

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



Posouzení pájecích past z pohledu exspirace

Assessment of solder pastes from the perspective of expiration

Diplomová práce

Master thesis

Bc. Daniel Koc

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Bc. Karel Dušek, Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

Praha, 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Koc** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **460528**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Posouzení pájecích past z pohledu expirace

Název diplomové práce anglicky:

Assessment of solder pastes from the perspective of expiration

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s materiály, pájecími pastami a jejich vlastnostmi.
- 2) Posuďte vlastností exspirované a neexspirované pájecí pasty.
- 3) Výsledky analýz vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [2] Pietriková A., Ďurišín J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Bc. Karel Dušek, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **16.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **21.09.2025**

prof. Ing. Bc. Karel Dušek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 20. května 2024

Daniel Koc

Poděkování

Na tomto místě bych rád vyjádřil můj vděk všem, kteří se jakkoli podíleli na realizaci této diplomové práce. Zejména bych chtěl poděkovat prof. Ing. Bc. Karlu Duškovi, Ph.D. za jeho čas, odborné vedení, cenné rady a podporu během mého magisterského studia. Dále bych rád poděkoval Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D., Ing. Dominiku Pilnajovi a Ing. Martinu Plačkovi, Ph.D., za jejich pomoc při realizaci experimentální části této práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na problematiku pájecích past a jejich stárnutí. První část obsahuje stručnou rešerši o technologii povrchové montáže (SMT) a pájecích pastách. Dále se práce zabývá vybranými chybami spojenými se SMT a výskytem a vlivem intermetalických sloučenin na pájený spoj. Na závěr rešeršní části je rovněž popsána řada testovacích metod, které jsou dále použity v experimentální části této práce pro posouzení pájecích past z pohledu jejich stárnutí. Cílem experimentální části práce bylo nalézt a použít vhodné metody analýzy pájecích past pro sledování změn jejich vlastností v čase. Praktická část práce obsahuje detailní snímky pájecí pasty a jejích pájecích zrn a popisuje aplikaci jednotlivých zmíněných testovacích metod na sledované vzorky různě starých pájecích past.

Klíčová slova

Pájecí pasta, intermetalické sloučeniny, plynová chromatografie, mikroskopie, meniskograf, metoda smáčecích vah.

Abstract

This master's thesis examines the aging process of solder pastes. The first part provides a brief overview of surface mount technology (SMT) and solder pastes. Additionally, it discusses selected defects associated with SMT, along with the occurrence and impact of intermetallic compounds on solder joints. Finally, the review section describes a series of testing methods, subsequently utilized in the experimental part of this thesis to assess solder pastes from the perspective of their aging. The aim of the experimental section was to identify and employ suitable methods for analyzing solder pastes to monitor changes in their properties over time. The practical part of the thesis describes the application of each of the mentioned testing methods on investigated samples of solder pastes of various ages and includes detailed images of solder paste and its solder grains.

Keywords

Solder paste, intermetallic compounds, gas chromatography, microscopy, meniscograph, wetting balance method.

Seznam použitých zkratk

DPS	Deska plošného spoje
SMT	Povrchová montáž (Surface Mount Technology)
SMD	Součástky používané při povrchové montáži (Surface Mount Device)
THT	Technologie s otvory (Through-Hole Technology)
OEEZ	Směrnice o odpadu z elektrických a elektronických zařízení
RoHS	Směrnice o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních (Restriction of Hazardous Substances)
IMC	Intermetalická sloučenina (Intermetallic Compound)
ENIG	Povrchová úprava DPS na bázi niklu a zlata (Electroless nickel immersion gold)
SAC	Pájecí slitina cínu, stříbra a mědi (Sn, Ag, Cu)
SC	Pájecí slitina cínu a mědi (Sn, Cu)
AOI	Automatická optická kontrola (Automated Optical Inspection)
BGA	Typ pouzdra integrovaného obvodu pro povrchovou montáž (Ball Grid Array)
OSP	Typ povrchové úpravy DPS na bázi organického povlaku (Organic Solderability Preservative)
CWR-DVB-PDMS	Směs aktivního uhlí, divinylbenzenu a polydimethylsiloxanů
GC-MS	Plynová chromatografie s hmotnostní spektrometrií (Gas Chromatography – Mass Spectrometry)
FR4	Typ kompozitního substrátu desky plošného spoje vyrobeného ze skleněné tkaniny a epoxidové pryskyřice (Flame-Retardant 4)

Obsah

ÚVOD.....	9
1 Technologie povrchové montáže.....	10
1.1 Nanášení pájecí pasty.....	11
1.1.1 Šablonový tisk.....	11
1.1.2 Sítotisk.....	11
1.1.3 Dávkování pomocí dispenzeru.....	11
2 Pájecí pasta.....	12
2.1 Pájecí zrna.....	12
2.2 Tavidla.....	13
2.2.1 Pyskyřičné pájecí pasty.....	13
2.2.2 Vodou omyvatelné pájecí pasty.....	13
2.2.3 Pájecí pasty No-clean.....	14
2.3 Používané pájecí pasty.....	14
3 Vady.....	16
3.1 Bleeding.....	16
3.2 Bridging.....	16
3.3 Nedostatečné množství pájecí pasty.....	17
3.4 Vrcholky/psí uši.....	17
3.5 Scooping/Scavenging.....	18
3.6 Slumping.....	19
3.7 Voiding.....	19
3.8 Tombstoning.....	20
3.9 Skewing.....	20
3.10 Solder Graping.....	21
3.11 Solder Balling/Beading.....	21
4 Intermetalické sloučeniny.....	23
4.1 Cu_6Sn_5	24
4.2 Cu_3Sn	24
4.3 Ag_3Sn	24
4.4 Ni_3Sn_4	24
5 Testovací metody.....	25
5.1 Roztékavost.....	25
5.2 Metoda smáčekcích vah.....	25
5.3 Kuličkový test (Globule Test).....	28
5.4 Dynamická viskozita.....	29
5.5 Plynová chromatografie s hmotnostní spektrometrií.....	29

5.6	Metalografické výbrusy	30
6	Praktická část.....	31
6.1	Mikroskopické snímky pájecích zrn	31
6.2	Metalografické výbrusy	34
6.3	Roztékavost	38
6.4	Dynamická viskozita.....	42
6.5	Plynová chromatografie	43
6.6	Smáčecí váhy	47
6.7	Kuličkový test.....	51
7	Závěr.....	55
	Zdroje.....	58
	Seznam tabulek.....	62
	Seznam grafů.....	62
	Seznam obrázků	62

ÚVOD

Nástup technologie povrchové montáže (anglicky *Surface Mount Technology* – SMT) zásadně změnil elektronický průmysl. SMT umožnila miniaturizaci a zvýšení výkonu elektronických zařízení díky umístění komponent přímo na povrch desky plošného spoje (DPS). Technologie SMT vedla ke snížení hmotnosti, zlepšení elektrické účinnosti a zvýšení efektivity výroby DPS v porovnání s technologií s otvory (anglicky *Through-Hole Technology* – THT) [1], [2], [3], [4].

Jedním z klíčových prvků v procesu SMT je použití pájecí pasty. Pájecí pasty zajišťují propojení elektronických komponent s vodivými cestami na DPS. Jedná se o kompozitní materiál obvykle složený z kovového prášku a tavidla [5], [6], [7].

V reakci k rychle rostoucímu množství spotřební elektroniky a stupňujícímu se problému s odpadními elektrickými a elektronickými zařízeními (OEEZ) byla v lednu roku 2003 zavedena směrnice omezující užívání některých nebezpečných látek v elektronických a elektrických zařízeních (RoHS) [8]. Tato směrnice mimo jiné omezila používání olova, což vyžadovalo nalezení nového složení pájek a pájecích past [9].

U pájecích past hraje kritickou roli jejich trvanlivost. Trvanlivost pájecích past označuje dobu, po kterou si pasta zachovává ideální vlastnosti pro své použití. Trvanlivost neovlivňuje pouze kvalitu a spolehlivost výrobku, ale má rovněž ekonomické důsledky [10], [11].

Cílem této diplomové práce je prozkoumat vliv skladování pájecích past na jejich degradaci vnějším prostředím, především teplotou při jejich skladování, a vliv chemických reakcí doprovázejících stárnutí past, jako je oxidace nebo tvorba intermetalických sloučenin na povrchu pájecích zrn.

1 Technologie povrchové montáže

Rozvoj elektroniky neustále pokračuje a tento nepřetržitý pokrok vyžaduje stále sofistikovanější osazování DPS se stále složitějšími elektrickými obvody.

Povrchová montáž (SMT) má své počátky datované do 60. let 20. století a původně se nazývala „*Planar Mounting*“. Prvním známým uživatelem SMT byla firma IBM, která tuto technologii poprvé použila při výrobě malých počítačů. Nicméně větší rozšíření SMT přišlo až po roce 1986, kdy takto montované součástky dosáhly 10% podílu na trhu. V dnešní době se SMT stala standardem a nachází své uplatnění v téměř všech elektronických zařízeních, od dětských hraček až po chytré telefony a notebooky. Aktuálně neexistuje žádná technologie, která by nahradila SMT, a zdá se, že nám tato osvědčená metoda bude ještě dlouhou dobu spolehlivě sloužit [12].

SMT představuje metodu pro přímé osazování a upevňování elektrických součástek na povrch DPS. Jednou z výhod oproti svému předchůdci, technologii s otvory (THT), která vyžadovala vyvrtané otvory v DPS, kam byly instalovány vývody součástek a následně byly tyto vývody zpravidla z druhé strany k DPS připájeny, je možnost miniaturizace součástek a omezení nutnosti vrtání děr do DPS pro zmíněné vývody součástek. To vedlo k výraznému zkrácení doby procesu osazování DPS. Současně tato technologie umožnila zvýšit hustotu jejich osazení [1].

Další výhodou SMT oproti THT vedle zmíněného zmenšování součástek používaných pro povrchovou montáž (anglicky *Surface Mount Devices* – SMD) vedoucí k možnosti hustšího osazování DPS je s tím spojené snížení jejich hmotnosti po osazení. SMT rovněž umožňuje osazení obou stran DPS bez omezení způsobených dírami, které se používaly v technologii THT. Klíčový benefit SMT, který vedl k rozšíření této technologie, představuje možnost rychlého a přesného automatizovaného osazování DPS. Tato efektivní automatizace následně přispěla ke snížení výrobních nákladů, neboť proces tvarování vývodů často nebýval snadný a vyžadoval více času. DPS osazené metodou SMT jsou méně náchylné na otřesy ve srovnání s DPS osazenými metodou THT. Obecně se rovněž zvýšila jejich spolehlivost [1], [4], [12], [13]. SMT dále umožnila i rozvoj flexibilních desek a používání komponent s jemnou roztečí („*fine pitch*“ komponenty) [2], [13].

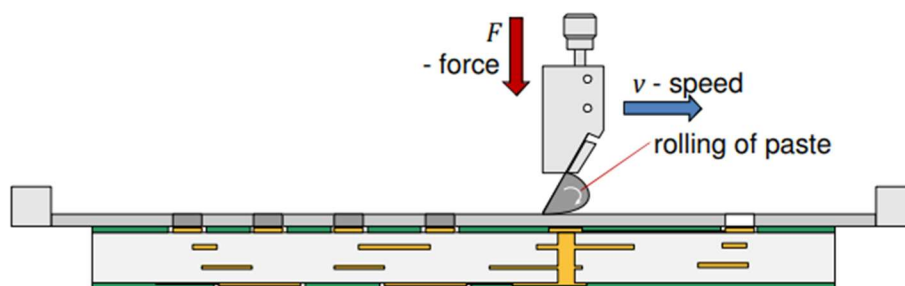
Mezi nevýhody SMT patří nutnost vyšší vstupní investice do nákladného vybavení, jako jsou přetavovací pec, stroj *Pick and Place*, šablonový tisk pájecí pasty nebo horkovzdušný SMD stroj pro případné opravy. Další nedostatek představují vyšší náklady pro malosériovou výrobu DPS. Vzhledem k tomu, že se komponenty zmenšují a některé typy jsou připájeny na své spodní straně k DPS, možnosti kontroly kvality pájeného spoje jsou u této technologie omezené. SMD jsou obvykle citlivější na elektrostatické výboje ve srovnání se staršími součástkami používanými při THT montáži [2], [14].

1.1 Nanášení pájecí pasty

V oblasti SMT existují různé metody pro aplikaci pájecí pasty na substrát. Každá z těchto metod má své výhody i nevýhody, které závisí na konkrétním účelu a rozsahu použití. Následující podkapitoly představí několik praktických způsobů, jak se pájecí pasta na DPS nanáší.

1.1.1 Šablonový tisk

Jako šablona se u šablonového tisku obvykle používá tenký kovový plech s precizně připravenými otvory, které odpovídají umístění pájecích plošek. Šablonový tisk je ideální pro velkosériovou výrobu a aplikaci na pevné substráty. Tato metoda nabízí vysokou rychlost, přesnost, a především opakovatelnost nanášení pájecí pasty na podklad. Vyžaduje však vyrobit specifickou šablonu pro danou DPS.



Obrázek 1: Ukázka principu šablonového tisku [15].

1.1.2 Sítotisk

Sítotisk, jako předchůdce šablonového tisku, využívá síto s otvory pro nanášení pájecí pasty na DPS. Síto je umístěno na desku a pasta je protlačována otvory pomocí stěrky. Tato metoda je vhodná pro malosériovou výrobu, výrobu prototypů a lze ji využít i pro aplikaci pasty na pružné substráty. Nicméně sítotisk je méně přesný a konzistentní ve srovnání se šablonovým tiskem a vyžaduje více pasty a čistících materiálů.

1.1.3 Dávkování pomocí disperzeru

Tato metoda zahrnuje nanášení pájecí pasty na DPS pomocí zařízení, které deponuje malé množství pasty tryskou. Tento postup může usnadnit práci s DPS s nepravidelným tvarem pájecích plošek a při použití vhodného disperzeru rovněž umožňuje práci s „fine-pitch“ součástkami. Dávkování s disperzerem se také často využívá pro aplikaci lepidel. Jedná se o pomalejší a méně přesnou metodu ve srovnání s ostatními zmíněnými metodami a vyžaduje pravidelné čištění a údržbu dávkovače.

2 Pájecí pasta

Pájecí pasty představují klíčovou součást metody SMT. Jedná se o kompozitní materiály, které zajišťují spojení mezi součástkou a DPS. Pájecí pasty se skládají ze směsi zrn pájecí slitiny, která tvoří základ pro vytvoření kovového spoje, a tavidla. Tavidlo napomáhá odstraňování oxidů, zbytků a dalších nečistot ze spojovaných povrchů a zároveň zlepšuje smáčivost povrchu během pájecího procesu. Tato směs je pečlivě promíchána tak, aby vytvořila hustou a lepidelnou pastu. Většina výrobců uvádí životnost svých pájecích past 3 až 6 měsíců při dobrém zacházení. Po uplynutí této doby nebo vystavení pájecí pasty vyšším okolním teplotám může dojít ke změně jejich vlastností a chování [6], [16], [17], [18], [19], [20], [21].

2.1 Pájecí zrna

Hlavní složkou pájecí pasty, která představuje přibližně 90 % její hmotnosti, jsou již zmíněná pájecí zrna. Výrobní proces těchto zrn je poměrně komplexní. Začíná tím, že se tavenina požadované slitiny nejprve odlévá do tyče odpovídající kvality. Použití tyče namísto taveniny umožňuje lepší kontrolu nad množstvím přivedeného kovového materiálu a zajišťuje stabilnější proces takzvané atomizace. Během procesu atomizace jsou tyto tyče postupně roztaveny a kapičky taveniny dopadají na rychle se otáčející podložku. Dopadající částice taveniny jsou následně rozptýleny odstředivou silou do prostoru komory atomizačního stroje s argonovou nebo dusíkovou atmosférou. Atmosféra tvořená inertním plynem je zde použita proto, aby se zamezilo oxidaci vznikajících zrn. Díky povrchovému pnutí materiálu se tato zrna začnou tvarovat před svým ztuhnutím do pravidelných kulovitých útvarů o průměru do 180 μm . Následuje prosetí vzniklých zrn pájky skrze různě hrubá síta, aby došlo k rozdělení dle jejich průměru. Dlouhou dobu byly v oblasti SMT dominantní pájecí pasty s průměrem většiny zrn prášku mezi 25 a 45 μm (typ 3). V současné době se častěji upřednostňují pájecí pasty, jejichž většina částic má průměr v rozmezí od 20 do 38 μm (typ 4) [22], [23], [24].

Tabulka 1: Rozdělení pájecích past podle velikosti pájecích zrn dle ANSI/J-STD-005 [25], [26].

Typ pasty	<0,005 % větších zrn než [μm]	<1 % větších zrn než [μm]	>90 % zrn mezi [μm]	>10 % menších zrn než [μm]
1	180	150	75-150	75
2	90	75	45-75	45
3	53	45	25-45	25
4	45	38	20-38	20
5	32	25	15-25	15
6	25	15	5-15	5

2.2 Tavidla

Další složkou pájecí pasty jsou tavidla. Tavidla se dělí na tavidla s pryskyřicí a tavidla bez pryskyřice. Volbou různých typů tavidel můžeme vytvořit pájecí pasty, které jsou vhodné pro různé aplikace a vyhovují různým podmínkám prostředí. Materiál použitý pro tavidlo se rozpouští ve vhodném rozpouštědle. V rámci procesu rozpouštění je možné dále přidat aktivátory. Charakteristiky tavidla závisí na molekulární struktuře chemické látky, jejích fyzikálních vlastnostech a okolním prostředí. Třídění typů tavidel může být založeno například na aktivitě tavidla a povaze zbytků, které zůstávají po pájení přetavením [18], [22].

Tabulka 2: Rozdělení tavidel [18].

Typ tavidla	Základ tavidla	Aktivátor
Pryskyřičné	Kalafuna	Bez aktivátoru Halogenové Nehalogenové
	Umělá pryskyřice	
Organické	Vodou rozpustné	
	Vodou nerozpustné	
Anorganické	Soli	Chlorid amonný
		Bez chloridu amonného
	Kyseliny	Kyselina fosforečná
		Jiná kyselina
Zásady	Čpavek a jeho aminy	

Na základě volby tavidla rovněž můžeme rozdělit pájecí pasty na pryskyřičné, vodou omyvatelné a pájecí pasty nevyžadující čištění (No-clean) [17], [19], [22].

2.2.1 Pryskyřičné pájecí pasty

Pryskyřičné pájecí pasty představují nejběžnější typ pájecích past. Jako tavidlo se používá přírodní kalafuna nebo syntetická pryskyřice s přídatnými rozpouštědly. Pájecí pasty na bázi pryskyřice obvykle vykazují lepší viskozitu a vyžadují nižší teplotu pro své přetavení. Tyto pasty jsou vhodné pro čisté a snadno pájitelné povrchy. Zbytky po těchto pastách po pájení je nutné očistit specializovanými rozpouštědly na bázi alkoholu [17], [18], [19], [22].

2.2.2 Vodou omyvatelné pájecí pasty

Při použití těchto pájecích past lze zbytky kolem pájeného spoje snadno odstranit vodou. Tyto zbytky mohou způsobit kontaminaci a korozi spoje. Většinou jsou použita silně aktivovaná tavidla, která dopomáhají dobré smáčivosti povrchu díky vysoké účinnosti při odstraňování

oxidačních vrstev. Primárně se jedná o tavidla organického původu (jiného než pryskyřice), často na bázi organických kyselin. Používaná tavidla pro svou aktivaci nevyžadují vysokou teplotu pájení, což znamená, že nedochází k nadměrnému tepelnému namáhání a degradaci pájených součástí [18], [19], [27].

2.2.3 Pájecí pasty No-clean

Bezoplachové pájecí pasty zpravidla nevyžadují dodatečné čištění po dokončení pájecího procesu, neboť tavidlo zanechává jen velmi málo zbytků v okolí pájených spojů. Použitá tavidla jsou méně aktivní. Případné zbytky jsou inertní, nekorozivní a neměly by mít tedy vliv na spolehlivost a životnost zařízení. Tím se stávají preferovanou variantou pájecích past pro použití s choulostivými součástkami. Také se osvědčují v situacích, kdy je čištění obtížné, nebo nemožné. V případě nutnosti očištění okolí pájeného spoje lze využít kombinaci vody s rozpouštědlem. Složení těchto tavidel je často na bázi kalafuny s nižší úrovní aktivity [17], [18], [28].

2.3 Používané pájecí pasty

S úmyslem ochránit životní prostředí byla v lednu roku 2003 zavedena směrnice RoHS. Jejím cílem bylo omezení používání nebezpečných látek u elektrických a elektronických zařízení s cílem přispět k ochraně životního prostředí a lidského zdraví. Směrnice RoHS omezuje používání nejen olova, ale rovněž rtuti, kadmia, šestimocného chrómu a polybromovaných bifenyků a difenyletherů [8], [9].

S ohledem na omezení používání olova bylo nutné hledat alternativy pro dříve nejběžněji používanou pájecí slitinu SnPb. Tato alternativní slitina by měla ideálně vykazovat eutektické vlastnosti (směs dvou nebo více látek se stejnou teplotu tání i tuhnutí), nízký elektrický odpor, dobré mechanické vlastnosti, vysokou spolehlivost, příznivé smáčecí charakteristiky, kompatibilitu s elektronickými součástkami, ohleduplnost k životnímu prostředí a neměla by být příliš drahá [9].

Dokonalý substitut pro dříve používanou slitinu SnPb neexistuje. Na jejím místě se v dnešní době začala používat pájecí slitina Sn-Ag-Cu (SAC). SAC nabízí dobrou spolehlivost a vyhovuje aktuálním ekologickým předpisům [9].

Označení SAC305 skrývá v dnešní době nejčastěji používanou pájecí slitinu, která se skládá z 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Váhové složení pájecích slitin SAC se však liší výrobce od výrobce. Někteří do svých slitin SAC pro zvýšení spolehlivosti pájeného spoje mohou přidávat prvky jako jsou například antimon, indium, či jiné [29], [30].

Další používanou alternativou olověných pájek je SC běžně se skládající z 99,3 % cínu a 0,7 % mědi. Tato slitina má vyšší teplotu tání než SAC a rovněž vykazuje horší mechanické vlastnosti. Její výhodou je její nízká cena [30].

V dnešní době jsou důkladně zkoumány slitiny založené na kombinaci cínu a bismutu. Slitiny SnBi totiž disponují výhodou nízké teploty tání, a to nižší dokonce nežli pájecí slitiny SnPb. Běžné složení čisté SnBi pájky bývá 58 % bismutu a 42 % cínu [30], [31].

Tabulka 3: Srovnání teploty tání zmíněných pájecích slitin [30], [31], [32].

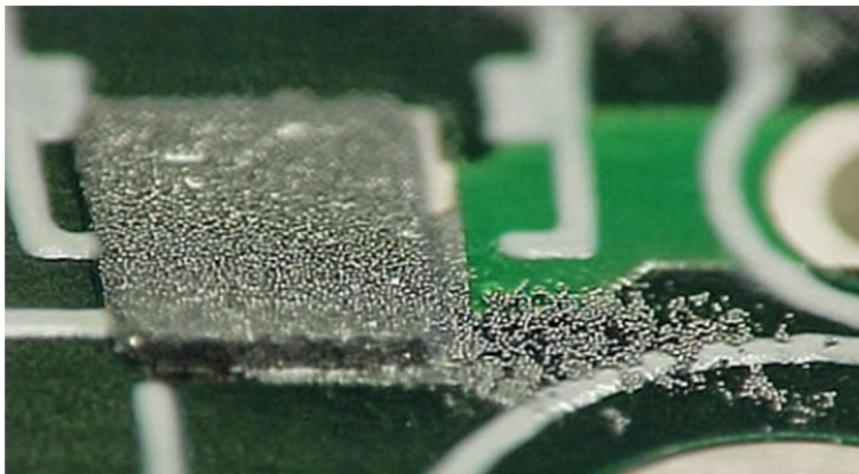
SnPb	SnBi	SAC	SC
183 °C	138 °C	217 °C	227 °C

3 Vady

Tato kapitola bude zaměřena na různé typy vad, které mohou souviset s pájecí pastou. Příčiny výskytu těchto vad mohou často zahrnovat širokou škálu faktorů. Jedním z hlavních faktorů může být technologie nanášení pájecí pasty. Dalším aspektem ovlivňujícím vlastnosti pájecí pasty, který může ovlivnit potenciální výskyt vad, je samotné složení pájecí pasty. V následujících podkapitolách bude zmíněno několik z možných vad, které se v praxi mohou u SMT vyskytnout.

3.1 Bleeding

Vytečení pájecí pasty (*bleeding*) představuje vadu, která se může vyskytnout během procesu tisku pájecí pasty na DPS. Tato vada spočívá v prosakování nebo šíření pájecí pasty mimo zamýšlené oblasti pájecích plošek. K této vadě dochází například při použití nevhodně vyrobených šablon nebo při špatném vyrovnání šablony s DPS. Vytečení pájecí pasty může vést k nechtěnému elektrickému propojení sousedních pájecích plošek a způsobit zkrat na DPS nebo může způsobit kontaminaci samotné šablony a tiskového zařízení, což dále vede k nekonzistentnímu nanášení pájecí pasty [33].

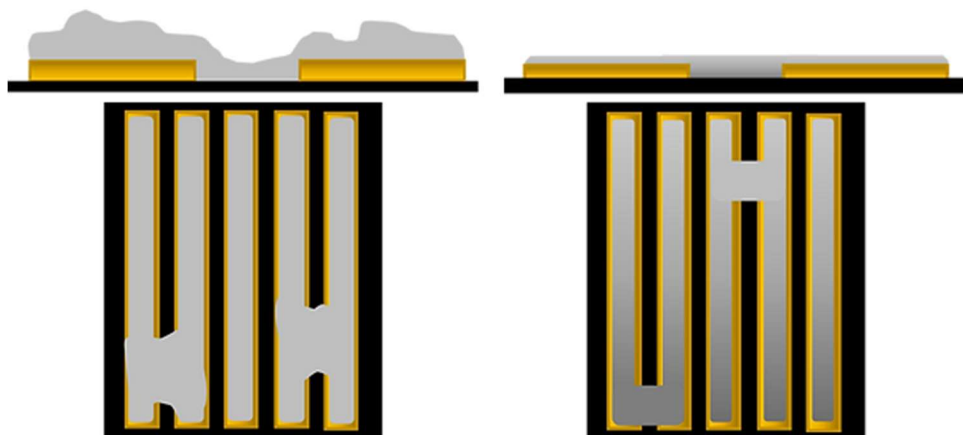


Obrázek 2: Ukázka vytečení pájecí pasty [33].

3.2 Bridging

Přemostění pájky (*bridging*) patří k běžným závadám při SMT. Dochází k němu tehdy, když nadbytečná pájecí pasta neúmyslně propojí sousední pájecí plošky a vytvoří mezi nimi vodivé propojení. Důsledkem vzniku těchto můstků může být ztráta funkčnosti nebo snížení spolehlivosti DPS a může vést k jejímu zkratování. Možnými důvody pro výskyt přemostění jsou nadměrné množství pájecí pasty, kontaminace šablony pro nanášení pájecí pasty, špatný návrh pájecích plošek v poměru k mezerám mezi nimi nebo nesprávné umístění součástek. Pro snížení pravděpodobnosti výskytu přemostění je vhodné zkontrolovat množství nanášené pájecí pasty na pájecí plošky (tloušťku šablony), řádně umístit šablonu na DPS a po každém

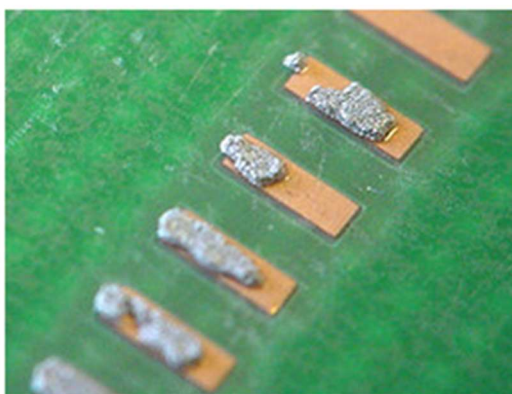
použití šablonu očistit. Po procesu přetavení je vhodné DPS podrobit vizuální nebo automatické kontrole pájecí pasty (anglicky *Automated Optical Inspection* – AOI) pro identifikování případných vad před jejím použitím [34], [35], [36], [37].



Obrázek 3: Pohled z boku a shora na bridging. Vlevo ukázka bridgingu před přetavením, vpravo ukázka bridgingu po přetavení [28].

3.3 Nedostatečné množství pájecí pasty

Při tisku pájecí pasty na DPS může dojít k nanesení jejího nedostatečného množství. To může způsobit vznik otevřeného spoje a snížit spolehlivost DPS. Možnými příčinami nanesení nedostatečného objemu pájecí pasty jsou například příliš nízká viskozita pájecí pasty způsobená nevhodnými vnějšími podmínkami při nanášení pájecí pasty (jako jsou příliš vysoká teplota či vlhkost), přítomnost větších pájecích zrn (ta mohou ovlivnit tok a uvolňování pájecí pasty ze šablony), ucpaný otvor šablony či přilepení pájecí pasty ke spodní části šablony [38].

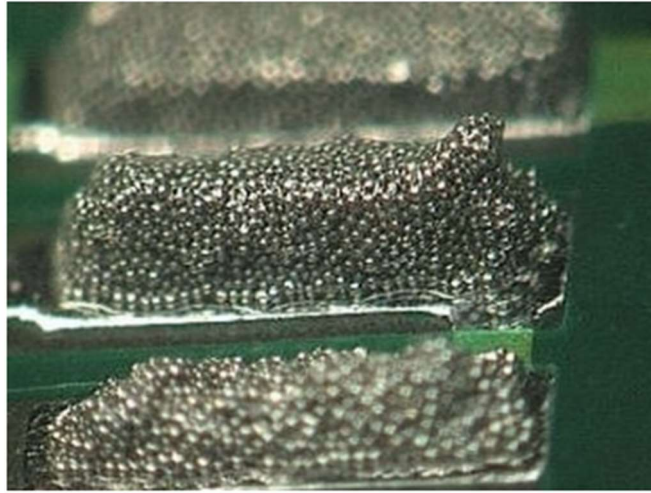


Obrázek 4: Ukázka nedostatečného množství pájecí pasty na pájecích ploškách [28].

3.4 Vrcholky/psí uši

Další vyskytující se vadou tisku pájecí pasty jsou takzvané „psí uši“. Tato vada způsobuje vytváření nepravidelných výstupků pájecí pasty na okrajích pájecích plošek, což negativně

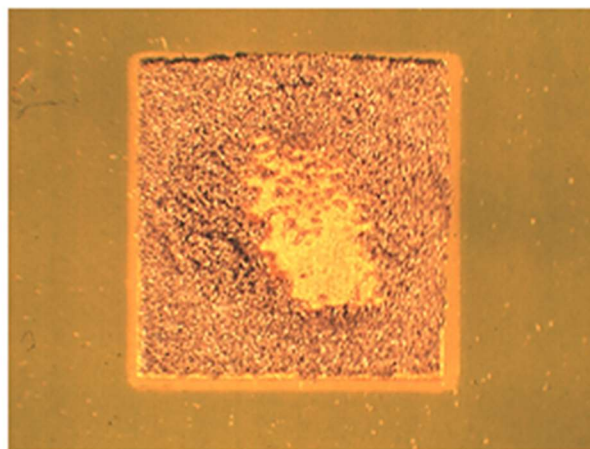
ovlivňuje konzistenci umístění součástek a může vést k dalším vadám DPS. Příčiny vzniku této vady mohou zahrnovat například nevhodný návrh šablony, příliš rychlé odebírání šablony z DPS nebo přítomnost zbytků pájecí pasty na šabloně [39].



Obrázek 5: Ukázka – „psí uši“ [39].

3.5 Scooping/Scavenging

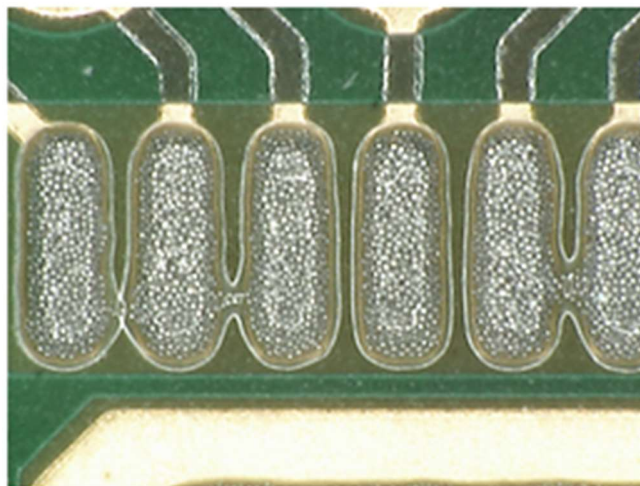
Další vada vyskytující se při používání šablonového tisku je takzvaný „*scooping*“ nebo „*scavenging*“. Tato vada způsobuje vznik mezer ve vrstvě nanesené pájecí pasty, což má negativní vliv na spolehlivost a pevnost vzniklého pájeného spoje, a může v krajních případech vést k rozpojení elektrického obvodu. Výskyt vady může být způsoben například nevyváženým tlakem stěrky, nevhodným sklonem stěrky nebo její nadměrnou rychlostí. Další možné příčiny této vady jsou zbytky pájecí pasty na šabloně nebo nevhodná viskozita pájecí pasty pro danou aplikaci [40].



Obrázek 6: Ukázka – *scooping* [28].

3.6 Slumping

Slumping neboli sesuv pájecí pasty představuje vadu tisku pájecí pasty, při které dojde k vytečení pasty ze zamýšlené polohy, což způsobí změnu tvaru nanesené pasty. *Slumping* může ovlivnit kvalitu a spolehlivost pájeného spoje a způsobit jiné vady jako jsou například bridging nebo nedostatečný objem pájecí pasty pro vznik spolehlivého pájeného spoje. Můžeme rozlišit studený sesuv a horký sesuv pájecí pasty. Stupeň poklesu za studena je určen výškou nánosu pájecí pasty. K horkému sesuvu dochází, když aplikované teplo sníží viskozitu tavidla, které se následně roztéká po povrchu spolu s částicemi pájecí slitiny. U past používajících tavidla rozpustná ve vodě je pravděpodobnost vzniku horkého propadu vyšší než u No-clean past. Mezi faktory vedoucí k výskytu této vady patří vystavení pájecí pasty vyšším teplotám při skladování nebo změna konzistence a tokových vlastností pasty v důsledku jejího vystavení zvýšené vlhkosti [41].

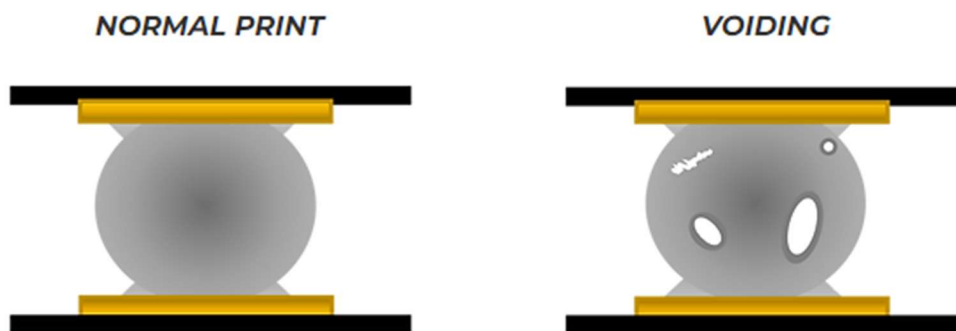


Obrázek 7: Ukázka – slumping [28].

3.7 Voiding

Termín “*voiding*” označuje vytváření dutin v pájených spojkách. Tato vada ovlivňuje kvalitu a spolehlivost pájených spojů, protože může snížit tepelnou a v některých případech i elektrickou vodivost, zvýšit mechanické namáhání a způsobit praskání či delaminaci. Ke vzniku *voidingu* může docházet například při odpařování tavidla, zachycením vzduchu nebo vlhkosti během nanášení pájecí pasty, oxidací pájky nebo substrátu, nerovnováhou tepelné roztažnosti a nevhodným zvolením profilu přetavení [42], [43].

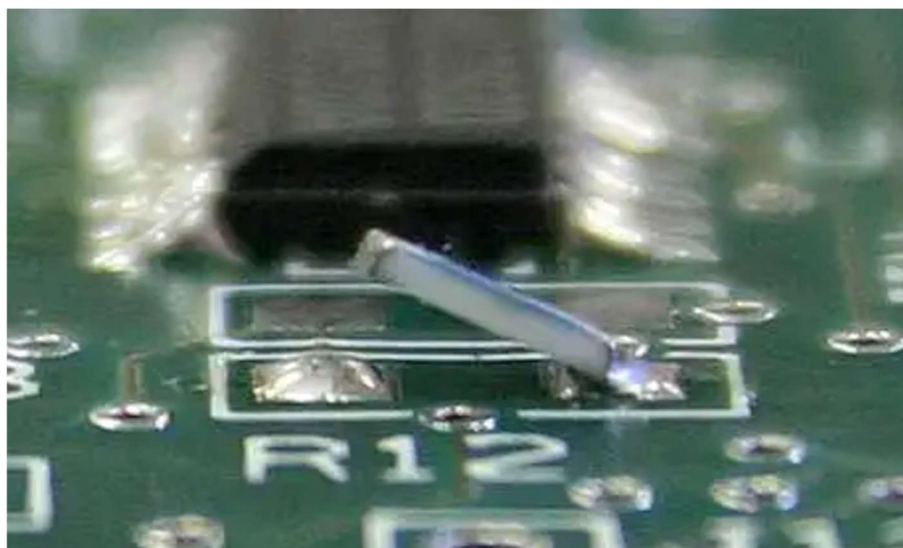
Voiding ovlivňuje geometrii a mikrostrukturu pájených spojů a může přispět k rozvoji trhlin, což může negativně ovlivnit termomechanickou spolehlivost těchto spojů. Přítomnost mezer či děr ovlivňuje schopnost přenosu tepla mezi součástkou a pájecí ploškou. Tato vada obvykle nemá výrazný vliv na elektrickou funkčnost součástek, s výjimkou případů, kdy se jedná o vysokofrekvenční nebo vysokoproudové aplikace [43].



Obrázek 8: Pohled z boku na dutiny v pájeném spoji [28].

3.8 Tombstoning

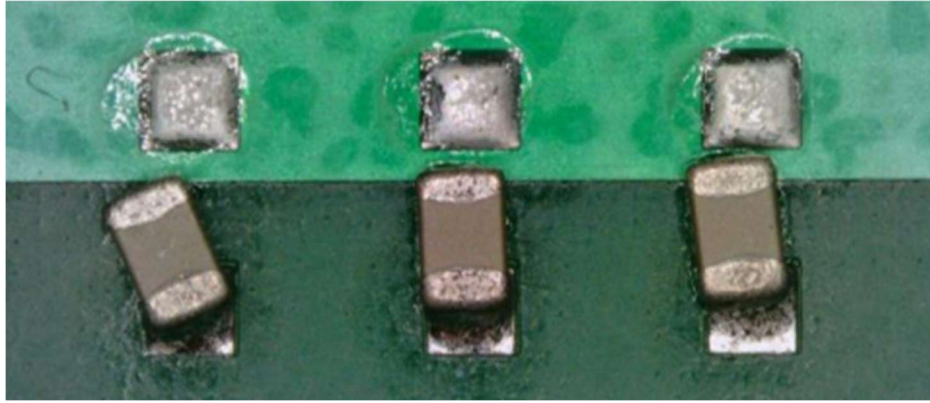
Efekt náhrobního kamene, známý též jako *tombstoning*, vzniká především v důsledku nerovnováhy smáčecích sil během pájecího procesu. Tato nesymetrie může být způsobena teplotními rozdíly mezi pájecími ploškami, rozdílnou velikostí a geometrií pájecích plošek, nesprávným umístěním součástky na pájecí plošky nebo nerovnoměrným nanesením vrstvy pájecí pasty. Pravděpodobnost výskytu tohoto jevu se zvyšuje při použití inertní atmosféry během procesu pájení. Pro snížení pravděpodobnosti výskytu *tombstoningu* může tedy pomoci použití slabší inertní atmosféry nebo využití teplotního profilu s pomalejším nárůstem teploty (snížením gradientu před roztavením) [44], [45], [46], [47].



Obrázek 9: Ukázka – tombstoning [46].

3.9 Skewing

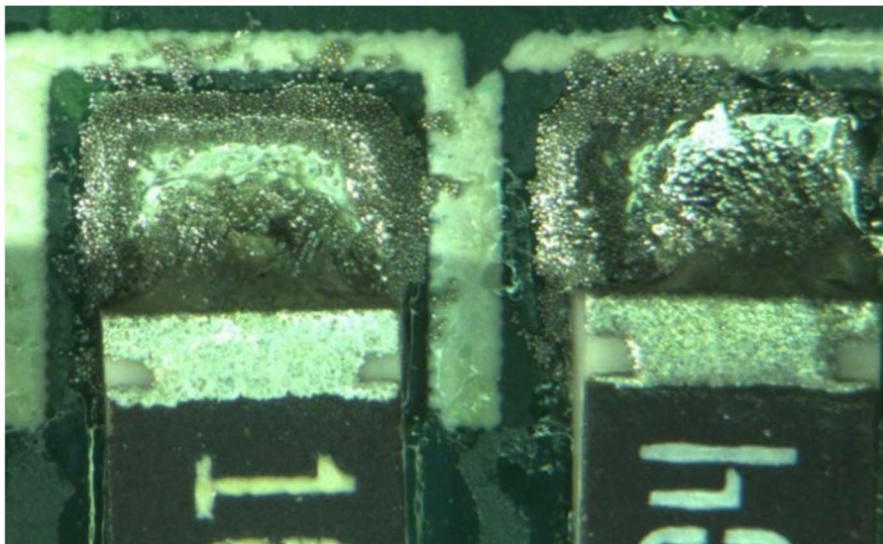
V případě, kdy nedojde k přetavení obou pájených spojů současně, může dojít k natočení součástky vlivem nerovnováhy sil působících na součástku (anglicky *skewing*). Tato vada ovlivňuje spolehlivost pájených spojů a může způsobit špatný či žádný elektrický kontakt [48].



Obrázek 10: Ukázka posunutých a zkosených komponent [49].

3.10 Solder Graping

Solder graping je jev, který se projevuje po procesu pájení, kdy nedošlo k úplnému roztavení pájecích zrn. Tato anomálie se častěji vyskytuje při použití bezolovnatých pájecích past, a to zejména při použití past s jemnějšími pájecími zrny, která jsou náchylnější k oxidaci povrchu po odpaření tavidla. Zoxidovaná pájecí zrna se nespojí s okolní pastou a po jejich zchladnutí vytvoří na povrchu neprostupnou vrstvu, která připomíná hrozen, což dalo této vadě název "*solder graping*". Tato vada ovlivňuje kvalitu a spolehlivost vzniklých pájených spojů tím, že zmenšuje kontaktní plochu a zvyšuje jejich elektrický odpor. V extrémních případech může vést i k vytváření *bridgingu* nebo *tombstoningu* [50], [51].



Obrázek 11: Ukázka – solder graping [51].

3.11 Solder Balling/Beading

Hlavní příčinou vzniku kuliček pájky (anglicky *solder balling* nebo *solder beading*) je nadměrné vytlačování pájecí pasty v okolí pájecích plošek. Dalším možným faktorem může být nevhodný teplotní profil přetavení pro danou pájecí pastu obsahující tavidlo, které nebylo

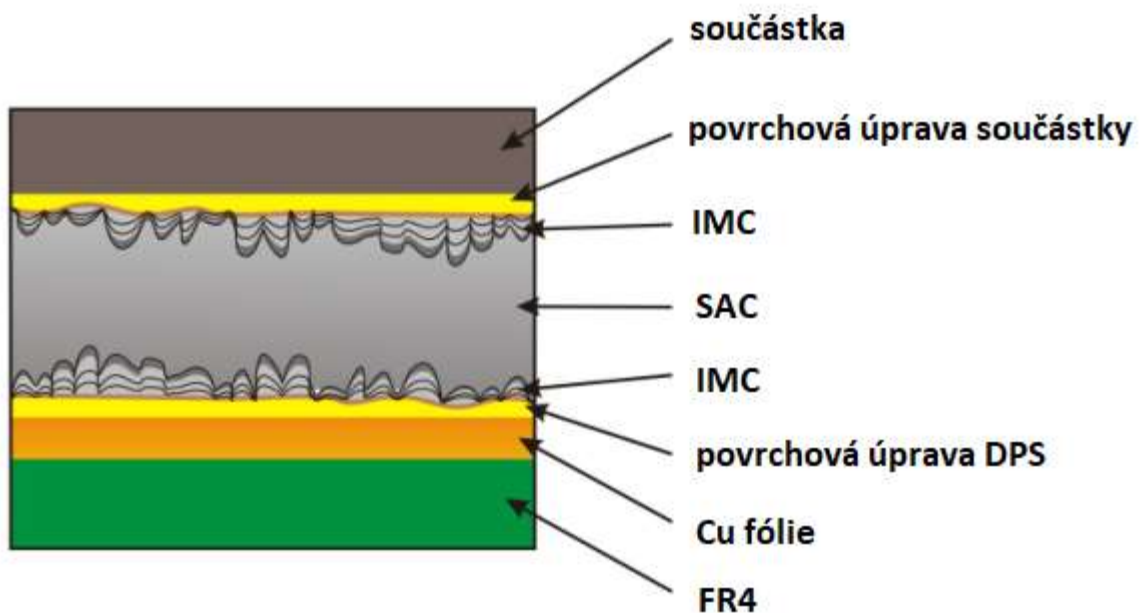
aktivováno během předehřevu. Toto neaktivované tavidlo může následně způsobit vylučování pájky a vytváření kuliček v blízkosti součástky. Pokud jsou po procesu přetavení nalezeny kuličky pájky, je nutné desku začistit pro jejich odstranění. V krajních případech mohou kuličky pájky způsobit přemostění a zkratování sousedních součástek [52], [53], [54], [55], [56].



Obrázek 12: Ukázka kuličky pájky po přetavení [52].

4 Intermetalické sloučeniny

Intermetalické vrstvy mohou být dalším důvodem snížení spolehlivosti a kvality pájeného spoje, a to při svém nadměrném růstu na rozhraních pájky se součástkou a pájky s pájecí ploškou. Přítomnost intermetalických sloučenin (anglicky *Intermetallic compounds* – IMC) v pájeném spoji ovlivňuje jak elektrické vlastnosti (neboť růst intermetalických vrstev zvyšuje celkový elektrický odpor pájeného spoje v čase), tak i vlastnosti mechanické (protože IMC mají odlišné teplotní koeficienty roztažnosti, elastické vlastnosti a jsou tvrdší než zbytek pájky, což vede k jeho mechanické degradaci). IMC jsou chemické sloučeniny dvou nebo více prvků, jako například Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , Ni_3Sn_4 , Ag_3Sn a další. Vznik intermetalické vrstvy u bezolovnatých pájek je však podmínkou pro dobrý pájený spoj. Mezi faktory ovlivňující počáteční hrubost intermetalických vrstev po přetavení patří například teplota a čas pájení, typ technologie pájení (vlna, ruční pájení, přetavení v peci, infračervený ohřev a další), typ povrchové úpravy DPS a její drsnost, přítomnost nečistot na povrchu DPS či vývodech součástek a také složení použité pájecí slitiny [57], [58], [59], [60].



Obrázek 13: Struktura pájeného spoje. Převzato z [57].

Při používání pájecích past pak hraje významnou roli i tavidlo, které je přítomné v pastě, případně několikanásobné přetavení či typ použité pájecí masky, která má díky různé drsnosti vliv na roztékavost do okolí. Studie [61] se zabývala porovnáním dvou typů tavidel ROL0 a ROL1, které se liší přítomností halogenidů (ROL1 obsahuje halogenidy a je tím pádem aktivnější), kdy intermetalická vrstva více narostla při použití pasty s aktivnějším tavidlem ROL1.

4.1 Cu_6Sn_5

IMC Cu_6Sn_5 tvoří hlavní součást intermetalických mikrostruktur u bezolovnatých pájecích slitin, jako je SAC, a zvyšuje kohezi pájeného spoje. Tato intermetalická vrstva vzniká na rozhraní mědi a pájecí slitiny během přetavení a její objem narůstá s časem a teplotou pájení [59], [60].

4.2 Cu_3Sn

IMC Cu_3Sn představuje mezifázovou intermetalickou vrstvu mezi měděnou pájecí ploškou a IMC Cu_6Sn_5 . Tato vrstva vzniká při stárnutí pájeného spoje na základě principu difuze mezi měděnou pájecí ploškou a cínem z pájecí slitiny. Výskyt této vrstvy je nežádoucí, jelikož je nesmáčivá [59], [60].

4.3 Ag_3Sn

IMC Ag_3Sn se vyskytuje u pájení slitinou SAC jakožto vnitřní mikrostruktura a dále se vyskytuje i u dalších pájecích slitin použitých u DPS osazených součástkami s postříbřenými vývody nebo u DPS s povrchovou úpravou imerzní stříbro. Imerzní stříbro představuje povrchovou úpravu DPS ve formě tenkého ochranného pokovení mědi 99% stříbrem s nízkým obsahem organických materiálů. Tyto organické příměsi chrání stříbro a zabraňují vzniku krystalků sulfidů, jež by mohly způsobit zkrat na DPS [59].

4.4 Ni_3Sn_4

Intermetalické vrstvy Ni_3Sn_4 se vytvářejí například na DPS, kde je použita povrchová úprava ENIG (*Electroless nickel immersion gold*), nebo u součástek s poniklovanými vývody. Povrchová úprava ENIG je tvořena vrstvou niklu o tloušťce 1-8 μm . Ta chrání měď před kontaktem se vzduchem a korozí. Vrstva niklu je následně pokryta tenkou vrstvou zlata o tloušťce 0,05-0,25 μm , která chrání nikl před kontaktem se vzduchem [59], [60], [62].

5 Testovací metody

Pájení je složitý proces ovlivněný mnoha faktory, které mohou ovlivnit kvalitu výsledného spoje. Testovací metody jsou obecně rozděleny na elektrické a neelektrické. Mezi neelektrické metody můžeme řadit optické metody, jako například AOI, která kontroluje především správné osazení součástek a kvalitu pájených spojů, a rentgenovou kontrolu, která slouží k inspekci částí skrytých pro oko nebo AOI. Rentgenová kontrola například zkoumá pájené spoje pod pouzdry součástek, jako jsou pouzdra BGA, nebo kontroluje výskyty dutin (voidů) a mechanických trhlin v pájených spojích. Mezi elektrické testovací metody patří mimo jiné vnitřní testování (anglicky *In-Circuit Testing* – ‘*Bed of Nails*’) a *Flying Probe Test*.

V této diplomové práci se zaměřuji na porovnávání vlastností exspirované a neexspirované pájecí pasty, a proto se budu soustředit zejména na neelektrické testovací metody. Tyto metody mohou být dále rozděleny na destruktivní a nedestruktivní.

V této kapitole poskytnu základní popis použitých testovacích metod, které byly využity k porovnání vlastností pájecích past před a po expiraci.

5.1 Roztékavost

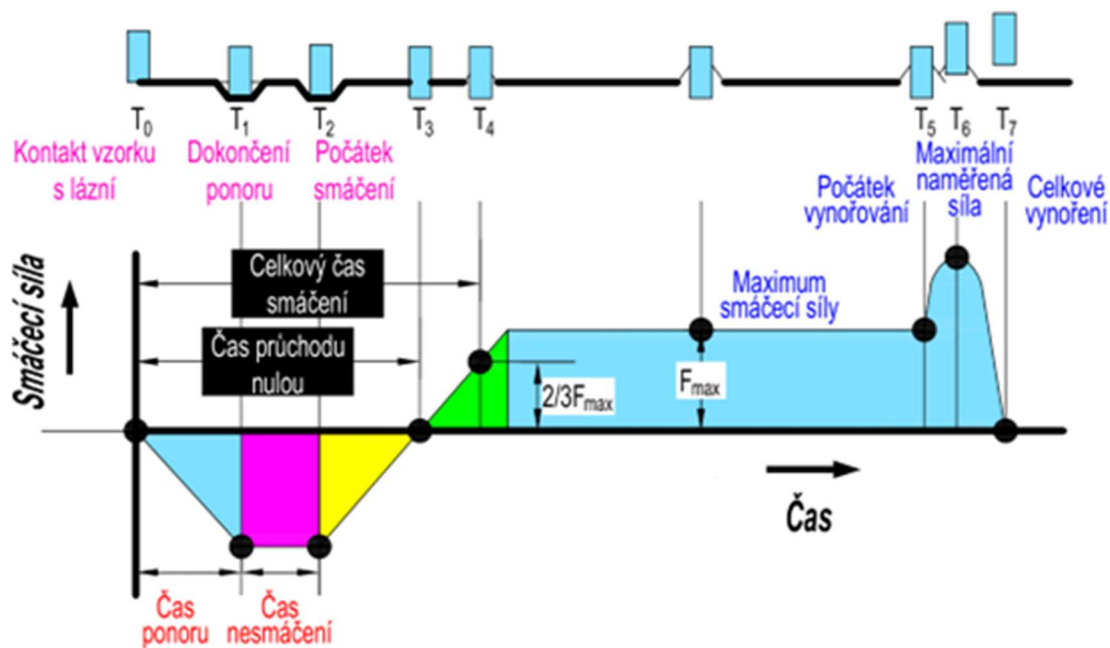
Principem testu roztékavosti (anglicky *Spreading Test*) je nanesení definovaného množství pájecí pasty na očištěnou smáčivou metalizovanou pájecí plošku a její následné přetavení. K přetavení pájecí pasty mohou být využity rozličné metody, například přetavení v horkovzdušné peci, nebo infračervený ohřev. Tento test se používá k vyhodnocování smáčivosti pájecí pasty pro daný substrát. Smáčení se vyhodnocuje porovnáním smáčené plochy po přetavení s původně potištěnou plochou. Pro vyhodnocení testu roztékavosti lze rozlišit následující kategorie smáčení [57], [63]:

- Smáčená plocha je větší než potištěná plocha → ideální
- Smáčená plocha je stejně velká jako potištěná plocha → vyhovující
- Smáčená plocha je menší než potištěná plocha → nevhovující, dochází k odsmáčení

5.2 Metoda smáčecích vah

Jedná se o přesnou kvantitativní testovací metodu pájitelnosti. Principem této metody je přesné měření smáčecích sil působících na vzorek v čase během jeho ponořování, setrvání v pájecí lázni a jeho následného vynořování. Metoda smáčecích vah se provádí na meniskografu, který pro přesnější výsledky při měření kompenzuje tíhovou sílu působící na analyzovaný vzorek. Před začátkem měření je nutné lázeň s pájecí slitinou náležitě nahřát na požadovanou teplotu, která je po celou dobu měření udržována konstantní pomocí topného tělesa. Měřený vzorek je následně zavěšen na siloměr nad pájecí lázní. Pohyb siloměru se zavěšeným vzorkem, nebo pohyb lázně (závisí na typu meniskografu), je řízen přesným krokovým motorem, který zajistí konstantní rychlost ponoru, požadovanou hloubku ponoru

a zároveň konstantní rychlost vyoření vzorku z lázně. Kontakt vzorku s hladinou lázně je detekován většinou elektricky. Pro nevodivé vzorky může být použita optická detekce kontaktu vzorku s hladinou lázně. Od okamžiku ponoru vzorku do lázně po jeho vyoření je pomocí převodníku připojeného k počítači zaznamenávána síla působící na vzorek v čase. Závislost výsledné smáčecí síly na čase se nazývá smáčecí křivka. Z tvaru smáčecí křivky se určuje kvalita smáčení vzorku [64].



Obrázek 14: Schématická ilustrace smáčecí křivky s parametry a polohou vzorku vůči hladině lázně. Převzato z [65].

Pro základní vyhodnocení pájitelnosti vzorku na základě smáčecích křivek lze použít následující hodnotící model převzatý z [66]:

Tabulka 4: Vyhodnocovací tabulka kritérií smáčecích křivek [66].

Hodnotící kritéria	Možné skóre
$T_{(0)}$ – čas průchodu nulou	0-3
$T_{(2/3)}$ – celkový čas smáčení	0-4
F_{max} – maximum smáčecí síly	0-3
Celkové hodnocení	0-10

Čas průchodu nulou (anglicky *Zero-cross time*) je definován jako doba, za kterou smáčecí síla vyrovná vztahovou sílu. Udává, jak rychle se roztavená pájecí slitina začne spojovat se vzorkem. Rozsah hodnocení tohoto kritéria se pohybuje v rozmezí 0-3 a skóre je přiřazováno následovně:

Tabulka 5: Hodnocení kritéria $T_{(0)}$ [66].

Hodnocení $T_{(0)}$	Čas [s]
0	$T_{(0)} > 3$
1	$3 > T_{(0)} > 2$
2	$2 > T_{(0)} > 1$
3	$T_{(0)} < 1$

Dalším kritériem pro hodnocení kvality pájitelnosti vzorku je doba dosažení dvou třetin smáčecí síly $T_{(2/3)}$, tedy celkový čas smáčení. Rozsah hodnocení tohoto kritéria se pohybuje v rozmezí 0-4 a skóre je přiřazováno následovně:

Tabulka 6: Hodnocení kritéria $T_{(2/3)}$ [66].

Hodnocení $T_{(2/3)}$	Čas [s]
0	$T_{(2/3)} > 3$
1	$3 > T_{(2/3)} > 2$
2	$2 > T_{(2/3)} > 1,5$
3	$1,5 > T_{(2/3)} > 1$
4	$T_{(2/3)} < 1$

Posledním používaným kritériem pro tento přístup k vyhodnocování pájitelnosti na základě naměřené smáčecí křivky je maximum smáčecí síly. Tato síla je definována jako maximální síla působící na vzorek, která byla během měření dosažena před počátkem vynořování vzorku z lázně, a jedná se o ukazatel kvality kontaktu mezi pájecí slitinou a vzorkem. Pro vyhodnocení tohoto kritéria je nutné hodnotu F_{\max} v mN normalizovat na mN/mm vydělením smáčivým obvodem zkušebního vzorku. Rozsah hodnocení tohoto kritéria se pohybuje v rozmezí 0-3 a skóre je přiřazováno následovně:

Tabulka 7: Hodnocení kritéria F_{\max} [66].

Hodnocení F_{\max}	Naměřená síla [mN/mm]
0	$F_{\max} < 0,1$
1	$0,1 < F_{\max} < 0,2$
2	$0,2 < F_{\max} < 0,3$
3	$F_{\max} > 0,3$

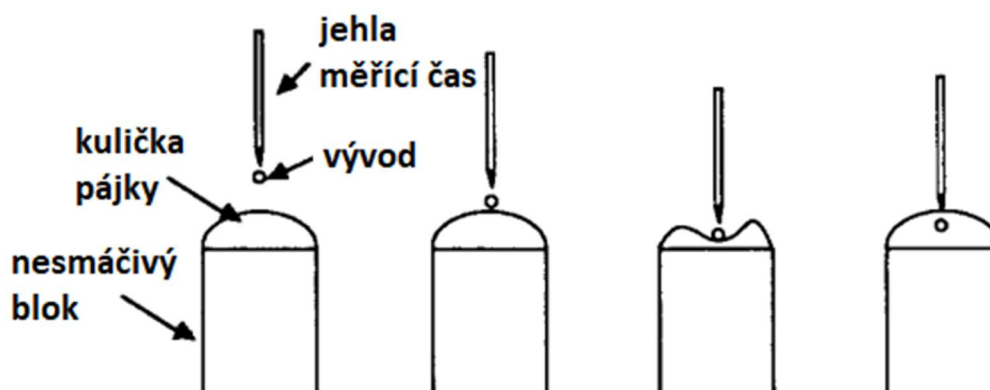
Tento model umožní přiřadit každé naměřené smáčecí křivce kvalitativní hodnocení míry pájitelnosti vzorku v rozmezí 0-10. To umožní kvalitativně porovnávat jednotlivé naměřené smáčecí křivky mezi sebou.

Tabulka 8: Vyhodnocení míry pájitelnosti [66].

Míra pájitelnosti	Skóre
Vynikající	9-10
Dobré	7-8
Uspokojivé	4-6
Neuspokojivé/Nesmáčivé	≤ 3

5.3 Kuličkový test (Globule Test)

Kuličkový test představuje jednu z prvních používaných metod kvantitativní zkoušky pájitelnosti, která byla dříve využívána u součástek pro THT. Tato metoda je určena především pro kruhové vývody součástek a kruhové vodiče. Tato metoda neumožňuje hodnotit příliš tenké či hranaté vývody součástek. Pro provedení kuličkového testu je nutné vytvořit z pájecí slitiny kuličku. K zajištění kulovitého tvaru roztavené pájecí slitiny slouží nahříváný nesmáčivý blok, na který je pájecí slitina nanesena. Díky nesmáčivosti povrchu se po přetavení vytváří roztavená kulička pájky. Během testu se do této roztavené kuličky shora zavede sledovaný kruhovitý vývod součástky, nebo vodič, čímž dojde k rozdělení kuličky. Za měřítko pájitelnosti zde slouží doba, za kterou roztavená kulička obklopí sledovaný vzorek. Jednotlivé kroky jsou znázorněny na obrázku 15. Dochází tedy pouze k měření času mezi okamžikem kontaktu vzorku s kuličkou a okamžikem, kdy vzorek začne smáčet. Nedostatkem tohoto testu tedy je, že neposkytuje informaci o kvalitě smáčení. Tento test je v dnešní době využíván jen omezeně, protože čas smáčení lze získat i společně s dalšími fyzikálními vlastnostmi pomocí metody smáčecích vah, která byla popsána v kapitole 5.2.



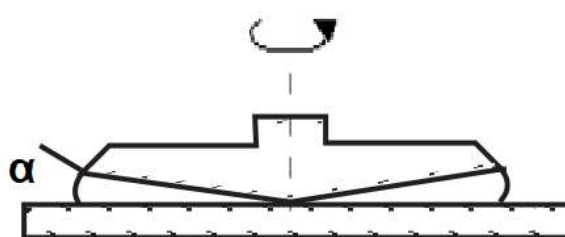
Obrázek 15: Schématická ilustrace sekvence kroků kuličkového testu. Převzato z [67].

5.4 Dynamická viskozita

Viskozita představuje fyzikální veličinu vyjadřující odpor, kterým působí tekutina proti silám, které se snaží vzájemně posunout její částice, a je mírou, která vyjadřuje poměr mezi tečným napětím a změnou smykové rychlosti podle vzdálenosti mezi sousedními vrstvami tekutiny. Dynamická viskozita se projevuje na rozhraní dvou vrstev tekutiny, které se pohybují různou rychlostí, tečným napětím, kterým se snaží rychlejší vrstva urychlit pomalejší vrstvu, a naopak pomalejší vrstva zpomalit vrstvu rychlejší. Viskozita je vlastnost kapaliny, která je závislá na vlastnostech okolního prostředí, jako jsou teplota a tlak. Jednotkou dynamické viskozity v soustavě jednotek SI je pascal sekunda ($Pa \cdot s$). Pájecí pasty patří mezi neneutronovské kapaliny, což znamená, že jejich viskozita se mění v závislosti na působící síle [68].

Pro měření viskozity existují rozličné viskozimetry: průtokové, výtokové, bublinkové, tělískové, rotační. V rámci této práce se budu zabývat dále pouze rotačními viskozimetry. Rotační viskozimetry dále můžeme dělit mimo jiné na viskozimetry se sousými válci nebo na viskozimetry se systémem kužel–deska [68].

U systému kužel–deska se nachází kapalina mezi rotujícím kuželovým diskem a statickou rovnou deskou. Obvyklý úhel mezi rotujícím kuželem a statickou deskou je $\alpha = 3^\circ$ pro 2 ml vzorku. Během experimentu jsou odčítány na stupnici viskozimetru dílky, jejichž počet je následně při vyhodnocování dynamické viskozity přenásobován faktorem pro danou rychlost otáčení [68], [69].



Obrázek 16: Geometrické uspořádání pro měření rotačním viskozimetrem – systém kužel–deska.

Převzato z [69].

5.5 Plynová chromatografie s hmotnostní spektrometrií

Plynová chromatografie představuje velmi cennou jak kvalitativní, tak kvantitativní analytickou metodu umožňující přesnou separaci a analýzu složitých směsí. Tato metoda poskytuje vysoké rozlišení, citlivost a všestrannost [70].

Soustava pro plynovou chromatografii zahrnuje nástříkový port pro vzorky (anglicky *inlet*), kolonu, pec, detektory a systém pro sběr dat. Každá část této soustavy je pečlivě kalibrována tak, aby bylo dosaženo optimální separace a detekce obsažených látek [70].

Dávkování vzorku do chromatografu metodou headspace nebo mikroextrakce pracuje tak, že se ve zkumavce odpařuje plynná fáze vzorku, na dně a na stěnách zkumavky zůstává netěkavá kapalná a pevná fáze. Pomocí autosampleru je vzorek dávkován do proudu inertního plynu, obvykle dusíku, helia, nebo vodíku. Inertní plyn dále zajistí přenos plynné fáze vzorku k detektorům k analýze [70].

Údaje získané detektory se prezentují obvykle formou chromatogramu, který představuje graf závislosti odezvy detektoru na čase. Jednotlivé peaky na chromatogramu představují detekované složky plynné fáze vzorku, přičemž jejich plocha odpovídá jejich koncentraci [70].

Jedním z nejuniverzálnějších detektorů používaných v kombinaci s plynovou chromatografií je hmotnostní spektrometr (GC-MS). Tento detektor analyzuje poměr hmotnosti a náboje iontů vzniklých ionizací vzorku. K ionizaci vzorku se obvykle používá ionizace nárazem elektronu, nebo chemická ionizace. Hmotnostní spektrometrie může například pomoci identifikovat neseparované látky ve vzorku. Výstupem plynové chromatografie s hmotnostní spektrometrií je pak celkový iontový chromatogram [70].

5.6 Metalografické výbrusy

Metalografické výbrusy slouží ke zjištění příčin vyskytujících se poruch, kde mnohé sofistikované metody, jako rentgenová kontrola, selžou, nebo k analýze IMC. Nevýhodou metalografických výbrusů je destrukce zkoumaného vzorku, jelikož je nutné vzorkem provést řez. Vyříznutý vzorek se následně fixuje pomocí fixační hmoty, nejčastěji epoxidové pryskyřice, nebo plastu. Po fixaci vzorku dochází k jeho broušení v oblasti zájmu. Tato oblast se může dále ještě leštit nebo i leptat pro jemnější analýzu vzorku. Vzniklý výbrus je poté podroben zkoumání obvykle pomocí mikroskopie, ať už konfokální nebo elektronové [64].

6 Praktická část

Praktická část této diplomové práce navazuje na testovací metody diskutované v kapitole 5. Pro sledování vlastností byla vybrána pájecí pasta od společnosti Senju Metal Industry Co. (SMIC) ve dvou různě starých exemplářích. Starší pasta byla vyrobena v březnu 2023, novější v září 2023. Výrobce uvádí na obalu u této pasty dobu expirace 6 měsíců. Jedná se o pasty s pájecí slitinou SAC obsahující 95,75 % cínu, 3,5 % stříbra a 0,75 % mědi s tavidlem typu RO (kalafuna), které byly dodány v tubách obsahujících 1400 g pájecí pasty. Tyto pasty jsou označeny produktovým názvem M31-GRN360-K1MK-V-3.5Ag-0.75Cu-SnBal. Jedná se o pájecí pasty s velikostí pájecích zrn 25-45 μm , tedy pastu typu 3 (viz tabulka 1 v kapitole 2.1). Pájecí pasty byly mezi experimenty skladovány v lednici. V odkazu [71] můžeme nalézt jejich datový list.

Tabulka 9: Základní vlastnosti pájecí pasty z datového listu [71].

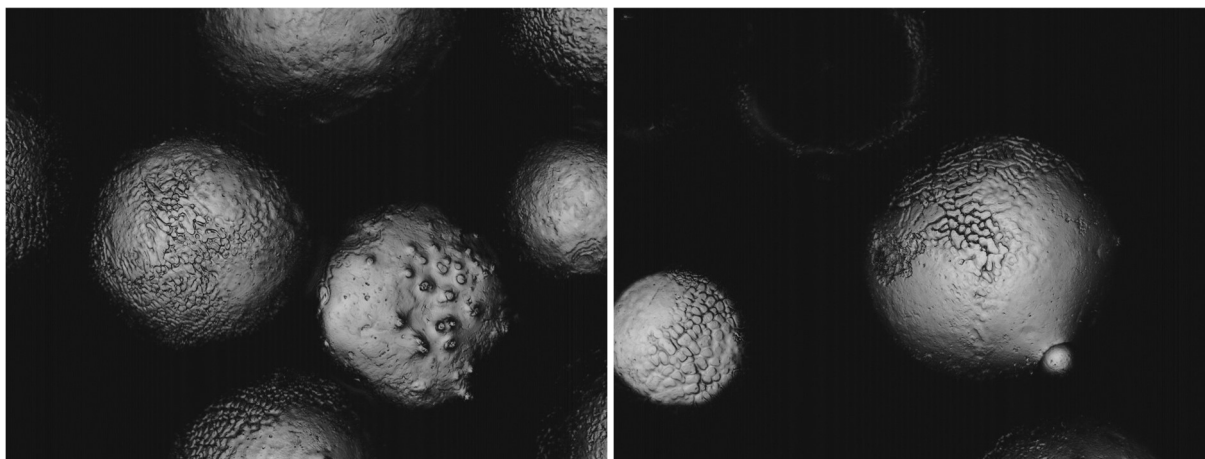
Složení pájecí slitiny	Sn95,75 - Ag3,5 - Cu0,75
Teplota tání	217 - 219 °C
Velikost pájecích zrn	25 - 45 μm
Tvar pájecích zrn	Sférické
Typ tavidla	RO
Aktivita tavidla	L0
Obsah halogenů v tavidle	0 %
Množství tavidla	11,5 % objemu
Udávaná trvanlivost (neotevřená, 0 - 10 °C)	6 měsíců

V následujících podkapitolách se budu zabývat provedenými měřeními na obou vzorcích zmíněné pájecí pasty.

6.1 Mikroskopické snímky pájecích zrn

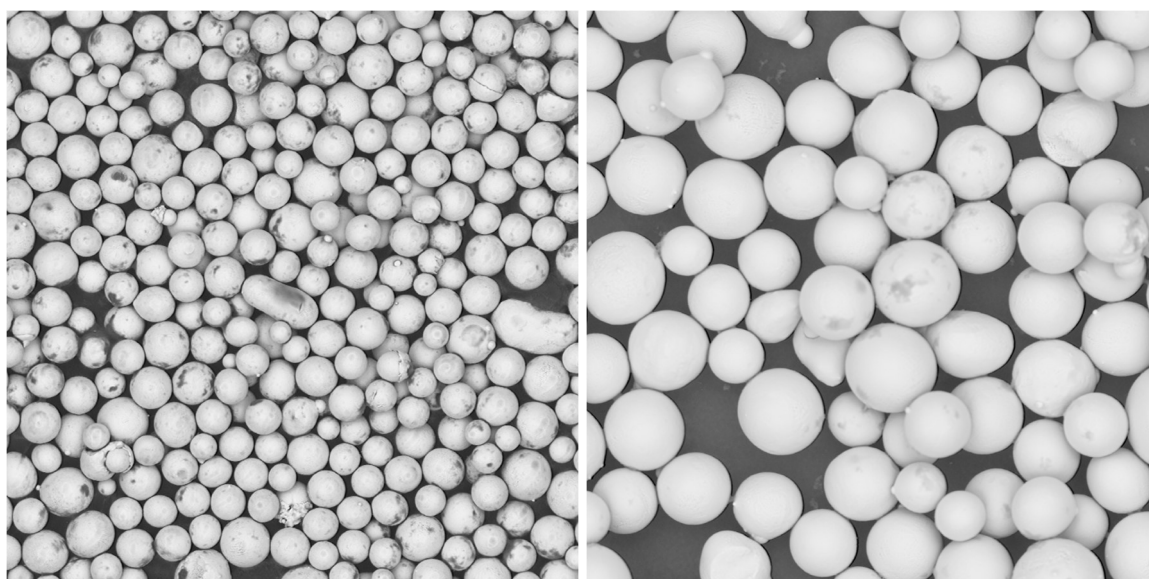
Na úvod praktické části bych rád přiblížil materiál, se kterým jsem v rámci mé diplomové práce pracoval. V této podkapitole ukáži několik fotek promytých pájecích zrn pořízených na konfokálním a na elektronovém mikroskopu. Univerzitní laboratoř diagnostiky materiálů je vybavena dvojicí mikroskopů. Stolní rastrovací skenovací elektronový mikroskop SEM Thermo Scientific Phenom ProX je možné využívat pro vodivé i nevodivé vzorky, umožňuje provádět prvkovou analýzu vzorku a umožňuje přiblížení větší než 100 000x; jako zdroj elektronů používá elektronové dělo CeB6. Dále je v laboratoři k dispozici laserový skenovací konfokální mikroskop Keyence VK-X1000, který umožňuje bezkontaktní měření profilu, drsnosti a tloušťky vzorků [72].

Vzorky pro mikroskopii bylo nejprve nutné náležitě připravit. Příprava zahrnovala promytí pájecí pasty pomocí isopropylalkoholu v Petriho miskách, což vedlo k odstranění tavidla. Po odpaření isopropylu zůstala na dně Petriho misky vrstva pájecích zrn. Pájecí zrna jsem následně nanesl na kolíčky pro elektronovou mikroskopii (*SEM Pin Stub*) pomocí vodivého oboustranně lepidivého uhlíkového terčíku (*Conductive Double Sided Adhesive Carbon Tab*). Takto připravené vzorky promytých pájecích zrn jsem mohl sledovat jak na konfokálním, tak elektronovém mikroskopu.



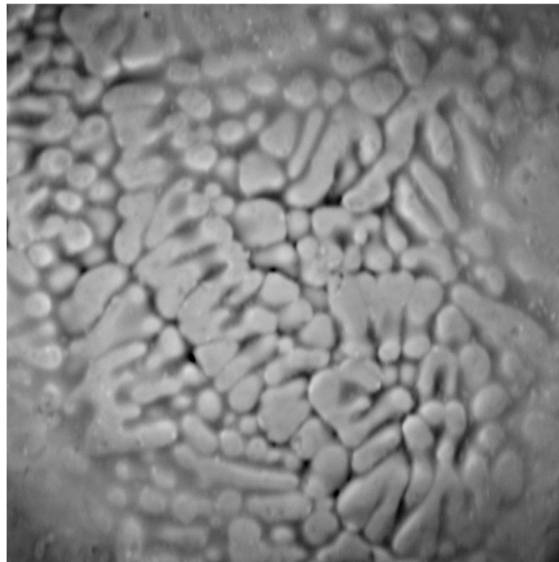
Obrázek 17: Snímky pořízené konfokálním mikroskopem s laserovou fokusací. Vlevo starší pasta při 150násobném zvětšení, vpravo novější pasta při 150násobném zvětšení.

V levé části obrázku 17 můžeme vidět snímek několika omytých pájecích zrn starší pasty pořízený na konfokálním mikroskopu s laserovou fokusací při 150násobném zvětšení. Na pravé části obrázku 17 jsou zachycena pájecí zrna novější pasty při obdobném nastavení mikroskopu.



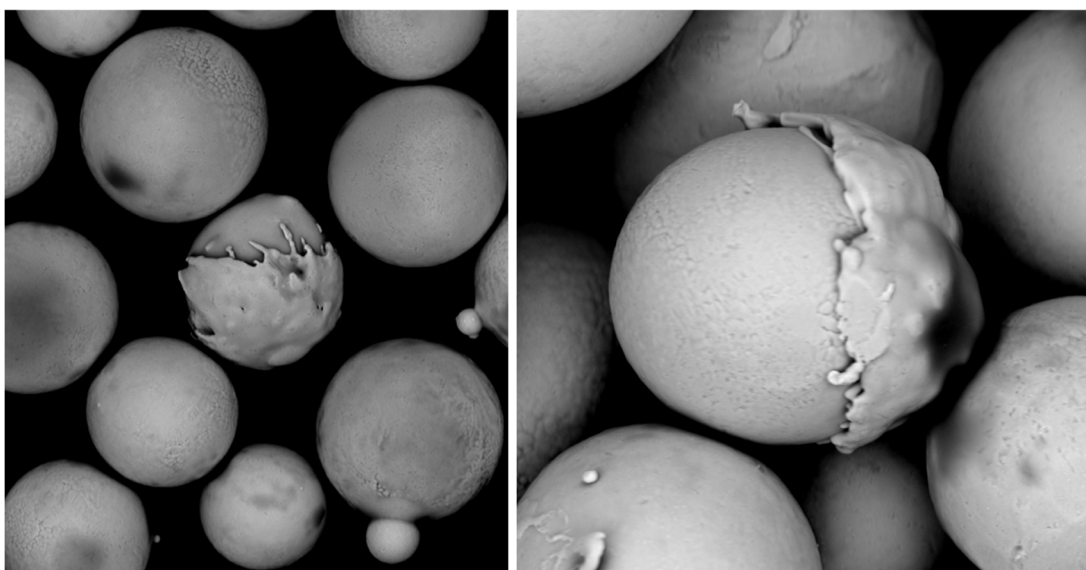
Obrázek 18: Snímky pájecích zrn pořízené elektronovým mikroskopem. Vlevo starší pasta při 500násobném zvětšení, vpravo novější pasta při 850násobném zvětšení.

V levé části obrázku 18 se nachází snímek pájecích zrn ze starší pasty. Tento snímek byl pořízen při 500násobném zvětšení na elektronovém mikroskopu. Na snímku je vidět několik zdeformovaných pájecích zrn a několik pájecích zrn, která svou velikostí nespádají do požadované velikosti zrn pro daný typ pasty. Vpravo jsou vidět nedokonalosti pájecích zrn novější pasty na elektronovém mikroskopu při 850násobném zvětšení. Tmavší skvrny na kuličkách tvoří pozůstatky neodmytého tavidla.



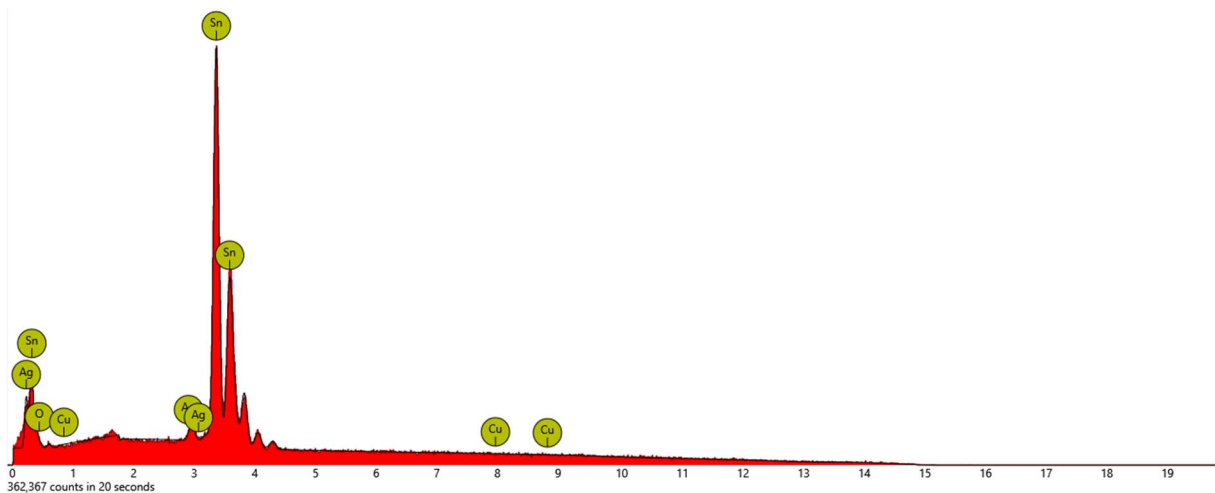
Obrázek 19: Detail struktury povrchu pájecího zrna novější pájecí pasty při 15000násobném zvětšení.

Na obrázku 19 je zachycena povrchová struktura pájecího zrna novější pasty při 15000násobném přiblížení. Můžeme vidět, že povrchová struktura SAC zrna není při větším přiblížení hladká.



Obrázek 20: Zdeformovaná pájecí zrna starší pájecí pasty. Levá část pořízena při 2000násobném zvětšení, pravá část při 5000násobném zvětšení.

Obrázek 20 zachycuje dvě z mnoha vad pájecích zrn, které jsem našel při pozorování vzorku. Levý obrázek je pořízen při 2000násobném přiblížení, pravý obrázek při přiblížení 5000násobném. Oba snímky byly pořízeny na vzorku ze starší pasty, ale tyto anomálie se objevovaly i u zrn pasty novější. Po provedení prvkové analýzy těchto úkazů vyšlo najevo, že se pravděpodobně nejedná o cizí materiál. Lze tak předpokládat, že pravděpodobně při výrobě zrn narazilo jedno ještě roztavené zrno do již ztuhnutého zrna a po ztuhnutí spolu vytvořila tyto zdeformované útvary.



Graf 1: Ukázka prvkové analýzy pájecího zrna.

Jak bylo dříve uvedeno, na elektronovém mikroskopu je možné rovněž provádět prvkovou analýzu. U pájecích zrn pájecí slitiny SAC jsem z prvkové analýzy získal, že se nepřekvapivě skládá zejména z cínu a stříbra. Měď se zde příliš nevyskytovala a byla do analýzy vnucena, neboť je ve slitině zastoupena pouze ve stopovém množství, ale v místě zkoumání se nenacházela. Vedle cínu a stříbra software ukazoval, že se na povrchu zrn na vybraném místě nachází kyslík a občas i uhlík, což naznačuje, že zrna vykazovala částečnou povrchovou oxidaci.

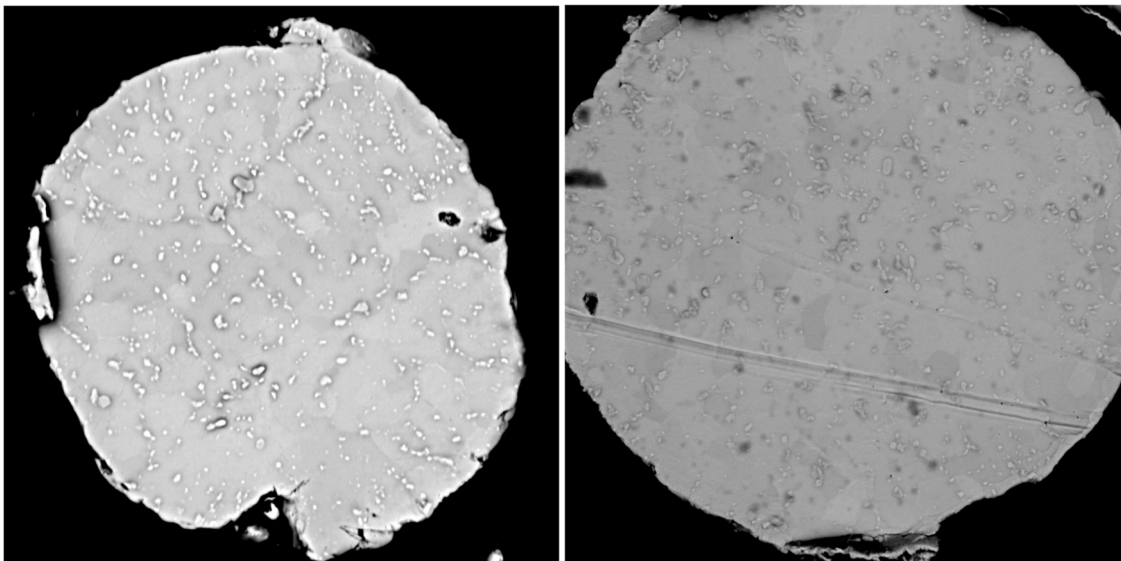
6.2 Metalografické výbrusy

Vedle snímků propláchnutých pájecích zrn jsem dále pozoroval i jejich metalografické výbrusy (viz obrázek 21). V rámci pozorování výbrusů propláchnutých pájecích zrn jsem zejména pozoroval výskyt intermetalických sloučenin (IMC) uvnitř pájecích zrn.



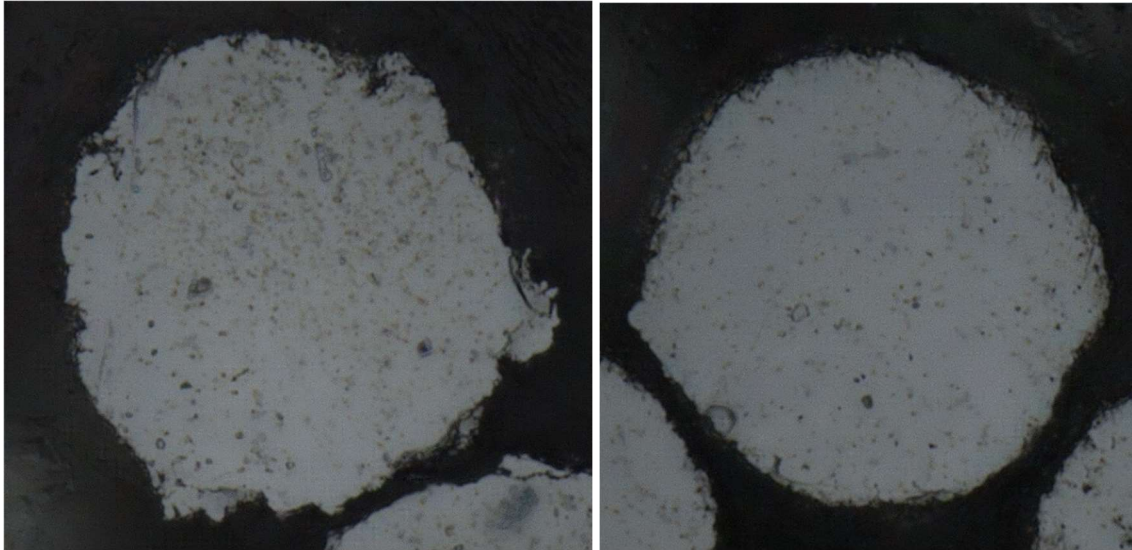
Obrázek 21: Metalografické výbrusy propláchnutých pájecích zrn zalitých v epoxidové pryskyřici.

K této analýze jsem opět využil zejména stolní rastrovací skenovací elektronový mikroskop SEM Thermo Scientific Phenom ProX, na kterém jsem následně provedl i prvkovou analýzu pozorovaných IMC.



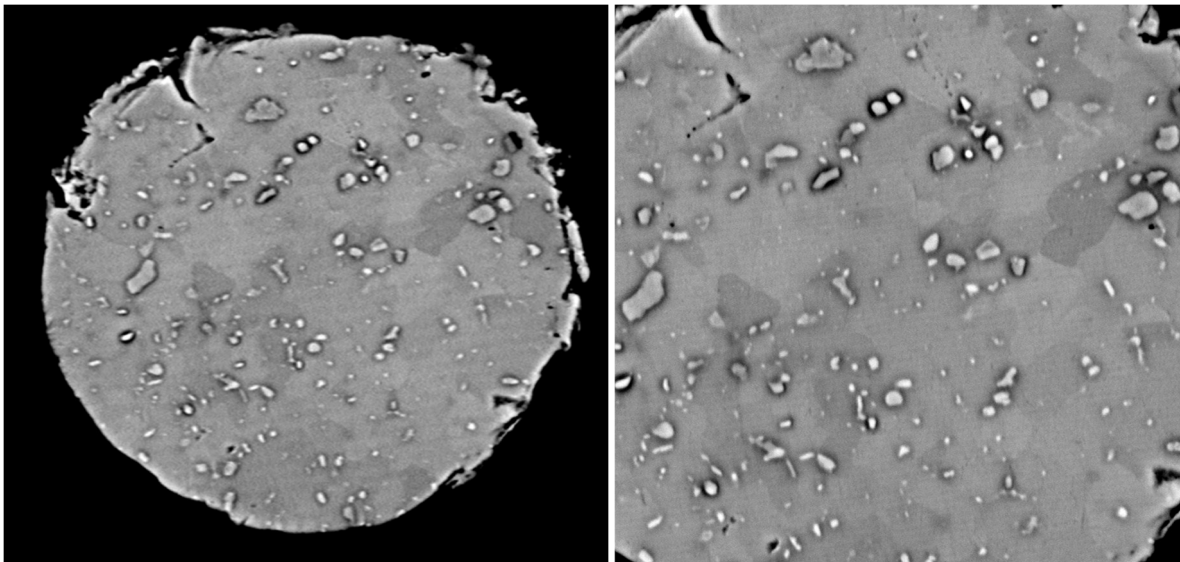
Obrázek 22: Snímky výbrusů pájecích zrn z elektronového mikroskopu. Vlevo starší pájecí pasta, vpravo novější pájecí pasta, obě při 7500násobném zvětšení.

Na obrázku 22 vlevo můžeme vidět pájecí zrno ze starší pasty a vpravo z pasty novější. Oba snímky byly pořízeny na elektronovém mikroskopu při 7500násobném přiblížení.



Obrázek 23: Snímky výbrusů pájecích zrn z konfokálního mikroskopu. Vlevo starší pájecí pasta, vpravo novější pájecí pasta, obě při 150násobném zvětšení.

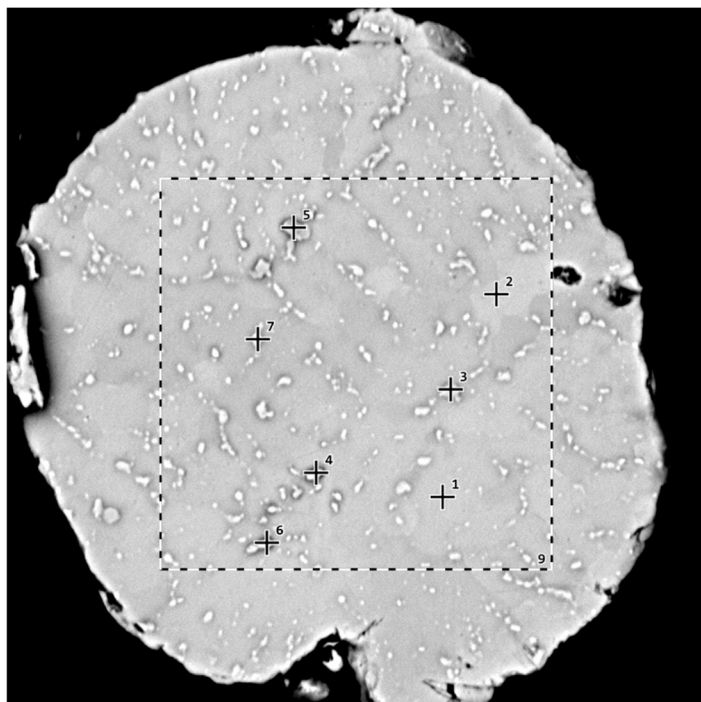
Na obrázku 23 vlevo můžeme vidět pájecí zrnko ze starší pasty a vpravo z pasty novější. Tyto snímky byly pořízeny na konfokálním mikroskopu při 150násobném zvětšení. Při bližším porovnání obrázků 22 a 23 si můžeme všimnout, že u zrn ze starší pasty je pozorovatelných více intermetalických sloučenin, a to především na snímcích z konfokálního mikroskopu. Při dalším analyzování výsledků a provedení prvkové analýzy těchto IMC s využitím elektronového mikroskopu se ukázalo, některé IMC jsou světlejší a jiné tmavší. Na snímcích z konfokálního mikroskopu vidíme především ta tmavší centra intermetalických sloučenin.



Obrázek 24: Snímky výbrusů pájecích zrn z elektronového mikroskopu.

Na obrázku 24 je možné nahlédnout na zrnko ze starší pájecí pasty, a to vlevo při 5000násobném přiblížení a vpravo při 12500násobném přiblížení. Na těchto snímcích můžeme zjevně vidět, že se ve výbrusu zrna nalézají různě výrazné IMC. Při prvkové analýze

se ukázalo, že místa bez IMC jsou téměř čistě tvořena cínem, světlé skvrny jsou tvořeny směsí zejména cínu a stříbra, tmavší skvrny jsou tvořeny směsí převážně cínu a mědi s trochou stříbra.



Obrázek 25: Snímek výbrusu pájecího zrna starší pasty z elektronového mikroskopu při 750násobném zvětšení.

Tabulka 10: Prvková analýza výbrusu z obrázku 25 – váhová koncentrace prvků.

Váhová koncentrace [%]							
Prvek \ Místo	1	2	3	4	5	6	7
Sn	100,00	100,00	65,32	90,52	84,28	91,59	80,13
Ag			34,68	3,82	3,55		19,87
Cu				5,66	12,17	8,41	

V přiložené tabulce 10 nalezneme výsledky prvkové analýzy provedené na výbrusu pájecího zrna ze starší pasty na obrázku 25 ve formě váhových koncentrací detekovaných prvků. Na tomto zrnu bylo celkem vybráno 7 míst pro provedení prvkové analýzy. Pro snazší porovnatelnost byly z výsledků uvedených v tabulce 10 odstraněny kyslík a uhlík, které byly na povrchu výbrusu při analýze přítomny v důsledku jeho oxidace.

Z obrázku 25 můžeme vidět, že se body 1 a 2 nachází mimo IMC. To potvrdila i prvková analýza a její výsledky uvedené v tabulce 10, když na těchto místech nebylo detekováno ani stříbro, ani měď. Body 3 a 7 představují světlejší části IMC, což dle prvkové analýzy odpovídá kombinaci cínu a stříbra. Bod 6 byl zvolen na tmavším okraji intermetalického centra, kde se

dle prvkové analýzy nenacházelo stříbro a byl zde pouze cín v kombinaci s mědí. Body 4 a 5 dle prvkové analýzy obsahovaly kombinaci všech tří prvků obsažených ve slitině SAC.

Na závěr této kapitoly je vhodné zmínit, že prvková analýza nám poskytuje pouze informaci o pravděpodobném prvkovém složení v okolí místa analýzy. Neposkytuje nám žádnou informaci o skutečných chemických sloučeninách, na které se elektronový svazek elektronového mikroskopu zaměřil.

6.3 Roztékavost

Pro test roztékavosti jsem využil tři substrátů: měděné destičky, měděné destičky ošetřené povrchovou úpravou OSP (organický povlak bránící oxidaci mědi) a měděné destičky ošetřené povrchovou úpravou imerzním cínem.

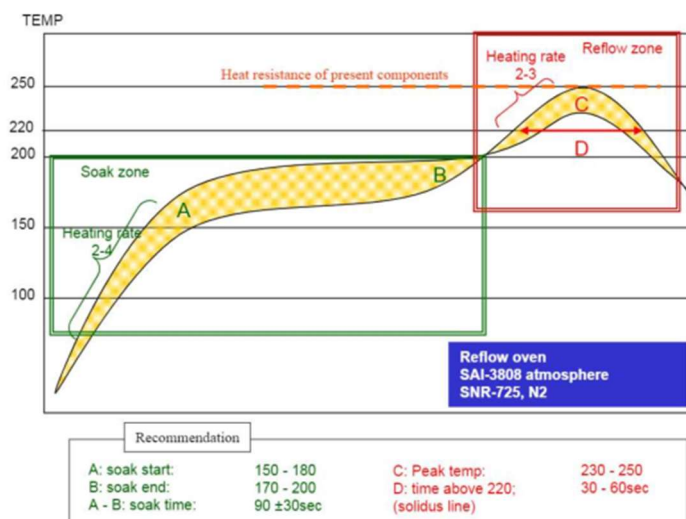
Pájecí pasta byla tištěna na šabloně s kulatými otvory o průměru 0,65 cm. Jak bylo naznačeno v rámci rešerše v kapitole 5.1, budu se zabývat pouze plochou, na kterou se pájecí pasta po přetavení roztekla. Po svém natištění pájecí pasta zabírala vždy přibližně 33,2 mm² plochy substrátu. Na měděné destičky a měděné destičky ošetřené vrstvou OSP jsem nanesl po dvanácti nánosech novější a starší pasty, na měděné destičky ošetřené imerzním cínem po osmi nánosech novější a starší pasty.

K přetavování pájecí pasty jsem využil průběžnou pec s nuceným oběhem vzduchu Mistral 260. Tato pec je rozdělena do tří nezávislých stejně velkých zón, kde každá zóna může být vyhřívána na vlastní teplotu. Pohyb vzorku pecí zajišťuje dopravníkový pás.



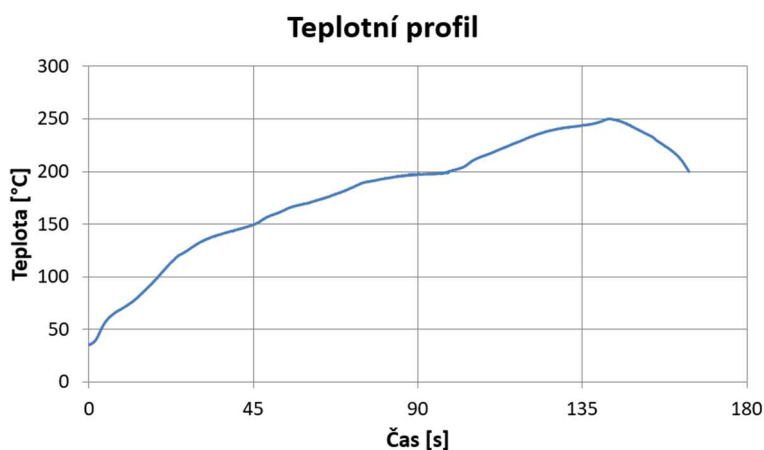
Obrázek 26: Snímek konvekční pece z profilu [73].

Pro test roztékavosti bylo nutné na této peci nastavit teplotní profil změnami rychlosti dopravníku a teplot jednotlivých sekcí pece tak, aby co nejlépe odpovídal požadovanému teplotnímu profilu pro zkoumanou pájecí pastu z datového listu v odkazu [71].



Graf 2: Doporučený teplotní profil pro zkoumanou pájecí pastu [71].

Reálný teplotní profil jsem změřil pomocí termočlánku, který jsem přilepil na vrchní plochu měděné destičky kaptonovou páskou. Tím jsem změřil teplotu povrchu substrátu, kde se bude následně nacházet pájecí pasta.



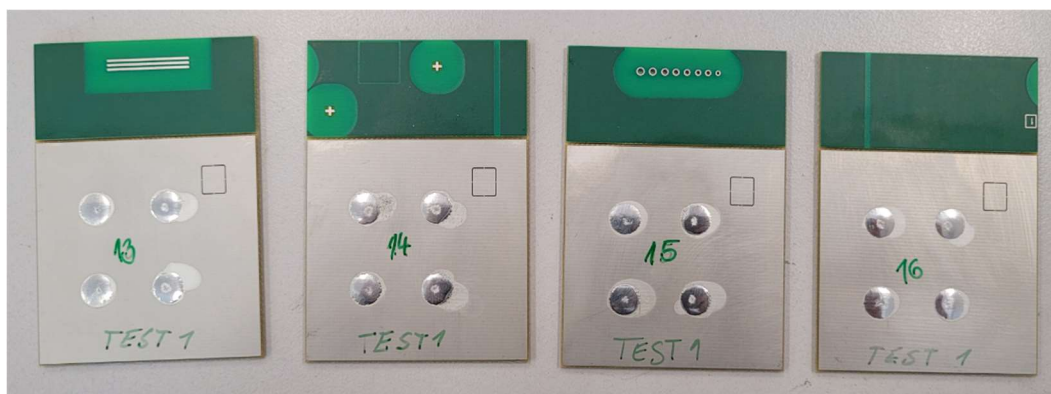
Graf 3: Změřený teplotní profil povrchu měděné destičky při průchodu pecí.

Tabulka 11: Nastavení teploty zón a rychlosti dopravníkového pásu.

Zóna 1	Zóna 2	Zóna 3	Rychlost pásu
190 °C	215 °C	265 °C	30 cm/min

Celkový čas, po který je vzorek v peci při této rychlosti dopravníkového pásu, činí přibližně 143 s, a teplota měděného povrchu na konci pece dosahuje 250 °C, jak je doporučeno v datovém listu pájecí pasty. Doba, po kterou je povrch destičky nad 220 °C při takto nastaveném teplotním profilu, je přibližně 48 s, což rovněž splňuje doporučení z datového listu v odkazu [71].

S takto nastaveným teplotním profilem jsem přetavil všechny vzorky.

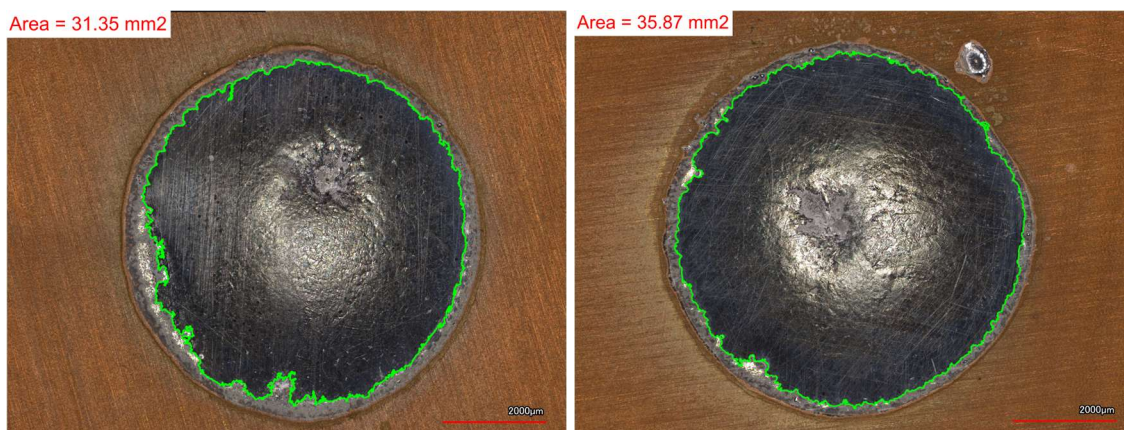


Obrázek 27: Ukázka přetavené pájecí pasty na destičkách s povrchovou úpravou imerzním címem.



Obrázek 28: Snímky přetavené pájecí pasty pořízené konfokálním mikroskopem. Vlevo starší pájecí pasta na měděném substrátu, vpravo novější pájecí pasta na měděném substrátu ošetřeném OSP.

V levé části obrázku 28 je s využitím konfokálního mikroskopu zachycena přetavená starší pájecí pasta na měděném substrátu. V pravé části je pak vidět přetavená pájecí pasta novější, tentokrát na měděném substrátu ošetřeném povrchovou úpravou OSP.



Obrázek 29: Snímky přetavené pájecí pasty s naznačenou a vypočtenou plochou roztečené pájecí slitiny. Vlevo starší pájecí pasta na měděném substrátu, vpravo novější pájecí pasta na měděném substrátu ošetřeném OSP.

Ke zjištění plochy, do které se pájecí slitina po přetavení roztekla, jsem využil školní počítač vybavený softwarem NIS Elements. Jak naznačuje obrázek 29, pomocí tohoto softwaru jsem vyznačil oblast s pájecí slitinou a software mi poté určil plochu označené oblasti s pomocí poskytnutého měřítka. Jak bylo v úvodu této podkapitoly již zmíněno, referenční plocha, na kterou byla pájecí pasta původně vytištěna pomocí šablony, byla 33,2 mm².

Tabulka 12: Výsledné zprůměrované hodnoty testu roztékavosti.

Substrát	Obsah [mm ²]		Relativní změna [%]
	Novější pasta	Starší pasta	
Cu	30,95 ± 1,74	30,63 ± 1,00	-1,1
OSP	33,54 ± 0,97	32,66 ± 1,76	-2,6
Imerzní cín	38,15 ± 0,59	37,24 ± 1,15	-2,4

Z výsledků testu roztékavosti uvedených v tabulce 12 můžeme usoudit, že v průměru došlo k mírně menšímu roztečení u starší pasty v porovnání s pastou novější. Ovšem s ohledem na uvedené směrodatné odchylky můžeme rovněž nahlédnout, že relativní změna průměrných hodnot je menší než tyto směrodatné odchylky, tedy nemůžeme z tohoto testu jednoznačně vyvodit, že by za dobu cca šesti měsíců došlo k výrazné změně vnitřních struktur sledovaných pájecích past ovlivňující jejich roztékavost. Vyjdeme-li z metodiky vyhodnocování popsané v kapitole 5.1 na základě zdroje [63], z uvedených průměrných hodnot můžeme usoudit, že u čisté mědi docházelo k odsmáčení, což znamená, že smáčivost tohoto substrátu na základě testu roztékavosti byla nevyhovující, plocha u měděného substrátu ošetřeného vrstvou OSP po přetavení byla srovnatelná s plochou natištěnou, což naznačuje, že zde bylo smáčení vyhovující, a smáčivost měděného substrátu s povrchovou úpravou imerzním cínem vyšla z testu roztékavosti jako ideální.

Na závěr této kapitoly bych však rád dodal, že kromě plochy, do které se roztekla přetavená pájecí slitina, je vhodné zmínit také rozdíly v roztečení tavidla na jednotlivých substrátech. Zde se ukázalo, že nejlépe na tom byl měděný povrch ošetřený OSP, dále čistá měď a nejhůře dopadl povrch ošetřený imerzním cínem, kde v některých případech došlo ke značnému znečištění okolí pájecí slitiny. Rozdíly ve velikosti plochy, do které se rozteklo tavidlo, přisuzuji různým drsnostem povrchu jednotlivých substrátů, kde největší drsnost vykazoval substrát ošetřený OSP, zatímco povrch s nejmenší drsností měl substrát ošetřený imerzním cínem.

6.4 Dynamická viskozita

K měření dynamické viskozity obou vzorků pájecích past byl využit analogový rotační viskozimetr od firmy Brookfield. Výsledky byly získány při použití viskozimetru se systémem kužel–deska s úhlem 3° mezi rotujícím kuželem a statickou nádobou, která hrála roli desky. Před oběma pokusy bylo odměřeno 5 ml pájecí pasty a vloženo na střed nádoby. Následně byla nádoba při pomalé rotaci kuželu šroubována do momentu, kdy o sebe začal kužel s nádobou mírně dřít. V tento moment byly kužel s nádobou o jeden dílek na pomocné stupnici viskozimetru oddáleny (cca o 0,013 mm) a experiment byl připraven pro měření.

Tabulka 13: Výsledky z pokusu měření dynamické viskozity systémem kužel–deska.

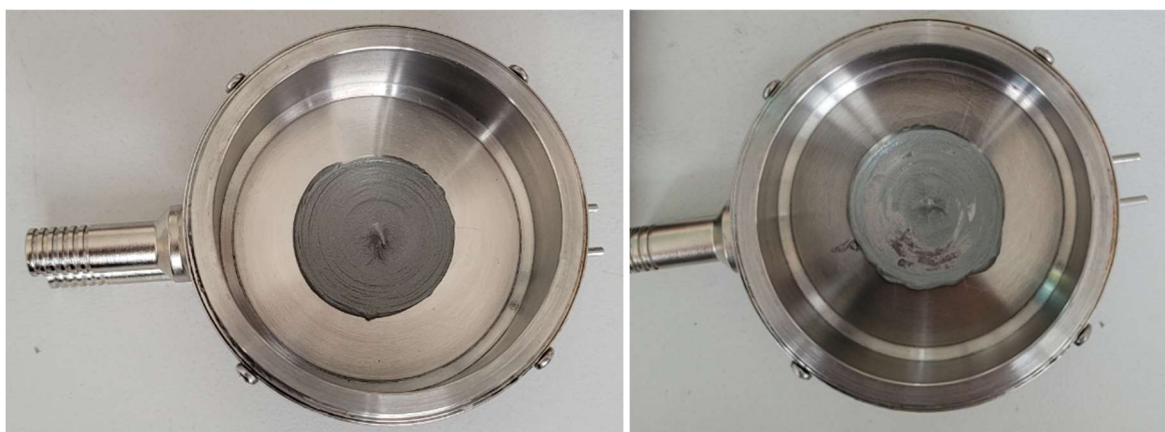
Rychlost otáčení [ot/min]	Dynamická viskozita [mPa*s]		Relativní změna
	Novější pasta	Starší pasta	
0,5	20480	24576	20 %
1	12288	14336	17 %
2,5	6554	7373	13 %
5	4506	5325	18 %
10	2867	3277	14 %
20	2048	2355	15 %
50	983	1106	13 %
100	717	819	14 %

V tabulce 13 je vypočtena dynamická viskozita pro obě pasty. Během experimentu byly odečítány dílky ze stupnice rotačního viskozimetru, kde počet dílků odpovídal odporu pájecí pasty k toku. Měřen byl točivý moment získaný otáčením kužele v pastě, který překonával viskózní odpor pro danou rychlost otáčení, a pomocí pružinky byl tento moment zobrazován na stupnici. K přepočtu dílků na dynamickou viskozitu byla využita přiložená přepočtová tabulka s faktory pro výpočet dynamické viskozity v závislosti na rychlosti otáčení kužele.

Tabulka 14: Přepočtová tabulka s faktory pro výpočet dynamické viskozity v závislosti na rychlosti otáčení pro systém kužel–deska. Faktory převzaty z ručně psaných poznámek uložených u viskozimetru skladovaném v prototypovém pracovišti FEL ČVUT.

Rychlost otáčení [ot/min]	0,5	1	2,5	5	10	20	50	100
Faktor	40,96	81,92	204,8	409,6	819,2	1638,4	4096	8192

Z výsledků uvedených v tabulce 13 můžeme vidět, že dynamická viskozita s rychlostí otáčení klesá. Pro porovnání obou sledovaných pájecích past je v tabulce pro přehlednost uvedena relativní změna dynamické viskozity mezi novější a starší pájecí pastou. Naměřené hodnoty dynamické viskozity stouply až o 20 % u starší pasty oproti novější při nejnižší měřené rychlosti otáčení kuželu. Pro vyšší rychlosti otáčení se relativní rozdíl hodnoty dynamické viskozity pohyboval mezi 13 a 15 %.



Obrázek 30: *Nádoba s rozetřenou pastou po ukončení měření viskozity. Vlevo nádoba s novější pájecí pastou, vpravo nádoba se starší pájecí pastou.*

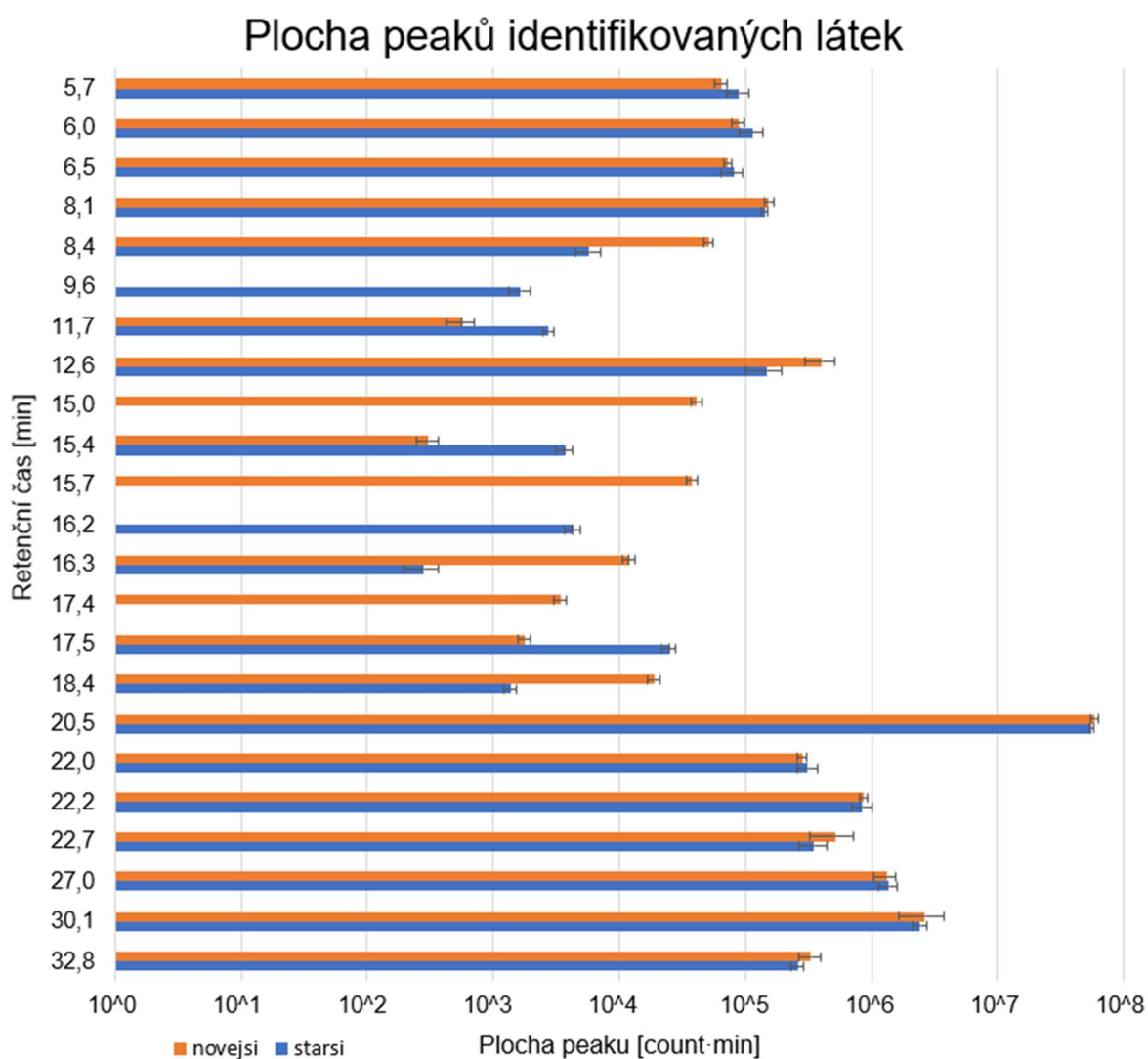
Na obrázku 30 zachycujícím stavy pájecích past po dokončení měření viskozity jsou již okem patrné rozdíly. Vlevo je snímek nádoby s novější pastou, která byla rovnoměrně rozetřena. Vedle ní vpravo je snímek starší pasty, u které nedošlo k rovnoměrnému rozetření, tedy pravděpodobně při rotaci kužele docházelo k pohybu více vrstev pájecí pasty než u novější pasty. To mělo za následek vytvoření "vydřených" míst v kruhovém obrazci během tohoto měření. Obě měření byla zakončena při rychlosti otáčení 100 ot/min.

6.5 Plynová chromatografie

Cílem měření pomocí plynové chromatografie bylo posoudit změny v chemickém složení tavidel mezi oběma analyzovanými pájecími pastami. Je důležité poznamenat, že výsledky nelze interpretovat jako pouhé stárnutí pájecí pasty, protože jednou z hlavních složek použitého tavidla je přírodní pryskyřice (kalafuna), která mohla být v obou případech sklizena v různou dobu a na jiném území. Nicméně i za tak krátký časový úsek bylo možné touto velmi citlivou metodou plynové chromatografie s hmotnostní spektrometrií zachytit některé změny ve složení, které by mohly být způsobeny právě stárnutím produktu. Pro dosažení přesnějších výsledků by bylo vhodné průběžně sledovat jednotlivé pájecí pasty a porovnávat naměřená data jejich stárnutí v průběhu času.



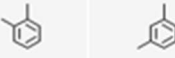








Pro samotnou analýzu bylo nutné odvážit 0,200 gramu vzorku do 20 ml headspace zkumavek, což jsem provedl celkem třikrát pro starší pastu a třikrát pro novější pastu. Analýza

probíhala na plynovém chromatografu Thermo Trace 1310 a hmotnostním spektrometru Thermo ISQ 7000. Přípravu a dávkování vzorku zajistil autosampler TriPlus RSH. Vzorek byl inkubován při teplotě 100 °C po dobu 30 minut. Za identických podmínek probíhala rovněž mikroextrakce na CWR-DVB-PDMS šipku. Vstup do analytického systému zajistil injektor při teplotě 280 °C a splítu 1:350. Průtok hélia jakožto mobilní fáze chromatografickou kolonou TG-Sil5MS o délce 30 m, vnitřním průměru 0,25 mm a tloušťce filmu 0,25 μm byl 1,2 ml/min. Teplotní profil pece začínal na teplotě 40 °C držené po dobu jedné minuty. Následoval ohřev s teplotním gradientem 5 °C/min do teploty 280 °C, která byla opět držena po dobu jedné minuty. Hmotnostní spektrometr ionizoval látky eluující z kolony elektronovou ionizací při napětí 70 eV, kvadrupól skenoval vznikající ionty v rozsahu 35 – 650 amu při frekvenci 5 Hz. Identifikace jednotlivých látek byla provedena porovnáním se spektrální knihovnou NIST17 rozšířenou o MassBank.








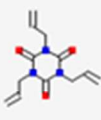

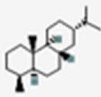


Graf 4: Plocha peaků identifikovaných látek pomocí plynové chromatografie a hmotnostní spektrometrie v logaritmickém měřítku.

Tabulka 15: Hlavní identifikované látky s jejich relativními změnami zprůměrovaných ploch peaků mezi hodnotami vzorků novější a starší pájecí pasty – první část.

	Název sloučeniny	Účel / Původ	Skupina	CAS	Retenční čas [min]	Relativní změna plochy
1	 Ethylbenzene	Rozpouštědlo	Hlavní složky	100-41-4	5,7	40,0%
2	 p-Xylene	Rozpouštědlo	Hlavní složky	106-42-3	6,0	29,5%
	 o, m-Xylene	Rozpouštědlo	Hlavní složky	95-47-6	6,5	11,5%
4	 2-Butene-1,4-diol, (Z)-	Aktivátor, rozpouštědlo	Hlavní složky	6117-80-2	8,1	-7,6%
5	 Ethanol, 2,2'-oxybis-	Aktivátor, rozpouštědlo	Zanikající	111-46-6	8,4	-88,7%
6	 Decane	Degradační produkt, rozpouštědlo	Vznikající	124-18-5	9,6	100,0%
7	 Formic acid, octyl ester	Degradační produkt, aktivátor	Vznikající	112-32-3	11,7	389,1%
8	 Ethanol, 2-(hexyloxy)-	Rozpouštědlo	Hlavní složky	112-25-4	12,6	-63,4%
9	 Ethanol, 2-(2-butoxyethoxy)-	Rozpouštědlo	Zanikající	112-34-5	15,0	-100,0%
10	 Dodecane	Degradační produkt, rozpouštědlo	Vznikající	112-40-3	15,4	1102,4%
11	 ? 2-Propanol, 1,1'-oxybis-	Rozpouštědlo	Zanikající	110-98-5	15,7	-100,0%
12		? 5,11-Diethyl-8-methyl-7,9-dioxapentadecane	Vznikající		16,2	100,0%

Tabulka 16: Hlavní identifikované látky s jejich relativními změnami zprůměrovaných ploch peaků mezi hodnotami vzorků novější a starší pájecí pasty – druhá část.

	Název sloučeniny	Účel / Původ	Skupina	CAS	Retenční čas [min]	Relativní změna plochy
13	Větvený alkohol		Zanikající		16,3	-97,6%
14	 ? Undecanol	Rozpouštědlo upravující viskozitu	Zanikající	112-42-5	17,4	-100,0%
15	 Octane, 1,1'-oxybis-	Degradační produkt	Vznikající	629-82-3	17,5	1283,7%
16	 Ethanol, 2-(octyloxy)-	Rozpouštědlo upravující viskozitu	Zanikající	10020-43-6	18,4	-92,7%
17	 Diethylene glycol hexyl ether	Rozpouštědlo upravující viskozitu	Hlavní složky	112-59-4	20,5	-7,0%
18	 Longipinane, (E)-	Terpen (z pryskyřice)	Hlavní složky		22,0	11,1%
19	 (-)-Neoclovene-(II), dihydro-	Terpen (z pryskyřice)	Hlavní složky		22,2	-2,0%
20	 Diethylene glycol heptyl ether	Rozpouštědlo	Hlavní složky	112-59-4	22,7	-31,7%
21	 Triallyl isocyanurate	Aktivátor	Hlavní složky	1025-15-6	27,0	5,5%
22	 1-Decanol, 2-hexyl-	Rozpouštědlo	Hlavní složky	2425-77-6	30,1	-9,0%
23	 Norabietane	Derivát kyseliny abietové (z pryskyřice)	Hlavní složky	2221-95-6	32,8	-21,1%

Na přiloženém grafu 4 můžeme nahlédnout na porovnání ploch peaků s jejich směrodatnými odchylkami indikujícími látkové množství identifikovaných sloučenin označených jejich retenčním časem (časem, kdy byla látka detekována) v jednotce count·min v logaritmickém měřítku. V tabulkách 15 a 16 můžeme vidět jednotlivé identifikované látky spolu s jejich účelem nebo původem a povětšinou i naznačenou chemickou strukturou (při spolehlivosti identifikace nad 90 %). U jednotlivých látek je uveden retenční čas, který byl použit k označení látek v grafu 4, a zároveň relativní změna plochy peaku. Jestliže látka bylo více ve starších vzorcích než v novějších, lze usoudit, že látka pravděpodobně vzniká při stárnutí, a relativní změna plochy je kladná. Naopak pokud bylo v novějších vzorcích naměřeno dané látky více než ve starších vzorcích, lze usoudit, že látka pravděpodobně zaniká při stárnutí, a relativní změna plochy je záporná.

Nejsnáze rozpoznatelným přímým důsledkem stárnutí jsou zanikající látka 16 a vznikající látka 15. Zde pravděpodobně došlo k odštěpení části molekuly u látky 16 a současně k jejímu spojení s další rozštěpenou molekulou téže zanikající látky. Jednotlivé detekované aktivátory se liší svou chemickou stabilitou nebo variabilitou mezi šaržemi. Nejstabilnějšími aktivátory se ukázaly být komponenty 21 a 4, jejichž změna koncentrace je menší než odchylky použité metody. Na druhou stranu aktivátor 5 v průběhu půl roku zanikl o cca 88 %. Variabilita v koncentraci terpenů a derivátů kyseliny abietové je dána především různými zdroji pryskyřice použité k výrobě tavidla. Pokles v koncentraci je pozorován zejména u rozpouštědel upravujících viskozitu, stárnutím budou tedy pravděpodobně nejvíce ovlivněny reologické vlastnosti pájecí pasty (například látky 14 a 16). Nejvyšší nárůst koncentrace (tedy jde pravděpodobně o důsledek degradace) je pozorován u látek 15, 11 a alkanů 6 a 10. Zdá se, že tyto látky mohou být využity pro analýzu pájecí pasty z hlediska úrovně její degradace. Látky 11, 12, 13 a 14 nebyly identifikovány s dostatečnou spektrální shodou s databází (< 80 %) a je tedy uvedena jen jejich nejpravděpodobnější varianta reflektující podobnost chemické struktury.

6.6 Smáčecí váhy

Dalším provedeným testem bylo měření pájitelnosti metodou smáčecích vah s využitím univerzitního meniskografu MK6. Tento přístroj disponuje citlivými mikrováhami, které měří sílu působící na testovaný materiál. Signály získané během jednotlivých měření byly vyhodnocovány softwarem na počítači připojeném k meniskografu.



Obrázek 31: Snímek univerzitního meniskografu MK6 [73].

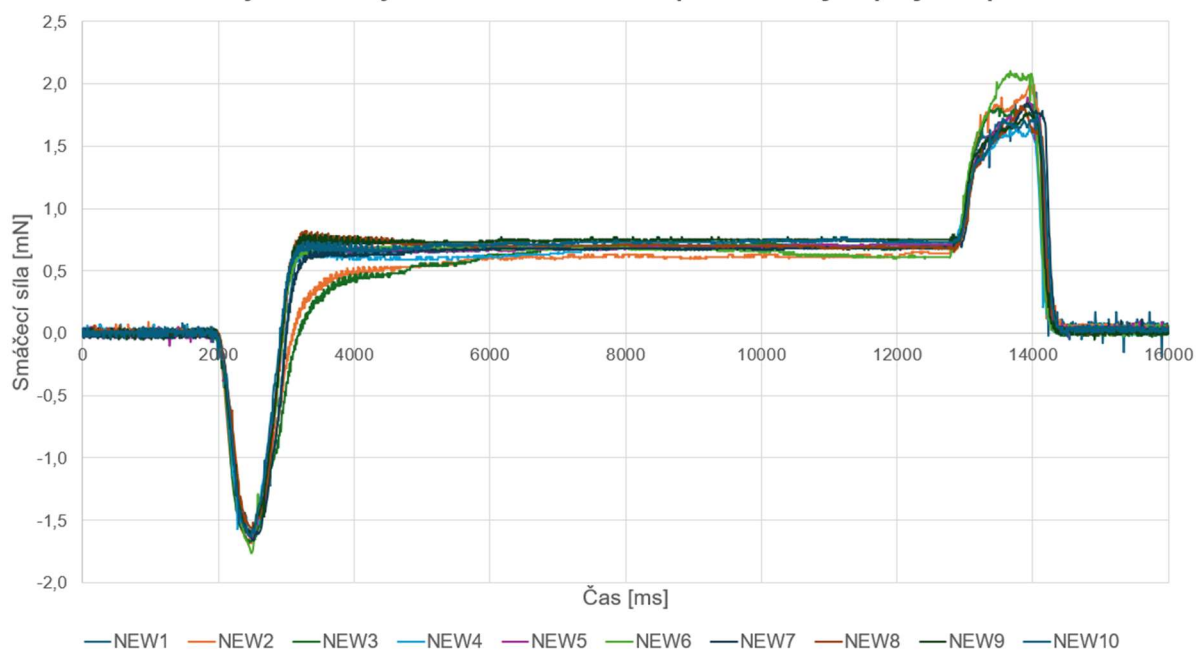
Jako testovaný vzorek byl použit měděný drát o průměru 1 mm, který byl nastříhán na přibližně 5 cm dlouhé kusy. Pro přípravu na měření metodou smáčecích vah a kuličkového testu bylo z obou pájecích past pomocí odstředivky separováno malé množství tavidla. Do tohoto tavidla byly následně ponořovány konce nastříhaných měděných drátků a ubrouskem bylo přebytečné tavidlo odstraněno. Jako pájecí slitina pro metodu smáčecích vah byla použita SAC slitina získaná přetavením jednotlivých past, která byla posléze přelita do kalíšku.



Obrázek 32: Snímek zkumavek se separovanými tavidly ze starší a novější pájecí pasty.

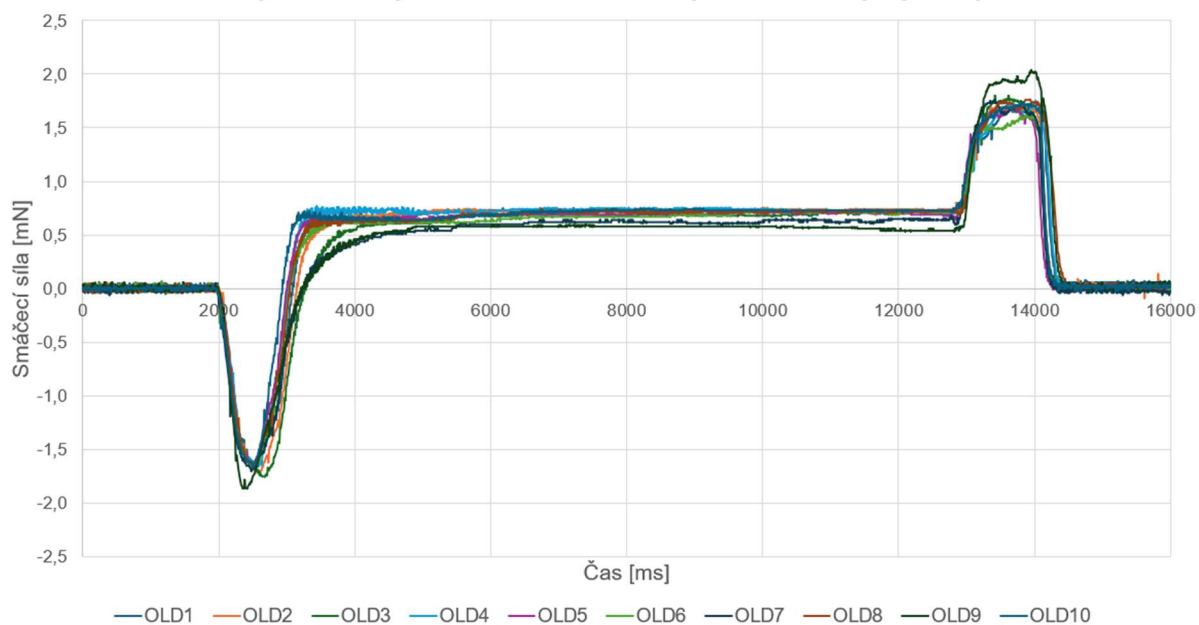
Všechna měření metodou smáčecích vah byla provedena při stejném nastavení parametrů: rychlosti 5 mm/s, hloubce ponoru 5 mm, době ponoření 10 s a teplotě pájecí lázně 270 °C. Před každým měřením bylo nutné očistit povrch roztavené pájecí slitiny od oxidů a zbytků tavidla.

Průběhy metody smáčekcích vah pro novější pájecí pastu



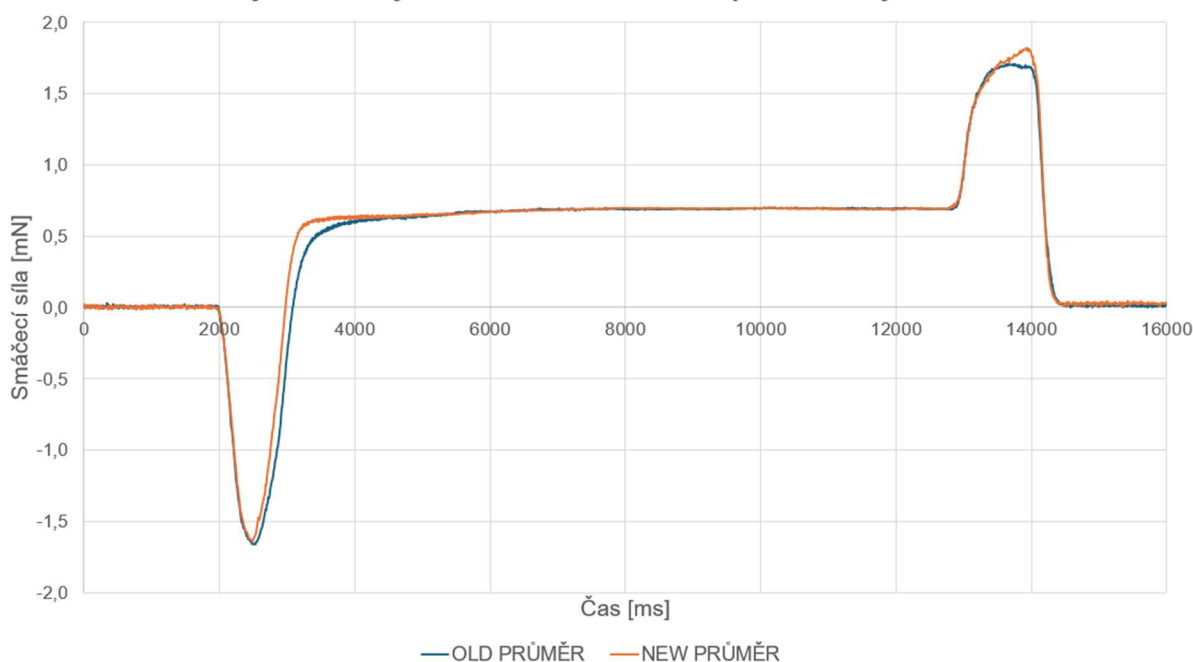
Graf 5: Naměřené průběhy metodou smáčekcích vah pro novější pájecí pastu a tavidlo.

Průběhy metody smáčekcích vah pro starší pájecí pastu



Graf 6: Naměřené průběhy metodou smáčekcích vah pro starší pájecí pastu a tavidlo.

Průběhy metody smáčecích vah z průměrných hodnot



Graf 7: Průběhy pro obě pájecí pasty a tavidla z průměrných hodnot smáčecích sil.

Z grafů získaných metodou smáčecích vah je patrné, že průběhy pro obě pájecí pasty, jak starší, tak novější, vykazovaly celkovou konzistenci. U obou past (a tavidel) lze pozorovat, že nárůst smáčecí síly byl u některých měření mírně pomalejší než u ostatních. Tento jev pravděpodobně souvisí s nanesením tavidla pouze na část ponořovaného drátku. Z průměrných dat vyplývá, že čas průchodu nulou (*zero-cross time*) byl mírně delší u kombinace starší pájecí pasty s odpovídajícím tavidlem ve srovnání s novější pájecí pastou.

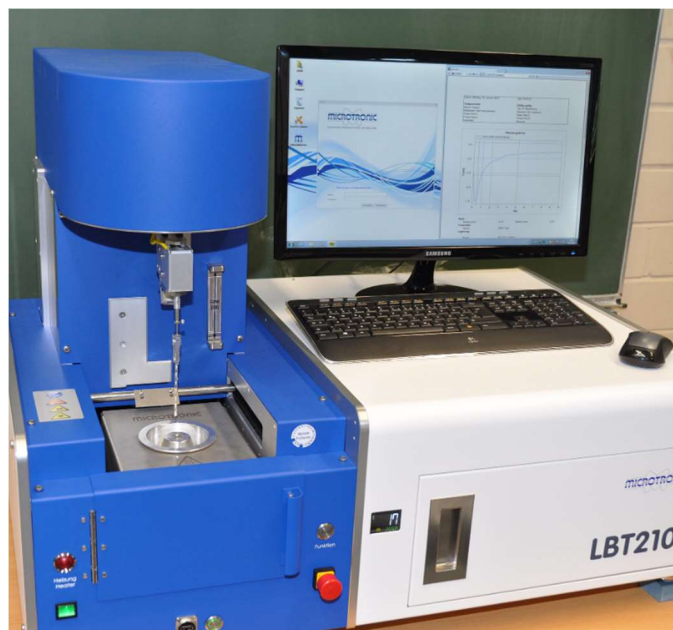
Numericky vyšel čas průchodu nulou pro novější pastu $0,96 \pm 8$ s a pro starší pastu $1,07 \pm 0,10$ s. Maximum smáčecí síly bylo u novější pasty v průměru $0,69 \pm 0,04$ mN a u starší pasty $0,70 \pm 0,05$ mN. Celkový čas smáčení (čas od ponoru špičky drátku po dosažení 2/3 smáčecí síly) byl v průměru u novější pasty $1,12 \pm 0,31$ s a pro starší pájecí pastu $1,35 \pm 0,36$ s. Při použití vyhodnocovací metody uvedené v kapitole 5.2 vycházející ze zdroje [66] by pro průměr z měření nové pasty vyšlo kvantitativní hodnocení 9, tedy vynikající míra pájitelnosti, a pro průměr z měření starší pasty 8, tedy dobrá míra pájitelnosti. Pokud bychom se podívali na jednotlivá měření novější pasty, celkový čas smáčení nikdy nebyl kratší než 1 s, tedy na kvantitativní hodnocení 10 se v žádném z měřených pokusů nedosáhlo, vedle toho pro dvojici měření byl čas průchodu nulou delší než 1 s, tedy kvantitativní hodnocení by se snížilo na 8, tedy dobrou míru pájitelnosti. Pro starší pastu bylo v nejlepších případech dosaženo času průchodu nulou kratšího než 1 s, tedy nejlepší výsledky starší pájecí pasty by dosáhly hodnocení 9, tedy vynikající míry pájitelnosti, vedle toho nejhorší by z důvodu

celkového času smáčení delšího než 1,5 s spadly do kvantitativního hodnocení 7, což však stále značí dobrou míru pájitelnosti.

Průměrná maximální dosažená síla v celkovém průběhu činila pro novější pájecí pastu $1,81 \pm 0,12$ mN a pro starší pájecí pastu $1,71 \pm 0,11$ mN.

6.7 Kuličkový test

Kuličkový test byl prováděn na automatizovaném a počítačem řízeném testovači pájitelnosti LBT210 od firmy Microtronic.

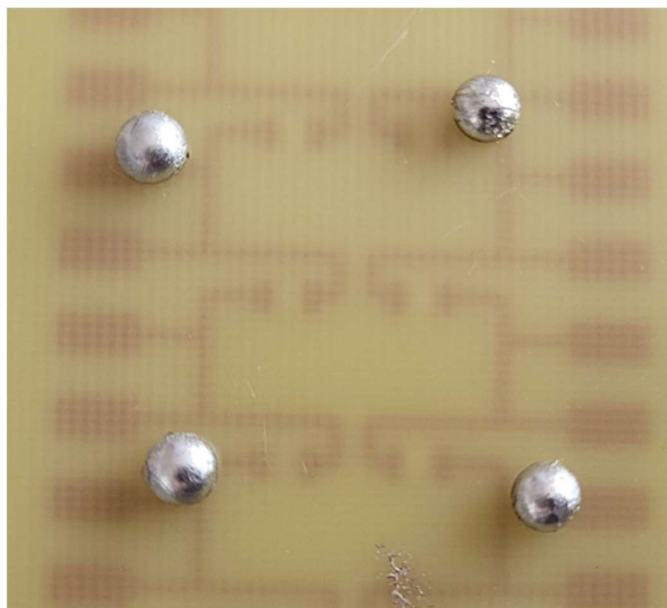


Obrázek 33: Snímek testovače pájitelnosti LBT210 od firmy Microtronic [74].

Tento testovač disponuje trojicí modulů pro testování pájitelnosti: modul s lázní pájky pro měření metody smáčecích vah, modul pro měření pájecí pasty a modul pro kuličkový test. Vedle modulu pro kuličkový test bylo v rámci měření experimentováno i s modulem pro analyzování pájecí pasty. Avšak tento modul se ukázal být z časových a technických důvodů nevhodný pro měření v rámci této diplomové práce.

Pro kuličkový test bylo použito stejné tavidlo jako pro metodu smáčecích vah, které bylo separováno z pájecích past, a stejný měděný drát o průměru 1 mm.

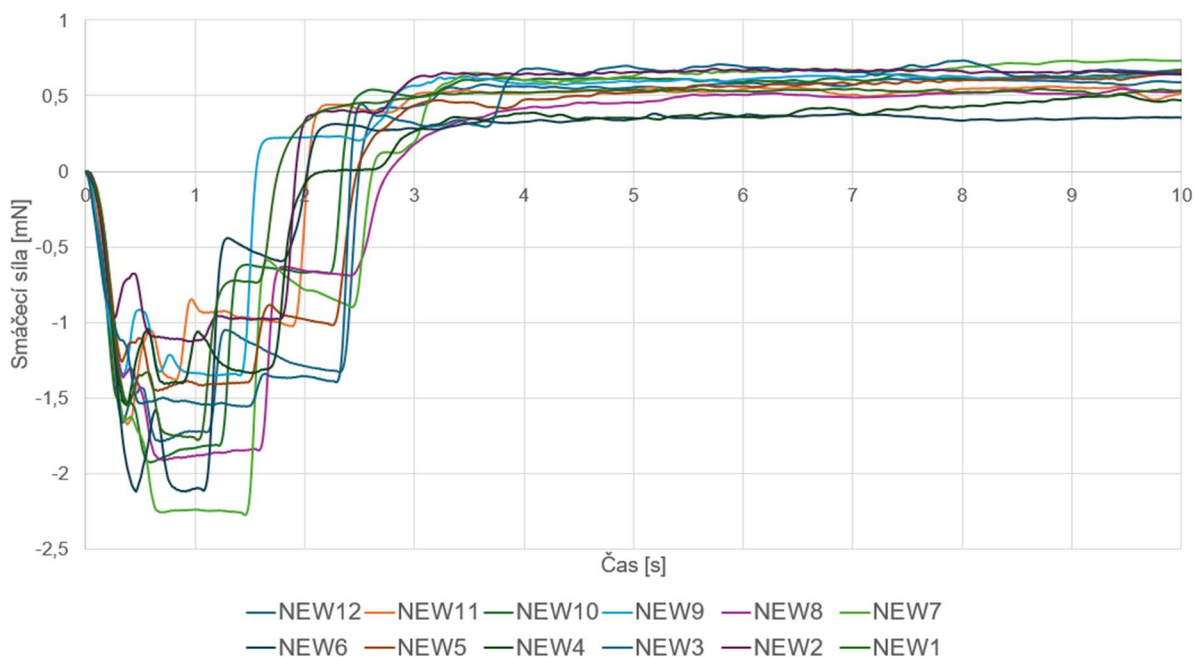
Pro výrobu kuliček pájecí slitiny z pájecí pasty se osvědčilo používat zadní stranu DPS ze substrátu FR4 (*Flame-Retardant 4*). Na tuto zadní stranu bylo aplikováno přibližně 0,2 g pájecí pasty, aby vznikla jedna kulička o průměru cca 4 mm, což odpovídalo požadovanému rozměru kuličky pro kuličkový test. Nanesená pájecí slitina byla následně přetavována v průběžné peci Mistral 260 podle dříve specifikovaného teplotního profilu uvedeného v podkapitole 6.3 na grafu 3.



Obrázek 34: Snímek čtveřice kuliček pájky vyrobených z novější pájecí pasty na zadní straně DPS.

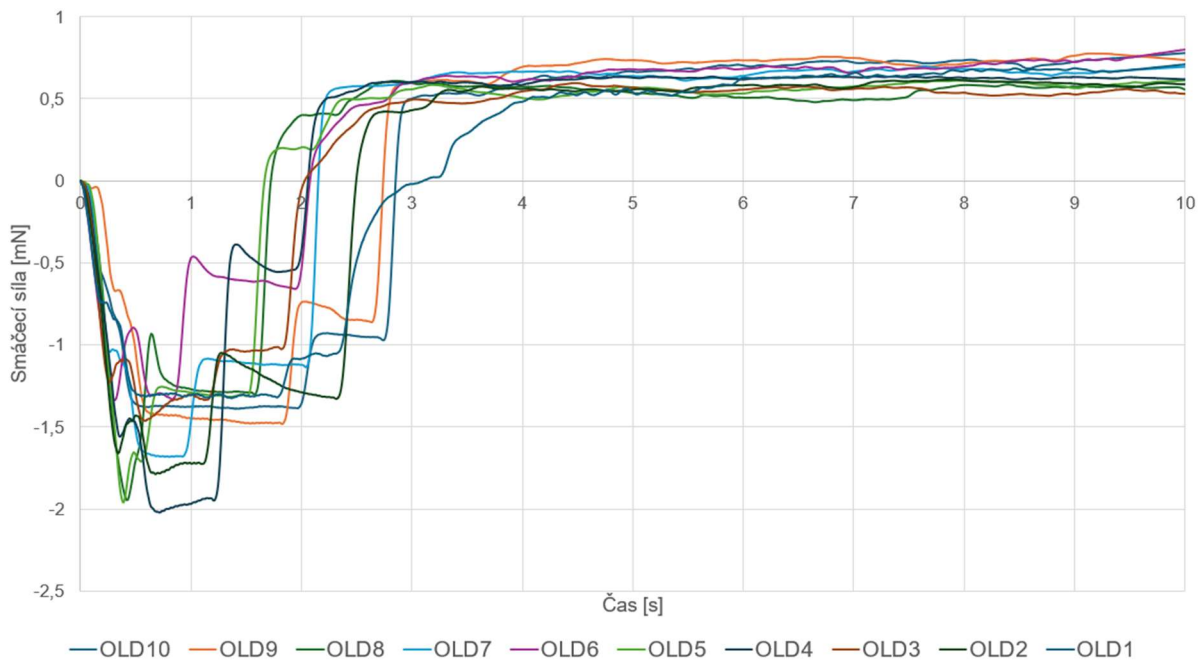
Kuličkový test probíhal na modulu, který byl tvořen nesmáčivým blokem ohříváným na teplotu 270 °C. Výrobce na nesmáčivý blok umístil čtveřici smáčivých bodů různých velikostí, aby umožnil zachycení roztavené kuličky pájecí slitiny a omezil tak její pohyb. Před každým měřením byla kulička zakápnuta tavidlem, které sloužilo k očištění povrchu kuličky od oxidů a napomáhalo udržení jejího kulovitého tvaru. Toto tavidlo by nemělo ovlivnit výsledky kuličkového testu, protože ihned z kuličky po vzájemném kontaktu sklo a při kontaktu se zahřátým blokem se okamžitě odpařilo.

Průběhy kuličkového testu pro novější pastu



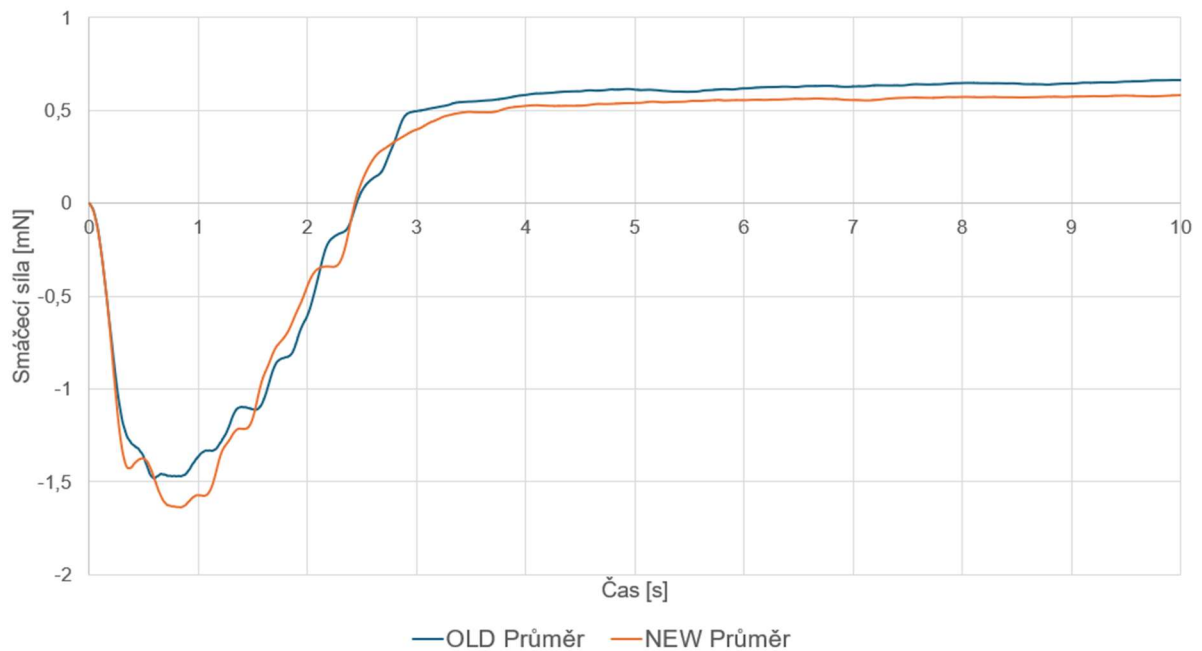
Graf 8: Naměřené průběhy kuličkového testu pro kuličky z novější pájecí pasty.

Průběhy kuličkového testu pro starší pastu



Graf 9: Naměřené průběhy kuličkového testu pro kuličky ze starší pájecí pasty.

Průběhy kuličkového testu z průměrných hodnot



Graf 10: Průběhy pro obě pájecí pasty z průměrných hodnot získaných při kuličkovém testu.

Ve srovnání s metodou smáčecích vah, která byla hodnocena v kapitole 6.6, se kuličkový test ukázal být silně nekonzistentní. Průběhy byly silně schodovité, skládající se ze 2 až 3 schodů. Nejnižší „rovinu“ představoval bod totálního nesmáčení při ponoření drátku do kuličky, která jím byla rozdělena, jak bylo naznačeno v rešeršní části na obrázku 15 v kapitole 5.2.1. Další 2 až 3 schody znázorňovaly postupné obklopování drátku formující se kuličkou. Tato metoda se ukázala být obtížně reprodukovatelná. Hlavní problém představovalo přesné zasažení středu kuličky, která měla průměr 4 mm, drátkem o průměru 1 mm. Při pokusech s tenčím drátkem nedošlo k rozdělení kuličky, čímž nebyl naplněn princip testu. Dalším problémem bylo zajistit, aby byl drátek dostatečně rovný a měl vhodně zaoblený konec, kterým se ponořoval do kuličky (nesměl být totiž příliš ostrý, aby došlo ke vhodnému rozdělení kuličky). Při zdánlivě úspěšných pokusech se kulička zpětně poměrně nahodile formovala okolo drátku, což způsobovalo problémy s nepřesným průběhem smáčení drátku.

V rámci číselného vyhodnocení tohoto experimentu je z příložených grafů zřejmé, že průchod smáčecí síly nulou, tedy okamžik, kdy se smáčecí síla vyrovnala vztlakové síle, byl silně závislý na momentu, kdy došlo k postupnému formování kuličky. Průměrný čas dosažení rovnováhy těchto sil u novější pasty činil $2,44 \pm 0,34$ s a u starší pasty $2,44 \pm 0,47$ s. Dalším zajímavým aspektem tohoto testu byla finální síla změřená siloměrem, která indikovala množství pájecí slitiny, která zůstala na drátku. Toto množství bylo rovněž nekonzistentní, jak je možné nahlédnout v grafech 8 a 9. Průměrná finální síla při měření se starší pastou činila $0,66 \pm 0,10$ mN, což odpovídá přibližně 66 ± 10 μ g odejmuté pájecí slitiny, a při měření s novější pastou byla finální síla $0,58 \pm 0,08$ mN, což odpovídá přibližně 58 ± 8 μ g odejmuté slitiny.

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo seznámit se s pájecími pastami a jejich vlastnostmi a prozkoumat, jak se tyto jejich vlastnosti mění v čase s ohledem na výrobcem deklarovanou dobu expirace. Diplomová práce se skládá z teoretické rešeršní části, která seznamuje čtenáře s problematikou pájecích past, jejich nanášením, jejich strukturou, možnými defekty při jejich použití a vybranými testovacími metodami, kterými lze pájecí pasty analyzovat, a části praktické, která zmíněné testovací metody následně aplikuje v praxi pro porovnání vzorků různě starých pájecích past.

Teoretická část práce podrobněji rozebírá technologii povrchové montáže a jeden z možných procesů spojených s výrobou pájecích zrn. Kromě toho je zde uvedeno dělení pájecích past na jednotlivé typy podle velikosti zrn. Dále se rešeršní část práce dotkla základního přehledu o různých typech tavidel a pájecích slitin, od tradičního, dnes již z ekologických důvodů zakázaného SnPb po moderní alternativy jako SAC, SC a SnBi. Další kapitoly se zabývají popisem vybraných potenciálních defektů spojených s pájecími pastami a povrchovou montáží, včetně vlivu, možných příčin vzniku a základních charakteristik vybraných intermetalických sloučenin ovlivňujících kvalitu pájených spojů. Závěrečné části rešerše se věnují představení různých testovacích metod pro sledování rozličných vlastností pájecích past, jako například měření viskozity, plynová chromatografie s hmotnostní spektrometrií či metoda smáčecích vah, které jsou následně využity v praktické části práce.

Po rešeršní části práce následuje praktická sekce, rozdělená do sedmi podkapitol, které se zabývají přípravou jednotlivých experimentů a prezentací jejich výsledků. Pro praktickou část práce byly použity dvě pájecí pasty s produktovým označením M31-GRN360-K1MK-V-3.5Ag-0.75Cu-SnBal, každá s jiným datem výroby. Jedná se o pájecí pasty obsahující pájecí slitinu SAC s procentuálním složením prvků Sn95,75 - Ag3,5 - Cu0,75 a tavidlo na bázi kalafuny.

V práci jsou uvedeny detailní snímky pájecích zrn po odstranění tavidla získané pomocí elektronového mikroskopu a několik přehledových snímků z konfokálního mikroskopu. V rámci experimentální části byly vyrobeny metalografické výbrusy pájecích zrn pro novější i starší pájecí pastu, což umožnilo sledovat mikrostruktury vznikající uvnitř jednotlivých pájecích zrn pomocí již zmíněných mikroskopů. Porovnáním přehledových snímků pořízených na obou metalurgických výbrusech lze usoudit, že se uvnitř pájecích zrn vytvářejí a shlukují mikrostruktury tvořené intermetalickými sloučeninami, jejichž počet s časem narůstá a zároveň se s časem zvětšují. V zrnech sledované pájecí slitiny SAC byla nalezena světlejší a tmavší centra blíže neurčených intermetalických sloučenin na bázi kombinace cínu, stříbra a mědi. Prvková analýza provedená elektronovým mikroskopem následně ukázala, že tmavnutí okrajů některých mikrostruktur je pravděpodobně způsobeno vyšší koncentrací mědi. Při porovnání

pájecích zrn novější a starší pasty se zdálo, že u starších zrn docházelo k častějšímu výskytu tmavších okrajů intermetalických center.

Jednou ze zkoumaných vlastností pájecí pasty byla její roztékavost, pro niž byl co nejpřesněji napodoben přetavovací teplotní profil podle doporučení z datového listu zkoumaných past. Vyhodnocení naměřených dat naznačilo, že rozdíl v roztékavosti byl menší než směrodatná odchylka. To naznačuje, že tato vlastnost zůstala konzistentní v rámci půlročního rozdílu mezi oběma pastami.

Další zkoumanou vlastností v rámci praktické části byla dynamická viskozita pájecí pasty. Výsledky pomocí měření na rotačním viskozimetru se systémem kužel-deska ukázaly, že dynamická viskozita se mezi zkoumanými vzorky pohybovala v rozmezí 13 až 20 % v závislosti na rychlosti rotace kužele. Tyto výsledky byly potvrzeny dalším experimentem, a to plynovou chromatografií s hmotnostní spektrometrií, která zkoumala rozdíly ve složení tavidla obou past. Analýza celkových iontových chromatogramů ukázala výrazný úbytek většiny rozpouštědel použitých pro úpravu viskozity pájecí pasty, což korelovalo s výsledky měření dynamické viskozity. Přehledové tabulky a graf v kapitole 6.5 o plynové chromatografii dále zobrazují naměřené koncentrace a relativní změny těchto koncentrací jednotlivých hlavních detekovaných komponent tavidel mezi oběma pájecími pastami. Ukazují, že i v krátkém časovém období (cca 6 měsíců) je pomocí citlivé metody plynové chromatografie s hmotnostní spektrometrií možné rozpoznat poměrně značné rozdíly ve složení obou pájecích past.

Po zkoumání vnitřních mikrostruktur, roztékavosti, dynamické viskozity a složení tavidel obou pájecích past byla provedena analýza pájitelnosti. K tomu byly použity měděné drátky, které byly ponořovány do pájecí slitiny získané přetavením jednotlivých past. Pro odstranění oxidů a nečistot na koncích měděných drátků bylo použito tavidlo odpovídající zkoumané pájecí slitině. Obě tavidla byla separována na odstředivce z původních pájecích past. Pájitelnost byla analyzována metodou smáčecích vah a následně kuličkovým testem. Metoda smáčecích vah poskytla kvantitativní hodnocení pájitelnosti, přičemž byly pozorovány mírné rozdíly mezi oběma pastami. Časy smáčení a průchodu nulou byly mírně delší v případě starší pájecí pasty, maximum smáčecí síly bylo mírně menší pro starší pájecí pastu ve srovnání s novější pájecí pastou. Výsledky měření metodou smáčecích vah byly konzistentní u obou past. Ovšem u kuličkového testu není možné hovořit o konzistenci měření. Ukázalo se, že reprodukovatelnost tohoto testu byla velmi nízká zejména z důvodu obtížného vystředění drátku nad kuličkou pájky. Zpětné formování rozdělené kuličky před celkovým smočením drátku bylo nahodilé a postupné, což vedlo ke schodovitým průběhům smáčecí křivky. Zprůměrovaný čas průchodů nulou byl u obou past srovnatelný, avšak hlavní rozdíl mezi oběma pastami spočíval v zprůměrované konečné síle, která reprezentovala množství ulpělé slitiny na měděných drátcích. Toto množství bylo mírně větší v případě starší pájecí pasty

ve srovnání s pastou novější. Vzhledem k minimálním rozdílům v pájecí slitině samotné byly odlišnosti zjištěné při těchto dvou testech zapříčiněny pravděpodobně variabilitou složení tavidel a jejich schopností odstranit oxidy a nečistoty z povrchu měděných drátků.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo prozkoumat a posoudit vlastnosti exspirované pájecí pasty a porovnat je s pájecí pastou neexspirovanou. Během měření se prokázalo, že slitina SAC je dle očekávání v krátkém sledovaném časovém období stabilní a změny v mikrostrukturách mají minimální vliv na celkové vlastnosti pájecí pasty. Vyšlo najevo, že tavidlo vykazuje významnou degradaci, což má vliv zejména na viskozitu produktu a částečně i na jeho schopnost odstraňovat oxidy a nečistoty z povrchu materiálů. Pro získání přesnějších údajů by bylo nezbytné provést testy na jedné pájecí pastě s časovým odstupem. Použití dvou různě starých pájecích past výrazně zvýšilo nejistotu výsledků kvůli možnému rozdílnému složení obou produktů, zejména použitím tavidel na bázi přírodní pryskyřice, která pravděpodobně pochází z různých stromů a byla pravděpodobně sklizena v různých ročních obdobích. Na základě získaných údajů lze konstatovat, že doporučená doba skladování pájecí pasty v rozmezí 3-6 měsíců by mohla být prodloužena a pájecí pasty by bylo možné nadále používat po určitou dobu bez významných změn v jejich vlastnostech.

Na tuto práci by bylo vhodné navázat dlouhodobějším pozorováním jednotlivých pájecích past a porovnáváním výsledků v rámci jednoho produktu pro eliminaci nejistoty způsobené možnými změnami v procesu výroby či rozdílným skladováním obou produktů v čase. Dále by bylo možné rozšířit měření o další experimenty.

Zdroje

- [1] R. Bales, „(SMT) Surface-Mount Technology: Meaning, Definition, and Examples“, History-Computer. Viděno: 21. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://history-computer.com/smt-surface-mount-technology/>
- [2] „Surface Mount Technology Advantages and Disadvantages“. Viděno: 21. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <http://www.electronicandyou.com/blog/surface-mount-technology-advantages-and-disadvantages.html>
- [3] Kerstin, „SMT vs THT - A Complete Guide about Their Differences“, IBE Electronics. Viděno: 21. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.pcbaaa.com/smt-vs-tht/>
- [4] S. S. Hasan, „THT vs SMT PCB Technology | Advantages & Disadvantages“, Circuits DIY. Viděno: 21. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.circuits-diy.com/tht-vs-smt-pcb-technology-advantages-disadvantages/>
- [5] „Some Basic Knowledge about Solder Paste in SMT“. Viděno: 21. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: https://www.allpcb.com/solder_paste/
- [6] Nimesh.Patel@cooksongold.com, „What Is Solder Paste? | Soldering Paste“, The Bench. Viděno: 24. září 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.cooksongold.com/blog/learn/what-is-solder-paste-and-how-do-you-use-it/>
- [7] „The Role of Solder Paste in SMT Line“, iTECH SMT and THT Machines. Viděno: 21. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.itechsmt.com/blogs/news/the-role-of-solder-paste-mixer-in-smt-line>
- [8] *Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (recast) Text with EEA relevance*, roč. 174. 2011. Viděno: 21. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <http://data.europa.eu/eli/dir/2011/65/oj/eng>
- [9] Zs. Illyefalvi-Vitez, J. Pinkola, G. Harsanyi, Cs. Dominkovics, B. Illes, a L. Tersztyanszky, „Present status of transition to Pb-free soldering“, in *28th International Spring Seminar on Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress, 2005.*, kvě. 2005, s. 88–93. doi: 10.1109/ISSE.2005.1491006.
- [10] „Solder Paste Expiration / Shelf Life | Eric Bastow | Indium Corporation Blogs | Flux | Indium Corporation | No Clean Flux | No Clean Solder | Rework | Solder | Solder Alloys | Solder Flux | Soldering | Solder Paste | Solder Stencils | Solderability | Soldering Products“. Viděno: 21. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.indium.com/blog/solder-paste-expiration-shelf-life.php>
- [11] „Solder FAQs“. Viděno: 21. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.nordson.com/en/divisions/efd/resources/solder-faqs>
- [12] A. Ayodele, „SMT Manufacturing: Everything You Need to Know“. Viděno: 22. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/smt-manufacturing-everything-you-need-to-know>
- [13] „What Is SMT Assembly? The Advantages and Applications of SMT“, Geospace Technologies. Viděno: 22. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://geospacemfg.com/blog/smt-assembly-technology/>
- [14] „Advantages and Disadvantages of Surface Mounting Technology - PCB Assembly - PCBway“. Viděno: 22. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: https://www.pcbway.com/blog/PCB_Assembly/Advantages_and_Disadvantages_of_Surface_Mounting_Technology.html
- [15] „Stencil Design Guidelines for Electronics Assembly Technologies.“.
- [16] „Difference Between Solder Paste And Flux – Material Welding“. Viděno: 27. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.materialwelding.com/difference-between-solder-paste-and-flux/>
- [17] Y. Wate, „What Is Solder Paste and What Is It Used For?“, MUO. Viděno: 27. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.makeuseof.com/what-is-solder-paste-and-what-is-it-used-for/>
- [18] „Main Types of Soldering Flux – Material Welding“. Viděno: 27. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.materialwelding.com/types-of-soldering-flux/>
- [19] C. Manager, „What is Solder Paste and How to Use it?“, ElectronicsHacks. Viděno: 27. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://electronics hacks.com/what-is-solder-paste-and-how-to-use-it/>
- [20] „Solder paste: what is it and when do you use it?“ Viděno: 27. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vtech-smt.co.uk/blog/post/solder-paste-what-is-it-and-when-do-you-use-it>
- [21] „Solder Paste Handling Guidelines“. AIM. Viděno: 13. duben 2024. [Online]. Dostupné z: https://aimsolder.com/sites/default/files/aim_paste_handling_guideline_revnf1.pdf
- [22] T. A. Nguty, N. N. Ekere, a A. Adebayo, „Correlating solder paste composition with stencil printing performance“, in *Twenty Fourth IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology*

Symposium (Cat. No.99CH36330), Austin, TX, USA: IEEE, 1999, s. 304–312. doi: 10.1109/IEMT.1999.804837.

- [23] admin, „Solder Paste Powder: When to Downsize“, AIM Solder. Viděno: 27. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://aimsolder.com/technical-articles/solder-paste-powder-when-downsize>
- [24] *Advanced plasma atomization process: How powder is made for additive manufacturing*, (2020). Viděno: 27. říjen 2023. [Online Video]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=vouCR6bhCt0>
- [25] „Requirements for Soldering Pastes J Standard 005A“. Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: https://devzone.nordicsemi.com/cfs-file/__key/support-attachments/beef5d1b77644c448dabff31668f3a47-6c034f8489cc46f0bee44ca17e107420/5_2D00_24b_5F00_d_5F00_J005A_5F00_proposed_5F00_for_5F00_ballot.pdf
- [26] „Solder Paste Basics“. 24. březen 2024. [Online]. Dostupné z: https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Solder_Paste_Basics.pdf
- [27] „Which Cleaner Works Best on OA Fluxes and Pastes?“ Viděno: 27. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.microcare.com/en-US/Resources/Resource-Center/FAQs/Which-Cleaner-Works-Best-on-OA-Fluxes-and-Pastes>
- [28] „Insituware | Definitive Guide to Solder Paste“, Insituware. Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.insituware.com/definitive-guide-to-solder-paste>
- [29] „SAC305 solder paste for electronics manufacturing - GENMA“. Viděno: 29. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.genma.eu/en/solder-paste/sac305-solder-paste.html>
- [30] N.-C. Lee, „Lead-Free Soldering - Where The World Is Going“, *Adv. Microelectron.*, led. 1999, Viděno: 5. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: https://www.academia.edu/3130744/Lead_Free_Soldering_Where_The_World_Is_Going
- [31] Q. <https://www.quadsimia.com>, „Bismuth Solders | Products made by Indium Corporation“, Indium Corporation. Viděno: 29. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.indium.com/products/solders/bismuth/>
- [32] D. T. Siewert, „Properties of Lead-Free Solders“.
- [33] „Solder Paste Bleeding - Printing Defect“, SURFACE MOUNT PROCESS. Viděno: 12. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.surfacemountprocess.com/solder-paste-bleeding---printing-defect.html>
- [34] „Solder Paste Bridging - Printing Defect“, SURFACE MOUNT PROCESS. Viděno: 12. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.surfacemountprocess.com/solder-paste-bridging---printing-defect.html>
- [35] „Common SMT Soldering Defects and How to Avoid Them in PCB Assembly – Siytek“. Viděno: 12. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: https://siytek.com/common-smt-soldering-defects/?utm_content=cmp-true
- [36] „What is Solder Bridging? - PCB Directory“. Viděno: 12. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.pcbdirectory.com/community/what-is-solder-bridging>
- [37] „Solder Bridging Issues During Assembly“, Solder Paste, Solder Flux - FCT Solder. Viděno: 12. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://fctsoldier.com/solder-bridging-issues-during-assembly/>
- [38] „Common solder paste printing problems and solutions in SMT processing. | Censtry“. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.censtry.com/blog/common-solder-paste-printing-problems-and-solutions-in-smt-processing.html>
- [39] „Solder Paste Peaking - Printing Defect“, SURFACE MOUNT PROCESS. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.surfacemountprocess.com/solder-paste-peaking---printing-defect.html>
- [40] „Solder Paste Scooping - Printing Defect“, SURFACE MOUNT PROCESS. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.surfacemountprocess.com/solder-paste-scooping---printing-defect.html>
- [41] „Stuck in a Slump? Factors Impacting Solder Paste Slump Susceptibility. | Jenny Gallery | Indium Corporation Blogs | Solder Joints | Solder Paste“. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.indium.com/blog/stuck-in-a-slump-factors-impacting-solder-paste-slump-susceptibility.php>
- [42] „What does the term voiding mean?“, SURFACE MOUNT PROCESS. Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.surfacemountprocess.com/what-does-the-term-voiding-mean.html>
- [43] U. Welzel, N. Holle, a R. B. GmbH, „Voids in SMT Solder Joints – Trends in Automotive Electronics“.

- [44] K. Dušek, V. Straka, M. Brejcha, a I. Beshajová Pelikánová, „Influence of type of reflow technology and type of surface finish on tomb stone effect", in *Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology*, kvě. 2013, s. 132–135. doi: 10.1109/ISSE.2013.6648229.
- [45] D. Shapiro, „SMT Tombstone Defects and How To Prevent Them", Vinatronic inc. Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://vinatronic.com/blog/smt-tombstone-defects/>
- [46] S. Sattel, „What Is PCB Tombstoning? | EAGLE | Blog", Fusion 360 Blog. Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/what-is-pcb-tombstoning/>
- [47] „Solder Tombstoning Issues During Reflow", Solder Paste, Solder Flux - FCT Solder. Viděno: 3. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://fctsoldier.com/solder-tombstoning-issues-during-reflow/>
- [48] „What is PCB Tombstone? - PCB Manufacturing Information - PCBway". Viděno: 3. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://www.pcbway.com/blog/PCB_Manufacturing_Information/What_is_PCB_Tombstone_.html
- [49] T. Lentz a G. Smith, „What Do You Want on Your Tombstone?".
- [50] „Solder Graping Issues", Solder Paste, Solder Flux - FCT Solder. Viděno: 12. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://fctsoldier.com/graping-issues/>
- [51] S. Law, „Soldering defects and atmosphere explained", Electronic Products & Technology. Viděno: 12. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.ept.ca/features/soldering-defects-and-soldering-atmosphere/>
- [52] „What Causes Solder Ball Formation During SMD Reflow?" Viděno: 3. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/what-causes-solder-ball-formation-during-smd-reflow>
- [53] „Solder Balls or Solder Balling on a PCB - Wave Soldering Defects". Viděno: 3. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/pcb/wave-soldering-defects/solder-balls.html>
- [54] „Solder Ball Defects", Heller. Viděno: 3. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://hellerindustries.com/solder-ball-defects/>
- [55] „What is Solder Beading? - PCB Directory". Viděno: 3. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.pcbdirectory.com/community/what-is-solder-beading>
- [56] „SMT defect - ‚Solder beads‘ phenomenon | SunzonTech". Viděno: 3. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.sunzontech.com/item/smt-defect-solder-beads-phenomenon-sunzontech>
- [57] A. Pietriková, J. Ďurišin, a P. Mach, „Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektrotechnike". 1. vydání. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010.
- [58] „What is IMC (Intermetallic Compound) in the electronic manufacturing industry? | I am a Manufacturing Process Engineer (MPE)". Viděno: 3. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://mpe.researchmfg.com/what-is-imc-intermetallic-compound/>
- [59] E. Hare, „Intermetallics in Solder Joints".
- [60] „How to understand IMC and why intermetallic compound is important for PCB assembly - MainPCBA". Viděno: 3. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.mainpcba.com/how-to-understand-imc/>
- [61] K. Dušek *et al.*, „Influence of Flux and Related Factors on Intermetallic Layer Growth within SAC305 Solder Joints", *Materials*, roč. 14, č. 24, Art. č. 24, led. 2021, doi: 10.3390/ma14247909.
- [62] „ENIG". Viděno: 7. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <http://www.sharedpcb.com/new/ENIG.html?btwaf=56586231>
- [63] „Solder paste qualification of low-temperature SnAgBiXx solder pastes based on selected solder paste tests", Fraunhofer Institute for Silicon Technology. Viděno: 8. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.isit.fraunhofer.de/en/newsroom/techblog/2021/08/solder-paste-qualification-of-low-temperature-snagbixx-solder-pa.html>
- [64] K. Dušek, „Diagnostika poruch pájených spojů, kontrolní a testovací metody", dub. 2017.
- [65] K. Dušek *et al.*, „A Weakness of Wetting Balance Method during the Diagnostic of Connector Pins with Wetting Issue", in *2022 45th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, kvě. 2022, s. 1–5. doi: 10.1109/ISSE54558.2022.9812772.
- [66] F. Xu, R. Farrell, a R. Mohanty, „To Quantify a Wetting Balance Curve". Viděno: 8. duben 2024. [Online]. Dostupné z: https://www.ipc.org/system/files/technical_resource/E39%26S19_02%20-%20Frank%20Xu.pdf
- [67] J. A. DeVore, „Practical quantitative solderability testing", in *Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, Dayton, OH, USA: IEEE, 1989, s. 2027–2034. doi: 10.1109/NAECON.1989.40499.

- [68] „Viskozita tekutin a její měření“. Viděno: 17. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://adoc.pub/viskozita-tekutin-a-jeji-meni.html>
- [69] „Brookfield Dial Viscometer - Operating Instructions“. Viděno: 18. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.brookfieldengineering.com/-/media/ametekbrookfield/manuals/obsolete%20manuals/dial%20m85-150-p700.pdf?la=en>
- [70] D. A. Skoog, D. M. West, a F. J. Holler, *Analytická chemie*, 9. vyd., roč. 2019. VŠCHT vydavatelství.
- [71] „High-Reliability Lead-Free Solder Paste M31-GRN360-K-V“. Viděno: 20. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://docplayer.net/43474862-High-reliability-lead-free-solder-paste-m31-grn360-k-v.html>
- [72] „Laboratoř diagnostiky materiálů FEL ČVUT“, Electrotechnology. Viděno: 20. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://technology.fel.cvut.cz/laboratore/laborator-diagnostiky-materialu/>
- [73] „Prototypové pracoviště FEL ČVUT“, Electrotechnology. Viděno: 21. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://technology.fel.cvut.cz/laboratore/prototypove-pracoviste/>
- [74] „Ausstattung des Labors: Maschinenbau - TH OWL“. Viděno: 3. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.th-owl.de/en/maschinenbau/fachbereich/labore/feinsystemtechnik/ausstattung/>

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení pájecích past podle velikosti pájecích zrn dle ANSI/J-STD-005 [25], [26].	12
Tabulka 2: Rozdělení tavidel [18].	13
Tabulka 3: Srovnání teploty tání zmíněných pájecích slitin [30], [31], [32].	15
Tabulka 4: Vyhodnocovací tabulka kritérií smáčecích křivek [66].	26
Tabulka 5: Hodnocení kritéria $T_{(0)}$ [66].	27
Tabulka 6: Hodnocení kritéria $T_{(2/3)}$ [66].	27
Tabulka 7: Hodnocení kritéria F_{max} [66].	27
Tabulka 8: Vyhodnocení míry pájitelnosti [66].	28
Tabulka 9: Základní vlastnosti pájecí pasty z datového listu [71].	31
Tabulka 10: Prvková analýza výbrusu z obrázku 27 – váhová koncentrace prvků.	37
Tabulka 11: Nastavení teploty zón a rychlosti dopravníkového pásu.	39
Tabulka 12: Výsledné zprůměrované hodnoty testu roztékavosti.	41
Tabulka 13: Výsledky z pokusu měření dynamické viskozity systémem kužel–deska.	42
Tabulka 14: Přepočtová tabulka s faktory pro výpočet dynamické viskozity v závislosti na rychlosti otáčení pro systém kužel–deska.	42
Tabulka 15: Hlavní identifikované látky s jejich relativními změnami zprůměrovaných ploch peaků mezi hodnotami vzorků novější a starší pájecí pasty – první část.	45
Tabulka 16: Hlavní identifikované látky s jejich relativními změnami zprůměrovaných ploch peaků mezi hodnotami vzorků novější a starší pájecí pasty – druhá část.	46

Seznam grafů

Graf 1: Ukázka prvkové analýzy pájecího zrna.	34
Graf 2: Doporučený teplotní profil pro zkoumanou pájecí pastu [71].	39
Graf 3: Změřený teplotní profil povrchu měděné destičky při průchodu pecí.	39
Graf 4: Plocha peaků identifikovaných látek pomocí plynové chromatografie a hmotnostní spektrometrie v logaritmickém měřítku.	44
Graf 5: Naměřené průběhy metodou smáčecích vah pro novější pájecí pastu a tavidlo.	49
Graf 6: Naměřené průběhy metodou smáčecích vah pro starší pájecí pastu a tavidlo.	49
Graf 7: Průběhy pro obě pájecí pasty a tavidla z průměrných hodnot smáčecích sil.	50
Graf 8: Naměřené průběhy kuličkového testu pro kuličky z novější pájecí pasty.	52
Graf 9: Naměřené průběhy kuličkového testu pro kuličky ze starší pájecí pasty.	53
Graf 10: Průběhy pro obě pájecí pasty z průměrných hodnot získaných při kuličkovém testu.	53

Seznam obrázků

Obrázek 1: Ukázka principu šablonového tisku [15].	11
Obrázek 2: Ukázka vytečení pájecí pasty [33].	16
Obrázek 3: Pohled z boku a shora na bridging. Vlevo ukázka bridgingu před přetavením, vpravo ukázka bridgingu po přetavení [28].	17
Obrázek 4: Ukázka nedostatečného množství pájecí pasty na pájecích ploškách [28].	17
Obrázek 5: Ukázka – „psí uši“ [39].	18
Obrázek 6: Ukázka – scooping [28].	18
Obrázek 7: Ukázka – slumping [28].	19
Obrázek 8: Pohled z boku na dutiny v pájeném spoji [28].	20
Obrázek 9: Ukázka – tombstoning [46].	20
Obrázek 10: Ukázka posunutých a zkosených komponent [49].	21
Obrázek 11: Ukázka – solder graping [51].	21
Obrázek 12: Ukázka kuličky pájky po přetavení [52].	22
Obrázek 13: Struktura pájeného spoje. Převzato z [57].	23

Obrázek 14: Schématická ilustrace smáčecí křivky s parametry a polohou vzorku vůči hladině lázně. Převzato z [65].	26
Obrázek 15: Schématická ilustrace sekvence kroků kuličkového testu. Převzato z [67].	28
Obrázek 16: Geometrické uspořádání pro měření rotačním viskozimetrem – systém kužel–deska. Převzato z [69].	29
Obrázek 17: Snímky pořízené konfokálním mikroskopem s laserovou fokusací. Vlevo starší pasta při 150násobném zvětšení, vpravo novější pasta při 150násobném zvětšení.	32
Obrázek 18: Snímky pájecích zrn pořízené elektronovým mikroskopem. Vlevo starší pasta při 500násobném zvětšení, vpravo novější pasta při 850násobném zvětšení.	32
Obrázek 19: Detail struktury povrchu pájecího zrna novější pájecí pasty při 15000násobném zvětšení.	33
Obrázek 20: Zdeformovaná pájecí zrna starší pájecí pasty. Levá část pořízena při 2000násobném zvětšení, pravá část při 5000násobném zvětšení.	33
Obrázek 21: Metalografické výbrusy propláchnutých pájecích zrn zalitých v epoxidové pryskyřici.	35
Obrázek 22: Snímky výbrusů pájecích zrn z elektronového mikroskopu. Vlevo starší pájecí pasta, vpravo novější pájecí pasta, obě při 7500násobném zvětšení.	35
Obrázek 23: Snímky výbrusů pájecích zrn z konfokálního mikroskopu. Vlevo starší pájecí pasta, vpravo novější pájecí pasta, obě při 150násobném zvětšení.	36
Obrázek 24: Snímky výbrusů pájecích zrn z elektronového mikroskopu.	36
Obrázek 25: Snímek výbrusu pájecího zrna starší pasty z elektronového mikroskopu při 7500násobném zvětšení.	37
Obrázek 26: Snímek konvekční pece z profilu [73].	38
Obrázek 27: Ukázka přetavené pájecí pasty na destičkách s povrchovou úpravou imerzním cínem.	40
Obrázek 28: Snímky přetavené pájecí pasty pořízené konfokálním mikroskopem. Vlevo starší pájecí pasta na měděném substrátu, vpravo novější pájecí pasta na měděném substrátu ošetřeném OSP.	40
Obrázek 29: Snímky přetavené pájecí pasty s naznačenou a vypočtenou plochou roztečené pájecí slitiny. Vlevo starší pájecí pasta na měděném substrátu, vpravo novější pájecí pasta na měděném substrátu ošetřeném OSP.	40
Obrázek 30: Nádoba s rozetřenou pastou po ukončení měření viskozity. Vlevo nádoba s novější pájecí pastou, vpravo nádoba se starší pájecí pastou.	43
Obrázek 31: Snímek univerzitního meniskografu MK6 [73].	48
Obrázek 32: Snímek zkumavek se separovanými tavidly ze starší a novější pájecí pasty.	48
Obrázek 33: Snímek testovače pájitelnosti LBT210 od firmy Microtronic [74].	51
Obrázek 34: Snímek čtveřice kuliček pájky vyrobených z novější pájecí pasty na zadní straně DPS.	52