40°C až 125°C s dobou trvání na teplotě 20 minut, teplotní profil je znázorněn na obrázku 7-17. Vzorky byly podrobeny celkem 880 teplotním cyklům. Protože při optické kontrole po těchto cyklech byly pozorovány praskliny, bylo urychlené stárnutí ukončeno a jednotlivé vzorky vyhodnoceny rentgenem, optickou kontrolou povrchu, mechanickými zkouškami a zkoumáním struktury spoje. tabulka 7-4 ukazuje vzorky, které byly podrobeny urychlenému stárnutí



Obrázek 7-17: Teplotní profil teplotního šoku

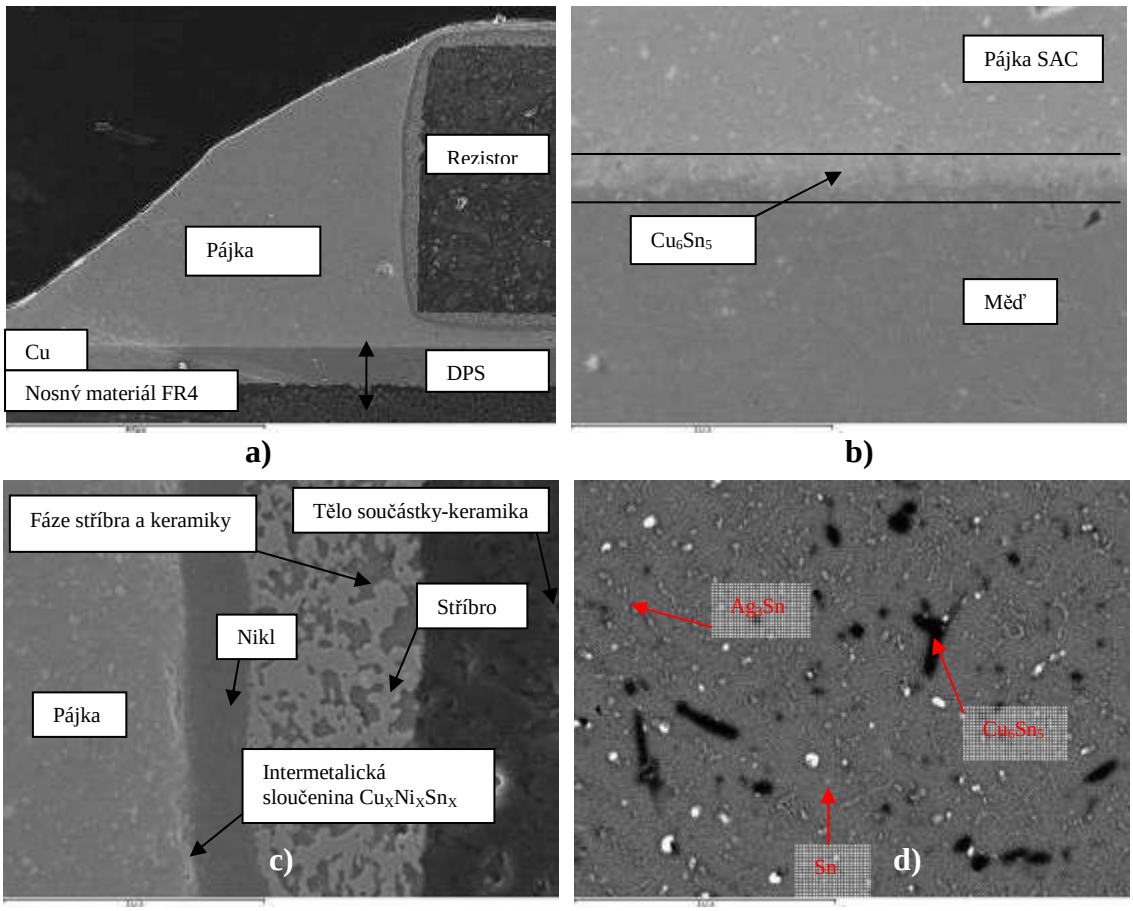
Označení	Stárnuto	Označení	Stárnuto
3A3N	ano	3B3N	ano
3A4N	ne	3B4W	ano
3A5V	ano	3B5V	ano
3A6V	ne	3B6N	ne
3A7W	ne	3B7V	ne
3A8W	ano	3B8W	ne

Tabulka 7-4: Seznam vzorků pro urychlené stárnutí

7.8 Vliv pájecí metody na výslednou strukturu

7.8.1 Struktura pájeného spoje 3A4N - pájka SAC305 zapájená za běžných podmínek

U pájeného spoje byly zkoumány tloušťky intermetalických sloučenin, struktura spoje a celkový vzhled pájeného spoje. Podle vzhledu pájeného spoje je možné vyhodnotit praskliny ve spoji. U běžně zapájeného vzorku pájkou SAC, kde nebylo provedeno urychlené stárnutí, nebyly nalezeny žádné poruchy ani praskliny pájeného spoje. Vzhled pájeného spoje je znázorněn na obrázku 7-18. Na rozhraní pájky a desky plošného spoje se vyskytla intermetalická sloučenina Cu_6Sn_5. Tloušťka této vrstvy je menší než 5µm. Na rozhraní součástky s pájkou se vyskytuje intermetalická sloučenina $Cu_xNi_xSn_x$, protože součástka má povrchovou úpravu tvořenou niklem. Tloušťka této vrstvy je nehomogenní, ale pohybuje se přibližně kolem hodnoty 2µm. Tloušťka niklového pokovení součástky je přibližně 10µm. Ve struktuře pájeného spoje se vyskytují dva druhy intermetalických sloučenin. Ag_3Sn tvořící drobné řetízky a Cu_6Sn_5, které tvoří plochy. Tyto sloučeniny vyplňují převažující matrici cínu. Bílé plochy ve struktuře jsou způsobeny nečistotami, které byly na pájený spoj zaneseny při tvorbě metalografického výbrusu. Struktura běžně zapájených spojů je nepravidelně uspořádána bez náznaku pravidelnosti.

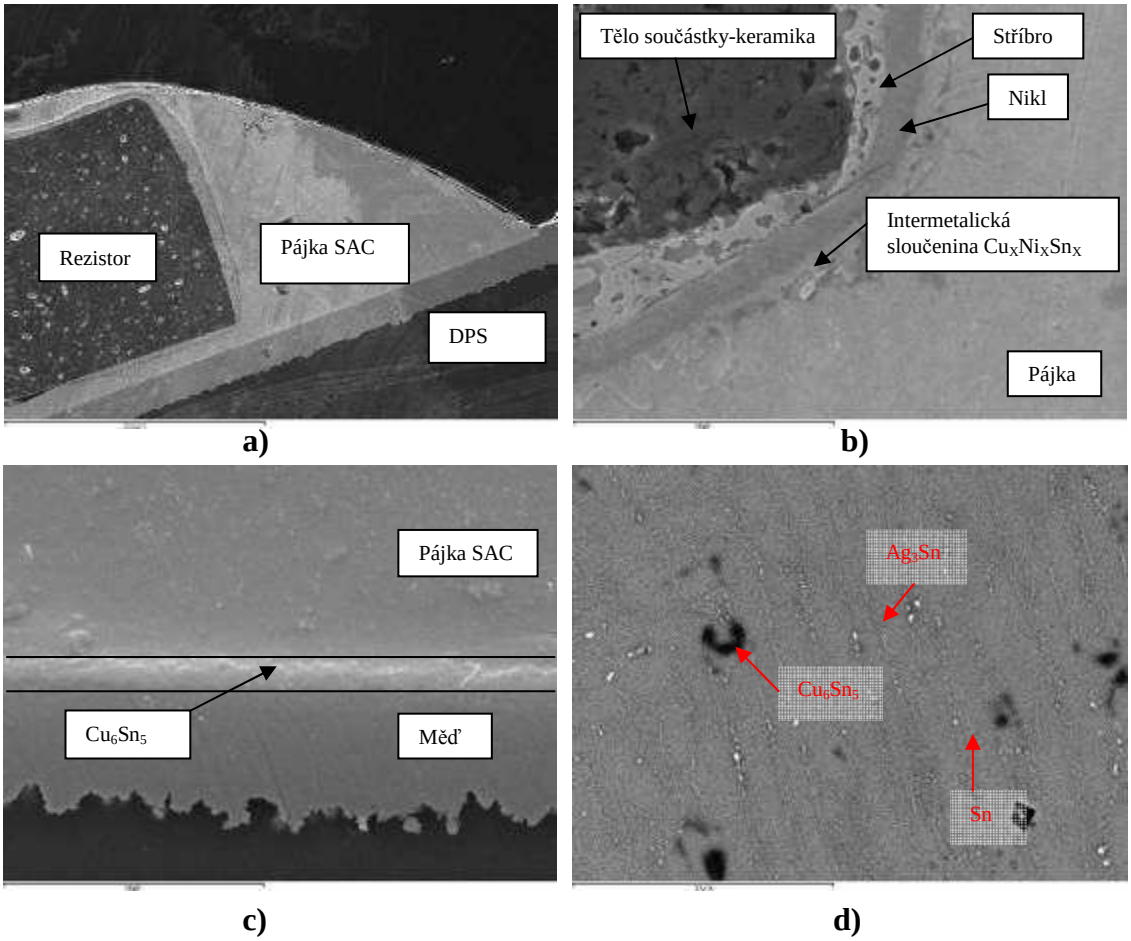


Obrázek 7-18: Běžně pájený spoj SAC305, a) Pohled na celý spoj (zvětšeno 140x), b) rozhraní měď pájka (zvětšeno 2000x), c) rozhraní součástka – pájka (zvětšeno 2000x), d) Struktura spoje (zvětšeno 2000x)

7.8.2 Struktura pájeného spoje 3A6V - pájka SAC305 zapájená za použití vibrací

Struktura pájeného spoje SAC305 s použitím vibrací je odlišná než u spojů běžně zapájených. Základem struktury jsou cínové plochy, kterými svisle procházejí intermetalické sloučeniny Ag3Sn. Ve struktuře se vyskytují intermetalické sloučeniny Cu6Sn5. Tyto sloučeniny ale nemají pravidelné uspořádání.

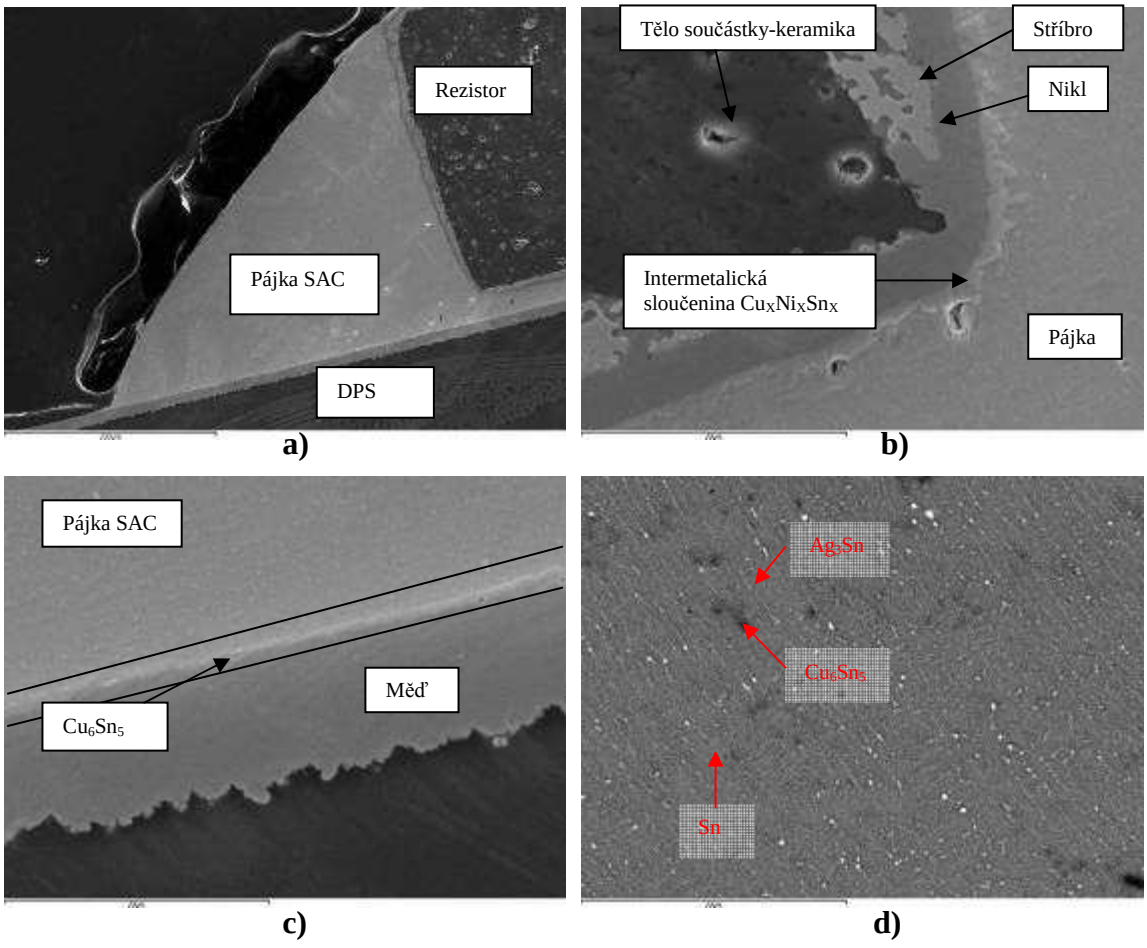
Na rozhraní součástka-pájka se vyskytuje intermetalická sloučenina CuXNiXSnX, jejíž tloušťka je 3µm. Na rozhraní FR-4 a pájky se vyskytuje intermetalická sloučenina Cu6Sn5 o tloušťce 2 µm. na obrázku 7-19 jsou znázorněny detaily spoje pořízené na SEM včetně struktury spoje.



Obrázek 7-19: Pájený spoj SAC305 s použitím vibrací, a) Pohled na celý spoj (zvětšeno 120x), b) rozhraní součástka – pájka (zvětšeno 2000x), c) rozhraní měď pájka (zvětšeno 2000x), d) Struktura spoje (zvětšeno 2000x)

7.8.3 Struktura pájeného spoje 3A7W - pájka SAC305 zapájená s vodním chlazením

Struktura pájeného spoje SAC305 s vodním chlazením je odlišná než u spojů běžně zapájených. Základem struktury jsou cínové plochy, které ohraničují intermetalické sloučeniny Ag3Sn. Ve struktuře se vyskytují intermetalické sloučeniny Cu6Sn5. Tyto sloučeniny však nemají pravidelné uspořádání. Na rozhraní součástka - pájka se vyskytuje intermetalická sloučenina CuXNiXSnX, jejíž tloušťka je 3µm. Na rozhraní FR-4 a pájky se vyskytuje intermetalická sloučenina Cu6Sn5 o tloušťce 2 µm. Na obrázku 7-20 jsou znázorněny detaily spoje pořízené na SEM včetně struktury spoje.



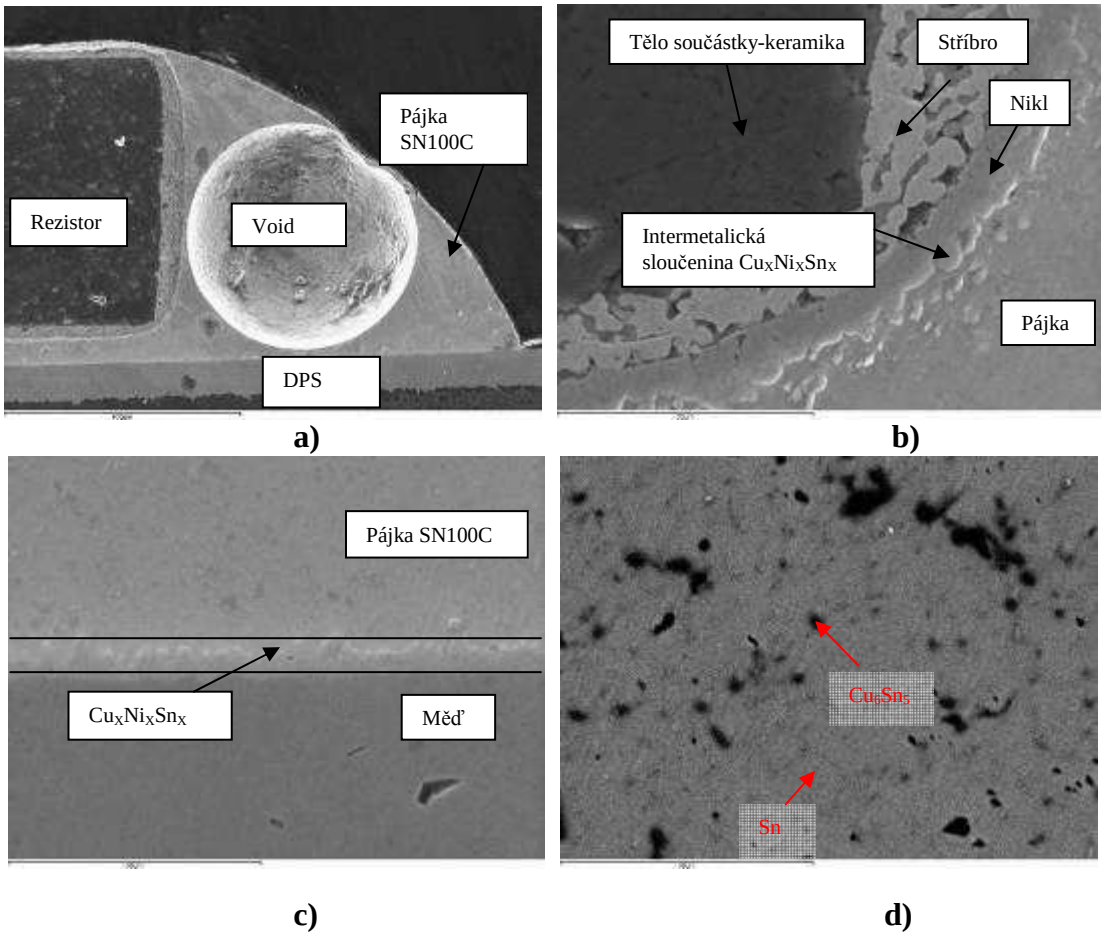
Obrázek 7-20: Vodou chlazený spoj SAC305 a)Pohled na celý spoj (zvětšeno 140x), b) rozhraní součástka – pájka (zvětšeno 2000x), c) rozhraní měď pájka (zvětšeno 2000x), d) Struktura spoje (zvětšeno 2000x)

7.8.4 Struktura pájeného spoje 3B6N - pájka SN100C zapájená za běžných podmínek

U běžně pájeného spoje pájkou SN100C se struktura výrazně liší od struktur s pájkou SAC305. Změna struktury je z důvodu jiného složení. U pájky SN100C se vyskytuje pouze cínová plocha, kterou vyplňují intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a $Cu_XNi_XSn_X$.

Tloušťka intermetalické sloučeniny $Cu_XNi_XSn_X$ na rozhraní součástka – pájka je 3µm. Přítomnost niklu v intermetalické fázi je způsobenou povrchovou úpravou součástky a stopového množství niklu v pájce.

Na rozhraní FR-4 a pájky se tvoří intermetalická sloučenina $Cu_XNi_XSn_X$ o tloušťce 4µm. Přítomnost niklu ve sloučenině je způsobením reakce stopového množství niklu v pájce. Na obrázku 7-21 jsou znázorněny detaily spoje pořízené na SEM včetně struktury spoje.



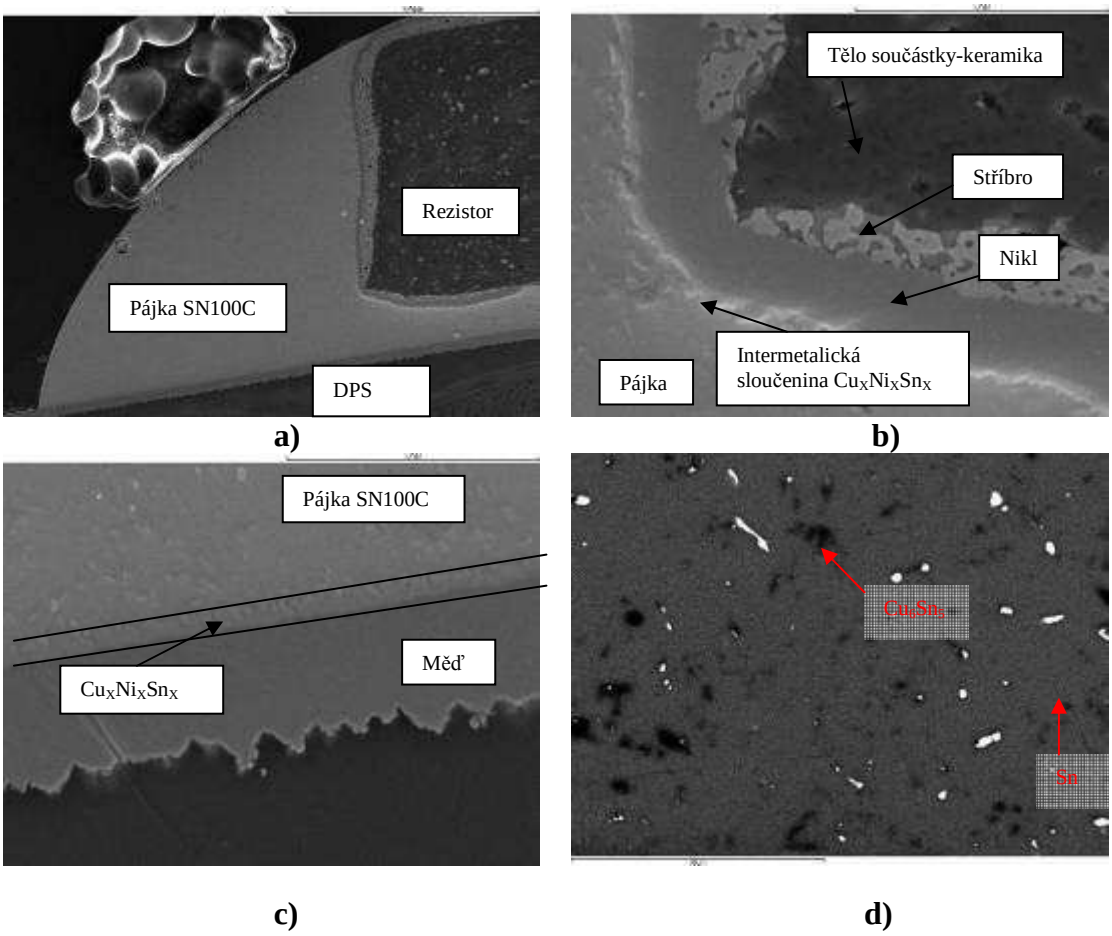
Obrázek 7-21: Běžně pájený spoj SN100C, a) Pohled na celý spoj (zvětšeno 140x), b) rozhraní součástka – pájka (zvětšeno 2000x), c) rozhraní měď pájka (zvětšeno 2000x, d) Struktura spoje (zvětšeno 2000x)

7.8.5 Struktura pájeného spoje 3B7V - pájka SN100C zapájená za použití vibrací

U pájky SN100C s použitím vodního chlazení nelze pozorovat změnu struktury oproti běžně zapájeným spojům, protože výskyt intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a $Cu_XNi_XSn_X$. v ploše cínu je nepravidelný.

Tloušťka intermetalické sloučeniny $Cu_XNi_XSn_X$ na rozhraní součástka – pájka je 3µm. Přítomnost niklu v intermetalické fázi je způsobenou povrchovou úpravou součástky a stopového množství niklu v pájce.

Na rozhraní FR-4 a pájky se tvoří intermetalická sloučenina $Cu_XNi_XSn_X$ o tloušťce 3µm. Přítomnost niklu ve sloučenině je způsobením reakce stopového množství niklu v pájce. Na obrázku 7-22 jsou znázorněny detaily spoje pořízené na SEM včetně struktury spoje.



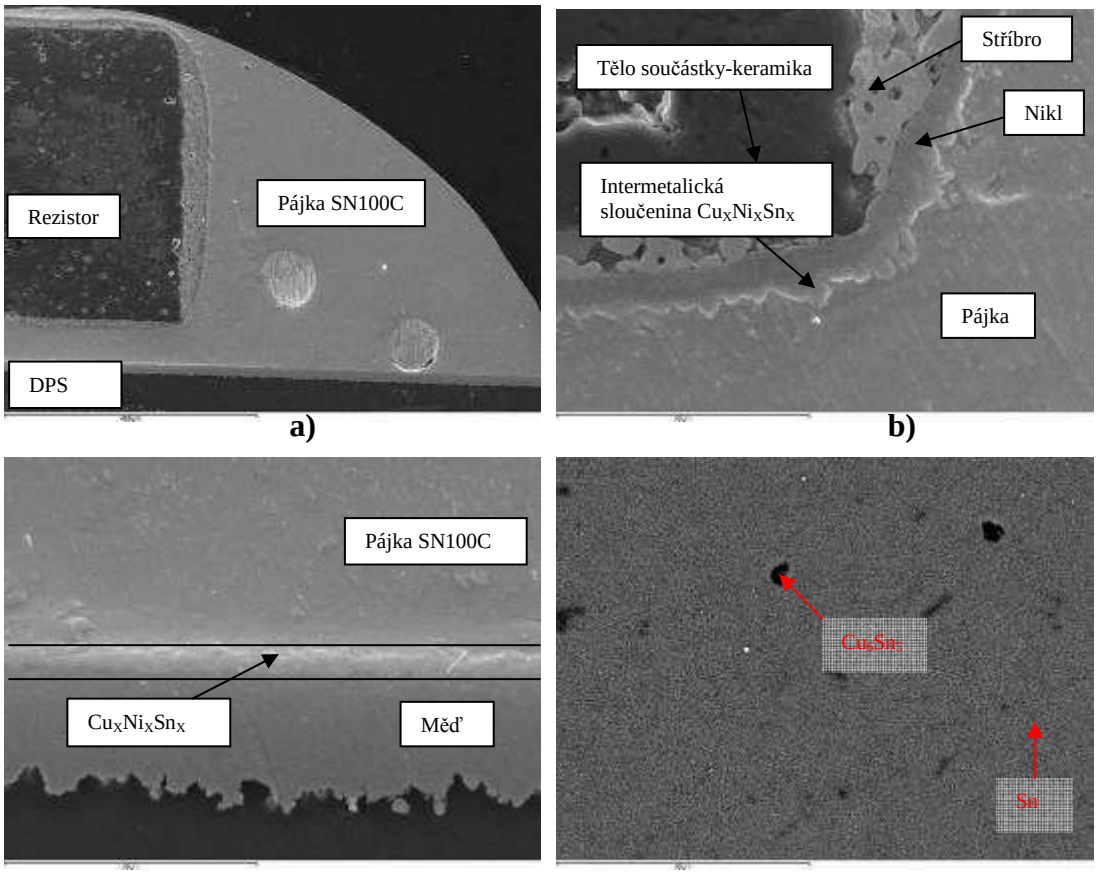
Obrázek 7-22: Pájený spoj SN100C s použitím vibrací, A - Pohled na celý spoj (zvětšeno 150x), B – rozhraní součástka – pájka (zvětšeno 2000x), C – rozhraní měď pájka (zvětšeno 2000x), D – Struktura spoje (zvětšeno 2000x

7.8.6 Struktura pájeného spoje 3B8W - pájka SN100C zapájená s vodním chlazením

U pájky SN100C s použitím vibrací nelze pozorovat změnu struktury oproti běžně zapájeným spojům, protože výskyt intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a $Cu_XNi_XSn_X$. v ploše cínu je nepravidelný.

Tloušťka intermetalické sloučeniny $Cu_XNi_XSn_X$ na rozhraní součástka – pájka je 4µm. Přítomnost niklu v intermetalické fázi je způsobenou povrchovou úpravou součástky a stopového množství niklu v pájce.

Na rozhraní FR-4 a pájky se tvoří intermetalická sloučenina $Cu_XNi_XSn_X$ o tloušťce 4µm. Přítomnost niklu ve sloučenině je způsobením reakce stopového množství niklu v pájce. Na obrázku 7-23 jsou znázorněny detaily spoje pořízené na SEM včetně struktury spoje.



Obrázek 7-23: Vodou chlazený spoj SN100C a) Pohled na celý spoj (zvětšeno 150x), b) rozhraní součástka – pájka (zvětšeno 2000x), c) rozhraní měď pájka (zvětšeno 2000x), d) Struktura spoje (zvětšeno 2000x)

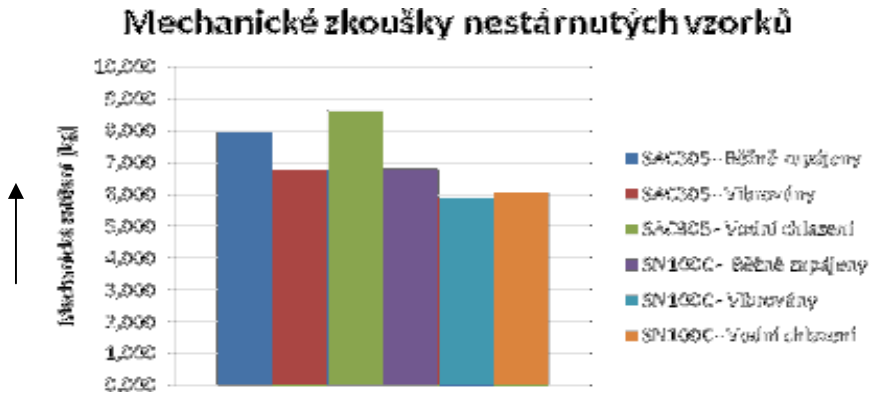
7.9 Mechanické zkoušky

Mechanické zkoušky byly provedeny na zařízení DAGE PC2400. Z výsledku střihů byly vytvořeny aritmetické průměry, které udávají informaci o pevnosti spoje. V tabulce7-5 jsou uvedeny výsledky pájek SAC305 a SN100C v závislosti na pájené metodě (A – pájka SAC305, B – pájka SN100C, N – běžně zapájený spoj, V – spoj pájeny s použitím vibrací, W – vodou chlazený pájený spoj).

Z výsledku vyplývá, že u pájky SAC305 mají největší pevnost vodou chlazené pájené spoje. Nejmenší pevnost mají spoje s použitím vibrací. U pájek SN100C mají největší pevnost běžně zapájené spoje. Nejmenší pevnost mají pájené spoje s použitím vibrací. Na obrázku 7-24 jsou znázorněny graficky jednotlivé průměry mechanického zatížení pro jednotlivé vzorky

	Mechanické zatížení [kg]					
pájený spoj	3A4N	3A6V	3A7W	3B6N	3B7V	3B8W
1	6,486	6,565	9,121	7,235	6,661	8,367
2	8,357	6,910	9,319	8,743	5,467	6,255
3	8,346	6,835	7,976	5,835	6,537	6,006
4	7,483	6,266	8,424	7,638	4,568	6,147
5	6,949	7,054	9,308	5,663	5,771	5,579
6	9,089	7,006	9,659	7,601	5,462	5,916
7	8,878	6,776	8,766	6,885	6,329	6,089
8	7,529	6,704	7,641	6,975	6,337	5,264
9	8,224	6,526	7,759	5,985	5,965	5,661
10	8,181	7,122	8,365	5,581	5,809	5,420
Aritmetický průměr	7,952	6,776	8,634	6,814	5,891	6,070

Tabulka 7-5: Výsledky mechanických testů nestárnutých vzorků



Obrázek 7-24: Grafické znázornění průměrného mechanického zatížení jednotlivých vzorků

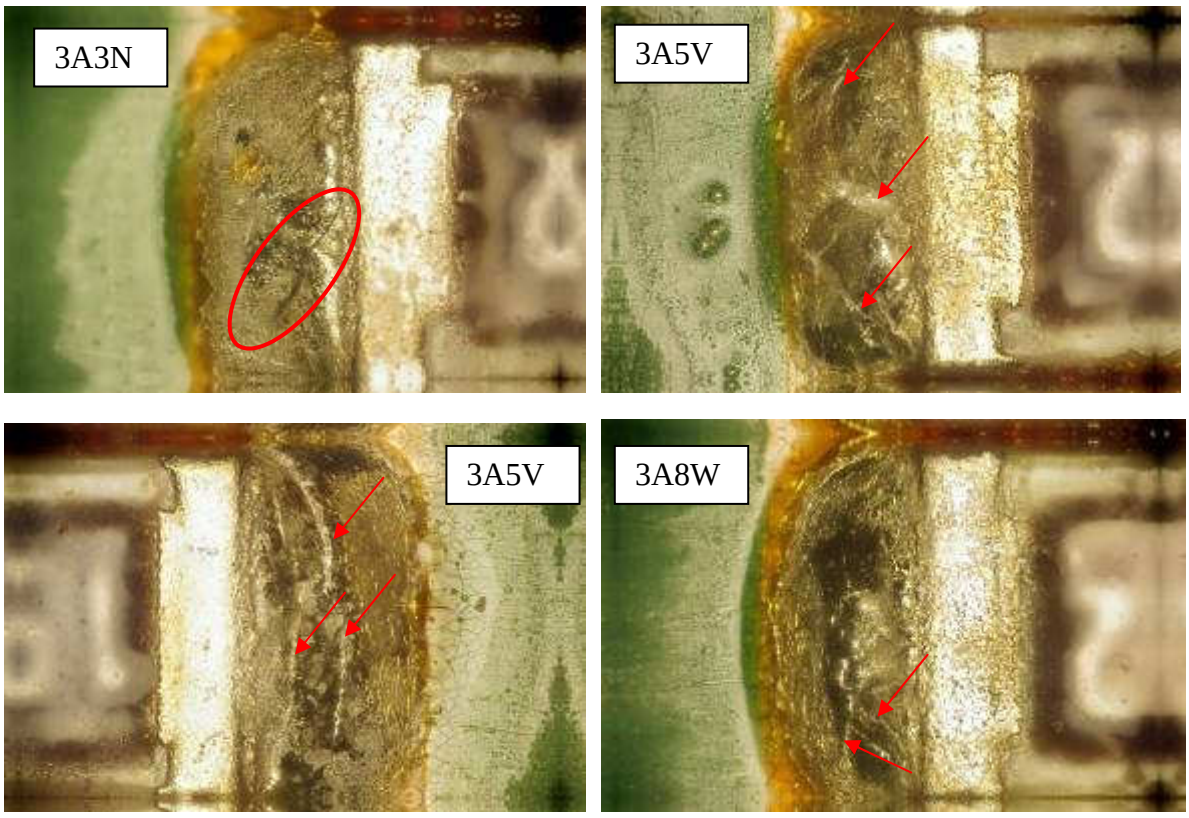
7.10 Vyhodnocení urychleného stárnutí

Během urychleného stárnutí popraskaly některé pájené spoje, proto bylo potřeba všechny vzorky důkladně vyhodnotit.

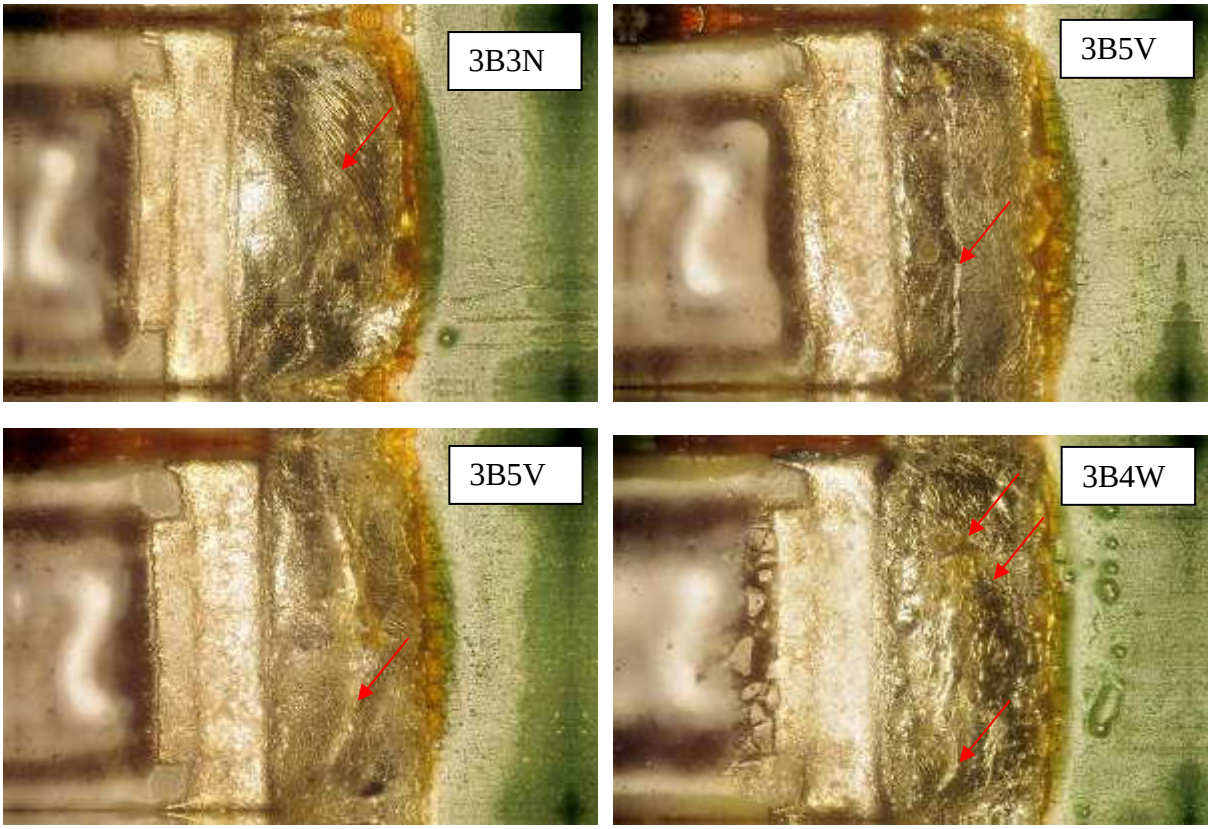
Po urychleném stárnutí se porovnaly získané data stárnutých a nestárnutých vzorků a vyhodnotily se vzniklé chyby. K vyhodnocení byly nejprve použity metody rentgenové diagnostiky a optické pozorování. Po optickém přezkoumání a zdokumentování byly provedeny destruktivní testy spojů (tvorba metalografického výbrusu a mechanické zkoušky).

7.10.1 Vyhodnocení povrchu spoje

Po urychleném stárnutí byly vzorky prozkoumány opticky a zdokumentovány. Na některých stárnutých vzorcích byly pozorovány praskliny různých rozměrů. Tyto praskliny byly poté nafoceny. Na obrázku 7-24 jsou znázorněny praskliny u jednotlivých vzorků pájky SAC305. Na obrázku 7-25 jsou znázorněny praskliny u jednotlivých vzorků pájky SN100C



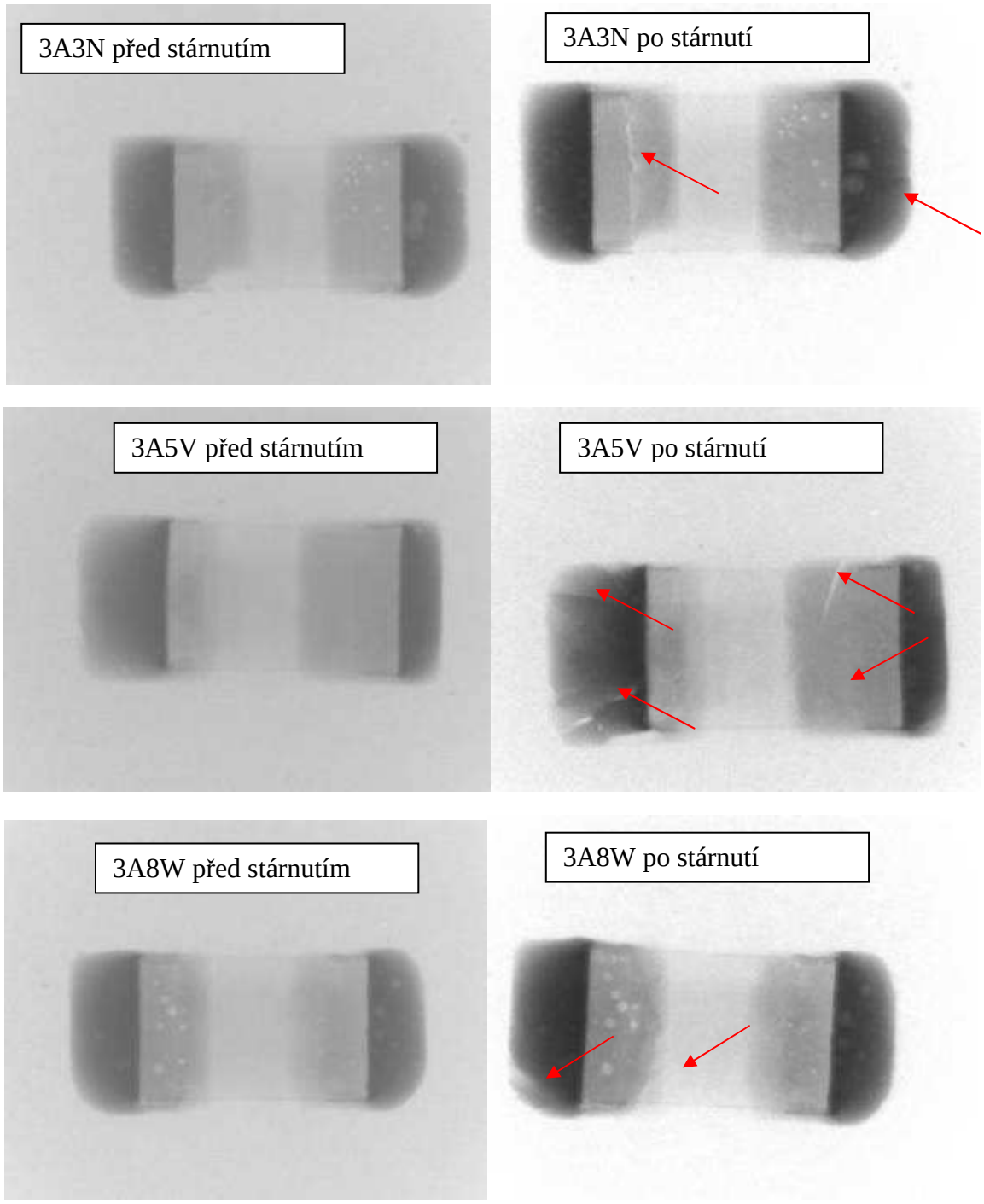
Obrázek 7-25: Praskliny u stárnutých SAC305 spojů



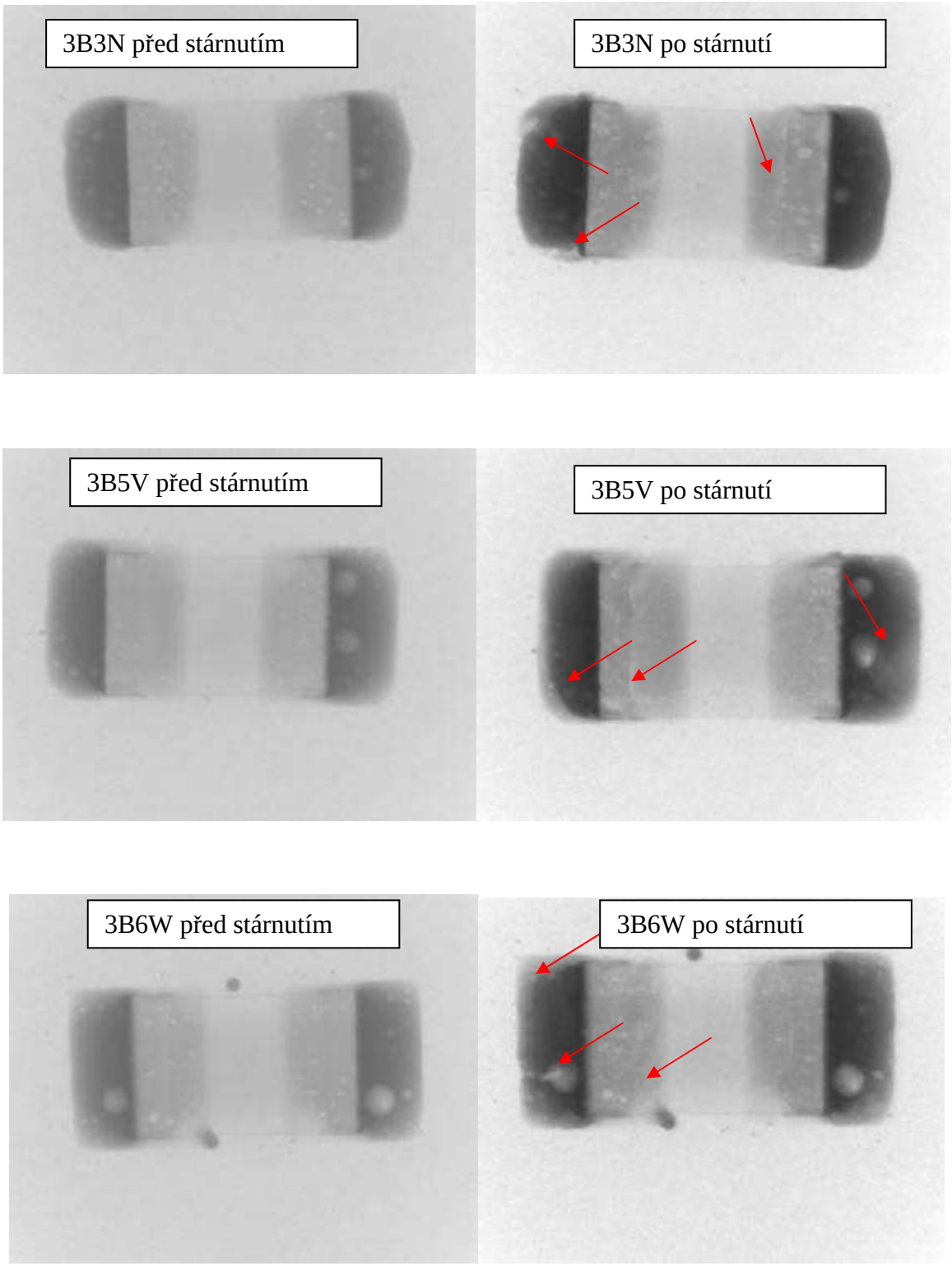
Obrázek 7-26: Praskliny u stárnutých SN100C spojů

7.10.2 Vyhodnocení spojů rentgenem

U vyhodnocení rentgenem bylo také možné odhalit praskliny spojů. U vibrací vznikly praskliny skrz celý pájený spoj, což může mít za důsledek úplnou nefunkčnost spoje. Pro větší názornost jsou na zobrazených obrázcích vedle sebe dány rentgenové snímky před a po urychleném stárnutí.



Obrázek 7-27: Vyhodnocení rentgenových snímku pájky SAC305 zapájené různými metodami



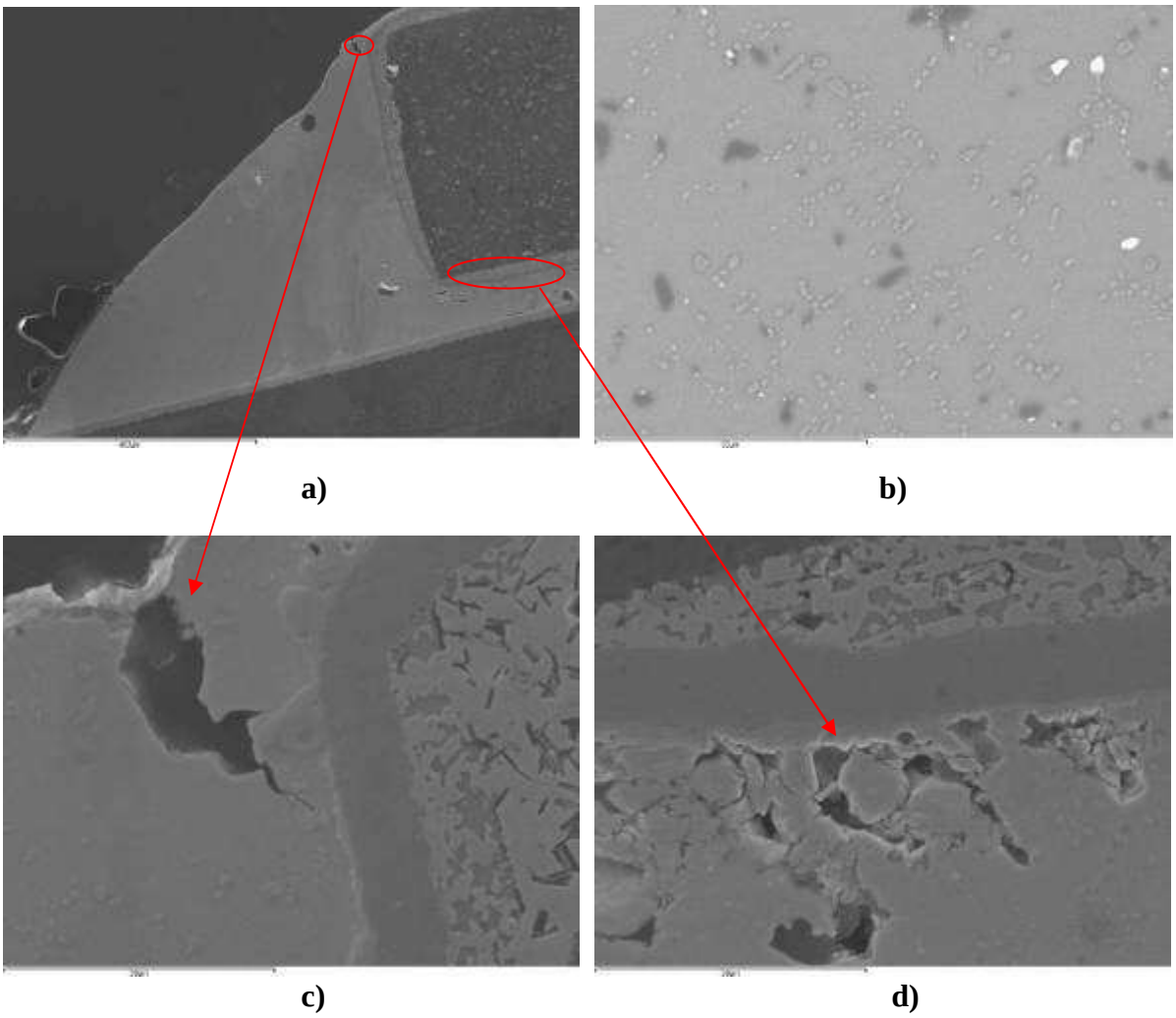
Obrázek 7-28: Vyhodnocení rentgenových snímku pájky SAC305 zapájené různými metodami

7.10.3 Vyhodnocení struktur spojů

Po urychleném stárnutí byla každá pájecí metoda vyhodnocena na elektronovém mikroskopu. Vyskytly se praskliny u pájených spojů a nebyl pozorován nárůst intermetalických sloučenin. Praskliny se vyskytují na rozhraních pájky se součástkou nebo na rozhraní pájky a FR4. Prasklina vzniká v místě intermetalické fáze.

7.10.3.1 Struktura stárnutého spoje 3A3N - pájka SAC305 zapájená za běžných podmínek

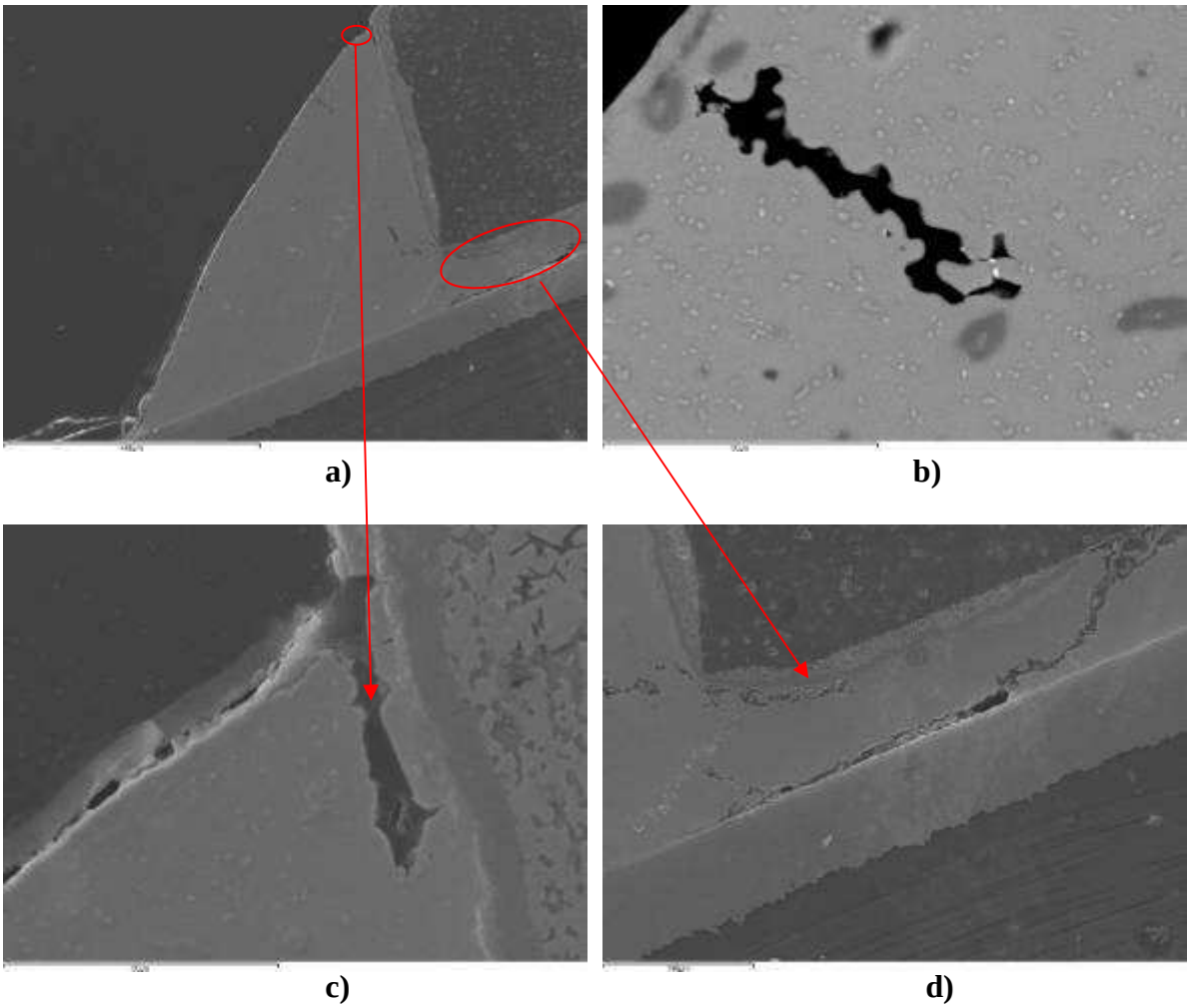
U běžně pájeného spoje SAC305 po urychleném stárnutí vznikly praskliny. Tyto praskliny se vyskytly v horní a spodní části součástky. Změna struktury proti nestárnutému spoji nebyla pozorována. Praskliny vznikají pouze na rozhraní pájky a intermetalické sloučeniny. Nárůst intermetalických sloučenin nebyl pozorován. Praskliny a struktura spoje 3A3N je znázorněna na obrázku 7-29.



Obrázek 7-29: Běžně pájený spoj SAC305, a) Pohled na celý spoj (zvětšeno 140x), b) Struktura spoje (zvětšeno 2000x), c) detail praskliny (zvětšeno 2000x), d) detail praskliny (zvětšeno 2000x)

7.10.3.2 Struktura stárnutého spoje 3A5V - pájka SAC305 zapájená za použití vibrací

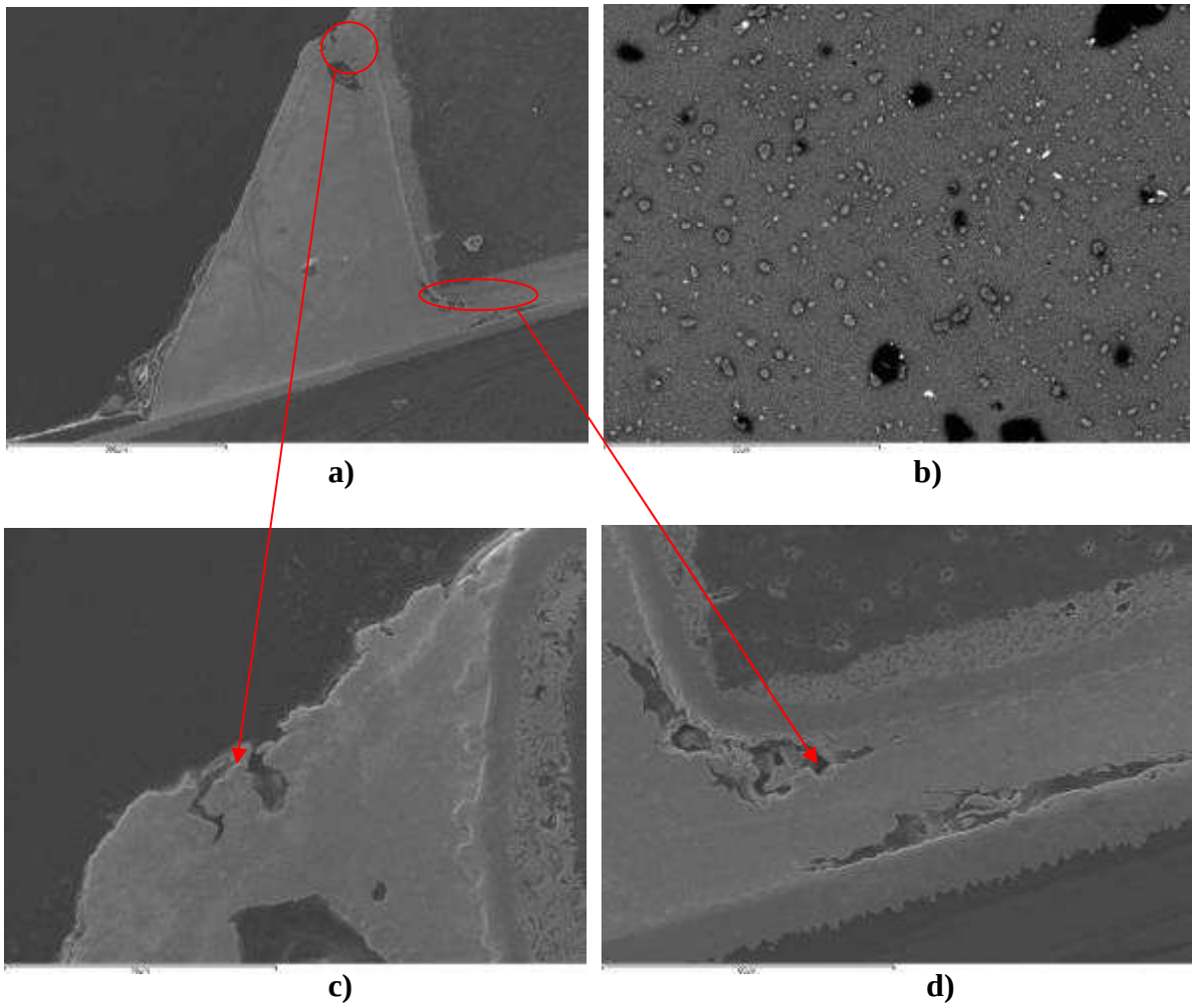
U spoje SAC305 s použitím vibrací po urychleném stárnutí vznikly praskliny. Tyto praskliny se vyskytly v horní a spodní části součástky. Změna struktury proti nestárnutému spoji nebyla pozorována. Praskliny vznikají pouze na rozhraní pájky a intermetalické sloučeniny. Byla nalezena prasklina v pájce vodorovná s intermetalickou sloučeninou Ag_3Sn. Praskliny oproti běžně zapájeným spojům jsou výrazně větší. Praskliny a struktura spoje 3A5V je znázorněna na obrázku 7-30. Na obrázku 7-30 c) je znázorněn výskyt praskliny i mezi FR-4 a pájkou. Nárůst intermetalických sloučenin nebyl pozorován.



Obrázek 7-30: Pájený spoj SAC305 s použitím vibrací, a) Pohled na celý spoj (zvětšeno 140x), B – Struktura spoje (zvětšeno 2000x), C – detail praskliny (zvětšeno 2000x), D – detail praskliny (zvětšeno 330x)

7.10.3.3 Struktura stárnutého spoje 3A8W - pájka SAC305 zapájená s vodním chlazením

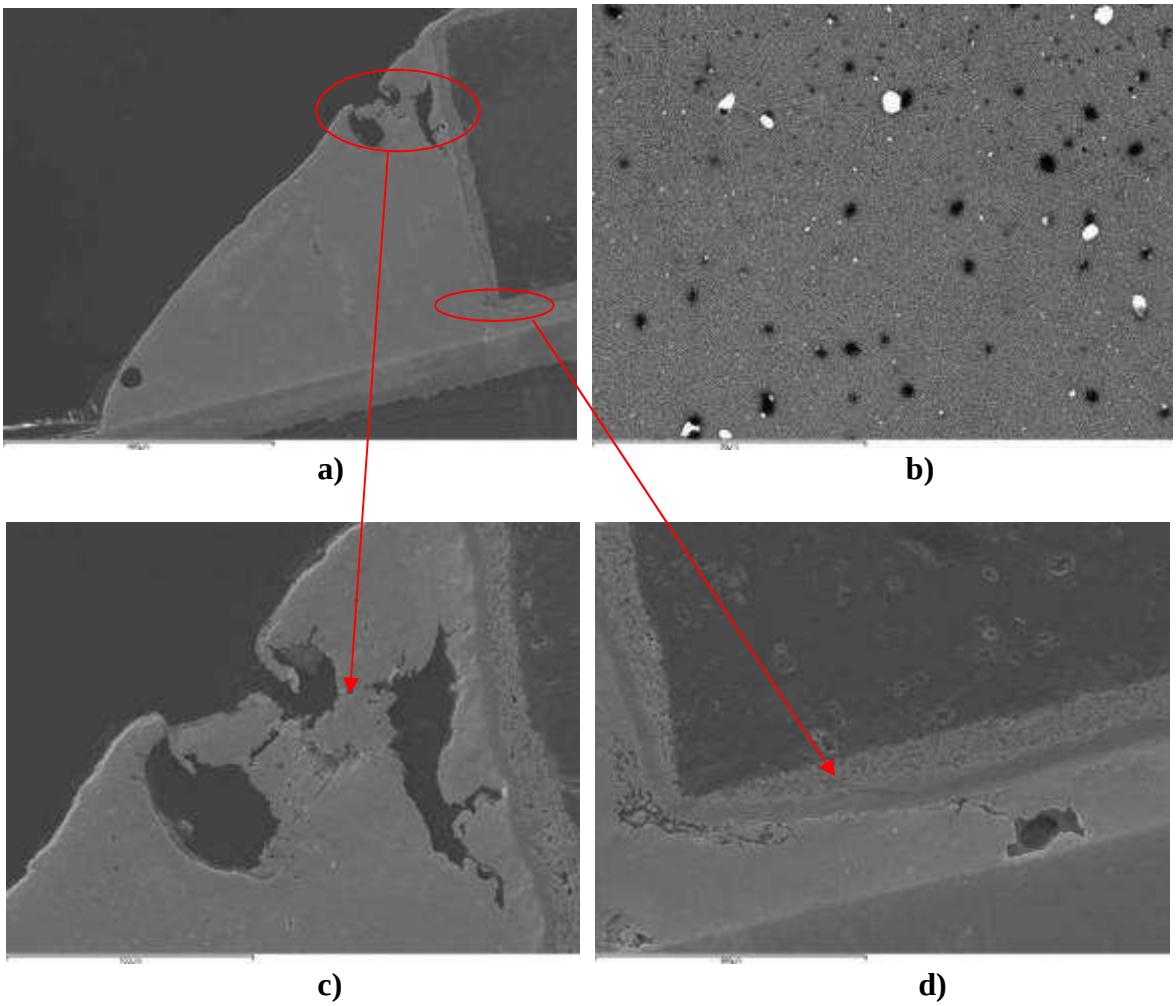
U spoje SAC305 s vodním chlazením po urychleném stárnutí vznikly praskliny. Tyto praskliny se vyskytly v horní a spodní části součástky. Praskliny vznikají pouze na rozhraní pájky a intermetalické sloučeniny. Nebyla objevena prasklina uvnitř spoje, pouze na povrchu spoje v horní části součástky, ve spodní části součástky a na rozhraní FR-4 a pájky. Nárůst intermetalických sloučenin byl pozorován na rozhraní pájky a součástky ve střední části. Tento nárůst však nebyl homogenní a maximální tloušťka intermetalické vrstvy činila 6µm. Praskliny a struktura spoje 3A8W je znázorněna na obrázku 7-31.



Obrázek 7-31: Vodou chlazený pájený spoj SAC305, A - Pohled na celý spoj (zvětšeno 160x), B – Struktura spoje (zvětšeno 2000x), C – detail praskliny (zvětšeno 850x), D – detail praskliny (zvětšeno 700x)

7.10.3.4 Struktura stárnutého spoje 3B3N - pájka SN100C zapájená za běžných podmínek

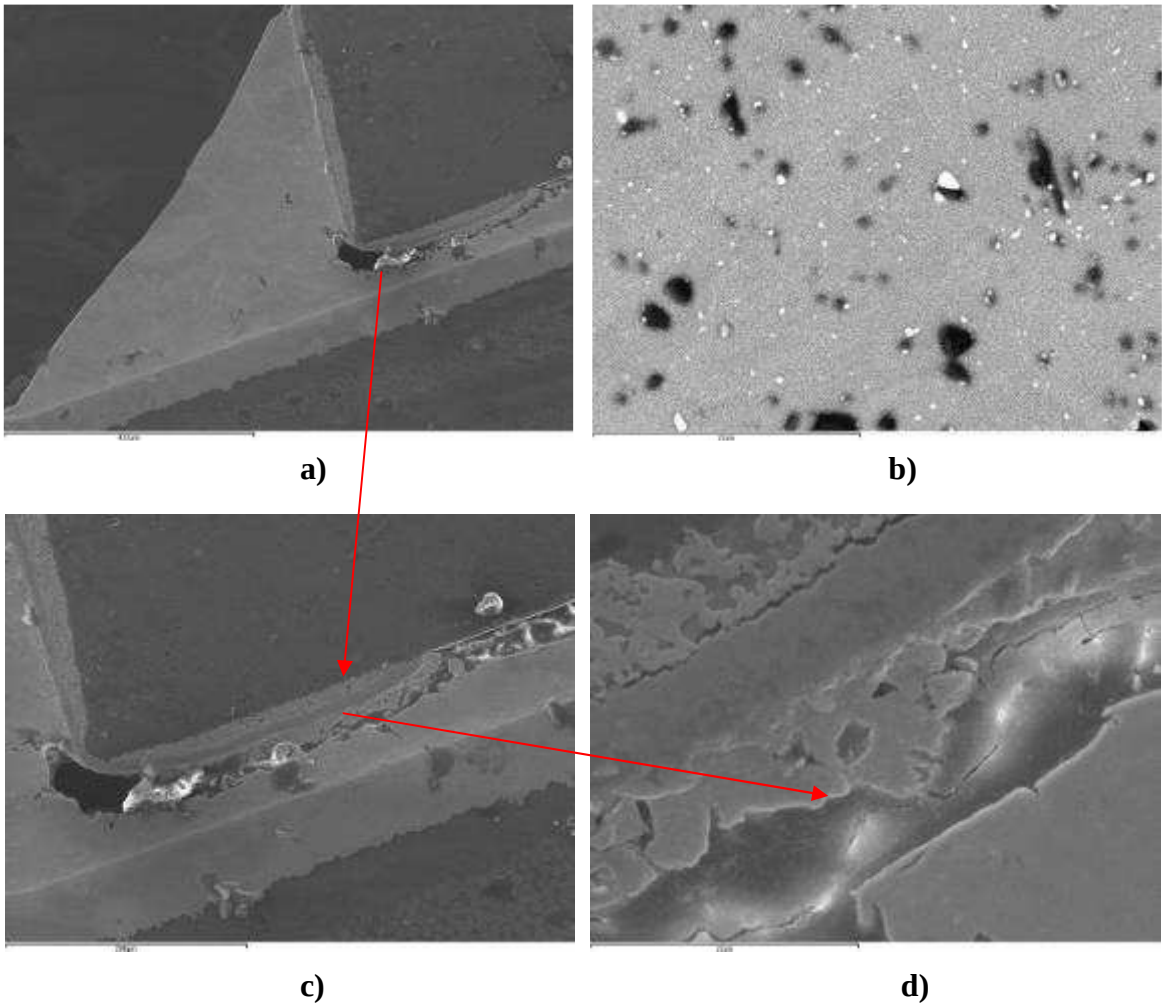
U běžně zapájeného spoje SN100C po urychleném stárnutí vznikly praskliny. Tyto praskliny se vyskytly v horní a spodní části součástky. Změna struktury proti nestárnutému spoji nebyla pozorována. Praskliny vznikají pouze na rozhraní pájky a intermetalické sloučeniny. Praskliny oproti běžně zapájeným spojům pájky SAC305 jsou výrazně větší, zvláště v horní části spoje. Nárůst intermetalických sloučenin nebyl pozorován. Praskliny a struktura spoje 3B3N je znázorněna na obrázku 7-32.



Obrázek 7-32: Běžně pájený spoj SN100C, a) Pohled na celý spoj (zvětšeno 150x), b) Struktura spoje (zvětšeno 2000x), c) detail praskliny (zvětšeno 550x), d) detail praskliny (zvětšeno 600x)

7.10.3.5 Struktura stárnutého spoje 3B5V - pájka SN100C zapájená za použití vibrací

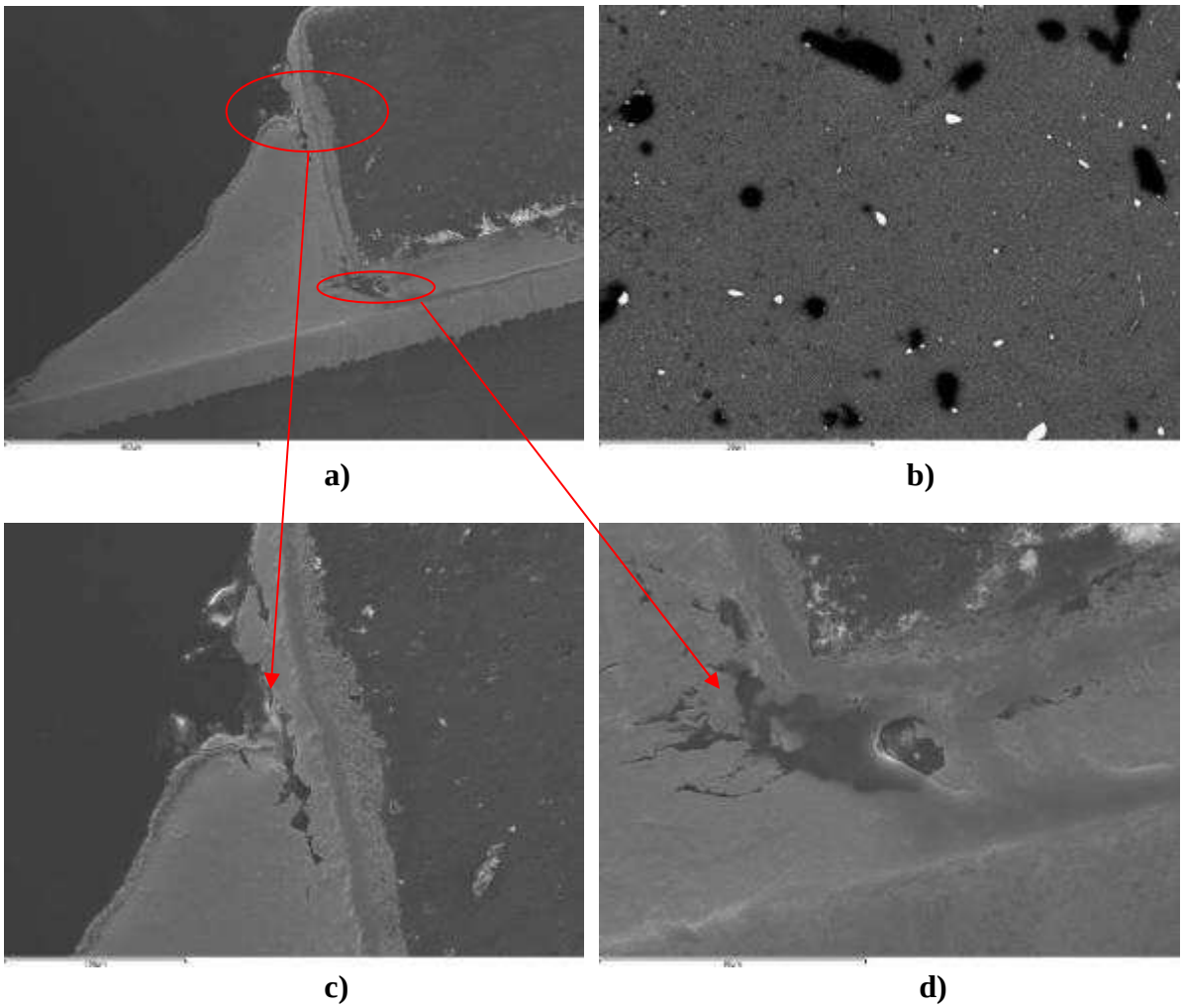
U spoje SN100C s použitím vibrací po urychleném stárnutí vznikly praskliny. Tyto praskliny se vyskytly ve spodní části součástky. Změna struktury proti nestárnutému spoji nebyla pozorována. Praskliny vznikají pouze na rozhraní pájky a intermetalické sloučeniny. Pozorovaná prasklina vznikla ve spodní části součástky a je výrazně větší než u běžně pájeného spoje. Praskliny a struktura spoje 3B5V je znázorněna na obrázku 7-33. U pájecí plošky součástky je pozorována prasklina mezi vrstvou stříbra a niklu součástky. Tato prasklina je pozorovatelná obrázku 7-33 d) Nárůst intermetalických sloučenin nebyl pozorován.



Obrázek 7-33: Pájený spoj SN100C s použitím vibraci, a) Pohled na celý spoj (zvětšeno 140x), b) Struktura spoje (zvětšeno 2000x), c) detail praskliny (zvětšeno 270x), d) detail praskliny (zvětšeno 2000x)

7.10.3.6 Struktura stárnutého spoje 3B4W - pájka SN100C zapájená s vodním chlazením

U spoje SN100C s vodním chlazením po urychleném stárnutí vznikly praskliny. Tyto praskliny se vyskytly ve spodní a horní části součástky. Změna struktury proti nestárnutému spoji nebyla pozorována. Praskliny vznikají pouze na rozhraní pájky a intermetalické sloučeniny. Pozorovaná prasklina vznikla ve spodní části součástky a je výrazně větší než u běžně pájeného spoje. Na rozhraní pájka a FR-4 je pozorovaná nečistota a nelze určit, zda se jedná o prasklinu. Praskliny a struktura spoje 3B4W je znázorněna na obrázku 7-34. Nárůst intermetalických sloučenin nebyl pozorován.



Obrázek 7-34: Vodou chlazený pájený spoj SN100C, a) Pohled na celý spoj (zvětšeno 140x), b) Struktura spoje (zvětšeno 2000x), c) detail praskliny (zvětšeno 400x), d) detail praskliny (zvětšeno 650x)

7.10.4 Vyhodnocení mechanických testů

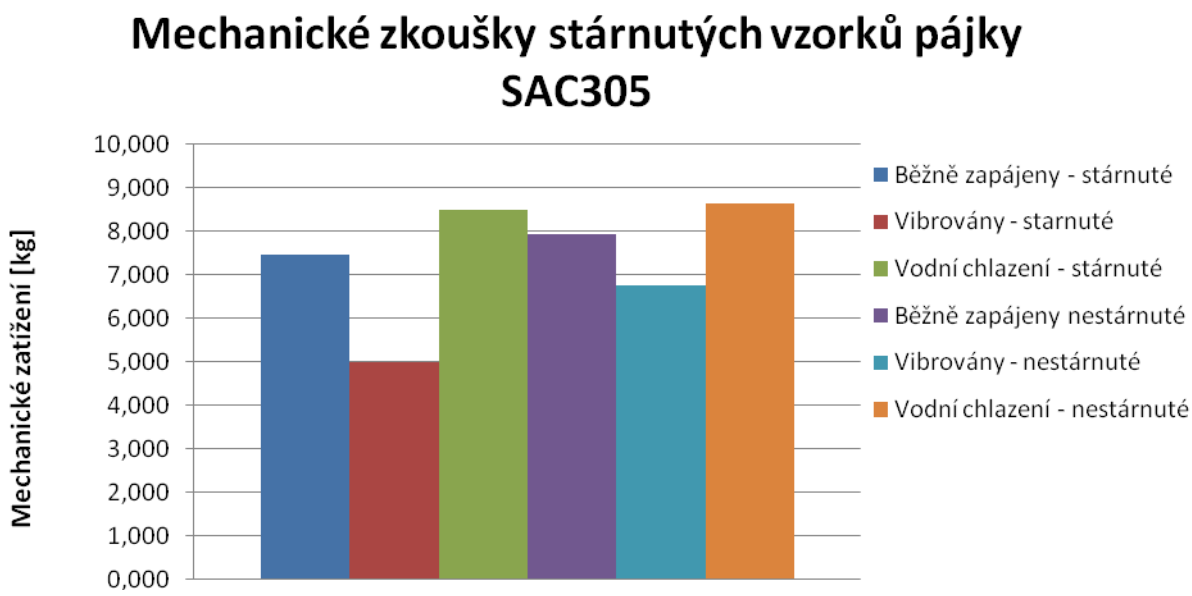
Po urychleném stárnutí byly provedeny mechanické zkoušky střihem u pájených spojů obdobně jako u nestárnutých spojů. Tyto výsledky byly zprůměrovány a porovnány s předchozími měřeními.

U pájky SAC305 došlo k výraznému poklesu pevnosti spojů zapájených s použitím vibrací. Průměrná hodnota mechanického zatížení stárnutých vibrovaných spojů je výrazně nižší než u ostatních pájecích metod po urychleném stárnutí. Pokles mezi metodami běžně zapájených spojů a spojů s vodním chlazením není výrazný a výsledky jsou přijatelné. Nejlepší výsledky po urychleném stárnutí má pájecí metoda s vodním chlazením. Metoda Běžného pájení je také vyhovující, ale metoda vibrací je nepřijatelná.

Výsledky měření jsou znázorněny v tabulce 7-6 (symbol "S" v závorce za označením vzorku symbolizuje, jestli pájené spoje byly stárnuty). Pro grafické znázornění je na obrázku 7-35 zobrazení průměrného mechanického zatížení vzorků z tabulky 7-6

Mechanické zatížení [kg]						
pájený spoj	3A3N (S)	3A4N	3A5V (S)	3A6V	3A7W	3A8W (S)
1	9,995	6,486	5,422	6,565	9,121	8,788
2	7,876	8,357	4,802	6,910	9,319	9,083
3	5,460	8,346	5,070	6,835	7,976	8,310
4	7,072	7,483	5,176	6,266	8,424	6,259
5	7,228	6,949	4,429	7,054	9,308	7,151
6	8,337	9,089	4,587	7,006	9,659	9,305
7	7,285	8,878	5,528	6,776	8,766	9,392
8	7,813	7,529	5,575	6,704	7,641	8,906
9	7,097	8,224	4,590	6,526	7,759	9,499
10	6,684	8,181	4,826	7,122	8,365	8,368
Aritmetický průměr	7,485	7,952	5,001	6,776	8,634	8,506

Tabulka 7-6: Hodnoty mechanického zatížení stříhaných spojů s pájkou SAC305



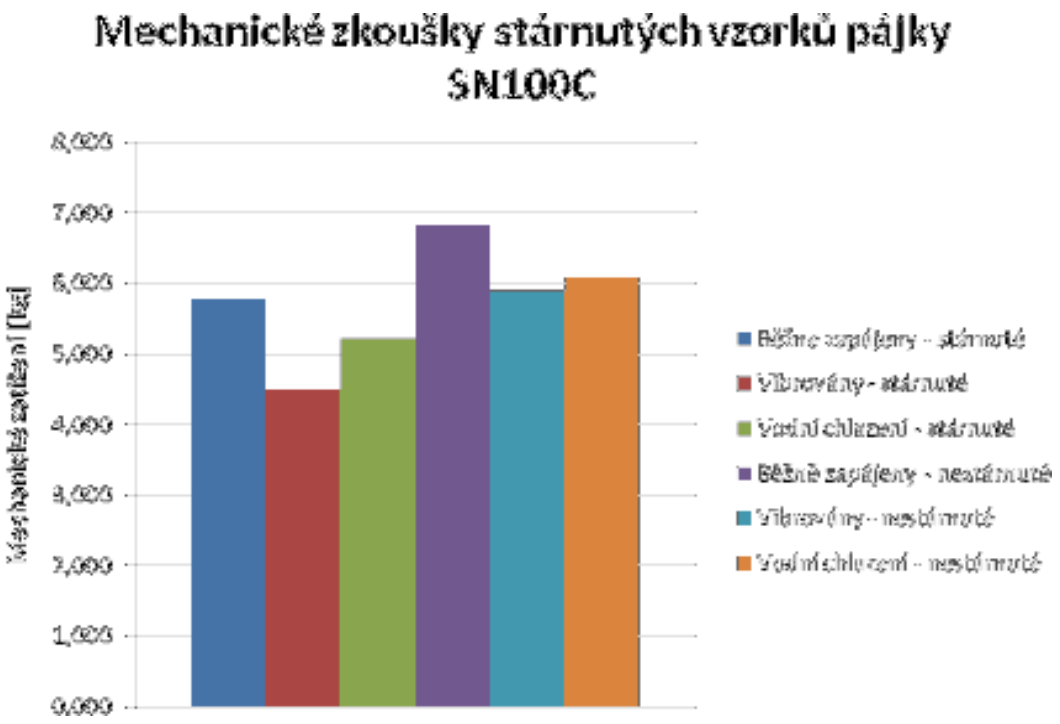
Obrázek 7-35: Grafické znázornění průměrného mechanického zatížení jednotlivých stárnutých vzorků pájky SAC305

U pájky SN100C je také pozorován pokles pevnosti vibrovaných spojů, ale i pokles pevnosti běžně pájených spojů a spojů s vodním chlazením oproti nestárnutým spojům. Nejmenší pevnost po stárnutí mají vibrované spoje. Nejvyšší pevnost mají stárnuté spoje běžně zapájeny. Výsledky měření jsou znázorněny v Tabulka 7-7 (symbol "S" v závorce za označením vzorku symbolizuje, jestli pájené spoje byly stárnuty). Pro grafické znázornění je na obrázku 7-36 zobrazena průměrná síla mechanického zatížení vzorku z tabulky 7-7.

V porovnání pevnosti po stárnutí s pájkou SAC305 má pájka SN100C nižší pevnost ve všech pájecích metodách.

Mechanické zatížení [kg]						
pájený spoj	3B3N (S)	3B4W (S)	3B5V (S)	3B6N	3B7V	3B8W
1	6,398	6,211	6,011	7,235	6,661	8,367
2	5,143	5,250	4,695	8,743	5,467	6,255
3	5,560	5,152	4,866	5,835	6,537	6,006
4	5,790	4,113	3,851	7,638	4,568	6,147
5	5,200	4,142	3,539	5,663	5,771	5,579
6	6,885	5,824	4,413	7,601	5,462	5,916
7	5,557	5,433	4,806	6,885	6,329	6,089
8	5,860	5,859	4,336	6,975	6,337	5,264
9	5,900	5,364	4,144	5,985	5,965	5,661
10	5,384	4,802	4,296	5,581	5,809	5,420
Aritmetický průměr	5,768	5,215	4,496	6,814	5,891	6,070

Tabulka 7-7: Hodnoty mechanického zatížení stříhaných spojů s pájkou SN100C



Obrázek 7-36: Grafické znázornění průměrného mechanického zatížení jednotlivých stárnutých vzorků pájky SN100C

7.11 Vyhodnocení experimentu

Během urychleného stárnutí vznikly praskliny u obou typů pájek a u všech pájecích metod. Lze pouze porovnávat výhody a nevýhody pájecích metod v závislosti na pájecí slitině.

SN100C

Povrch spoje – u běžného pájení nejlepší, u vibrací vznik mikroprasklin, u vodního chlazení nedokonalá smáčivost.

Výskyt voidů – výskyt voidů je u všech pájecí metod.

Změna struktury – nelze pozorovat, protože výskyt intemetalických sloučenin Cu_6Sn_5 je náhodný.

Mechanické vlastnosti – největší pevnost má běžné pájený spoj, vodní chlazení má pevnost nižší a u vibrací je pevnost nejnižší. Tento trend platí před stárnutím i po stárnutí.

Výskyt prasklin – zde jsou výsledky obdobné jako i u mechanických vlastností. U běžně pájených spojů je četnost a velikost prasklin nižší. U vibrací se vyskytují největší praskliny.

SAC305

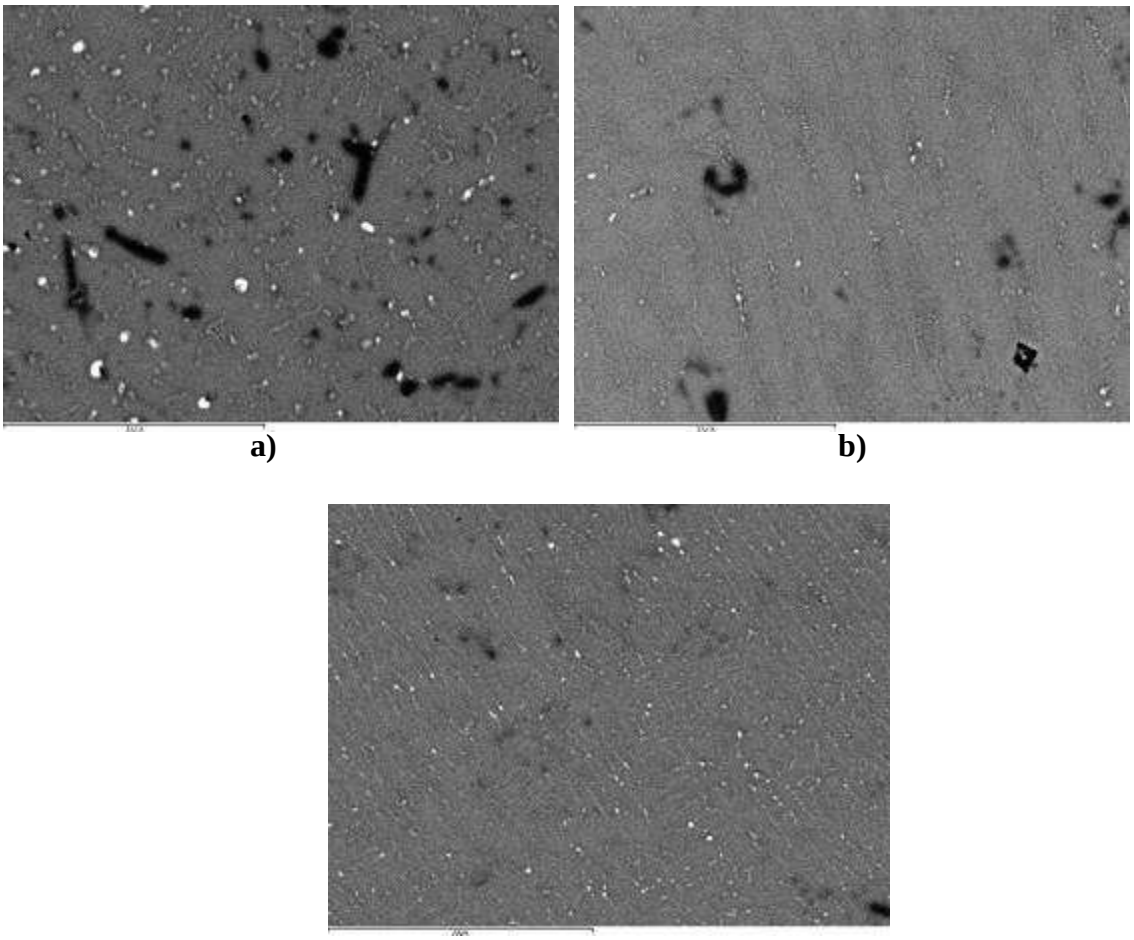
Povrch spoje - u běžného pájení nejlepší, u vibrací a vodního chlazení vznik mikroprasklin a nedokonalá smáčivost.

Výskyt voidů – nejčetnější výskyt voidů je u vodního chlazení a velikost voidu je nepřípustná. U vibrací je výskyt voidů minimální.

Změna struktury – změna struktury v závislosti na pájecí metodě je výrazná- porovnání změny struktury pro jednotlivé pájecí metody je znázorněno na obrázku 7-37.

Mechanické vlastnosti – největší pevnost mají spoje s vodním chlazením. Nejnižší pevnost mají vibrovány spoje.

Výskyt prasklin – největší četnost výskytu prasklin byla pozorována u vibrovaných pájecích spojů, což má za důsledek i nejhorší výsledek u mechanických testů.



Obrázek 7-37: Porovnání struktur pájených spojů u pájky SAC305 v závislosti na pájecí metodě: a) běžně zapájený spoj, b) spoj s použitím vibrací, c) spoj s vodním chlazením

Lze provést i shrnutí pájecích metod následovně.

Pájení s použitím vibrací:

- horší smáčivost
- *omezení výskytu voidů*
- změna struktury spoje
- vznik mikroprasklin na povrchu spoje
- špatná pevnost spoje

Pájení s vodním chlazením:

- horší smáčivost
- větší výskyt voidů s nepřípustnou velikostí
- změna struktury pájeného spoje
- vznik mikroprasklin na povrchu spoje
- *lepší pevnost spoje*

8 Závěr

V první části diplomové práce je provedena studie problematiky bezolovnatého pájení. Tato problematika je značně rozsáhlá, proto jsou zpracovány jen nejdůležitější části této problematiky. Byl stanoven soubor experimentů, jejichž cílem bylo stanovit vliv přídavných energií a vodního chlazení na strukturu pájeného spoje. Dále byly zkoumány vliv pájecí metody na vzhledu povrchu spoje, výskytu voidů, pevnost spoje a změna hmotnosti během pájecího procesu. Pro tyto experimenty byla navržena testovací deska a stanovena metodika testů.

První experiment pro zjištění vlivu vodního chlazení na strukturu spoje byl realizován s trubičkovými pájkami. Byly provedeny metalografické výbrusy a zkoumání metalografických struktur pod elektronovým mikroskopem. Při výrobě těchto výbrusů byly přidány i vzorky zapájeny s upraveným teplotním profilem (fáze chladnutí).

Z výsledku experimentů je zřejmé, že úprava teplotního profilu má vliv na strukturu pájeného spoje. Zda se jedná o vliv pozitivní nebo negativní nebylo možné určit, proto byla nutnost provést urychlené stárnutí a mechanické testy.

Při zkoumání vlivu přídavných energií na pájený spoj byla stanovena metodika, jak přidat energie do pájeného spoje. Řešením byla vibrační stolice a energie byla předávána mechanickými ultrazvukovými kmity. Při těchto testech bylo provedeno i opakování vlivu vodního chlazení na spolehlivost spoje.

Výsledkem testu bylo porovnání výsledků optické inspekce, rentgenových snímků spojů, mechanických testů a struktur spojů před a po urychleném stárnutí v závislosti na pájecí metodě.

Výsledkem práce je zdokumentovaný souhrn vlastností pájeného spoje v závislosti na pájecí metodě. Tato zjištění jsou následující:

Přídavné energie během pájení mají vliv na strukturu spoje. Po provedení dalších zkoušek bylo možné určit, že přídavné energie omezují tvorbu voidů, ale zhoršují smáčivost, vzhled povrchu spoje a jeho pevnost.

Vodní chlazení během pájení má vliv na strukturu spoje. Po provedení dalších zkoušek bylo možné určit, že vodní chlazení podporuje tvorbu voidů, zhoršuje smáčivost, vzhled povrchu spoje, ale zlepšuje jeho pevnost.

Použitá literatura:

[1] HWANG J. S. - Environment - friendly electronics: Lead free technology, Electrochemical Publications Ltd 2001 - ISBN 0 901150 40 1

[2] SZENDIUCH I. - Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů, VUTIUM 2006 - ISBN 80-214-3292-6

[3] BELL, Hans, GROSSMANN, Günter. *Reflow Technology, Fundamentals of Reflow Soldering*. [s.l.] : [s.n.], 2009. 78 s.

[4] *VSCHT* [online]. 2009,[cit. 2009-05-23]. Metalografie I. - příprava vzorku pro pozorování mikroskopem. Dostupné z WWW: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm>.

[5] Addressing Industry Knowledge Gaps Regarding New Pb-Free Solder Alloy Alternatives - 33rd International Electronics Manufacturing Technology Conference 2008

[6] STARÝ, ŠANDERA, KAHLE. *Plošné spoje a povrchová montáž* [online]. Brno : PC DIR-REAL, 1999 [cit. 2009-11-9]. Dostupný z WWW: <http://147.229.68.79/SMT/eltext/PSPM/4.pdf>

[7] HAMÁČEK, A., et al. Diagnostika mechanických vlastností pájeného spoje. In *Diagnostika 09*. [s.l.] : [s.n.], 2009. s. 4. Dostupný z WWW: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce1/36.pdf>.

[8] *Pájecí pasty* [online]. 2008 , 07. 12. 2008 [cit. 2009-12-09]. Dostupný z WWW: <http://www.pbt.cz/produkty/pajeci-pasty.php#formular>.

[9] Scanning electron microscope. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2005, last modified on 2010 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope>.

[10] *Nihonsuperior* [online]. 2007. 2009 [cit. 2010-05-23]. Výrobce pájek Nihonsuperior. Dostupné z WWW: <Výrobce pájek Nihonsuperior>.

[11] STŘELEC, Jiří . *Ishikawa diagram* [online]. 2008, 2010 [cit. 2010-05-23]. Sspolehlivost. Dostupné z WWW: <http://www.vlastnicesta.cz/akademie/kvalita-system-kvality/kvalita-system-kvality-metody/ishikawa-diagram/>.

[12] *Informace o rentgenech* [online]. 2006. 2010 [cit. 2010-05-23]. Rentgen. Dostupné z WWW: <http://www.rentgen.eu >.

[13] *Výrobce rentgenových zařízení Phoenix X-ray : Phoenix Xray* [online]. 2005, 2010 [cit. 2010-05-23]. Phoenix Xray. Dostupné z WWW: <http://www.phoenix-xray.com/en/index.php>.

[14] *DAGE PC1200* [online]. 2008. 2005, 2010 [cit. 2010-05-23]. Testovací zařízení DAGE PC1200. Dostupné z WWW: <http://fs.bookpawnshop.com/D/ad-Dage-PC2400-t-micro-bond-tester-die,-ball,-wire-pull-/>.

[15] Produkt datasheet Pb-free solders [online]. 2005 [cit. 2009-12-12]. Dostupný z WWW: <http://www.indium.com/_dynamo/download.php?docid=130>.

[16] *COBAR* [online]. 2001. 2010 [cit. 2010-05-23]. Výrobce pájecích slitin. Dostupné z WWW: <http://www.cobar.com/flux_products.asp?group=14&id=30>.

[17] *Kvalita pájených spojů* [online]. c2007 [cit. 2009-12-13]. Dostupný z WWW: <http://www.smtcentrum.cz/pruvodce-technologiemi/smt/kvalita-pajenych-spoju.htm>.

[18] Vitronics Soltec GmbH, 5 Steps to Lead-Free Soldering, Duben 2010. Dostupné na internetu: http://www3.vsww.com/files/Presenter/5StepsVS/index.htm

[19] AIM. Lead-Free Soldering, 2010. Dostupné na internetu: http://www.aimsolder.com/lead_free.cfm [10]