

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

DISERTAČNÍ PRÁCE

PLZEŇ, 2017

Ing. Karel Rendl

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor v oboru
Elektronika

Ing. Karel Rendl

**Optimalizace bezolovnatého pájecího procesu
s ohledem na vliv tavidel na spolehlivost spojů**

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

Datum státní doktorské zkoušky: 3. 12. 2014

Datum odevzdání práce:

V Plzni, 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že disertační práci na téma „Optimalizace bezolovnatého pájecího procesu s ohledem na vliv tavidel na spolehlivost spojů“ jsem vypracoval samostatně a použil jsem jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu literatury.

V Plzni dne

.....

Podpis

Poděkování

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

Tato práce byla podpořena z Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci Regionálního inovačního centra pro elektrotechniku (RICE), projekt č. CZ.1.05 / 2.1.00 / 03.0094; pod RICE - Nové technologie a koncepty pro inteligentní průmyslové systémy, projekt č. LO1607 a studentské Grantové agentury Západočeské univerzity v Plzni, SGS 2015-020 „technologie a materiálové systémy v elektrotechnice,,.

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

Anotace

Tato práce se zabývá problematikou optimalizace pájecího procesu a jeho dopady na kvalitu pájeného spoje z pohledu tavidel. První kapitola popisuje úvod do problematiky bezolovnatého pájení a úskalí související s touto technologií. Z velké části se tato kapitola také zaměřuje na kvalitu bezolovnatého pájeného spoje a na faktory, které ji ovlivňují, což jsou převážně technologické a materiálové aspekty. Na tuto kapitolu navazuje shrnutí současného stavu problematiky tavidel a jejich vlivu na kvalitu pájeného spoje a celé sestavy. Jsou zde zmapovány defekty, které mohou být způsobeny tavidly a jejich zbytky po procesu pájení. Dále jsou zde popsány metody měření iontové čistoty a metody, jak lze měřit a identifikovat nečistoty po procesu pájení. Nedílnou součástí této kapitoly je popsání metod odstraňování nečistot a kontaminací na DPS. Z teoretické části vyplynuly požadavky a hypotézy, které naznačily směr zaměření a realizace praktické experimentální části. Experimentální část této práce je zaměřena na snížení množství iontové kontaminace na DPS po procesu pájení, pomocí vhodného nastavení pájecího procesu. Tato kapitola popisuje průběh experimentu a dosažené výsledky. Následná část práce se zabývá problematikou čištění no-clean pájecích past, na kterou navazuje závěr, který shrnuje dosažené výsledky práce a doporučení pro praxi.

Klíčová slova

Tavidlo; bezolovnatý pájený spoj; kontaminace DPS; iontová čistota; pájecí profily

Annotation

This work deals with the optimization of the soldering process and its impact on the quality of the solder joint in terms of flux. First chapter describes introduction to the issue of lead-free soldering and difficulties concerning this technology. This chapter is mostly focused on the quality of lead-free joint and factors which influence it. One of the crucial factors is materials and technologies aspects. The chapter is subsequently followed by the summary of current state of the issue of fluxes and their influences on the quality of soldered joint and the entire assembly. Defects which may be caused by fluxes or their residues after soldering are mapped out here. Further, methods of measurement of ion cleanliness and methods of measurement and identification of residues after soldering are described here. Description of impurity and contamination removal from PCB is the integral part of the chapter. From theoretical part, demands and hypothesis ensued. They indicated the way of the focus and realization of the practical experimental part. Experimental part of this work is focused on decrease of amount of residues after the soldering process by the help of proper setup of the soldering process. This chapter describes the progress of the experiment and the achieved results. The subsequent part of the work deals with cleaning no-clean solder paste, which is followed by a conclusion that summarizes the results of the work and recommendations for practice.

Key words

Flux; lead free solder joint; contamination PCB; ionic purity; solder profiles;

Seznam zkratk

BGA	Ball Grid array - pouzdro součástky s kulovými vývody
ČSN	Označení československých státních norem
DI	Demineralizovaná voda
DPS	Deska plošných spojů
EU	European Union – Evropská unie
FR4	Flame Retardant Class 4 – kompozitní materiál ze skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice
IC	Integrated Circuit – integrovaný obvod
IMC	Intermetallic compound – intermetalická sloučenina
IPA	Isopropylalkohol
IPC	Institute of Printed Circuits - Institut plošných spojů
LCD	Liquid Crystal Display - Displej z tekutých krystalů
LED	Light-Emitting Diode – dioda emitující světlo
QFN	Quad Flat No Lead - pouzdro součástky s kontaktovacími ploškami na spodní straně
PCB	Printed circuit board – deska plošného spoje
PWI	Process window index – index procesního okna
RoHS	Restriction of Hazardous Substances – EU směrnice o omezení nebezpečných látek
ROSE	Resistivity Of Solvent Extract - metoda měření iontové čistoty
SAC	Sn-Ag-Cu pájecí slitina
SEM	Scanning electron microscope - rastrovací elektronový mikroskop
SIR	Surface insulation resistance - povrchový izolační odpor
SMT	Surface mount technology – povrchová montáž
TPL	Triple Point Line – trojný bod ve fázovém diagramu
USA	United States of America – Spojené státy americké
VOC	Volatile organic compound - obsah těkavých sloučenin
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment – EU směrnice pro elektronický a elektrický odpad

Obsah

1	Cíle disertační práce	13
2	Bezolovnatá technologie pájení	15
2.1	Evropská Unie	15
2.2	Čína	15
2.3	USA	15
3	Změny v procesu pájení z důvodů zavádění bezolovnatých pájecích slitin.....	16
3.1	Materiálové aspekty bezolovnatého procesu pájení	17
3.1.1	Bezolovnaté pájecí slitiny	17
3.2	Technologické aspekty bezolovnatého procesu pájení.....	19
3.2.1	Teplotní profil pájení	19
3.2.2	Smáčivost.....	20
3.2.3	Intermetalické sloučeniny v pájeném spoji	23
3.3	Požadavky na bezolovnatý pájený spoj	24
4	Současný stav problematiky tavidel v bezolovnatém procesu pájení.....	24
4.1	Rozdělení tavidel	25
4.1.1	Oplachová tavidla	26
4.1.2	Bezoplachová (no-clean) tavidla.....	26
4.2	Rozdělení tavidel dle norem.....	27
5	Defekty způsobené zbytky tavidel.....	29
5.1	Vodivé dendrity a koroze na povrchu DPS	30
5.2	Dutiny (voidy) v pájeném spoji.....	32
6	Měření iontové čistoty	33
6.1	Přímé metody měření iontové čistoty:.....	34
6.1.1	ROSE (Resistivity Of Solvent Extract) metoda	34
6.1.2	Ionograf	34
6.1.3	Omegametr	35
6.1.4	Kontaminometr	35
6.1.5	Testování organické povrchové kontaminace.....	35
6.1.6	Měření povrchového napětí a měření kontaktního úhlu	35
6.1.7	Měření povrchového napětí pomocí inkoustu s definovaným povrchovým napětím.	36
6.1.8	Indikace zbytků na DPS.....	36
6.2	Nepřímé metody měření iontové čistoty:.....	36

6.2.1	Vizuální metody.....	36
6.2.2	Korozivita tavidla	36
6.2.3	SIR testy (měření povrchového odporu substrátu)	36
6.2.4	Testy pájitelnosti	37
7	Čistící proces DPS po pájení.....	38
8	Experimentální část 1	41
8.1	Vliv pájecího profilu na iontovou kontaminaci DPS	41
8.1.1	Použité materiály.....	41
8.1.2	Volba teplotního profilu	43
8.1.3	Použité metody měření iontové kontaminace	46
8.1.4	Analýza výsledků jednotlivých metod měření iontové kontaminace.....	47
8.1.5	Porovnání jednotlivých použitých metod měření iontové kontaminace DPS a jejich výsledků	54
8.2	Vliv pájecího profilu na smáčecí úhel	55
8.2.1	Analýzy výsledků měření smáčecích úhlů	56
8.3	Vliv pájecího profilu na intermetalické sloučeniny	58
8.3.1	Ověření tloušťky IMC výpočtem	58
8.3.2	Analýzy výsledků měření tloušťky intermetalických sloučenin	59
8.4	Vliv pájecího profilu na tvorbu dutin v pájeném spoji	62
8.4.1	Analýza výsledků měření plochy dutin v pájeném spoji.....	62
8.4.2	Analýza výsledků měření plochy dutin v pájeném spoji.....	63
8.5	Vyhodnocení všech faktorů ovlivňující pájený spoj a jeho spolehlivost při změně teplotního profilu	65
9	Experimentální část 2	69
9.1	Vliv čištění no-clean pájecích past na iontovou kontaminaci DPS	69
9.1.1	Analýza výsledků čištění DPS s no-clean pastami měřené kontaminometrem.....	70
9.1.2	Analýza výsledků čištění DPS s no-clean pájecími pastami - měřené pomocí vodivosti extrakčního roztoku.....	72
9.1.3	Analýza výsledků čištění DPS s no-clean pájecími pastami – měřené metodou SIR	74
9.2	Vyhodnocení vlivu čištění no-clean pájecích past na iontovou kontaminaci DPS.....	78
10	Závěr a zhodnocení splnění cílů práce	79
11	Literatura	81
12	Seznam publikací autora	86
	Publikace vztahující se k tématu disertační práce.....	86
	Publikace v impaktovaných časopisech.....	86

Publikace v recenzovaných časopisech	86
Publikace ostatní	86
Funkční vzorky, prototypy	87
Publikace ostatní	87
Přílohy	89

Úvod

Jednou z nejdůležitějších součástí elektronických zařízení je kvalitní pájený spoj. Hlavní jeho funkcí je mechanicky a elektricky připojit součástku k desce plošného spoje, proto jeho kvalita a spolehlivost značně ovlivňuje spolehlivost celého zařízení. Pro vytvoření pájeného spoje se používala cín-olovnatá pájecí slitina, která ovšem díky směrnici Evropské unie RoHS (Restriction of Hazardous Substances) a WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) musí být nahrazena bezolovnatou pájecí slitinou, kvůli zlepšení ochrany životního prostředí. Proto neustále dochází k vývoji a zlepšování vlastností bezolovnatých pájecích slitin a zlepšování bezolovnaté technologie pájení. Celá řada firem vynakládá nemalé úsilí a prostředky na dokonalé zmapování vlastností a kvality bezolovnatých pájených spojů. Neustále je snaha o nalezení optimálního nastavení pájecího procesu pro bezolovnatou technologii. Problém je brát v potaz všechny materiálové a technologické aspekty, které do tohoto procesu vstupují a zkombinovat je tak, aby došlo k ideálnímu nastavení procesu pájení. V oblasti vývoje se setkáváme s celou řadou vědců zabývajících se touto problematikou. Nejvíce odborných článků můžeme nalézt z oblasti intermetalických sloučenin v bezolovnatých pájených spojkách, kterými se zabývá např. B. Salam [1], Chang-Keun Shin [2], další velká část vývoje se ubírá směrem zkoumání čistoty DPS a jejich čištěním např. Ning-Cheng Lee [3], Sheng Zhan [4], Nowshad Amin [5]. Je nutné také zmínit vznik defektů způsobených nečistotami z tavidel, kterými se ve svých pracích zabývá např. Jongwoo Park [6], Kazutaka Mitobe [7] a v neposlední řadě je často kladena otázka, zdali je nutné čistit no-clean technologie a jakou desku lze považovat za opravdu čistou; touto problematikou se zabývá převážně Michael Konrad [8].

Pro dosažení kvalitního pájeného spoje je nutné docílit dobrého smáčení povrchu pájkou. Smáčivost ovlivňuje převážně teplota pájení, aktivita tavidla a množství oxidů na pájených površích. Vývojem tavidlové chemie se může výrazně měnit i potřeba použití inertní atmosféry. Proto je velmi žádoucí věnovat se problematice tavidel a problémům s nimi spojenými.

Volba tavidla při procesu pájení se převážně řídí jeho aktivitou, aby byly dostatečně odstraněny vrstvy oxidů při pájení, ale při volbě tavidla musí být brán v potaz i následný vznik jeho zbytků po procesu pájení. Protože tyto zbytky mohou vést k celé řadě defektů, čímž je ohrožena celková spolehlivost zařízení. V dnešní době náročných elektrických sestav je problematika tavidel velice aktuální, jelikož má značný dopad na spolehlivost celého

zařízení. S problematikou tavidel, tedy úzce souvisí i problematika čištění DPS po pájení, aby se předcházelo možným defektům způsobených tavidly a jejich zbytky.

Práce se zaměřuje na problémy s optimalizací pájecího profilu pro bezolovnaté pájecí slitiny s ohledem na čistotu DPS. Při optimalizaci pájecího profilu je nutné brát v potaz všechny parametry ovlivňující pájený spoj. Celá řada autorů různých článků v oblasti této problematiky se úzce zaměřuje na jeden parametr (např. IMC, voidy, dendrity, iontová kontaminace...) ovlivňující pájený spoj. V této práci je cílem zaměřit se na celkový dopad optimalizace pájecího profilu. Zhodnotit nejpodstatnější parametry působící na pájený spoj a určit nejvhodnější nastavení pájecího profilu.

1 Cíle disertační práce

Technologie pájení jako celek je velice náročný proces, který ovlivňuje celá řada faktorů a vnějších vlivů. Aby byla dosažena požadovaná kvalita pájených spojů, je nutné mít tento proces dokonale řízený a brát v potaz při jeho optimalizaci veškeré působící faktory. Z dosavadní rešeršní činnosti problematiky tavidel a iontové čistoty DPS vyplývá, že tato problematika je aktuální a je vhodné se zabývat otázkami, jaký vliv má tavidlo na kvalitu pájeného spoje a celé elektronické sestavy. Tavidlo samotné, nebo jeho zbytky, značně ovlivňují kvalitu a spolehlivost pájené sestavy. Objevují se i experimenty, kde je snaha o vyřazení tavidla z procesu pájení, ale výsledky nejsou tak přesvědčující, a hlavně náhrady použití tavidla jsou převážně z hlediska finančního náročné a je nutné v takovém případě zcela měnit celý proces pájení. Z tohoto důvodu je i nadále tavidlo nedílnou součástí procesu pájení. Vývoj se ubírá směrem předcházení defektů a sledování kvality pájených spojů, ať už z hlediska používání nových pájecích slitin a spojovaných materiálů, tak i například volbou vhodných druhů tavidel a dalších faktorů.

Hlavním cílem disertační práce je objasnění materiálových a procesních vlivů, působících na kvalitu bezolovnatých pájených spojů a spolehlivost výsledných elektronických zařízení. Oblast praktických experimentů bude zaměřena na objasnění závislosti míry znečištění DPS na nastavení pájecího procesu pro různé typy tavidel. Dalším cílem práce je zmapovat dopady změn v nastavení pájecího procesu, které mohou ovlivnit spolehlivost pájené sestavy. Hodnocenými parametry budou změny v množství iontových nečistot na DPS, v tloušťkách intermetalických sloučenin, ve smáčecích úhlech a v množství dutin vytvořených v pájených spojích, z důvodu jejich velkého vlivu na spolehlivost pájeného spoje.

Dílčím cílem práce je zmapování dopadů čištění tzv. no-clean tavidel, s kterým se velmi často setkáme v praxi. Tato nevhodná praxe čištění totiž může negativně ovlivnit čistotu DPS, protože umožňuje uvolňování nečistot v provozu elektronického zařízení.

Dalším dílčím cílem je porovnání metod hodnocení iontové čistoty DPS po procesu pájení nebo po procesu mytí. Měření iontové čistoty pomocí kontaminometru, který je ve výrobní praxi používán, nemusí přinášet dostatečně přesné výsledky, a proto je nutné volit další metody měření iontové čistoty (SIR test, měření elektromigrace atd.) nebo kombinaci vhodných metod pro přesné stanovení iontové čistoty dané DPS, aby došlo k potvrzení výsledků měření pomocí kontaminometru.

Posledním dílčím cílem práce je na základě výsledků provedených experimentů definovat doporučení a návody pro využití v praxi. Tato doporučení budou sloužit především v

předvýrobní a výrobní etapě pro stanovení optimálních procesních a materiálových nastavení procesu pájení zajišťující kvalitní pájené spoje a spolehlivá elektronická zařízení.

2 Bezolovnatá technologie pájení

Technologie pájení prošla v posledních letech nemalým vývojem. Jako největší a zlomovou změnu lze uvést vyloučení olova z procesu pájení. Tato změna byla zavedena kvůli ochraně životního prostředí a ochraně lidského zdraví. Zavedení bezolovnatého pájení probíhalo a stále probíhá v různých zemích odlišně.

2.1 Evropská Unie

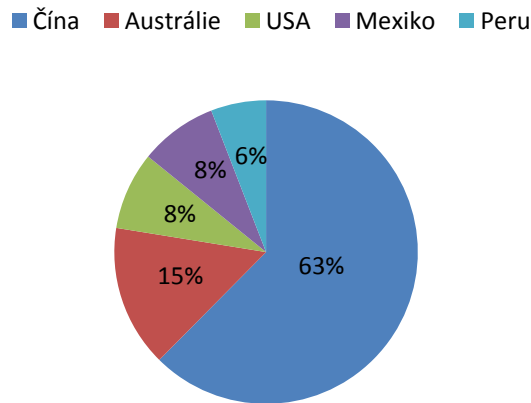
Členské státy Evropské Unie musí dodržovat ustanovení směrnic RoHS (Restriction of Hazardous Substances) a WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment), které se snaží zcela zakázat používání olova a jiných nebezpečných látek v elektrotechnickém průmyslu. Tyto směrnice byly vydány roku 2003 a nařizovaly státům EU nepoužívat od 1. 6. 2006 u některých nových elektronických a elektrických zařízení nebezpečné látky (např. olovo, rtuť, kadmium...), v dnešní době byla směrnice upravena na RoHS2 [9].

2.2 Čína

V Číně byla vydána, obdobně jako v EU, směrnice, která reguluje používání zakázaných látek v elektronice. Tato směrnice je nazývána jako čínská RoHS a týká se stejných prvků jako evropská RoHS. [42].

2.3 USA

Jednotlivé státy v USA nejsou jednotné v používání zakázaných látek v elektronice. V některých státech legislativa zakazuje prodej elektroniky, která obsahuje zakázané látky podle RoHS, ale zákaz se nevztahuje na veškerou produkci (jedná se pouze o obrazovky a displeje LCD a CRT). Seznam produktů, kterých se zákaz týká, je postupně rozšiřován [40][41].



Obr. 1: Těžba olova za rok 2010 - 4165 tisíc tun olova [40]

Nejpřísnější opatření pro používání olova v elektronice přijala Evropská unie, zavedením směrnice RoHS. Jak je vidět na Obr. 1 největší těžbu a spotřebu olova zaznamenala v roce 2010 Čína, která je i největším výrobcem elektroniky. Množství olova spotřebované v oblasti pájení je však v porovnání s oblastí výroby akumulátorů a dalších oblastí průmyslu mizivé. Například v roce 2010 se v USA celkem spotřebovalo 1 430 000 tun olova, z čehož 0,45 % tvořilo množství spotřebované v pájkách [40].

V Číně však nejsou tak tvrdé legislativní požadavky jako v EU. Jelikož Čína hojně exportuje své výrobky i do zemí EU musí přijímat legislativní požadavky těchto zemí. Z důvodu celosvětového provázání trhu dotýká se omezení zakázaných látek všech výrobců elektroniky. Zaváděním bezolovnatých technologií do výrobního procesu elektronických zařízení s sebou přináší nemalé problémy ve výrobě a také ve spolehlivosti elektronických sestav, a proto je nutné věnovat této problematice pozornost.

3 Změny v procesu pájení z důvodů zavádění bezolovnatých pájecích slitin

Kvalitní pájený spoj je metalurgické spojení vývodů součástky s pájecí ploškou, kde dochází za pomoci roztavené pájecí slitiny k trvalému spojení těchto součástí. Z fyzikálního a fyzikálně chemického hlediska se procesem pájení dosáhne mechanicky pevného a trvale spolehlivého pájeného spoje. Formování pájeného spoje ovlivňuje celá řada faktorů. Nejvíce proces pájení ovlivňují použité materiály, jako je použitá pájecí slitina, povrchová úprava spojovaných materiálů a použité tavidlo, a jejich vzájemná kompatibilita. Dalšími ovlivňujícími faktory mohou být také například teplota a doba pájení, gradienty poklesu a

nárůstu teploty a v neposlední řadě použitá ochranná atmosféra při pájení a mnoho dalších, jelikož se jedná o náročný technologický proces [46]. Tento proces je také podmíněn pohybem hmoty mezi zúčastněnými materiály a chemickými reakcemi v místech styku DPS, součástky a samotné pájecí slitiny za předpokladu dodání energie. Tyto skutečnosti mají za následek tvorbu intermetalických sloučenin na rozhraní pájených povrchů a pájecí slitiny. Přítomnost těchto sloučenin je nezbytná, jelikož zajišťuje vyšší pevnost pájeného spoje, ale přináší s sebou i nežádoucí vlastnosti jako je například větší křehkost, vyšší rezistivita a menší teplotní vodivost spoje. Pokud jsou tyto vrstvy přítomny ve větší míře, dochází k redukci životnosti pájeného spoje [11].

Zavedení bezolovnatých pájecích slitin s sebou přináší rozdíly v celém pájecím procesu. Je nutné brát v potaz, zejména při nastavování procesu pájení, nové materiálové aspekty (pájecí slitiny, povrchové úpravy, tavidla...) a technologické aspekty (teplota pájení, pájitelnost, inertní atmosféra).

3.1 Materiálové aspekty bezolovnatého procesu pájení

Nejvíce z materiálového hlediska ovlivňuje proces pájení použitá bezolovnatá pájecí slitina a k ní odpovídající druh tavidla. Dále je nutné volit vhodnou povrchovou úpravu desky plošného spoje a nároky vzrůstají i na pájené součástky. Ty musí mít větší tepelnou odolnost. To se týká i samotné DPS, aby nedocházelo k její deformaci a poškození vyššími pájecími teplotami [48].

3.1.1 Bezolovnaté pájecí slitiny

Pro bezolovnatou technologii pájení se využívá převážně slitina cínu a přidaných prvků. Od volby přidaných složek, které mohou tvořit i drahé kovy, se odvíjí celková cena pájecí slitiny. Zásadní rozdíl mezi bezolovnatou a olovnatou pájkou je v teplotě tavení. Zatímco olovnaté pájky (eutektika) dosahují tavení při 183°C, u většiny bezolovnatých pájek je tohoto stavu dosaženo při teplotě vyšší, v rozmezí 190°C – 227°C, v závislosti převážně na přidaných prvcích. Od vhodně zvolené pájecí slitiny se odvíjejí další faktory ovlivňující proces pájení, jako je například volba povrchových úprav pájených materiálů, nebo vhodného druhu tavidla. Praktické experimenty ukazují, že s různými druhy pájecích slitin je vhodné použít jiné druhy tavidel, jak zmiňují ve své práci např.: B. Balluch, Min Yang, Janusz Sitek a další [23,52]. Totéž platí pro různé druhy povrchových úprav, které s odlišnými pájecími slitinami dosahují různých výsledků, to je patrné i z výsledků experimentů, které uvádím ve svém článku [12][13].

Tab. 1: Příměsové kovy nejčastěji používané v bezolovnatých pájecích slitinách [14]

Kov v pájce	Teplota tavení (°C)	vlastnost
Antimon	630	zvyšuje pevnost, snižuje povrchové napětí
Bismut	271	snižuje bod tání, nízká cena
Indium	156	snižuje bodu tání, vysoká cena, horší mech. pevnost
Měď	1083	dobrá smáčivost povrchu a mech. pevnost,
Stříbro	961	snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost a pevnost
Zinek	419	nízký bod tání, nízká cena

Olovo v pájce může nahradit například stříbro, které pro své dobré elektrické vlastnosti, snižuje bod tání pájecí slitiny a zlepšuje pevnost a smáčivost. Nevýhodou je jeho vyšší cena. Jako další náhrada olova může posloužit měď. Ta se volí pro její dobrou smáčivost a mechanickou pevnost, ale rozpouští se ve slitinách s vysokým obsahem cínu a tím se ovlivňuje kvalita spoje. Pro snížení bodu tání se používá v bezolovnatých slitinách indium, jehož bod tavení je 156°C a má dobrou smáčivost, ale vyznačuje se špatnými mechanickými vlastnostmi a vysokou cenou. Dále se používají nikl (zabraňuje odsmáčení), zinek (nízký bod tání, nízká cena), germanium (zabraňuje oxidaci), antimon (zvyšuje pevnost, snižuje povrchové napětí, ale je částečně toxický) a bismut (snižuje bod tání, výhodou je také cena) [13].

Mezi nejčastěji používané bezolovnaté pájené slitiny patří slitiny prvků Sn, Ag a Cu v různých procentních poměrech. Nejpoužívanější bezolovnatou slitinou je slitina s označením SAC 305, v které jsou obsaženy 3 procenta stříbra, 0,5 procenta mědi a zbytek slitiny (96,5%) tvoří cín. V porovnání s olovnatou pájecí slitinou mají SAC slitiny větší povrchovou energii, proto je smáčení rozdílných povrchů kritičtější, protože pro překonání větší povrchové energie je zapotřebí větší teplota a delší čas pájení. SAC 305 nemá obdobné parametry jako dříve používané olovnaté pájecí slitiny, proto se stále hledají nové pájecí slitiny s lepšími parametry, než má nejpoužívanější SAC 305. Wayne Lam například udává ve své práci, že pájecí slitina SAC 307 + Ce (0,25% Ce) má lepší vlastnosti než zmiňovaná SAC 305, což dokládá provedenými experimenty. Dobrých výsledků bylo dosaženo i s pájecí slitinou SAC 405+0,1%Al, která vykazuje obdobnou pájitelnost jako SAC 305, ale u této slitiny byly slabší vrstvy intermetalických sloučenin, což prezentuje ve svém článku Roman Koleňák [15]. Vývoj v oblasti nových pájecích slitin se v dnešní době zaměřuje na pájecí pasty, které obsahují velké množství bismutu, za účelem snížení teploty tavení těchto slitin. Vlastnosti

těchto past je možné pozorovat v experimentech, které prezentuje ve svých publikacích např.: C. Hoppenbrouwers, M. Cichra a další [16].

Tab. 2: Bezolovnaté pájecí slitiny a jejich teplota tavení [18]

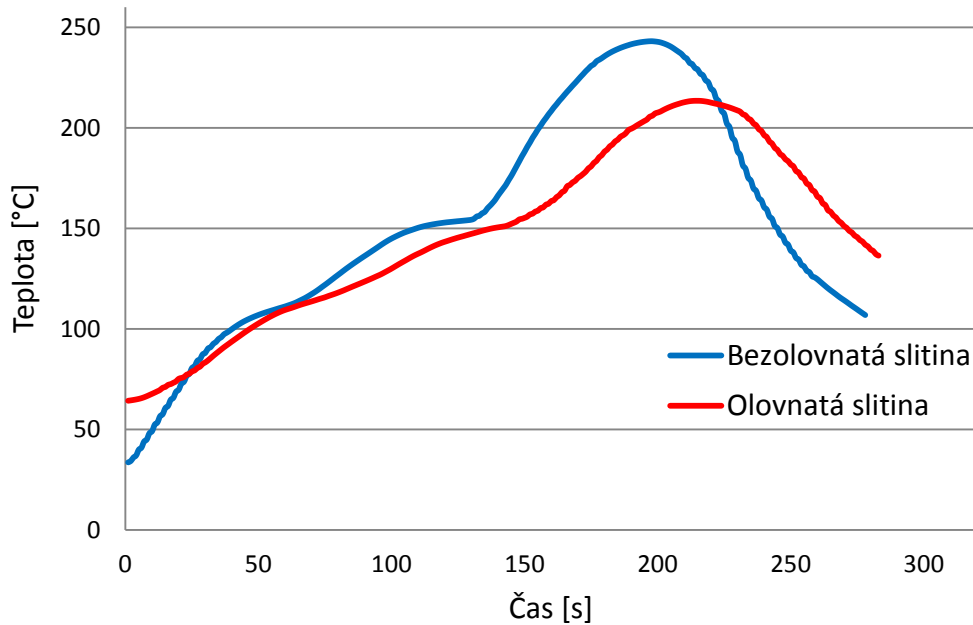
Pájka	Teplota tavení (°C)
Sn-0,7Cu	227
Sn-3,5Ag	221
Sn-3,5Ag-3Bi	220
Sn-3,8Ag-0,7Cu	217 - 219
Sn-Ag-Cu	217
Sn-Ag-Cu-Sb	217
Sn-2Ag-0,75Cu	217 - 219
Sn-2Ag-4Bi-0,5Cu-0,1Ge	216
Sn-2,5Ag-0,8Cu-0,5Sb	213 - 218
Sn-3,5Ag-5Bi-0,7Cu	210 - 215
Sn-2Ag-3Bi-0,75Cu	210 - 215
Sn-3,4Ag-4,8Bi	205 - 210
Sn-8Zn-3Bi	191
Sn-57Bi-0,1Ag	138 - 140

3.2 Technologické aspekty bezolovnatého procesu pájení

Jak již bylo zmíněno dříve, zavedením bezolovnatých pájecích slitin s sebou přineslo také změnu v technologii pájení jako je např.: změna teplotního profilu a smáčivost povrchu roztavenou pájecí slitinou [43].

3.2.1 Teplotní profil pájení

Se změnou teploty tání bezolovnatých pájecích slitin je nutné změnit teplotní profil při pájení. Jelikož teplota tavení bezolovnatých pájecích slitin je převážně vyšší (vyjma slitiny obsahující velké množství Bi), je nutné zvýšit teploty jak přehřevu, tak i teploty samotného přetavení. Rozdíl změny teplotního profilu s olovnatou a bezolovnatou slitinou je patrný na Obr. 2 a Tab. 3.



Obr. 2: Změřený teplotní profil olovnaté a bezolovnaté pájecí slitiny

Tab. 3: Hodnoty teplotního profilu olovnaté a bezolovnaté pájecí slitiny [44]

	Olovnatá pájecí slitina Sn ₆₃ Pb ₃₇ (eutektikum)	Bezolovnatá pájecí slitina SAC 305
Max. doba nárůstu	6 °C/s	6 °C/s
Teplota předehřevu	135-150 °C	150-200 °C
Max. doba předehřevu	2 min	3min
Teplota tání	183°C	220°C
Max. špičková teplota	225°C	260°C
Max. rychlost chlazení	10°C/s	10°C/s

Zvýšená teplota pájení s sebou přináší větší náchylnost připojovacích plošek nebo vodivých cest k oxidaci. Vlivem zvýšené teploty dochází ke zvýšené tvorbě intermetalických sloučenin, které ovlivňují zejména mechanické vlastnosti pájených spojů. Dále jsou ovlivňovány součástky náchylné na vyšší teploty a samotné desky plošných spojů. Již při návrhu desky plošného spoje je nutné brát všechny tyto aspekty v potaz.

3.2.2 Smáčivost

Bezolovnaté pájecí slitiny smáčejí povrch pájených částí pomaleji, proto je nutné použít delší čas pájení s vyšší teplotou pájení [18].

Při smáčení povrchu pájecí slitinou jde o komplexní jev, který je nejvíce ovlivněn materiálovými vlastnostmi a procesními podmínkami. Pro hodnocení smáčivosti jsou důležité dva základní faktory. Jako první se hodnotí stupeň smáčení, který udává jak moc se po povrchu daná pájecí slitina rozteče. Jako druhý faktor se vyhodnocuje, jak rychle je daný povrch dostatečně smáčen pájecí slitinou. Toto je ovlivněno převážně účinností použitého zdroje tepla, typem a aktivitou použitého tavidla a na probíhajících chemických reakcích [9][16][19].

Smáčení lze rozdělit na fyzikální a na chemické podle toho, jestli probíhá s chemickou reakcí na rozhraní nebo ne. Při fyzikálním smáčení nedojde k chemické reakci na rozhraní mezi povrchem kovu a roztavenou pájkou, a nedojde ke změně chemického složení. Jedná se tedy v podstatě o adhesní spojení, které má menší pevnost ve smyku a v ohybu, ale dobrou elektrickou vodivost. Oproti tomu u chemického smáčení dojde procesy rozpouštění nebo difúze, k vytvoření společné fáze na rozhraní liquidu a solidu. Musí zde dojít k vytvoření tuhého roztoku nebo intermetalické fáze, přičemž vzájemná rozpustnost kovů může být jen nepatrná [19].

Podmínky smáčení mohou být popsány z termodynamického pohledu pomocí koeficientu roztékání S_p na mezifázovém rozhraní L, S, F rovnicí [9][19]:

$$S_p = -\left(\frac{\partial G}{\partial A}\right)_{P,T} = \gamma_{SF} - (\gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cos \Theta) \quad [Nm^{-1}] \quad (1)$$

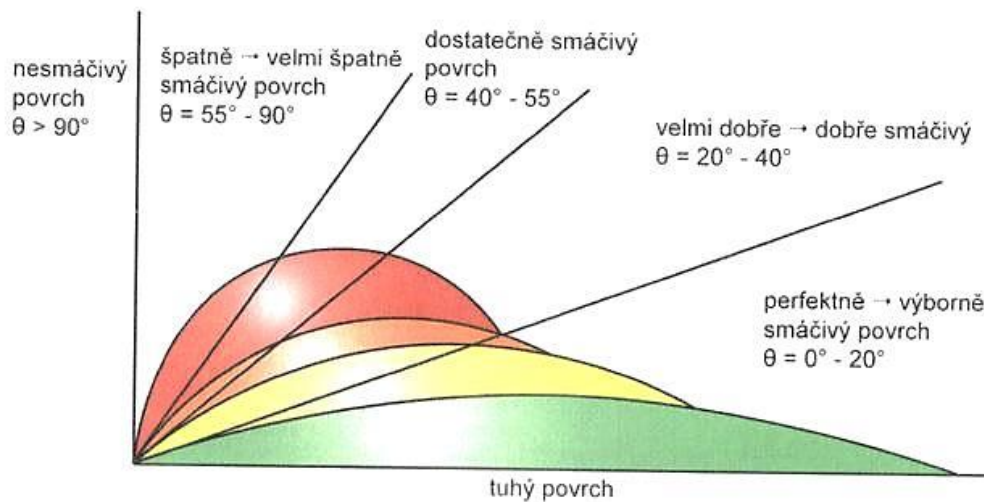
kde SF index označuje rozhraní substrátu s tavidlem a prostředím, LS index označuje rozhraní pájky a substrátu, LF index označuje rozhraní pájky s tavidlem a prostředím; γ - označuje povrchová napětí na jednotlivých rozhraních [Nm^{-1}]; Θ - smáčecí úhel [$^\circ$]

Z rovnice (1) je zřejmé, že čím menší je γ_{LF} - povrchové napětí na rozhraní LF a čím větší je γ_{SF} - povrchové napětí na rozhraní SF, tím lepší je smáčení povrchu roztavenou pájkou. Dostanou-li se působící mezifázová napětí do rovnováhy, pak se určuje rozdíl mezi složkami, které nelze změřit [9][19]:

$$\gamma_{SF} - \gamma_{LS} = \gamma_{LF} \cos \Theta \quad (2)$$

Z této rovnice (2) lze určit podmínky pro smáčení povrchu. Musí platit $\Theta < 90^\circ$. Z výše uvedené rovnice (2) tedy dostáváme podmínku pro smáčení povrchu [9][19]:

$$\gamma_{SF} > \gamma_{LS} \quad (3)$$



Obr. 3: Rozdělení smáčivosti povrchů podle velikosti smáčecího úhlu [20]

Na kontaktní úhel se nedá pohlížet jen za ustáleného stavu, proto je nutné zavést tzv. dynamický kontaktní úhel. Tento úhel se během roztékání pájky po povrchu mění v závislosti na rychlosti, kterou se linie rozhraní mezi třemi fázemi pohybuje dopředu nebo zpět po povrchu. Základním bezrozměrným parametrem, který charakterizuje rychlost pohybu kontaktní linie (TPL - Triple Point Line) je kapilární číslo C_A (rovnice 4), které představuje relativní důležitost viskózních sil k mezifázovému povrchovému napětí. Výsledkem je tvar volného povrchu na kontaktní linii [9][19].

$$C_A = \frac{\mu U}{\gamma_{LF}} \quad (4)$$

kde U je rychlost toku pájky; μ je viskozita a γ_{LF} je mezifázové povrchové napětí.

Zlepšení smáčivosti povrchů

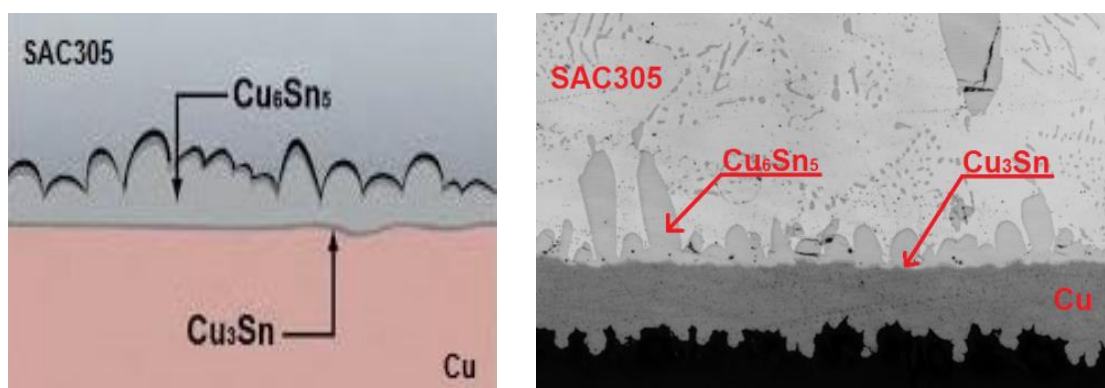
Při použití daného druhu pájecí slitiny lze zlepšit smáčení pájených povrchů třemi možnými způsoby. Jedním z nich je zvýšení teploty pájení, za další lze uvést zvětšení aktivity tavidla a v neposlední řadě lze smáčení zlepšit snížením koncentrace kyslíku v pájecím prostoru, což lze docílit použitím vhodné ochranné atmosféry. Ne všech těchto vlivů lze snadno využít. Možná teplota pájení je ovlivněna použitými materiály, jak substrátu, tak i pájené součástky, proto není jednoduché smáčivost zlepšit zvýšením teploty pájení. Tato teplota je již ovlivněna použitím některých bezolovnatých pájecích slitin, které mají teplotu tavení vyšší než olovnaté pájecí slitiny, proto je další zvyšování pájecí teploty nevhodné.

Lepším řešením zlepšení smáčivosti se jeví vhodná kombinace použitého tavidla a inertní atmosféry. Vývoj nových tavidel by mohl ovlivnit i potřebu inertní atmosféry. Nebo opačnou cestou je možnost z pájecího procesu zcela vynechat tavidlo, jak je možno vidět v experimentech Makota Senuagi [23], který ve své práci nahradil použití tavidla vodíkovými radikály, se kterými dosáhl velmi dobrých výsledků u pájených spojů s použitím jak olovnatých, tak i bezolovnatých pájecích slitin.

3.2.3 Intermetalické sloučeniny v pájeném spoji

Při procesu pájení dochází k přiblížení atomů pájeného materiálu a roztavené pájecí slitiny na tak malou vzdálenost, že dochází k difuzi prvků spojovaných materiálů na rozhraní pájecí slitiny a pájeného povrchu. Na tomto rozhraní se vytváří intermetalická sloučenina v tloušťce řádově desetin μm . U difuzního pájení je vytvoření pájeného spoje podmíněno vznikem mezivrstvy tvořené intermetalickými sloučeninami.

Po smáčení povrchu pájecí slitinou se na rozhraní vlivem difuze atomů mědi do pájky a atomů cínu do mědi vytvoří tenká vrstva Cu_6Sn_5 (viz Obr. 4). Má světle šedou barvu a teplotu tání přibližně $415\text{ }^\circ\text{C}$. Je-li zabráněno difuzi cínu do mědi a současně je podporována difuze mědi do pájky (tj. zejména při vyšších teplotách), dochází na rozhraní mezi mědí a vrstvou Cu_6Sn_5 k tvorbě druhé intermetalické sloučeniny Cu_3Sn , která obsahuje více mědi než předchozí. Má tmavě šedou barvu a teplotu tání cca $670\text{ }^\circ\text{C}$ a její důležitou vlastností je nesmáčivost pájecí slitinou. Nesmáčivost a vysoká teplota tání komplikují opravitelnost pájeného spoje [9].



Obr. 4: Grafické a skutečné zobrazení intermetalických vrstev v pájeném spoji

Intermetalická vrstva má fyzikální, mechanické i chemické vlastnosti rozdílné od spojovaných materiálů a pájecí slitiny. Intermetalické sloučeniny mají zásadní vliv na

dlouhodobou spolehlivost pájeného spoje. Tloušťka intermetalické vrstvy je dána pájecí teplotou a dobou pájení. Pro spolehlivý pájený spoj se doporučuje teplota pájeného spoje 220 - 230°C po dobu cca 2 - 3 s. Tloušťka vytvořené intermetalické vrstvy je přibližně 0,5 μm .

3.3 Požadavky na bezolovnatý pájený spoj

Obecné předpoklady spolehlivosti bezolovnatého pájeného spoje jsou [19][22]:

- Mechanická integrita spoje
 - Správný konstrukční návrh spoje
 - Správná volba pájecí slitiny
 - Správný tvar menisků spoje
 - Spoj s minimem dutin a mikrotrhlin
 - Pevnost a tažnost spoje
- Tepelné a elektrické vlastnosti spoje
 - Elektrický kontakt
 - Tepelný kontakt
- Metalurgická stabilita
 - Reakční mechanismy mezi pájkou a spojovanými kovy
- Environmentální stabilita
 - Odolnost vůči korozi

V porovnání s olovnatým pájeným spojem, vykazuje bezolovnatý pájený spoj odlišnosti ve vyšší teplotě tavení, odstranění toxicity, použití nových tavidel, větší pevnosti, nižší schopnost smáčení, horší vizualizaci spoje a vyšší ceně při použití slitin s drahými kovy. Snahou je vytvořit bezolovnatou pájecí slitinu s vlastnostmi podobající se olovnaté pájce, aby nebylo nutno příliš zasahovat do již zavedených a ověřených technologií [22].

4 Současný stav problematiky tavidel v bezolovnatém procesu pájení

Tavidla jsou nedílnou součástí pájecího procesu. Jejich funkcí je redukovat vrstvy oxidů vzniklé na pájených částech a zabránit vzniku nových oxidů na roztavené pájecí slitině. Dále tavidlo zlepšuje přenos tepla na desce plošného spoje. Tavidlo působí na povrchové napětí pájecí slitiny a tím ovlivňuje smáčení spojovaných materiálů roztavenou pájecí slitinou [11].

Tavidla je nutné hodnotit jak s ohledem na požadovanou tvorbu pájeného spoje, tak z hlediska možného ohrožení budoucí funkce celého zařízení a v neposlední řadě je nutné hodnotit vliv tavidla na životní prostředí [16].

Po procesu pájení mohou tavidla zanechat korozně aktivní a elektricky vodivé zbytky, které mohou mít nežádoucí vliv na spolehlivost elektrického zařízení, proto je nutné tyto residua po pájení odstranit. To je jednak nákladné, a zároveň tato technologie prodlužuje výrobní proces. Ideální tavidlo by mělo proto být vysoce aktivní za pájecích teplot a nečinné za normálních pracovních teplot daného zařízení, aby nebylo nutné jejich odstranění po pájení. V praxi je nutné zvolit kompromis mezi aktivitou tavidla za pájecích teplot a mezi nečinností tavidla za normálních teplotních podmínek. Dále je nutné, aby se po aktivaci tavidla odpařila všechna rozpouštědla a aktivátory v tavidle obsažené. Jinak mohou v pájeném spoji vznikat dutiny z důvodu právě neodpařených rozpouštědel a nedostatečné aktivaci tavidla. Takto vzniklé dutiny ovlivňují značně mechanickou pevnost spoje a tím i jeho životnost [18].

4.1 Rozdělení tavidel



Obr. 5: Složení obsahu tavidla [18]

Složky tavidla jsou především tuhá složka a rozpouštědlo, jak ukazuje Obr. 5. Tuhou složkou je tavidlový nosič (přírodní pryskyřice, syntetická pryskyřice, nebo organická kyselina), aktivátory na organické bázi (s halogenidy, nebo bez halogenidů), nebo anorganické bázi. Tuhá složka může také zahrnovat aditiva (příměsi), které upravují vlastnosti tavidla. Rozpouštědla mohou být na bázi organické (alkoholy) nebo na bázi anorganické

(deionizovaná voda). Materiál nosičů nebo rozpouštědel, které drží ostatní aktivní látky tavidel v roztoku, jsou hlavně voda nebo alkohol. Tavidla na bázi alkoholu mají tu výhodu, že snadno rozpouští složky, mají nízké povrchové napětí, které usnadňuje smáčení a lze je snadno sušit již v procesu přehřátí. Nevýhodou je hořlavost a vysoký obsah těkavých sloučenin (VOC). Tavidla na vodní bázi nejsou hořlavá a nemají vysoký obsah těkavých sloučenin VOC, ale mají vyšší povrchové napětí a obtížněji se suší ve fázi přehřátí. Zbytky tavidel na bázi vody mohou být hydroroskopická, a proto je celková spolehlivost pájeného spoje s využitím těchto tavidel, nižší [18][23].



Obr. 6: Rozdělení druhů tavidel [18]

4.1.1 Oplachová tavidla

Elektrochemická aktivita zbytku tavidla určuje další dělení, a to na oplachová a bezoplachová (no-clean). Tavidla, která jsou omyvatelná vodou, bývají korozivní a po pájení se musí očistit. Většina těchto tavidel obsahuje halogenidy a silné organické kyseliny, které jsou aktivní již při pokojové teplotě a v průběhu pájení nejsou plně odpařeny. Nevýhodou omyvatelných tavidel je jejich nutnost smytí po procesu pájení, čímž se zvyšují náklady na provoz a realizaci pájecího procesu [16].

4.1.2 Bezoplachová (no-clean) tavidla

Do roku 1978 se téměř všechny DPS (98%) po procesu pájení čistily a používala se pouze oplachová tavidla. Poté se objevují bezoplachová tavidla, která jsou méně nákladná, a to z důvodu jednoduššího procesu pájení. Tavidla jsou navržena tak, aby se stala aktivními a neaktivními v daných pájecích cyklech, které je důležité přesně určit, aby nedošlo k aktivaci tavidla v krátkém čase, popř. v dlouhém čase ještě před procesem pájení [16].

V dnešní době se používají převážně bezoplachová tavidla, hlavně z důvodu ekologického (neobsahují těkavé sloučeniny VOC) a ekonomického (není třeba čistit). Přináší s sebou ale také nevýhody, jako je zhoršení optické inspekce a automatické inspekce, z důvodu lesklosti tavidla na povrchu DPS. Jako další nevýhodu lze uvést problémy při lakování DPS, vzniká problém s no-clean tavidlem pod součástkami, kam nemůže zatéct lak. Problémy mohou také vznikat při opravách, kdy je nutné odstranit no-clean tavidlo okolo měněné součástky. Tavidlo se zcela neodstraní a může vznikat problém s korozí na DPS způsobené vlhkostí.

Poslední dělení tavidel je z hlediska přítomnosti halogenidů. Halogenidy se používají jako aktivátory, protože mají schopnost rychle snížit tloušťku oxidů kovů. Halogenidy se mohou použít jako vysoce výkonné aktivátory, ale také mohou být příčinou vzniku koroze při pájení a tomu se snaží výrobci vyhnout. Tavidla bez halogenidů se považují za bezpečnější, ale mají nižší aktivitu a smáčecí schopnost [13].

4.2 Rozdělení tavidel dle norem

Rozdělení tavidel udávají jak české tak i zahraniční normy. Rozdělení tavidel dle normy ČSN EN ISO 9454-1 je uvedeno v Tab. 4. Nejnovější členění tavidel dle ČSN EN 61190-1-1:2002 (třídění podobné J-STD-004) popisuje Tab. 5, která ukazuje úroveň aktivace (procentní množství halogenidů).

Tab. 4: Rozdělení tavidel dle ČSN EN ISO 9454-1 [24]

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

Tab. 5: Typy tavidel ČSN EN 61190-1-1:2002 (J-STD-004) [25]

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

Dříve se tavidla na bázi přírodních pryskyřic dělila ještě na [25]:

- R - velmi málo aktivní,
 - vhodné na dobře pájitelné spoje,
 - zůstávají po něm zbytky nečistot, které není potřeba čistit
- RMA - halogenidy aktivované, středně aktivní,
 - zůstávají po něm zbytky nečistot, které je vhodné čistit,
- RA - silně aktivované,
 - zůstávají po něm zbytky nečistot, které je nutno odstranit.

Tavidla lze také rozdělit podle jejich druhu a aktivity, jak je zobrazeno v Tab. 6. Tavidla jsou označena písmeny L (Low), což značí málo aktivní tavidla, M (Moderate) mírně aktivní tavidla a H (High) velmi aktivní tavidla. 0 a 1 označují nepřítomnost nebo přítomnost halogenidu. Tato tabulka vychází z normy ANSI J-STD-004 [25].

Tab. 6: Typy tavidel a jejich aktivita dle normy ANSI J-STD-004 [25]

Druh tavidla	Aktivátor (váha % halogenidu)		IEC označení tavidel
Kalafuna (RO)	Málo (<0,01)	L0	ROL 0
	Málo (<0,15)	L1	ROL 1
	Mírně (0)	M0	ROM 0
	Mírně (0,5-2,0)	M1	ROM 1
	Velmi (0)	H0	ROH 0
	Velmi (>2,0)	H1	ROH 1
Pryskyřice (RE)	Málo (<0,01)	L0	REL 0
	Málo (<0,15)	L1	REL 1
	Mírně (0)	M0	REM 0
	Mírně (0,5-2,0)	M1	REM 1
	Velmi (0)	H0	REH 0
	Velmi (>2,0)	H1	REH 1
Organické látky (OR)	Málo (<0,01)	L0	ORL 0
	Málo (<0,15)	L1	ORL 1
	Mírně (0)	M0	ORM 0
	Mírně (0,5-2,0)	M1	ORM 1
	Velmi (0)	H0	ORH 0
	Velmi (>2,0)	H1	ORH 1
Anorganické látky (IN)	Málo (<0,01)	L0	INL 0
	Málo (<0,15)	L1	INL 1
	Mírně (0)	M0	INM 0
	Mírně (0,5-2,0)	M1	INM 1
	Velmi (0)	H0	INH 0
	Velmi (>2,0)	H1	INH 1

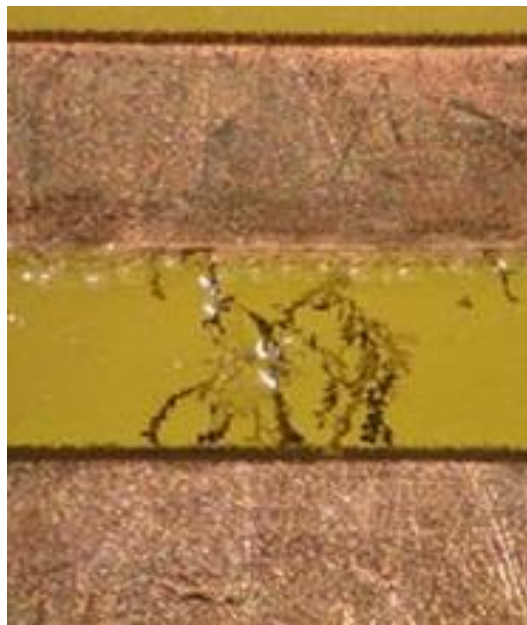
5 Defekty způsobené zbytky tavidel

Tavidla jsou nezbytnou součástí pájecího procesu pro jejich hlavní funkci, což je odstranění oxidů z pájecí slitiny a pájených součástí a napomáhání lepšího smáčení. Tavidla však působí i negativně na celý proces pájení a to převážně vznikem zbytků a kontaminací po procesu pájení. Tato residua mohou způsobit celou řadu problémů na DPS a pájených spojích. Největší databáze defektů vniklých při pájení (Soldering Defects Database [26]) udává, že

vlivem tavidel a jejich zbytků je způsobena celá jedna čtvrtina defektů pájených spojů. Nejčastějšími defekty jsou dendrity a koroze, které vznikají působením vnějších vlivů (zvýšená vlhkost, teplota, napětí) na aktivní zbytky tavidel po procesu pájení. Jako další defekty, způsobené vlivem tavidla na pájený spoj, jsou dutiny ve spojích tzv. voidy, které budou blíže popsány v následujících kapitolách [26].

5.1 Vodivé dendrity a koroze na povrchu DPS

Vodivé dendrity na povrchu DPS vznikají působením iontů obsažených v roztocích na povrchu DPS. Tyto kyselinové roztoky obsahují převážně chloridy a halogenidy, vyskytující se ve zbytcích tavidel, které narušují kovový povrch. Čím větší je koncentrace halogenidů, tím silnější tyto kyselinové roztoky jsou a tím více narušují kovové materiály, jako jsou např.: měděné a cínové vodivé cesty a plošky na DPS. Uvolněné kovové ionty působením elektromigrace se přesouvají mezi kladně a záporně nabitými elektrodami (vodivými cestami na DPS). Tento korozivní proces a uvolňování iontů z kovů je urychlen působením vnějšího napětí. Vznik dendritů a vodivých solí snižuje povrchový izolační odpor a může vést až ke tvorbě vodivých spojení na povrchu DPS (viz Obr. 7) [27][28].



Obr. 7: Vznik dendritů mezi vodivým motivem [28].

Při přiložení vnějšího napětí na měděné elektrody (vodivé cesty oddělené izolační mezerou na DPS) dochází k přesouvání iontů z místa anody ke katodě. Pohybem iontů dochází ke zvyšování intenzity elektrického pole v závislosti na vzdálenosti elektrod (vodivých cest na DPS), což popisuje rovnice 5.

$$E = \frac{U}{d} \quad (5)$$

kde E je elektrické pole, U je napětí a d je vzdálenost mezi elektrodami.

Ionty kontaminujících látek, které se rozpouštějí ve vlhkosti na povrch DPS, zvyšují vodivost (nižší odpor) izolační vrstvy mezi anodou a katodou. Jejich přítomnost zvyšuje elektrochemickou migraci. Množství migrujících iontů se zvyšuje v závislosti na několika faktorech: na rozpustnosti iontu, pohyblivosti iontu, vlivu pH na rozpustnost, reaktivitě iontu, teplotě a relativní vlhkosti. Rozpustnost iontu a jeho pohyblivost v roztoku jsou nejdůležitější faktory, protože vodivost závisí nejvíce na obou těchto faktorech (viz rovnice 6).

$$\sigma = \sum N_i q_i \mu_i \quad (6)$$

kde σ je vodivost, N_i je počet nosičů náboje, q_i velikost náboje nosiče, μ_i pohyblivost nosiče náboje.

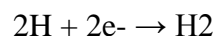
Pohyblivost nosiče náboje je závislá na teplotě a na difusním koeficientu iontu jak je vidět z rovnice 7.

$$\mu_i = \left(\frac{q}{kT} \right) D_{ion} \quad (7)$$

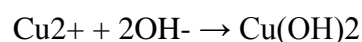
kde μ_i je pohyblivost nosiče náboje, k je Boltzmannova konstanta, T je teplota a D_{ion} je difusní koeficient daného iontu [18].

Jev elektromigrace je možné také vyjádřit pomocí několika následujících chemických rovnic [28][29]:

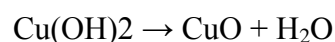
Uvolňování mědi z anody [28]:

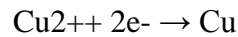


Přenos elektronů mědi z anody ke katodě [28]:

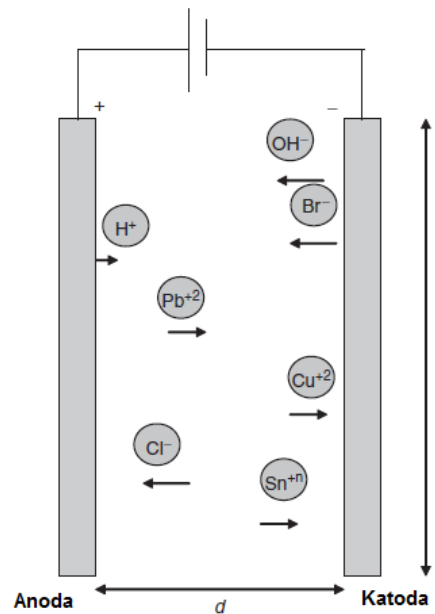


Usazování mědi na katodě [28]:





Přesouvání iontů z místa anody ke katodě, které jsou pokryty pájecí slitinou, je vidět na Obr. 8.



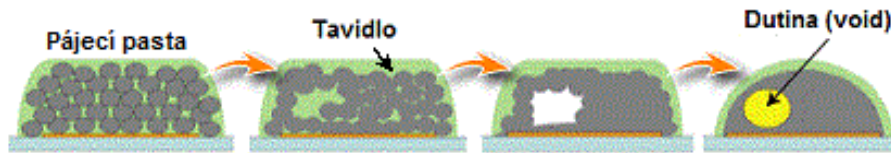
Obr. 8: Schéma elektromigrace [18]

Tento druh defektu (vodivý dendrit), který byl výše popsán, je nejčastějším druhem vady v pájených spojích způsobený tavidly a jejich zbytky. Ve zmíněné databázi defektů je celá řada ukázek výskytů dendritů: mezi vodivým motivem, mezi vodivým motivem pod nepájjivou maskou, mezi vodivým motivem pod ochranným lakem, mezi piny konektoru a pod součástkami mezi jejich spodními vývody a další [26].

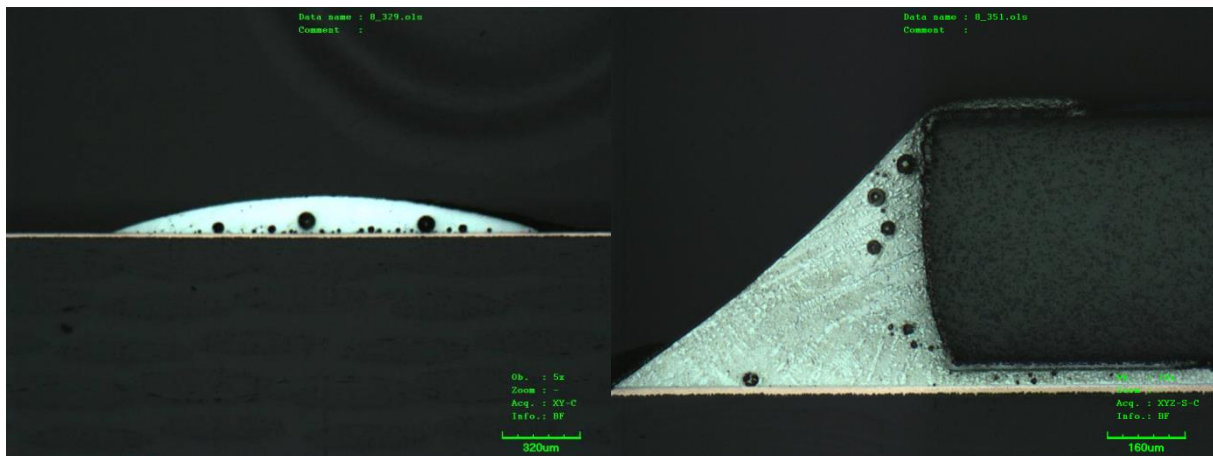
5.2 Dutiny (voidy) v pájeném spoji

Dutiny (voidy) jsou nežádoucí defekty, které ovlivňují mechanické vlastnosti spoje, přenos tepla ve spoji a mají vliv na životnost pájených spojů. V pájených spojích se vyskytuje celá řada voidů, které jsou zapříčiněny různými faktory. V této kapitole se budeme věnovat tzv. macro voidům, protože jejich vznik zapříčiňují tavidla. Problematikou voidů se zabývá celá řada vědců a výrobců elektroniky, lze zde uvést např. Johns Creek, Mitch Holtzer [30] a další. Velikost macro voidů se pohybuje v rozmezí $100 \mu\text{m} \div 300 \mu\text{m}$. Pro spolehlivost spoje není tak důležitá velikost voidů, ale hlavně jejich poloha ve spoji. Voidy uprostřed spoje nemají tak velký vliv na mechanické vlastnosti jako u součástek, nebo pájecích plošek.

Voidy vznikají při procesu pájení ve fázi předehřevu a samotného pájení nedostatečnou aktivací tavidla a neodpařením veškerých rozpouštědel v tavidle obsažených. Tyto plyny poté ve spoji způsobují dutiny (Obr. 9 a Obr. 10).



Obr. 9: Vznik voidu v pájeném spoji



Obr. 10: Dutiny v pájených spoji

Tvorbu macro voidů lze ovlivnit dobou aktivace tavidla. Při prodloužení této doby je tavidlo dostatečně aktivované a odstraní oxidy z pájených spojů. Dalším ovlivňujícím faktorem je doba předehřevu. Tato doba musí být dostatečně dlouhá, aby se z tavidla odpařila všechna rozpouštědla. Tudiž vznik těchto defektů lze nejvíce ovlivnit vhodným nastavením pájecího profilu.

Tvorbu voidů lze dále ovlivnit také použitím ochranné atmosféry, která ovlivňuje povrchové napětí pájecí slitiny a tím i odcházení odpařených rozpouštědel z pájeného spoje. Některé přetavovací pece využívají ochrannou atmosféru spolu s vakuem, které odstraní plyny z roztavené pájecí slitiny a tím se minimalizuje vznik macro voidů.

6 Měření iontové čistoty

Z předchozích kapitol vyplynulo, že nejméně jedna čtvrtina defektů vzniká vlivem zbytků tavidel, které vznikají při procesu pájení. Jako nejčastější defekt se vyskytuje koroze v okolí a na pájených spoji a jako další častý jev jsou vznikající dendrity mezi spoji a mezi vodivými motivy a spoji. Proto je důležité stanovit míru těchto zbytků na DPS s pájenými

spoji a dále je nutné uvést měřicí metody, které umožňují toto množství stanovit, popřípadě s jakou přesností.

Iontová čistota znamená, že na povrchu DPS se nevyskytují látky, které mohou vykazovat elektronovou aktivitu a mohou se uvolňovat. Jedná se například o disociované kyseliny, zásady, soli a organické radikály. Všechny tyto látky mohou, se zvýšenou vlhkostí, vytvářet elektrolyt a způsobit pohyb iontů kovu, které mohou vést až k vytvoření vodivých můstků mezi elektrodami [31][32].

Iontová čistota se dá měřit různými metodami, které jsou uvedeny v normách zabývajících se tavidly pro pájení a čištěním DPS (ČSN EN 29454, IPC-CH-65B). Metody jsou založeny na různých typech přístrojů nebo jen na laboratorním vybavení [33].

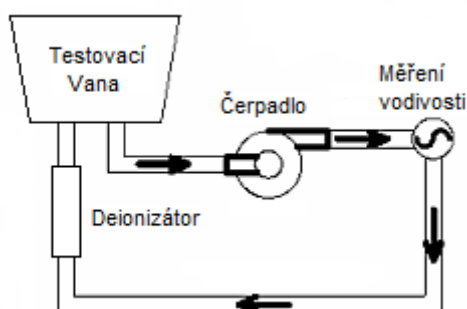
6.1 Přímé metody měření iontové čistoty:

6.1.1 ROSE (Resistivity Of Solvent Extract) metoda

Tato metoda spočívá v omytí testované DPS v roztoku s přesně definovaným množstvím isopropanolu a DI vody. Existují dvě normy stanovující koncentraci IPA: 75 hmotnostních % ve vodě a 50 hmotnostních % ve vodě. DI voda musí mít min 6 M Ω /cm – 25 M Ω /cm. Po předem stanovené době se měří vodivost roztoku, v kterém byla daná DPS omyta a porovnává se s referenční lázní, která je přesně kontaminovaná množstvím NaCl. Porovnáním se získá údaj iontové čistoty v ekvivalentu $\mu\text{g NaCl}/\text{cm}^2$ [31].

6.1.2 Ionograf

Jde o dynamickou měřicí metodu, kde je roztok, v němž je ponořen testovací vzorek, kontinuálně regenerován. Z rychlosti regenerace roztoku vyplývá hodnota vodivosti roztoku, z které je vypočítán ekvivalent $\mu\text{g NaCl}/\text{cm}^2$. Blokové schéma ionografu je zobrazeno na Obr. 11 [33].



Obr. 11: Blokové schéma ionografu

6.1.3 Omegametr

Statická měřicí metoda, u níž se roztok izopropanolu a DI vody připraví cirkulací přes vysoce výkonné iontoměniče a po dosažení požadované hodnoty roztoku se iontoměničové kolony oddělí z okruhu a do roztoku se vloží měřený vzorek. Měřená hodnota vodivosti se postupně mění a po jejím ustálení získáme výslednou hodnotu. Výsledná hodnota je jako u metody ROSE $\mu\text{g}/\text{NaCl}$ na cm^2 [34].

6.1.4 Kontaminometr

Statická měřicí metoda, která má obdobný princip jako Omegametr. Fotografie kontaminometru s testovanou DPS je vidět na Obr. 12.



Obr. 12: Kontaminometr

6.1.5 Testování organické povrchové kontaminace

Průběh a podmínky této metody popisuje norma IPC TM 650 2.3.38. Podstata tohoto testu spočívá v rozpuštění organických nečistot pomocí silného rozpouštědla a jejich depozici na skleněný substrát. Poté dochází k optické kontrole skleněného substrátu, zda jsou na jejím povrchu patrné nějaké kontaminace. Nebo lze provést i referenční měření pomocí infra-spektrometru na tenké vrstvě nečistot (tuto metodu popisuje norma IPC TM 650 2.3.39).

6.1.6 Měření povrchového napětí a měření kontaktního úhlu

Tato metoda spočívá v měření pod optickým profiloměrem, kterým je možno měřit kontaktní úhel definované kapaliny na očištěném povrchu. Podle srovnání kontaktního úhlu referenčního roztoku a měřeného roztoku lze určit míru kontaminace.

6.1.7 Měření povrchového napětí pomocí inkoustu s definovaným povrchovým napětím.

Pomocí speciální sady inkoustů s různým povrchovým napětím se na DPS zkouší míra kontaminace. Postupně se aplikují inkousty na DPS, až dojde k nerozlítí daného inkoustu do plochy. Na povrchu se vytvoří kapky inkoustu a podle druhu inkoustu lze odhadnout míru znečištění. Jde o velice jednoduchou a rychlou metodu v praxi jednoduše aplikovatelnou, ne však tolik přesnou.

6.1.8 Indikace zbytků na DPS

Některé společnosti (např. ZESTRON) nabízejí testovací sady pro snadnou detekci zbytků na DPS. Jedná se o roztoky, které se aplikují na lokální místa na DPS a podle zbarvení roztoku lze indikovat patřičné aktivní zbytky nebo organické zbytky tavidel. Výhodou této metody je aplikace na lokální místa a snazší odhalení kritických znečištěných míst a snadné použití.

6.2 Nepřímé metody měření iontové čistoty:

V tomto případě se jedná o metody, které přímo neudávají vyjádření iontové čistoty ve fyzikálním rozměru, ale zjišťují jeho přímé účinky na DPS, což se velice blíží praxi a proto se tyto metody hojně využívají pro měření a zjišťování zbytků tavidel. Tyto metody lze označit jako "doplňkové" metody k metodám přímým, které jsou uvedené výše. Do nepřímých metod lze zařadit následující metody [31].

6.2.1 Vizuální metody

Opticky se hodnotí kontaminace na povrchu DPS. Pomocí skleněných substrátů lze hodnotit i znečištění pod čipy a součástkami. Tyto metody jsou velice subjektivní a záleží na odbornosti a zkušenostech posuzovatele [31].

6.2.2 Korozivita tavidla

Při této metodě se aplikuje na připravený testovací substrát testované tavidlo a vystavuje se zhoršeným klimatickým podmínkám a následně se vyhodnocuje míra vzniklé koroze na substrátu [34].

6.2.3 SIR testy (měření povrchového odporu substrátu)

Test se provádí na speciálních DPS pomocí speciálního motivu, na který se aplikuje testovací roztok. V některých případech se tento motiv umísťuje i na technologické okraje

DPS, aby test probíhal přímo s celou DPS po celou dobu procesu. Testovací vzorky jsou pak umístěny do klimakomory, kde dochází k zatěžování DPS vnějšími vlivy jako je zvýšená teplota a vlhkost. Dále je deska zatěžována stejnosměrným napětím v rozsahu 5 – 50V. Po celou dobu se zjišťuje na DPS změna povrchového odporu.

Podmínky a průběh testu je dán standardem IPC TM-650 2.5.27, nebo IPC TM-650 2.6.14.1. Průběžné měření je důležité provádět hlavně u spojů s pájecí slitinou SAC, která vytváří dendrity Ag, které po vyjmutí z komory většinou přehoří a test tím může být velice ovlivněn [52].

6.2.4 Testy pájitelnosti

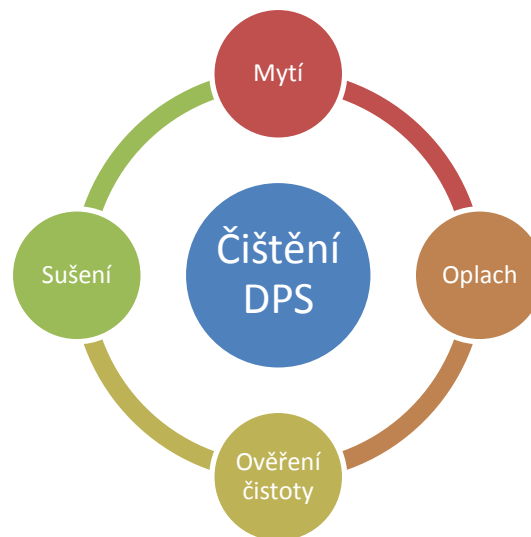
Tyto testy jsou popsány v J-STD 002D (Solderability tests). Nečistoty ovlivňují pájitelnost DPS a pájených částí, proto lze pomocí testů pájitelnosti hodnotit, zda je daná DPS znečištěna, ale nejde dost dobře určit míra znečištění. K testům se nejčastěji využívají testy roztékavosti a test smáčecích vah [35][49].

Z výše uvedených metod vyplývá, že jednotlivé metody a jejich výsledky, kvůli různému uspořádání a použití přístrojů, se velice obtížně dají porovnávat. Většina přístrojů je sice kalibrována obdobně pomocí množství (váhy) NaCl, ale postupy měření, tj. koncentrační gradienty a rychlosti omývání vzorku jsou rozdílné, což v praxi znamená, že výsledky jednotlivých měření nejsou ani lineárně závislé a prakticky se nedají porovnávat. U nepřímých metod je porovnávání výsledků taktéž irelevantní, jelikož dané metody mají jiné fyzikální vyjádření nebo ho nemají vůbec. Dalším omezením výše uvedených metod je zjištění výsledků pouze průměrných hodnot kontaminací na DPS, což přímo nespecifikuje, kde na DPS se znečištění objevuje. Z praxe je patrné, že kontaminace v ploše nejsou tak kritické, jako kontaminace pod čipy a součástkami. Z důvodů těchto úskalí je vždy důležité zvolit vhodnou metodu nebo kombinaci metod pro důkladnou detekci odpovídajících znečištění. Pokud se jedná o kritické procesy výroby z hlediska čistoty, vždy se doporučuje provést zkoušky elektromigrace, nebo stárnutí celých sestav v klimatických testech a současně s tím provést např. kontaminometrické měření, SIR test, nebo měření povrchového napětí.

Norma IPC udává povolenou míru znečištění na DPS a tj. 1,56 μg NaCl na cm^2 [33]. Tato hodnota byla stanovena v 70-80 letech při vytvoření normy IPC. Od této doby se technologie výroby elektroniky značně změnily. Zařízení se stále zmenšují, integrita spojů

neustále roste a velikost komponentů na DPS se snižuje, proto se často můžeme setkat v odborných člancích a na konferencích s názorem o tom, zdali tato hodnota znečištění je stále aktuální a postačující. Výrobci elektroniky nejsou v tomto ohledu jednotní. Někteří zavádějí do SMT procesů čištění DPS po pájení, aby předcházeli problémům se znečištěním. V dnešní době polovina výrobců DPS po procesu pájení čistí DPS a druhá polovina nikoliv. Lze však s jistotou říci, že opravdu čistá DPS je s hodnotami kontaminace $0,0 \mu\text{g NaCl na cm}^2$, všechny hodnoty vyšší mohou potenciálně způsobit problémy ve spolehlivosti daného zařízení [8].

7 Čistící proces DPS po pájení



Obr. 13: Jednotlivé fáze čištění DPS po pájení [8]

Z důvodu zlepšení spolehlivosti a předcházení vzniků vad, způsobených tavidly a jejich zbytky, které byly zmíněny v kapitole 5, zavádí se do výrobní technologie proces čištění DPS. Tento proces se skládá ze čtyř hlavních dílčích úkonů, kterými jsou mytí DPS, oplach, sušení a ověření čistoty (viz Obr. 13). Z těchto čtyř fází je nejkritičtější právě mytí DPS, kde dochází ke styku čištěného objektu s čistící emulzí. Následně je aplikován oplach DPS od mycího roztoku, ve kterém jsou rozpuštěny zbytky tavidel a ostatní nečistoty, poté následuje proces ověřování čistoty DPS. Tento proces někteří výrobci elektroniky vynechávají nebo ho provádí v rámci nastavování procesu. Pokud DPS po mytí nevykazuje požadované parametry je možné mycí proces opakovat. Nakonec se celá sestava suší, aby došlo k odpaření zbytků rozpouštědel a čistících látek. U všech těchto fází hrají důležitou úlohu nastavitelné faktory jako je čas procesu, teplota lázně, koncentrace roztoku, intenzita mechanického působení atd. Pro technologii čištění se nejčastěji používá ultrazvukové mytí nebo čištění

postřikem, lze také využít čištění bubláním a kýváním, ale tyto dvě technologie nejsou v praxi tak časté [27][34].

Při využití ultrazvukového čištění je použit zdroj ultrazvuku s frekvencí okolo 40 kHz. Při této metodě se využívá jevu zvaného kavitace, kdy vlivem průchodu ultrazvuku kapalinou dochází k tvorbě dutin a jejich následné implozi, která má destruktivní účinek na okolní materiál a dochází tak k lepšímu uvolňování zbytků. Výhodou této metody je schopnost odstranit i nečistoty z hůře přístupných míst, jako jsou místa pod součástkami. Jako další výhodu lze uvést rychlost čištění a účinnost. Většina těchto výhod je závislá na vhodně zvoleném čistidle a jeho složení. Pro zlepšení účinnosti ultrazvukového čištění lze zvolit přehřev lázně v rozmezí 50 - 60 °C, tím je dosaženo maximálního kavitačního účinku [34].

Pro dosažení požadované čistoty je nutné dobře nastavit veškeré parametry čistícího procesu. Jako dva klíčové parametry pro nastavení čistícího procesu je nutno uvést vhodnou volbu čistidla a vhodnou konstrukci stroje. Při volbě čistidla je nutné zvolit dostatečně aktivní čistidlo, ale ne nadměrně aktivní, aby nedocházelo k velké spotřebě tohoto čistidla, a toto příliš aktivní čistidlo bývá převážně nekompatibilní s některými díly DPS. Celý proces by se tím prodražil. Dále by čistidlo mělo obsahovat minimální podíl organických rozpouštědel v systému na vodní bázi. Pokud tento faktor není splněn, zpravidla jsou vysoké hodnoty oxidovatelných organických zbytků v oplachových vodách, což nedovolí oplachy vypouštět do odpadu, ale musí se řízeně likvidovat, což opět prodraží celý proces. U vhodné volby konstrukce stroje je nejdůležitější maximální dynamika postřiku, nebo pouděním pod hladinou, což dokáže účinně zrychlit čistící proces a kompenzuje nižší aktivitu čistidel. Dále je nutné zvolit vhodně uspořádané postřikové pole trysek. V případě zvolení maticových, nebo postupně přímočarých oscilujících trysek je mytí efektivnější než mytí pomocí trysek s neřízeně otáčivými rozvodnicemi s tryskami. Ty jsou sice levnější na výrobu, ale nedokáží rovnoměrně obsáhnout celé postřikové pole. V neposlední řadě je nutné zajistit optimální proces sušení ve stroji, tedy nejen zahřátí sestavy, ale opravdové vytvoření termodynamických podmínek, aby sušení probíhalo co nejrychleji [27].

Jak je patrné z popisu výše, optimalizace čistícího procesu není nijak jednoduchým procesem a je jak časově, tak hlavně finančně náročná. Zavedením čištění sestav do procesu výroby DPS se tento celý systém prodraží a tím bude vyšší i cena celého výrobku. V ideálním případě je vhodně se vyhnout zavedení procesu mytí DPS do výroby, nebo je vhodné si rozmyslet, jestli pro danou aplikaci je čistota DPS kritická. Aby nebylo nutné DPS po procesu pájení čistit, je možno se ubrat cestou tzv. "No-clean" technologií, kde se využívá pájecích

past a tavidel bez nutnosti čištění po pájení. Z praxe ale vyplývá otázka, zda „NO-clean“ technologie opravdu není nutné čistit, a zda zbytky tavidel po pájení nezpůsobí problémy ve spolehlivosti daného zařízení, jelikož v dnešní době s rostoucími nároky na elektronické sestavy se otázka čištění (potlačená na řadu let právě nástupem „NO-clean“ technologie), vynořuje opět do popředí. Vedou k tomu zejména vyšší nároky na SIR (povrchové izolační odpory). Dalším z důvodů je pronikání elektronických řídicích a kontrolních prvků i tam, kde to dříve bylo (s ohledem na prostředí) nemožné. V neposlední řadě k tomu vede celková miniaturizace zařízení. Z těchto důvodů se stále hledá alternativa, jak snížit množství nečistot nebo kontaminace zcela odstranit bez použití procesu mytí DPS [32][33].

8 Experimentální část 1

Oblast praktických experimentů je zaměřena na potvrzení hypotézy, že míru znečištění lze pro různé typy tavidel snížit vhodnou optimalizací pájecího procesu. Dále experimenty mají za úkol zmapovat dopady změn v nastavení pájecího procesu, které mohou ovlivnit spolehlivost pájené sestavy. Hodnocenými faktory byly změny v množství iontových nečistot na DPS, v tloušťkách intermetalických sloučenin, ve smáčecích úhlech a v množství dutin vytvořených v pájených spojích. Jak již vyplynulo z rešeršní části práce, klíčovou částí pájecího procesu je vhodné nastavení pájecího profilu a materiálové aspekty vstupující do tohoto procesu.

8.1 Vliv pájecího profilu na iontovou kontaminaci DPS

8.1.1 Použité materiály

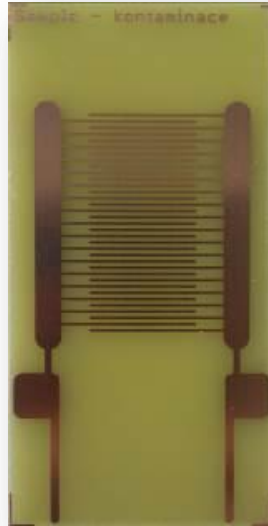
Pro experiment byly vybrány tři odlišné pájecí slitiny s odlišnou aktivitou tavidla. Pájecí slitiny jsou od firmy Shenmao Technology a jsou všechny bezolovnaté a bezoplachové (no-clean) viz Tab. 7.

Tab. 7: Zvolené pájecí slitiny [37][38][39]

Pájecí slitina označení	Složení pájecí slitiny	Typ tavidla (J-STD-004A)	Množství tavidla
SAC305	Sn 96,5% Ag 3% Cu 0,5%	ROL 0	11,5%
SnAg	Sn 97% Ag 3%	ROL 1	10%
SnBi	Sn 42% Bi 57,6% Ag 0,4%	ROM 0	10%

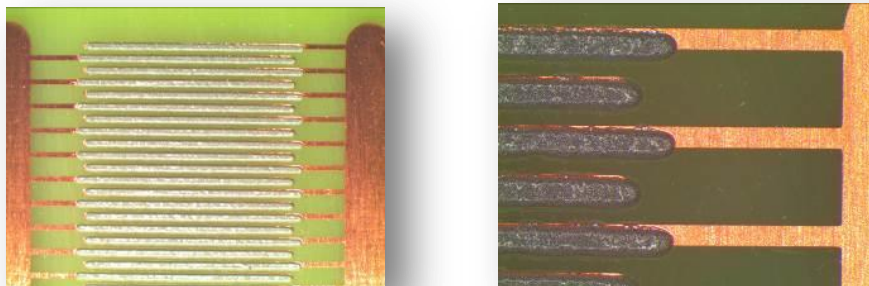
Pro testovací vzorky byl vybrán v praxi nejpoužívanější materiál na výrobu DPS, materiál FR4, jednostranně plátovaný mědí. Pro navržení testovacího vzorku byla využita předloha dle IPC-B-24, který je obsažen ve standardu IPC-9201. Tento vzor byl vybrán dle doporučení testovacích metod TM 2.6.3.3B a TM 2.6.3.7. Uvedený testovací vzor je využíván pro měření povrchového izolačního odporu (SIR) a pro měření možné iontové kontaminace na DPS. Obrazec má interdigitální strukturu s šířkami čar 16 mil (0,003 cm) a s elektrodami o šířce 50 mil (0,127 cm). Izolační mezera v hřebenovité struktuře je široká 20 mil (0,051 cm). Délka překrytí hřebenů byla vypočítána dle popsaného postupu ve standardu IPC-9201 na 600 mil (1,524 cm). Jednotlivé elektrody jsou opatřeny připojovacími body umožňující připojení měřících elektrod. Rozestup mezi elektrodami je 1000 mil (2,54 cm). Tato vzdálenost byla

použita pro možnost využití ISA sběrnice, která je využívána pro připojení napájecího napětí při měření SIR. Tyto sběrnice jsou umístěny na samostatné desce doplněné rezistory s odporem $1M\Omega$, které zabraňují vzniku zkratu. Testovací DPS je zobrazena na Obr. 14.



Obr. 14: Testovací DPS

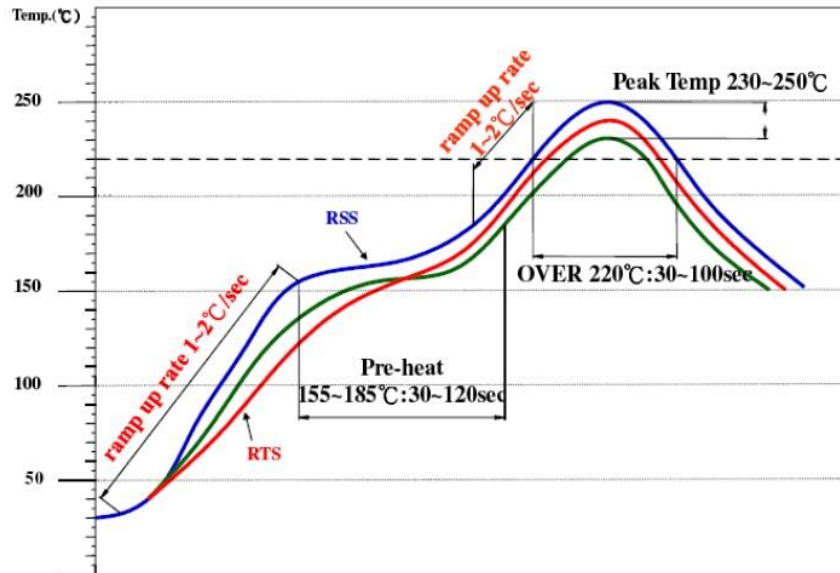
Na připravené testovací DPS byly za pomoci šablonového tisku nanесeny vybrané pájecí pasty (viz Obr. 15). Před samotným nanášením bylo nutné jednotlivé vzorky očistit. Čištění probíhalo dle instrukcí ve vybraných testovacích metodách z testovacího manuálu IPC-TM-650 (TM 2.6.3.3B a TM 2.6.3.7) [33]. Jednotlivé vzorky byly čištěny po dobu 30 sekund za pomoci měkkého kartáčku a izopropylalkoholu. Po důkladném očištění byl vzorek opláchnut demineralizovanou vodou a poté vysušen.



Obr. 15: Testovací DPS s natištěnou pájecí pastou

8.1.2 Volba teplotního profilu

Podle zvoleného druhu pájecí slitiny je nutné dobře nastavit pájecí profil, aby došlo k správnému smáčení spojovaných materiálů a odpaření všech rozpouštědel z tavidel. Výrobci pájecích slitin udávají vhodné pájecí okno pro své výrobky. Součástí dokumentace k pájecí slitině je odpovídající pájecí profil např. viz Obr. 16.



Obr. 16: Pájecí profil pro slitinu SAC305 z dokumentace od výrobce [37]

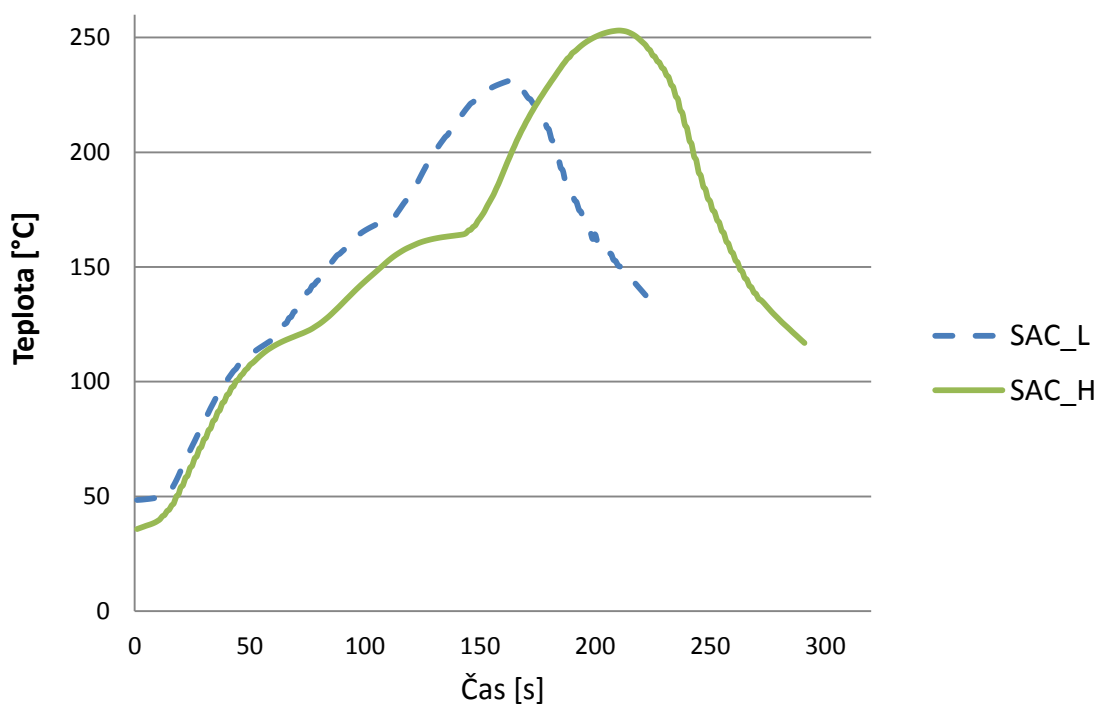
Jak je vidět z pájecího profilu (Obr. 16) pro zvolenou pájecí slitinu, teplotní rozmezí předehřevu a přetavení je značně široké a časy jsou taktéž velice rozdílné. V tomto konkrétním případě je rozdíl teplot u předehřevu 30 °C a časový rozdíl 90 s, u teploty přetavení rozdíl teplot činí 20 °C a časový rozdíl je 70 s. S takto širokými pájecími okny se můžeme setkat u celé řady výrobců. Při prvotním nastavení teplotního profilu můžeme dle dat poskytovaných od výrobce volit teplotu předehřevu a samotného přetavení velice různorodě, v případě nejsme-li omezeni např. teplotně citlivými součástkami, materiálem DPS atd. Pro tento experiment byly zvoleny mezní hodnoty jak teplot, tak i časů předehřevu a přetavení. Byl kladen důraz na co největší rozdílnost teplotních profilů, ale tak, aby hodnoty uvedené v dokumentaci od výrobce byly dodrženy. Zvolené teploty a časy předehřevu a samotného přetavení jsou uvedeny v Tab. 8. Tato tabulka zobrazuje označení pájecích profilů a jejich odpovídajících hodnoty. Teplotní profily pro jednotlivé pájecí pasty jsou zobrazeny na Obr. 17 - Obr. 19. Pro každou pájecí pastu byl vybrán nejprve profil s označením XX_L, kde byly nastaveny spodní hranice hodnot udávaných výrobcem. Poté pro tu samou pájecí pastu byl

vybrán pájecí profil s označením XX_H, kde byly nastaveny horní hranice hodnot udávaných výrobcem.

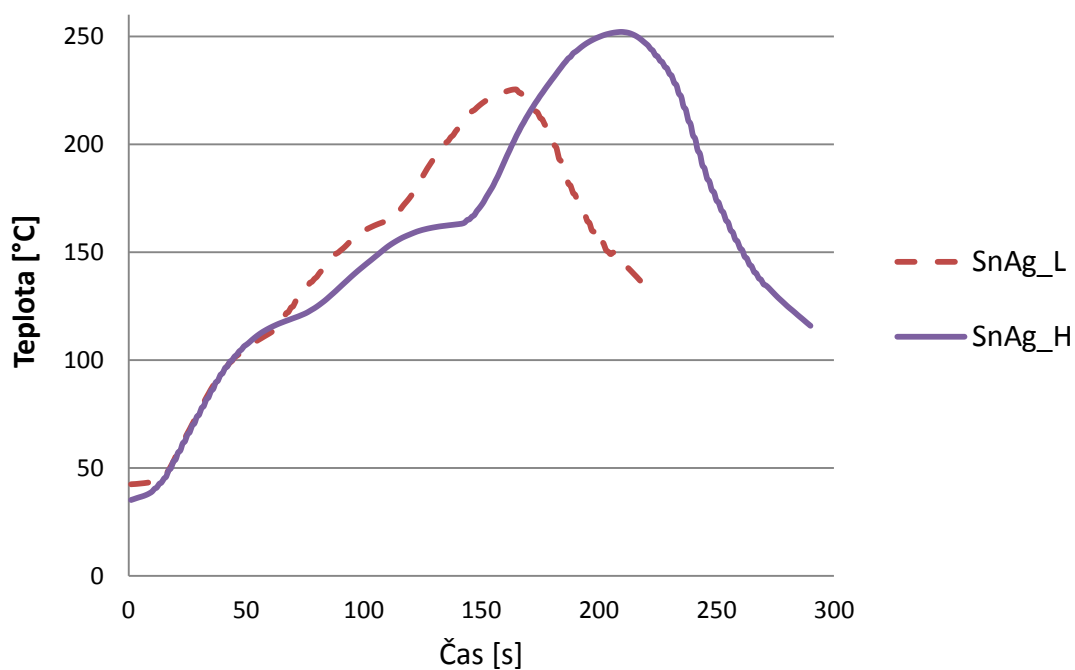
Tab. 8: Zvolené mezní hodnoty teplotního profilu pro jednotlivé pájecí pasty

Pájecí pasta, značení profilu	Teplota přetavení [°C]	Čas nad bodem likvidu [s]	Teplota předehřevu [°C]	Čas předehřevu [s]
SAC, SAC_L	235	30	155	45
SAC, SAC_H	250	50	195	100
SnAg, SnAg_L	230	30	140	60
SnAg, SnAg_H	249	60	200	90
Bi, Bi_L	160	30	100	100
Bi, Bi_H	180	60	100	100

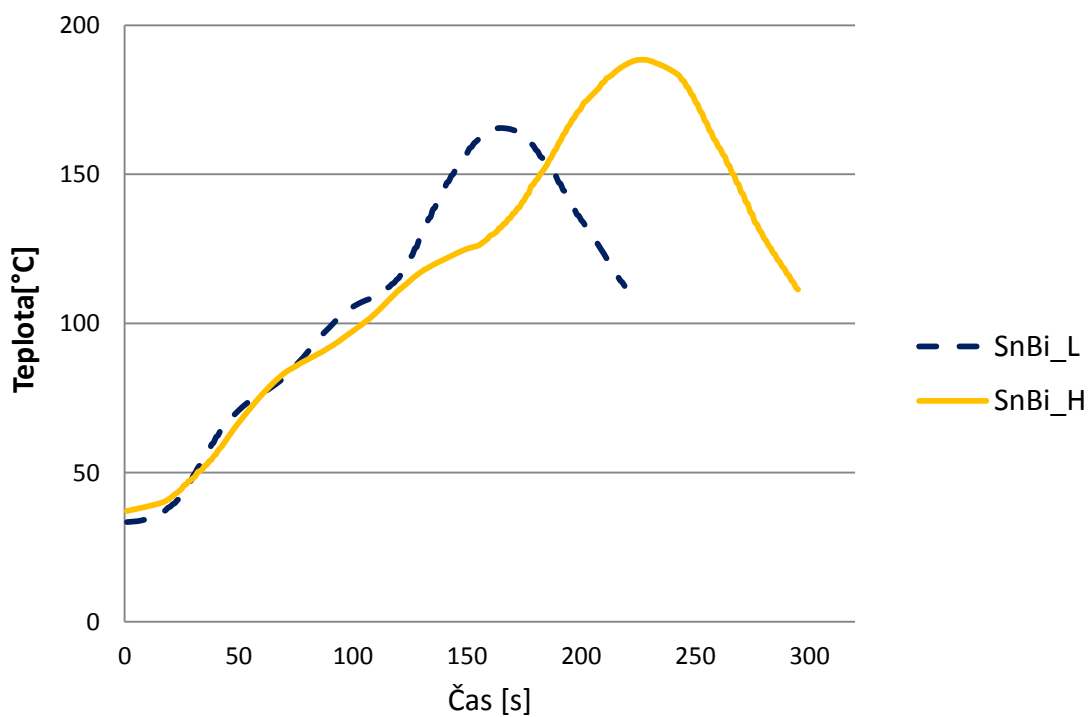
Přetavení pájecí pasty bylo realizováno v průběžné přetavovací peci Mistral 260, kde byly nastaveny odpovídající teplotní profily pro jednotlivé pájecí pasty. Tato pec má tři nastavitelné zóny a regulovatelnou rychlost dopravníku. Pomocí termočlánků umístěných přímo na testovaných vzorcích byla průběžně monitorována teplota na DPS (viz Obr. 17 - Obr. 19).



Obr. 17: Nastavený teplotní profil pájecí pasty SAC ověřený měřením



Obr. 18: Nastavený teplotní profil pájecí pasty SnAg ověřený měřením



Obr. 19: Nastavený teplotní profil pájecí pasty SnBi ověřený měřením

8.1.3 Použité metody měření iontové kontaminace

Pro ověření správnosti výsledků byly zvoleny tři odlišné metody měření iontové kontaminace. Byly zvoleny dvě přímé metody (měření pomocí kontaminometru a měření vodivosti extrakčního roztoku) a jedna metoda nepřímá (měření povrchového izolačního odporu SIR). Jak již bylo zmíněno v kapitole 6, tyto metody se liší jak provedením, tak i interpretací získaných výsledků. Všechny však mohou odhalit, zdali jsou na DPS nějaké iontové nečistoty.

Měření pomocí kontaminometru

Princip této metody je popsán podrobněji v kapitolách 6.1.3 a 6.1.4.

Měření vodivosti extrakčního roztoku

Tato metoda vychází z normy IPC-TM-650 (2.3.25) [33]. Nejprve je nutná příprava roztoku demineralizované vody a isopropylalkoholu v poměru 1:1. Takto připravený roztok je nalit do čisté nádoby v množství 10ml na 1cm² plochy testované DPS. Pro námi zvolené testovací desky bylo nutné použít množství roztoku 200 ml. Do připraveného roztoku byl poté vložen testovací vzorek, který byl v roztoku extrahován po dobu jedné hodiny. Poté byl vzorek z roztoku vyjmut a pomocí konduktoměru byla zjišťována vodivost roztoku. Z takto změřené vodivosti bylo poté nutno dopočítat ekvivalent $\mu\text{g NaCl}$ na cm².

Norma udává rovnici pro ekvivalentní množství NaCl v roztoku:

$$C_{NaCl} = \frac{\sigma - 4,846 \cdot 10^{-1}}{5,555 \cdot 10^{-4}} \quad [\mu\text{g}/\text{l}] \quad (8)$$

Z této hodnoty lze dopočítat iontovou kontaminaci desky jako podíl koncentrace ekvivalentu NaCl a plochy desky S. Výsledek je vyjádřen v $\mu\text{g NaCl}/\text{cm}^2$.

$$\text{Plocha DPS:} \quad S = 2 \cdot \text{šířka} \cdot \text{délka} \quad [\text{cm}^2] \quad (9)$$

$$\text{Iontová kontaminace DPS:} \quad T = \frac{C_{NaCl} \cdot V_{ext}}{S} \quad [\mu\text{g NaCl}/\text{cm}^2] \quad (10)$$

kde V_{ext} je množství extrakčního roztoku.

Měření povrchového izolačního odporu (SIR)

Tato metoda je popsána v kapitole 6.2.3 a vychází ze standardu IPC TM 2.6.3.3B a TM 2.6.3.7 z testovacího manuálu IPC-TM-650. Tyto testovací metody mají obdobu v normě ČSN EN ISO 9456-17 a probíhají za pevně stanovených klimatických podmínek (40°C – 90% r. v. nebo 85°C – 85% r. v.). Předepsané napájecí napětí je mezi 5 až 50V a testovací napětí je mezi 5 až 100V. Čas testování byl stanoven dle testovací metody TM 2.6.3.7 na 72 hodin. Vzorky byly uloženy v klimakomoře, kde byla teplota 40°C a relativní vlhkost 90%. Napájecí napětí bylo nastaveno na 50V a testovací napětí bylo nastaveno na 100V. Přeměření vzorků probíhalo po šesti hodinách. Povrchový izolační odpor byl měřen pomocí elektrometru Keithley 6517A, který zároveň sloužil jako zatěžovací zdroj pro testované vzorky.

Počet a označení vzorků v průběhu experimentu pro všechny měřicí metody vyobrazuje Tab. 9. Označení pájecích profilů je vysvětleno v Tab. 8.

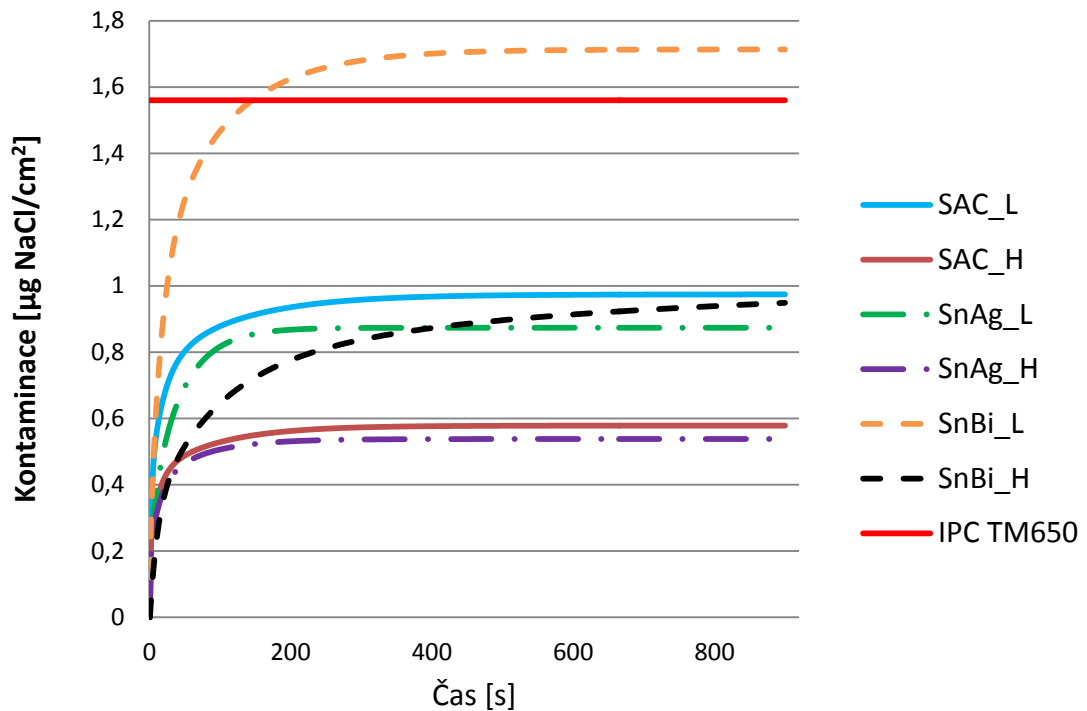
Tab. 9: Označení a počty vzorků při měření iontové kontaminace

Pájecí slitina	Teplotní profil	Měřicí metoda (počet vzorků)		
		Kontaminometr	Měření ext. výluhu	SIR
SAC	L	5	5	5
SAC	H	5	5	5
SnAg	L	5	5	5
SnAg	H	5	5	5
SnBi	L	5	5	5
SnBi	H	5	5	5

8.1.4 Analýza výsledků jednotlivých metod měření iontové kontaminace

Výsledky měření všech vzorků iontové kontaminace pomocí kontaminometru byly zprůměrovány a vyneseny do grafu (Obr. 20). V grafu je vynesena mezní povolená hodnota iontové kontaminace dle standardu IPC (1,56 $\mu\text{g NaCl}/\text{cm}^2$). Z grafu je patrné, že tuto míru překročily pouze vzorky s pájecí slitinou SnBi při použití pájecího profilu s kratší dobou a s nižšími teplotami předehřevu a samotného pájení. Překročení této meze bylo způsobeno nedostatečnou aktivací tavidla, z důvodu nižších teplot pájecího profilu. Dále z grafu lze vyčíst, že vzorky přetavené pájecím profilem označeným H dosahují nižší míry kontaminace na DPS. To lze opět přisoudit lepší aktivaci tavidla a odpaření rozpouštědel obsažených

v pájecí pastě vlivem vyšší teploty a delších časů přehřevu a samotného pájení. Rozdíl mezi pájecím profilem H a L u jednotlivých druhů past byl okolo $0,4 \mu\text{g NaCl}/\text{cm}^2$, což není zanedbatelný rozdíl. Tento fakt nepotvrdila pájecí pasta SnBi (rozdíl mezi pájecím profilem H a L byl okolo $0,7 \mu\text{g NaCl}/\text{cm}^2$), zde se však pohybujeme v odlišném rozmezí pájecích teplot, protože teplota přetavení u bismutové pájecí slitiny je pouze okolo $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Proto se zde tolik projevil rozdíl v teplotách přetavení u pájecího profilu s označením L a H.



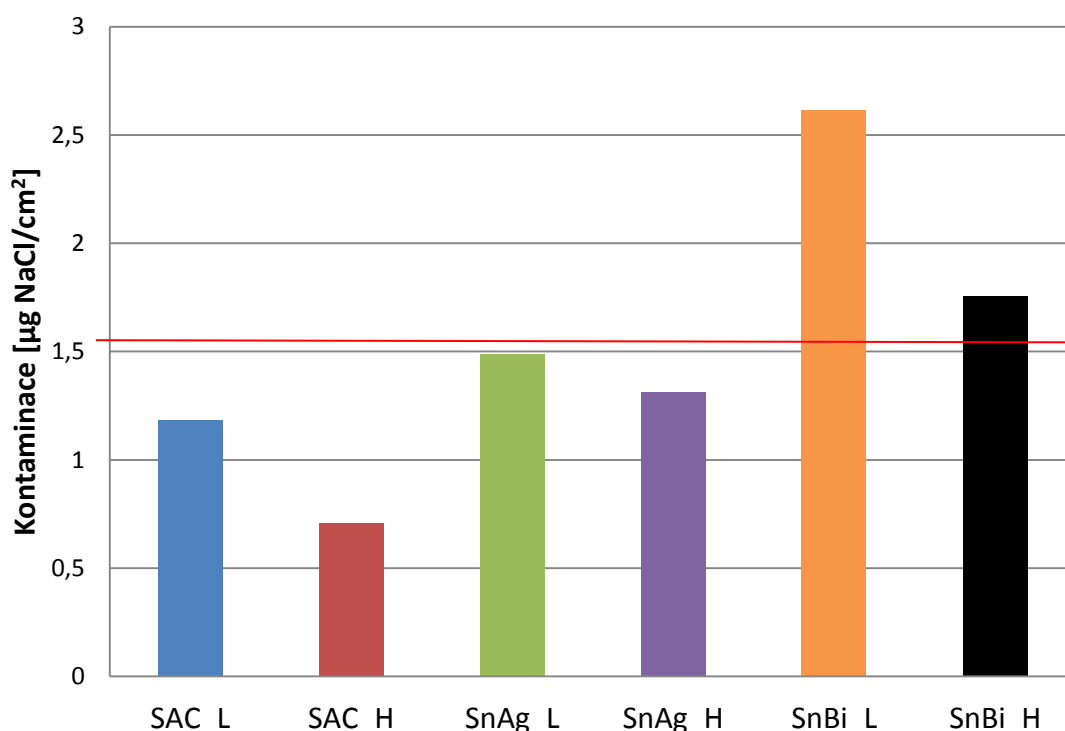
Obr. 20: Graf výsledek kontaminace DPS, měření pomocí kontaminometru

Jako druhá metoda měření iontové kontaminace byla použita metoda měření vodivosti extrakčního roztoku. V Tab. 10 jsou zaznamenány průměrné hodnoty iontové kontaminace DPS jednotlivých pájecích past. Pro posouzení zdali iontová kontaminace nepřesáhla povolenou mez dle IPC standardu je zde uvedena i maximální povolená míra iontové kontaminace. Dosažené výsledky jsou také zaznamenány v grafu na Obr. 21. Získané výsledky zcela nepotvrzují výsledky získané měřením iontové kontaminace pomocí kontaminometru. Povolenou míru dle IPC překročily pájecí pasty s označením SnBi_L a SnBi_H, což v případě předchozí měřicí metody překročila pouze pájecí pasta s označením SnBi_L. Celkově dosažené hodnoty iontové kontaminace všech vzorků, metodou měření extrakčního výluhu, byly vyšší. To je patrně způsobené odlišností měřících metod. Při měření kontaminometrem se nejprve roztok před vložením testovaného vzorku automaticky upravuje pomocí iontoměničových kolon, je přesně nastavena vodivost roztoku, což u druhé metody

není. Další nepřesnosti vznikají u přepočtu iontové kontaminace z vodivosti extrakčního roztoku a použitý konduktometr také nemá takovou přesnost ($\pm 0,01 \mu\text{S}$), které dosahuje kontaminometr ($\pm 0,001 \mu\text{S}$). Princip měřicích metod je obdobný, avšak přístrojové vybavení je odlišné, proto také vznikly odlišnosti v dosažených výsledcích. Měření iontové kontaminace pomocí vodivosti extrakčního roztoku potvrdilo rozdíl v množství iontových kontaminací jednotlivých pájecích past s využitím teplotního profilu L a H. Iontová kontaminace všech vzorků pájecích past byla nižší s využitím pájecího profilu H.

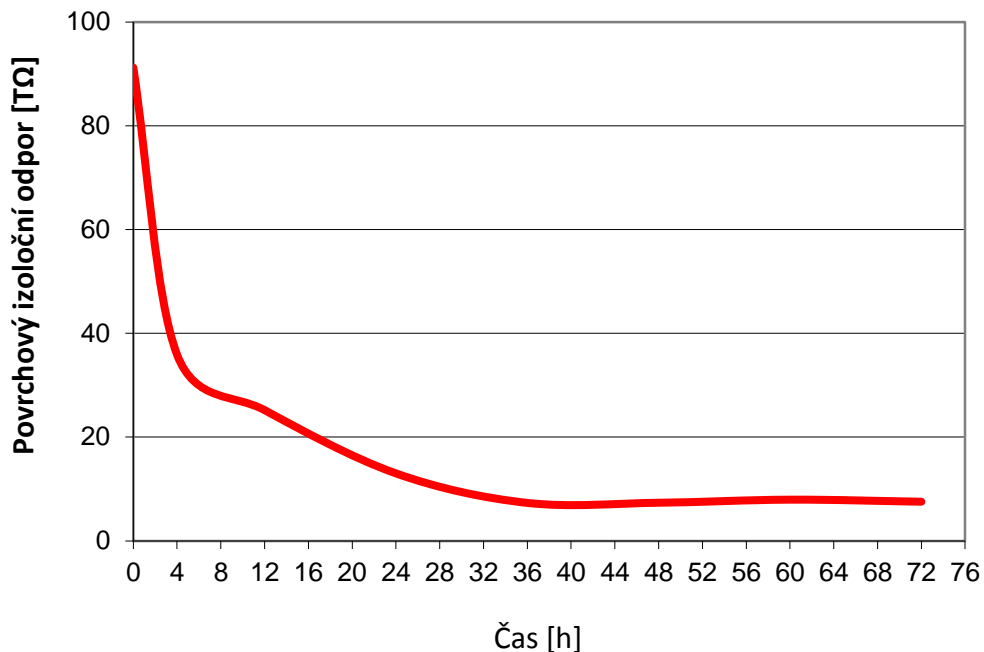
Tab. 10: Průměrná hodnota iontové kontaminace DPS měřená pomocí vodivosti extrakčního výluhu

Pájecí slitina	Iontová kontaminace DPS [$\mu\text{g NaCl}/\text{cm}^2$]
SAC_L	1,18
SAC_H	0,71
SnAg_L	1,49
SnAg_H	1,31
SnBi_L	2,61
SnBi_H	1,76
IPC TM-650	1,56



Obr. 21: Graf průměrné hodnoty iontové kontaminace DPS měřená pomocí vodivosti extrakčního výluhu

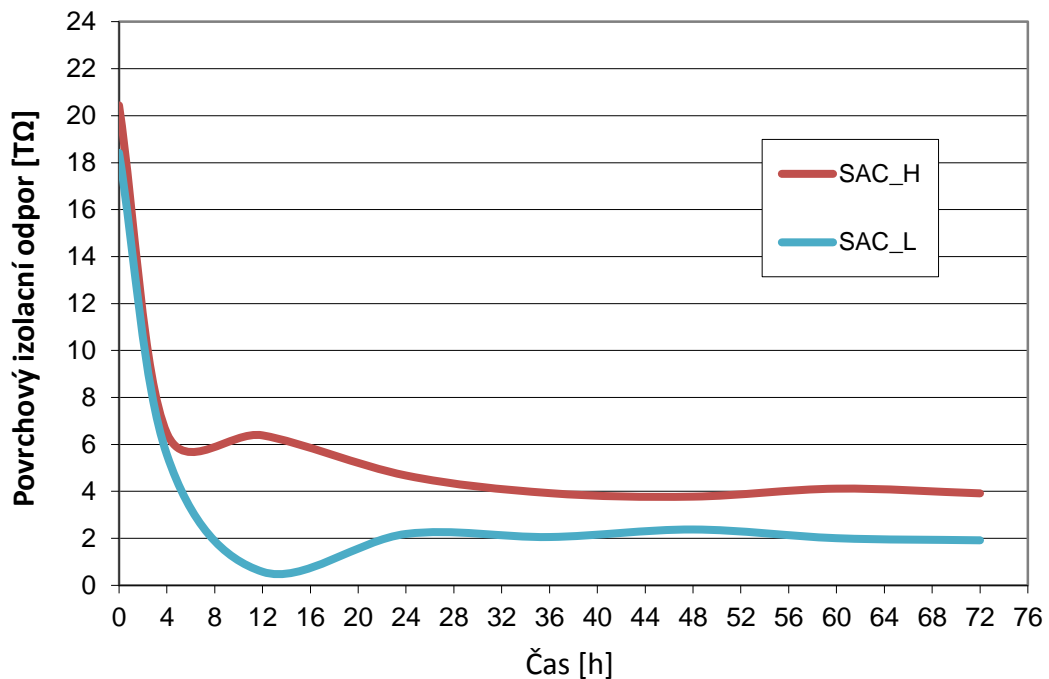
Jako poslední metoda měření množství iontové kontaminace byla zvolena metoda měření povrchového odporu (SIR). Jedná se o nepřímou měřicí metodu (viz kapitola 6.2.3), tudíž touto metodou nezjistíme přímo množství nečistot obsažených na desce. Z testu však můžeme zjistit, zdali nemůže klesnout velikost povrchového izolačního odporu na DPS v důsledku nečistot obsažených v použitých tavidlech, což by mohlo ohrozit spolehlivost celé elektronické sestavy, ve které by bylo toto tavidlo použito. Nejprve bylo provedeno referenční měření s testovacími DPS bez pájecí pasty. Tyto vzorky byly měřeny stejně jako testované desky s pájecími pastami, což bylo popsáno dříve. Hodnoty měření SIR s referenčními DPS jsou na Obr. 22. V tomto grafu je zaznamenána průměrná hodnota změny izolačního odporu z pěti referenčních DPS. Je zde patrné, že po 72 hodinách, kdy byly testované vzorky vystaveny zvýšené vlhkosti, teplotě a napájecímu napětí, klesla hodnota povrchového izolačního odporu na 7,546 T Ω . Po 28 hodinách se izolační odpor ustálil na této hodnotě a takřka se neměnil. Norma IPC TM 2.6.3.7 uvádí, že hodnota povrchového izolačního odporu nesmí klesnout pod hodnotu 1G Ω , což všechny referenční vzorky splnily.



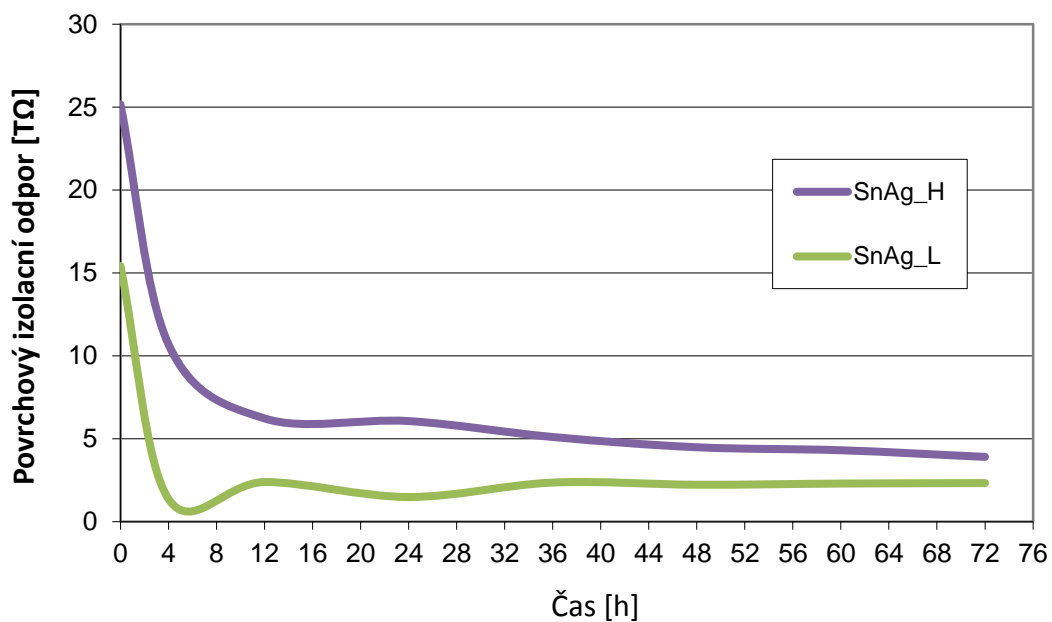
Obr. 22: Měření povrchového izolačního odporu na referenčních DPS

Dále byly měřeny vzorky s testovanými pájecími pastami s využitím pájecího profilu označeného L a H. Opět byl vypočten aritmetický průměr hodnot povrchového izolačního odporu z pěti testovaných vzorků pro každou pájecí pastu a pro každý teplotní profil. Naměřené průměrné hodnoty povrchového izolačního odporu jsou zobrazeny na Obr. 23 -

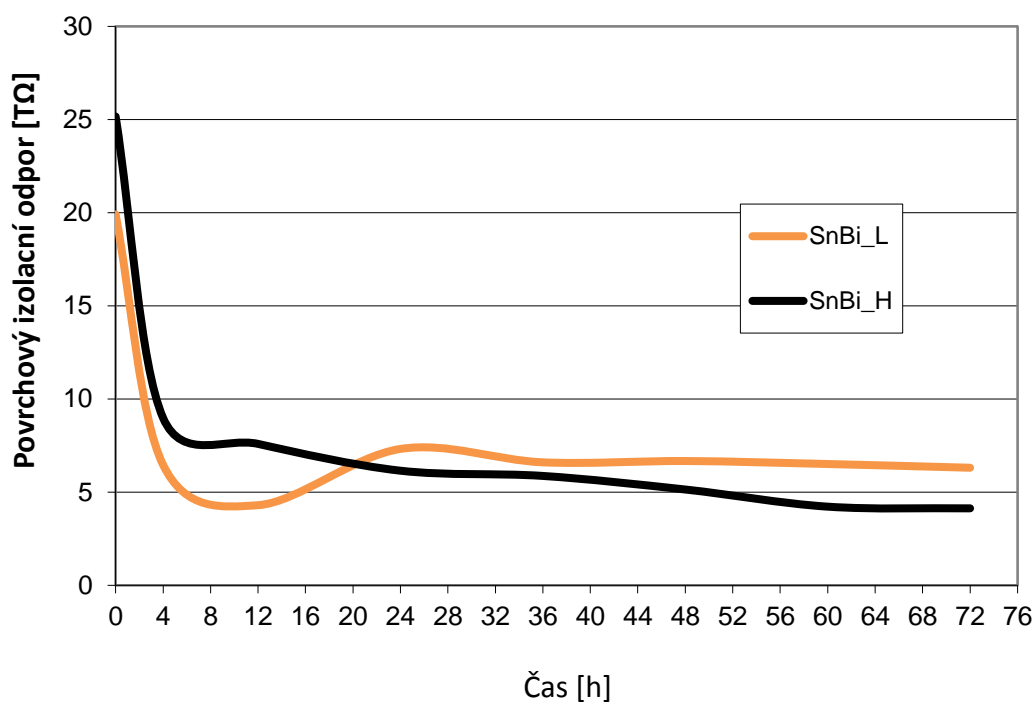
Obr. 25. Z grafů je opět vidět, že u vzorků, které byly přetaveny pájecím profilem s označením H, došlo k menšímu poklesu povrchového izolačního odporu. To je opět zapříčiněno menším množstvím nečistot na DPS. Došlo k lepší aktivaci tavidla obsaženého v pájecí pastě a k odpaření většího množství rozpouštědel obsažených v tavidle, než u vzorků přetavených pájecím profilem s označením L. Tento fakt potvrdily vzorky pájecích past SAC a SnAg. U vzorků SnBi však došlo k téměř stejnému poklesu povrchového izolačního odporu jak s využitím pájecího profilu L tak i H. Pro snazší porovnání jednotlivých pájecích past a jejich změn povrchového izolačního odporu byl v grafu vynesena pouze pokles hodnot SIR (Obr. 26 a Obr. 27).



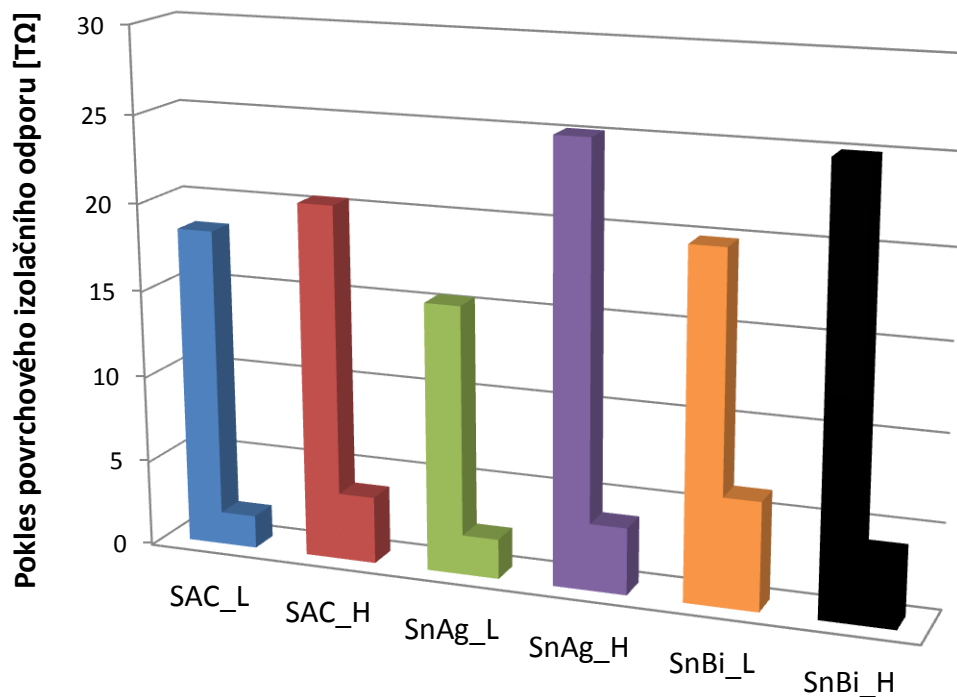
Obr. 23: Naměřené hodnoty povrchového izolačního odporu DPS s pájecí pastou SAC



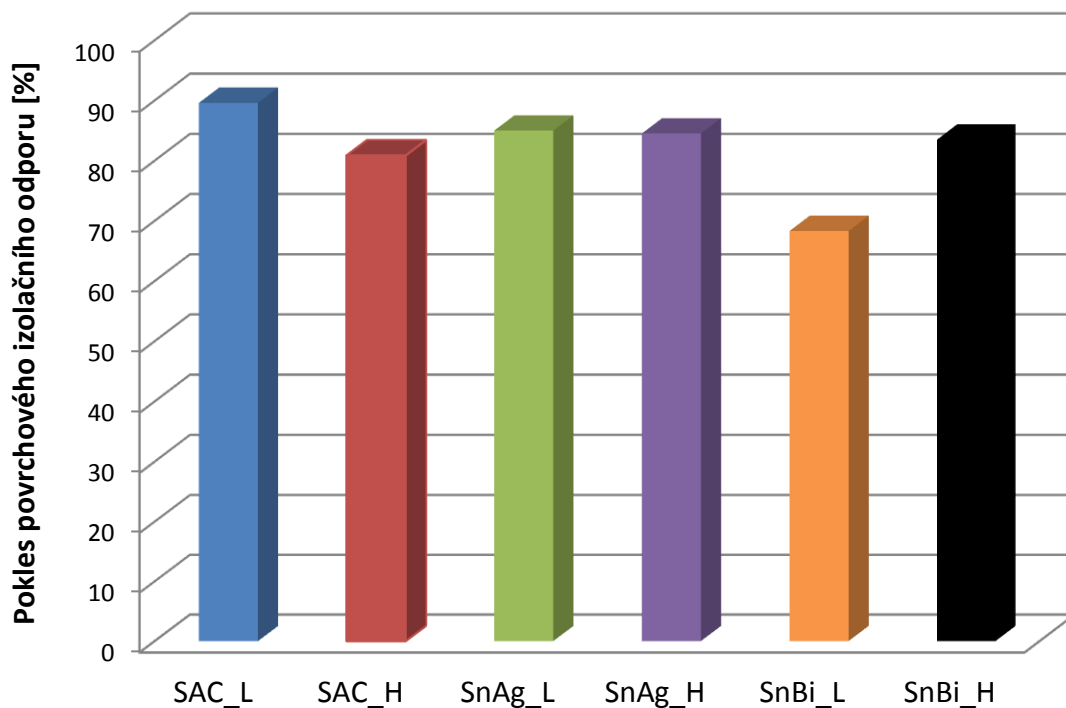
Obr. 24: Naměřené hodnoty povrchového izolačního odporu DPS s pájecí pastou SnAg



Obr. 25: Naměřené hodnoty povrchového izolačního odporu DPS s pájecí pastou SnBi



Obr. 26: Pokles povrchového izolačního odporu pro všechny pájecí pasty



Obr. 27: Procentuální pokles povrchového izolačního odporu pro všechny pájecí pasty

8.1.5 Porovnání jednotlivých použitých metod měření iontové kontaminace DPS a jejich výsledků

Jak již bylo zmíněno dříve, použité měřicí metody se dají pouze velice obtížně porovnávat, jelikož se liší jak interpretací dosažených výsledků, tak i průběhem a principem měření. Poslední použitá měřicí metoda (SIR) nám neposkytuje ani přímo množství iontové kontaminace na DPS, zato velice dobře simuluje vliv nežádoucích vnějších podmínek na DPS. To je pro sledování spolehlivosti elektronické sestavy velice důležité. První dvě měřicí metody nám poskytly výsledky obdobně v ekvivalentu $\mu\text{g NaCl}/\text{cm}^2$, ale jejich princip a přístrojové vybavení není shodné, proto i tyto výsledky není příliš relevantní porovnávat. V praxi se však můžeme setkat s použitím všech těchto tří metod.

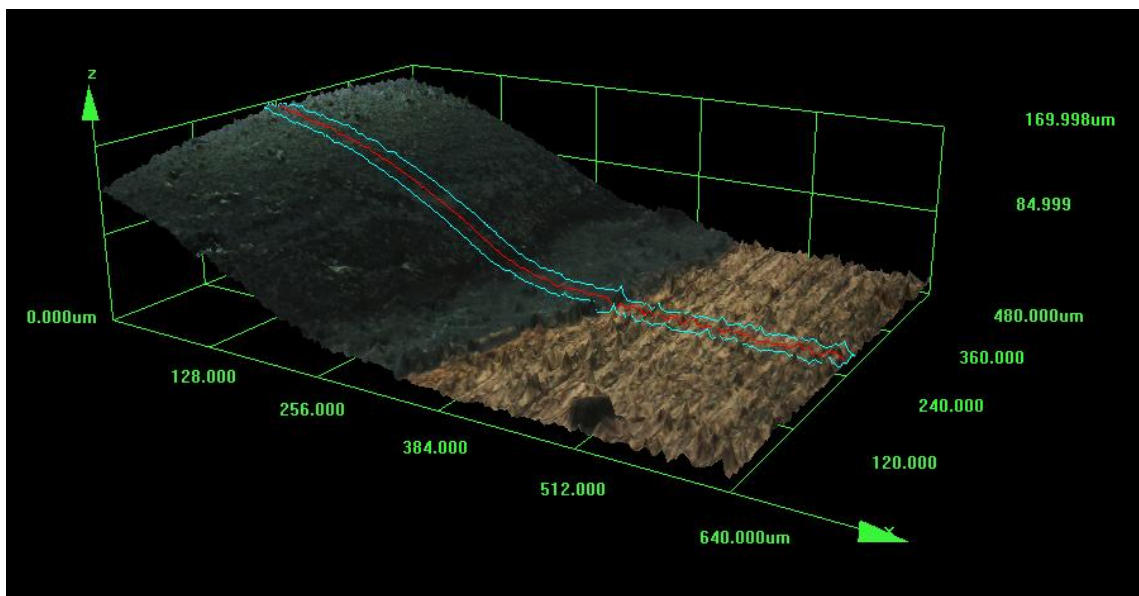
Nejpřesnější a nejrychlejší se zdá metoda měření iontové kontaminace na DPS pomocí kontaminometru. Tato metoda je snadno zařaditelná do procesu výroby, umožňuje velice rychle zjistit stav znečištění na DPS. Nejkratší měření pomocí kontaminometru umožňuje zapnutí krátkého testu a během 5 minut je znám výsledek, ale pro větší přesnost výsledků se doporučuje měření alespoň 15 minut. V tomto porovnání je metoda měření extrakčního výluhu zdlouhavější, jelikož pro relevantnost výsledků je nutné ponechat měřený vzorek v roztoku alespoň jednu hodinu. Z časového hlediska je na tom nejhůře třetí testovaná metoda (SIR), tam norma udává délku měření alespoň 72 hodin. Další nevýhodou této metody je její implementace do procesu, jelikož je nutné vložit měřené vzorky do klima komory a nechat působit vnější vlivy na DPS po delší časový úsek. Porovnání jednotlivých metod z hlediska přesnosti je velice závislé na přesnosti použitých měřicích přístrojů, v našem případě byla nejpreciznější metoda SIR a kontaminometru, ale to jen z důvodu použití ne tak přesného konduktoměru u druhé testované metody (metoda měření vodivosti extrakčního roztoku). První dvě testované metody pomáhají odhalit plošné znečištění na DPS, což přímo neumožňuje lokalizovat zdroj potenciálních problémů. Díky SIR testu je možno odhalit, kde přímo nečistoty způsobují problémy.

Abychom získali jistotu správných výsledků, ideálním stavem je metody kombinovat. Při měření iontové kontaminace v praxi je nejčastější kombinací měření kontaminometrem a SIR testem, jelikož kontaminometr nám poskytne výsledky množství iontové kontaminace a SIR test odhalí, zdali tyto iontové nečistoty jsou agresivní a mohou způsobit problémy ve spolehlivosti elektronické soustavy.

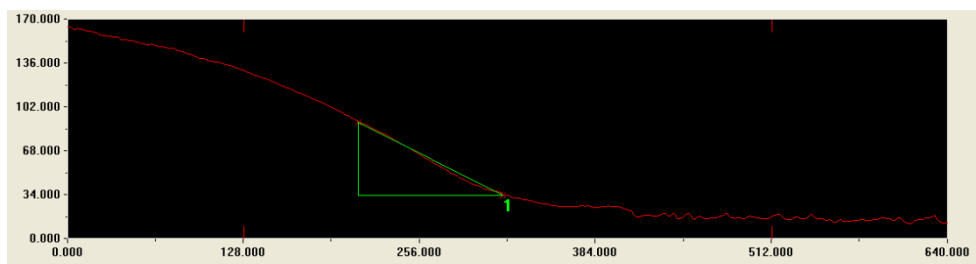
V experimentu všechny tři použité měřicí metody takřka zcela potvrdily naši hypotézu, že použitím pájecího profilu s delšími dobami a vyššími teplotami jak předehřevu, tak i samotného přetavení, lze dosáhnout snížení množství iontových kontaminací. To pro praxi může znamenat snížení nároků na čisticí proces DPS nebo na jeho úplnou eliminaci při vhodném nastavení teplotního profilu. Je však nutné ověřit, jaké další následky s sebou přinese zvýšení teplot a prodloužení časů v teplotním profilu. Ověřením těchto dopadů na celý proces pájení DPS se věnují následující kapitoly.

8.2 Vliv pájecího profilu na smáčecí úhel

Předtím, než vzorky byly testovány pomocí kontaminometru a měření SIR (viz kapitola 8.1), byl na ně aplikován test pájitelnosti metodou měření smáčecího úhlu, aby bylo zjištěno jaký vliv má pájecí profil s označením L a H na velikost smáčecího úhlu, tudíž na pájitelnost. Byly použity stejné profily a materiály jako v kapitole 8.1. Pro měření smáčecího úhlu byl využit laserový konfokální mikroskop Olympus LEXT 3000, pomocí něhož byly nasnímány 3D modely pájených spojů. Jeden z 3D modelů je zobrazen na Obr. 28. Z těchto 3D modelů byly poté naměřeny smáčecí úhly. Tyto úhly byly odečteny z 2D profilu pájeného spoje (viz Obr. 29), taktéž vytvořeného pomocí mikroskopu LEXT. Pro každý druh pájecí pasty bylo nasnímáno pět pájených spojů a pro každý spoj bylo provedeno měření v deseti bodech. Získané hodnoty byly poté zprůměrovány.



Obr. 28: 3D model pájecí slitiny SAC přetavené pomocí pájecího profilu H



Obr. 29: Odečtení smáčecího úhlu pomocí mikroskopu LEXT

8.2.1 Analýzy výsledků měření smáčecích úhlů

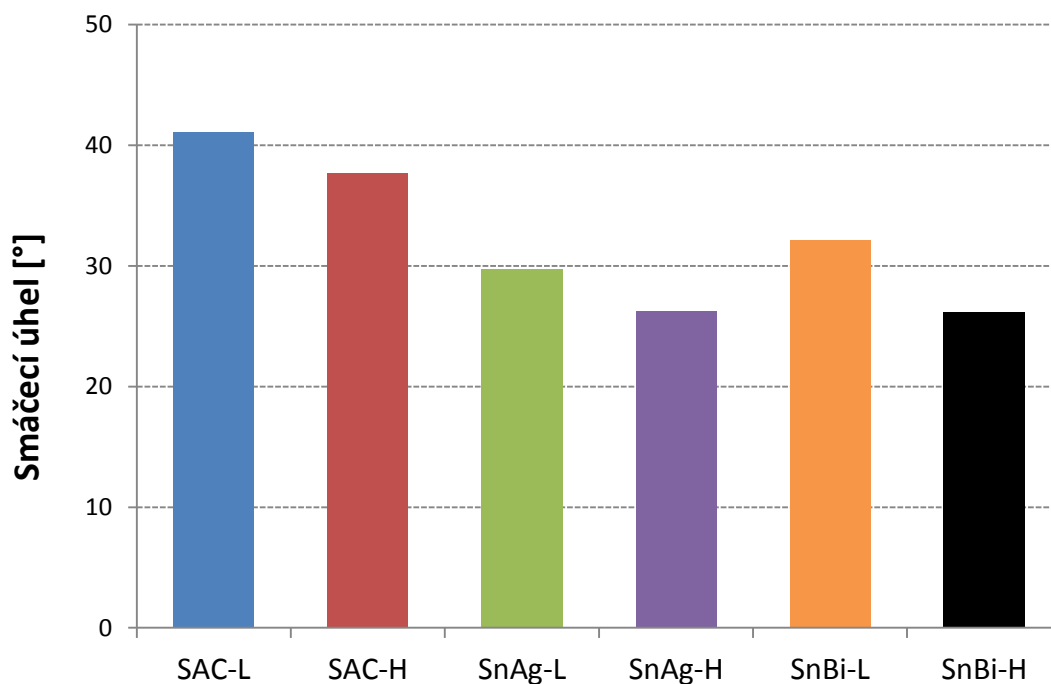
Zprůměrované hodnoty smáčecích úhlů byly vyneseny do grafu (Obr. 30). Pro větší přehlednost a klasifikaci smáčecích úhlů jednotlivých pájecích past, byla vytvořena tabulka smáčecích úhlů. Klasifikace smáčecích úhlů je zobrazena v Tab. 11, kde je jasně vidět rozpětí jednotlivých smáčecích úhlů a jednotlivé rozmezí skupin kvality pájitelnosti. V Tab. 12 jsou zaneseny průměrné velikosti smáčecích úhlů jednotlivých pájecích past.

Tab. 11: Klasifikace smáčecích úhlů [53]

Klasifikace smáčecích úhlů									
Od:	1°	11°	21°	31°	41°	51°	61°	71°	>80°
Do:	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	
Pájitelnost	Velmi dobrá					Dobrá			Špatná

Tab. 12: Smáčecí úhly jednotlivých pájecích past a jejich klasifikace

Pájecí slitina	Pájitelnost											
	Velmi dobrá						Dobrá			Špatná		
SAC_L						41,7						
SAC_H					37,7							
SnAg_L			29,7									
SnAg_H			26,2									
SnBi_L				32,1								
SnBi_H			26,1									
0° ← lepší ← 50° → horší → 80° Kontaktní úhel [°]												



Obr. 30: Velikost smáčecích úhlů jednotlivých pájecích past

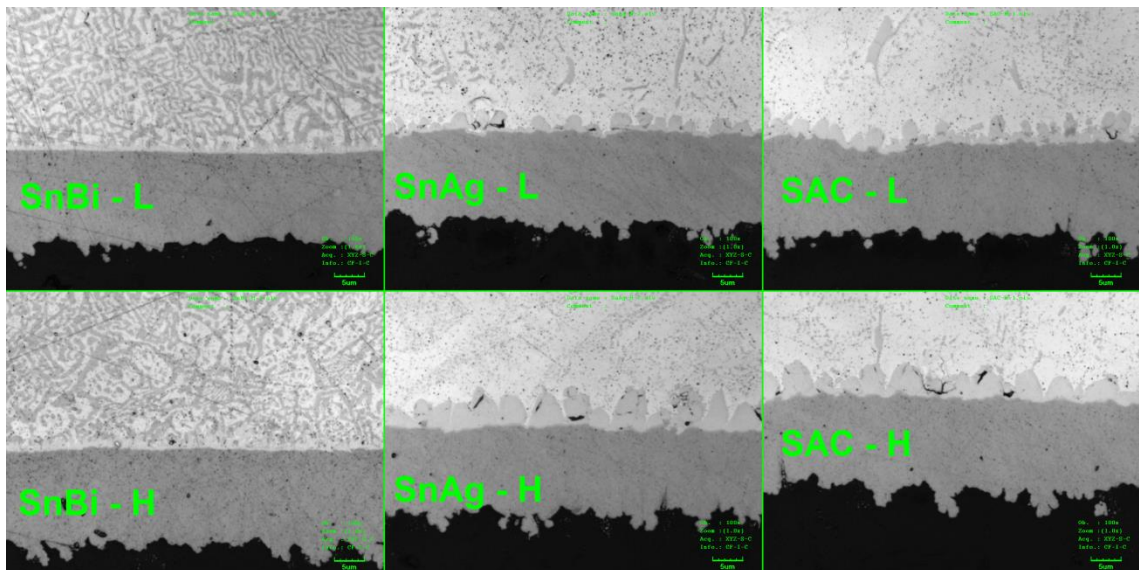
Z dosažených výsledků měření smáčecích úhlů je jasně patrné, že všechny pájecí pasty mají menší smáčecí úhel s využitím pájecího profilu s označením H. Tento fakt potvrdily všechny testované pájecí pasty. To znamená, že s využitím tohoto pájecího profilu byla pájitelnost lepší. Dle naměřených smáčecích úhlů všechny vzorky (i s pájecím profilem L) vykazovaly velmi dobrou pájitelnost, což je vidět v Tab. 12. Rozdíl ve smáčecích úhlech u pájecí pasty označené SAC v porovnání obou pájecích profilů je 8,08%. Došlo tedy ke snížení smáčecího úhlu s využitím pájecího profilu H o 8,08%. U dalších dvou testovaných past byl tento rozdíl 11,68% u pájecí pasty SnAg a 18,55% u pájecí pasty SnBi. Jak je vidět z tabulky klasifikace smáčecích úhlů (Tab. 11), rozdíl 10° je poměrně značný a může znamenat i změnu v klasifikaci pájitelnosti, např. z velmi dobré na dobrou nebo až na špatnou, záleží, v jakých hodnotách smáčecích úhlů se budeme pohybovat.

Výsledky prokázaly, že vhodnou volbou pájecího profilu a jeho nastavením je možno kladně ovlivnit jak znečištění na DPS (viz předchozí kapitoly), tak i pájitelnost a tudíž tvorbu kvalitnějších pájených spojů. S využitím pájecího profilu s delší dobou a vyššími teplotami přehřevu a samotného pájení lze snížit hodnotu smáčecího úhlu až o cca 10%.

8.3 Vliv pájecího profilu na intermetalické sloučeniny

Pro tento experiment byly použity stejné druhy pájecích past jako v předchozích kapitolách. Tyto vzorky byly opět přetaveny stejnými pájecími profily s označením L a H. Poté ze vzorků byly vytvořeny metalografické výbrusy, na kterých byla měřena tloušťka intermetalických sloučenin. Ta byla zjišťována, jelikož velice ovlivňuje především mechanické vlastnosti spoje (křehkost, pevnost ve stříhu a odolnost proti otřesům), čím je IMC tlustší, mechanické vlastnosti spoje jsou horší.

Měření probíhalo pomocí laserového konfokálního mikroskopu Olympus LEXT 3000. Intermetalické sloučeniny byly měřeny v deseti místech, ze kterých byl poté vypočítán aritmetický průměr. Nasnímané intermetalické vrstvy pro jednotlivé pájecí slitiny jsou na Obr. 31. Pro zjištění růstu intermetalických sloučenin byla část vzorků vystavena stárnutí. Po dobu jednoho roku byly vzorky skladovány při pokojové teplotě a následně byla opět měřena tloušťka intermetalické sloučeniny stejným způsobem jako u předchozích vzorků.



Obr. 31: Intermetalické sloučeniny pro jednotlivé pájecí slitiny

8.3.1 Ověření tloušťky IMC výpočtem

Pro ověření tloušťky IMC byly použity následující rovnice a hodnoty časů a teplot přetavení viz kapitola 8.1.2 Tab. 8.

Pro tloušťku vytvořené difuzní vrstvy Z po době pájení t z II. Fickova zákona platí [53][54]:

$$Z = \sqrt{Dt}, \quad (11)$$

kde Z – tloušťka IMC [m]

D – součinitel difúze [m^2s^{-1}]

t – čas [s]

Rychlost difúze i tloušťka vytvořené vrstvy závisí na nastavení pájecího procesu (teplota pájení, doba pájení, volba pájky) a na spojovaných materiálech. Ze základních rovnic difúze byla empiricky stanovena Arrheniova rovnice [54][55].

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (12)$$

kde D_0 – difúzní koeficient [m^2s^{-1}]

Q – aktivační energie růstu IMC [eV]

k – Boltzmannova konstanta $8,617 \cdot 10^{-5}$ [eVK $^{-1}$]

T – teplota [K]

Aktivační energii Q pro růst IMC na rozhraní Cu–Sn byla stanovena pomocí vyhodnocení Arrheniova grafu $\ln(D)$ proti $1/T$. Z těchto hodnot byla stanovena aktivační energie Q a difúzní koeficient D_0 pro mezifázový růst IMC CuSn v povrchově montovaném pájeném spoji jako $Q \sim 1,09$ eV a $D_0 \sim 1,61 \cdot 10^{-4}$ m^2s^{-1} [53][54]. Po dosazení číselných hodnot do uvedených vzorců jsme dostali vypočtené velikosti IMC pro jednotlivé pájecí pasty a jejich mezní hodnoty (času a teploty přetavení viz Tab. 8). Vypočtené hodnoty IMC jsou uvedeny v následující

Tab. 13: Hodnoty vypočtených tlouštěk IMC pro jednotlivé pájecí pasty

Pájecí pasta	SAC_L	SAC_H	SnAg_L	SnAg_H	SnBi_L	SnBi_H
IMC [μm]	2,73	5,04	2,41	5,39	0,32	0,85

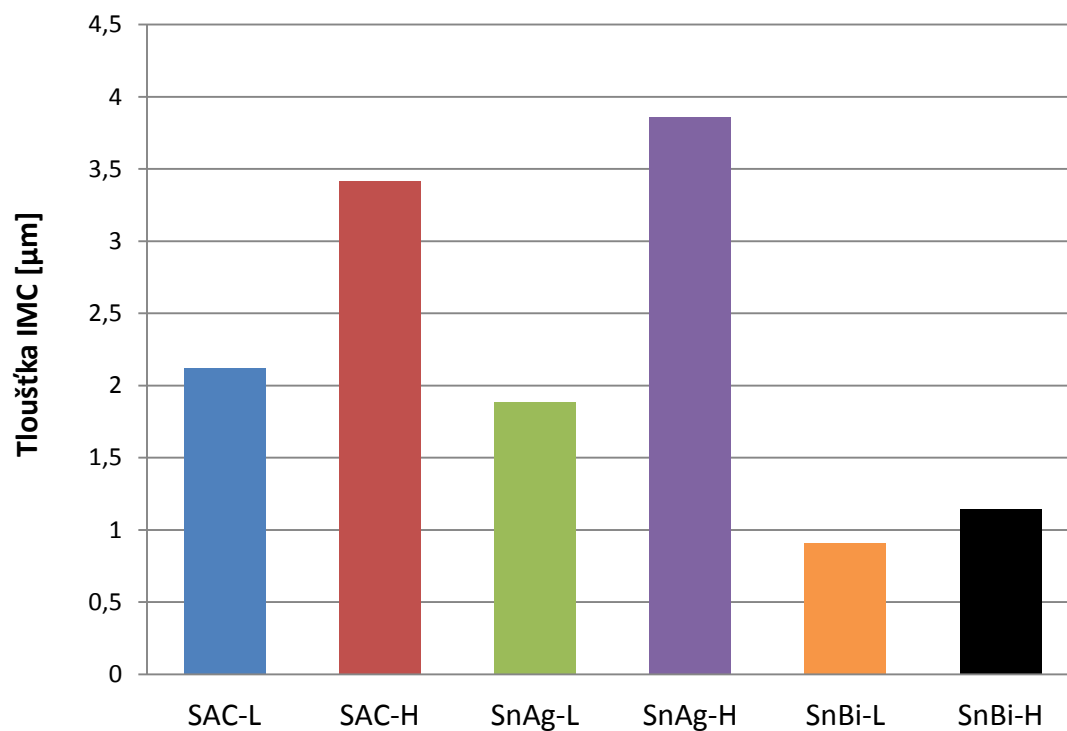
8.3.2 Analýzy výsledků měření tloušťky intermetalických sloučenin

Průměrné hodnoty naměřených tlouštěk intermetalických sloučenin byly vyneseny do grafu (Obr. 32), kde jsou IMC po přetavení. Dále byl vytvořen graf (Obr. 33), kde jsou vyobrazeny rozdíly mezi IMC a IMC po ročním stárnutí za pokojových podmínek. Z grafu (Obr. 32) je patrné, že při přetavením testovaných vzorků pájecím profilem s označením L, byla vrstva IMC nižší než u vzorků přetavených teplotním profilem označeným H. Nejvyšší rozdíl u tloušťky IMC byl naměřen u pájecí slitiny SnAg, kde byl naměřen rozdíl cca 2 μm . U

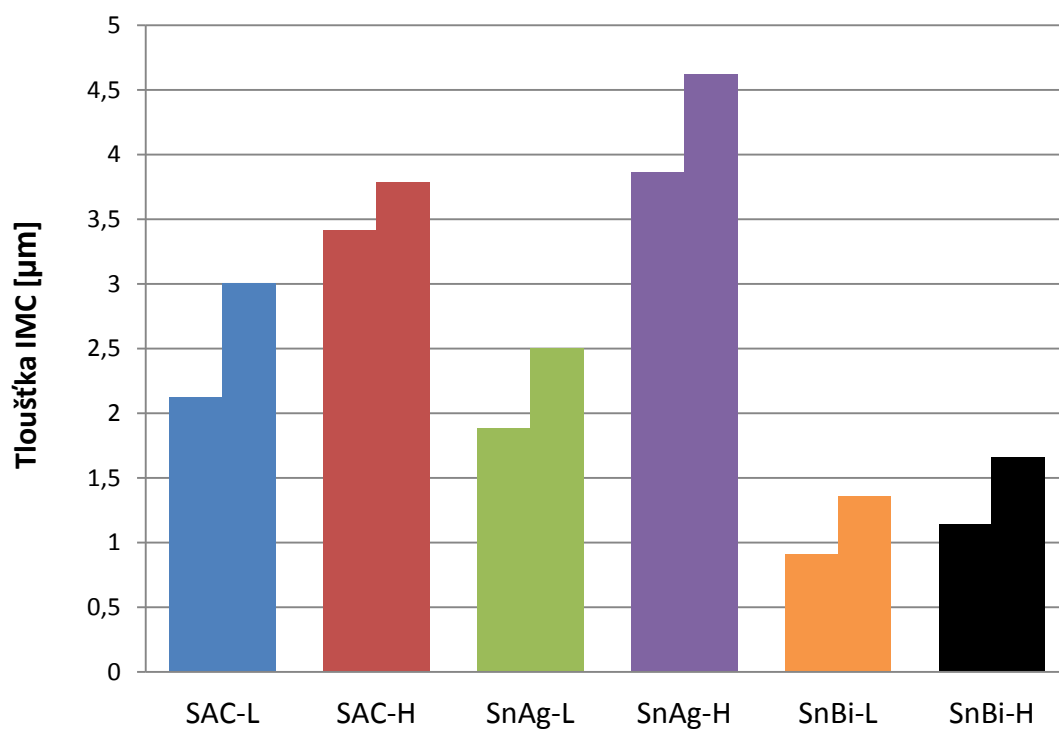
všech testovaných vzorků se potvrdil předpoklad, že s využitím teplotního profilu, s vyšší teplotou tavení a přehřevu a delšími časy, bude tloušťka IMC vyšší. U vzorků s pájecí slitinou SnBi nebyl rozdíl v tloušťkách IMC tak markantní, což bylo způsobeno nižšími teplotami, které jsou značně odlišné od teplot používaných u zbývajících dvou pájecích slitin. Jak již bylo zmíněno, tloušťka IMC může značně působit na dlouhodobou spolehlivost pájených spojů, proto je při volbě nastavení pájecího profilu nutno brát toto hledisko v potaz.

Z analýzy stárnutých vzorků je patrné, že tloušťka po roce skladování pájených spojů při pokojové teplotě, vzrostla v průměru všech testovaných vzorků cca o 1 μm , což není zanedbatelná hodnota, jelikož (jak ukazují další studie [36]), při zvýšení teplotních podmínek tloušťka IMC roste ještě rychleji, a tudíž je ovlivněna spolehlivost celé elektronické sestavy ještě více. [47].

V porovnání naměřených velikostí vrstvy IMC a vypočtených hodnot (viz kap. 8.3.1), nám vyšly vypočtené hodnoty cca o 20% vyšší než naměřené hodnoty. Toto tvrzení potvrzují pájecí pasty s označením SAC a SnAg, ne však pájecí pasta SnBi, kde byl rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami ještě vyšší. Tyto rozdíly byly způsobeny vznikem nepřesností při měření IMC pomocí laserového konfokálního mikroskopu Olympus LEXT 3000, kde nasnímané fotografie byly podrobeny analýze v deseti vybraných bodech a poté byl z těchto naměřených hodnot vypočten aritmetický průměr. Jelikož vrstva IMC není kompaktní, ale její velikost se při Cu povrchu značně mění, je obtížné vybrat vhodná místa pro měření tloušťky IMC, proto vznikly rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami. Při porovnání hodnot s jinými studiemi [36], kde byly měřeny velikosti IMC za obdobných podmínek, hodnoty byly takřka totožné. Autor zmíněné studie Tomáš Novák [36] uvádí, že pájený spoj s těmito velikostmi vydrží mechanické namáhání do $F_{\text{max}} = 90[\text{N}]$, své tvrzení dokládá experimenty na testovaných rezistorech o velikosti pouzdra 1206.



Obr. 32: Tloušťka IMC jednotlivých pájecích slitin po pájení

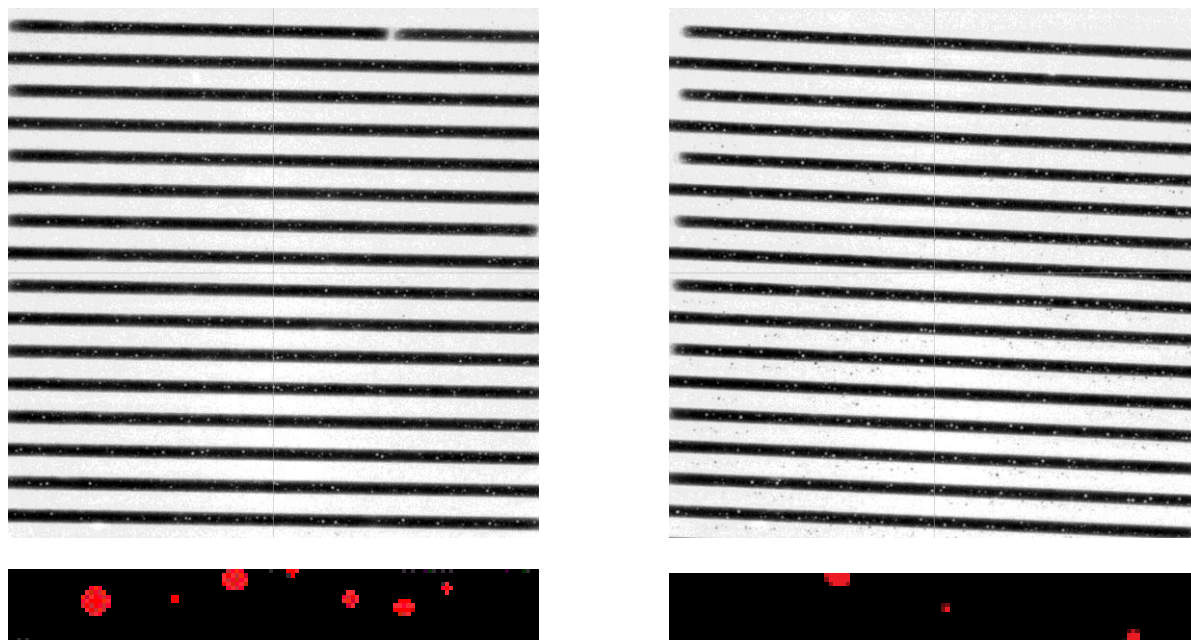


Obr. 33: Rozdíl v tloušťce IMC po pájení a po ročním stárnutí

8.4 Vliv pájecího profilu na tvorbu dutin v pájeném spoji

Přetavené vzorky byly zrentgenovány a pořízené fotografie byly analyzovány na přítomnost dutin (voidů) v pájce. Jelikož množství dutin v pájeném spoji může negativně působit na spolehlivost pájeného spoje. Převážně na jeho mechanické vlastnosti, které se s přibývajícím množstvím voidů ve spoji snižují.

K analýze byl použit software ImageJ. V softwaru byla nejprve z fotografie vybrána pozorovaná oblast (u všech vzorků shodná), která byla poté zvětšena na 400 %, a byl upraven jas, aby byl eliminován okolní šum. Software poté vyhodnotil barevnost jednotlivých pixelů a zobrazil výslednou plochu světlejších pixelů, což reprezentuje plochu voidů v pájené oblasti. Pro všechny vzorky byly nastaveny shodné podmínky v softwaru, aby výsledky nebyly zkresleny. Pro jednotlivé pájecí slitiny byly zrentgenovány 3 vzorky, na kterých proběhlo měření v pěti oblastech. Z naměřených hodnot byl vypočítán průměr. Na Obr. 34 je v horní části nalevo fotografie zrentgenovaného vzorku pájecí slitiny SAC, přetaveného teplotním profilem označeným L, a napravo je vzorek SAC přetavený teplotním profilem H. Pod těmito fotografiemi je vyobrazena analyzovaná část v softwaru ImageJ s vyznačením oblasti voidů (červená barva), z níž software vypočítal procentní plochu z měřené oblasti.



Obr. 34: Fotografie zrentgenovaného vzorku SAC_L a SAC_H, ve spodní části měřená oblast s vyznačením voidů (červená plocha)

8.4.1 Analýza výsledků měření plochy dutin v pájeném spoji

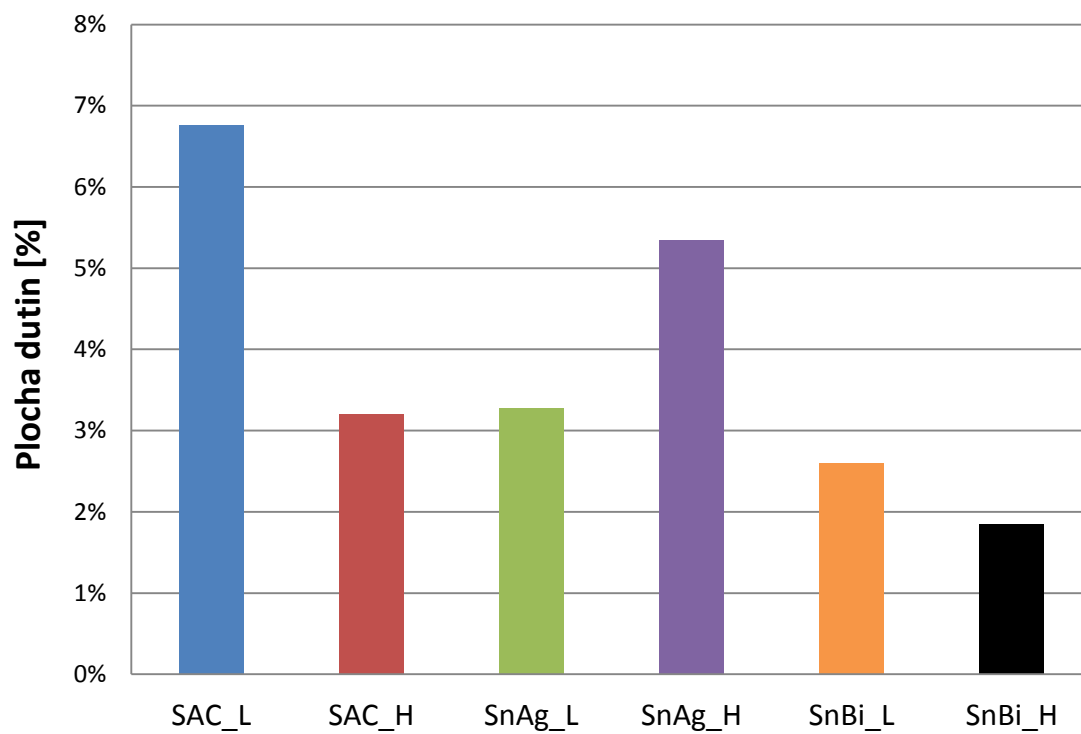
Z průměrných hodnot naměřené plochy dutin ve spoji (Tab. 14) byl vytvořen graf (Obr. 35) jednotlivých pájecích slitin s odpovídajícím teplotním profilem. Z grafu je patrné, že při použití teplotního profilu s označením H, bylo množství voidů v pájené oblasti nižší, než tomu bylo u pájecího profilu s označením L. Tyto výsledky byly potvrzeny u pájecích slitin s označením SAC a SnBi. U pájecí slitiny SnAg se tento vliv teplotního profilu na množství dutin v pájené oblasti nepotvrdil. To bylo způsobeno nejmenším rozdílem teplot v oblasti přetavení a obsahem aktivnějšího tavidla, než je obsaženo v pájecí slitině SAC.

Nejvyšší rozdíl v naměřené ploše dutin ve spoji byl u pájecí slitiny SAC, kde došlo ke snížení plochy dutin ve spoji o 3,6% s využitím teplotního profilu s označením H. Tento teplotní profil byl nastaven na vyšší teplotu přehřevu a jeho delší trvání, což způsobilo dostatečné aktivování tavidla a odpaření všech rozpouštědel v tavidle obsažených. Proto se v pájené oblasti neobjevilo takové množství dutin.

Celkové nejmenší množství dutin v pájené oblasti vykázala pájecí slitina s označením SnBi. Tato pájecí slitina, obsahující bismut, má však rozdílné teplotní rozmezí hodnot, jak přehřevu, tak i samotného přetavení. Je nutno také zmínit, že tato pájecí slitina obsahovala nejaktivnější tavidlo. Předpokládalo se (viz kap. 5.2 Dutiny v pájeném spoji), že z tohoto důvodu bude míra dutin ve spoji vyšší, jelikož pájecí slitina obsahuje vyšší množství aktivátorů. To se však nepotvrdilo, patrně z důvodu využití dlouhé doby přehřevu teplotního profilu.

Tab. 14: Naměřená plocha dutin ve spoji pro jednotlivé pájecí slitiny

Pájecí slitina	Vzorek 1 Průměr z pěti oblastí	Vzorek 2 Průměr z pěti oblastí	Vzorek 3 Průměr z pěti oblastí	Průměr
SAC_L	4,71%	8,60%	6,96%	6,76%
SAC_H	3,71%	3,11%	2,77%	3,20%
SnAg_L	2,32%	2,72%	4,78%	3,27%
SnAg_H	3,15%	6,91%	5,95%	5,34%
SnBi_L	4,03%	1,87%	1,90%	2,60%
SnBi_H	3,15%	0,88%	1,49%	1,84%



Obr. 35: Plocha dutin ve spoji jednotlivých pájecích slitin

8.5 Vyhodnocení všech faktorů ovlivňující pájený spoj a jeho spolehlivost při změně teplotního profilu

Hodnocenými parametry ovlivňující pájený spoj při změně teplotního profilu, byly kontaminace DPS, smáčecí úhel, velikost intermetalických vrstev a plocha dutin obsažených v pájecí ploše. Jelikož míra kontaminace na DPS se obtížněji stanovuje a existuje několik metod jejího měření, byly vybrány tři odlišné metody měření a jejich výsledky byly zprůměrovány a poté zahrnuty do celkového hodnocení. Pro každý ovlivňující parametr byla zjišťována hodnota při použití teplotního profilu s označením L a H. Získané hodnoty je možno vidět v Tab. 15. Hodnoty v políčku „zlepšení x zhoršení“ jsou vztaženy ke změně teplotního profilu L k H. Tudiž, když došlo např. ke snížení kontaminace při použití H profilu oproti L profilu, v tabulce je vyznačena procentní změna kontaminace, a jelikož došlo ke zlepšení hodnoty, je políčko vyplněno zelenou barvou (v případě zhoršení červeně). Z hodnot je patrné, že na některé parametry měla změna teplotního profilu větší vliv než na ostatní. To se projevilo ve větší rozdílnosti hodnot jednotlivých parametrů pro teplotní profil L a H. Nejmenší procentní rozdíl jednotlivých parametrů u všech testovaných past byl zaznamenán u smáčecích úhlů. Je tedy možno konstatovat, že změna teplotního profilu smáčecí úhel ovlivňuje, ne však v takové míře. Ze získaných dat je vidět, že změna teplotního profilu nejvíce ovlivnila míru kontaminace na DPS (viz Tab. 15 řádek Suma Δ) u všech testovaných pájecích past.

Změna teplotního profilu z L na H kladně působila na hodnocené parametry. Iontová kontaminace DPS, smáčecí úhel a míra dutin v pájené oblasti. To se potvrdilo téměř u všech testovaných past (s výjimkou měření SIR u pájecí pasty s označením SnBi a u měření voidů u pájecí pasty s označením SnAg). Negativně změna působila na velikost intermetalické vrstvy, která se u všech vzorků pájecích past zvýšila.

Celkový procentní vliv teplotního profilu na hodnocené parametry je vidět v Tab. 16. Hodnoceny byly procentní změny parametrů u jednotlivých pájecích past (kontaminace je průměrem ze tří měřících metod). Z tabulky je patrné, že změna teplotního profilu kladně působila u testované pájecí pasty s označením SAC a SnBi. Oproti tomu u pasty SnAg došlo ke zhoršení, hlavně u parametrů velikosti intermetalických vrstev a míry dutin v pájené oblasti.

Tab. 15: Parametry ovlivňující pájený spoj při změně teplotního profilu

Pájecí pasta	Teplotní profil	Měření iontové kontaminace (metoda)						Smáčecí úhel [°]	IMC [μm]	Voidy [%]							
		Kontaminometr [μg NaCl/cm ²]		Vodivost ext. Výluhu [μg NaCl/cm ²]		SIR [TΩ]											
		Mezní hodnoty dle IPC															
		1,56 [μg NaCl/cm ²]		1,56 [μg NaCl/cm ²]		<1000 MΩ						>90[°]		-		>25%	
		Hodnota	Zlepšení (zelená) x zhoršení (červená) [%]	Hodnota	Zlepšení (zelená) x zhoršení (červená) [%]	Hodnota	Zlepšení (zelená) x zhoršení (červená) [%]					Hodnota	Zlepšení (zelená) x zhoršení (červená) [%]	Hodnota	Zlepšení (zelená) x zhoršení (červená) [%]	Hodnota	Zlepšení (zelená) x zhoršení (červená) [%]
SAC	L	0,974		1,18		1,915		41,7		2,119		6,76%					
SAC	H	0,578	40,66	0,71	39,83	3,915	51,09	37,7	9,59	3,414	37,93	3,20%	52,66				
SnAg	L	0,876		1,49		2,32		29,7		1,886		3,27%					
SnAg	H	0,538	38,58	1,31	12,08	3,9	40,51	26,2	11,78	3,86	51,14	5,34%	38,76				
SnBi	L	1,713		2,61		6,31		32,1		0,906		2,60%					
SnBi	H	0,928	45,83	1,76	32,57	4,13	34,55	26,1	18,69	1,144	20,8	1,84%	29,23				
Suma Δ			125,07		84,48		126,15		40,06		109,87		120,65				

Tab. 16: Celkové procentní zhodnocení vlivu jednotlivých parametrů na změnu pájecího profilu

	Kontaminace [%]	Smáčecí úhel [%]	IMC [%]	Voidy [%]	Celkem [%]
SAC	43,86	9,59	37,93	52,66	68,18
SnAg	30,39	11,78	51,14	38,76	-47,73
SnBi	14,62	18,69	20,80	29,23	41,74

V celkovém hodnocení došlo k největšímu ovlivnění parametrů u pájecí pasty s označením SAC, kde změnou teplotního profilu bylo dosaženo celkové procentní zlepšení v podobě 68%. Jelikož se jedná o jednu z nejpoužívanějších bezolovnatých pájecích slitin, toto zjištění může napomoci při optimalizaci pájecího profilu mnoha výrobcům elektroniky.

Ze získaných výsledků je nutné si uvědomit, že změnou teplotního profilu je možno značně ovlivnit jednotlivé parametry působící na spolehlivost pájeného spoje. Je však nutné brát v potaz, o jakou pájecí slitinu se jedná, a také je nutné zohlednit použité tavidlo. Jelikož jak se podařilo prokázat, na různé druhy pájecích slitin a tavidel působí změna teplotního profilu odlišně. V některých případech může zvýšení teplot a časů přehřevů a samotného pájení přinést zlepšení (např. míry kontaminace a smáčecích úhlů), ale mohou se oproti tomu zhoršit mechanické vlastnosti spoje v podobě zvětšení intermetalických vrstev. Proto je nutné všechny parametry důkladně zhodnotit a teplotní profil nastavit tak, aby byl kompromisem všech ovlivňujících parametrů. Experiment ukazuje, že námi zvolená optimalizace pájecího procesu přináší největší úskalí v podobě větších tloušťek IMC. Ale jak bylo zmíněno v kap. 8.3.2 velikosti intermetalických vrstev v porovnání s ostatními studii [36], kde velikost vrstev byla obdobná, avšak po testech mechanické pevnosti tyto spoje vykazovaly mechanickou pevnost o velikosti maximální síly okolo 90 [N] pro rezistory o velikosti pouzdra 1206. Tyto hodnoty mechanické pevnosti jsou dostatečné. Otázkou je, jak se bude měnit IMC v průběhu stárnutí elektronické soustavy, a jaká bude mechanická pevnost spoje v průběhu jeho života.

Popsaný rozsáhlý experiment byl proveden pro krajní meze nastavení teplotního profilu pro doby a teploty, jak přehřevu, tak samotného přetavení, které doporučuje výrobce pájecí pasty. Na základě získaných výsledků a skutečností byla vytvořena metodická interní směrnice (viz příloha) pro nastavování pájecích profilů, která byla implementována ve

společnosti Integrated Micro-Electronics Czech Republic [56]. Tato firma se specializuje na osazování desek plošných spojů pro automobilový průmysl a průmyslovou techniku. Firma je součástí mezinárodní skupiny Integrated Micro-Electronics Inc. (IMI), která se věnuje vývoji, výrobě a prodeji elektronických komponentů pro různá průmyslová odvětví působící v 17 zemích. Firma Integrated Micro-Electronics Czech Republic provozuje čtyři kompletní SMT linky, kde jsou desetizónové přetavovací pece od firmy Heller. Pro tyto pece a používanou pájecí pastu SAC305 od firmy Kester, byla uzpůsobena interní směrnice (viz příloha) pro nastavování pájecích profilů, aby napomohla procesním inženýrům SMT v nastavování teplotních profilů.

9 Experimentální část 2

Jako dílčí cíl této disertační práce bylo objasnit hypotézu, zdali je vhodné pájecí pasty s označením no-clean (pasty, které není nutné po pájení čistit) po přetavení podrobovat čistícímu procesu. Tato hypotéza je aktuální, protože výrobci elektronických zařízení v dnešní době nejsou v této problematice jednotní [8].

Do roku 1987 se veškeré DPS čistily po pájení (98%) a nepoužívaly se no-clean technologie. Posléze výrobci začínají používat no-clean technologie a od čištění se zcela upouští. V dalších letech se někteří výrobci uchylují k mytí no-clean technologií a těchto výrobců postupně přibývá. V roce 2005 již 40% výrobců své výrobky podrobuje procesu čištění a v dnešní době je to až 50% z nich, co své výrobky s no-clean pájecími pastami čistí po pájení. Z toho vyplývá, že dnes není přesně známo, zda je nutné no-clean tavidla odstranit po pájení nebo nikoliv. V dnešní době miniaturizace je kladen mnohem větší důraz na čistotu DPS, než tomu bylo např. před dvaceti lety. Je to např. z důvodu používání ochranných laků, převážně v automobilovém průmyslu. Před aplikací laku je totiž nutné, aby DPS byla zbavena všech nečistot. Dalším důvodem je větší hustota spojů na DPS a používání menších součástek. V těchto zmíněných elektronických sestavách může znečištění na DPS způsobit celou řadu defektů, které jsou zmíněny v kapitole 6. Z těchto důvodů byl navržen následující experiment, který odpoví na otázku, zda je nutné no-clean tavidla odstraňovat po pájení, popřípadě jak správně nastavit čistící proces.

9.1 *Vliv čištění no-clean pájecích past na iontovou kontaminaci DPS*

Pro experiment byly vybrány shodné pájecí pasty a testovací DPS jako v předchozím experimentu (všechny pájecí pasty byly označeny od výrobce jako no-clean) a na přetavené vzorky byl následně aplikován čistící proces s různými druhy oplachů. Poté byla zjišťována opět míra znečištění na vzorcích, a to třemi různými metodami (viz 9.1.3).

Čištění probíhalo pomocí ultrazvukové čistící lázně s teplotou čistícího media 60 °C po dobu 10 minut. Čistící oplachy, které byly testovány, jsou v Tab. 17. Pro porovnání účinnosti jednotlivých oplachů a následné kontaminace DPS byly měřeny i vzorky, na kterých nebyl aplikován žádný z oplachů. Tyto vzorky jsou označeny pouze značením teplotního profilu (např. SAC_L – nečištěný vzorek).

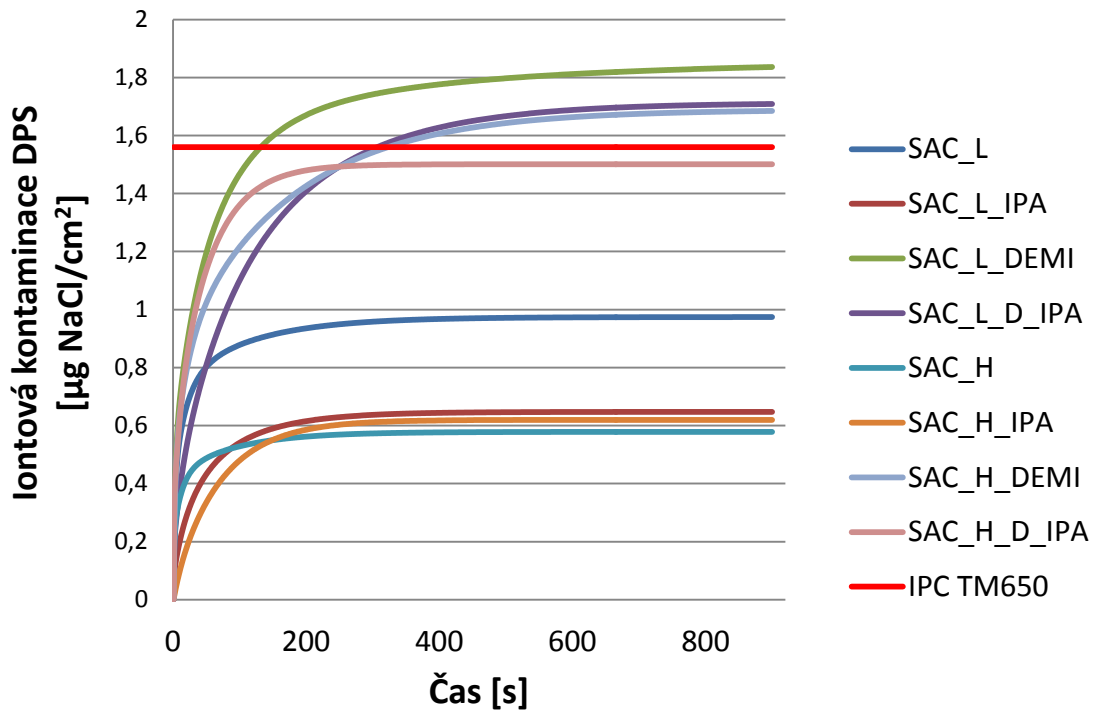
Tab. 17: Označení a druhy oplachů

Označení oplachu	Oplach
DEMI	Demineralizovaná voda
D_IPA	Demi. voda 50% a 50% izopropylalkohol
IPA	100% izopropylalkohol

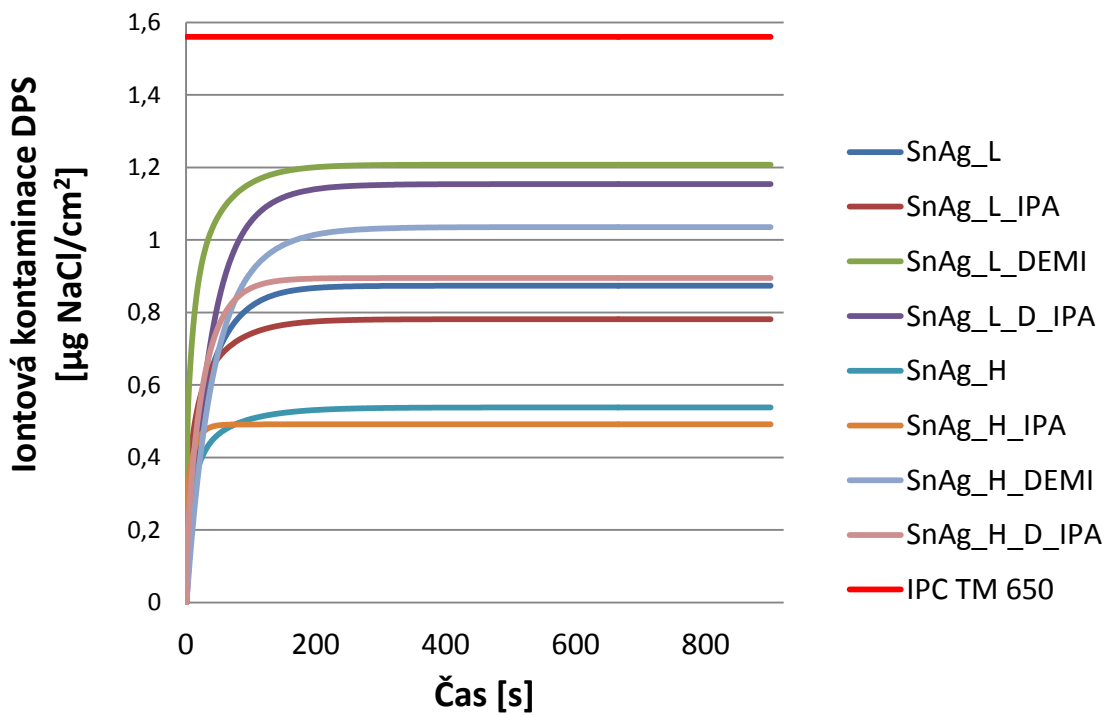
Vzorky pájecích past byly přetaveny, stejně jako v předcházejícím experimentu, teplotními profily s označením L a H. Označení vzorků bylo tedy nejprve: pájecí pasta, poté pájecí profil a naposledy označení oplachu (např. SAC_L_DEMI – vzorek pájecí pasta SAC, přetavený teplotním profilem L a čištěn oplachem DEMI). Pro každý oplach bylo testováno pět vzorků (celkově 120 vzorků).

9.1.1 Analýza výsledků čištění DPS s no-clean pájecími pastami - měřené kontaminometrem

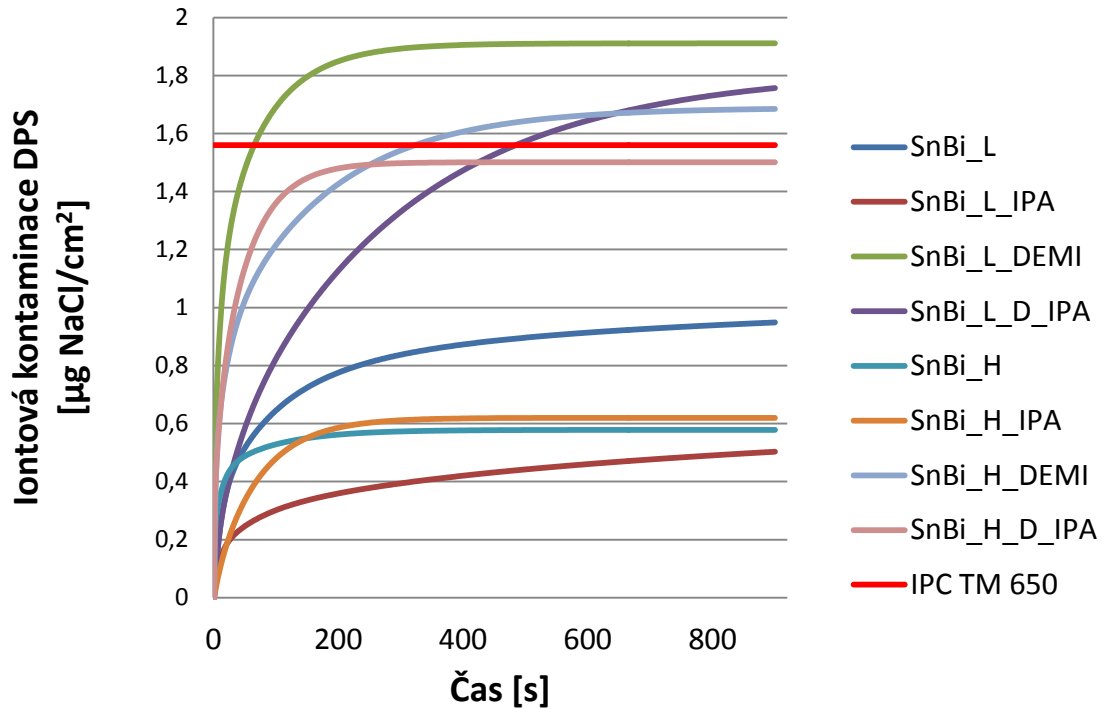
Z naměřených výsledků iontové kontaminace, měřené pomocí kontaminometru, byly vytvořeny grafy pro jednotlivé pájecí pasty a odpovídající oplachy (Obr. 36, Obr. 37, Obr. 38). Z grafů je vidět, že odlišné oplachy, při použití shodného nastavení čistícího procesu, působí na iontovou kontaminaci na DPS odlišně. Opět se potvrdil i vliv teplotního profilu na množství iontové kontaminace na DPS, který byl předmětem zkoumání v předchozím experimentu. Jak je vidět např. u pájecí pasty SAC s tavidlem ROL 0, zvolením nevhodného oplachového media může dojít k překročení míry povoleného množství iontových nečistot na DPS, které stanovuje norma IPC TM650. Překročení této meze bylo naměřeno u vzorků s použitím oplachu demineralizovanou vodou a roztoku 50% demineralizované vody a 50% izopropylalkoholu. U těchto oplachů došlo k téměř dvojnásobnému nárůstu iontových nečistot na DPS, než tomu bylo u vzorků bez oplachu. Toto zhoršení způsobilo narušení povrchu no-clean tavidla, ale už ne jeho celkové odstranění. Narušení povrchu mělo za následek uvolnění a rozplavení nečistot po povrchu DPS, a tím se míra iontové kontaminace zvýšila. Při zjišťování iontové kontaminace pomocí kontaminometru se jevil jako nejhorší použitý oplach „demineralizovaná voda“, v kombinaci s teplotním profilem označeným L, což bylo ověřeno u všech vzorků.



Obr. 36: Iontová kontaminace DPS s pájecí slitinou SAC a jednotlivými oplachy



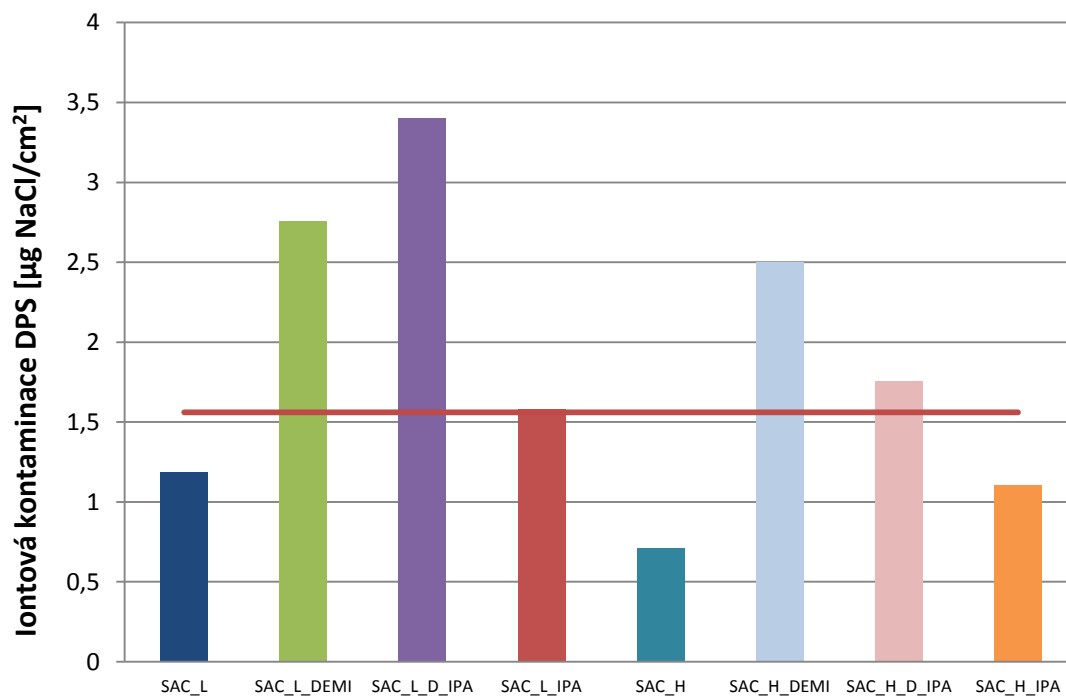
Obr. 37: Iontová kontaminace DPS s pájecí slitinou SnAg a jednotlivými oplachy



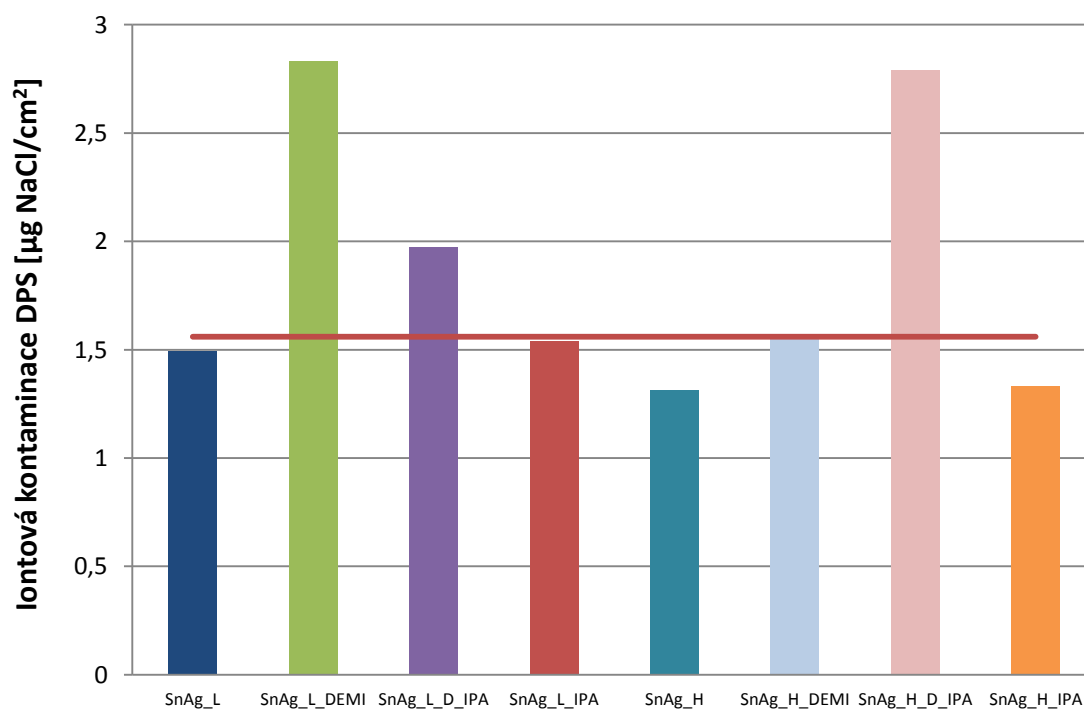
Obr. 38: Iontová kontaminace DPS s pájecí slitinou SnBi a jednotlivými oplachy

9.1.2 Analýza výsledků čištění DPS s no-clean pájecími pastami - měřené pomocí vodivosti extrakčního roztoku

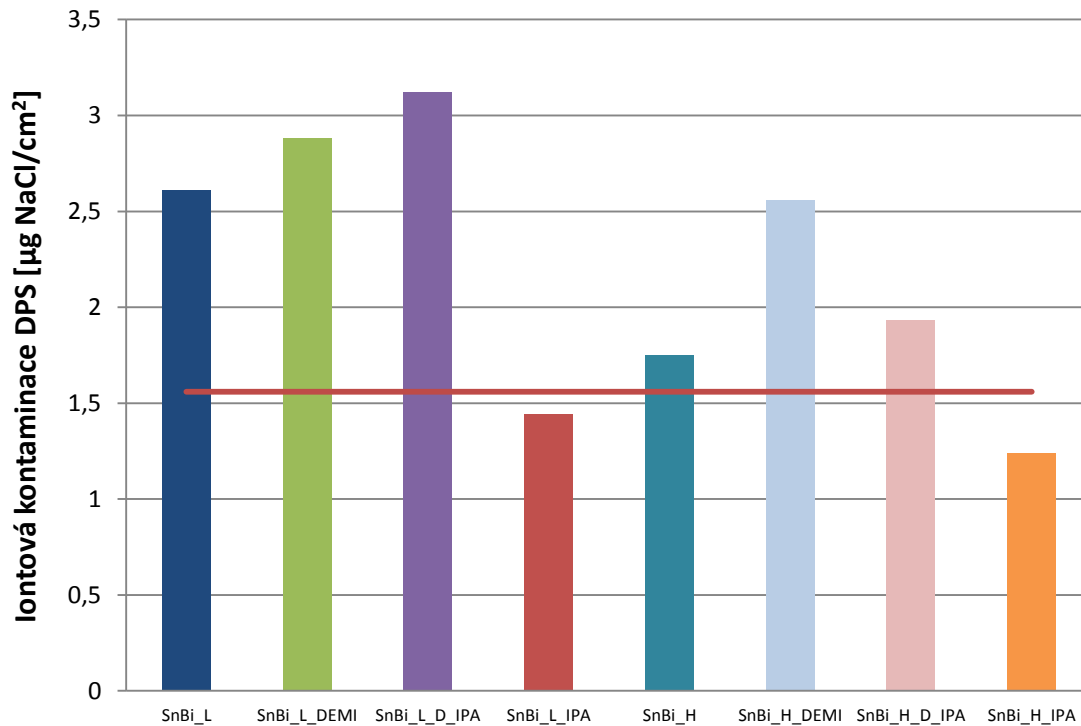
Jako druhá metoda zjišťování iontové kontaminace na DPS byla použita metoda extrakčního roztoku (viz kapitola 8.1.3). Tato metoda se jeví jako méně přesná, a to z důvodu použití ne tak přesného konduktoměru (přesnost $\pm 0,01 \mu\text{S}$) a nutnosti dopočítání potřebné míry iontové kontaminace na DPS. Ale i tato metoda potvrdila výsledky, které jsme získali z měření iontové kontaminace pomocí kontaminometru. I zde nejhorší výsledky vykazoval oplach demineralizovanou vodou v kombinaci s teplotním profilem s označením L. Jen u pájecí pasty s označením SnBi byla nejvyšší míra naměřené kontaminace s oplachem „50% demineralizovaná voda a 50% izopropylalkohol“.



Obr. 39: Iontová kontaminace DPS s pájecí slitinou SAC a jednotlivými oplachy



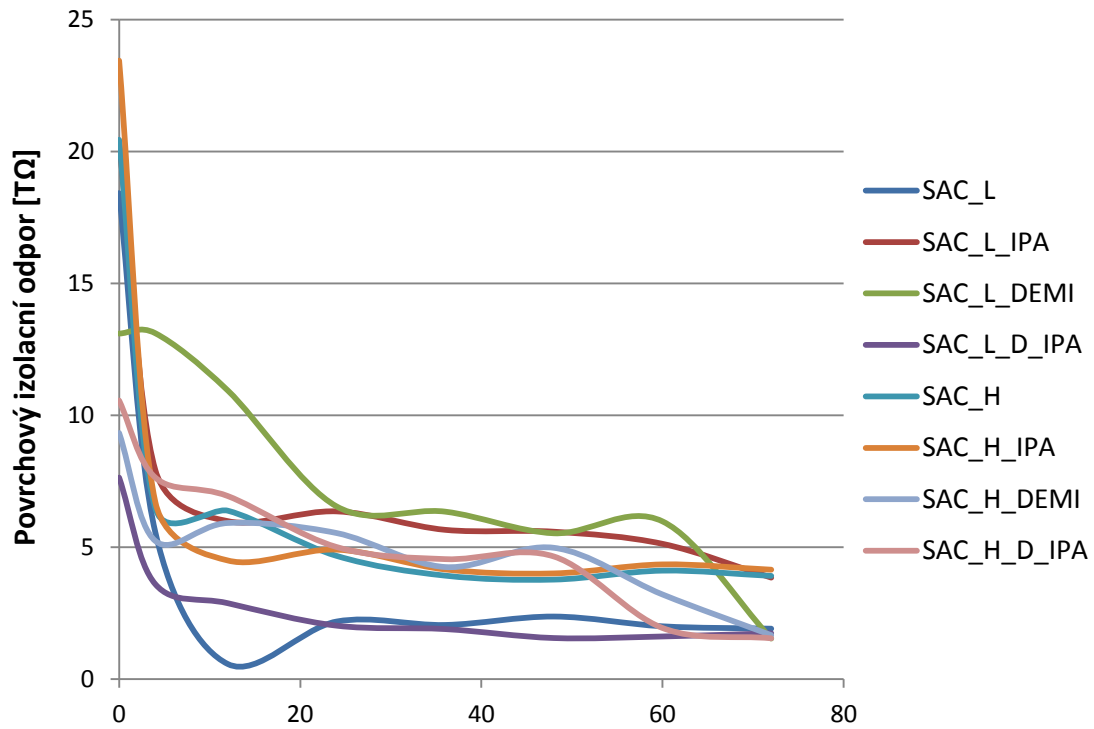
Obr. 40: Iontová kontaminace DPS s pájecí slitinou SnAg a jednotlivými oplachy



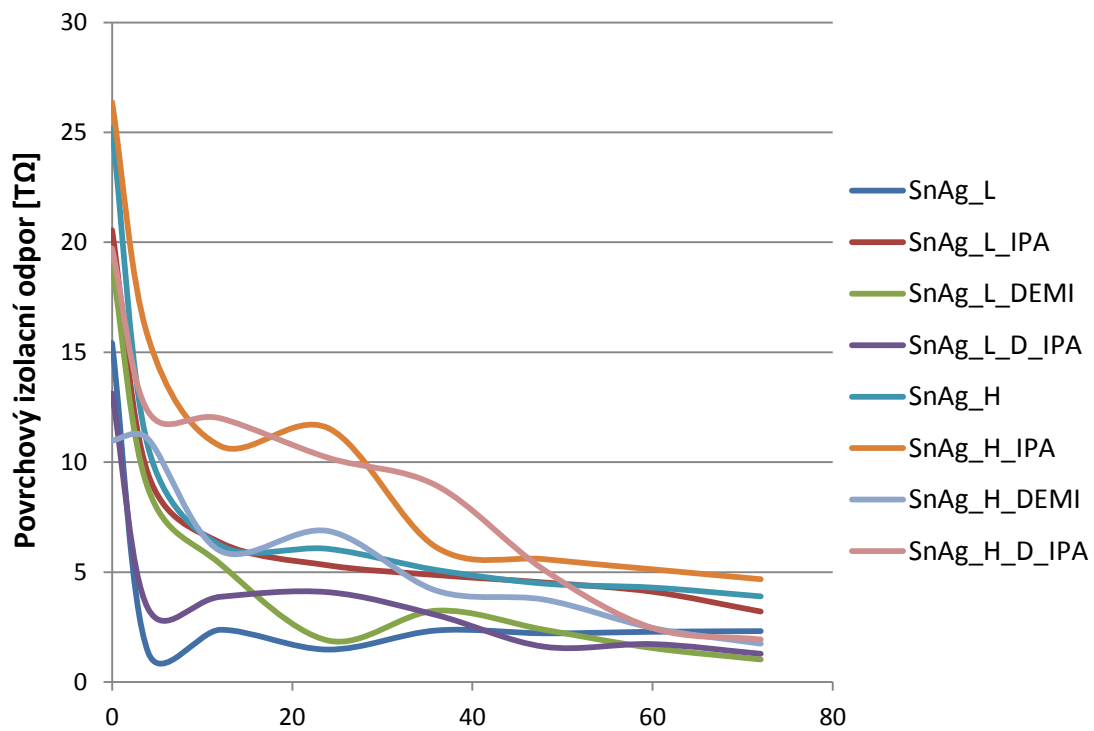
Obr. 41: Iontová kontaminace DPS s pájecí slitinou SnBi a jednotlivými oplachy

9.1.3 Analýza výsledků čištění DPS s no-clean pájecími pastami – měření metodou SIR

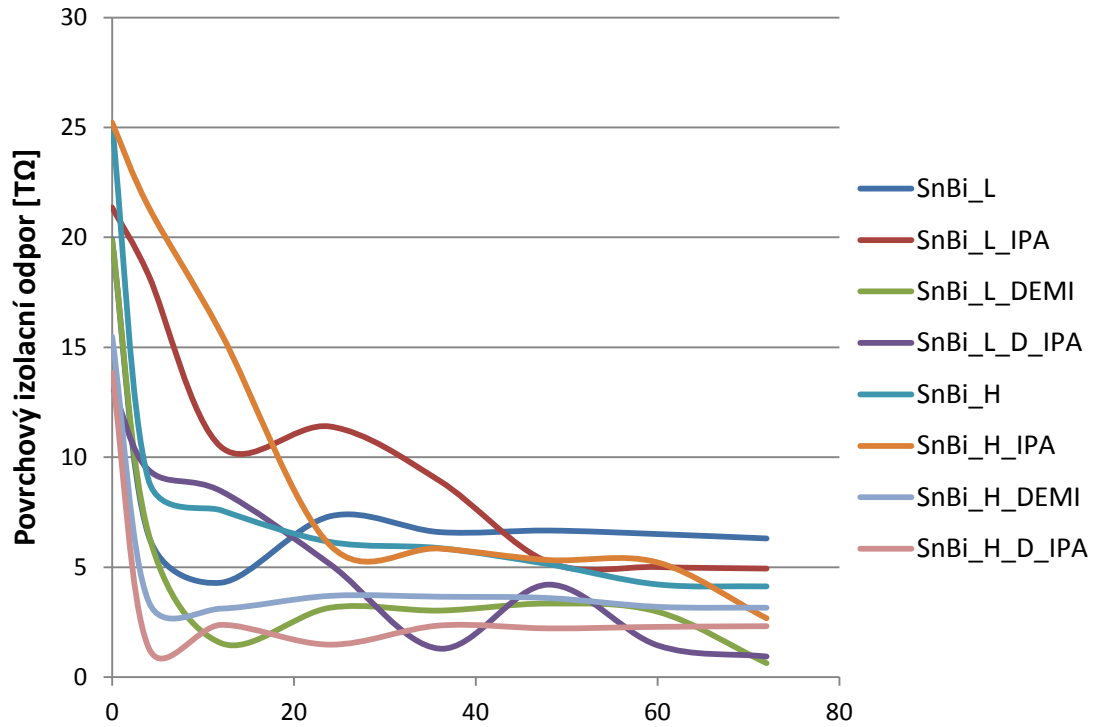
Jako třetí metoda stanovení iontové kontaminace DPS byla použita metoda měření povrchového izolačního odporu (SIR). Tato metoda nám přímo neumožňuje číselně vyjádřit hodnotu iontové kontaminace, a proto se výsledky nedají přímo porovnávat s předchozími metodami. Ale i tato nepřímá metoda nám potvrdila předchozí výsledky, jelikož i zde vzorky s oplachem demineralizované vody vykazovaly nejhorší výsledky v poklesu povrchového izolačního odporu u všech vzorků pájecích past. Jak je vidět v grafech Obr. 42 - Obr. 47. Z naměřených hodnot byly vytvořeny grafy závislosti povrchového izolačního odporu na čase a pro lepší přehlednost výsledků také grafy poklesu povrchového izolačního odporu (Obr. 45 - Obr. 47), kde je možné sledovat hodnotu povrchového izolačního odporu na počátku měření a jeho pokles na konci měření. Z těchto grafů je dobře patrné zhoršení povrchového izolačního odporu u vzorků s použitým oplachem DEMI a D_IPA.



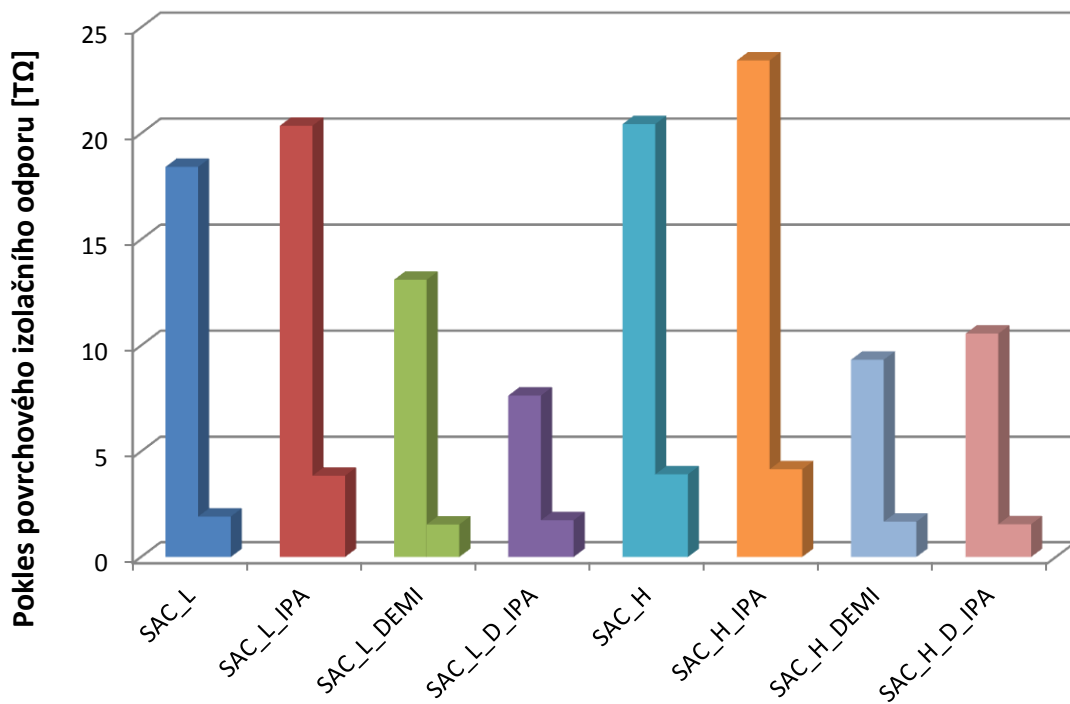
Obr. 42: Povrchový izolační odpor DPS s pájecí slitinou SAC a jednotlivými oplachy



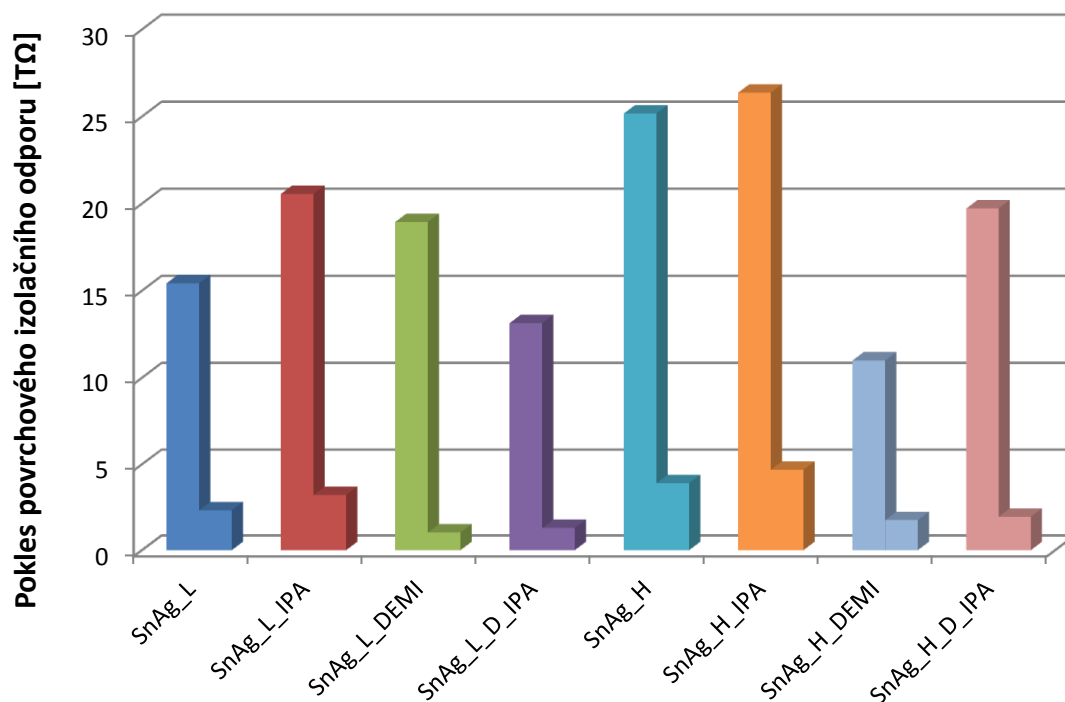
Obr. 43: Povrchový izolační odpor DPS s pájecí slitinou SnAg a jednotlivými oplachy



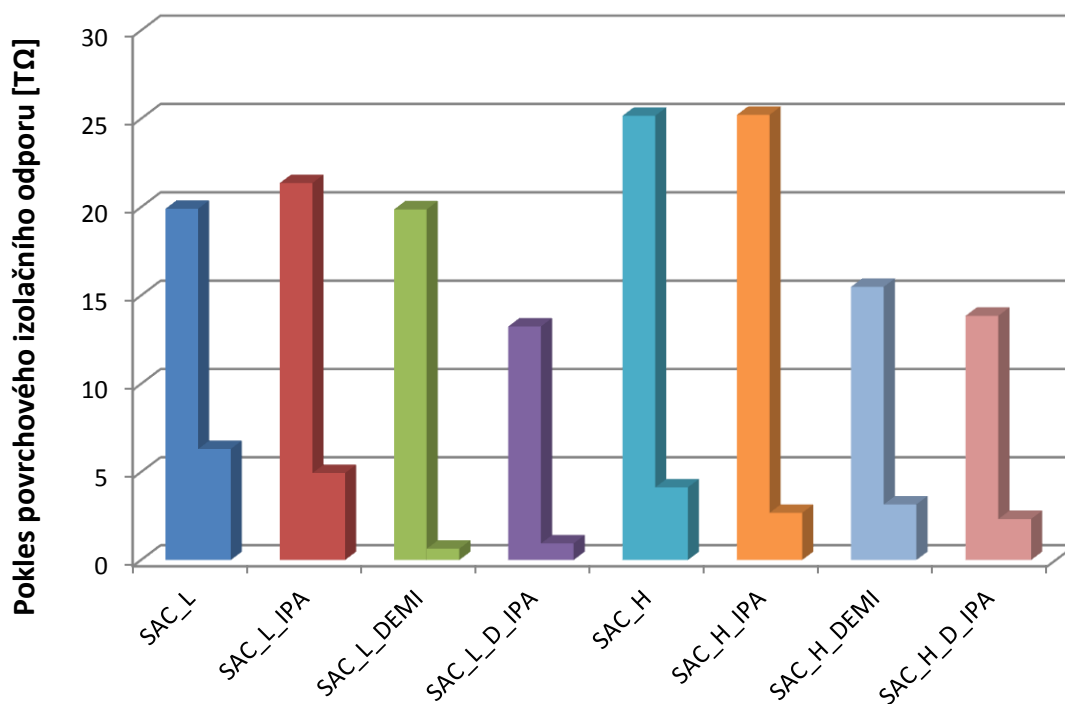
Obr. 44: Povrchový izolační odpor DPS s pájecí slitinou SnBi a jednotlivými oplachy



Obr. 45: Pokles povrchového izolačního odporu DPS s pájecí slitinou SAC a jednotlivými oplachy



Obr. 46: Pokles povrchového izolačního odporu DPS s pájecí slitinou SnAg a jednotlivými oplachy



Obr. 47: Pokles povrchového izolačního odporu DPS s pájecí slitinou SnBi a jednotlivými oplachy

9.2 Vyhodnocení vlivu čištění no-clean pájecích past na iontovou kontaminaci DPS

Výsledky tohoto experimentu potvrdily, že nevhodným zvolením oplachového média a následným procesem čištění no-clean pájecích past, může dojít ke zhoršení iontové čistoty na povrchu DPS. To se povedlo potvrdit třemi odlišnými metodami měření znečištění na DPS. Z experimentu také vyplynulo, že v případě měření iontové kontaminace je nutné zvolit vhodnou měřicí metodu anebo kombinaci metod, abychom obdrželi opravdu reálnou hodnotu iontové kontaminace. V případě problémů s iontovou čistotou se jeví jako vhodné použití měření pomocí kontaminometru a např. doplnění o SIR test, nebo jinou nepřímou měřicí metodu, abychom měli jistotu, zda jsou naměřené výsledky opravdu pravdivé. Nutné je také určit, zdali je znečištění plošné, nebo pouze lokální, a to nám může odhalit SIR test.

Zařazení čistícího procesu po procesu pájení s no-clean pájecími pastami může způsobit problémy v oblasti iontové čistoty DPS. Jak ukázaly výsledky experimentů, ne u všech druhů pájecích past je vhodné DPS čistit po pájení, jelikož může dojít k narušení povrchu no-clean tavidla a následnému rozplavení nečistot po DPS, a tudíž i k zvýšení hodnoty iontové kontaminace. V případě nutnosti mytí no-clean pájecích past (problémy s iontovou čistotou) je nutné zvolit vhodný oplach, aby došlo k dokonalému odstranění všech zbytků tavidel z povrchu DPS. Je vhodné použít dostatečně agresivní oplach (např. námi testovaný izopropylalkohol) a správně nastavit čistící proces, aby bylo odstraněno no-clean tavidlo kompletně. To může být jak časově, tak i finančně značně náročné. Dle získaných výsledků lze usuzovat, že není nutné čistit no-clean pájecí pasty po procesu pájení, jelikož nepřesáhly povolenou mez iontové kontaminace dle IPC. Výjimkou je testovaná pájecí pasta SnBi. Tato pájecí pasta hodnotu IPC překročila a to patrně z důvodu obsahu aktivnějšího tavidla. Z tohoto důvodu je nutné při volbě, zda čistit no-clean pájecí pasty, brát v potaz, o jakou pájecí pastu se jedná, a zda nemůže čištění způsobit problémy v oblasti čistoty DPS. Pro pájecí pasty s aktivnějšími tavidly (v našem případě SnBi) a DPS s malými roztečemi (mezera menší než 20 mil = 0,051cm) je nutné použít čistící proces, aby nevznikly problémy se zbytky tavidel na DPS.

10 Závěr a zhodnocení splnění cílů práce

Tato práce se zaměřuje na problematiku optimalizace pájecího profilu při procesu přetavení u bezolovnatých pájecích past, s důrazem kladeným na problematiku čistoty DPS. Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, téma optimálního nastavení procesu pájení je neustále aktuální otázkou, jelikož nikdo nemůže stoprocentně říci, jak optimálně nastavit proces pájení s ohledem na dlouhodobou spolehlivost pájeného spoje. Celá řada firem a vědeckých pracovníků se snaží o nalezení optimálního nastavení procesu pájení, ale tento proces je velice složitý, jelikož do něj vstupuje celá řada jak technologických aspektů, tak i materiálových aspektů.

Teoretická část této práce se věnuje popisování vzniku pájeného spoje a převážně technologickým a materiálovým aspektům vzniku pájených spojů v bezolovnaté technologii. Je zde také uvedeno dělení druhů tavidel, protože práce je z velké části věnována objasnění otázek čistoty DPS. Tato dříve často opomíjená otázka čištění DPS se den ode dne stává častěji vyslovenou a tudíž aktuální, jelikož s neustálou minimalizací elektronických zařízení se zmenšují jak samotné součástky, tak i vzdálenosti vodivých spojení mezi nimi. V dnešní době nejednotnosti výrobců elektroniky v otázkách čištění, je nutné si uvědomit, co všechno nám mohou způsobit zbytky tavidel po procesu pájení na DPS. Proto byla také do této práce zařazena (v teoretické části) kapitola defektů, způsobených právě zbytky tavidel, druhy čištění DPS po pájení a metody měření znečištění na DPS.

Z rešeršní části práce vyplynula celá řada otázek a hypotéz, jejichž zodpovězení a objasnění je cílem této práce. Hlavním cílem práce je optimalizace teplotního profilu na základě porovnání jednotlivých procesních a materiálových faktorů a jejich následný vliv na spolehlivost pájeného spoje, pro tři různé pájecí pasty (různá slitina i tavidlo). Jelikož výrobci pájecích past přesně nespecifikují doby a časy jak přehřevu, tak samotného přetavení. Pro jednotlivé pájecí pasty doporučují rozmezí hodnot pro jednotlivé části pájecího profilu (procesní okno). Experiment byl navržen tak, aby pro jednotlivé pasty byly brány krajní meze doporučené výrobcem pájecích past, a byl zkoumán dopad těchto dvou profilů na parametry výsledného pájeného spoje. Jako zásadní byly vybrány parametry, které nejvíce mohou ovlivnit kvalitu pájeného spoje, jako je smáčecí úhel, znečištění na DPS po pájení, intermetalické sloučeniny v pájeném spoji a tvorby dutin ve spoji. Po analýze získaných dat z první části experimentu byl hodnocen celkový dopad změny mezi krajními hodnotami testovaných teplotních profilů pro jednotlivé pájecí pasty (viz kap.8.5). Z výsledků vyplývá,

že teplotní profil s delší dobou a vyšší teplotou přehřevu a samotného pájení, vhodně působí na parametry smáčecího úhlu, znečištění DPS po pájení a tvorbu dutin ve spoji. Nevhodný dopad má na tvorbu IMC ve spoji což je popsáno v kap. 8.3.2. Celkově ale působí zvolení tohoto teplotního profilu na kvalitu pájeného spoje kladně (viz kap.8.5). Na základě vyhodnocení experimentu a získaných znalostí vznikla interní metodická směrnice (viz příloha) pro společnost Integrated Micro-Electronics Czech Republic k nastavování a měření teplotních profilů při procesu přetavení. Tudíž výsledky této dizertace byly aplikovány v mezinárodní firmě pro výrobu elektroniky pro automobilový průmysl a průmyslovou techniku, jejíž výrobou se tato firma zabývá.

Jako dílčí cíl práce bylo ověřit vybrané měřicí metody pro zjišťování míry znečištění na DPS po pájení z hlediska porovnatelnosti jejich výsledků. Z experimentu vyplynulo, že jednotlivé metody jsou těžko porovnatelné a jejich výsledky vykazují v některých případech rozdíly. Proto je nutné v praxi použít kombinaci metod např. měření kontaminometrem a metodu SIR. Měření kontaminometrem nemůžeme zjistit na jakém místě, můžeme mít problém s nečistotami, což je možné ověřit metodou SIR. Nevýhodou této metody je však její časová náročnost, což pro využití v praxi je nepříjemné. Při použití kombinace měřicích metod budeme mít jistotu, zda je nutné řešit problémy s nečistotami po pájení nebo nikoli.

Dalším dílčím cílem bylo ověřit, zdali je nutné bezoplachové technologie (no-clean) čistit nebo nečistit po procesu pájení. Protože tato otázka je často kladena a polovina výrobců elektroniky tyto pasty po pájení čistí a druhá polovina nikoli, jak bylo řečeno v kap. 9.1. Z výsledků experimentů jasně vyplynulo, když volit čistící proces na tyto technologie, tak je nutné vždy zvolit dostatečně agresivní oplach pro dokonalé odstranění všech nečistot z DPS a vhodně nastavit proces čištění. Jinak je možné, že pomocí čisticího prostředku dojde pouze k narušení povrchu no-clean tavidla a následnému rozplavení nečistot po povrchu DPS, což sebou může přinést zmíněné problémy se vzniklými defekty a ovlivní to spolehlivost dané elektronické soustavy.

11 Literatura

- [1] SALAM, B. A Study of Inter-Metallic Compounds (IMC) Formation and Growth in Ultra-Fine Pitch Sn-Ag-Cu Lead-Free Solder Joints. *2006 Electronics System integration Technology Conference* [online]. 2006, (06), 7 [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4060856/>
- [2] CHANG-KEUN, S. Effect of Cu-containing solders on the critical IMC thickness for the shear strength of BGA solder joints. *2000 Electronics Packaging Technology Conference* [online]. 2000, , 6 [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/906408/>
- [3] NING-CHENG, L. Lead-Free Flux Technology and Influence on Cleaning. In: *2009 11th Electronics Packaging Technology Conference* [online]. 2009, s. 6 [cit. 2016-10-03]. ISBN 978-1-4244-5100-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5416571/>
- [4] SHENG, Z. Surface Insulation Resistance of Conformally Coated Printed Circuit Boards Processed With No-Clean Flux. In: *IEEE transactions on electronics packaging manufacturing* [online]. 2006, s. 7 [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1707870/>
- [5] NOWSHAD, A. The Effect of Clean and No-clean Flux in Enhancing the Wettability of Eutectic Solder Bump Flip Chip PBGA. In: *ICSE 2008 Proc. 2008, Johor Bahru, Malaysia* [online]. 2008, s. 5 [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4770347/>
- [6] JONGWOO, P. Propensity of Copper Dendrite Growth on Subassembly Package Components Used in Quad Flat Package. In: *IEEE transactions on device and materials reliability* [online]. 2008, s. 7 [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4472169/>
- [7] KAZUTAKA, M. Analysis of the dendrite on printed wiring board by soft X-ray microscope and THz imaging. In: *IEEE* [online]. 2011, s. 4 [cit. 2016-10-03]. ISBN 978-1-4577-1510-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6156691/>
- [8] KONRAD, M. *The Reasons for Cleaning A Handy Guide for Cleaning Circuit Assemblies* [online]. 2015. Germany: Aqueous Technologies [cit. 2016-10-03].

- [9] WASSINK, R.J.K. *Soldering in electronics: a comprehensive treatise on soldering technology for surface mounting and through-hole techniques*. 2nd ed. Ayr, Scotland: Electrochemical Publications, 1989. ISBN 090115024X.
- [10] *Electronic Waste Recovery and Recycling* [online]. Oddělení recyklace a obnovy zdrojů v Kalifornii. [cit. 2016-10-03]. Dostupné z:
<http://www.calrecycle.ca.gov/Laws/Regulations/Title14/Chap08pt2/default.htm>
- [11] MACH, P. URBÁNEK, J. a SKOČIL, V. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [12] WIRTH, V. et al. Comparison of solderability testing methods of PCBs with different surface finishes. In: *Electronic devices and systems: IMAPS CS international conference: proceedings*. Brno: Vysoké učení technické, 2011. s. 229-234. ISBN 978-80-214-4303-7.
- [13] HENSHALL, G. A. ed., BATH, J. ed. a HANDWERKER, C. A., ed. *Lead-free solder process development* [online]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, ©2011 [cit. 2013-12-21]. ISBN 978-0-470-41074-5.
- [14] GANESAN, P. „*Lead-free electronics*“, A John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. ISBN 13-978-0-471-78617-7.
- [15] KOLEŇÁK, R. AUGUSTIN R, MARTINKOVIČ, M. a CHACHULA, M. Comparison study of SAC405 and SAC405+0.1%Al lead free solders. *Soldering & Surface Mount Technology* [online]. 2013,25(3), 175-183 [cit. 2016-10-04]. DOI: 10.1108/SSMT-Aug-2012-0018. ISSN 0954-0911. Dostupné z:
<http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/SSMT-Aug-2012-0018>
- [16] SUBRAMANIAM, K. N., ed. *Lead-free solders: materials reliability for electronics* [online]. Chichester: John Wiley & Sons, 2012. Wiley series in materials for electronic and optoelectronic applications [cit. 2013-12-21]. ISBN 978-1-11-996621-0.
- [17] TU, K. N. *Solder joint technology: materials, properties, and reliability*. New York: Springer, c2007. ISBN 9780387388922.
- [18] CLYDE F. COOMBS, JR., EDITOR-IN-CHIEF., Clyde F. Coombs, Jr., editor-in-chief. *Printed circuits handbook*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 0071510796.

- [19] STARÝ, J. „*Bezolovnaté pájení - materiálová a procesní kompatibilita v inertní a inertně/redukční atmosféře*“, disertační práce, Vysoké Učení Technické v Brně, Brno 2005.
- [20] Pájecí slitiny - internetový portál COPTEL - elektrotechnika. [online]. [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=6096&docGroup>
- [21] JOHAN LIU .[ET AL.]. *Reliability of microtechnology interconnects, devices, and systems*. New York, NY: Springer Science+Business Media, LLC, 2011. ISBN 9781441957603.
- [22] ANDREW E. PERKINS, SURESH K. SITARAMAN. *Solder joint reliability prediction for multiple environments*. Online-Ausg. New York, NY: Springer, 2009. ISBN 9780387793948.
- [23] WOLFGANG Sch., *Resin/Rosin Free Solder Pastes and Fluxes*, 2006 Electronics System Integration Technology conference, Dresden, Germany. pp. 974-982.
- [24] ČSN EN 29454-1. *Tavidla pro měkké pájení. Klasifikace a požadavky. Část 1: Klasifikace, označování a balení*. Praha, 1997.
- [25] ANSI/J-STD-004A, *Requirements for Soldering Fluxes*. American National Standard, Joint Industry Standard, 2004.
- [26] Soldering Defects Database. [online]. [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: http://defectsdatabase.npl.co.uk/defectsdb/defects_query.php
- [27] JELÍNEK, T. „*Sledování účinnosti čisticích emulsí pro desky plošných spojů*“, bakalářská práce, Vysoké Učení Technické v Brně, Brno 2010.
- [28] HUA Hou, DONG-ZING Ju. *Numerical simulation for dendrite growth of binary alloy with phase field method [J]*. Journal of materials science technology,2004 ,20:45-48.
- [29] SANG-AH KIM a DO-SEOK AHN. *Case Study of Copper Dendrite Growth Under HAST Test*. 2008, s. 1-3.
- [30] YUMIS M. [ET AL.]. *Effects of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints*, Microelectronics Reliability 43, (2003) 2077-2006, Elsevier Ltd.
- [31] SÍTKO, V. *Jak čisté je čisté: (a jak čistého dosáhnout)*. In: [Pdf]. Brno: SMT-info konsorcium, 2010 [cit. 2013-09-28]. ISBN 1211-6947.

- [32] SHAW, D. *Practical Cleaning Solutions for No-Clean Flux: How to Have a Successful Cleaning Process*. In: [Pdf]. Budapešť: IPC_Budapest, 2012 [cit. 2016-10-03].
- [33] *IPC-TM-650, Test Method Manual, No. 2.4.46A, Spread Test, Liquid, Paste or Solid Flux, June 2004*.
- [34] SÍTKO V., *Optimization of Cleaning PCB Assemblies and Stencil through process examination*. IPC conference 2012 Budapešť.
- [35] ČSN EN ISO 9455-16. *Tavidla pro měkké pájení - Zkušební metody - Část 16: Zkoušky účinnosti tavidla, metoda smáčecích vah*. Praha, 2003.
- [36] NOVÁK, T. *Intermetalické sloučeniny v bezolovnatém pájeném spoji*. V Plzni, 2012. Disertační práce (Ph.D.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [37] SHENMAO TECHNOLOGY INC. *Datasheet SAC305* [online]. In: . Taiwan, 2012, s. 3 [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: <http://www.shenmao.com>
- [38] SHENMAO TECHNOLOGY INC. *Datasheet SnBi solder paste* [online]. In: . Taiwan, 2012, s. 3 [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: <http://www.shenmao.com>
- [39] SHENMAO TECHNOLOGY INC. *Datasheet SnAg solder paste* [online]. In: . Taiwan, 2012, s. 3 [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: <http://www.shenmao.com>
- [40] *Electronic Waste Recovery and Recycling* [online]. Oddělení recyklace a obnovy zdrojů v Kalifornii. [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: <http://www.calrecycle.ca.gov/Laws/Regulations/Title14/Chap08pt2/default.htm>
- [41] *U. S. Consumption of Lead*. [online]. Index Mundi. [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/lead/lead_t5.html
- [42] *China RoHS Solutions*[online]. Michael Kirschner. 2012. [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: <http://www.chinarohs.com/>
- [43] PUTTLITZ, K. J. a KATHLEEN A. STALTER. *Handbook of lead-free solder technology for microelectronic assemblies*. New York: Marcel Dekker, c2004. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 170. ISBN 0824748700.
- [44] *Database for Solder Properties with Emphasis on New Lead-free Solders*[online]. National institute of Standards and Technology. [cit. 2016-10-03]. Dostupné z: http://www.metallurgy.nist.gov/solder/NIST_LeadfreeSolder_v4.pdf
- [45] ABEL, M. a CIMBUREK, V. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Vyd. 1. Pardubice: ABE.TEC, 2005. ISBN 80-903597-0-1.

- [46] NOVÁK, T., STEINER, F.: „*Usage of inert atmosphere for solderability testing*“. In EDS '12 IMAPS CS International conference proceedings. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. s. 77-82. ISBN: 978-80-214-4539-0.
- [47] STEJSKAL, P. *The Impact of Intermetallic Compounds on Reliability of Solder Joint*. Student EEICT 2008. Brno: Brno University of Technology, 2008, p. 380-384. ISBN 978-80-214-3617-6.
- [48] BARTH, J. *Lead-Free Soldering*. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. ISBN 978-0-387-68422-2.
- [49] J-STD-001D Standard, *Requirements For Soldered Electrical and Electronic Assemblies*. Bannockburn: IPC, 2005.
- [50] ČSN EN 62137-1-2. *Technologie povrchové montáže. Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchové montovaného spoje. Část 1-2: Zkouška pevnosti ve smyku*. 2008.
- [51] STEJSKAL, P. *Vliv čistících prostředků na smáčení povrchu DPS roztavenou pájkou*. In Elektrotechnika a informatika 2007. doc. Ing. Jiří Hammerbauer, CSc. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007. s. 93-94. ISBN: 978-80-7043-572- 4.
- [52] HUI LEE, K. JUKNA, R. ALTPETER, J. a Kantesh DOSS. Comparison of ROSE, C3/IC, and SIR as an effective cleanliness verification test for post soldered PCBA. *Soldering & Surface Mount Technology* [online]. 2011, **23**(2), 85-90 [cit. 2016-10-05]. DOI: 10.1108/09540911111120159. ISSN 0954-0911. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/09540911111120159>.
- [53] EVANS, J. W. KWON, J. Y. EVANS: „*A guide to lead-free solders*“, Springer-Verlag London Limited 2007. ISBN 978-1-84628-309-3.
- [54] FLANDERS, JACOBS, PINIZZOTTO: „*Activation energies of intermetallic growth of Sn-Ag eutectic solder on copper substrates*“, *Journal of Electronic Materials*, Volume 26, No. 7, March 1997, Pages 883-887, ISSN 0361-5235, DOI: 10.1007/s11664-997-0268-4.
- [55] KUMAR, CHEN: „*Interdependent intermetallic compound growth in an electroless Ni-P/Sn-3.5Ag reaction couple*“, *Journal of Electronic Materials*, Volume 40, No. 2, 2011, Pages 213-223, ISSN 0361-5235, DOI: 10.1007/s11664-010-1447-2.
- [56] Integrated Micro-Electronics, Inc. *IMI* [online]. Philippines [cit. 2016-10-06]. Dostupné z: <http://www.global-imi.com/about-imi/imi/>

12 Seznam publikací autora

Publikace vztahující se k tématu disertační práce

Publikace v impaktovaných časopisech

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

Publikace v recenzovaných časopisech

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

Publikace ostatní

- WIRTH, V., RENDL, K., STEINER, F. Effect of multiple reflow cycles on intermetallic compound creation. In *Proceedings of the 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 1-5. ISBN: 978-1-4799-8860-0 , ISSN: 2161-2528
- HROMADKA, K., ŘEBOUN, J., RENDL, K., WIRTH, V., HAMÁČEK, A. Comparison of the surface properties of power electronic substrates. In *Proceedings of the 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 1-5. ISBN: 978-1-4799-8860-0 , ISSN: 2161-2528
- RENDL, K., WIRTH, V., STEINER, F. Impact of no-clean fluxes cleaning on PCB Ionic contamination. In *Proceedings of the 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 1-5. ISBN: 978-1-4799-8860-0 , ISSN: 2161-2528
- HIRMAN, M., RENDL, K., STEINER, F., WIRTH, V. Influence of Reflow Soldering Profiles on Creation of IMC at the Interface of SnBi/Cu. In *ISSE 2014 - 37th International Spring Seminar on Electronics Technology - "Advances in Electronic System Integration"*. Templin: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2014. s. 1-5. ISBN: 978-1-4799-4455-2 , ISSN: 2161-2528
- HIRMAN, M., RENDL, K., STEINER, F., WIRTH, V. *Influence of Reflow Soldering Profiles on Creation of IMC at the Interface of SnBi/Cu*. Drážďany, 2014.

- RENDL, K., MACHAČ, J., STEINER, F., WIRTH, V. PROPER SOLDER PROFILE SET-UP DUE TO PCB CONTAMINATION REDUCTION. In *Electronic devices and systems : IMAPS CS international conference : proceedings*. Brno: Vysoké učení technické, 2014. s. 54-59. ISBN: 978-80-214-4985-5
- RENDL, K., MACHAČ, J., STEINER, F., WIRTH, V. Comparison of rosin fluxes. In *Electronic devices and systems : IMAPS CS international conference : proceedings*. Brno: Vysoké učení technické, 2013. s. 166-171. ISBN: 978-80-214-4754-7
- RENDL, K. Kontaminace DPS po pájecím procesu s "NO-Clean" pájecími pastami. In *Elektrotechnika a informatika 2013 část první*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. s. 115-118. ISBN: 978-80-261-0233-5
- WIRTH, V., HUJER, T., NOVÁK, T., RENDL, K., STEINER, F. Comparison of solderability testing methods of PCBS with different surface finishes. In *Electronic devices and systems : IMAPS CS international conference : proceedings*. Brno: Vysoké učení technické, 2011. s. 229-234. ISBN: 978-80-214-4303-7
- RENDL, K. Testování pájitelnosti desek plošných spojů s různými povrchovými úpravami. In *Elektrotechnika a informatika 2011 část první*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 109-110. ISBN: 978-80-261-0016-4
- RENDL, K. Vliv aktivity tavidel na pájitelnost. In *Elektrotechnika a informatika 2012. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 105-108. ISBN: 978-80-261-0120-8
-

Funkční vzorky, prototypy

- STEINER, F., BLECHA, T., LINHART, R., RENDL, K., WIRTH, V., HERZ, L., SEHNAL, P., KLOCKER, L. *Systém pro testování multimediálních jednotek*. 2013.
- LINHART, R., STEINER, F., BLECHA, T., RENDL, K., WIRTH, V. *Multiplexor měřících signálů*. 2013.
- LINHART, R., RENDL, K., WIRTH, V. *Testovací a konfigurační aplikace pro multiplexor signálů*. 2013.

Publikace ostatní

- WIRTH, V., BLECHA, T., LINHART, R., RENDL, K., STEINER, F., KLOCKER, L., HERC, L., SEHNAL, P. Automatic testing of multimedia units. In *35 th*

International Spring Seminar on Electronics Technology - Power Electronics. Vienna: Vienna University of Technology, Austria, 2012. s. 1-6. ISBN: 978-3-85465-015-7

- RENDL, K., BLECHA, T., LINHART, R., STEINER, F., WIRTH, V., HERC, L., KLOCKER, L., SEHNAL, P. MULTIPLEXER FOR AUTOMATIC TESTING OF MULTIMEDIA UNITS. *Electroscope*, 2012, roč. 2012, č. 6, s. 1-6. ISSN: 1802-4564
- RENDL, K., WIRTH, V., STEINER, F., BLECHA, T., LINHART, R., HERC, L., SEHNAL, P., KLOCKER, L. MULTIPLEXER FOR AUTOMATIC TESTING OF MULTIMEDIA UNITS. In *Electronic devices and systems : IMAPS CS international conference : proceedings*. Brno: Vysoké učení technické, 2012. s. 71-76. ISBN: 978-80-214-4539-0
- WIRTH, V., BLECHA, T., LINHART, R., RENDL, K., STEINER, F., KLOCKER, L., HERC, L., SEHNAL, P. *Automatic testing of multimedia units*. Bad Aussee, Austria, 2012.

Přílohy:

Na následujících stránkách je uvedena dvanáctistránková interní směrnice společnosti Integrated Micro-Electronics Czech Republic pro nastavování teplotních profilů pro SMT pájecí linky. Tuto interní směrnici jsem vytvořil na základě získaných hodnot a zkušeností při vypracovávání této dizertační práce.



Nastavování a měření teplotních profilů pro pájení přetavením

Historie revizí		
Číslo revize	Datum revize a vydání	Popis změny
0	23. 11. 2015	Vydání dokumentu
1	4. 5. 2016	Změna umístění termočlánků, změny v kap. 5.1.

	Zpracoval:	Validoval:
Funkce:	Process Engineer	Production Manager
Jméno:	Karel Rendl	Alexandre Atayi
Datum:		
Podpis:		



Obsah

1. ÚČEL	3
2. ROZSAH PLATNOSTI INSTRUKCE	3
3. ODPOVĚDNOST	3
4. DEFINICE POJMŮ.....	3
5. POPIS ČINNOSTI	4
5.1 Stanovení vhodného teplotního profilu.....	4
5.1.1 Parametry teplotního profilu	4
5.1.2 Stanovení teplotního profilu pro lepidlo.....	7
5.1.3 Stanovení teplotního profilu pro nový výrobek.....	7
5.2 Vyhodnocení teplotního profilu.....	8
5.3 Pravidelné měření referenčního teplotního profilu.....	9
5.3.1 Měření teplotního profilu pro peci bez měřícího systému Probot	10
5.3.2 Měření teplotního profilu pro peci s měřícím systémem Probot	12



1. ÚČEL

Tato instrukce jednoznačně stanovuje pravidla pro určení a opakované měření teplotních profilů a popisuje pravidla pro pájení přetavením v „reflow pecích“. Cílem popisované činnosti je správně nastavit proces u nových produktů, a to tak, aby vyhovoval všem normám, použitým součástkám a samozřejmě také splňoval požadavky zákazníka, co se týče kvality a spolehlivosti. Následně je potřeba tento proces průběžně kontrolovat a udržovat ho ve správných mezích. Také je nutné zajistit vysokou spolehlivost, bezpečnost a stanovit odpovědnosti při strojním pájení.

2. ROZSAH PLATNOSTI INSTRUKCE

Tento dokument je platný a závazný pro oddělení SMT, kde je prováděno pájení přetavením.

3. ODPOVĚDNOST

Za realizaci činností popsaných v této instrukci jsou zodpovědní:

POPIS ČINNOSTI	ODPOVĚDNOST
stanovení vhodného teplotního profilu	procesní inženýr
pravidelné měření/vyhodnocení referenčního teplot.profilu	technik SMT
vyhodnocení teplotního profilu	procesní inženýr
úpravy teplotních profilů	procesní inženýr
záznam do seznamu teplotních profilů	procesní inženýr
záznam změn teplotního profilu	procesní inženýr
schválení změn teplotního profilu	inženýr kvality

Za proškolení a informovanost zainteresovaných pracovníků je odpovědný vlastník procesu (dle *F-Q-2012/11 Process reference list*), tj. procesní inženýr nebo procesní manažer.

4. DEFINICE POJMŮ

Vhodný teplotní profil = teplotní profil, který vyplývá z technických možností stroje, vlastností pájecí pasty (u vlny tavidla a pájky) a maximálního možného tepelného namáhání součástek.

Referenční teplotní profil = teplotní profil změřený pomocí profilometru a speciálního přípravku pro opakované měření teplotních profilů. Tento přípravek umožňuje rychlé a jednoduché porovnání kontrolních výsledků.



5. POPIS ČINNOSTI

5.1 Stanovení vhodného teplotního profilu

Při stanovení vhodného teplotního profilu se vždy vychází z doporučení výrobce dané pájecí pasty (lepidla) a maximálního tepelného namáhání osazovaných součástek.

Každá pájecí pasta nebo lepidlo mají své parametry (maximální nárůst teploty, doba přehřevu, doba přetavení a maximální teplota), které je potřeba dodržovat pro dosažení optimálních výsledků pájení.

Pro výrobek samotný jsou potom důležité jeho vlastnosti:

- materiál, struktura a tloušťka PCB;
- hmotné součástky pohlcující teplo (větší cívky, elektrolytické kondenzátory, DPAKY, atd.);
- **kritické součástky**
 - výpis kritických součástek: **LED, IC (QFN, QFP), tlačítka, konektory**
 - mají stejně jako pájecí pasty svá omezení, která se musí zohlednit při nastavování vhodného teplotního profilu. Jejich doporučené profily jsou v příslušných datasheetech, a je nutné se jimi řídit.
- běžné součástky (čipové součástky R,L,C)

5.1.1 Parametry teplotního profilu

Teplotní profil má definovaných pět základních parametrů. Pro každý tento parametr je třeba dodržovat teplotní a časové požadavky, které jsou dány doporučením výrobce pájecí pasty nebo lepidla, normou IPC a vlastnostmi součástek. Tyto základní parametry vychází z nastavení teplotních zón (obvykle 4-10), chladič zóny a rychlosti dopravníku pece.

Stručný popis všech základních parametrů:

maximální nárůst teploty (max.rising slope)

- udává maximální nárůst teploty na PCB za 1 sekundu;
- vypočítává se průběžně v 20s intervalech po celou dobu měření profilu;
- norma J-STD-020D doporučuje hodnotu menší 3°C/s; pro pájecí pastu Kester NXG1 je to nárůst menší než **2,5°C/s**;
- při rychlejším nárůstu teploty může dojít k poškození citlivých součástek nebo k odpaření tavidla před dosažením teploty potřebné pro přetavení.

dobu přehřevu (preheat/soak time)

- je měřena v intervalu od **150°C** do bodu přetavení pasty (např. bod přetavení pájecí pasty Kester NXG1 SAC305 je **221°C**);
- norma J-STD-020D udává 60-120s v intervalu teplot 150°C-200°C; pro pájecí pastu Kester NXG1 je to **60-120s** v intervalu teplot 150°C-221°C;
- dobu a čas přehřevu je vhodné volit vyšší z uvedeného rozmezí udávaného výrobcem (zdali tím neporušíme mezní hodnoty pro kritické součástky), z důvodu snížení znečištění po procesu pájení (např. pro Kester NXG1 SAC305 110s a teplota 210°C)

dobu přetavení (reflow time)

- je doba, po kterou je PCB vystaveno teplotám vyšším, než je bod přetavení pájecí pasty nebo lepidla (včetně);
- norma J-STD-020D uvádí obecnou hodnotu nad 217°C po dobu 60-150s; opět např. pro pájecí pastu Kester NXG1 je to nad 221°C po dobu **45-90s**;
- pokud by byla doba přetavení kratší, než doporučené hodnoty nemusí dojít ke kompletnímu přetavení pasty, naopak při delší době by se mohly naopak spálit některé citlivé součástky. V případě, že jsou na PCB takovéto součástky, je nutné zkontrolovat jejich doporučený teplotní profil a řídit se podle něj (především LED diody atd.), jeli to možné, opět volíme dobu a čas přetavení vyšší z uvedeného rozmezí udávaného výrobcem pro pájecí pastu (zdali tím neporušíme mezní hodnoty pro kritické součástky), z důvodu snížení znečištění po procesu pájení (např. pro Kester NXG1 SAC305 80s a teplota 255°C).

maximální teplota (peak temperature)

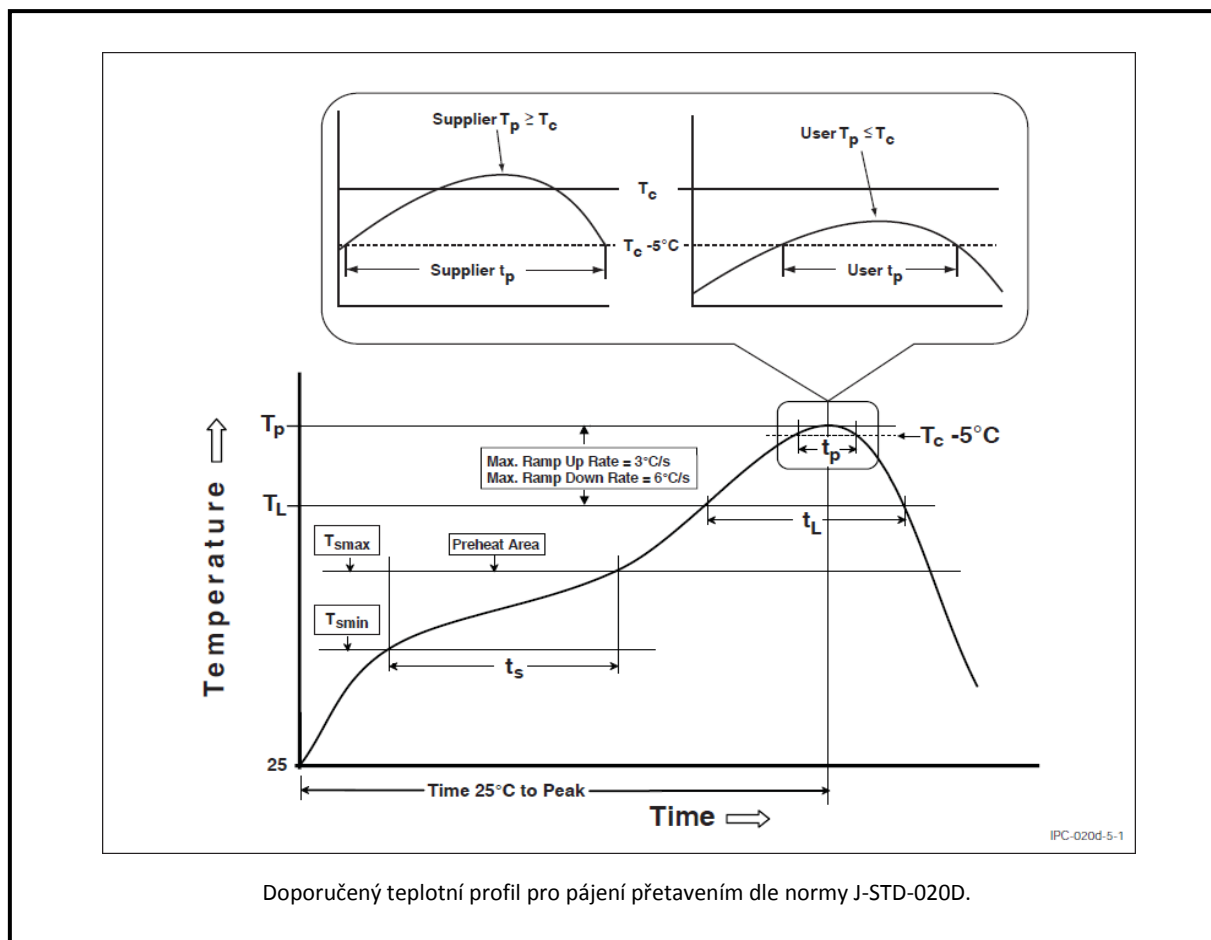
- maximální teplota, které je součástka během pobytu v peci vystavena;
- norma J-STD-020D udává maximální teplotu v závislosti na tloušťce pouzdra a objemu SMD součástek na PCB dle tabulky 4.2;

Package Thickness	Volume mm ³ <350	Volume mm ³ 350 - 2000	Volume mm ³ >2000
<1.6 mm	260 °C	260 °C	260 °C
1.6 mm - 2.5 mm	260 °C	250 °C	245 °C
>2.5 mm	250 °C	245 °C	245 °C

Tabulka 4.2 z normy J-STD-020D

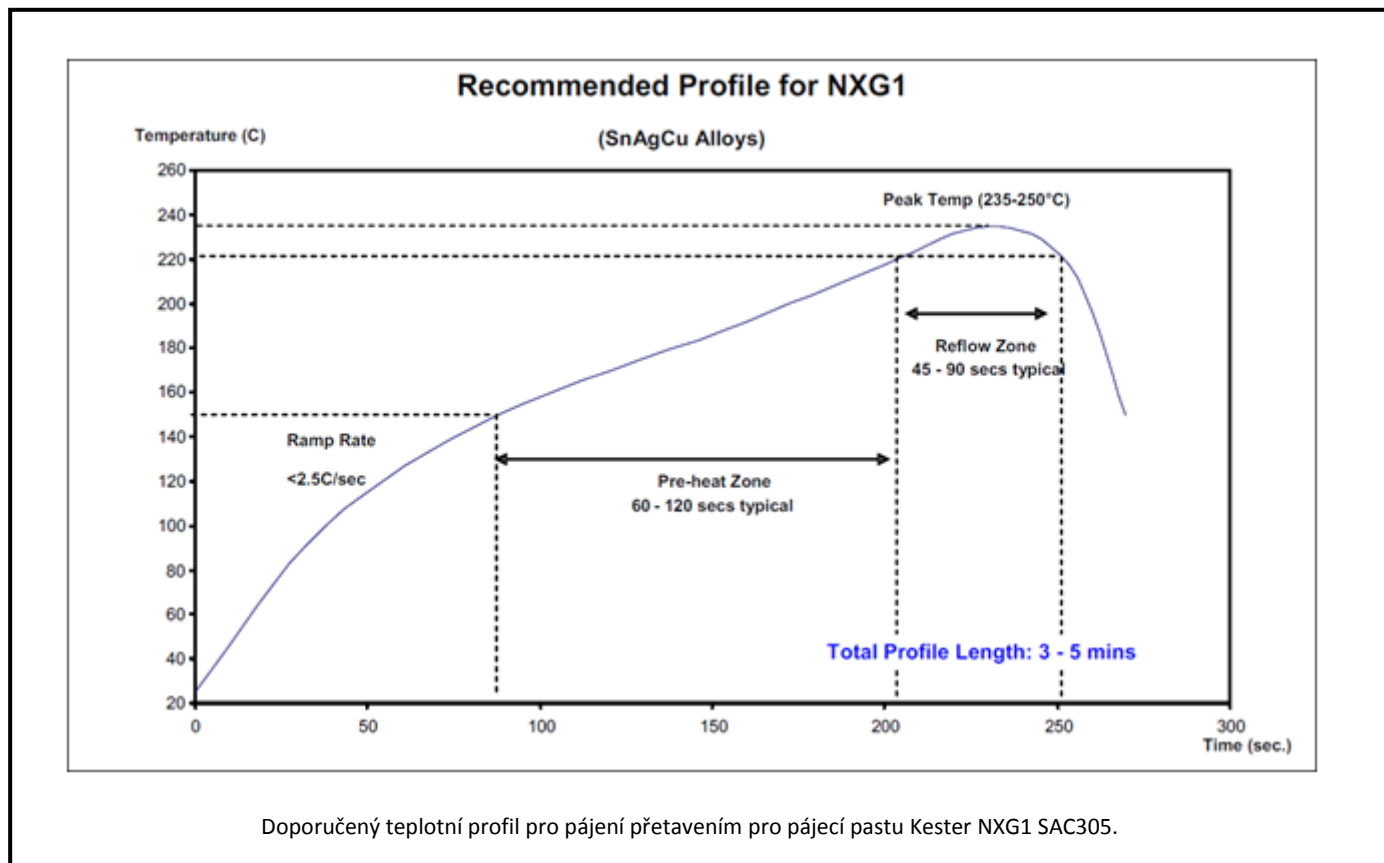

maximální pokles teploty – chlazení (max.cooling slope)

- udává maximální pokles teploty na PCB za 1 sekundu;
- vypočítává se průběžně v 20s intervalech po dobu klesání teploty v rozmezí 221°C-50°C;
- norma J-STD-020D doporučuje hodnotu menší než 6°C/s.



PARAMETR PROFILU	OLOVNATÉ PÁJENÍ	BEZOLOVNATÉ PÁJENÍ
minimální teplota předehřevu T_{smin}	100°C	150°C
maximální teplota předehřevu T_{smax}	150°C	200°C
doba předehřevu t_s mezi T_{smin} a T_{smax}	60-120 sekund	60-120 sekund
nárůst teploty mezi T_L a T_p	max. 3°C/s	max. 3°C/s
teplota přetavení T_L čas t_L nad teplotou T_L	183°C 60-150 sekund	217°C 60-150 sekund
maximální teplota balení součástky T_p	220°C-235°C	245°C-260°C
čas t_p při teplotě T_p	20 sekund	30 sekund
pokles teploty mezi T_p a T_L	max. 6°C/s	max. 6°C/s
čas od 25°C po maximální teplotu	max. 6 minut	max. 8 minut

Tabulka 4.3 doporučených hodnot parametrů pro teplotní profil pro pájení přetavením.



PARAMETR PROFILU anglicky	PARAMETR PROFILU česky	HODNOTA pro pastu NXG1
ramp up	nárůst teploty	$\leq 2,5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$
ramp down <small>*dle S-STD-20D</small>	pokles teploty	$\leq 6\text{ }^{\circ}\text{C/s}$
min.preheat temperature	minimální teplota předehřevu	150 °C
max.preheat temperature	maximální teplota předehřevu	221 °C
preheat time	čas předehřevu	60-120s
reflow peak temperature	maximální teplota přetavení	235-250 °C
reflow time t	čas přetavení	45-90 s

Tabulka 4.4 doporučených hodnot parametrů pro teplotní profil pro pájení přetavením.

Samozřejmě nesmíme zapomínat na specifické parametry použitých kritických součástí. V mnoha případech jsou zrovna tato doporučení výrobce pro výsledný profil zásadní.

Pro každý profil je nutné nastavit hodnoty dle:

1. pájecí pasty viz tab.4.4 – (volíme hodnoty a časy předehřevu a samotného pájení vyšší z uvedených intervalů – z důvodu snížení nečistot po pájení) viz kap. 5.1.1
2. kritických komponentů (dle datasheetu).

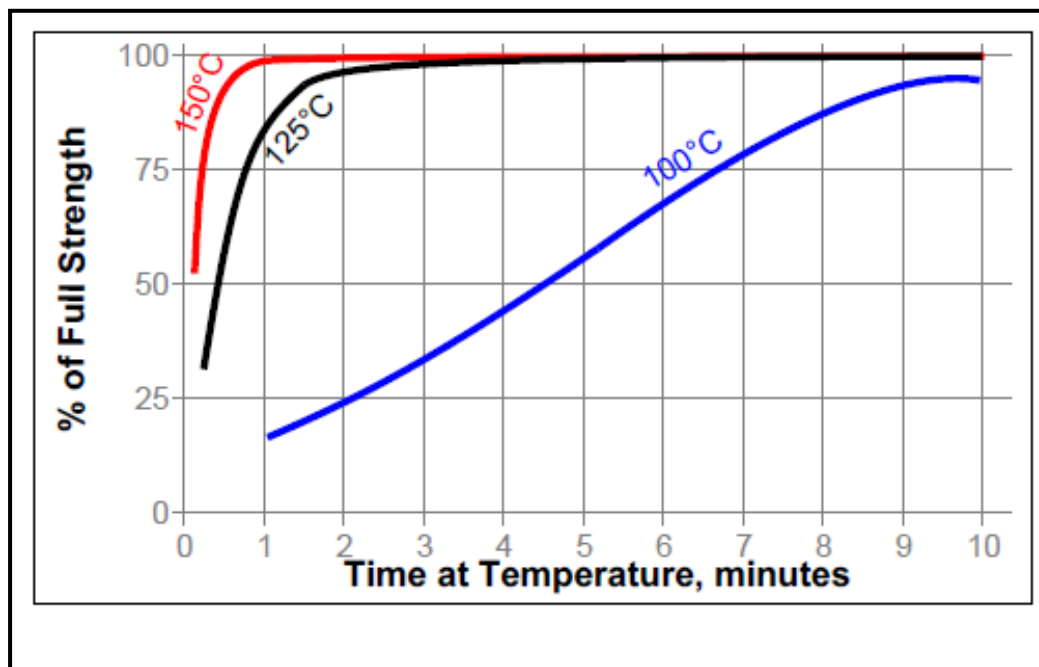
V případě neshody hodnot pájecí pasty a kritických komponentů při nastavení teplotního profilu vyšší prioritu má bod 2, ale je nutná následná kontrola pájitelnosti.



5.1.2 Stanovení teplotního profilu pro lepidlo

Lepidlo se nejčastěji používá pro připevnění větších SMD součástek nebo konektorů pro pájení vlnou. Lepidlo se nanáší stejně jako pájecí pasta sítotiskem, jen je potřeba zohlednit vlastní pravidla pro síta i parametry sítotisku, které jsou odlišné od pravidel používaná pro pájecí pastu.

Pro sítotisk se používá lepidlo Loctite 3616 Chipbonder, jehož doporučené hodnoty parametrů pro teplotní profil jsou uvedeny v datasheetu. Obecně platí, že lepidlo se při teplotě 150°C vytvrdí za 90-120s. Teplota desky v peci nepřesáhne 160°C, odpadá zde tedy riziko tepelného namáhání součástek.



Čas vytvrzení lepidla Loctite 3616 v závislosti na teplotě.

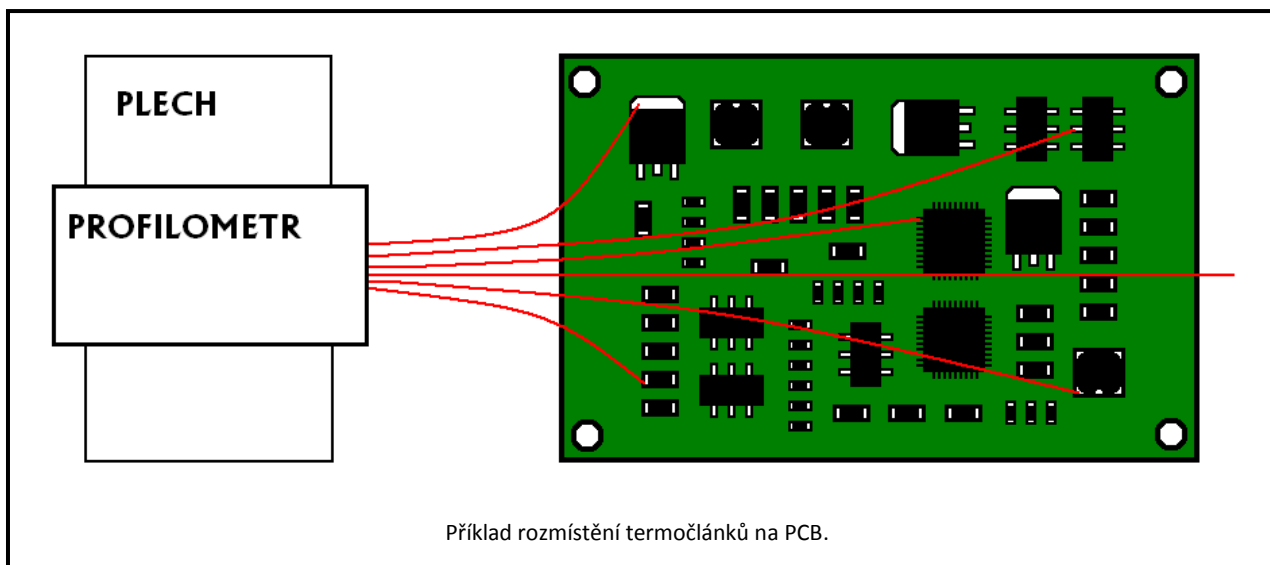
5.1.3 Stanovení teplotního profilu pro nový výrobek

Při hledání vhodného teplotního profilu se termočlánky (typ K) umísťují na vývody součástek. Termočlánky musí být připevněny tak, aby docházelo k dokonalému přenosu tepla (připájení cínem s teplotou tání 400°C) a zároveň nedošlo k narušení tepelných vlastností výrobků. Pro stanovení vhodného teplotního profilu se na panel umísťují 3 - 6 teplotních čidel v závislosti na počtu kritických součástek.

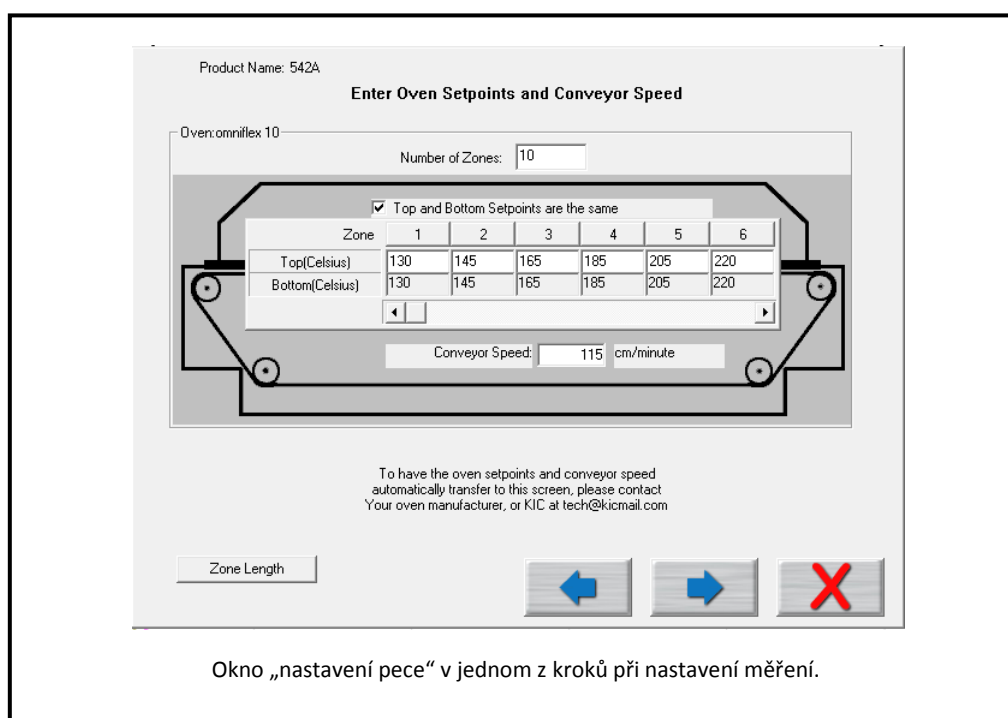
Spouštěcí termočlánek se přilepí kaptonovou páskou na okraj PCB (okraj, který zajíždí do pece jako první) a musí přesahovat hranu o přibližně 1cm. Ostatní termočlánky se připájejí na vývody jednotlivých typů součástek na různá místa desky a těsně u součástky se ještě přilepí kaptonovou páskou k PCB.

Umístění termočláneků na měřené PCB:

- Termočlánky je nutné umístit na všechny druhy kritických komponentů (viz kap. 5.1)
- V případě menšího množství druhů kritických komponentů než 6, termočlánky se umístí na ostatní čipové součástky
- Dále je nutné termočlánky rozmístit rovnoměrně po ploše PCB s ohledem na polohu součástek (viz obr. Příklad rozmístění termočláneků na PCB.)
- V případě velkého množství druhů kritických komponentů a nedostatku vstupů profilometru, provede se měření opakovaně s odlišným rozmístěním termočláneků
- U většiny LED se teplota musí měřit na vršku čočky diody, termočlánek se v tomto případě připevní hliníkovou páskou a oblepí kaptonovou páskou
- Termočlánky se připojují k profilometru postupně od první (spouštěcí) sondy až po poslední.



Při měření u nových výrobků je dobré do nastavení pece, které se objeví v jednom z kroků při spuštění měření v programu KIC2000, přepsat přesné nastavení pece (teploty v jednotlivých zónách a rychlost dopravníku).

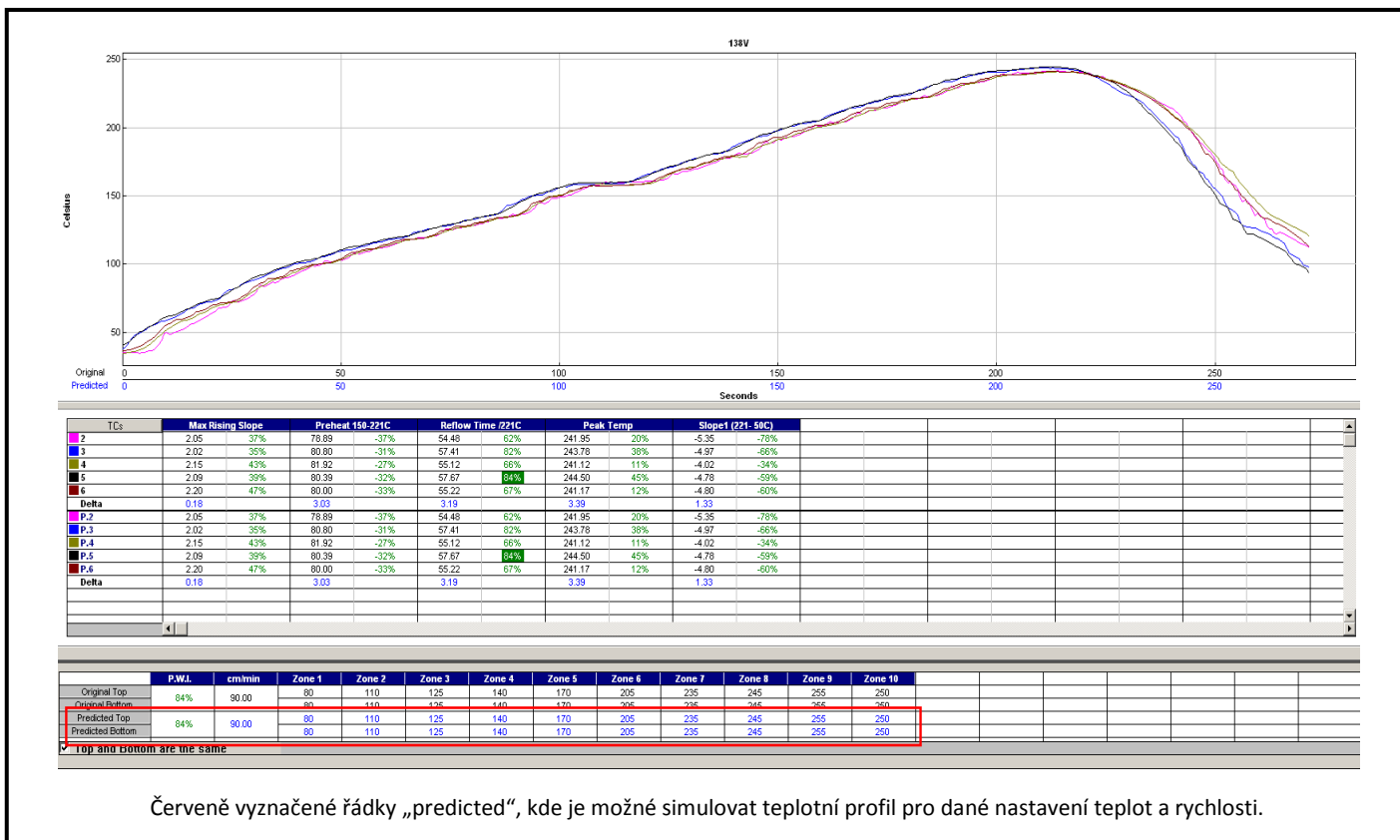


5.2 Vyhodnocení teplotního profilu

Po dokončení měření a připojení profilometru do počítače se hodnoty automaticky stáhnou a vykreslí se teplotní profil, zobrazí se naměřené hodnoty a hodnoty nastavené při nastavení měření. Pokud byly nastaveny skutečné hodnoty teplot jednotlivých zón pece a rychlost dopravníku a je nutné profil upravit a přeměřit, lze využít řádků „Predicted Top“ a „Predicted Bottom“. Hodnoty nastavení pece nebo dopravníku lze v těchto řádcích měnit a zároveň je možné vidět, jak se pravděpodobně změní profil naměřený s těmito novými hodnotami. Tímto lze relativně jednoduše, a především rychle, nalézt správné nastavení pece, abychom získali ten správný teplotní profil pro daný výrobek.



Po dokončení měření je nutné testovací desku označit a uložit na skladovací místo pro „PCB desky pro měření profilů“ v procesní místnosti.



Červeně vyznačené řádky „predicted“, kde je možné simulovat teplotní profil pro dané nastavení teplot a rychlosti.

Pro nové výrobky jsou stanoveny obecné limity parametrů daného teplotního profilu, tzv. PWI (= Process Window Index), které musí být dodrženy, případně jsou upraveny s ohledem na použitou pastu (nebo lepidlo) a osazované kritické součástky. Teplotní profil splňuje dané požadavky, když PWI < 100%.

Tyto limity byly shrnuty v odstavci 5.1.1 Parametry teplotního profilu. Pokud teplotní profil neodpovídá stanoveným limitům, využívá se právě řádku „predicted“ k úpravě tohoto teplotního profilu, jako rychlého a jednoduchého způsobu nalezení vhodného teplotního profilu.

Důležitou hodnotou při vyhodnocování je také Delta, hodnota uvedená pod naměřenými hodnotami jednotlivých sond. Delta udává rozdíl mezi nejmenší a nejvyšší hodnotou naměřenou každou sondou pro každý parametr. Čím vyšší je Delta, tím větší rozdíl měřených hodnot na PCB. Logicky tedy je cílem dosáhnout co nejnižšího rozdílu hodnot Delta na PCB.

Po dokončení měření profilu na PCB je nutno provést kontrolní měření pomocí „Špiona“ a v případě potřeby musí být upraveny hodnoty PWI.

5.3 Pravidelné měření referenčního teplotního profilu

Pravidelné měření a vyhodnocení teplotního profilu se provádí vždy na začátku nové výrobní objednávky. Také pokud dojde k jakékoliv změně v parametrech pece (teplota, rychlost posuvu). Ke změnám v parametrech teplotního profilu nesmí docházet bez vědomí procesního inženýra SMT.

Pravidelné měření teplotního profilu na začátku výrobní objednávky provádí technik SMT a vyhodnocuje ho na základě výsledných hodnot PWI, které musí být menší než 100%.

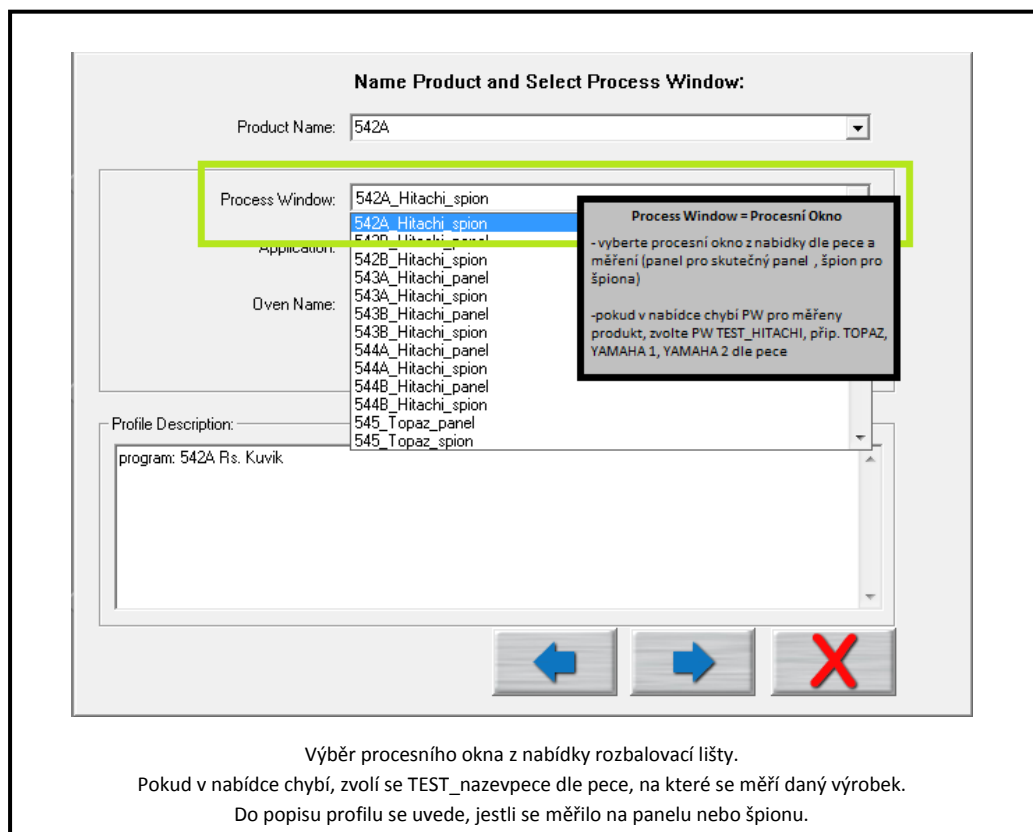
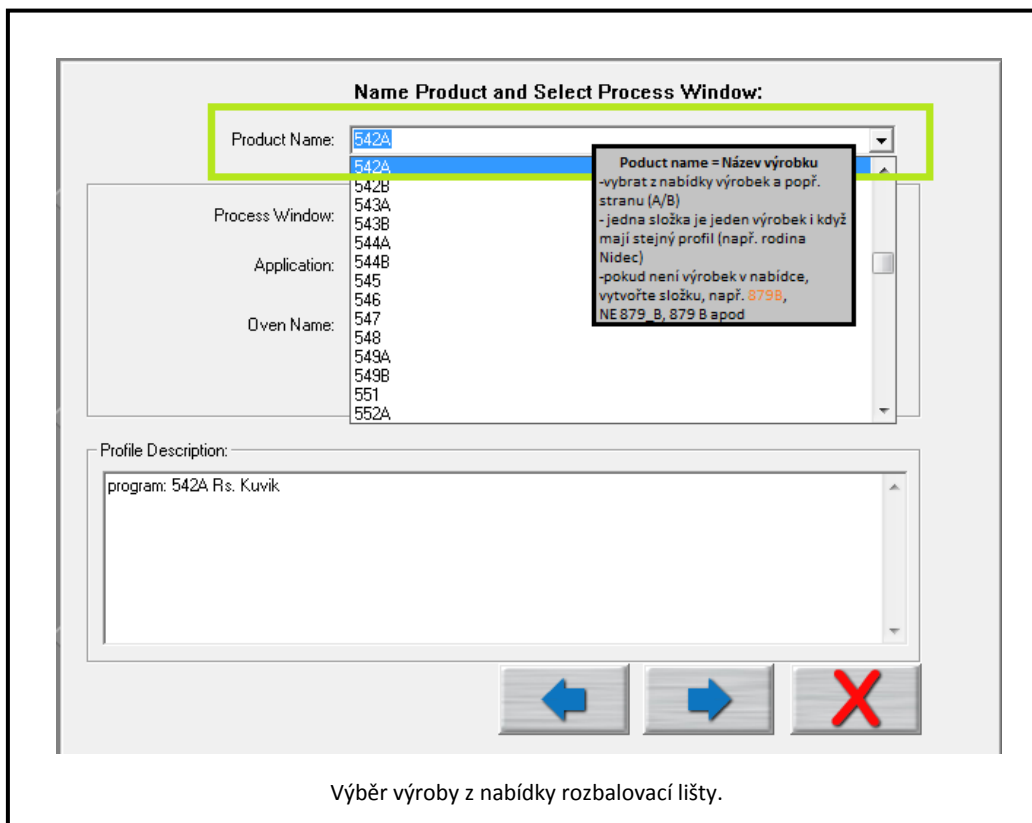
Výjimku stanoví pec s nainstalovaným měřícím systémem Probot, který vyhodnocuje teplotní profil pro každý vyrobený panel, a není nutné ověřování profilu na začátku výrobní objednávky.



5.3.1 Měření teplotního profilu pro pece bez měřicího systému Probot

Měření teplotního profilu se zadává do počítače na pracovišti Měření teplotních profilů. Aby byla databáze měřených profilů přehledná, je důležité dodržovat jednotlivé kroky při zadávání měření teplotního profilu do programu Kic2000:

- název výrobku: 123, 123X, kde X je strana „A“ nebo „B“ (bez mezer, podtržítok atd.);
- název procesního okna: 123X_název pece_Y, kde Y je „panel“ nebo „špion“;
- popis profilu: číslo programu (linka Topaz) nebo jméno programu (ostatní linky) a jméno technika, který měření provádí.





Name Product and Select Process Window:

Product Name:

Process Window:

Application:

Oven Name:

Application = použití
- vždy zvoleno "Solder reflow"

Oven name = Název pece
- z nabídky vybereme pec, na které se měří:
Hitachi = Omniflex
Topaz = Heller 1809EXL
Yamaha, Yamaha 2 = Heller 1809MKIII

Profile Description:

Nastavení použití a názvu pece je opět z nabídky rozbalovací lišty.
Použití je vždy „Solder reflow“.

Příprava měřícího zařízení

Pro samotné měření je nutné správně připravit měřící zařízení „Kic Profiler“.

Po odpojení kabelu od počítače se Kic Profiler uzavře do hnědého ochranného obalu. **Do dalších obalů se už špion nezavírá!** Na všech linkách, kromě Yamaha 1 a 2 (postup pro tyto linky je uveden níže), se profily měří přednostně na univerzálním vozíku, kde je pozice špiona pevně daná:

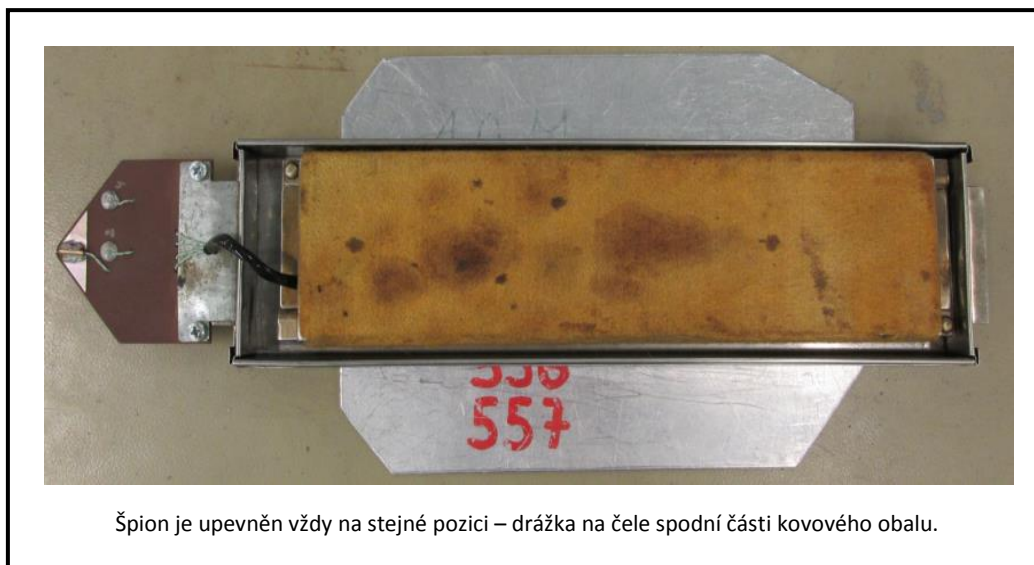


Výjimkou jsou případy, kdy:

- rozteč kolejí je pro daný program větší než maximální možná šířka univerzálního vozíku: v tomto případě je postup:
 - Kic Profiler se špionem se vloží do spodní části kovového obalu s drážkou pro založení špiona;
 - takto připravený Kic Profiler se do pece vpouští na odpovídajícím plechu pro danou výrobu.



- rozteč kolejí je pro daný program menší než minimální možná šířka univerzálního vozíku: v tomto případě je postup:
 - Kic Profiler se špionem se vloží do spodní části kovového obalu s drážkou pro založení špiona;
 - takto připravený Kic Profiler se do pece vpouští na odpovídajícím plechu pro danou výrobu.



- měření na lince Yamaha 1 a Yamaha 2 (pec Heller 1809MKIII):
 - měření se provádí vždy na univerzálním vozíku (v případě velmi úzké rozteče je potřeba vozík kompletně rozebrat!)– kovový obal je příliš tlustý a do pece se na výšku nevejde!!

Měření a vyhodnocení

Samotné měření teplotního profilu se provádí cca 5minut po natopení pece – pec nepřetržitě svítí zeleným světlem na semaforu. Po projetí pecí se Kic Profiler připojí k počítači a výsledek měření se automaticky stáhne a zobrazí na monitoru.

Vyhodnocení je dle pravidla:

1. Pokud měřím poprvé a PWI vyjde vyšší než 100%, je nutné měření opakovat dle stejného postupu.
2. Pokud PWI druhého měření vyjde vyšší než 100% (s tolerance 5%), výrobu nelze spustit. Je nutné informovat procesního inženýra, příp. manažera a naměřené hodnoty konzultovat – je nutné vyloučit poškození měřícího špiona a vyhodnotit naměřené hodnoty.

Výsledek měření, hodnota PWI, se zapisuje do formuláře OK Startu.

5.3.2 Měření teplotního profilu pro pece s měřícím systémem Probot

Systém Probot slouží k online měření a vyhodnocování teplotního profilu pro každý vyrobený panel. Ověření funguje na základě srovnání aktuálního virtuálního profilu (vypočteného na základě teplot odečtených z teplotních čidel nainstalovaných po celé délce pece) s referenčním teplotním profilem vytvořeným procesním inženýrem- kapitola 5.1.3.

Systém musí být spouštěn pro každý produkt aktuálně vyráběný na lince vybavené Probodem dle *PPV 2015 2015/034 Spuštění měření teplotního profilu při pomoci Probodu*. Do OK startu bude zapsaná hodnota PWI první desky, která bude zobrazena v křišťálové kouli na pravé straně obrazovky.

V případě, že pro nějakou výrobu nebude vytvořen referenční profil, musí dojít k ověření teplotního profilu dle pravidel popsaných v bodě 5.3.1.



Měření a vyhodnocení

Způsob vyhodnocení a reakce na výsledky je popsán v PPV 2015/034.

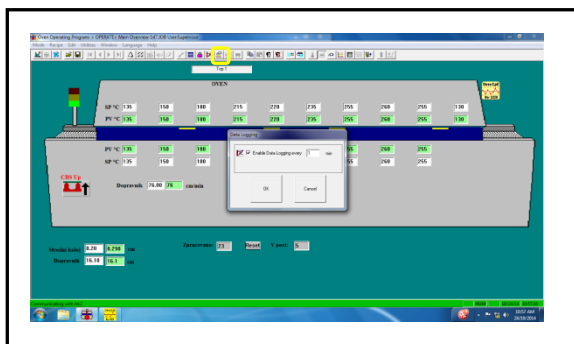
Obecné pravidlo zní:

1. Pokud PWI bude menší než 100%- křišťálová koule svítí zeleně a výroba se smí rozjet nebo může pokračovat.
2. Pokud PWI bude větší než 100%- křišťálová koule svítí červeně, ozve se zvuková signalizace a výroba se nesmí rozjet nebo pokračovat, dojde k zastavení dopravníku před pecí až do doby odstranění problému a objevení zelené koule.

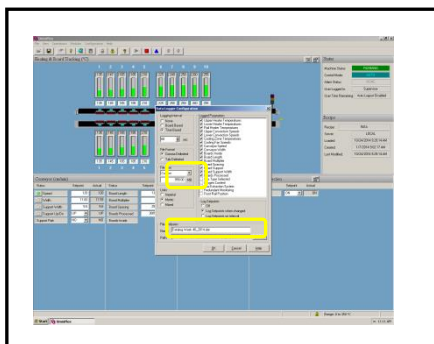
6. Deník události

Všechny Reflow pece mají možnost zápisu provedených směn a akcí. Aby mohlo dojít k pravidelnému zápisu událostí, jsou nutné následující kroky.

1. Na peci typu Heller je nutno nastavit „logování dat“ každou minutu.



2. Na peci typu Omniflex je nutno upravit velikost souboru na maximální hodnotu 999 Mb. Zároveň, každý měsíc je nutno změnit jméno souboru na „Datalog Week aktuální týden_aktuální rok.dat“ na příklad „Datalog Week 40_2014.dat“ aby nedošlo k přepsání deníku a ztrátě dat.



3. Při instalaci jiného modelu pece nezměněného v bodech 1-2, musí dojít k úpravě parametru logování dat, aby byl zajištěn pravidelný zápis událostí.