



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

POROVNÁNÍ PÁJECÍCH PAST Z POHLEDU SPOLEHLIVOSTI PÁJENÉHO SPOJE

SOLDER PASTE COMPARISON FROM SOLDER JOINT RELIABILITY POINT OF VIEW

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Dokoupil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2018



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Jakub Dokoupil

ID: 155510

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Porovnání pájecích past z pohledu spolehlivosti pájeného spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku pájecích past SAC s rozdílným poměrem stříbra. Soustřeďte se zejména na spolehlivost pájených spojů.

Navrhněte režim zrychleného cyklování.

Vybrané vzorky pájecích past natiskněte na zkušební desky s plošnými spoji, osadte rezistory a pájejte přetavovacími profily RTS a RSS. Porovnejte vzhled, proměřte mechanickou pevnost i elektrické parametry před a po teplotním cyklování.

Připravte mikrovýbrusy pájených spojů, vyhodnoťte vzhled pájeného spoje i výskyt dutin, změřte tloušťku intermetalické oblasti a proveďte prvkovou analýzu.

Zpracujte ekonomické vyhodnocení i technické porovnání pájecích past s rozdílným obsahem stříbra.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 22.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se po teoretické stránce zabývá popisem pájení přetavením pájecí pasty a popisem defektů vzniklých během tohoto procesu. Praktická část práce potom popisuje testování dvou pájecích past s rozdílným obsahem stříbra před a po zrychleném teplotním cyklování.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pájení přetavením, DPS, pájecí pasta, teplota, cyklování

ABSTRACT

This thesis deals with the theoretical description of the solder during reflow soldering the solder paste and describing the defects arising during this process. Practical part of the thesis describes the testing of two solder pastes with different silver content before and after the accelerated temperature cycle.

KEYWORDS

Reflow soldering, PCB, solder paste, temperature, cycling

DOKOUPIL, J. *Porovnání pájecích past z pohledu spolehlivosti pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2018. 85 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma porovnání pájecích past z pohledu spolehlivosti pájeného spoje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. a panu Ing. Zdeňku Jurčíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Čudkovi, Ph.D., za realizaci měření na elektronovém mikroskopu a panu Ing. Alexandru Otáhalovi a Ústavu mikroelektroniky za možnost využít jejich zařízení.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	6
1 Pájení a pájený spoj	7
2 Pájení přetavením pájecí pasty	8
2.1 Konvekční pájení	8
2.2 Pájení infračerveným zářením	11
2.3 Kondenzační pájení – pájení v parách	12
2.4 Teplotní profil	13
2.4.1 Příčný teplotní profil	14
2.4.2 Podélný teplotní profil	14
3 Pájecí pasta	16
3.1 Prášková pájka	16
3.1.1 Výroba pájecích částic	18
3.2 Tavidlové médium	19
3.3 Lepivost pájecí pasty	20
3.4 Nanášení pájecí pasty na DPS	20
3.4.1 Nanášení pájecí pasty disperzerem	20
3.4.2 Sítotisk	21
3.4.3 Šablonový tisk.....	23
3.4.4 Jet printing	27
3.5 Skladování pájecí pasty	27
3.6 Porovnání pájecích past s rozdílným obsahem stříbra.....	28
4 Defekty pájených spojů	30
4.1 Defekty vznikající během tisku pájecí pasty	30
4.1.1 Nedostatečné množství pájecí pasty	30
4.1.2 Příliš mnoho natisknuté pájecí pasty	31
4.1.3 Špatná pozice natisknuté pasty	31
4.1.4 Nesprávný tvar natisknuté pasty	32
4.1.5 Můstky	32
4.1.6 Sedání pájecí pasty za studena.....	33
4.2 Defekty vznikající během procesu přetavení.....	33

4.2.1	Voidy	34
4.2.2	Kuličky pájky.....	39
4.2.3	Solder bead	39
4.2.4	Zkrat.....	40
4.2.5	Sedání pájecí pasty za tepla	41
4.2.6	Špatné přetavení pasty	41
4.2.7	Náhrobky	41
5	Praktická část	44
5.1	Testovací DPS.....	44
5.2	Osazení a pájení	45
5.3	Rozdělení vzorků	53
5.4	Test roztékavosti	54
5.5	Solder ball test	55
5.6	Sedání pájecí pasty za studena (cold slump test).....	57
5.7	Sedání pájecí pasty za tepla (hot slump test)	58
5.8	Zrychlené teplotní cyklování	59
5.8.1	Zrychlené teplotní cyklování dle IPC-SM-785.....	60
5.8.2	Zrychlené teplotní cyklování dle JESD22-A104D.....	61
5.8.3	Srovnání vzorků po zrychleném teplotním cyklování	62
5.9	Vyhodnocení IMC vrstvy	64
5.10	Zkouška stříhem.....	70
5.11	Měření elektrického odporu.....	73
5.12	Ekonomické vyhodnocení.....	75
	Závěr	76
	Literatura	77
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	80
	Seznam obrázků	81
	Seznam tabulek	85

ÚVOD

Pájení přetavením pájecí pasty je v dnešní době nejrozšířenější technologií hromadného pájení. Přejít na bezolovnaté technologie po přijetí směrnice RoHS o omezení používání nebezpečných látek ovšem přineslo do tohoto procesu hromadného pájení nové problémy. Jedním z nich byla náhrada stávající olovnaté pájecí pasty za bezolovnatou. Pro své vlastnosti se staly velice oblíbené slitiny, které obsahují různé množství cínu, stříbra a mědi. Použití stříbra ovšem značně navyšuje cenu těchto past, a proto se v dnešní době výrobci pájecích past snaží nahrazovat stříbro jinými materiály. Zde ovšem nastává problém s parametry těchto past, které se snaží co nejvíce přiblížit parametrům, jaké měly pájecí pasty obsahující větší podíl stříbra.

Tato práce je rozdělena do několika hlavních kapitol. První kapitola se zabývá ve zkratce obecně popisem pájení a pájeného spoje. Druhá kapitola se potom zaměřuje na proces pájení přetavením pájecí pasty. Teoretický popis pájecí pasty je možno nalézt v třetí kapitole. Čtvrtá kapitola se věnuje defektům pájených spojů, které vznikají už během tisku pájecí pasty, a defektům které vznikají při jejím pájení. A konečně v páté kapitole je popsána praktická část této práce.

1 PÁJENÍ A PÁJENÝ SPOJ

Pájeným spojem se rozumí podmíněně rozebíratelné spojení dvou a více částí s využitím přídavného materiálu (pájky) zahřátím ve smontovaném stavu nad teplotu tavení pájky. Spoj mezi materiály je zprostředkovaný pájkou. [1]

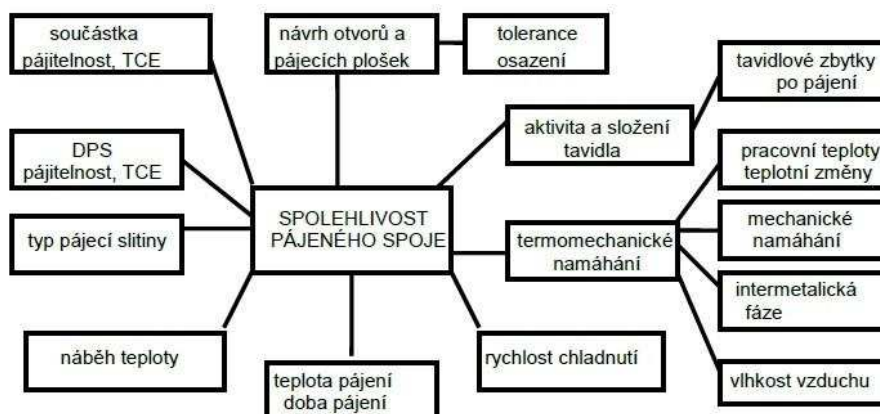
Pájení je metalurgický proces spojování kovových částí roztavenou pájkou, zpravidla za přítomnosti tavidla. Rozlišujeme měkké pájení (teploty do 450 °C) a tvrdé pájení (teploty nad 450 °C do 1100 °C). Při pájení součástek se jedná o měkké pájení.

Pájení je fyzikálně chemický proces, při kterém se atomy spojovaných kovů a atomy pájky dostávají do velmi malých vzdáleností, kde dochází k účinkům adhezních (přilnavých) a kohezích (soudržných) sil. Při pájení dochází také k difuzi a rozpouštění některých prvků pájky i spojovaných materiálů. Na rozhraní tak vzniká tzv. intermetalická oblast se specifickými vlastnostmi. [1]

Pájený spoj musí být mechanicky pevný a dlouhodobě spolehlivý. Lze toho dosáhnout vhodnými kombinacemi materiálového, procesního a environmentálního systému. Mezi materiálové kombinace patří povrchové úpravy pájených povrchů, tavidla a pájky. Mezi procesní systém zase teplota, doba, gradienty nárůstu a poklesu teploty. A do environmentálního systému patří volba mezi vzduchem, řízením atmosféry nebo vakuem.

Ideální pájený spoj je charakterizován konkávním pájecím kuželem, lesklým a hladkým povrchem pájky s dokonale smočeným vývodem součástky i pájecí ploškou/pájecím mezikružím DPS. Takto vizuálně charakterizovaný spoj bude pravděpodobně mechanicky pevný a dlouhodobě spolehlivý. V reálných podmínkách ovšem tohoto nemusí být vždy dosaženo. Spolehlivý spoj je dán kompatibilitou pájených i pájecích materiálů i pájecím procesem. Faktory ovlivňující pájecí proces je možno vidět na obrázku 1. [1]

Celosvětově nejpoužívanější standard pro montáž elektronických sestav, a tedy standard, kde jsou uvedeny požadavky na kvalitní pájený spoj, je „IPC-A-610E-CZ: Kritéria přijatelnosti elektronických sestav“. Další je norma ČSN EN 61192: Požadavky na provedení zapájených elektronických sestav.



Obrázek 1: Faktory ovlivňující vlastnosti pájeného spoje [1]

2 PÁJENÍ PŘETAVENÍM PÁJECÍ PASTY

Pájení přetavením pájecí pasty (reflow pájení) je jedna z nejpoužívanějších metod hromadného pájení desek plošných spojů. Při této metodě jsou elektronické součástky ručně nebo strojově osazeny do pájecí pasty, která je nanášena na pájecích ploškách DPS. Takto připravená DPS je poté vystavena teplotám, které jsou vyšší než bod tání pájky obsažené v pájecí pastě a dojde k zapájení elektronických součástek. Během pájení jsou součástky povrchovým napětím vycentrovány na plošky DPS. Za pomoci této metody lze pájet montážní celky osazené čistou povrchovou montáží ať už jednostrannou, tak i oboustrannou, případně i typy kombinované povrchové montáže.

V porovnání s technologií strojního pájení vlnou, případně s jinými technologiemi, má metoda pájení přetavením pájecí pasty tyto výhody:

- úspora materiálu – na pájecí plošky je nanášeno definované množství pájecí pasty,
- pájka a tavidlo jsou dávkovány v přesně definovaném poměru,
- je vyloučena nekontrolovatelná přítomnost nečistot, které se mohou dostat na pájený spoj při strojním pájení vlnou,
- pájecí proces probíhá bez teplotních rázů,
- přesný technologický postup aplikace pasty umožňuje dosáhnout vyšší hustoty montáže,
- oboustranná montáž SMD.

Mezi nejrozšířenější metody pájení přetavením patří konvekční pájení, pájení infračerveným zářením a kondenzační pájení (pájení v parách). [1]

Faktor	IR	Kondenzace	Konvekce
Řízení procesu	dobré	výborné	velmi dobré
Pracovní teplota	regulovatelná	pevná	regulovatelná
Homogenita pracovní teploty	špatná	velmi dobrá	dobrá
Maximální teplota	špatně def.	pevná	špatně def.
Univerzálnost	ucházející	velmi dobrá	dobrá
Citlivost na barvu materiálu	velká	žádná	malá

Tabulka 1: Porovnání tří nejrozšířenějších metod pájení přetavením [1]

V tabulce číslo 1 je možno vidět porovnání tří nejrozšířenějších metod pájení přetavením pájecí pasty. Nejrozšířenější je metoda konvekčního pájení. [1]

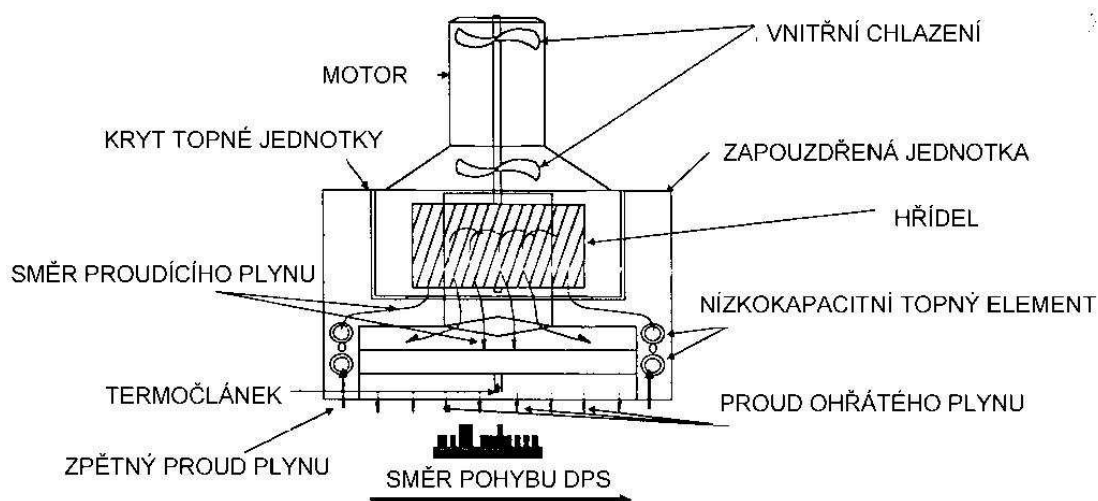
2.1 Konvekční pájení

Při konvekčním pájení využívají pájecí pece nucené konvekce a v menší míře i přirozené konvekce tepelného média. Jako tepelné médium se používá vzduch nebo dusík. Přítomnost dusíku během pájení chrání kovové povrchy před oxidací, zlepšuje přenos tepla a také minimalizuje oxidaci tavidla. Přítomnost dusíku také zvyšuje povrchové

napětí roztavené pájky. To je patrné například při horším natisknutí pájecí pasty na pájecí plošky s přetisky, kde dusík výrazně redukuje množství zkratů. [1]

Energie potřebná pro přetavení pájecí pasty na DPS se potom získává průchodem tepelného média přes topné elementy. Pájecí pece pro konvekční pájení lze rozdělit na dva typy. Prvním z nich jsou vsázkové pece. Tyto pece se používají pro malosériovou výrobu (velice oblíbené jsou mezi bastlíři, kteří si různé vsázkové pece sami vyrábí). Výhodou těchto pecí jsou malé rozměry a nižší cena. Nevýhodou je horší regulace teploty, menší rozsah nastavení jednotlivých parametrů a většinou zastaralý způsob ohřevu i chlazení. Práce s tímto druhem pecí je také celkově pomalejší a vyžaduje častý zásah obsluhy. [2]

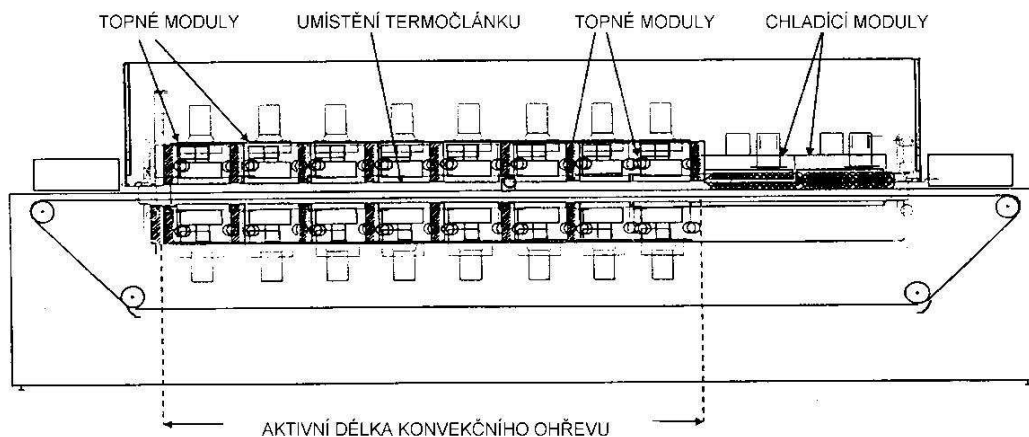
Dalším typem jsou průběžné (in-line) pece. Jejich rozměry jsou větší a jsou určeny pro velkosériovou výrobu. Postupné ohřívání je zajištěno pomocí přetavovacích zón, kterými prochází dopravníkový pás (prstový nebo pásový). Konvekční dmychadla přenášejí teplo ze zářičů různých kapacit přes směšovací boxy do disperzní desky s tryskami a poté do pájecího prostoru, zpravidla na obě strany desky plošného spoje. Jako zářiče se používají výkonné tepelné spirály s malou tepelnou setrvačností. Schematické znázornění topné jednotky konvekční přetavovací pece je na obrázku 2. [1][3]



Obrázek 2: Schematické znázornění topné jednotky konvekční přetavovací pece [1]

Ochlazený plyn je poté koncentrickými štěrbinami okolo trysek nasáván zpět a opět ohříván. U některých typů pecí, lze horký plyn pomocí programově ovládaných trysek usměrnit na předem stanovená místa. Jak bylo uvedeno výše, skládají se průběžné přetavovací pece z několika zón. Jednotlivé zóny jsou nezávislé a jejich teplotu je možno regulovat nezávisle na ostatních zónách. Konvekční přetavovací pece mívají minimálně 4 zóny. Pro bezolovnaté pájení se doporučuje minimální konfigurace 7 zón horních a 7 dolních. Počet vyhřívacích zón by měl být nahoře i dole stejný. Toto je velmi důležité pro rovnoměrné zahřívání DPS během procesu pájení. Díky tomuto se předchází nežádoucím jevům uvnitř DPS (především pnutí) nebo na jejich povrchu (horší tvorba pájeného spoje na horní straně DPS, pokud by spodní vytápění nebylo účinné). Obecně lze říci, že větší počet zón umožňuje lepší nastavení pájecího profilu. Důležitá je také délka pájecích zón. Čím kratší pájecí zóny jsou, tím snazší je udržet nastavený pájecí

profil (pokud by zóny byly příliš dlouhé, nebylo by technicky možné, při zachování rozumné délky pece, tohoto profilu dosáhnout). Schematické znázornění konvekční pece lze vidět na obrázku 3. [1][3]



Obrázek 3: Schematické znázornění konvekční pece

Moderní konvekční pece jsou také vybaveny „flux management systémem“, který minimalizuje údržbu stroje od tavidlových zbytků. Například firma Heller má vyvinut systém, který odděluje zbytky tavidla z plynů v chladicích zónách. [1][3]

Důležitým parametrem je u těchto typů pecí také ekologická stránka výroby, zejména tedy spotřeba elektrické energie a regulace zplodin. Elektrická energie představující hlavní zdroj energie se přemění v teplo, které se předává pájenému výrobku, část odvádí chladicí systém a odsávání a část se vyzářuje z pece do výrobních prostor (obr. 4). [3][4]



Obrázek 4: Schéma proudění energie u konvekční pájecí pece [4]

Proto je důležitá kvalitní tepelná izolace vytápěných zón, která předejde zbytečně vyšší povrchové teplotě pece a s tím spojené zvýšené potřebě chladit vzduch v prostorách výroby. Z tohoto důvodu se také používá přídavné chlazení krytů pece (obr. 5). [3][4]



Obrázek 5: Přídavné chlazení krytů pece [4]

Velkou výhodou konvekčních pecí je, že více vyhovují požadavkům na více vrstvé DPS a vyšší zástavbové hustoty. Také se vyznačují menším zastíněním jednotlivých součástek. Tento způsob pájení také umožňuje jednodušší nastavení pájecího profilu pouhou změnou rychlosti posuvu dopravníku. Mezi nevýhody naopak patří menší účinnost, větší energetická spotřeba a vyšší míra oxidace pájecí pasty při pájení ve vzduchu.

2.2 Pájení infračerveným zářením

Tepelná energie potřebná k přetavení pájecí pasty se na montážní celky dostává zářením z IR zářičů (obr. 6). Množství absorbované energie je závislé zejména na barvě povrchu a na vlnové délce záření (absorpce záření se vzrůstající vlnovou délkou klesá). Při pájení infračerveným zářením jsou součástky s tmavým povrchem více zahřívány než místa, kde se nachází pájecí pasta. Tento jev má za následek nerovnoměrné rozložení teploty na povrchu sestavy, což má vliv na kvalitu pájení a tepelné namáhání součástek. Toto lze zmírnit použitím infrazářiče s širším rozsahem vlnových délek (zahřívání bude méně závislé na infračerveném záření ze vzdáleného konce spektra). Vzhledem k tomu, že záření dopadá na DPS přímočaře, dochází ke stínění menších součástek většími. Částečně lze tento efekt eliminovat zavedením nucené konvekce ventilátory, pečlivým návrhem rozmístění součástek na desce a konstrukcí zdroje tepla. [1][5]



Obrázek 6: Konstrukční provedení wolframového zářiče [5]

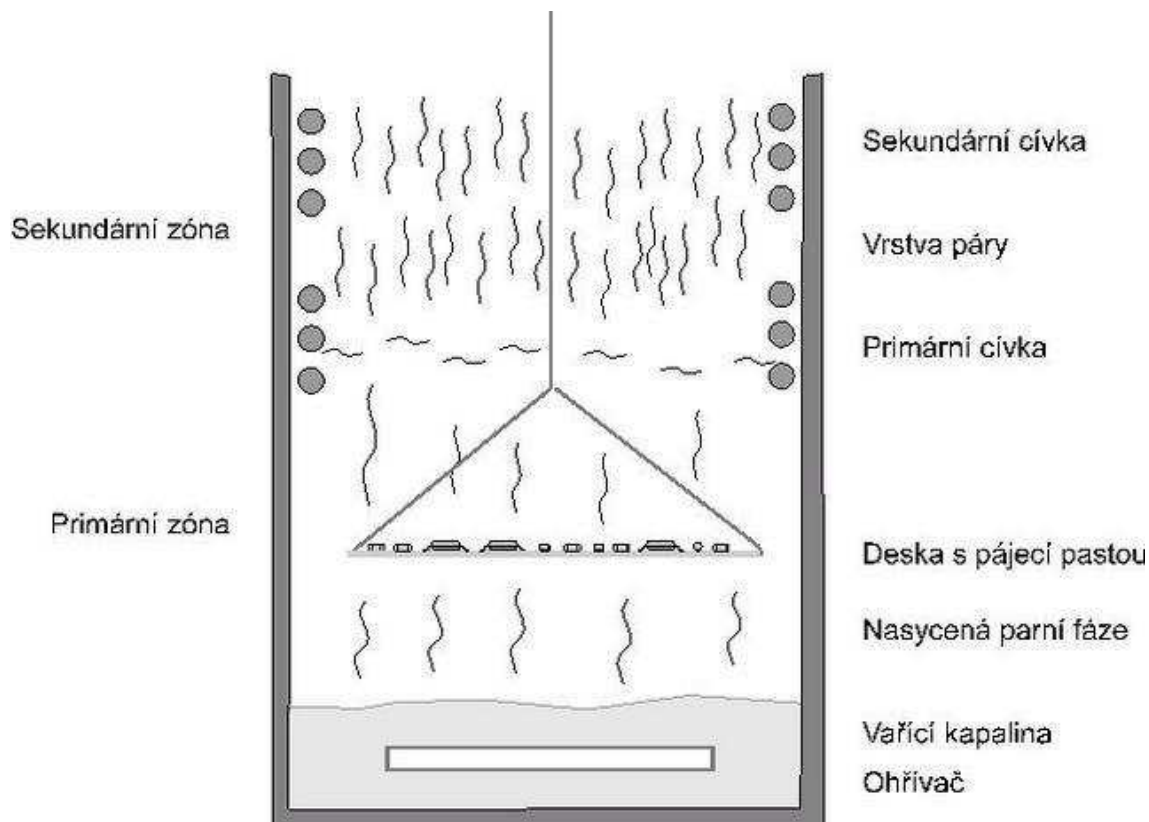
Stejně jako u konvekčního pájení i zde se používají vsázkové i průběžné pece, a i zde jsou více využívané pece průběžné (obr. 7). V těchto pecích jsou infračervené zářiče umístěny nad i pod dopravníkovým pásem a jsou rozděleny do zón. Teplotu v těchto zónách lze nezávisle regulovat a tím nastavit vhodný pájecí profil. Výhodou této metody je vysoká účinnost procesu (60 až 70 %). [1]



Obrázek 7: Jednoduchý model přetavovací pece využívající IR záření [5]

2.3 Kondenzační pájení – pájení v parách

Princip této metody pájení je jednoduchý – osazená deska plošných spojů se po předeřtání ponoří do nasycených par kapaliny na bázi uhlovodíků (Galden). Teplota, při které dochází k varu pájecího média, musí být vyšší, než je teplota pájení. Jelikož teplota pájené DPS je nižší než teplota nasycených par, bude docházet ke kondenzaci těchto par na povrchu osazené DPS. Latentní teplo par se přenáší na osazenou DPS a postupně ji zahřívá na teplotu pájení. Princip lze vidět na obrázku 8. Pájecí teplota je dána bodem varu kapaliny, což zaručuje konstantní teplotu pájení. Rozložení teploty je v celém prostoru pájení rovnoměrné. Nasycené páry také neobsahují kyslík, takže nedochází k oxidaci pájených míst. [1][6]



Obrázek 8: Princip pájení v parách [6]

Kapaliny pro pájení v parách musí mít vysoký bod vzplanutí, musí být netečné, chemicky a tepelně stabilní, musí mít definovaný bod varu a hustota jejich par musí být větší, než je hustota vzduchu. [6]

Nevýhody pájení v parách:

- je nezbytná dobrá pájitelnost
- nutno respektovat kompatibilitu kondenzující kapaliny s plasty
- kapalina je poměrně drahá
- během pájecího procesu dochází ke ztrátám kapaliny

Výhody pájení v parách:

- poměrně rychlý ohřev,
- rovnoměrné zahřívání,
- ohřev je nezávislý na geometrii pájených prvků,
- není možné přehřát montážní celek,
- nedochází k oxidaci,
- je možno použít tavidla s menší aktivitou.

2.4 Teplotní profil

Jedná se o časovou závislost měnící se teploty v průběhu pájení přetavením, kterou je možné zobrazit v podobě grafu. Správně nastavený teplotní profil brání vzniku defektů v pájených spojkách i součástkách a je podmínkou kvalitně provedeného spoje s dlouhou

životností. U přetavovacích pecí se jedná o příčný teplotní profil a podélný teplotní profil.

2.4.1 Příčný teplotní profil

Příčný teplotní profil charakterizuje nehomogenitu pájecí pece v příčném směru během procesu pájení. Je dán konstrukcí pájecí pece a je ovlivněn zástavbovou hustotou DPS. Tento typ profilu je nutno sledovat při pájení náročnějších aplikací a odpovídajícím způsobem volit orientaci montážní sestavy při průchodu pecí. U kvalitních přetavovacích pecí se dosahuje přesnosti ± 2 °C. [1]

2.4.2 Podélný teplotní profil

Jak bylo uvedeno výše, správné nastavení teplotního procesu je základním předpokladem pro zajištění kvalitního pájeného spoje s dlouhou životností. Toto zejména platí u podélného pájecího profilu. V praxi neexistuje univerzální nastavení teplotního profilu a vždy je potřeba zohlednit teplotní profil doporučený výrobcem pájecí pasty, maximální teplotní odolnosti osazovaných součástek a jejich geometrické rozměry, geometrické rozměry DPS, jejich tepelnou kapacitu a teplotu skelného přechodu T_g . Nutno je také zohlednit technické možnosti přetavovací pece. V dnešní době se v praxi využívají dva typy podélných teplotních profilů.

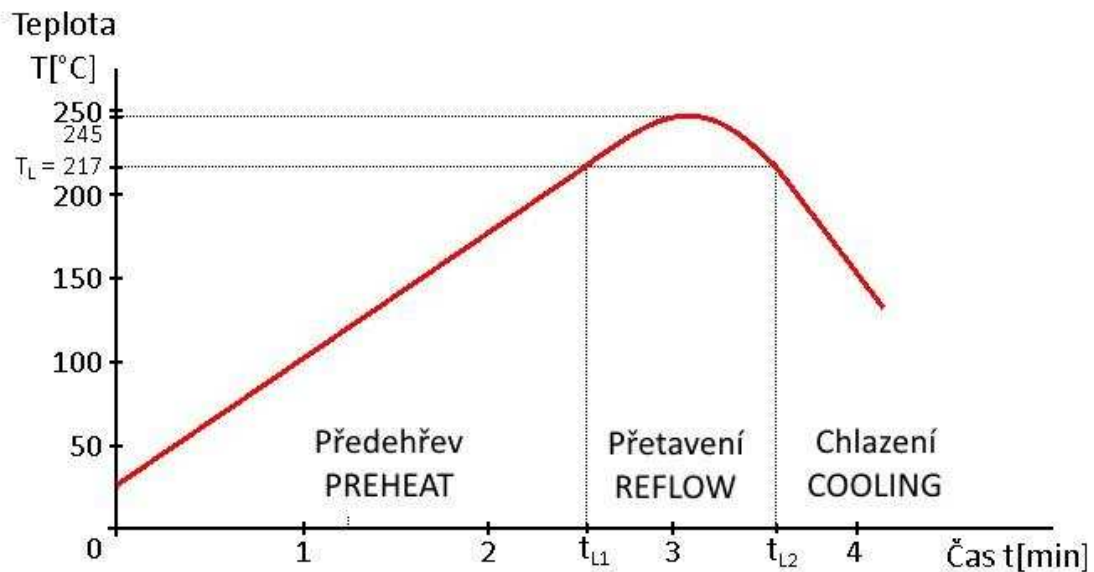
Profil s lineárním nárůstem teploty – RTS (ramp to spike)

Tento typ podélného teplotního profilu dává jasnější, lesklejší spoje. Při použití tohoto typu profilu se také vyskytuje méně problémů spojených s pájitelností (nosič tavidla vydrží déle v předehřívacím cyklu, což vede k lepšímu smáčení). RTS profil je charakterizovaný 3 oblastmi (obr. 9). Oblast předehřevu má lineární nárůst teploty a dochází zde k aktivaci tavidla, odpaření těkavých složek a minimalizuje se teplotní šok. Teplotní gradient nárůstu teploty by se měl pohybovat v rozsahu 0,6–1,8 K/s. Příliš velký nárůst teploty při předehřevu by vedl k rychlému odpařování tavidla, což by mohlo vést k defektům, jako jsou náhrobky. Případně pokud součástka obsahuje velký podíl vlhkosti, může rychlý předehřev vést ke generaci vodná páry, která může způsobit mikrotrhliny v pájeném spoji. [1][7]

Další je oblast přetavení, ve které mění pájecí pasta své skupenství a dochází k zapájení součástek. Celková délka prodlevy na liquidem TAL (time above liquidus) by měla být 60 ± 15 s. Příliš krátká doba na liquidem může vést ke špatné smáčivosti nebo tvorbě voidů. Naopak příliš dlouhá doba by mohla vést k odsmačení, menší mechanické pevnosti a nevhodnému povrchu pájeného spoje (spoj bude mít zrnitý povrch). Maximální teplota profilu by měla být o 15 až 40 °C vyšší, než je bod tavení pájecí pasty a této hodnoty by mělo být dosaženo za 3,5–4 minuty. [1][7]

Poslední oblastí teplotního profilu je oblast chlazení. Chlazení by mělo být řízené, s rychlostí kolem 4 K/s. Rychlost chlazení ovlivňuje výsledný vzhled pájeného spoje a jeho krystalickou strukturu. Pokud bude rychlost chlazení příliš velká, povrch spoje bude mít drsnější strukturu a bude docházet k tvorbě dutin a trhlin uvnitř spoje. Při příliš pomalém chlazení budou součástky vystaveny tepelnému namáhání po delší dobu. [1][7]

Pravidlem při použití RTS profilu je, že 2/3 profilu musí ležet pod teplotou 150 °C. Profil RTS redukuje energetické náklady, zvyšuje účinnost, redukuje pájecí defekty, zlepšuje smáčení a všeobecně zjednodušuje pájecí profil. [1]

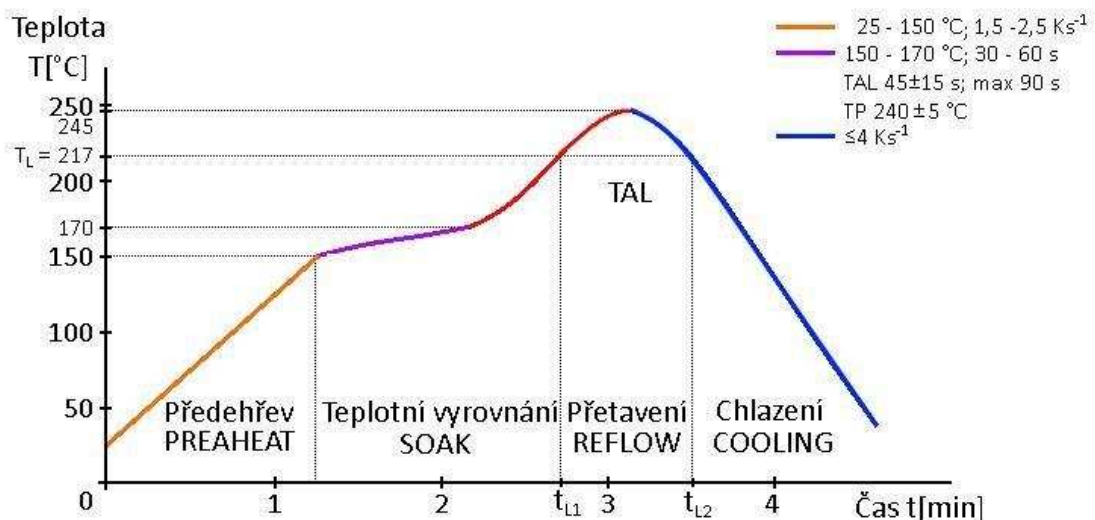


Obrázek 9: RTS teplotní profil [1]

Sedlový profil RSS (ramp soak spike)

Sedlový profil zaručuje lepší prohřátí celé pájené DPS před dosažením teploty liquidu pájecí pasty. Na rozdíl od RTS profilu obsahuje RSS profil oblast teplotního vyrovnání, kde dochází k vyrovnání teploty na všech místech pájené DPS. To má za následek zmírnění teplotního šoku a snížení pravděpodobnosti výskytu některých typů defektů.

Oblast teplotního vyrovnání (též temperování) se nachází mezi teplotami 150 až 170 °C a délka této oblasti bývá v rozmezí 40 až 100 s. Příliš dlouhá doba teplotního vyrovnání by mohla způsobit problémy s pájitelností. Ostatní části profilu jsou definovány totožně jako u profilu RTS. RSS teplotní profil je zobrazen na obrázku 10.



Obrázek 10: RSS teplotní profil

3 PÁJECÍ PASTA

Pájecí pasty jsou homogenní směsi částic kovů odpovídajících složení pájky s technologickou (pojivovou) složkou. Ta je tvořena gelovým tavidlem, aktivátory, rozpouštědly a reologickými modifikátory. Z hlediska chování se pájecí pasta dělí do kategorie viskózně elastických kapalin a její chování je charakterizováno reologickými vlastnostmi. Pro různé techniky nanášení pájecí pasty se pasty s rozdílnou viskozitou a množstvím kovu liší, jak je znázorněno v tabulce 2.

TECHNIKA NANÁŠENÍ	VISKOZITA	PODÍL KOVU
dávkovač	200-450 Pa.s	82-86 hm. % kovu
sítotisk	400-700 Pa.s	86-89 hm. % kovu
šablonový tisk	600-1.000 Pa.s	90-92 hm. % kovu
tryskové nanášení (jet printing)	xxx	xxx

Tabulka 2: Vlastnosti pájecích past pro různé techniky nanášení [1]

Požadavky na pájecí pastu se liší podle jednotlivých aplikací. Požadavky na pájecí pastu lze rozdělit do několika skupin [1]:

- požadavky během tisku a po natisknutí – dobré tiskové vlastnosti pasty (tixotropnost), stabilita pasty na šabloně, minimální zasychání na šabloně, ostrý obrazec natisknuté pasty, rozměrová stabilita pasty po tisku, minimální vliv zvýšené vlhkosti i teploty na viskozitu pájecí pasty,
- během dávkování – minimální separace složek, malý frikční koeficient, minimální tahání vláken, žádné vzduchové bubliny,
- při osazení – dobrá lepivost, dlouhá doba lepivosti,
- během přetavovacího cyklu a po přetavení – velké technologické okno, lesklý a hladký vzhled spoje, tvar spoje, minimální množství reziduí, bez migrací ve vlhku, stálý a vysoký SIR,
- čištění – snadné čištění i rozpustnost v izopropanolu,
- testování – kompatibilita s testovacím procesem.

3.1 Prášková pájka

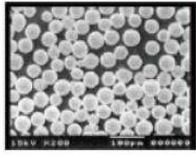
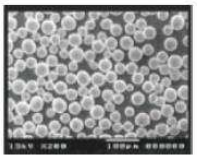
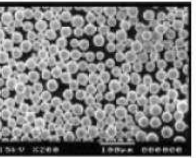
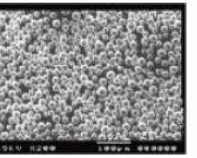
Prášková pájka je složena z částic pájecí slitiny různých velikostí. Preferovaný tvar pájecích částic je kulovitý, ale ve většině pájecích past se vyskytuje až 15 % elipsoidů a 1 % částic jiných tvarů.

Velikost částic pájecí pasty se volí podle nejmenší apertury šablony. Zde je často používáno pravidlo 5D, které říká, že do nejmenší apertury šablony by se mělo na šířku vejít 5 kuliček pájky největšího průměru daného typu pájecí pasty. Typ pájecí pasty dle velikosti částic a jejich zastoupení v hmotnostních procentech udává norma ANSI J-STD-005. Toto rozdělení můžeme vidět v tabulce 3. [1]

Typ	Méně než 0,5 % větších než [μm]	Max 10 % mezi [μm]	Min 80 % mezi [μm]	Max 10% menších než [μm]
1	160	150 - 160	75 - 150	75
2	80	75 - 80	45 - 75	45
3	60	45 - 60	25 - 45	25
4	50	38 - 50	20 - 38	20
5	40	25 - 40	15 - 25	15
6	25	15 - 25	5 - 15	5
7	15	11 - 15	2 - 11	2

Tabulka 3: Rozdělení pájecích past dle velikosti částic [8]

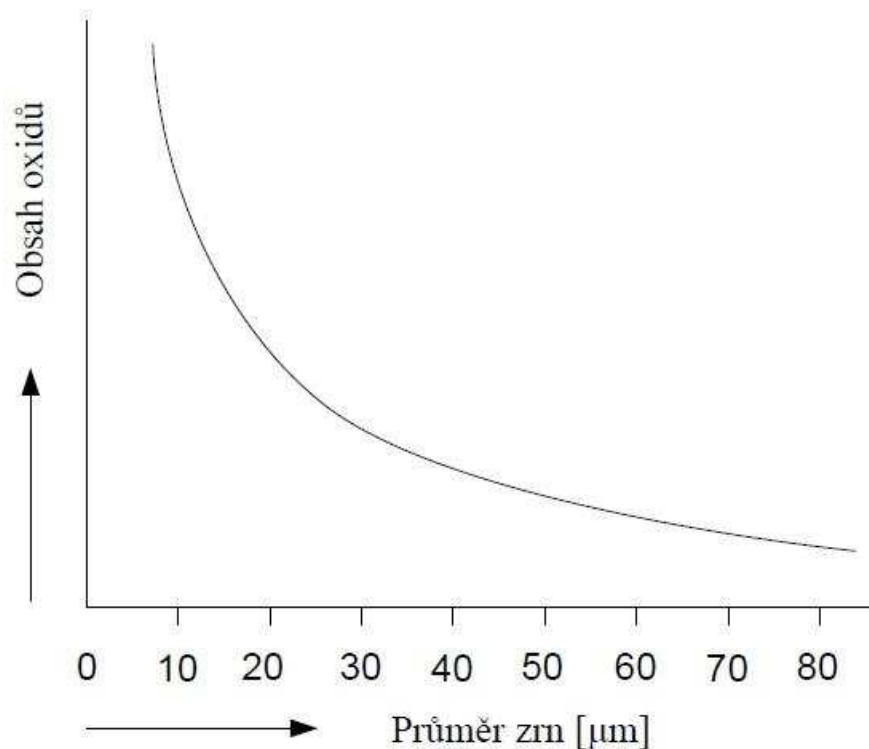
V tabulce 4 je možno vidět toto rozdělení na příkladu pájecí pasty SAC 305.

Typ a rozpětí průměru pájecích zrn	Typ 2 0,045 - 0,075 mm	Typ 3 0,020 - 0,045 mm	Typ 4 0,020 - 0,038 mm	Typ 5 0,010 - 0,025 mm
Pájecí slitina SAC 305				

Tabulka 4: Rozdělení dle velikosti částic pájecí slitiny SAC 305 [7]

Pájecí pasty typu 2 byly hojně využívány v 90. letech a jsou vhodné pro nenáročné aplikace do rozteče vývodů součástek 0,65 mm a větší. Typ 3 se používá pro ultra fine pitch aplikace s roztečí mezi 0,4 až 0,3 mm a typ 4 pro ultra fine pitch aplikace s roztečemi pod 0,3 mm. [1]

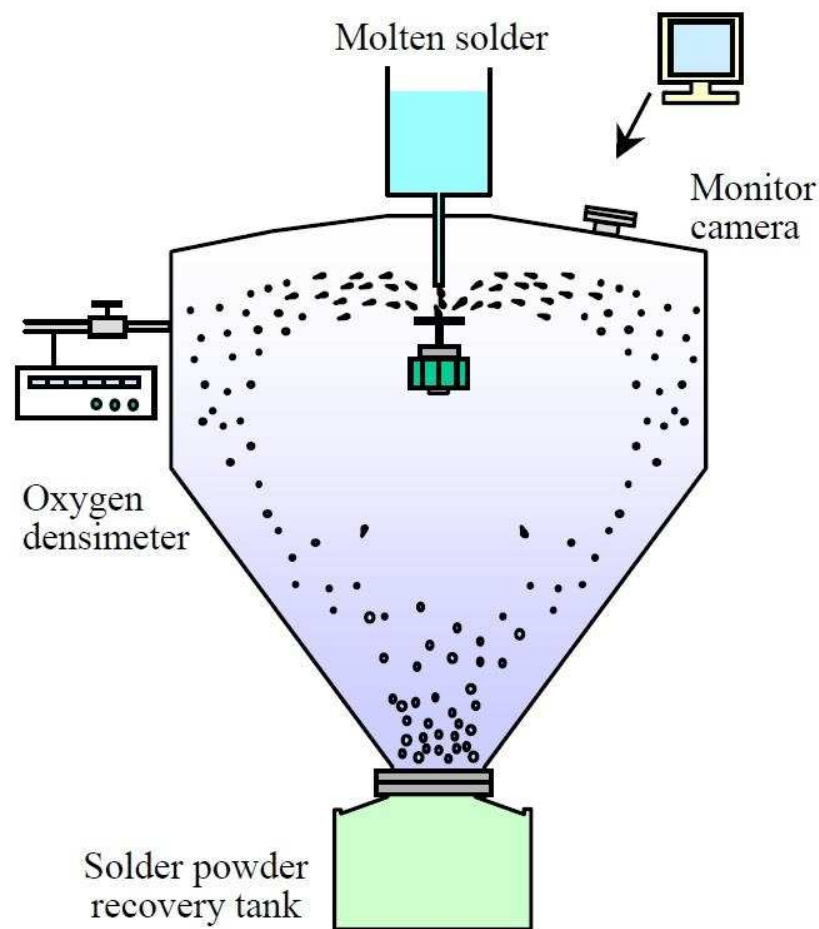
Obsah oxidů v pastě by měl být co nejnižší. Nevhodným skladováním, ale i stárnutím pasty se však jejich obsah zvyšuje. Vyšší podíl oxidů kovů může mít za následek některé defekty pájeného spoje jako například solder balling. Větší podíl oxidů se vyskytuje u pájecích past s menšími zrnny pájecí pasty (celková plocha pro oxidování je větší). Tuto závislost je možno vidět na obrázku 11.



Obrázek 11: Závislost podílu oxidů na průměru zrn [7]

3.1.1 Výroba pájecích částic

Principů výroby pájecích částic je několik, zde bude popsána atomizace pájecích částic pomocí rotujícího vřetena. Tato metoda je vhodná pro výrobu jemných částic, protože úroveň oxidace povrchu částic je velmi malá. Komora pro výrobu částic je vysoká přibližně 5 metrů a její průměr je 3 metry. Objem komory je vyplněn dusíkem a koncentrace zbytkového kyslíku je zde velmi malá, což má za následek minimální oxidaci částic. Proces začíná roztavením ingotu pájky v nádobě umístěné na vrcholu zařízení. Roztavená pájka poté odkapává na vřeteno s velmi vysokými otáčkami. V okamžiku dopadu roztavené pájky na rotující vřeteno dojde k jejímu rozstříknutí směrem ke stěně komory. Během letu dostane kapka roztavené pájky kulovitý tvar a ztuhne dříve, než se dotkne stěny komory. Na dno komory, kde je umístěn zásobník, poté dopadají kuličky o průměru 1–100 μm. Velikost a tvar částic je ovlivněn zejména rychlostí vřetena a rychlostí dopadu roztaveného materiálu na vřeteno. Po tomto procesu následuje třídění částic dle jejich velikosti. K tomu se využívá proud dusíku, který odfoukne lehčí částice (tedy menší částice), než jaká jsou požadována. Závěrem jsou zbylé částice prosety skrze síto, kterým propadnou jen částice požadované velikosti. Tento princip lze vidět na obrázku 12. [9]



Obrázek 12: Princip výroby částic pájecí pasty [9]

3.2 Tavidlové médium

Kromě použité pájecí slitiny je tavidlové médium další součástí pájecí pasty a má velký vliv na vlastnosti pájecí pasty a na spolehlivost výsledného pájeného spoje. Tavidlo má několik základních funkcí [1]:

- reaguje s oxidy a nečistotami na povrchu pájeného materiálu a pájky a brání jejich opětovné reoxidaci – chemická funkce,
- odstraňuje reakční produkty z povrchu pájeného spoje a umožňuje pájce dostat se do pracovní vzdálenosti s kovovými povrchy – fyzikální funkce,
- zlepšuje přenos tepla od jeho zdroje k pájenému místu – tepelná funkce.
- zvyšuje povrchové napětí pájeného povrchu a snižuje povrchové napětí pájecí slitiny, čímž umožňuje pájce dobré roztékání po pájeném povrchu,
- v pájecí pastě suspenduje kuličky pájky, řídí tixotropní a rheologické vlastnosti a „zapouzdřuje“ pohyblivé ionizovatelné zbytky po procesu pájení.

Jak bylo uvedeno výše, skládá se tavidlové médium ze čtyř částí. První z nich je tavidlo samotné. Používají se tavidla pastovité formy na bázi přírodní pryskyřice (RO),

syntetické pryskyřice (RE) a organických kyselin (OR). Tato složka tavidlového média má zejména vliv na tisknutelnost, pájitelnost, tavidlové zbytky a na případné ICT testování. Další částí tavidlového média jsou aktivátory (aminohydrochlorid – halogenid, organické kyseliny atd.). Tato složka má za úkol odstranění oxidů z pájených povrchů a rozhoduje tedy o úrovni aktivace tavidla. Aktivátory mají přímý vliv na elektrickou vodivost a chemickou spolehlivost a ovlivňují tedy SIR, elektromigraci, korozi a skladovatelnost.

Další částí jsou reologické modifikátory (včelí vosk, ricinový olej, alifatický amid atd.). Reologické modifikátory popisují změny v chování pájecí pasty, zejména změny v tečení a deformaci vlivem působících faktorů, jako jsou tlak při tisku, rychlost pohybu těrky a teploty. Reologické vlastnosti se zabývají viskózně elastickými změnami v chování pájecí pasty v dynamickém režimu. Hlavní reologické vlastnosti u pájecí pasty jsou viskozita a tixotropnost. Poslední složkou tavidlového média jsou rozpouštědla (glykoléter, vícesytné alkoholy). Rozpouštědla mají rozhodující vliv na dobu, po kterou může být pasta nanášena na šabloně, aniž by ztrácela deklarované vlastnosti. Tato doba je určena bodem varu a rychlosti vypařování rozpouštědla. [1][9]

3.3 Lepivost pájecí pasty

Lepivost je charakterizována jako schopnost pájecí pasty držet součástku na pozici po jejím osazení až do ukončení přetavovacího procesu. Rozpouštědla, těkavé látky, aditiva a vzájemné interakce mezi hlavními složkami určují rychlost zasychání pasty, a tedy i její lepivost. Lepivost pájecí pasty po natisknutí na vzduchu nejprve vzrůstá až do maximální hodnoty a poté začne klesat.

Vliv na lepivost má také podíl práškové pájky v pastě. Menší podíl pájky v pájecí pastě a větší podíl tavidlového nosiče vede ke snížení viskozity a při pájení se začnou objevovat defekty způsobené sedáním a roztékáním pájecí pasty. [1]

3.4 Nanášení pájecí pasty na DPS

Pájecí pastu lze nanášet několika způsoby:

- dávkovačem (dispenzerem),
- tiskem skrze síto (sítotiskem),
- tiskem skrze šablonu (šablonovým tiskem),
- tryskové nanášení (jet printing).

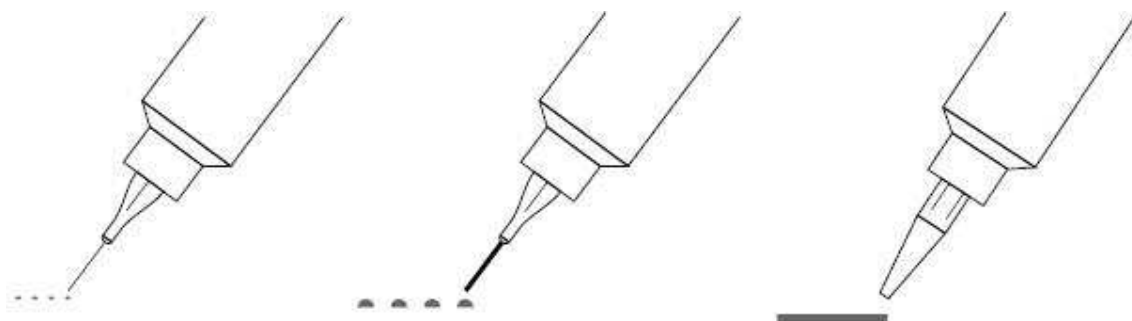
3.4.1 Nanášení pájecí pasty dispenzerem

Nanášení pasty pomocí dispenzeru se využívá při malých objemech pájení a oblíben je při opravách DPS. Tento způsob nánosu pájecí pasty je levný a umožňuje nanést pájecí pastu jen na požadované místo. Příklad poloautomatického dispenzeru lze vidět na obrázku 13.



Obrázek 13: Poloautomatický disperzer [10]

Podle požadovaného množství pasty se volí jehly o různých průměrech, jak lze vidět na obrázku 14.



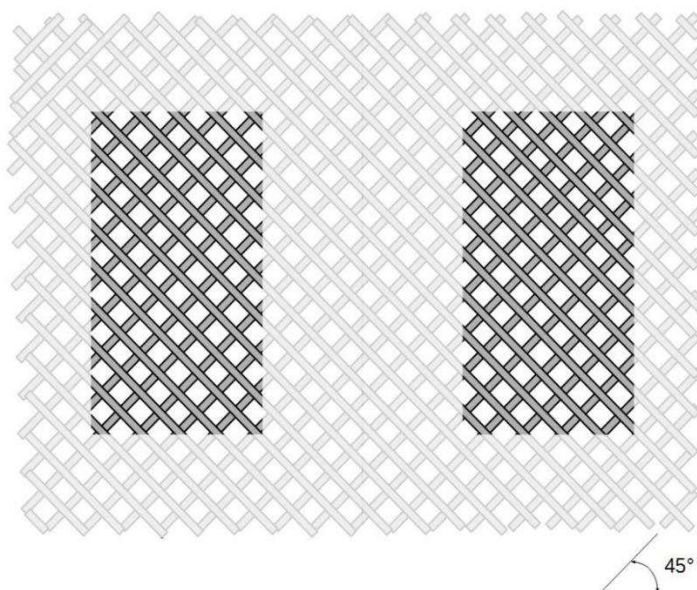
Obrázek 14: Různé průměry jehel disperzeru [7]

3.4.2 Síťotisk

Princip tisku pájecí pasty pomocí síťotisku spočívá v protlačení pájecí pasty těrku přes síto, na kterém je zhotoven motiv DPS na pájecí plošky. Prvním krokem při síťotisku je tedy zhotovení síťotiskové šablony. Ta se skládá ze síta utkaného z vlákna plastické látky (polyester) nebo drátku z nerezové oceli napnutého do pevného rámečku. Výrobci past předepisují druh síta pro určitou pastu pomocí tří hlavních údajů – průměrem použitého vlákna (drátu), rozměrem oka a tzv. vlnou plochou, což je procentuální podíl celkové plochy síta tvořen oky. Síto se pro přenos motivu opatří vrstvou světlo citlivé emulze, která uzavře otvory. Dále se síto osvítlí přes fotomatrici ultrafialovým světlem a neosvětlené části emulze se vyplaví ve vodě. Na síti tedy zůstanou odkrytá místa, která korespondují s pájecími ploškami. [11]

Takto zhotovené síto je poté napnuto v rámu, přičemž je důležité, aby úhel orientace osnovy tkaniny se směrem těrky svíral 45° (obr. 15), což dává předpoklad pro dosažení

lepší ostroty u jemných motivů a současně umožňuje stejné namáhání osnovy síta, což se příznivě projevuje na jeho životnosti.



Obrázek 15: Síto s fotocitlivým materiálem [7]

Mezi hlavní parametry síta patří hustota tkaniny a světlost síta. Hustota tkaniny n je počet ok na délkovou jednotku. Velikost ok a průměr drátu je znázorněn na obrázku 16 a.

$$n = \frac{10}{w + d} \quad (1)$$

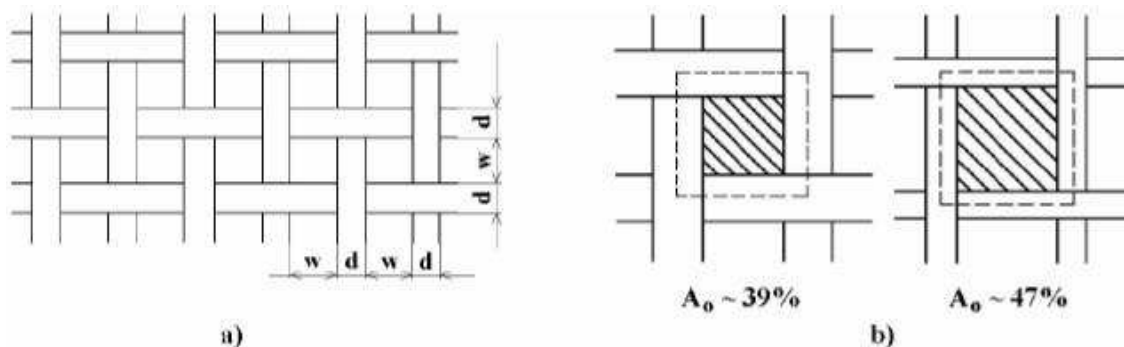
Světlost síta A_0 je otevřená plocha mezi výpletem (obr. 16 b).

$$A_0 = \left(\frac{w}{w + d} + d \right)^2 * 100 \% \quad (2)$$

kde:

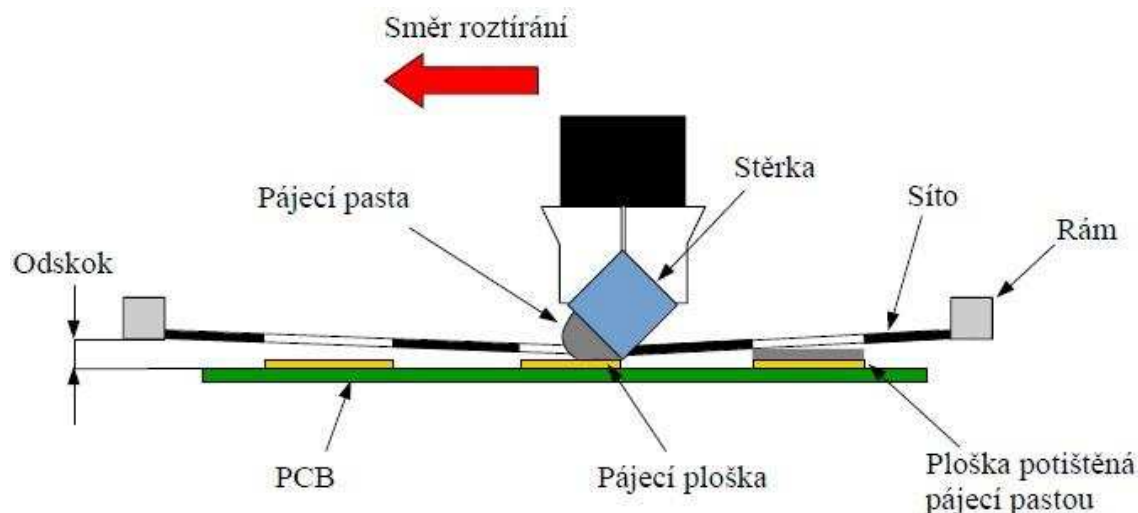
w rozměr strany volné plochy oka [mm]

d průměr vlákna [mm]



Obrázek 16: Parametry síta a) velikost ok vs. průměr drátu, b) otevřená plocha síta – světlost [11]

Při samotném tisknutí pájecí pasty je DPS vakuově uchycena v nastavitelném držáku. Síťka je umístěna ve vzdálenosti od síta nazývané odtrh nebo odskok o (0,8–1 mm) nad DPS. Tato vzdálenost definuje výšku vrstvy. Na síťku je naneseno malé množství pasty, jež se pohybem těrky s rychlostí v_s a při působení síly F_s protlačí do ok síťky. V důsledku rheologických vlastností pasty dochází po návratu těrky do krajní polohy k odskoku síťky do původního stavu a současně k přenesení pájecí pasty z ok síťky na podložku (obr. 17). [11]



Obrázek 17: Princip síťotisku [7]

Faktory působící v procesu síťotisku lze rozdělit na vnitřní a vnější. Vnitřní faktory působí bezprostředně při tisku a jsou dány nastavením tiskových parametrů a můžeme je regulovat. Patří mezi ně vliv výšky odtrhu, působení síly na těrku, rychlost těrky, úhel těrky (35 až 45 °). Mezi vnější faktory patří vliv podložky (drsnot podložky, rozměrové tolerance), vliv síta (materiál, světlost, hustota tkaniny), vliv šablony (tloušťka masky, přesnost), vliv pasty (viskozita, rheologie). [11]

3.4.3 Šablonový tisk

Princip šablonového tisku je stejný jako u síťotisku – pájecí pasta je protlačována těrkou přes otvory v kovové šabloně, které korespondují s motivem DPS. Na rozdíl od síťotisku není mezi šablonou a DPS během tisku žádná mezera. Při velkosériové výrobě jsou používány automatizované systémy využívající princip šablonového tisku. Tyto systémy zajišťují procesní stabilitu tisku pasty při zachování rychlosti výroby.

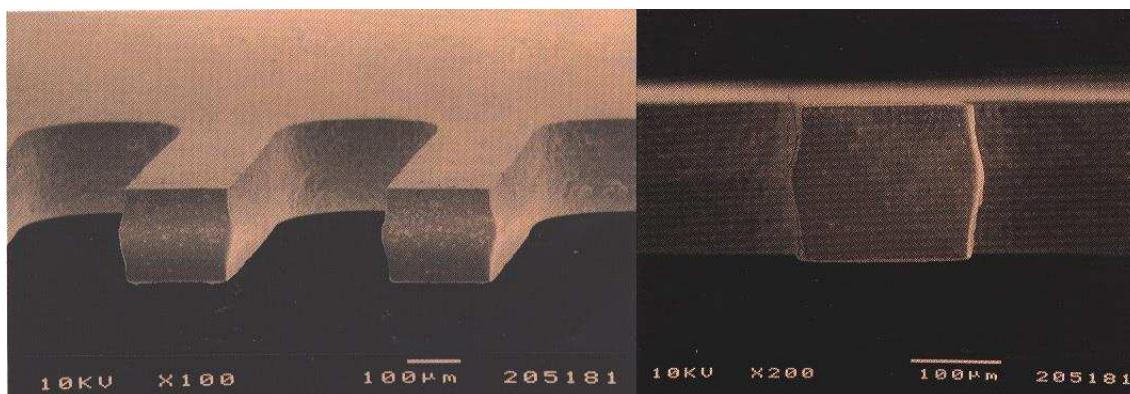
Tisková šablona

Správně zhotovená šablona je základním předpokladem kvalitního natisknutí pájecí pasty, a tedy se výraznou měrou podílí na kvalitním zapájení SMD součástek. Na výsledek tisku pájecí pasty má vliv tloušťka šablony, design otvorů šablony, postup výroby a materiál šablony. Tloušťka šablony se v závislosti na aplikaci pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,5 mm. Šablony jsou nejčastěji vyrobeny z nerezové oceli, bronzu a niklové mosazi. Oproti sítu má šablona vyšší životnost, ale náklady na její pořízení jsou vyšší. [9][12]

Tiskové šablony lze vyrábět několika metodami [9]:

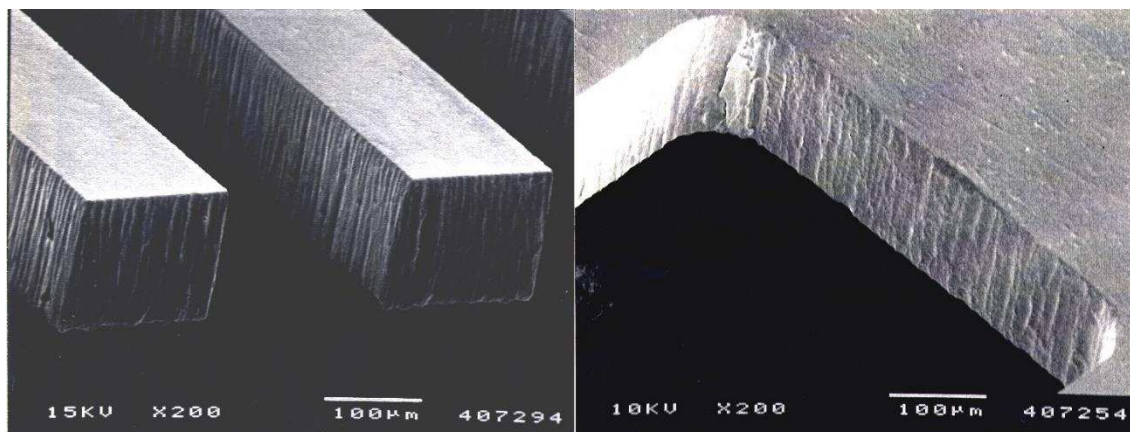
- chemickým leptáním,
- řezáním laserem,
- galvanickým nanášením.

V minulosti byla nejpoužívanější metoda chemického leptání, a to proto, že byla nejlevnější. Tato metoda ovšem vykazuje nejhorší výsledky při tisku pájecí pasty ze všech vyjmenovaných metod. Vzniklé otvory po odleptání nemají zcela hladké stěny a hrany otvorů nejsou vyleptány přesně (obr. 18). Z důvodu zmenšujících se pouzder SMD součástek a tím pádem zvyšujících se nároků na přesnost tisku pájecí pasty se v současné době chemicky leptané šablony využívají jen minimálně. Takto zhotovené šablony lze využít pro součástky, které mají větší rozteč než 0,5 mm. [9]



Obrázek 18: Chemicky vyleptaná šablona [9]

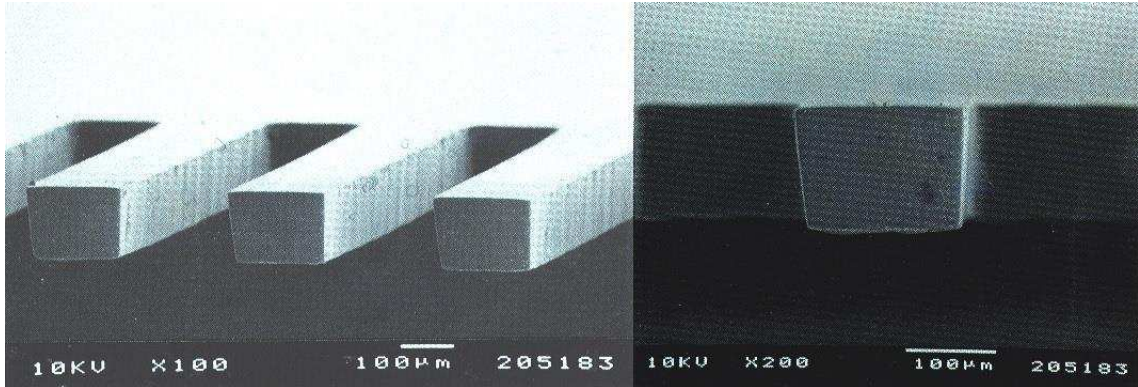
Šablona vyřezaná laserem má oproti metodě chemického leptání hrany otvorů, ale na druhou stranu mají tyto otvory drsnější povrch (obr. 19), což může způsobit obtížnější uvolnění pasty z šablony. Tyto šablony se využívají u aplikací s roztečí větší než 0,4 mm. [9]



Obrázek 19: Šablona vyřezaná laserem [9]

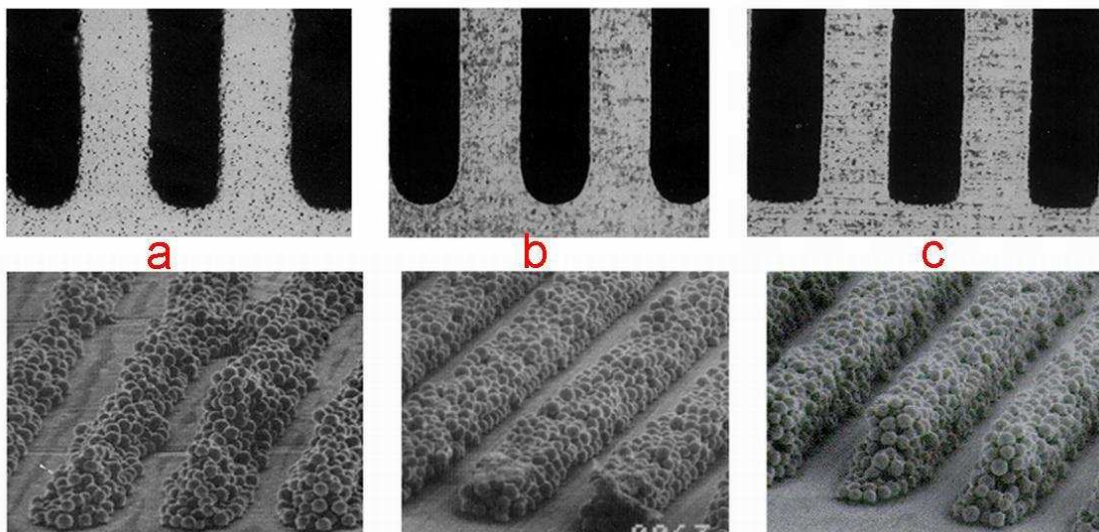
Pro tisk pájecí pasty, kde jsou rozteče menší než 0,4 mm se používá šablony zhotovených galvanickou cestou. Tyto šablony jsou založeny na chemickém aditivním nanášení vrstvy niklu na pomocnou část tvořenou měděnou vrstvou nesoucí fotorezistivní motiv. Ten je exponován UV světlem přes masku představující požadovaný motiv a na

něj je nanášena galvanicky vrstva niklu. Po dosažení požadované tloušťky je fotorezist odstraněn a niklová šablona je oddělena od pomocné části. Stěny otvorů u těchto šablon jsou velmi hladké a okraje otvorů velmi ostré (obr. 20). Tím zajišťují dobré uvolnění pasty. Nevýhodou těchto šablon je jejich vysoká cena. [9][12]



Obrázek 20: Šablona vyrobená galvanickým nanášením [9]

Na obrázku 21 je možno vidět porovnání tisku výše uvedených metod výroby šablony.

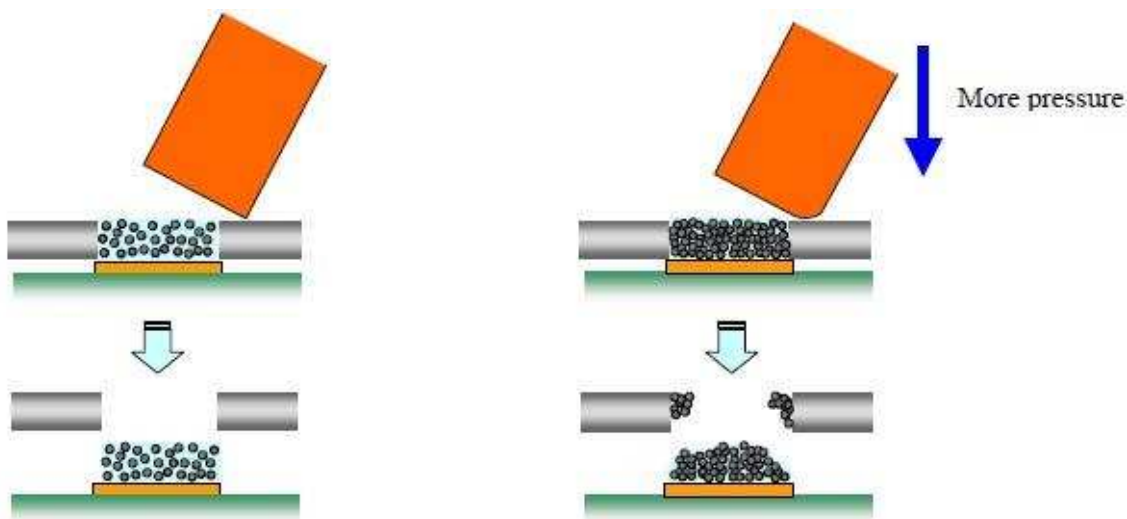


Obrázek 21: Otvory šablony a nanášená pasta šablonou vyrobenou, a) chemickým leptáním, b) řezáním laserem c) galvanickým nanášením [7]

Těrky

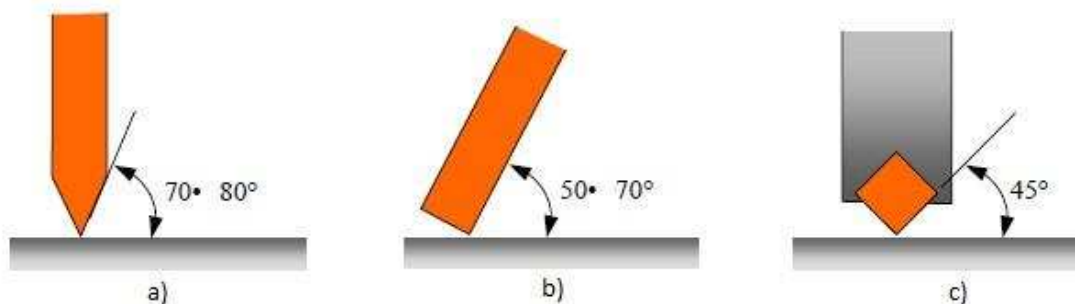
Těrky pro tisk pájecí pasty jsou vedle šablon druhým kritickým nástrojem pro její správné nanášení na DPS. Používají se těrky pryžové (polyuretanové), nebo kovové. S pryžovými těrkami se obecně dosahuje nižšího množství natištěné pasty – při tisku je těrka vtlačována dovnitř prostoru šablony. Z tohoto důvodu mají pryžové těrky také omezenou životnost, jelikož během tisku se hrana těrky opotřebovává a dochází k jejímu zakulacení. Pokud k tomuto dojde, je potřeba zvýšit tlak na těrku, jinak by na DPS zůstávala tenká vrstva pasty po průjezdu těrky. Pokud by ovšem přítlak těrky byl moc vysoký, docházelo by k vtlačení nadbytečného množství částic pasty do otvorů šablony,

což by zvýšilo tření mezi částicemi pájky a stěnami otvorů šablony. Částice pájecí pasty by po zvednutí šablony ulpívaly na jejích okrajích, což by vedlo ke snížení kvality tisku. Toto je znázorněno na obrázku 22. [9]



Obrázek 22: Výsledek přílišného tlaku na těrku [9]

Kromě tlaku na těrku je dalším důležitým faktorem úhel, který těrka svírá se šablonou. Na obrázku 23 lze vidět tři základní typy terek.



Obrázek 23: a) diamantový tvar těrky b) plochá těrka c) čtvercová těrka [9]

Diamantový tvar těrky svírá s šablonou úhel v rozmezí 70–80°. Přítlačná síla působící na těrku je poměrně malá a tento typ těrky je vhodný pro pájecí pasty s nízkou viskozitou.

Čtvercová těrka svírá s šablonou úhel 45° a přítlačná síla působící na těrku je poměrně vysoká. Tento typ těrky je vhodný pro pájecí pasty s vysokou viskozitou. Pokud by byl tento typ těrky použit na pájecí pastu s nízkou viskozitou, mohlo by dojít k rozmazání tisku.

Nejpoužívanější těrkou je ovšem těrka plochá, která se šablonou svírá úhel v rozmezí 50 až 70°. Tento typ těrky je nejuniverzálnější a poskytuje širší přizpůsobivost pro různé druhy pájecích past. [9]

V dnešní době jsou ovšem preferované těrky kovové, jelikož umožňují tisk menších rastrů, při tisku nedochází k jejich deformaci a jejich životnost je větší. Kovové těrky se skládají z kovového břitů, který jim zaručuje určitou míru pružnosti a jejich držáku.

Stejně jako u pryžových těrek je zde důležitý úhel, který těrka svírá s šablonou. Tento úhel se s pohybem těrky zmenšuje, jak je naznačeno na obrázku 24, a je nutné zabezpečit, aby byl tento ohyb co možno nejmenší.



Obrázek 24: Změna úhlu těrky během tisku pájecí pasty [13]

3.4.4 Jet printing

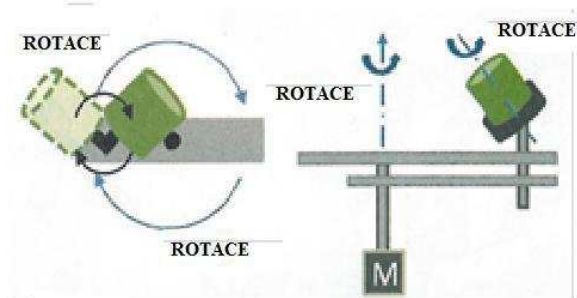
Technologie nanášení pájecí pasty podobná inkoustovým tiskárnám. Při nanášení pasty se nevyužívá šablon, ale trysek dispenzeru a samotná pasta je uložena v cartridge. Jedná se o flexibilní technologii, která umožňuje velmi rychlé změny výroby. Stačí pouze změnit program a odpadá tedy nutnost skladovat a čistit šablony. Jedná se o ideální řešení pro výroby se středním objemem výroby, ale s různorodou skladbou vyráběných produktů. Nevýhodami jsou malá kapacita linky při výrobě složitějších DPS s velkým počtem součástek a většinou nutnost použití past vhodných pro disperzní tisk.

3.5 Skladování pájecí pasty

Pájecí pasta je citlivá na teplo, vlhkost i mráz. Skladovat pájecí pastu se doporučuje v chladničce při teplotách mezi 2–6 °C. Zpracovatelnost takto uskladněné pasty je mezi 6–12 měsíci. Pokud je pasta skladována v místnosti, doporučuje se teplota okolí do 25 °C a relativní vlhkost kolem 60 %. Zpracovatelnost takhle skladované pasty se ovšem sníží na 3–6 měsíců. [1]

Teplota vyšší než 25 °C vede k separaci tavidlového nosiče a tím ke změně reologických vlastností pasty, což může mít za následek defekty při tisku. Zmrznutí pasty povede k oddělení aktivátorů od tavidlového nosiče, což bude mít za následek horší smáčení pasty. Pájecí pasta je hydrokopická a zvýšená vlhkost povede k navázání molekul vody do pájecí pasty, a to povede k defektům, jako je sedání pasty, rozstříkávání pájky, redukce lepivosti a k horšímu smáčení. [1]

Před započítím výroby je potřeba pájecí pastu nechat temperovat na její pracovní teplotu, která je 22 °C ±2 °C. Pracovní relativní vlhkost je v rozmezí 40–50 %. Použitím speciálního kondicionéru (obr. 25), kdy za využití odstředivých sil rotací uzavřeného kelímku a frikčních sil uvnitř kelímku dojde k homogenizaci pasty i jejímu ohřevu na pracovní teplotu během 10 minut. Tím dojde k eliminaci kondenzace vlhkosti v pájecí pastě. [1]



Obrázek 25: Kondicionér pájecí pasty [1]

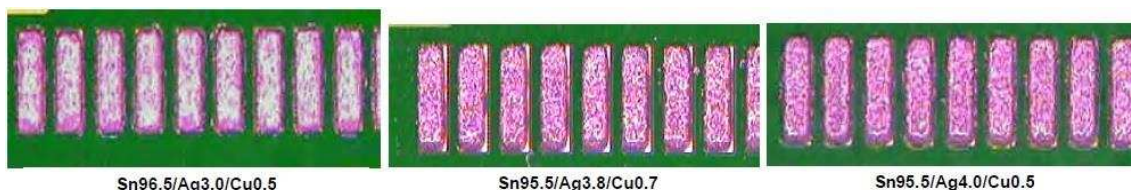
Použitá pájecí pasta po tisku by měla být skladována v prázdné (použitá pasta se nesmí přidávat k nepoužité) a uzavřené nádobě, bez přítomnosti vzduchu, aby nedocházelo k její oxidaci. Při dalším použití je vhodné přidat k použité pastě ekvivalentní množství čerstvé pasty. [1]

3.6 Porovnání pájecích past s rozdílným obsahem stříbra

SAC (cín-stříbro-měď) slitiny se staly jednou z nejužívanějších rodin pájecích slitin využívaných pro přijetí směrnice RoHS o omezení používání nebezpečných látek. Tyto slitiny nabízí relativně nízké teploty tání a jsou poměrně spolehlivé oproti jiným slitinám. Nejpopulárnější jsou slitiny Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5 (SAC305), Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7 (SAC387) a Sn95,5/Ag4,0/Cu0,5 (SAC 405).

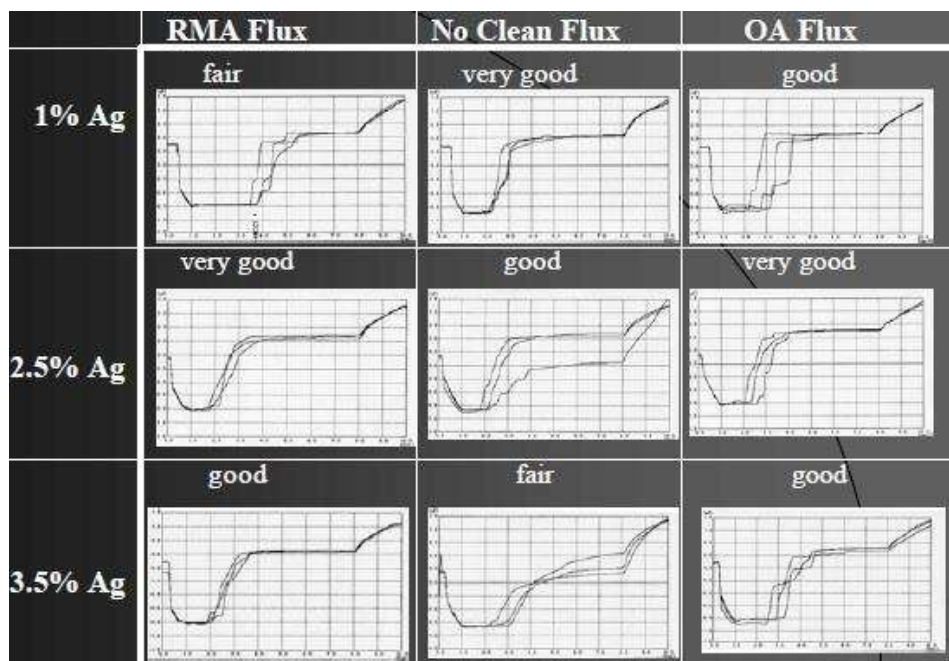
Studie [36] se zabývala porovnáním těchto slitin. Bod tání těchto slitin leží v rozmezí od 218 °C do 220 °C. Dle [36] byl bod tání pro slitinu SAC305 219,77 °C, pro SAC387 218,78 °C a pro SAC405 220,23 °C.

Tiskové vlastnosti těchto past jsou téměř totožné, jak je možno vidět na obrázku 26. Všechny pasty měly při testování jejich tiskových vlastností stejné no-clean tavidlo, stejný podíl kovu, stejnou velikost částic a stejnou viskozitu. Tisk byl proveden na ploškách s roztečí 12 milů.



Obrázek 26: Porovnání tiskových vlastností SAC pájecích past [36]

Na obrázku 27 lze vidět výsledky metody smáčecích vah pro pájecí pasty SAC s rozdílným obsahem stříbra, při použití tří různých tavidel. Z testu vyplývá, že čím nižší obsah stříbra ve slitině je, tím bude smáčení rychlejší. Ovšem je třeba poznamenat, že výsledky naznačují pouze malou změnu rychlosti smáčení. [36]

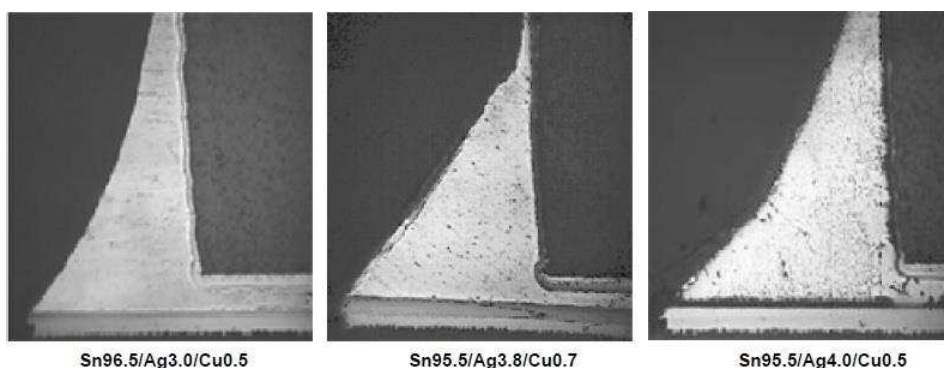


Obrázek 27: Výsledky testu smáčecích vah pro SAC slitiny s různým obsahem stříbra

Test roztékavosti byl proveden nejprve na plošky s ENIG povrchovou úpravou a přetavení pájecí pasty došlo v přetavovací peci bez ochranné atmosféry. Všechny pájecí pasty dosáhly úplného roztečení po pájecí plošce. Dále byl test roztékavosti proveden na měděném kupónu, kdy k přetavení pájecí pasty došlo na vyhřívané destičce. Průměr výsledného terče přetavené pasty byl stejný pro všechny tři testované pájecí pasty.

Z výsledků testu smáčecích vah a testů roztékavosti, lze tvrdit, že smáčení a roztékavost SAC pájecích past závisí na obsahu stříbra v pastě jen minimálně. [36]

Zmíněné pasty byly také podrobeny teplotnímu šokovému cyklování. Zapájené testovací DPS byly podrobeny 500 15minutovým cyklům, kde minimální teplota byla $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a maximální teplota byla $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Následně byla zjišťována přítomnost prasklin v pájených spojích. Jak lze vidět na obrázku 28, žádné praskliny detekovány nebyly. [36]



Obrázek 28: SAC slitiny po teplotním šokovém testování [36]

Studie [37] se zabývala rozdílem mechanických vlastností těchto slitin a dle jejich závěru nemá rozdílný podíl stříbra v pájecích pastách zásadní vliv na jejich mechanické vlastnosti a výsledky testů byly pro všechny tři výše zmíněné slitiny téměř totožné.

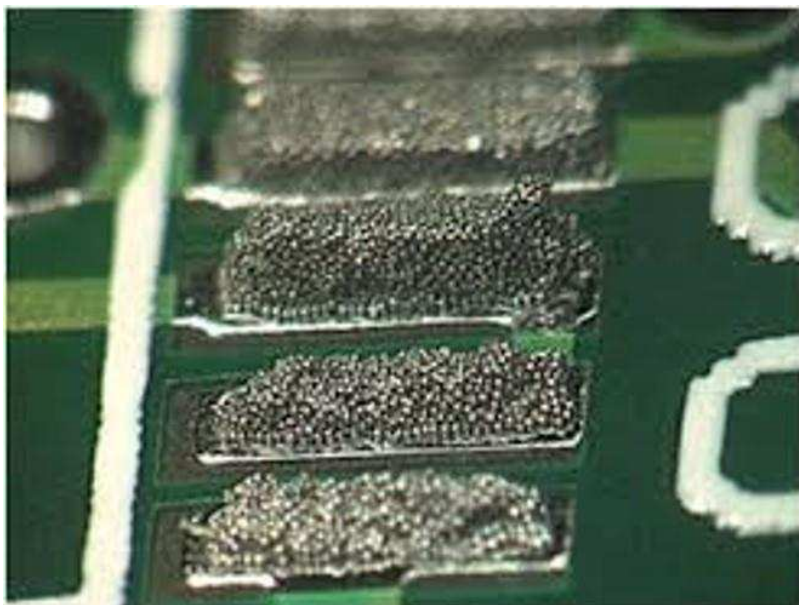
4 DEFEKTY PÁJENÝCH SPOJŮ

4.1 Defekty vznikající během tisku pájecí pasty

Kvalitní natisknutí pájecí pasty má zásadní vliv na výslednou kvalitu pájeného spoje. V dnešní době mají výrobní linky modul, který provádí kontrolu správného tisku – SPI (solder paste inspection).

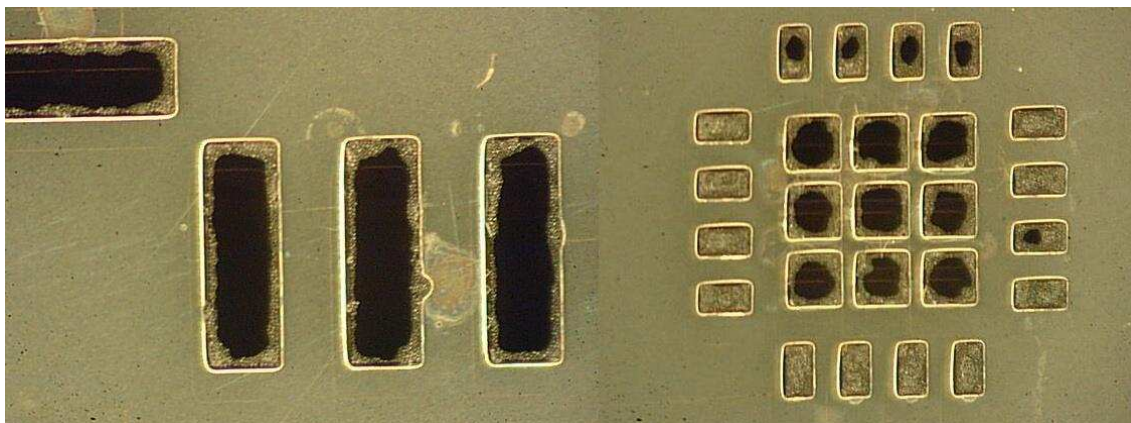
4.1.1 Nedostatečné množství pájecí pasty

Při nedostatečném množství pájecí pasty (obr. 29) na pájecích ploškách může dojít ke špatnému zapájení součástky. Buďto nebude ve spoji dostatečné množství pájky a pájený spoj nebude vyhovovat normě, anebo pájený spoj vůbec nevznikne.



Obrázek 29: Nedostatečné množství pájecí pasty na posledních dvou ploškách [14]

Příčinou je buďto nedostatečné množství pasty na šabloně během tisku, nebo částice pájecí pasty při oddělování šablony od DPS zůstanou na jejích stěnách (obr. 30). Toto je možno vyřešit snížením oddělovací rychlosti šablony od DPS. Druhou možností je snížení tlaku těrky. Do otvorů šablony tak nebude natlačeno nadbytečné množství pájecí pasty, a tudíž se sníží tření mezi částicemi pasty a stěnami otvorů šablony.



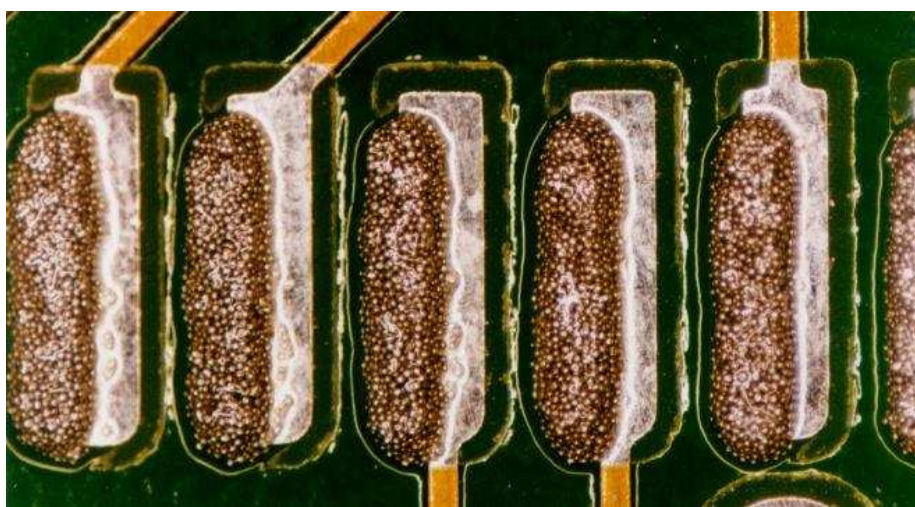
Obrázek 30: Částice pájecí pasty, které zůstaly po oddělení šablony v jejich otvorech [15]

4.1.2 Příliš mnoho natisknuté pájecí pasty

Stejně jako nedostatek natisknuté pájecí pasty způsobuje problémy i její nadbytek. Pokud je pájecí pasta na ploškách nadbytek, hrozí vznik poruchy zvané „solder bead“ (viz níže). Součástky také během přetavení mohou začít v pastě plavat, což je kritické zejména u součástek s malou roztečí vývodů, kde může dojít ke změně polohy součástky osazené do pájecí pasty. Příčinou tohoto problému může být nedostatečný tlak těrky, případně problém s podporou DPS v tiskovém stroji (šablona úplně nedoléhá na DPS).

4.1.3 Špatná pozice natisknuté pasty

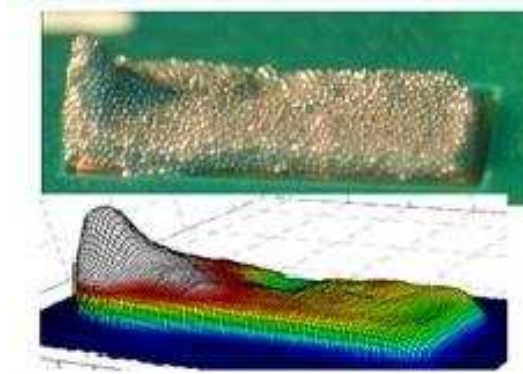
Pokud bude při tisku pájecí pasta natisknuta mimo pájecí plošky, může být výsledný pájený spoj nekvalitní, mohou se objevit zkratky nebo náhrobky. Tento defekt vzniká, pokud nejsou šablona a DPS správně sesouhlaseny. To může být způsobeno nekvalitními značkami, které slouží k sesouhlasení na DPS, nebo závadou na tiskovém stroji, který například nemusí být správně zkalibrován. Příklad špatné pozice natisknuté pasty lze vidět na obrázku 31.



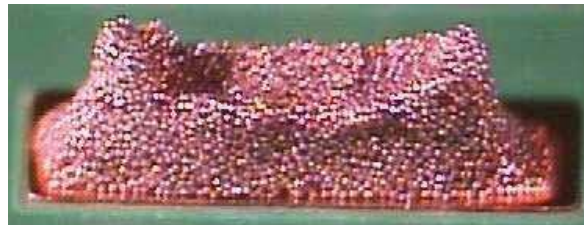
Obrázek 31: Pájecí pasta natisknutá mimo pájecí plošky [16]

4.1.4 Nesprávný tvar natisknuté pasty

Nesprávný tvar natisknuté pasty vzniká, pokud je nadbytek pasty pouze v některých místech, obvykle na krajích natisknuté pasty. V anglické literatuře má tento defekt název „dog ears“ v překladu tedy „psí uši“. Tento typ defektu může vést ke tvorbě náhrobků nebo defektu typu solder bead. Tento defekt vzniká, pokud je oddělovací rychlost šablony od DPS příliš rychlá, pokud je tlak těrky příliš vysoký nebo je vysoká teplota pasty. Odstranit vznik těchto defektů můžeme tedy snížením oddělovací rychlosti, snížením tlaku těrky nebo snížením teploty pájecí pasty. Příklad tohoto defektu je možno vidět na obrázku 32 a 33.



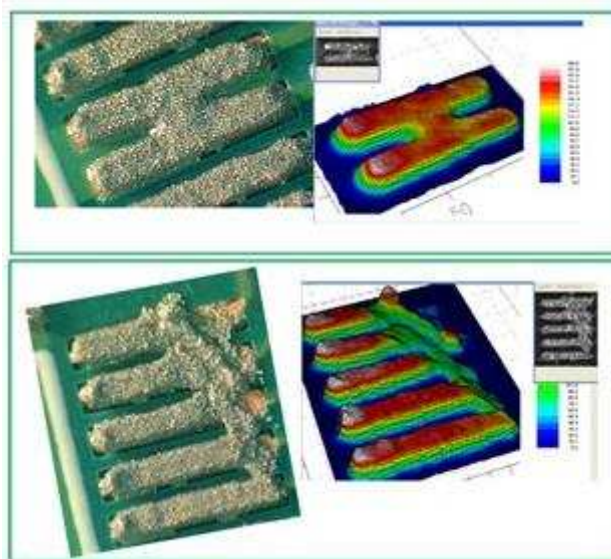
Obrázek 32: Nesprávný tvar natisknuté pasty (ve spodní části obrázku je možno vidět výstup z SPI) [17]



Obrázek 33: „Dog ears“ [18]

4.1.5 Můstky

Můstkem jsou propojeny dvě plošky, na kterých je natisknuta pasta, které propojeny být nemají (obr. 34). Po přetavení může můstek vést ke vzniku zkratu. Můstek vzniká, pokud je množství natisknuté pasty příliš velké. Další příčinou může být ulpění zbytku pájecí pasty na spodní straně šablony a její přenesení na následující DPS. Příčinou také může být příliš vysoká teplota pasty, a tedy příliš velká roztékavost pasty.

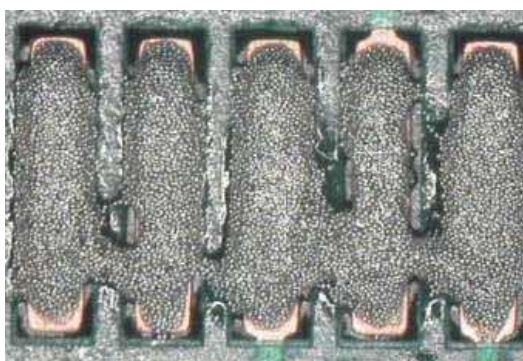


Obrázek 34: Můstky [17]

4.1.6 Sedání pájecí pasty za studena

Po natisknutí má pájecí pasta tendence klesat a roztékat se (obr. 35). Toto sesunutí může způsobit vznik můsteků mezi ploškami, ze kterých po přetavení mohou vzniknout zkratky. Sedání pájecí pasty za studena závisí na [19]:

- viskozitě pájecí pasty,
- těkavosti tavidla, které určuje rychlost vysychání pasty, která se poté začne rozpadat,
- výšce natisknuté pasty,
- teplotě.



Obrázek 35: Studený sesuv pájecí pasty [18]

4.2 Defekty vznikající během procesu přetavení

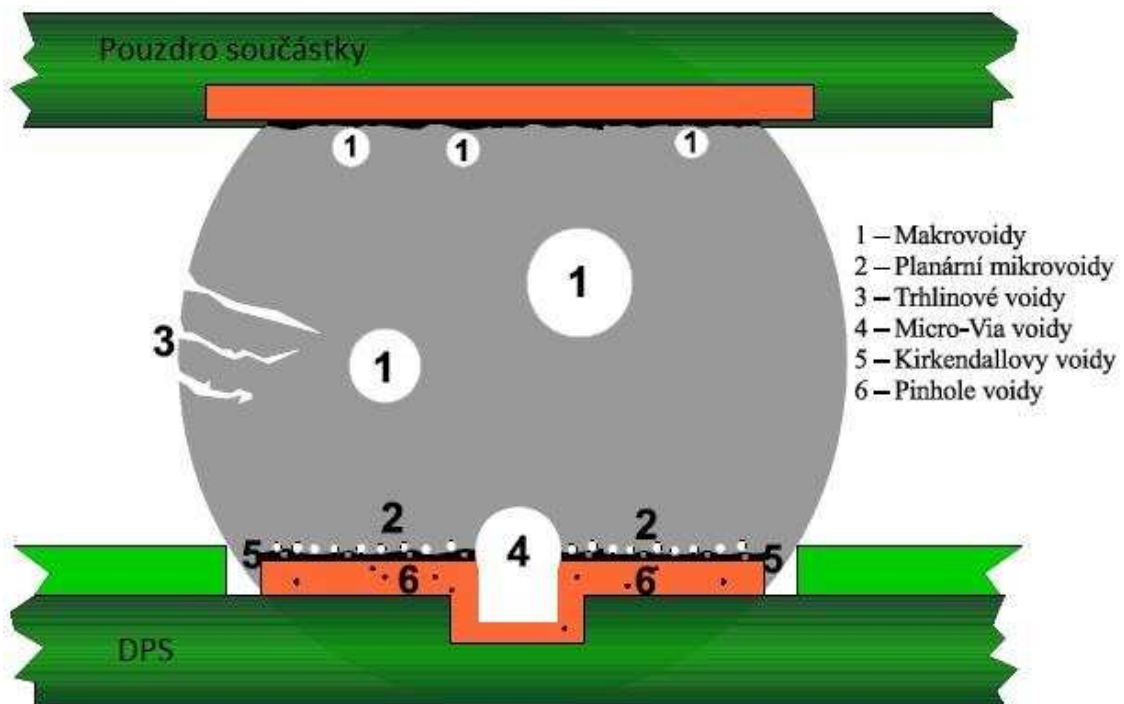
Defekty vznikající během procesu přetavení mohou mít zásadní vliv na funkci daného zařízení a je nutné jim předcházet. Tyto defekty jsou závislé především na nastavení pájecího procesu na použitých materiálech.

4.2.1 Voidy

Voidy lze charakterizovat jako dutiny uvnitř pájeného spoje. Je to typ defektů, který je typický pro pájení přetavení pájecí pasty. Dutiny uvnitř spoje obsahují plyny, tekuté nekovové materiály, tuhá rezidua nebo vakuum. Na kvalitu pájeného spoje má vliv četnost voidů, jejich velikost a poloha. Pokud voidy tvoří více než 25 % objemu spoje, jedná se již o nadměrný výskyt, který má významný vliv na kvalitu pájeného spoje, zejména jedná-li se o velké množství voidů o malých rozměrech na rozhraní pájky a součástky.

Životnost pájeného spoje je také výrazně snížena, pokud je defekt tvořen jedním voidem, jehož objem tvoří více než 50 % objemu pájeného spoje. Voidy dále snižují tepelnou i elektrickou vodivost spoje. Dle některých studií má podíl malého množství menších voidů pozitivní vliv na pájený spoj co se týče jeho mechanické pevnosti, zejména v mechanismu růstu prasklin a redukci stresového namáhání díky stlačitelnosti vzduchových kapes. [1][20]

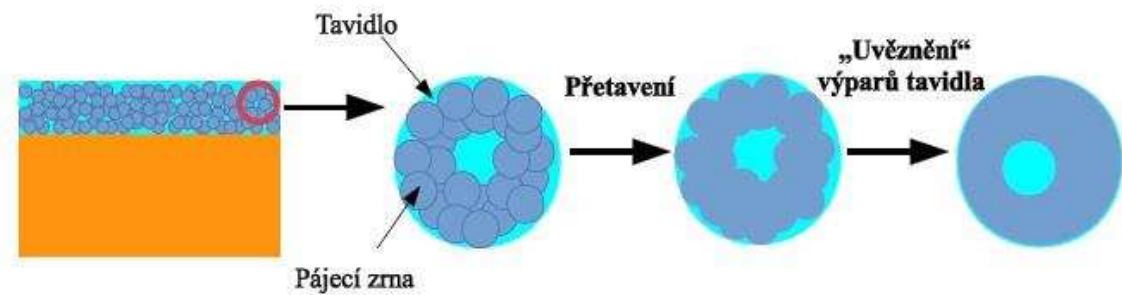
Voidy se dělí na několik typů dle jejich mechanismu vzniku a umístění (obr. 36).



Obrázek 36: Typy voidů [1]

Makro voidy

Makro voidy jsou označovány také jako procesní voidy a hlavní příčinou jejich vzniku je uvolňování těkavých složek tavidla z pájecí pasty během přetavení, kdy se tyto složky nedostanou na povrch a zůstanou uvězněny uvnitř formujícího se spoje. Mechanismus vzniku procesních voidů je zobrazen na obrázku 37.

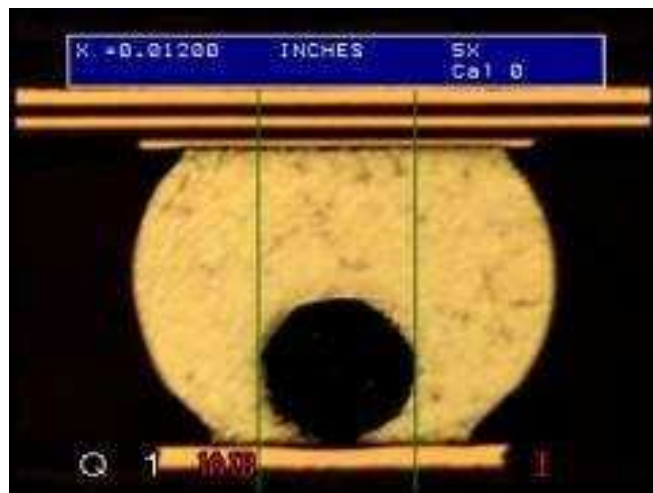


Obrázek 37: Mechanismus vzniku makro voidů [1]

Průměr procesních voidů se pohybuje v rozmezí 100–300 μm a vyskytovat se mohou kdekoli v pájeném spoji. [1]

Mezi hlavní faktory ovlivňující velikost makro voidů patří [1]:

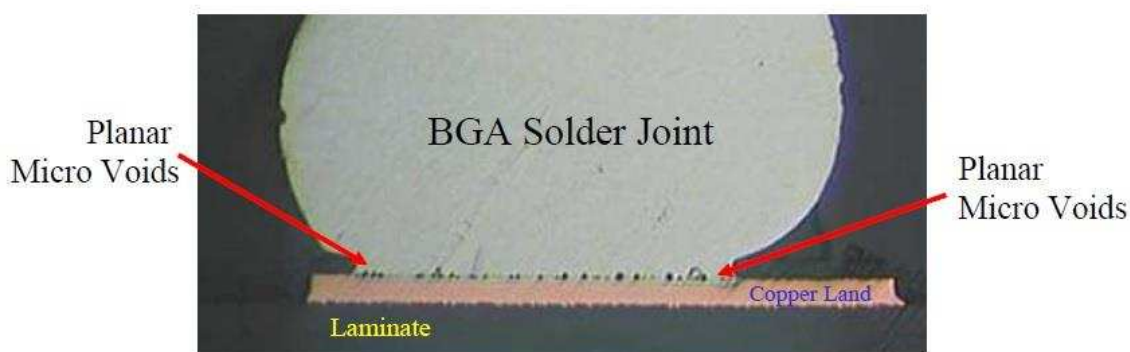
- pájka – velikost kuliček, složení, teplota tavení, oxidace,
- tavidlo – viskozita, tixotropní vlastnosti, povrchové napětí, složení,
- pájený spoj – geometrie, tvar, povrchová úprava, oxidace vývodů,
- proces – tisk (tloušťka vrstvy, tvar natisknuté vrstvy, parametry), pájení (teplotní profil – gradienty, TAL, pracovní atmosféra).



Obrázek 38: Příklad makrovoidů [21]

Planární voidy

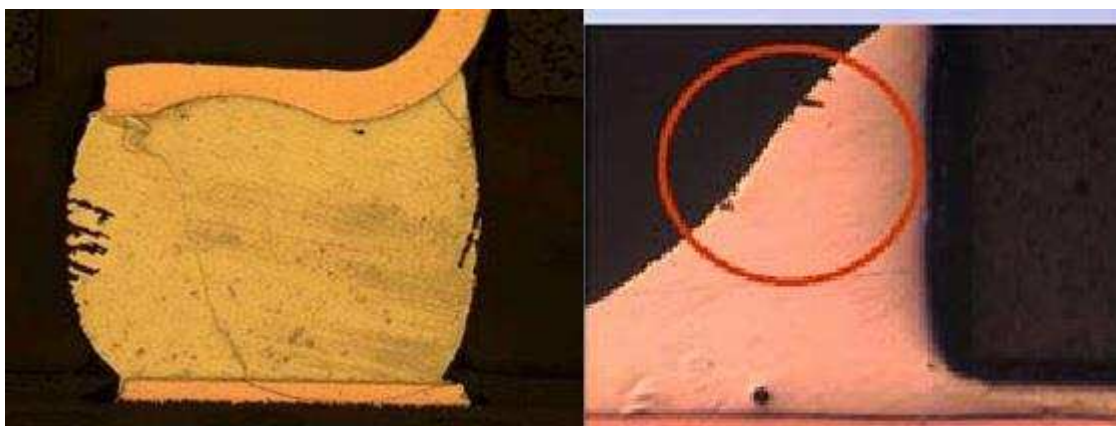
Planární voidy jsou malé dutinky na rozhraní pájeného povrchu a pájky (obr. 39). Voidy mají v průměru maximálně 25 μm a tvoří souvislou vrstvu na rozhraní spoje. Tato vrstva je tak významně oslabena a může dojít ke ztrátě mechanické pevnosti spoje či může být změněna jeho elektrická vodivost. Vznik planárních voidů úzce souvisí s volbou pájecí slitiny a povrchové úpravy DPS. Princip vzniku této poruchy není dosud přesně znám. Tyto voidy jsou někdy nazývány jako „champaigne voids“. [1]



Obrázek 39: Planární voidy [21]

Trhlinové voidy

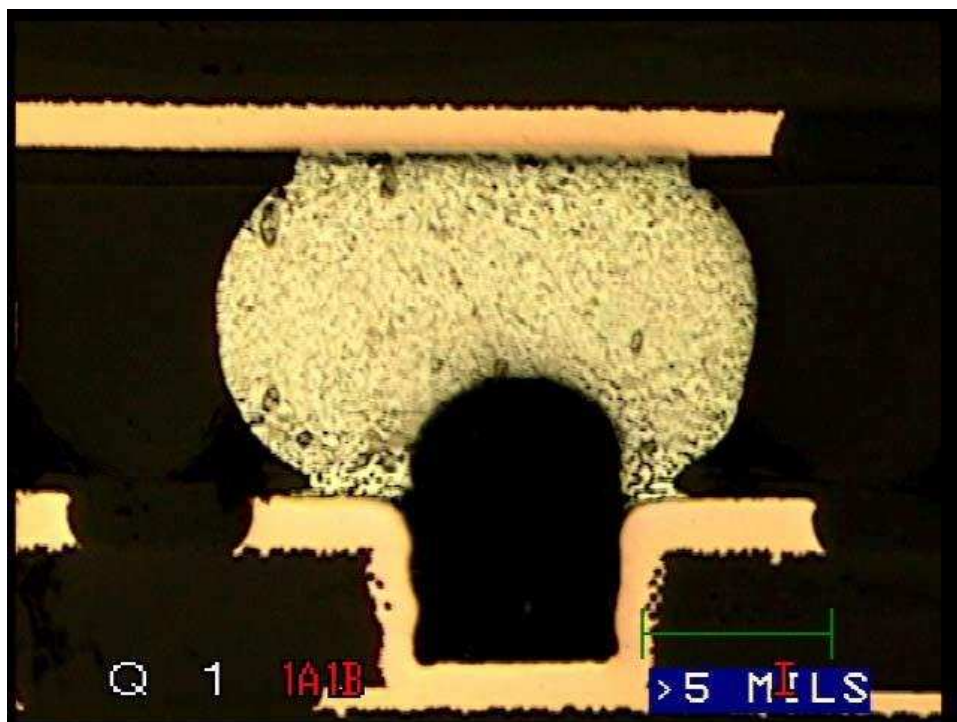
Technicky vzato se nejedná o dutiny, ale o lineární praskliny, které se dendriticky větví. Tyto voidy se tvoří převážně při použití SAC pájecí slitiny a jsou tudíž typické pro bezolovnaté pájené spoje. Tato vada se vyskytuje při pomalém chladnutí pájeného spoje, kdy dojde ke smrštění pájky před jeho ztuhnutím. Tyto voidy se také nazývají jako „sink holes“ nebo „hot tears“. Příklad trhlinových voidů lze vidět na obrázku 40. [1]



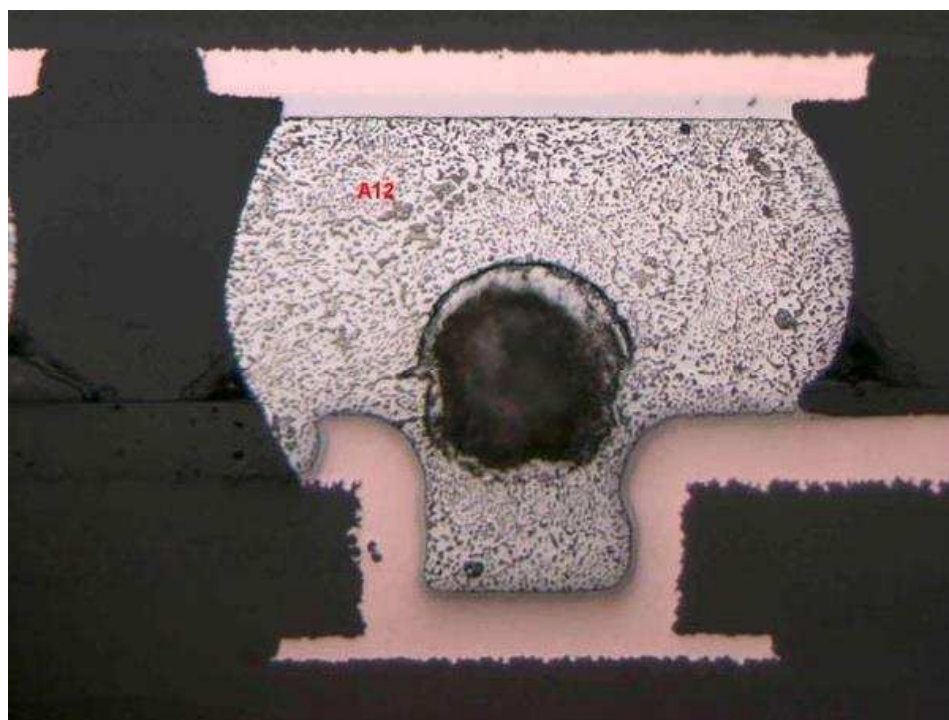
Obrázek 40: Trhlinové voidy [21]

Voidy v mikropropojích

Voidy, které mají v průměru 100 μm a více a vznikají v důsledku implementace mikropropojů na DPS. Tyto voidy nebývají zahrnuty do 25 % specifikace dle IPC normy. Vyskytují se u bezolovnatých i olovnatých slitin. Na obrázku 41 je vyobrazena dutina, která je způsobena nevyplněním mikropropoje pájkou. Na obrázku 42 poté dutina, která v důsledku vyplnění mikropropoje přešla do pájeného spoje, kde zůstala uvězněna. [1]



Obrázek 41: Void v mikropropoji [21]

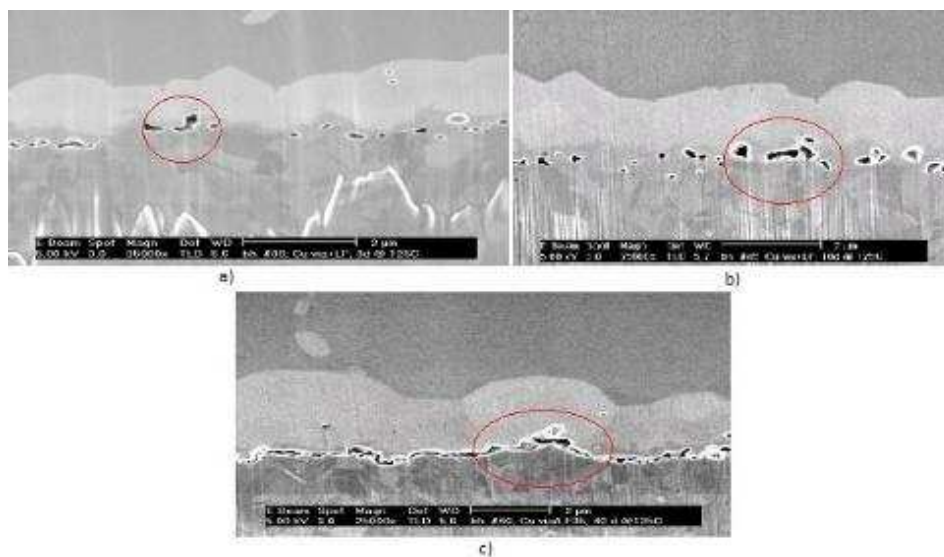


Obrázek 42: Void v mikropropoji [21]

Kirkendallové voidy

Nacházejí se na rozhraní intermetalické vrstvy a měděnými pájecími ploškami (obr. 43). Tyto voidy rostou s časem a k jejich růstu je potřeba vyšších teplot. Příčina jejich vzniku spočívá v rozdílné difuzní rychlosti mědi a cínu. Intermetalická vrstva se díky

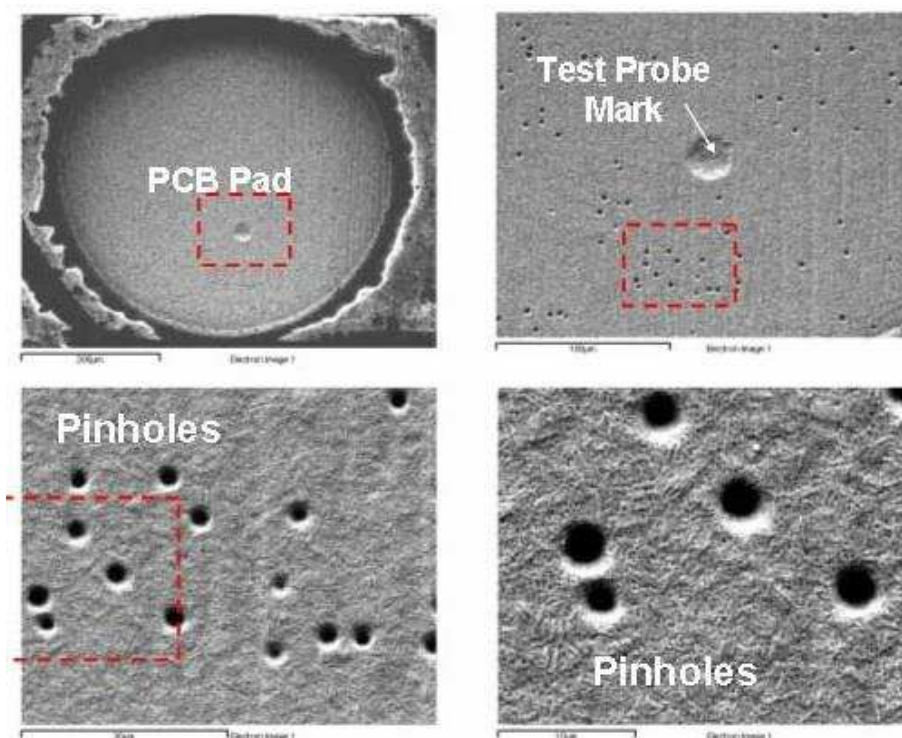
těmto voidům stává křehčí, což může ovlivnit spolehlivost pájeného spoje. Označovány jsou také jako „horsting voids“. [1]



Obrázek 43: Růst Kirkendallových voidů při 125 °C a) po 3 dnech, b) po 10 dnech, c) po 40 dnech [11]

Pinhole voidy

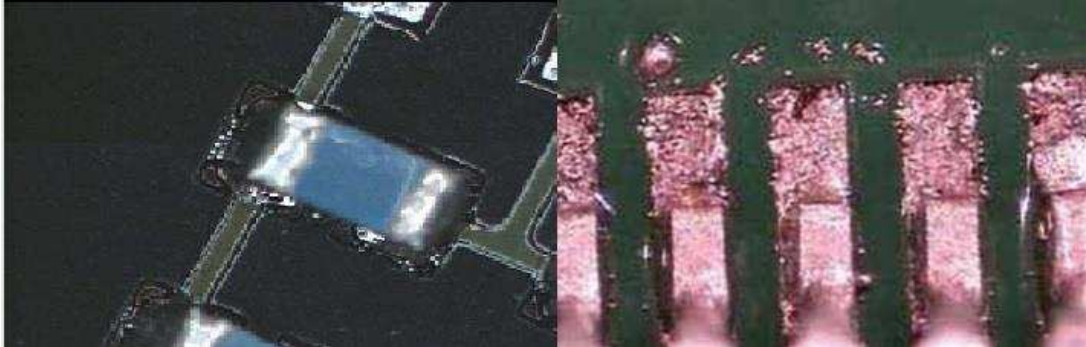
Označovány jsou také jako špendlíkové voidy, mají velikost řádově v jednotkách mikronů a vznikají při galvanickém pokovování mědi u výrobce DPS. Jsou viditelné i přes povrchovou úpravu. Na DPS se usazují chemické látky používané během její výroby a ty se poté během procesu pájení odpařují. Zobrazeny jsou na obrázku 44. [1]



Obrázek 44: Pinhole voidy [21]

4.2.2 Kuličky pájky

Jednou z hlavních příčin tohoto defektu, který je zobrazen na obrázku 45, je oxidace částic pájky. Ta může nastat při výrobě pájecí pasty, v důsledku nevhodného skladování pasty a dlouhé prodlevě mezi natisknutím pasty a jejím přetavením.



Obrázek 45: Kuličky pájky [18]

Další příčina je nesprávná délka předehřevu. Při příliš rychlém předehřívání se budou složky z tavidla odpařovat rychleji a dojde k malým explozím, které budou rozstříkávat částičky pasty do okolí. Při příliš pomalém předehřívání se bude tavidlo rozstříkávat příliš daleko od pájecích plošek a bude s sebou unášet i částice pájecí pasty.

4.2.3 Solder bead

Tento defekt je možno vidět na obrázku 46. Solder bead se projevuje přítomností velké kuličky pájky, která je usazená ve zbytcích tavidla v bezprostřední blízkosti zapájené součástky. Často se jedná o součástky, které mají malou vzdálenost mezi vývody (typickým příkladem jsou pasivní součástky).

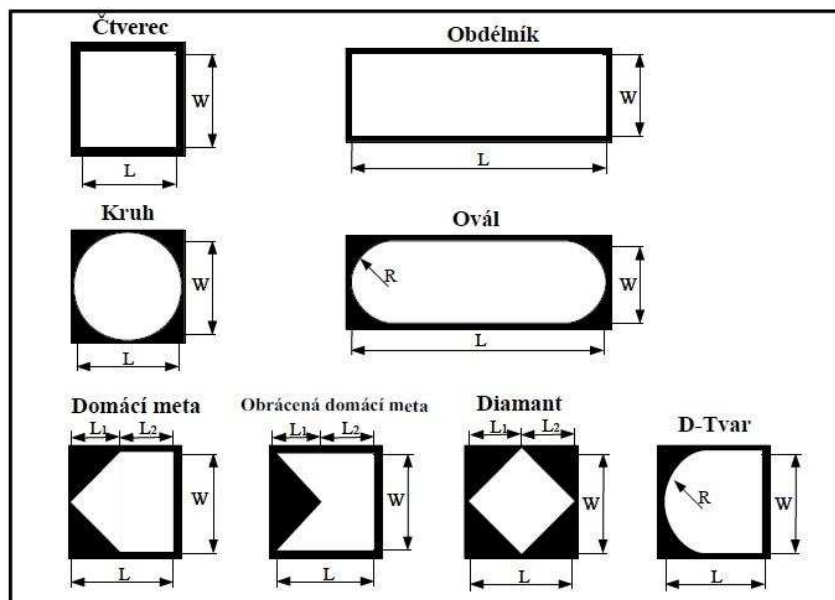


Obrázek 46: Solder bead [14]

Typicky tento defekt vzniká, pokud je natisknuto příliš mnoho pasty na pájecí plošky. Při osazení součástky do pasty je potom část pasty stlačena i pod tělo součástky.

Při přetavení se částice pod součástkou začnou shlukovat. Povrchové napětí chladnoucí pájky stahuje součástku blíže k ploškám DPS, a to má za následek vytlačení pájky na stranu součástky, kde utvoří kuličku. [22]

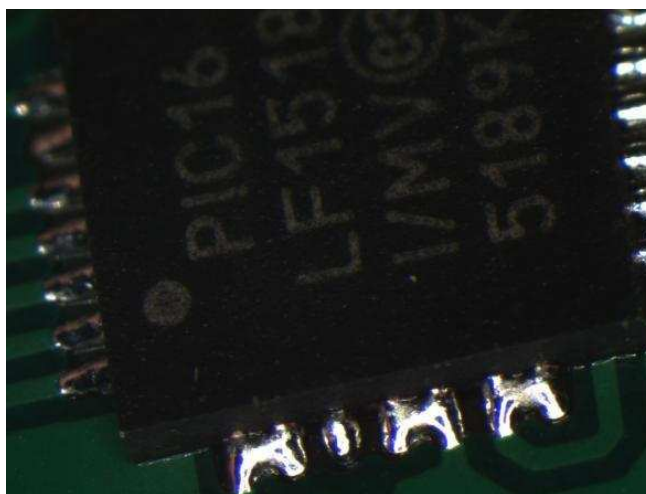
Zabránit tomuto defektu se dá upravením parametrů tisku (rychlost a tlak těrky), nebo upravením tiskové šablony. Její tloušťkou nebo velikostí a tvarem otvorů šablony. V dnešní době se využívá minimálně 10% redukce velikosti otvorů šablony proti skutečné velikosti pájecích plošek. Příklady redukce otvorů jsou uvedeny na obrázku 47. [23]



Obrázek 47: Redukované tvary otvorů šablony [7]

4.2.4 Zkrat

Zkrat je spojení dvou částí elektrického obvodu, které za normálních okolností spojeny být nemají. U pájení přetavením se zkraty nejčastěji vyskytují mezi vývody integrovaných obvodů, jak je například uvedeno na obrázku 48. Čím jemnější je rozteč mezi vývody, tím je riziko zkratu větší.



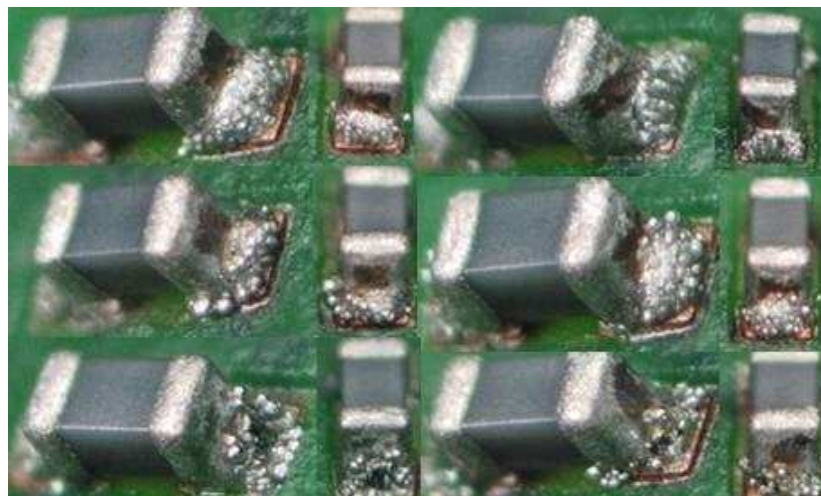
Obrázek 48: Zkrat u QFN pouzdra [7]

4.2.5 Sedání pájecí pasty za tepla

Sedání pájecí pasty za tepla se vyskytuje během přehřívání, kdy dochází k aktivaci tavidla. V tuto chvíli je obtížné udržet relativně těžké částice pájky ve tvaru, v kterém byla natisknuta a díky gravitaci dojde k jejímu roztékání. [19]

4.2.6 Špatné přetavení pasty

Anglicky také „solder graping“ je defekt, při kterém jsou na povrchu pájeného spoje patrné částice pájky (obr. 49). Příčinou tohoto jevu je velká míra oxidace částic pájky v pájecí pastě. Náchylné na tento typ defektů jsou zejména pasivní součástky v malých pouzdrech (0201, 01005). Malé množství pasty vystavuje okolí relativně velké množství částic pájky ze svého celkového objemu, která budou podléhat oxidaci a při přetavení nedojde k jejich slítí. [24][25]

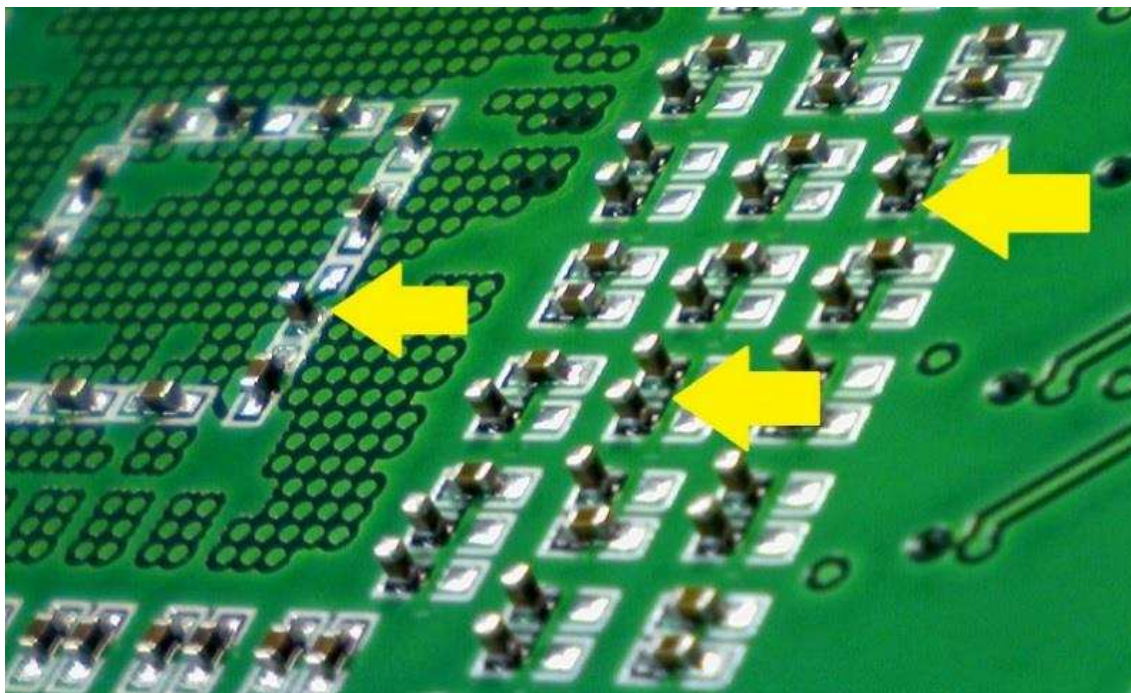


Obrázek 49: Solder graping [24]

Předejít tomuto problému se dá zvětšením množství pájecí pasty, ovšem zde je třeba myslet na to, že větší množství pájecí pasty může způsobit jiné defekty (solder bead, zkrat). Dalším řešením je úprava teplotního profilu (především přehřívací část), případně použití RTS pájecího profilu. [24][25]

4.2.7 Náhrobky

Náhrobky nebo také tombstone effect, Manhattan effect (obr. 50) jsou jedním z častých defektů, vznikajících během pájení přetavením SMD součástek. Nejvíce náchylné jsou pasivní součástky v malých pouzdrech (0805 a menší).



Obrázek 50: Náhrobky [26]

Jedním z mechanismů, které mohou zapříčinit efekt náhrobků, je rozdíl sil působících na vývody součástky. Tento rozdíl sil může mít několik příčin.

Jednou z nich je špatný design DPS. Pokud bude u jednoho vývodu součástky větší měděná plocha (chladicí ploška, zemnění), bude na této straně odváděno teplo od vývodu více jak u vývodu na straně druhé. To způsobí, že na straně součástky, ke které bude připojen například jen tenký vodič, dojde k přetavení pájecí pasty rychleji než na straně druhé. Na jedné straně součástky tedy bude nepřetavená pasta, zatímco na druhé již bude docházet ke smáčení. Smáčecí síly a povrchové napětí tedy způsobí pákový efekt a dojde ke zvednutí součástky na stranu.

Další příčinou může být špatný design samotných pájecích plošek. Čím větší bude ploška vzhledem k součástce, tím větší páka bude moct být vyvinuta na součástku. Pokud bude ploška příliš široká, bude součástka nakloněna do strany, pokud bude ploška příliš dlouhá, bude páka na součástku větší.

Z výše popsaného je jasné, že velkou roli zde hraje samotná váha součástky a její geometrie. Čím těžší součástka bude, tím méně bude náchylná na tvoření náhrobků. Kondenzátory mají tendence k tvoření náhrobků větší než rezistory. To je dáno tím, že kondenzátory jsou zpravidla vyšší. Roztavená pájka smáčí součástky do výšky, a tedy na kondenzátory bude vyvíjena větší páka než na rezistory.

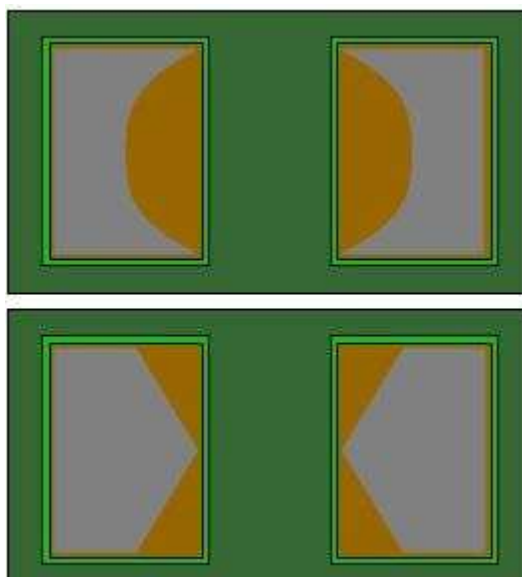
Jednou z častých příčin tombstone efektu je oxidace pájecí plošky nebo vývodu součástky. Zoxidovaná ploška nebo vývod se budou hůře smáčet než ploška nebo vývod s menším stupněm oxidace a opět zde bude docházet k nerovnováze sil.

Také přesnost osazení součástky má vliv na tvoření náhrobků. Pokud dojde k nepřesnému osazení součástky a součástka bude na jedné straně usazena menší plochou než na straně druhé, bude na této straně ploška defacto větší a budou zde tedy působit větší síly.

Vliv má samozřejmě i složení použité pasty a její chování během smáčení. A samozřejmě velký vliv má také přetavovací proces. Kritická je zejména fáze předehřevu. Pokud teplota bude růst příliš rychle, na různých místech DPS (v závislosti na designu) budou různé teploty a pravděpodobnost tvoření náhrobků bude větší. Nárůst teploty o 1 °C/s byl měl tvorbu náhrobku značně omezit. [26][27]

Také výpary z tavidla pájecí pasty, které se uvolňují během procesu přetavení, mohou způsobit zvednutí součástky. Uvolňované výpary působí směrem vzhůru silou, která působí zesponu na součástky a společně s jevy zmíněnými výše mohou zapříčinit tombstone efekt. I zde hraje velkou roli zvolený teplotní profil procesu pájení. Pokud bude náběh teploty příliš rychlý, může se stát, že složky tavidla se nestačí odpařit během fáze předehřevu. To by znamenalo, že k odpařování bude docházet i během fáze přetavení. Součástka se vlivem toho bude pohybovat nahoru a dolů podobně jako poklička na hrnci, ve kterém se vaří voda. [26][27]

Pokud bude na plošky DPS natisknuto příliš velké množství pasty, součástka pak může v roztavené pastě začít plavat. Tyto pohyby jsou nežádoucí a mohou způsobit rozdílné velké síly působící na vývody pájené součástky. I zde může design otvorů šablony pomoci odstranit tento defekt. Doporučené tvary otvorů šablony jsou „domácí meta“ a „U – tvar“ (viz obr. 51).



Obrázek 51: Doporučené tvary otvorů šablony [27]

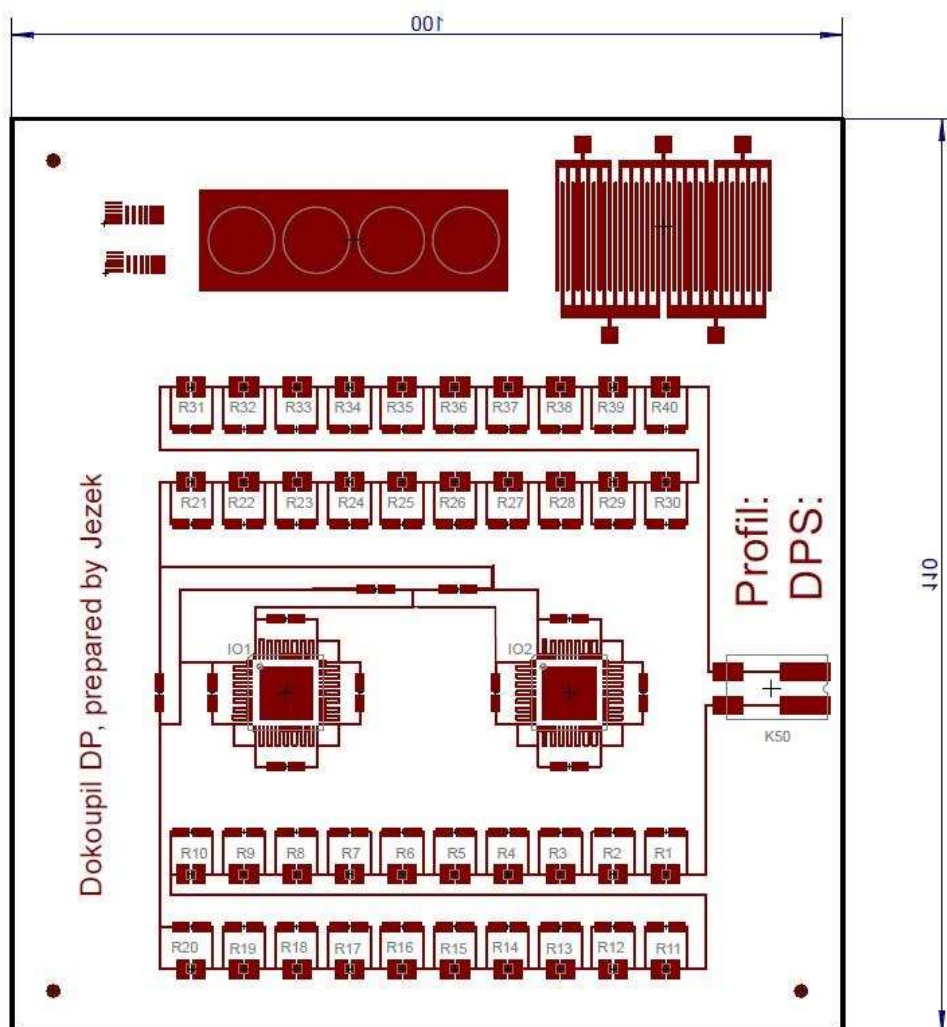
5 PRAKTICKÁ ČÁST

5.1 Testovací DPS

Pro účely testování byla použita DPS z diplomové práce [28]. Tato DPS obsahuje pro osazení 40 kusů SMD rezistorů v pouzdrech 0805, dvě QFN DUMMY pouzdra a možnost osadit SMD konektor značky Wago.

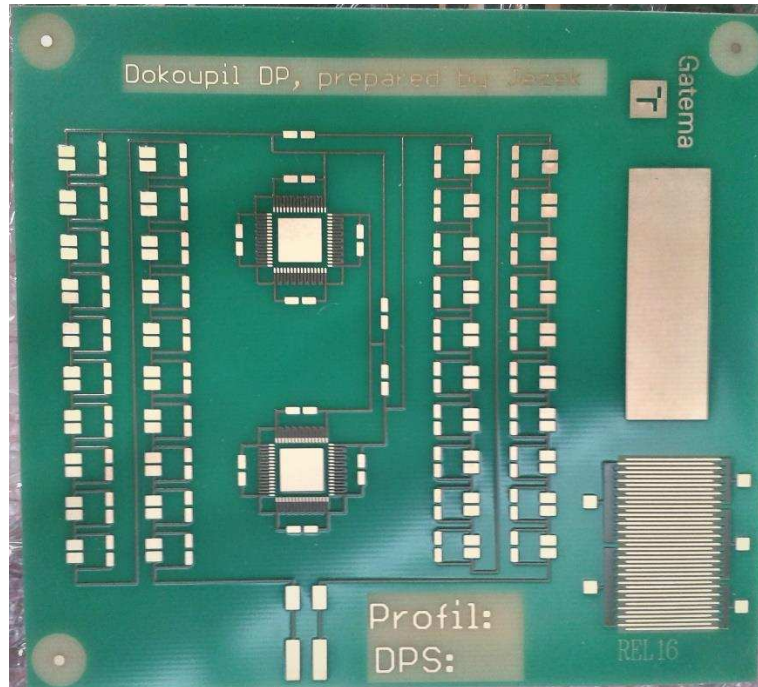
Rozměry testovací DPS jsou 100 x 110 mm. Rozměry pájecích plošek pro rezistory byly zvětšeny z 1,42 x 1,02 mm na 2,3 x 1,5 mm. Tato redukce byla provedena z důvodu eliminování delaminace plošky při zkoušce stříhem. Každý rezistor má také přidružené zkratovací plošky, které umožňují překlenout případnou poruchu součástky. [28]

Deska dále obsahuje kupón pro zkoušku roztékavosti pasty, motiv pro test sedavosti a motiv pro měření SIR. Motiv DPS lze vidět na obrázku 52.



Obrázek 52: Motiv testovací DPS [28]

Testovací DPS byly vyrobeny firmou Gatema. Byl použit základní materiál FR-4 (IS 400) s T_g 150 °C, který je oboustranně plátovaný měděnou fólií o tloušťce 18 μm , použita je zelená nepájitvá maska a povrchová úprava ENIG na všech kusech. Celkem bylo vyrobeno 32 kusů oboustranných DPS (obr. 53).



Obrázek 53: Neosazená DPS

5.2 Osazení a pájení

Osazení a zapájení testovacích desek proběhlo v brněnském výrobním závodě společnosti Honeywell. Nejprve byla na každou DPS laserem vypálena identifikační značka. Tisk pájecí pasty byl poté proveden zařízením MPM Momentum (obr. 54) přes šablonu o tloušťce 130 μm zhotovenou z nerezové oceli (motiv byl vyřezán laserem). Parametry tisku nebudou na přání společnosti Honeywell zveřejněny.

Na polovinu testovacích DPS byla natisknuta pasta, která je momentálně používána ve výrobě firmy Honeywell, na druhou polovinu potom zvažovaná náhrada. Obchodní názvy těchto pájecích past také nebudou na přání firmy Honeywell zveřejněny a nadále bude pro stávající pájecí pastu používáno označení „Pájecí pasta 1“ a pro zvažovanou náhradu „Pájecí pasta 2“. Tyto pasty se liší zejména obsahem stříbra. Teplota tání pájecí pasty 1 je 217 °C, pájecí pasty 2 je 208 °C.



Obrázek 54: MPM Momentum

Tisk pájecí pasty byl následně zkontrolován pomocí zařízení Koh Young KY 8030-3 (obr. 55).

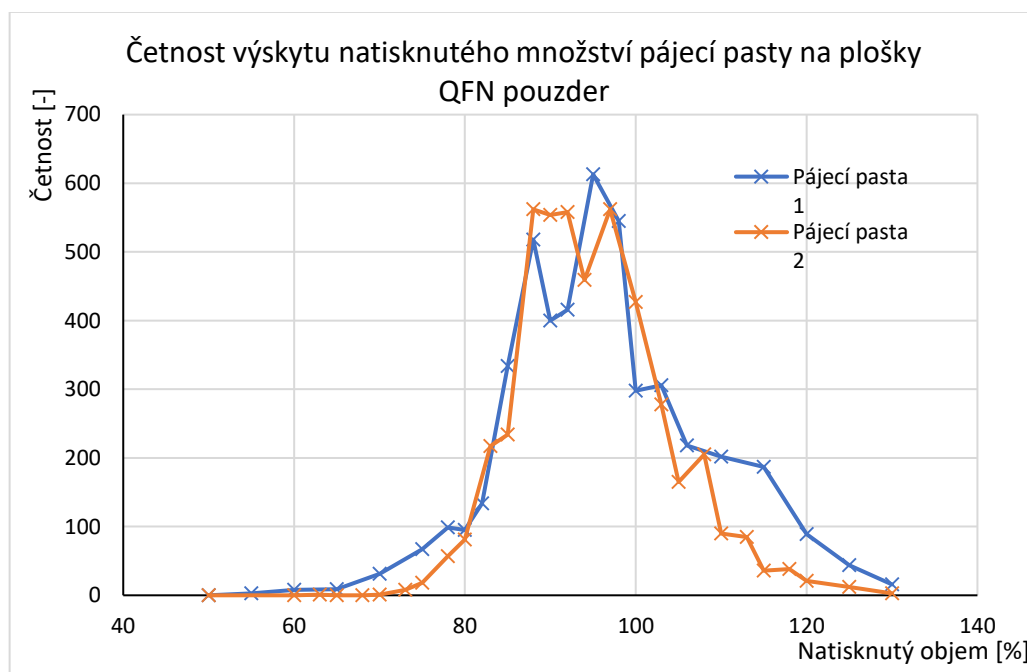


Obrázek 55: Koh Young KY 8030-3

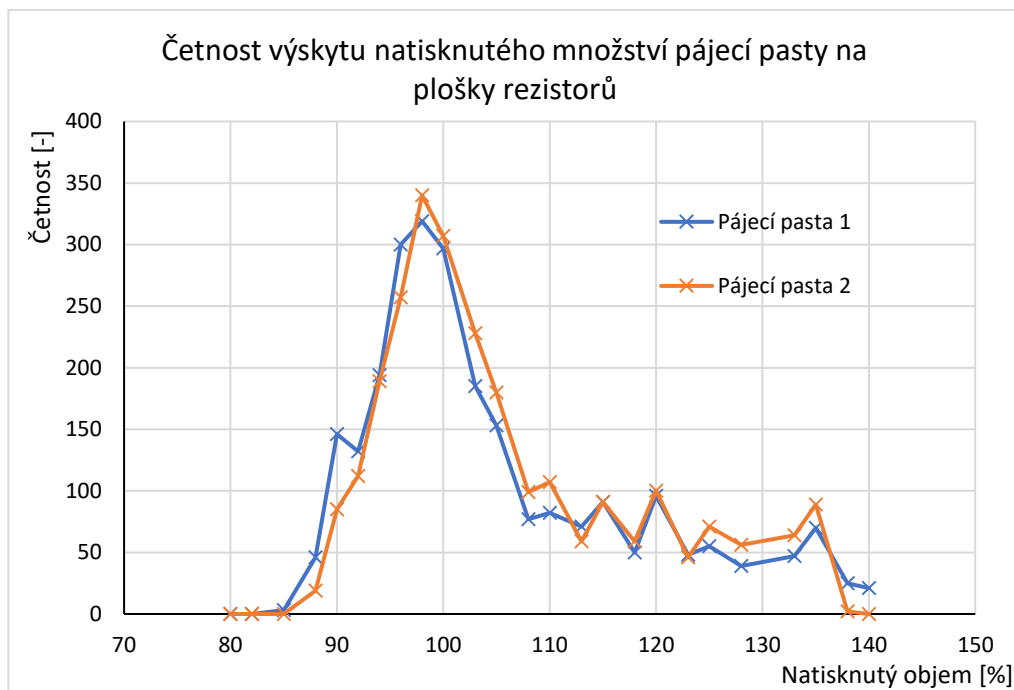
Každá z natištěných plošek byla pomocí SPI vyhodnocena z pohledu skutečného objemu natištěné pasty v porovnání s teoretickým množstvím. Výsledky SPI je možno vidět v tabulce 5. Na obrázcích 56 a 57 je možno vidět závislost poměru četností k celkovému počtu na množství natisknuté pasty na plošky pro pouzdra QFN a pro plošky pro rezistory. Z tabulky 5 a obrázků 56 a 57 je patrné, že pájecí pasta 2 dosahuje mírně lepší kvality tisku, než pájecí pasta 1. Na řadě rezistorů R11 – R12 (viz obr. 52) bylo také patrné výrazně větší množství natisknuté pasty než na ostatních rezistorech nezávisle na tištěné pastě. Jelikož se tato řada rezistorů nachází nejbližší okraji DPS, lze usuzovat, že přítlak těrky nebyl rovnoměrný nebo nebyla kontrolována paralelnost DPS a šablony.

	Pájecí pasta 1		Pájecí pasta 2	
	QFN	R	QFN	R
Minimum	53,51	80,86	60,98	82,64
Maximum	139,88	141,04	128,93	134,97
Průměr	93,80	101,21	93,47	101,79
Směrodatná odchylka	10,32	12,41	8,44	11,46

Tabulka 5: Výsledky SPI



Obrázek 56: Četnost výskytu natisknutého množství pájecí pasty na plošky QFN pouzder



Obrázek 57: Četnost výskytu natisknutého množství pájecí pasty na plošky rezistorů

Osazení součástek potom proběhlo na osazovacím automatu Siemens Siplace X4 (obr. 58). Výrobce udává rychlost osazování je až 112 500 součástek za hodinu. Automat umožňuje osazovat součástky až do velikosti pouzdra 01005. [29]



Obrázek 58: Siemens Siplace X4

Osazeny byly pouze nulové rezistory 0805 typ CRCW08050000Z0EA od firmy Vishay, které mají niklové terminály, na nichž je vrstva cínu, která zaručuje kompatibilitu s bezolovnatými pájkami. [33]

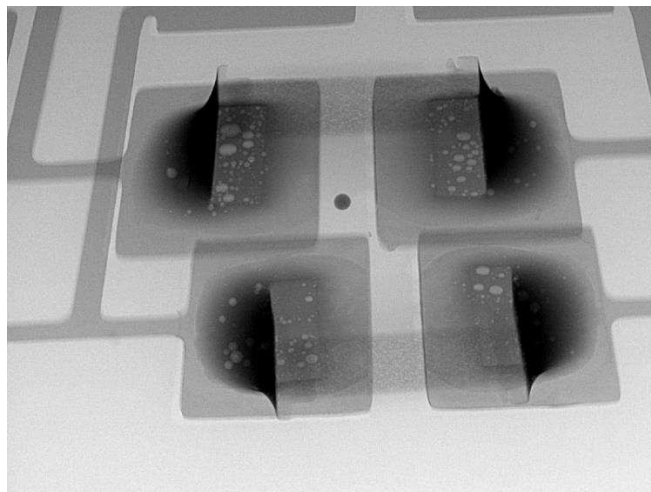
Pájení proběhlo v přetavovací peci Heller 1812EXL (obr. 59). Jedná se o pec, která má 12 vytápěcích zón a 2 zóny chladicí. [30]



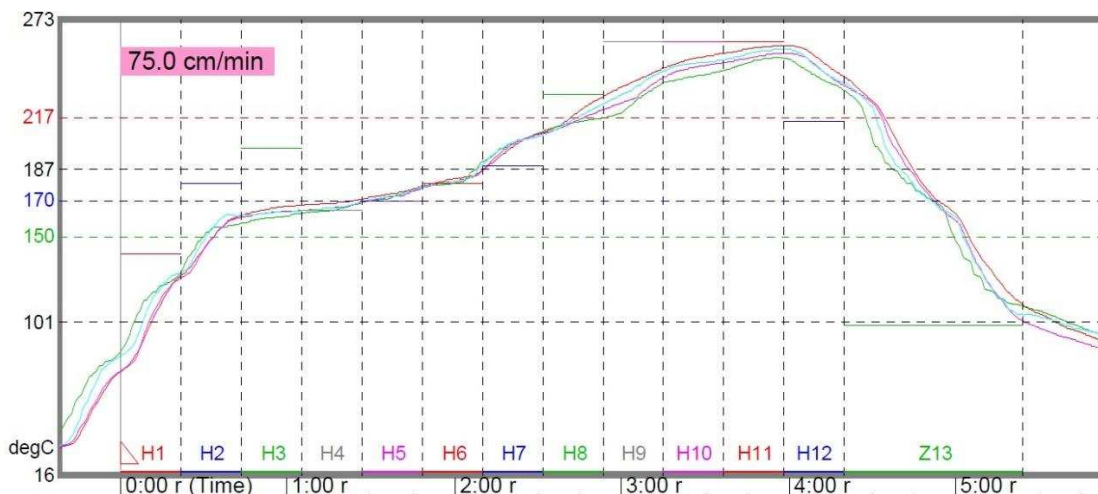
Obrázek 59: Heller 1812EXL

Na obrázku 61 je zobrazen teplotní profil 1 (pomalý), který odpovídá doporučením výrobce pájecí pasty. Doba nad liquidem pájecí pasty 1 byla 95 s (doporučení výrobce mezi 30-90 sekundami), maximální dosažená teplota 257,8 °C (doporučení výrobce 250 °C). Lze tedy vidět, že nastavený profil se neshoduje s doporučením výrobce, což ale bylo zapříčiněno zaseknutím měřící DPS v prostoru pece. Na obrázku 62 je potom zobrazen teplotní profil 2 (rychlý), kde byla zvýšena rychlost dopravníku ze 75 cm/min na 120 cm/min. TAL pájecí pasty 2 byla 66 s. Maximální dosažená teplota byla 238,3 °C. Doporučená nastavení byla stejná jako u pájecí pasty 1 a byla zde tedy shoda s doporučením výrobce.

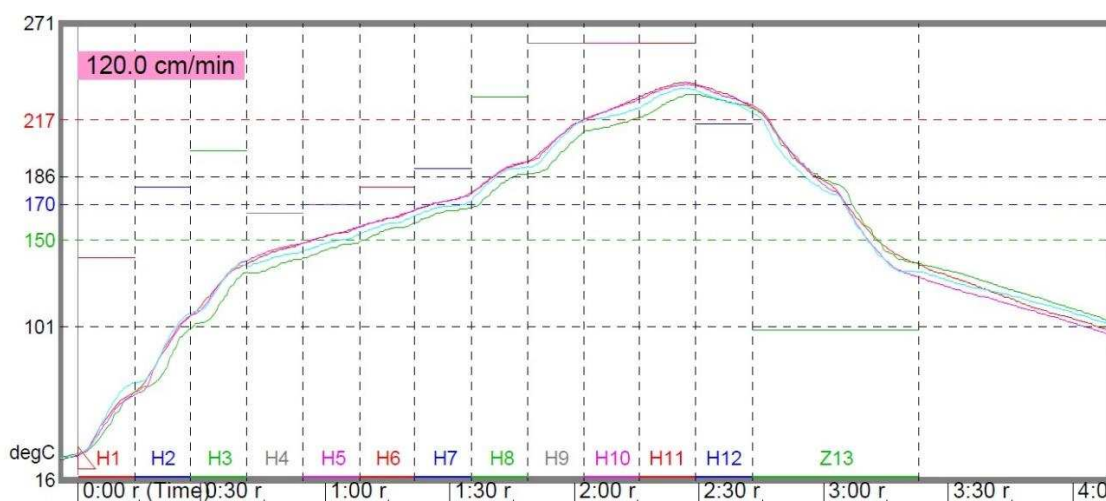
Po zapájení součástek nebyly na první pohled zjištěny žádné defekty, ovšem při kontrole za pomoci rentgenu byly pod pouzdry rezistorů objeveny kuličky pájky (obr. 60). Tyto kuličky se vyskytovaly u obou pájecích past při použitém rychlém teplotním profilu (teplotní profil 2).



Obrázek 60: Kulička pájky uvězněná pod pouzdrům rezistoru



Obrázek 61: Teplotní profil 1 (pomalý)

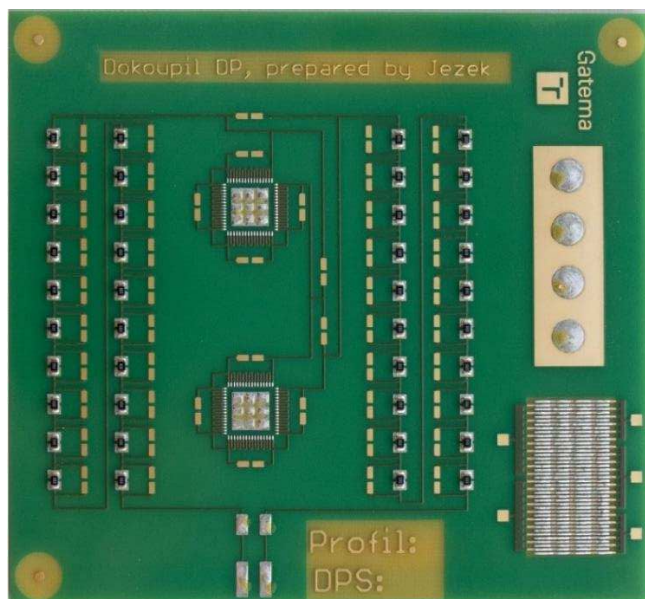


Obrázek 62: Teplotní profil 2 (rychlý)

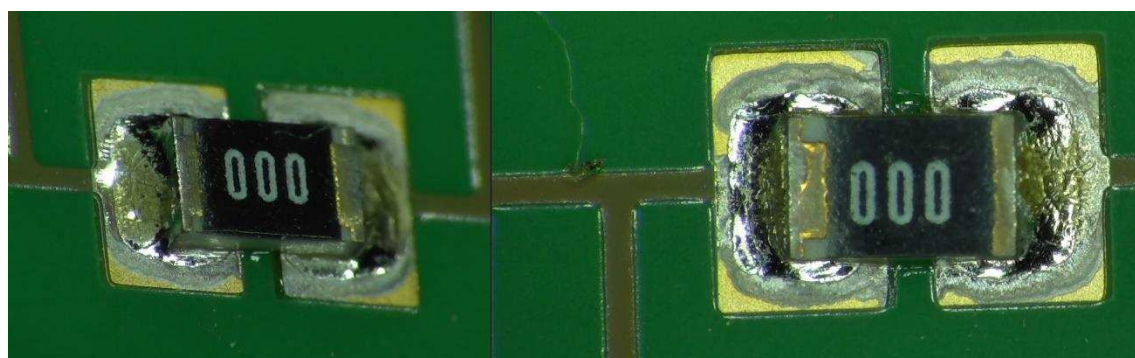
Na obrázku 63 potom lze vidět osazenou a zapájenou DPS.

Na obrázku 64 je detail zapájených součástek pájecí pastou 1 pomocí pomalého teplotního profilu (teplotní profil 1). Spoj je hladký a lesklý, nedošlo k roztečení pájecí pasty po celém povrchu pájecích plošek. Druhý průchod přetavovací pecí vzhled spoje neovlivnil.

Na obrázku 65 se nachází detail zapájených součástek pájecí pastou 1 pomocí rychlého teplotního profilu. Spoj je hladký ale matný. Roztečení pájecí pasty po povrchu pájecích plošek je větší, než bylo u pomalého teplotního profilu. Při druhém průchodu přetavovací pecí došlo k úplnému roztečení pájecí pasty po povrchu pájecích plošek. Pájecí pasta 1 zanechává poměrně velké množství tavidlových zbytků.



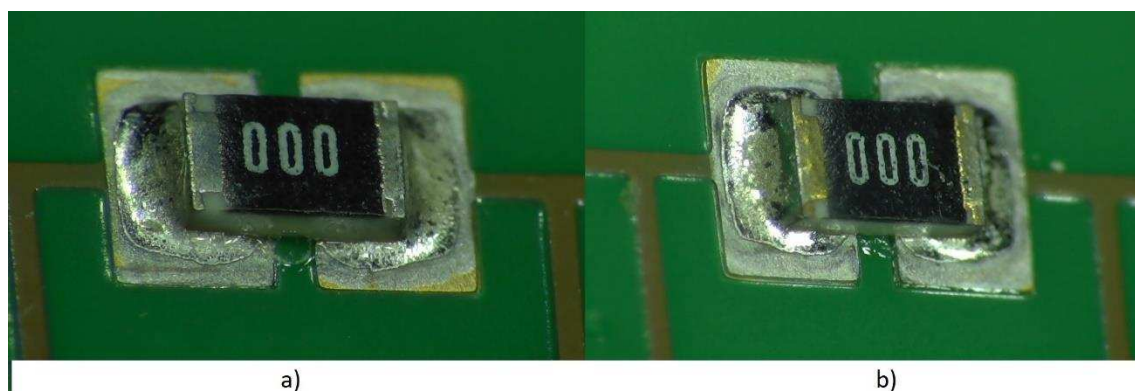
Obrázek 63: Osazená DPS



a)

b)

Obrázek 64: Součástky zapájené pájecí pastou 1, pomalý teplotní profil a) jeden průchod pecí, b) dva průchody pecí



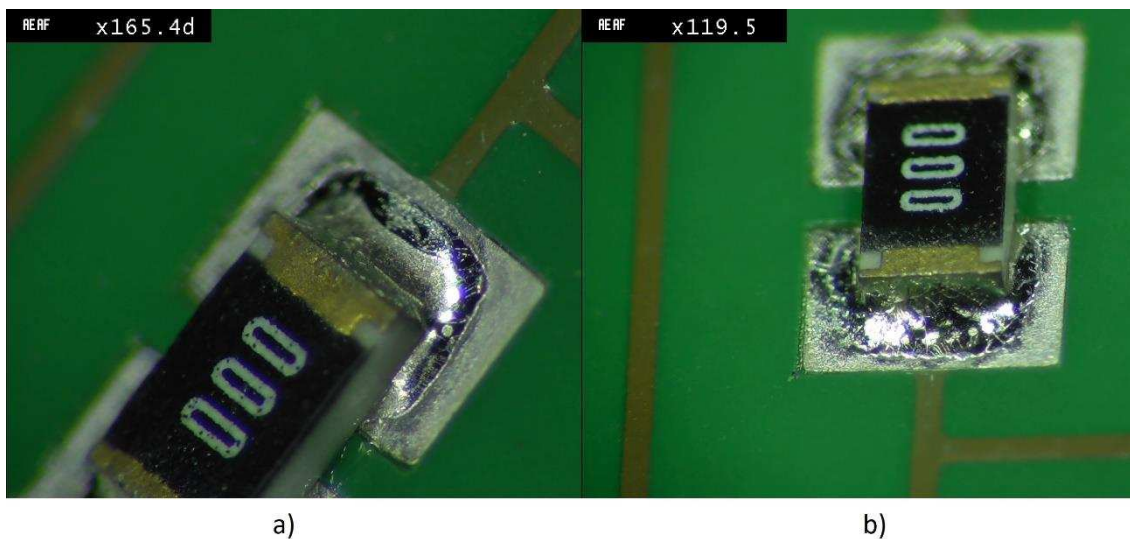
a)

b)

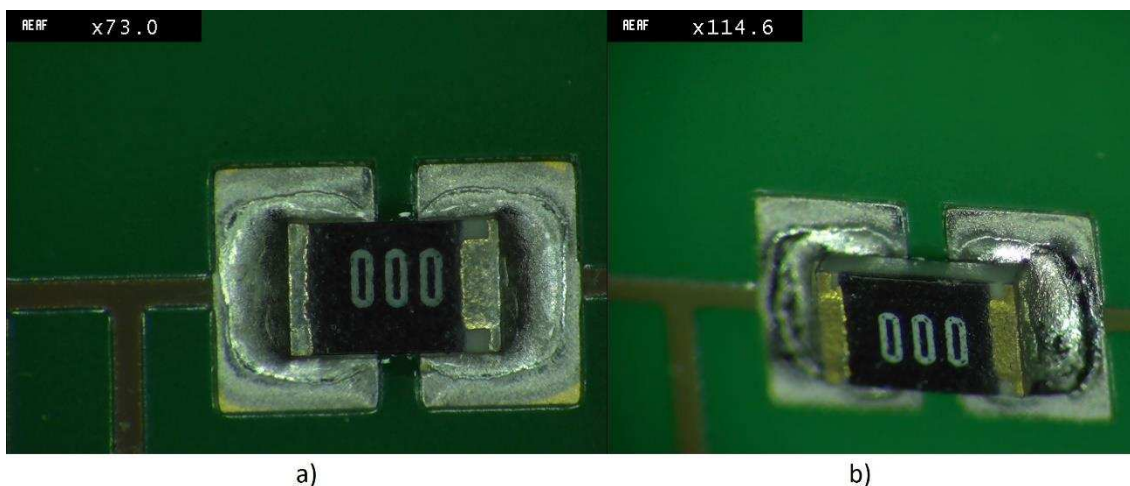
Obrázek 65: Součástky zapájené pájecí pastou 1, rychlý teplotní profil a) jeden průchod pecí, b) dva průchody pecí

Na obrázku 66 je detail zapájených součástek pájecí pastou 2 pomocí pomalého teplotního profilu. Povrch spoje je lesklý a zrnitý. Došlo u úplnému roztečení pájecí pasty po povrchu pájecích plošek. Druhý průchod přetavovací pecí vzhled spoje neovlivnil.

A konečně na obrázku 67 je detail zapájených součástek pájecí pastou 2 pomocí rychlého teplotního profilu. Povrch spoje je zrnitý a matný. Pájecí pasta není zcela roztečena po povrchu pájecích plošek, což se změnilo po druhém průchodu vzorků přetavovací pecí. Pájecí pasta 2 zanechává výrazně méně tavidlových zbytků, než pájecí pasta 1. To nejspíše bude způsobeno rozdílným složením tavidel zmíněných past, konkrétně tedy přítomností halidů v tavidle pájecí pasty 2.



Obrázek 66: Součástky zapájené pájecí pastou 2, pomalý teplotní profil a) jeden průchod pecí, b) dva průchody pecí



Obrázek 67: Součástky zapájené pájecí pastou 2, rychlý teplotní profil a) jeden průchod pecí, b) dva průchody pecí

5.3 Rozdělení vzorků

Jak bylo uvedeno výše, celkem bylo zhotoveno 32 kusů oboustranných testovacích DPS. U 16 DPS byla použita pájecí pasta 1 a jsou značeny jako SACxx (xx znamená číslo vzorku). U zbylých 16 DPS byla použita pájecí pasta 2 a jsou značeny jako RELxx (xx znamená číslo vzorku). Ta strana DPS, na které je vypáleno číslo vzorku, prodělala jeden průchod přetavovací pecí, strana bez čísla prodělala průchody dva. Rozdělení vzorků do jednotlivých testů obsahuje tabulka 6. Popis a výsledky jednotlivých testů jsou rozebrány níže.

	Číslo DPS	Necyklované vzorky		Cyklování dle IPC-SM-785			Cyklování dle JESD22-A104D		
		Test roztékavosti	Mikrovýbrus	Měření elektrického odporu	Zkouška střihem	Mikrovýbrus	Měření elektrického odporu	Zkouška střihem	Mikrovýbrus
1 profil Teplotní (pomalý)	SAC01	ANO	-	-	-	-	-	ANO	-
	SAC02	ANO	-	-	-	-	ANO	-	ANO
	SAC03	ANO	-	-	-	-	ANO	-	-
	SAC04	ANO	-	-	-	-	ANO	-	-
	SAC05	ANO	ANO	-	-	-	-	-	-
	SAC06	ANO	-	ANO	ANO	ANO	-	-	-
	SAC07	ANO	-	ANO	-	-	-	-	-
	SAC08	ANO	-	ANO	-	-	-	-	-
Teplotní profil 2 (rychlý)	SAC09	ANO	-	-	-	-	-	ANO	-
	SAC10	ANO	-	-	-	-	ANO	-	ANO
	SAC11	ANO	-	-	-	-	ANO	-	-
	SAC12	ANO	-	-	-	-	ANO	-	-
	SAC13	ANO	ANO	-	-	-	-	-	-
	SAC14	ANO	-	ANO	ANO	ANO	-	-	-
	SAC15	ANO	-	ANO	-	-	-	-	-
	SAC16	ANO	-	ANO	-	-	-	-	-
	Číslo DPS	Necyklované vzorky		Cyklování dle IPC-SM-785			Cyklování dle JESD22-A104D		
		Test roztékavosti	Mikrovýbrus	Měření elektrického odporu	Zkouška střihem	Mikrovýbrus	Měření elektrického odporu	Zkouška střihem	Mikrovýbrus
1 profil Teplotní (pomalý)	REL01	ANO	-	-	-	-	-	ANO	-
	REL02	ANO	-	-	-	-	ANO	-	ANO
	REL03	ANO	-	-	-	-	ANO	-	-
	REL04	ANO	-	-	-	-	ANO	-	-
	REL05	ANO	ANO	-	-	-	-	-	-
	REL06	ANO	-	ANO	ANO	ANO	-	-	-
	REL07	ANO	-	ANO	-	-	-	-	-
	REL08	ANO	-	ANO	-	-	-	-	-
Teplotní profil 2 (rychlý)	REL09	ANO	-	-	-	-	-	ANO	-
	REL10	ANO	-	-	-	-	ANO	-	ANO
	REL11	ANO	-	-	-	-	ANO	-	-
	REL12	ANO	-	-	-	-	ANO	-	-
	REL13	ANO	ANO	-	-	-	-	-	-
	REL14	ANO	-	ANO	ANO	ANO	-	-	-
	REL15	ANO	-	ANO	-	-	-	-	-
	REL16	ANO	-	ANO	-	-	-	-	-

Tabulka 6: Rozdělení vzorků dle testů

5.4 Test roztékavosti

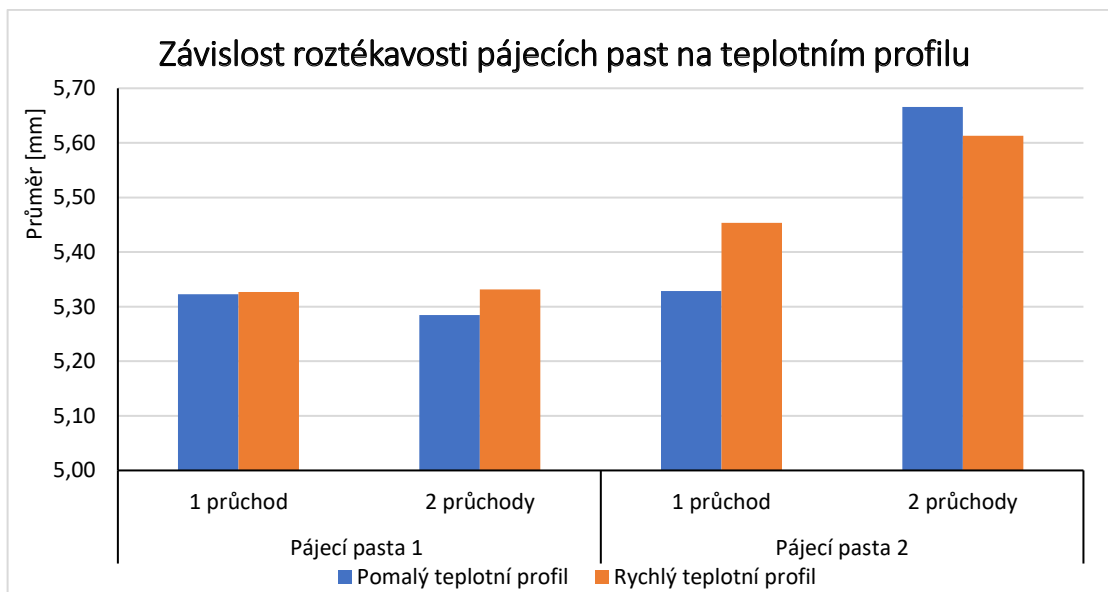
Test roztékavosti pájecí pasty probíhal přímo na testovacích DPS, které obsahují kupón o velikosti 37 x 12 mm. Na tento kupón byly následně (společně s motivem DPS) natištěny čtyři kotouče o průměru 5 mm. Tento test byl proveden dle normy IPC-TM-650 čísla 2.4.45. [38]

Pomocí optického mikroskopu Olympus SZ61 byl poté změřen průměr kotoučů po pájení přetavením. Výsledky pro jednotlivé teplotní profily a pájecí pasty je možno vidět v tabulce 7.

Test roztékavosti pájecích past [mm]				
	Pájecí pasta 1		Pájecí pasta 2	
	1 průchod	2 průchody	1 průchod	2 průchody
Pomalý teplotní profil	5,32	5,28	5,33	5,67
Rychlý teplotní profil	5,33	5,33	5,45	5,61

Tabulka 7: Výsledky testu roztékavosti

Na obrázku 68 lze potom tyto výsledky vidět v grafické podobě. Je patrné, že roztékavost pájecí pasty 1 je jen minimálně závislá na teplotním profilu a počtu průchodů přetavovací peci. Roztékavost této pájecí pasty byla ovšem po druhém průchodu menší než po prvním průchodu. Došlo tady tedy k jistému odsmáčení. Pájecí pasta 2 při pomalém teplotním profilu (teplotní profil 1) a jednom průchodu vykazuje stejnou roztékavost jako pájecí pasta 1. Při druhém průchodu roztékavost pasty vzrostla o 6 %. Roztékavost v tomto případě byla nejvyšší ze všech sledovaných kombinací. V případě rychlého teplotního profilu (teplotní profil 2) byla roztékavost pasty po prvním průchodu o 2 % vyšší než při pomalém teplotním profilu. Po druhém průchodu vzrostla roztékavost oproti prvnímu průchodu o 3 %, ale nepřekročila hranici, která byla u pomalého teplotního profilu. Toto chování pájecí pasty 2 není úplně standardní a pro jeho pochopení by bylo potřeba další zkoumání, které ale není v rozsahu této práce. Zatím se zdá, že toto chování zapříčiňuje kombinace použité slitiny a použitého tavidla v pastě.

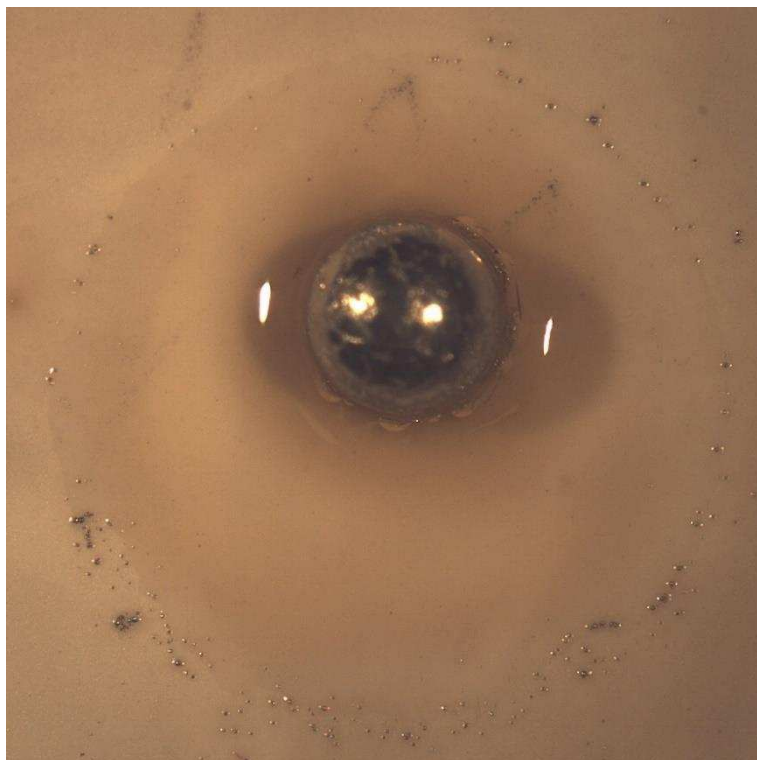


Obrázek 68: Závislost roztékavosti pájecích past na teplotním profilu

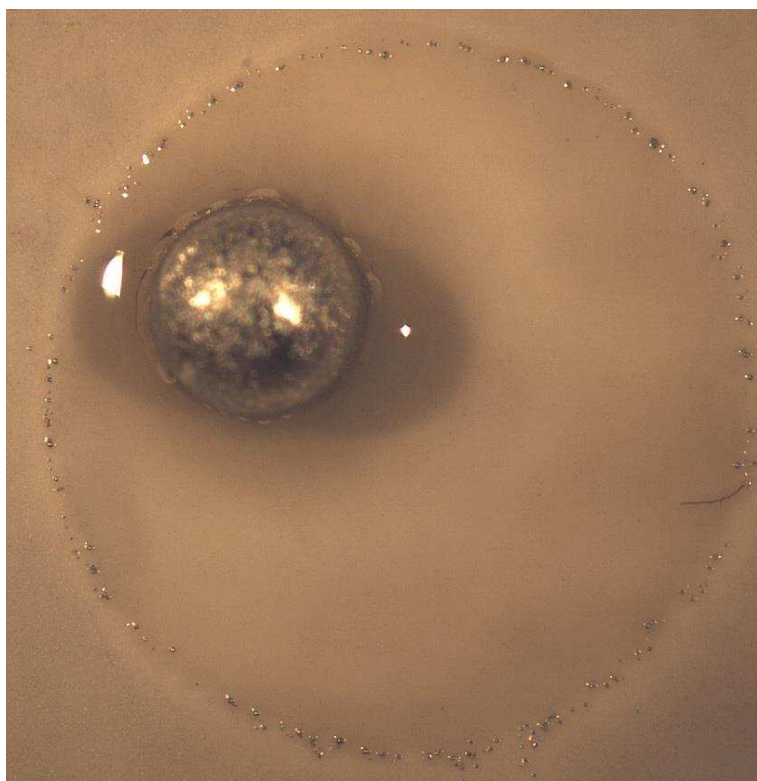
5.5 Solder ball test

Tento test byl proveden na základě normy IPC-TM-650 číslo 2.4.43. [31] Na keramickou destičku byly přes nerezovou šablonu o tloušťce 200 μm natištěny 4 kruhové plochy pájecí pasty o průměru 6 mm. Následně bylo provedeno přetavení pájecí pasty a pomocí optického mikroskopu bylo vyhodnoceno rozmístění a velikost satelitů (sekundární kuličky pájky, které se nachází v okolí primární kuličky). Tento test byl pro obě pájecí pasty proveden celkem čtyřikrát.

Kritéria přijatelnosti výše zmíněné normy splňují obě pájecí pasty. Sekundární kuličky tvoří pouze prstence na okrajích tavidlových zbytků, netvoří žádné větší shluky. Je ale třeba zmínit, že pájecí pasta 2 tvoří satelitů znatelně více. Na obrázku 69 je možno vidět nejhorší výsledek testu u pájecí pasty 1, na obrázku 70 potom nejhorší výsledek u pájecí pasty 2.



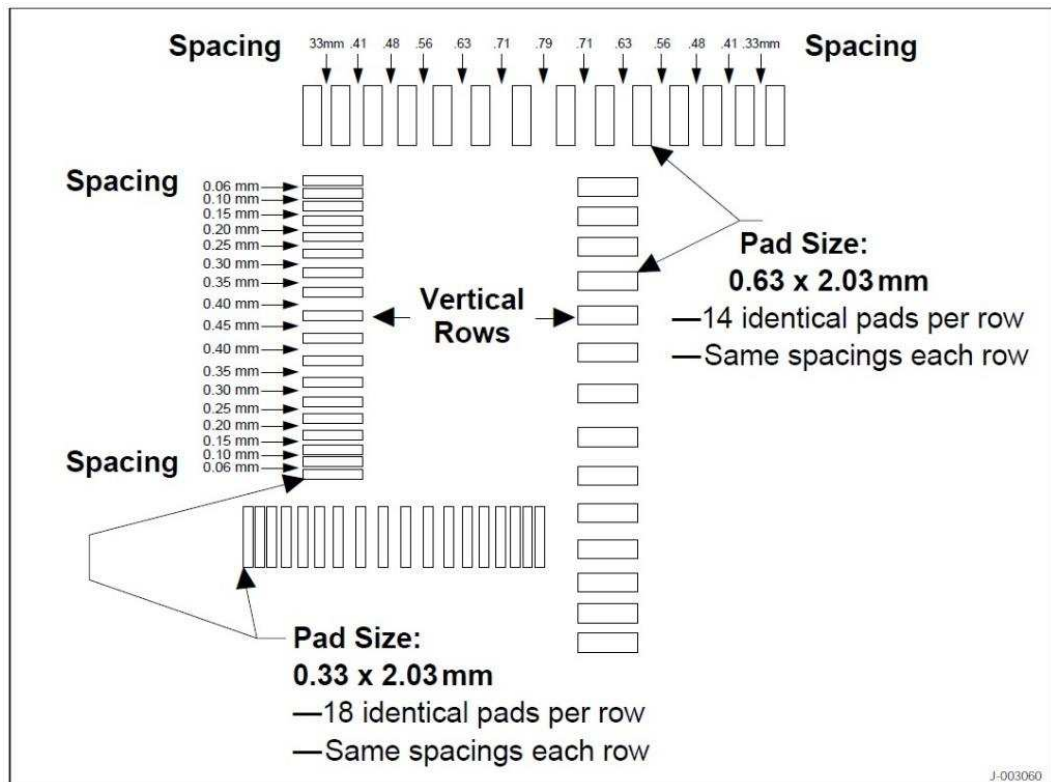
Obrázek 69: Nejhorší výsledek solder ball testu u pájecí pasty 1



Obrázek 70: Nejhorší výsledek solder ball testu u pájecí pasty 2

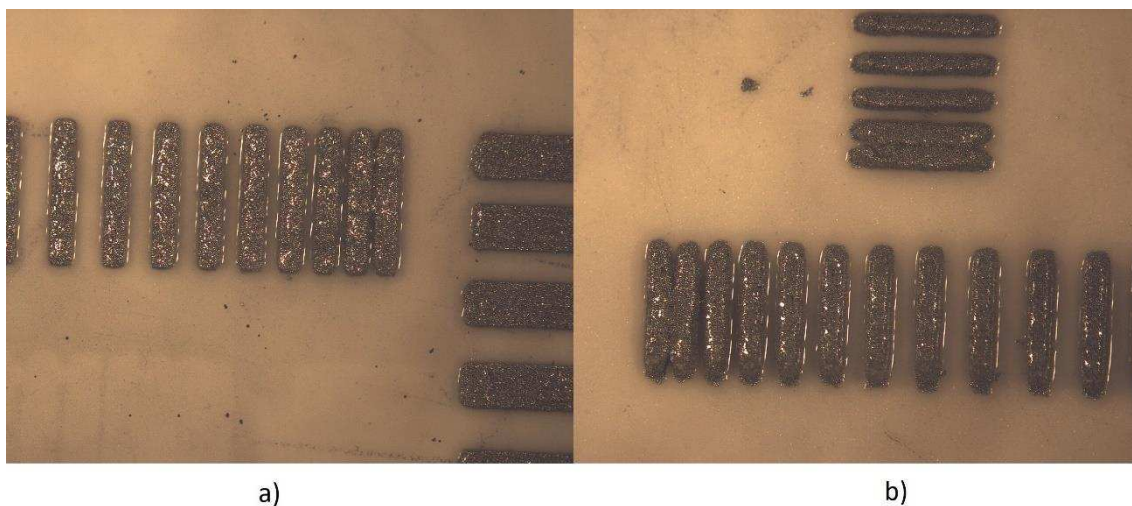
5.6 Sedání pájecí pasty za studena (cold slump test)

Test byl proveden na základě normy IPC-TM-650 číslo 2.4.35. [32] Proveďte se nátisk pájecí pasty na keramickou destičku přes nerezové šablony o tloušťce 100 a 200 μm . Nerezové šablony mají motiv IPC-A-21 (obr. 71). Natisknutá pasta se poté nechá 15 ± 5 minut odstát při pokojové teplotě a poté se provede vizuální vyhodnocení případných vzniklých můstků mezi jednotlivými ploškami natištěné pájecí pasty. Tento test byl pro každou pájecí pastu a pro obě tloušťky šablon zopakován třikrát.

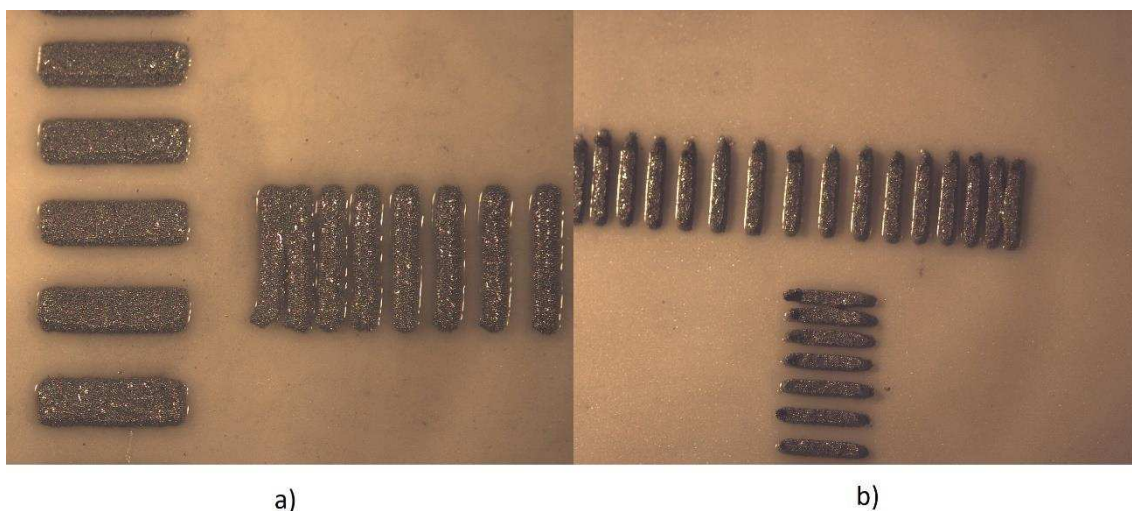


Obrázek 71: Šablona pro slump test IPC-A-21 [32]

Výsledky tohoto testu jsou pro pájecí pastu 1 i pro pájecí pastu 2 totožné. U obou pájecích past docházelo k tvorbě můstků mezi natisknutými ploškami o velikosti 0,33 x 2,03 mm s nejmenší mezerou, tj. 0,06 mm. Tyto výsledky byly stejné pro obě tloušťky testovacích šablon. Na obrázku 72 je uveden příklad výsledků slump test pro pájecí pastu 1, na obrázku 73 pro pájecí pastu 2.



Obrázek 72: Cold slump test pájecí pasty 1 a) šablona o tloušťce 100 µm, b) šablona o tloušťce 200 µm

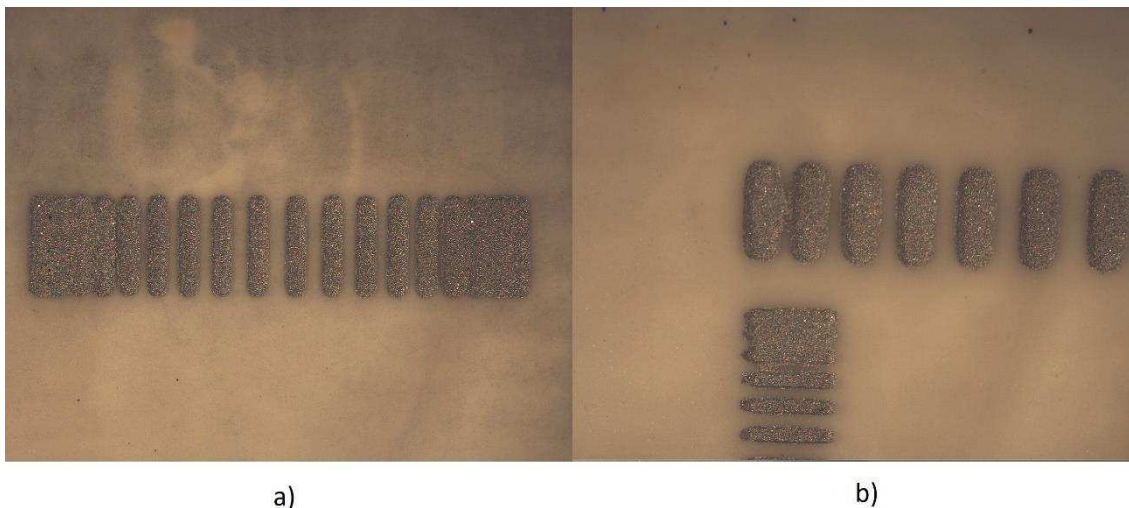


Obrázek 73: Cold slump test pájecí pasty 2 a) šablona o tloušťce 100 µm, b) šablona o tloušťce 200 µm

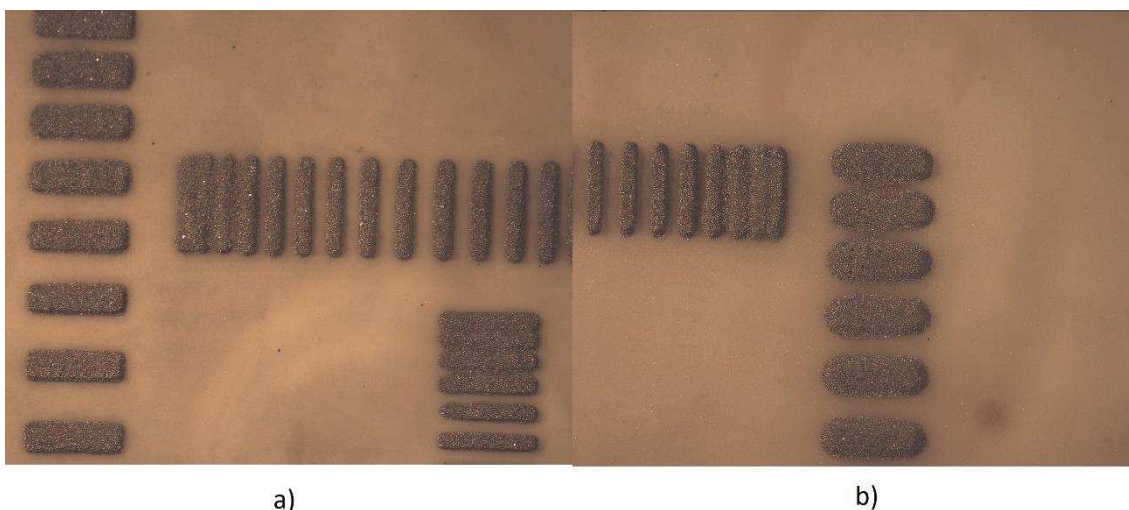
5.7 Sedání pájecí pasty za tepla (hot slump test)

Tento test také vychází z normy IPC-TM-610 čísla 2.3.35 a postup při tomto testu je téměř totožný jako postup při cold slump testu. Rozdíl spočívá v tom, že natisknutá pájecí pasta se nechá odstát při teplotě 150 °C (umístí se na vyhřívací destičku nebo do pece).

Výsledky tohoto testu jsou opět pro obě pájecí pasty totožné, ale dopadly hůře než výsledky cold slump testu. Pasta natisknutá přes 100µm šablonu tvořila můstky mezi více ploškami (plošky s rozměry 0,33 x 2,03 mm), jak je vidět na obrázcích 74 a 75. Po tisku přes 200µm šablonu docházelo i k sesuvu u plošek o velikosti 0,63 x 2,03 mm (viz obrázek 74 a 75).



Obrázek 74: Hot slump test pájecí pasty 1 a) šablona o tloušťce 100 μm , b) šablona o tloušťce 200 μm



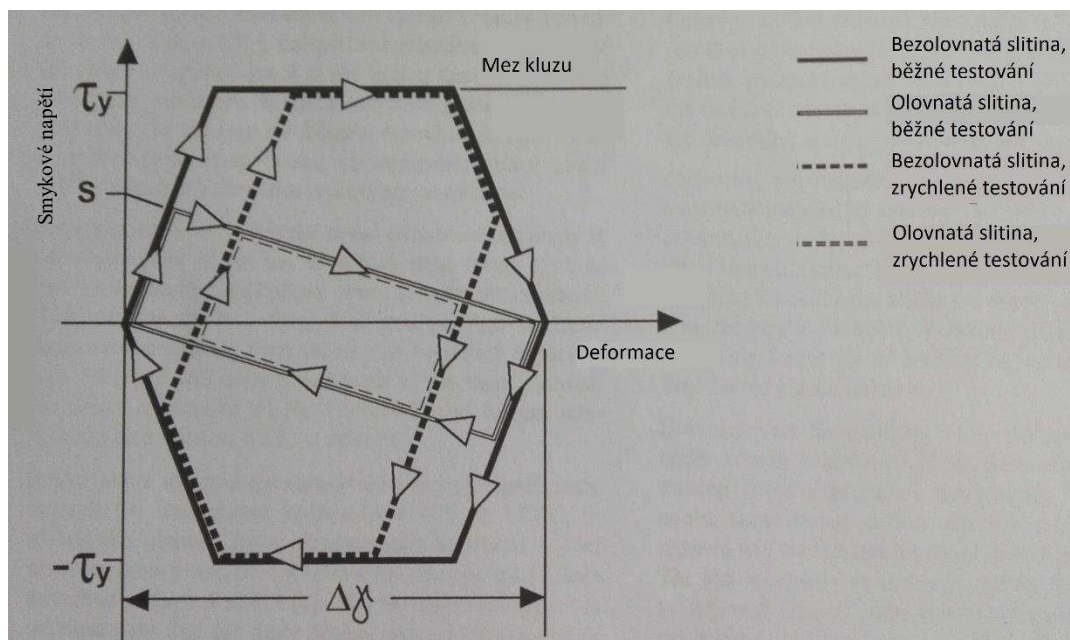
Obrázek 75: Hot slump test pájecí pasty 1 a) šablona o tloušťce 100 μm , b) šablona o tloušťce 200 μm

5.8 Zrychlené teplotní cyklování

Primárním mechanismem poškození při teplotním cyklování je namáhání pájeného spoje, které je způsobené cyklickými změnami teploty. Na obrázku 76 je možno vidět průběh visko-plastické deformační energie, která je proporcionálně reprezentovaná oblastí hysterezní smyčky v diagramu závislosti smykového napětí na deformaci (způsobené poměrným prodloužením) vztahené k jednomu cyklu. Tato visko-plastická deformační energie způsobuje únavové namáhání, které se vzrůstajícím počtem cyklů narůstá. Pájený spoj nejprve prochází elastickou deformací, která je následována plastickou deformací, pokud namáhání pokračuje nad mez kluzu pájky. Je třeba poznamenat, že pro pájku není hodnota meze kluzu přesně definována, jelikož tato hodnota je silně závislá na teplotě, zatížení, složení a struktuře pájky. Je třeba si také uvědomit, že některé z těchto parametrů

je možné ovlivnit (například teplotu) a jiné ne (struktura pájky).

Po zhruba 25 až 50 % únavové životnosti pájeného spoje dochází k vytváření mikro voidů, které během cyklování přerůstají v mikrotrhliny. Tyto mikrotrhliny dále rostou a splývají s dalšími mikrotrhlinami, a nakonec vytváří trhlinu, která způsobí selhání pájeného spoje.



Obrázek 76: Závislost smykového napětí na deformaci [34]

Jak je dále naznačeno na obrázku 76, plocha hysterezní smyčky zrychleného testování neodpovídá ploše hysterezní smyčky pro běžné testování. Plocha této smyčky je menší, což znamená, že během jednoho cyklu při zrychleném testování dochází k menšímu namáhání pájeného spoje, tedy počet cyklů během zrychleného testování není ekvivalentní k počtu cyklů během běžného testování. [34]

5.8.1 Zrychlené teplotní cyklování dle IPC-SM-785

Tento test probíhal v inkubátoru FRIOCELL 55 od Brněnské Medicínské Techniky (obr. 77). Teplotní rozsah tohoto zařízení je od 0 °C do 100 °C. Dle normy IPC-SM-785 [34] byly vzorky v této komoře testovány jako kategorie spotřební elektroniky. Dle této normy byla spodní hranice teploty nastavena na 25 °C, horní hranice na 100 °C. Doba temperování na obou těchto hranicích byla nastavena na 7 minut. Na inkubátoru byl nastaven program časově neomezeného teplotního cyklování s maximální možnou rychlostí změny mezi hraničními teplotami. Délka takto nastaveného cyklu byla 2 hodiny a 1 minuta. Dle normy odpovídá 320 cyklů jednomu roku používání.

Dle normy je porucha definována jako prasklina, která se táhne celým průřezem pájeného spoje a části pájeného spoje již nejsou vzájemně propojeny. Tato porucha se typicky neprojevuje na elektrickém odporu pájeného spoje nebo se projeví jen velmi nepatrným zvýšením elektrického odporu. Spoj sice je prasklý, ale mezi prasklými částmi je stále elektrický kontakt způsobený tlakem součástky, která je stále připájená na druhé straně (pokud se bude jednat například o rezistor). Elektricky se prasklý spoj projeví

během působení mechanického namáhání (například vibrace), kdy dojde k oddálení prasklých částí na velmi krátký časový úsek, během něhož vzroste elektrický odpor nad hranici 300 Ω . [34] Vzorky cyklované podle této normy prodělaly celkem 333, cyklů což zhruba odpovídá jednomu roku a 2 týdnům v provozu.



Obrázek 77: Inkubátor FRIOCELL 55

5.8.2 Zrychlené teplotní cyklování dle JESD22-A104D

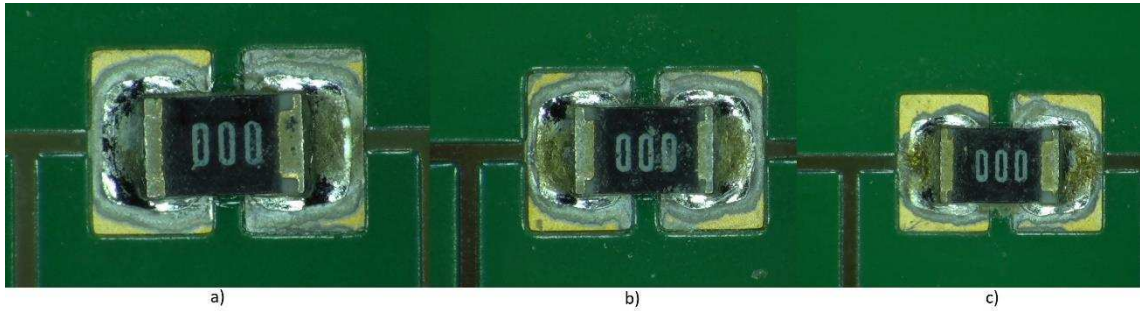
Toto testování probíhalo v klimatické zkušební komoře WEISS WK 340/70 (obr. 78) ve společnosti Honeywell. Teplotní rozsah této komory je od -70 °C do 180 °C. Tento test probíhal dle normy JESD22-A104D [35]. Teploty pro tento test byly nastaveny dle kategorie „G“, tedy spodní hranice byla nastavena na -40 °C, horní hranice na +125 °C. Doba temperování na obou těchto teplotách byla nastavena na 5 minut. Stejně jako u testování dle normy IPC-SM-785 byl nastaven program časově neomezeného teplotního cyklování s maximální možnou rychlostí změny mezi hraničními teplotami. Délka jednoho cyklu tedy byla 2 hodiny a 2 minuty. Vzorky testované dle této normy celkem prodělaly 304 cyklů. Odpovídající dobu v běžném provozu norma neuvádí. Stejně tak kritéria pro poruchu nejsou dle normy přesně stanovena.



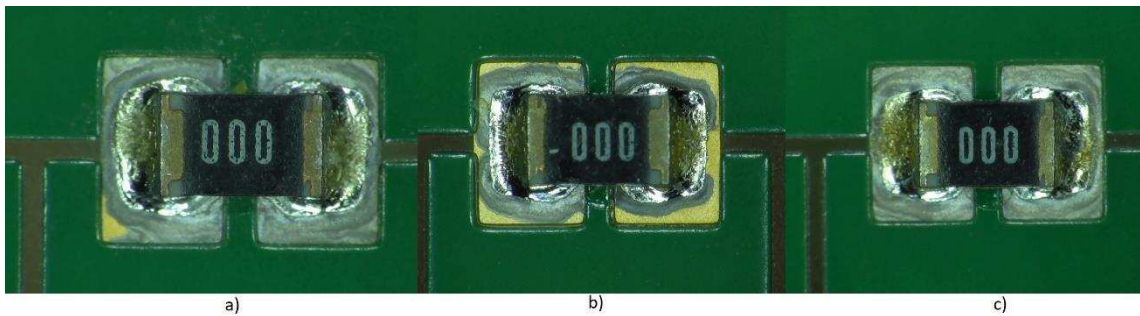
Obrázek 78: Klimatická zkušební komora WEISS WK 340/70

5.8.3 Srovnání vzorků po zrychleném teplotním cyklování

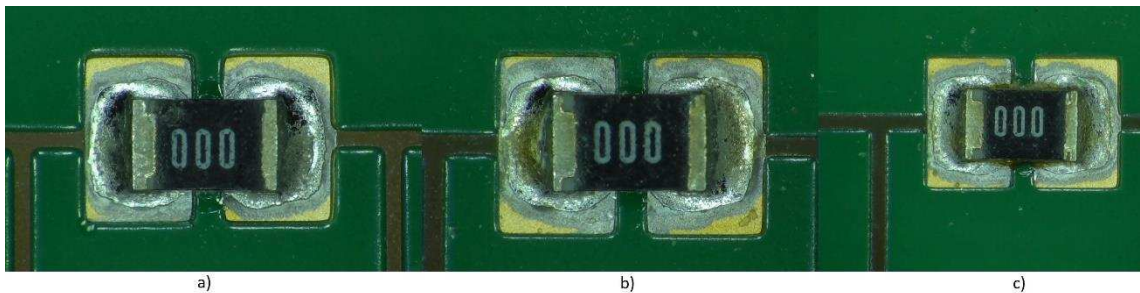
Na obrázcích 79–86 lze vidět změny na površích pájených spojů před a po zrychleném teplotním cyklování pro jednotlivé kombinace použité pájecí pasty, teplotního profilu a počtu průchodů pecí. Nebyly zjištěny žádné změny ve struktuře nebo integritě pájených spojů, pouze došlo k degeneraci tavidlových zbytků. Degenerace byla bez výjimky nejhorší po testování dle normy JESD22-A104D. Jelikož pájecí pasta 1 zanechala po pájení více tavidlových zbytků, byla na vzorcích zapájených touto pastou degenerace tavidlových zbytků více výrazná.



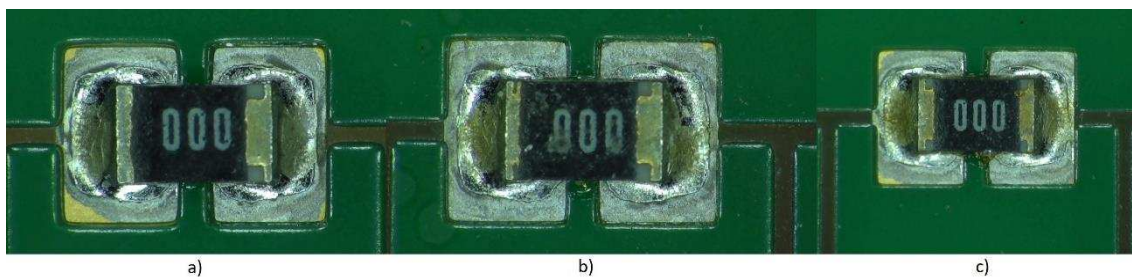
Obrázek 79: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, pomalým profilem, jeden průchod pecí
a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D



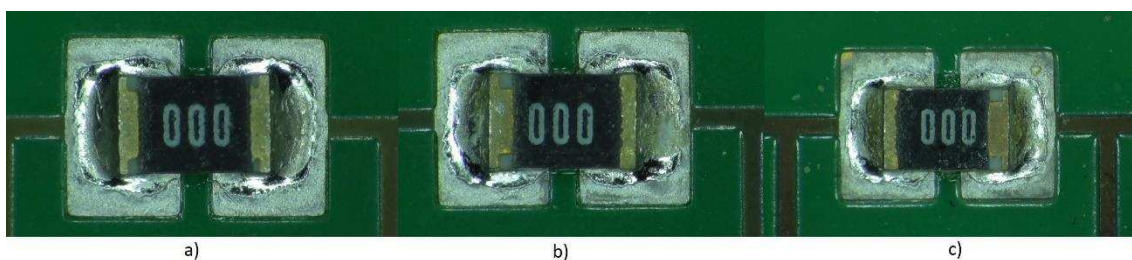
Obrázek 80: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, pomalým profilem, dva průchody pecí
a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D



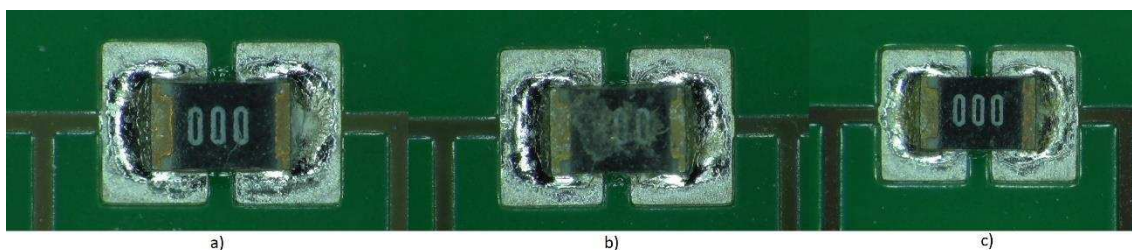
Obrázek 81: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, pomalým profilem, jeden průchod pecí
a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D



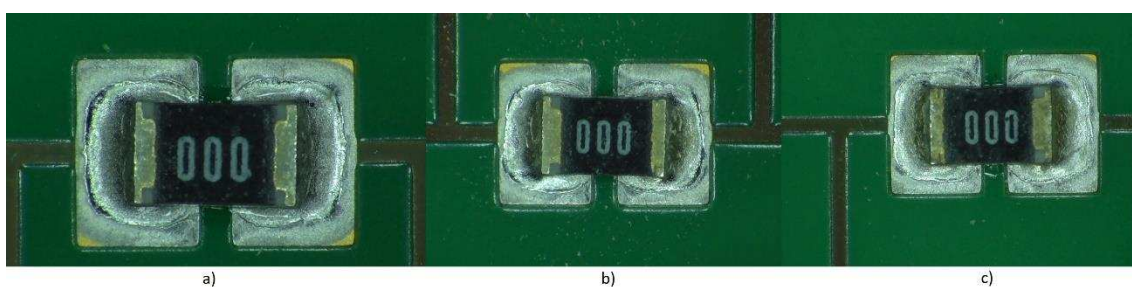
Obrázek 82: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, pomalým profilem, dva průchody pecí
 a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D



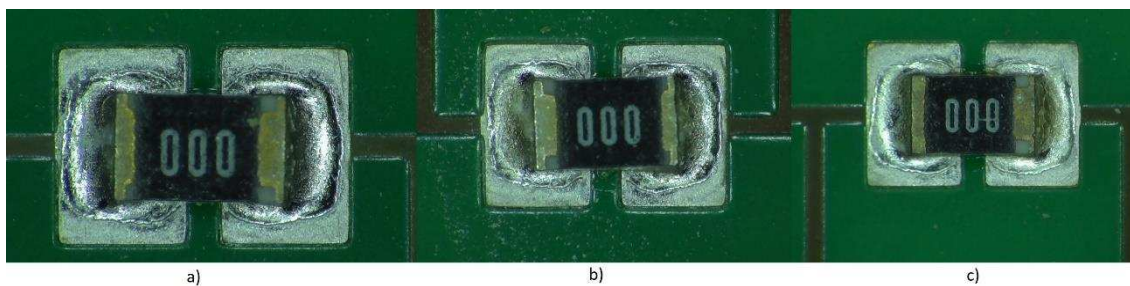
Obrázek 83: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, rychlým profilem, jeden průchod pecí
 a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D



Obrázek 84: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, rychlým profilem, dva průchody pecí
 a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D



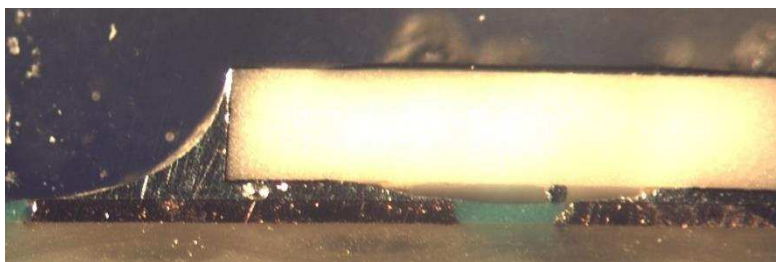
Obrázek 85: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, rychlým profilem, jeden průchod pecí
 a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D



Obrázek 86: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, rychlým profilem, dva průchody pecí
 a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D

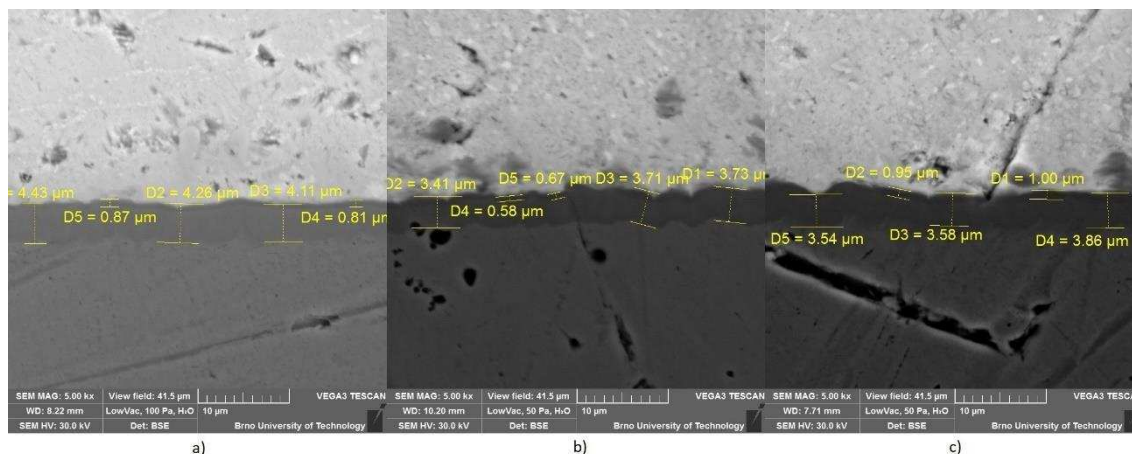
5.9 Vyhodnocení IMC vrstvy

Ze všech kombinací necyklovaných i cyklovaných vzorků byly zhotoveny mikrovýbrusy, které následně byly vyhodnoceny enviromentálním rastrovacím elektronovým mikroskopem Tescan VEGA3 XM. Příklad zhotoveného mikrovýbrusu je možno vidět na obrázku 87, kde je pod pouzdrém rezistoru vidět uvězněná kulička pájky (defekt typu solder bead).

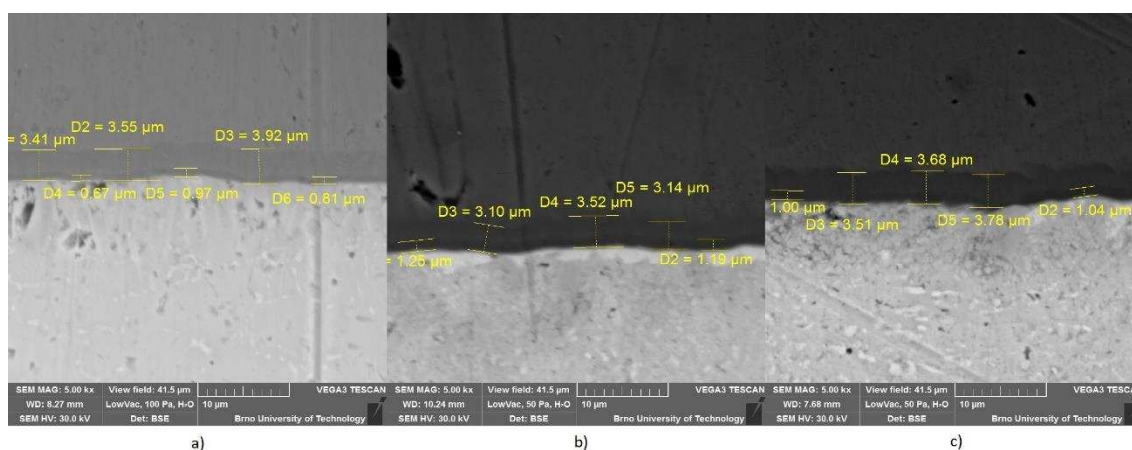


Obrázek 87: Příklad mikrovýbrusu

Na obrázcích níže se nachází srovnání výsledků změřených pomocí elektronového mikroskopu. Vyznačeny jsou tloušťky intermetalických vrstev, kde by se podle [1] mělo jednat o ternární IMC $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$, jejíž rozměry se pohybují od 0,4 do 1,3 μm a nachází se mezi vrstvou představující pájecí slitinu (nejsvětlejší část) a vrstvou povrchové úpravy ENIG. Rozměry povrchové úpravy jsou vyznačeny rovněž a dosahují rozměru od 3,4 do 5 μm . Jak bude řečeno níže, tato vrstva vykazovala zajímavé chování, jež mohlo ovlivnit pevnost a elektrický odpor spoje.



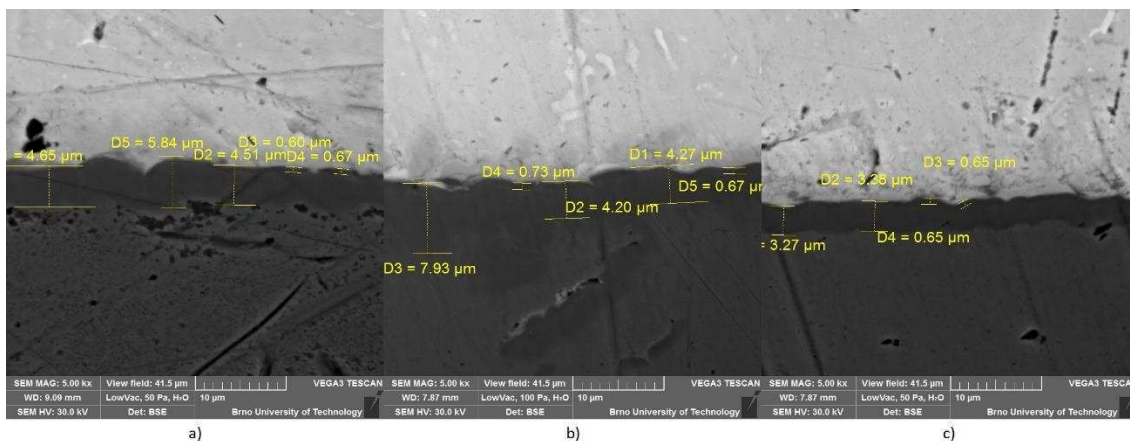
Obrázek 88: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, pomalým profilem, jeden průchod pecí
 a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D



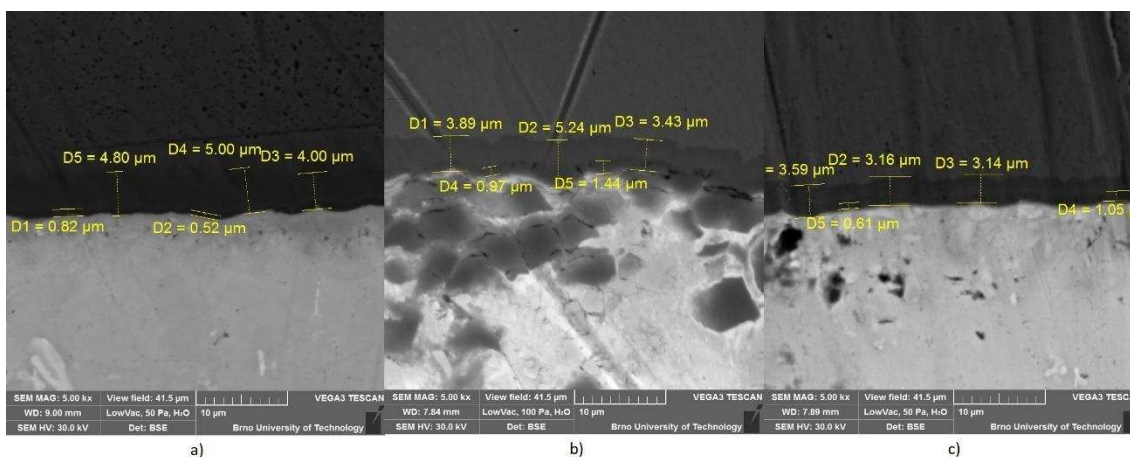
Obrázek 89: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, pomalým profilem, dva průchody pecí
 a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D

U vzorků zapájených pájecí pastou 1, pomalým profilem při jednom průchodu pecí byla již tloušťka IMC vrstvy poměrně velká, ale během následného cyklování vzrostla pouze o zhruba 15 % (obr. 88). Rapidnější nárůst byl ale zaznamenán u vzorků, které prošly pecí dvakrát (obr. 89). Zde byla tloušťka IMC vrstvy mírně vyšší už u necyklovaných vzorků, ale nárůst po teplotním cyklování dle normy IPC-SM-785 činí 25 %. Ovšem nárůst po teplotním cyklování dle normy JESD22-A104D byl mnohem menší, pouze okolo 10 %.

Situace při použití pájecí pasty 2 a pomalého teplotního profilu je odlišná. Při jednom průchodu vzorků pecí (obr. 90) je tloušťka IMC menší, než tomu bylo u pájecí pasty 1 a během stárnutí vzrostla pouze o několik jednotek procent. Při druhém průchodu (obr. 91) IMC vrstva vzrostla opět již u necyklovaných vzorků, ale její tloušťka byla menší, než při použití pájecí pasty 1. Po cyklování dle normy IPC došlo k nárůstu vrstvy až o 150 %, po cyklování dle normy JESD byl nárůst až 100 %. Při cyklování dle IPC normy nastala poměrně velká difuze niklu z povrchové úpravy do pájeného spoje.



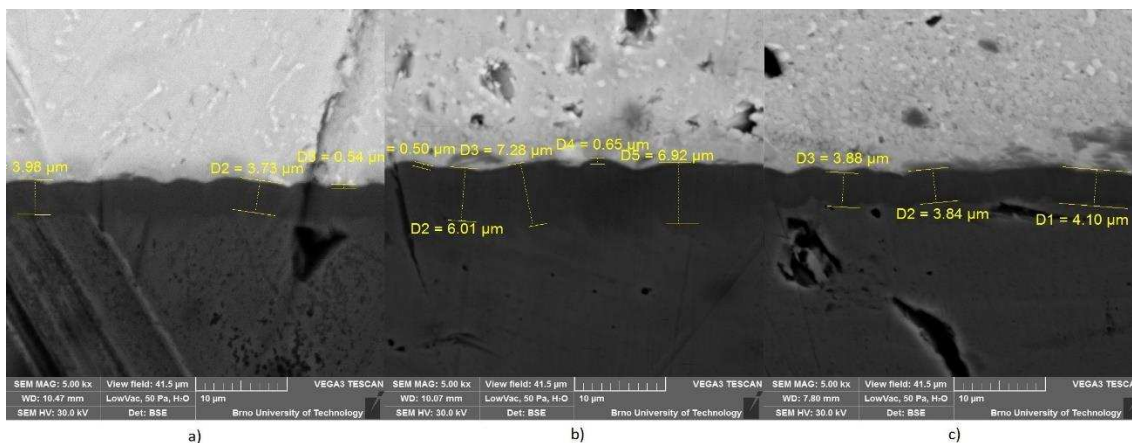
Obrázek 90: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, pomalým profilem, jeden průchod pecí
 a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D



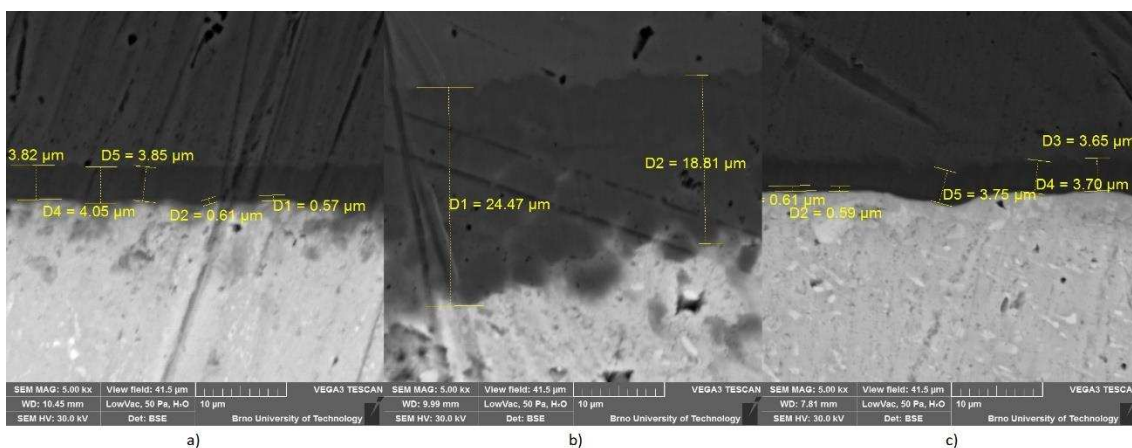
Obrázek 91: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, pomalým profilem, dva průchody pecí
 a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D

Při použití rychlého pájecího profilu, pájecí pasty 1 a jednoho průchodu pecí byla tloušťka IMC vrstvy nižší, než tloušťka IMC vrstvy při pomalém pájecím profilu zhruba o 40 % a dále během cyklování téměř nerostla (obr. 92).

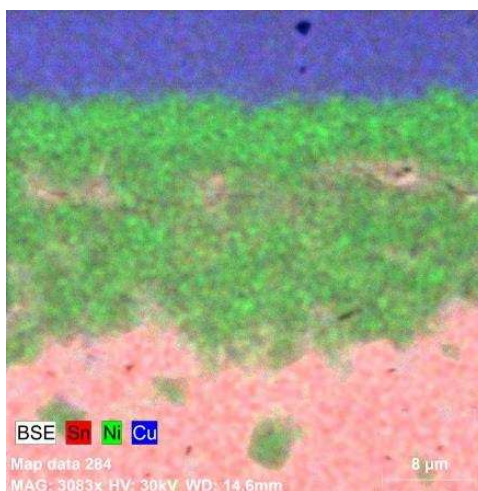
Při druhém průchodu pecí (obr. 93) došlo u necyklovaných vzorků jen k nepatrnému nárůstu tloušťky IMC vrstvy. Po cyklování dle normy JESD nedošlo k dalšímu nárůstu IMC vrstvy. Po cyklování dle normy IPC není IMC vrstva vůbec patrná, ale došlo zde k masivní difuzi niklu z povrchové úpravy do pájeného spoje, podobně jako tomu bylo u pájecí pasty 2, která byla zapájena pomalým profilem (obr. 91). Tento jev byl potvrzen prvkovou analýzou, jejíž výsledky jsou na obrázku 93. Tato difuzní vrstva byla dobře viditelná i optickým mikroskopem (obr. 95).



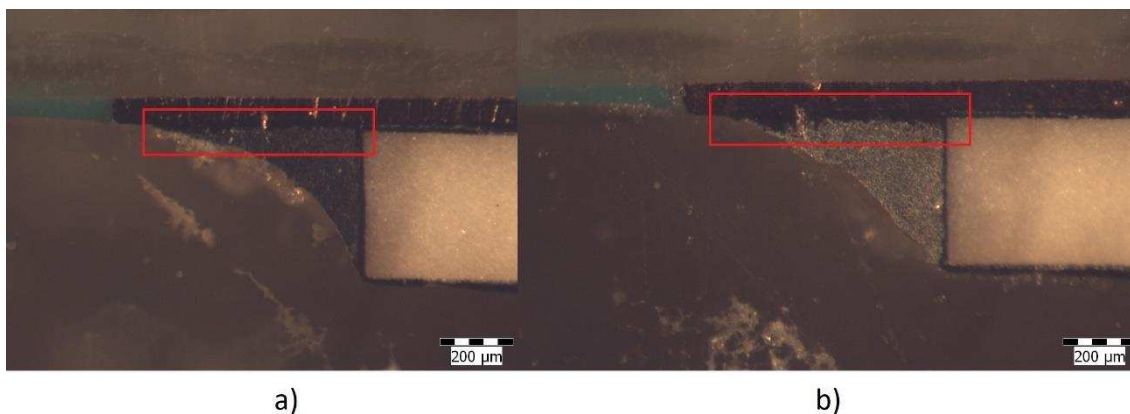
Obrázek 92: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, rychlým profilem, jeden průchod pecí
 a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D



Obrázek 93: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, rychlým profilem, dva průchody pecí
 a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D



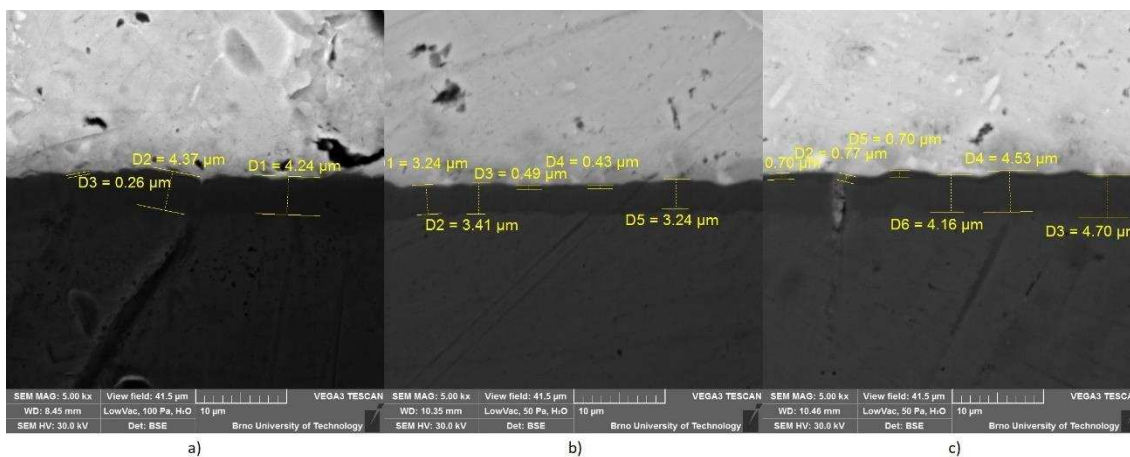
Obrázek 94: Materiálový obraz vzorku zapájeného pájecí pastou 1, rychlým teplotním profilem, dva průchody pecí



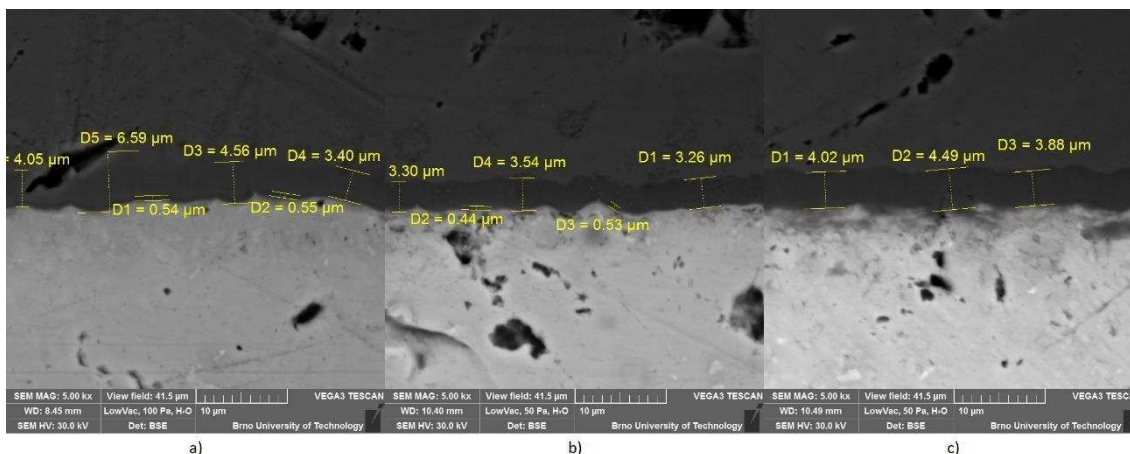
Obrázek 95: Růst difuzní vrstvy po teplotním cyklování dle normy IPC-SM-785 a) pájecí pasta 2, pomalý teplotní profil, 2 průchody, b) pájecí pasta 1, rychlý teplotní profil, dva průchody

U vzorků zapájených pájecí pastou 2, rychlým teplotním profilem a které prošly pecí jednou (obr. 96) byla IMC vrstva nejmenší ze všech testovaných vzorků, její tloušťka byla poloviční při porovnání s pomalým teplotním profilem. Nárůst vrstvy byl po cyklování dle normy IPC až 100 %, po cyklování dle normy JESD až 200 %. Toto byl také jediný případ, kdy tloušťka IMC vrstvy byla po cyklování dle normy JESD vyšší než po cyklování dle normy IPC.

U vzorků, které prodělaly dva průchody přetavovací pecí (obr. 97), byla u necyklovaných vzorků IMC vrstva zhruba o 100 % větší, ale během cyklování docházelo k jejímu minimálnímu nárůstu.



Obrázek 96: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, rychlým profilem, jeden průchod pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D



Obrázek 97: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, rychlým profilem, dva průchody pecí
a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D

Potvrdil se tedy předpoklad, že tloušťka IMC vrstvy je závislá na době procesu a pro pomalý teplotní profil je tato vrstva větší než pro krátký. S tím tedy souvisí i počet průchodů pecí, kdy u vzorků, které prošly pecí jednou byla, tloušťka IMC vrstvy nižší než u vzorků, které prošly pecí dvakrát. Toto chování vysvětlují rovnice 3 a 4, které jsou uvedeny níže.

Dále bylo zjištěno, že pájecí pasta 2 tvoří s povrchovou úpravou ENIG menší IMC vrstvy než pájecí pasta 1. Toto bude dáno rozdílným složením slitin pájky obou past.

Z pohledu zvolených testů dopadly výsledky z hlediska tloušťky IMC vrstvy po cyklování dle normy IPC-SM-785 hůře než po cyklování dle normy JESD22-A104D, kdy docházelo k poměrně enormnímu růstu difuzní vrstvy niklu v pájeném spoji. Toto může být vysvětleno Arrheniovou rovnicí pro součinitel difuze:

$$D = D_0 * e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (3)$$

kde: D_0 – difuzní koeficient [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
 Q – aktivační energie růstu IMC [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]
 R – plynová konstanta 8,314 [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 T – teplota [K]

Potom tloušťka difuzní vrstvy:

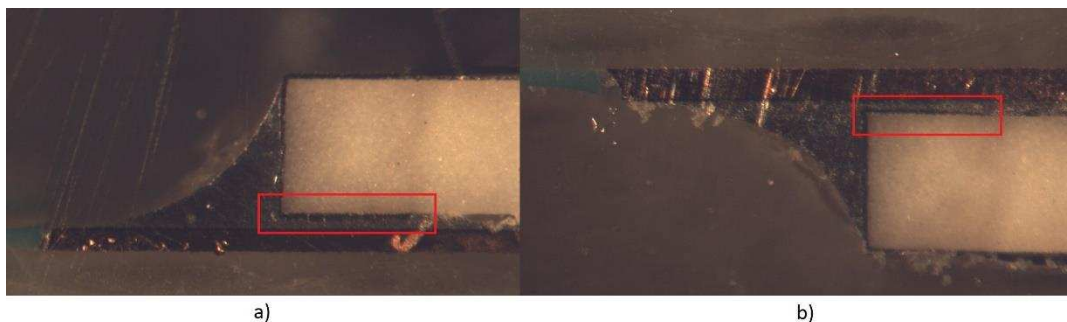
$$Z_0 = \sqrt{Dt} \quad (4)$$

kde: Z_0 – tloušťka IMC vrstvy [m]
 D – součinitel difuze [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
 T – čas [s]

Jak je patrné z rovnice 1, roste součinitel difuze D exponenciálně se zvyšující se teplotou. Cyklování dle normy IPC-SM-785 probíhá pouze za teplot, které jsou vyšší než pokojová teplota, což tedy růst difuzní vrstvy předpovídá. Cyklování dle normy JESD22-A104D ale probíhá v intervalu od -40 do +125 °C, kde jeden cyklus trval 2 hodiny a 2

minuty. Lze se tedy domnívat, že díky relativně krátké době cyklu a faktu, že za teplot, které se nachází pod bodem mrazu bude difuze probíhat výrazně pomaleji, nenacházely se testované vzorky dostatečně dlouhou dobu v intervalu kladných teplot, aby mohla být pozorována difuze niklu z povrchové úpravy do pájeného spoje. Tento mechanismus probíhal také na rozhraní pájka–poniklovaný terminál rezistoru.

Dalším pozorovaným mechanismem byl, nezávisle na použitém teplotním profilu, větší růst difuzní vrstvy z poniklovaných terminálů rezistorů u vzorků, které prošly pecí jednou než u vzorků, které prodělaly průchody dva, při použití pájecí pasty 2. Tato vrstva rostla vždy ze spodního okraje rezistoru, jak je naznačeno na obrázku 98. Proč tomu tak je, není zcela jasné.



Obrázek 98: Růst difuzní vrstvy ze spodního okraje terminálu rezistoru při použití pájecí pasty 2
a) jeden průchod, b) dva průchody

5.10 Zkouška stříhem

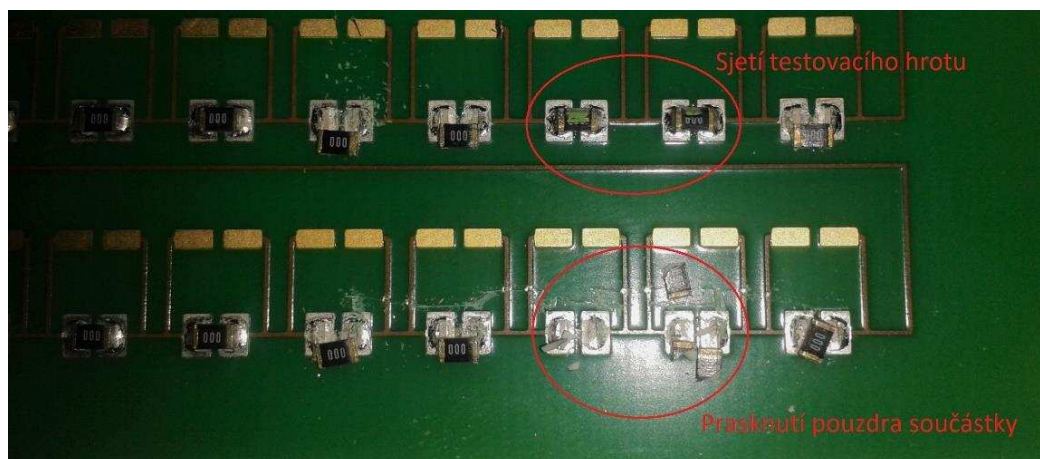
Měření mechanické pevnosti pájených spojů ve stříhu bylo provedeno v laboratoři ústavu mikroelektroniky za pomoci zařízení DAGE PC2400 (obr. 99). Parametry zkoušky byly následující:

- výška hrotu od DPS při testu: 100 μm ,
- rychlost hrotu při testu: 17 μm ,
- vzdálenost, kterou urazí hrot po utrnutí součástky 500 μm ,
- rozsah 100 N.



Obrázek 99: DAGE PC2400

Zkoušku stříhem vždy podstoupilo pro každou kombinaci pájecí pasty, teplotního profilu a počtu průchodů 10 kusů rezistorů. Ve většině případů došlo k odtržení součástky mezi pájeným spojem a součástkou v důsledku lomu spoje, který nastal ve spodní části spoje a dále byl veden pod samotnou součástkou. Ve dvou případech došlo k prasknutí pouzdra součástky, ve dvou případech testovací hrot sjel po těle součástky (nedošlo k odtržení). Toto lze vidět na obrázku 100.



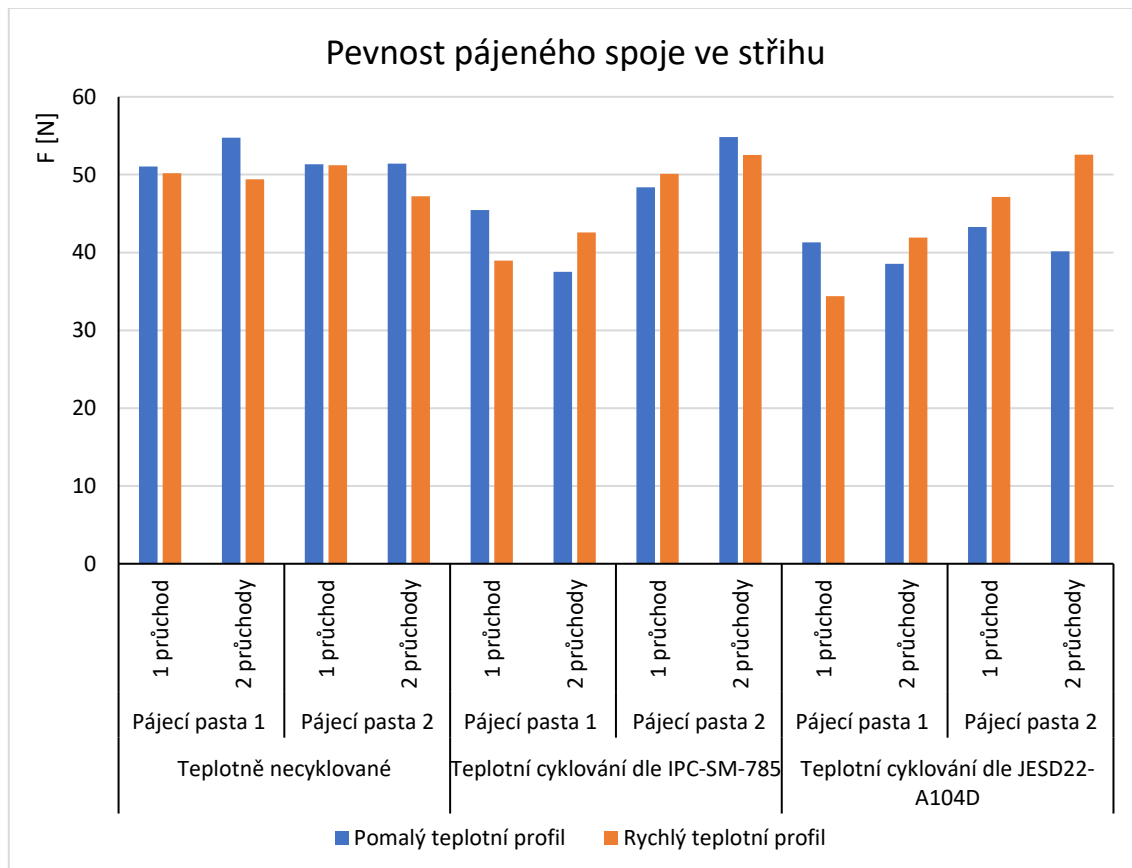
Obrázek 100: Zkouška stříhem

V tabulce 7 jsou uvedeny výsledky pro necyklované vzorky a pro vzorky cyklované dle norem IPC-SM-785 a JESD22-A104D. Na obrázku 101 se potom nachází jejich grafické znázornění. Z grafu je patrné, že pájecí pasta 2 dosahovala po teplotním cyklování lepších výsledků, než pájecí pasta 1. Pevnost spoje je u teplotně necyklovaných vzorků srovnatelná pro obě testované pájecí pasty i pro oba použité teplotní profily a pro jeden i dva průchody pecí. Po teplotním cyklování už je situace jiná. Pevnost pájených spojů vytvořených pájecí pastou 1, které prodělaly jeden průchod pecí s nastaveným pomalým profilem po cyklování dle normy IPC-SM-785, klesla o 10 %, po cyklování dle normy JESD22-A104D byl pokles 20 %.

Výsledky zkoušky stříhem [N]				
	Teplotně necyklované			
	Pájecí pasta 1		Pájecí pasta 2	
	1 průchod	2 průchody	1 průchod	2 průchody
Pomalý teplotní profil	51,04	54,75	51,33	51,41
Rychlý teplotní profil	50,17	49,38	51,20	47,24
	Teplotní cyklování dle IPC-SM-785			
	Pájecí pasta 1		Pájecí pasta 2	
	1 průchod	2 průchody	1 průchod	2 průchody
Pomalý teplotní profil	45,45	37,52	48,37	54,84
Rychlý teplotní profil	38,96	42,56	50,11	52,51
	Teplotní cyklování dle JESD22-A104D			
	Pájecí pasta 1		Pájecí pasta 2	
	1 průchod	2 průchody	1 průchod	2 průchody
Pomalý teplotní profil	41,31	38,55	43,29	40,15
Rychlý teplotní profil	34,37	41,91	47,13	52,56

Tabulka 8: Výsledky zkoušky stříhem

Při použití rychlého teplotního profilu byl pokles po cyklování dle normy IPC 20 %, po cyklování dle normy JESD 25 %. Pokud vzorky prošly dvěma průchody pecí s nastaveným pomalým teplotním profilem, klesla jejich pevnost po cyklování dle normy IPC i JESD o 30 %. Při nastaveném rychlém teplotním profilu klesla pevnost po cyklování dle obou norem o 15 %.



Obrázek 101: Grafické znázornění výsledků zkoušky stříhem

Při použití pájecí pasty 2 nebyla pevnost pájených spojů vzorků cyklovaných dle normy IPC-SM-785 ovlivněna. Po cyklování dle normy JESD22-A104D byl pokles pevnosti pro pomalý profil a jeden průchod pecí 15 %, pro rychlý profil a jeden průchod pecí 7 %. Pokud vzorky prodělaly dva průchody pecí, poklesla pevnost pro pomalý teplotní profil o 20 %, při použití rychlého teplotního profilu nedošlo ke změně pevnosti.

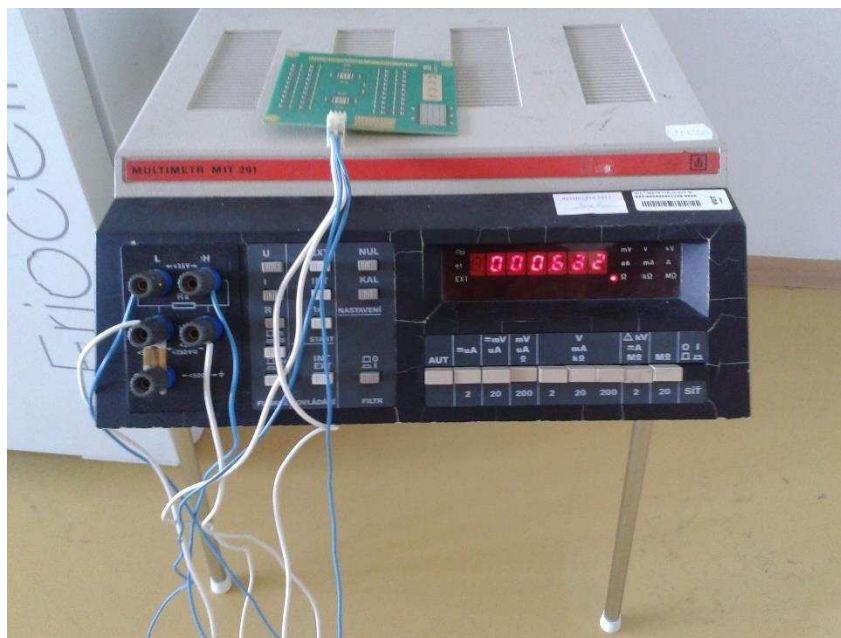
Pokles pevnosti spoje při cyklování, zvláště dle normy IPC-SM-785, lze vysvětlit růstem IMC vrstvy a difuzní vrstvy niklu ve spoji. To ovšem nevysvětluje nižší pevnost spojů po cyklování dle normy JESD22-A104D, zvláště když tyto spoje vykazovaly nejhorší výsledky pevnosti. Lze tedy předpokládat, že došlo i ke změně struktury pájeného spoje, což je vidět na obrázku 102, kdy u cyklovaného vzorku lze, na rozdíl od vzorku, který teplotním cyklováním neprošel, pozorovat zrnitou strukturu spoje.



Obrázek 102: Změna struktury spoje a) před teplotním cyklováním, b) po teplotním cyklování

5.11 Měření elektrického odporu

Všechny rezistory na testovací DPS (40 kusů) jsou zapojeny do série, tudíž měření elektrického odporu bylo provedeno vždy pro celou DPS. Elektrický odpor byl měřen 4bodovou metodou pomocí měřicího přístroje Metra MULTIMETR MIT 291 (obr. 103).

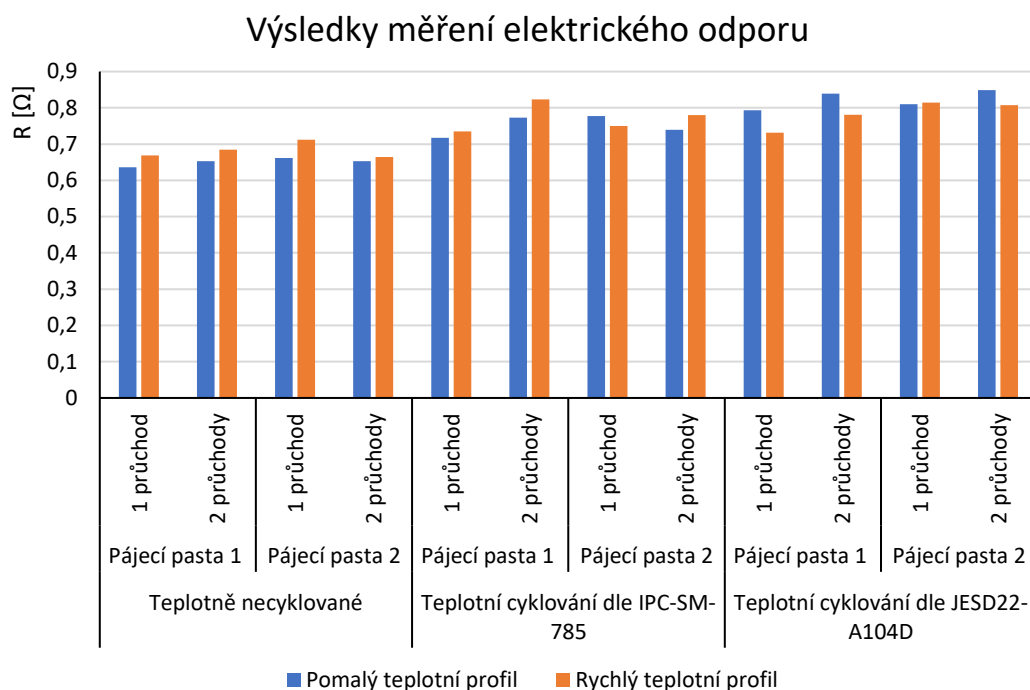


Obrázek 103: Metra MULTIMETR MIT 291

Měřená DPS byla připojena k měřicímu zařízení pomocí edge konektoru, který byl nasunut na pájecí plošky sloužící k osazení WAGO konektoru. Měření probíhalo vždy po temperování měřených DPS na 30 °C. Elektrický odpor byl u vybraných vzorků změřen před započítím zrychleného teplotního cyklování, několikrát během teplotního cyklování a po jeho ukončení. Během testu docházelo k výkyvům naměřených hodnot a k vyhodnocení tedy byly vzaty pouze počáteční a koncové hodnoty. Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulce 8 a na obrázku 104 potom lze vidět jejich grafické znázornění.

Výsledky měření elektrického odporu [Ω]				
	Teplotně necyklované			
	Pájecí pasta 1		Pájecí pasta 2	
	1 průchod	2 průchody	1 průchod	2 průchody
Pomalý teplotní profil	0,636	0,653	0,662	0,653
Rychlý teplotní profil	0,669	0,685	0,712	0,664
	Teplotní cyklování dle IPC-SM-785			
	Pájecí pasta 1		Pájecí pasta 2	
	1 průchod	2 průchody	1 průchod	2 průchody
Pomalý teplotní profil	0,717	0,773	0,777	0,739
Rychlý teplotní profil	0,735	0,823	0,75	0,78
	Teplotní cyklování dle JESD22-A104D			
	Pájecí pasta 1		Pájecí pasta 2	
	1 průchod	2 průchody	1 průchod	2 průchody
Pomalý teplotní profil	0,793	0,839	0,81	0,849
Rychlý teplotní profil	0,731	0,781	0,814	0,807

Tabulka 9: Výsledky měření elektrického odporu



Obrázek 104: Grafické znázornění výsledků měření elektrického odporu

Z výsledků zobrazených na obrázku 104 je patrné, že vlivem teplotního cyklování došlo k nárůstu elektrického odporu měřených vzorků. Je také patrné, že vzorky, které prodělaly testování dle normy JESD22-A104D a tudíž prošly menším počtem cyklů, ale byly vystaveny náročnějším podmínkám než vzorky testované dle IPC-SM-785, vykazují nejvyšší změny hodnot elektrického odporu. Lze tedy říct, že vodivost pájeného spoje je více závislá na hraničních hodnotách, rychlosti a průběhu cyklu než na počtech cyklů. Tato změna elektrického odporu bude nejspíše následkem růstu intermetalické vrstvy ve spoji a změnou struktury samotného pájeného spoje.

U vzorků došlo k potvrzení předpokladu, že během druhého průchodu přetavovací

pecí dochází k růstu intermetalické vrstvy ve spoji a tento spoj tedy vykazuje větší elektrický odpor.

Co se týče vlivu použitých teplotních profilů při pájení, je možno pozorovat, že vzorky zapájené rychlým teplotním profilem (teplotní profil 2) vykazují větší elektrický odpor, což neodpovídá očekáváním, jelikož tloušťka IMC vrstvy u těchto vzorků je nižší než u vzorků zapájených pomalým teplotním profilem. Tato situace se mění až při testování dle normy JESD22-104D, kdy vzorky zapájené pomalým teplotním profilem (teplotní profil 1) na konci testování vykazují větší elektrický odpor, než vzorky zapájené rychlým teplotním profilem.

Jelikož elektrický odpor u vzorků, které neprošly cyklováním, je téměř totožný, nelze s jistotou říci, zda má na elektrický odpor pájených spojů vliv složení použitých past a zda tedy koncentrace stříbra v pájecí pastě ovlivňuje tyto vlastnosti.

5.12 Ekonomické vyhodnocení

Za rok 2017 bylo ve společnosti Honeywell spotřebováno 1 694 kusů 600g balení pájecí pasty 1, což celkem činí 1 016 kg pájecí pasty. Rozdíl ceny mezi pájecí pastou 1 a pájecí pastou 2 činí 10 USD/kg. Vzátaženo k datům z roku 2017 by případné nahrazení pájecí pasty 1 pájecí pastou 2 odpovídalo roční úspoře 10 160 USD, tedy 220 000 Kč.

Dle internetových cen stojí 500g balení pájecí pasty 1 95 USD, za celý objem 193 116 USD tedy 4,17 milionu Kč. Úspora tedy činí jednu dvacetinu z celkového objemu. Tato úspora na materiálu není nijak výrazná, ale určitě je nezanedbatelná.

Pájecí pasta 2 má oproti pájecí pastě 1 nižší teplotu tání, je tedy pravděpodobné, že při optimalizaci procesu dojde k další úspoře na energiích.

Rizikem ovšem je právě optimalizace procesu, kdy bude muset dojít k dočasnému omezení výroby. To bude mít za následek snížení výrobní kapacity podniku a generovaný zisk za toto období bude nižší. Je zde tedy otázka, za jakých podmínek bude změna pájecí pasty rentabilní.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo porovnat dvě pájecí pasty s rozdílným obsahem stříbra. V teoretické části práce rozebírá proces pájení přetavením pájecí pasty, věnuje se pájecím pastám obecně a dále se zaměřuje na možné defekty, které mohou nastat při tisku pájecí pasty a při následném pájení a nabízí možná řešení jejich odstranění.

Praktická část se potom věnuje testování vlastností pájecích past dle normy IPC-TM-650, zrychlenému teplotnímu cyklování dle norem IPC-SM-785 a JESD22-A104D, zkoušce stříhem, měření elektrického odporu a jejich zhodnocení a ekonomickému vyhodnocení.

Z výsledků testů roztékavosti je patrné, že pájecí pasta 2 dosahuje lepší roztékavosti a lepšího smáčení než pájecí pasta 1. Výsledky solder ball testu a slump testů vyšly pro obě pájecí pasty téměř totožně. Dle dat z SPI má také pájecí pasta 2 mírně lepší vlastnosti tisku.

Po zrychleném teplotním cyklování je patrné, že pájecí pasta 1 produkuje více tavidlových zbytků a jejich degradace je na vyšší úrovni oproti pájecí pastě 2. Také IMC vrstva v pájených spojkách při použití pájecí pasty 1 je vyšší oproti IMC vrstvě v pájených spojích při použití pájecí pasty 2. Dalším negativem pájecí pasty 1 je schopnost niklu z povrchové úpravy a z terminálů součástek více difundovat do pájeného spoje.

Výše zmíněné dalo předpoklad k tomu, že pájené spoje zapájené pájecí pastou 2 budou vykazovat vyšší pevnost ve stříhu, což se potvrdilo zvláště po teplotním cyklování dle normy JESD22-A104D.

Z měření elektrického odporu vyšla lépe pájecí pasta 1, zde je ale potřeba položit si otázku, jak moc mohly výsledky, zvláště při měření takto nízkých hodnot elektrického odporu, ovlivnit nežádoucí jevy jako například oxidace kontaktů měřicího konektoru a měřících plošek či tavidlové zbytky.

Z ekonomického hlediska dokáže případná náhrada pájecí pasty 1 za pájecí pastu 2 při správné optimalizaci procesu ušetřit několik stovek tisíc korun ročně.

Z výše zmíněného lze tedy společnosti Honeywell jednoznačně doporučit změnu pájecí pasty 1 za pájecí pastu 2.

Při realizaci této práce vyvstala řada možných směrů, kterými by se mohly zabývat případné navazující práce. Zajímavé by bylo sledovat delší dobu cyklování, ideálně až do doby, kdy by pájené spoje začaly praskat. Také změna doby trvání jednoho cyklu, ať už jeho prodloužení, či zkrácení (teplotní šoková zkouška), by mohla přinést zajímavé výsledky. Dále by bylo dobré provést vibrační zkoušku vzorků zapájených použitými pastami. A konečně provést toto testování při jiné povrchové úpravě pájecích plošek.

LITERATURA

- [1] STARÝ, Jiří a Miroslav ZATLOUKAL. *Montážní a propojovací technologie*. Brno, 2014.
- [2] ADÁMEK, Martin, Cyril VAŠKO a Miloš DRLÍK. *Pájení v elektrotechnické výrobě: Kontrola jakosti spojů* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L04b_p%C3%A1jen%C3%AD_a_kontrola.pdf
- [3] KOLLÁR, Anton. *Pájení přetavením v SMT výrobě – moderní požadavky* [online]. 5/2015 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:29239>
- [4] BELL, Hans, Marcel KNEER a André KAST. *Ekologické aspekty pájení přetavením* [online]. 4/2015 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:8145/ekologicke-aspekty-pajeni-pretavenim>
- [5] *Přetavení infračerveným zářením* [online]. 2017 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-pretavenim/pretaveni-infracervenym-zarenim/>
- [6] *Pájení v parách* [online]. 2017 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-v-parach/pajeni-v-parach/>
- [7] STUNA, Jakub. *Pájecí pasty pro bezolovnaté pájení a jejich vliv na spolehlivost* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/22917/1/Pajeci_pasty_pro_bezolovnate_pajeni_a_jejich_vliv_na_spolehlivost.pdf. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [8] Join industry standard: Requirements for Soldering Pastes J Standard 005 A [online]. 2011 [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: http://ipc.org/committee/drafts/5-24b_d_J005A_proposed_for_ballot.pdf
- [9] General Information on Solder Paste [online]. [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: http://www.pmdtk.upc.smm.lt/dokumentai/Medziaga/inzinerine/mm12/Priedai/3_4%20priedas.%2023_Solder_paste_general_info_KOKI.pdf
- [10] WORKSHOP VIDEO #54: 983A/986A Solder paste dispenser [online]. [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: <http://dangerousprototypes.com/blog/2013/02/07/workshop-video-54/>
- [11] *MIKROELEKTRONIKA A TECHNOLOGIE SOUČÁSTEK: LABORATORNÍ CVIČENÍ – REALIZACE HYBRIDNÍHO INTEGROVANÉHO OBVODU* [online]. [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/190407/mod_resource/content/1/LC1_navod.pdf
- [12] JANÁČ, Martin. *Technologie tisku pájecí pasty* [online]. Zlín, 2011 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/17507/jan%C3%A1%C4%8D_2011_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [13] MOHANTY, Rita a Bill CLAIBORNE. Effect Of Squeegee Blade On Solder Paste Print Quality [online]. [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://www.smtnet.com/library/files/upload/EffectOfSqueegeeBlade.pdf>
- [14] 3D Solder Paste Inspection Measurement System [online]. [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <http://caltexsystems.com/products/solder-paste-inspection-systems/spm-300-3d/>
- [15] SHEA, Chrys. Troubleshooting the Stencil Printing Process [online]. [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: https://www.smta.org/chapters/files/Houston_Troubleshooting_The_Stencil_Printing_Process_-_Chrys_Shea.pdf

- [16] Stencil and Screen Cleaning [online]. [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <http://www.zestron.com/cleaning-applications/smt-electronics-cleaning/stencil-and-screen-cleaning.html>
- [17] Easy solder paste mixer [online]. [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <http://www.sinerji-grup.com/easy-solder-paste-mixer/easy-solder-paste-mixer>
- [18] THE QUICK POCKET REFERENCE FOR TIN/LEAD AND LEAD -FREE SOLDER ASSEMBLY [online]. [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/soldering_handbook_rev_10-13.pdf
- [19] Characteristics of Solder Paste [online]. [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Characteristics_of%20Solder_Paste.pdf
- [20] YUNUS, Mohammad, K. SRIHARI, J.M. PITARRESI a Anthony PRIMAVERA. Effect of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints [online]. 2003, [cit. 2018-4-2]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.85.2519&rep=rep1&type=pdf>
- [21] ASPANDIAR, Raiyo. Voids in Solder Joints [online]. 2004 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: https://www.smta.org/files/oregon_chapter_presentation0905.pdf
- [22] Solder beading [online]. 2009 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://www.epdtonthenet.net/article/24087/Solder-Beading.aspx>
- [23] PIGEON, Kevin. Advanced Issues in Assembly: Part 2 Causes and Cures in Solder Beading [online]. 2001, s. 5 [cit. 2018-4-2]. Dostupné z: http://www.kondner.com/files/Solder_Beading.pdf
- [24] Graping. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Graping>
- [25] TUDOR, Christian. Amtest Seminar Training 2012 [online]. 2012 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://www.amtest-smt.com/files/File/protected/Amtest%20Training%20Presentation%20Jun%202012.pdf>
- [26] Cause Analysis of SMD Tombstone Troubleshooting in SMT Assembly [online]. 2017 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://heros-electronics.com/News/261.html>
- [27] BAO, David. Tombstoning Explained [online]. 2017 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://metallicresources.com/wp-content/uploads/2017/02/n3.pdf>
- [28] JEŽEK, Vladimír. *Vliv integrálu teploty a času na kvalitu pájeného spoje*. Brno, 2015, 71 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý Ph.D.
- [29] Siplace X-Series: The Ultimate High-End SMT Solution [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://www.siplace.com/addmindms/download.aspx?domid=10&log=1&d_id=5bb5ad00-c226-4ab9-a11d-10e14d3f2883&fdl=0
- [30] New Heller EXL Series: Reflow ovens [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: http://www.hellerindustries.com/pdf/Heller_EXL_Catalog.pdf
- [31] IPC-TM-650 Test methods manual: Solder Paste—Solder Ball Test [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2.4.43.pdf>
- [32] IPC-TM-650 Test methods manual: Solder Paste—Slump Test [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2.4.43.pdf>

- [33] Standart Thick Film Chip Resistors [online]. 2017 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2310790.pdf?_ga=2.168514088.807909637.1525900259-356845575.1525900259
- [34] IPC-SM-785: Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface mount Solder Attachments. Northbrook: IPC, 1992.
- [35] Jedec Standard: Temperature Cycling [online]. Arlington: JEDEC Solid State Technology Association, 2009 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.pdfFiller.com/jsfiller-desk6/?projectId=185719376&expId=3395&expBranch=2#6c6b9a6040ce4e289e2c075a05462071>
- [36] SEELING, Karl a David SURASKI. AIM, INCORPORATED. 1 A COMPARISON OF TIN-SILVER-COPPER LEAD-FREE SOLDER ALLOYS [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/lead-free_comparison_of_snagcu_alloys.pdf
- [37] SAMAWURA, Tadashi a Takeo IGARASHI. ALMIT LTD. Difference Between Various Sn/Ag/Cu Solder Compositions [online]. 2005 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.almit.com/dloads/Agents/SAC%20Alloy%20Comparison.pdf>
- [38] IPC-TM-650 Test methods manual: Solder Paste—Wetting Test[online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2.4.45.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

DPS	Deska plošných spojů
RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment (omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních)
SMD	Surface Mount Device (součástky určené pro povrchovou montáž)
IR	Infrared (infračervené záření)
RTS	Ramp to spike (profil s lineárním nárůstem teploty)
RSS	Ramp soak spike (sedlový profil)
SIR	Surface Insulation Resistance (povrchový odpor izolace)
ICT	In-circuit test (test elektrického propojení)
UV	Ultraviolet (ultrafialový)
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold (bezproudé pokovení NiAu)
SPI	Solder paste inspection (inspekce pájecí pasty)
TAL	Time above liquidus (prodleva nad liquidem)
QFN	Quad Flat No-lead (typ pouzdra součástky)
FR	Flame retardant (samozhášecí přísada)
Tg	Glass transition Temperature (teplota skelného přechodu)
IMC	Intermetallic compound (intermetalická sloučenina)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Faktory ovlivňující vlastnosti pájeného spoje [1]	7
Obrázek 2: Schematické znázornění topné jednotky konvekční přetavovací pece [1].....	9
Obrázek 3: Schematické znázornění konvekční pece	10
Obrázek 4: Schéma proudění energie u konvekční pájecí pece [4]	10
Obrázek 5: Přídavné chlazení krytů pece [4]	11
Obrázek 6: Konstrukční provedení wolframového zářiče [5]	12
Obrázek 7: Jednoduchý model přetavovací pece využívající IR záření [5]	12
Obrázek 8: Princip pájení v parách [6]	13
Obrázek 9: RTS teplotní profil [1].....	15
Obrázek 10: RSS teplotní profil.....	15
Obrázek 11: Závislost podílu oxidů na průměru zrn [7].....	18
Obrázek 12: Princip výroby částic pájecí pasty [9]	19
Obrázek 13: Poloautomatický dispenzer [10].....	21
Obrázek 14: Různé průměry jehel dispenzeru [7]	21
Obrázek 15: Síto s fotocitlivým materiálem [7]	22
Obrázek 16: Parametry síta a) velikost ok vs. průměr drátu, b) otevřená plocha síta – světlost [11].....	22
Obrázek 17: Princip sítotisku [7]	23
Obrázek 18: Chemicky vyleptaná šablona [9].....	24
Obrázek 19: Šablona vyřezaná laserem [9]	24
Obrázek 20: Šablona vyrobena galvanickým nanášením [9].....	25
Obrázek 21: Otvory šablony a nanosená pasta šablonou vyrobenou, a) chemickým leptáním, b) řezáním laserem c) galvanickým nanášením [7]	25
Obrázek 22: Výsledek přílišného tlaku na těrku [9]	26
Obrázek 23: a) diamantový tvar těrky b) plochá těrka c) čtvercová těrka [9]	26
Obrázek 24: Změna úhlu těrky během tisku pájecí pasty [13]	27
Obrázek 25: Kondicionér pájecí pasty [1]	28
Obrázek 26: Porovnání tiskových vlastností SAC pájecích past [36]	28
Obrázek 27: Výsledky testu smáčecích vah pro SAC slitiny s různým obsahem stříbra	29
Obrázek 28: SAC slitiny po teplotním šokovém testování [36]	29
Obrázek 29: Nedostatečné množství pájecí pasty na posledních dvou ploškách [14]....	30
Obrázek 30: Částice pájecí pasty, které zůstaly po oddělení šablony v jejích otvorech [15]	31

Obrázek 31: Pájecí pasta natisknutá mimo pájecí plošky [16]	31
Obrázek 32: Nesprávný tvar natisknuté pasty (ve spodní části obrázku je možno vidět výstup z SPI) [17]	32
Obrázek 33: „Dog ears“ [18]	32
Obrázek 34: Můstky [17]	33
Obrázek 35: Studený sesuv pájecí pasty [18]	33
Obrázek 36: Typy voidů [1]	34
Obrázek 37: Mechanismus vzniku makro voidů [1]	35
Obrázek 38: Příklad makrovoidů [21]	35
Obrázek 39: Planární voidy [21]	36
Obrázek 40: Trhlinové voidy [21]	36
Obrázek 41: Void v mikropropoji [21]	37
Obrázek 42: Void v mikropropoji [21]	37
Obrázek 43: Růst Kirkendallových voidů při 125 °C a) po 3 dnech, b) po 10 dnech, c) po 40 dnech [11]	38
Obrázek 44: Pinhole voidy [21]	38
Obrázek 45: Kuličky pájky [18]	39
Obrázek 46: Solder bead [14]	39
Obrázek 47: Redukované tvary otvorů šablony [7]	40
Obrázek 48: Zkrat u QFN pouzdra [7]	40
Obrázek 49: Solder graping [24]	41
Obrázek 50: Náhrobky [26]	42
Obrázek 51: Doporučené tvary otvorů šablony [27]	43
Obrázek 52: Motiv testovací DPS [28]	44
Obrázek 53: Neosazená DPS	45
Obrázek 54: MPM Momentum	46
Obrázek 55: Koh Young KY 8030-3	46
Obrázek 56: Četnost výskytu natisknutého množství pájecí pasty na plošky QFN pouzder	47
Obrázek 57: Četnost výskytu natisknutého množství pájecí pasty na plošky rezistorů .	48
Obrázek 58: Siemens Siplace X4	48
Obrázek 59: Heller 1812EXL	49
Obrázek 60: Kulička pájky uvězněná pod pouzdem rezistoru	49
Obrázek 61: Teplotní profil 1 (pomalý)	50
Obrázek 62: Teplotní profil 2 (rychlý)	50

Obrázek 63: Osazená DPS.....	51
Obrázek 64: Součástky zapájené pájecí pastou 1, pomalý teplotní profil a) jeden průchod pecí, b) dva průchody pecí	51
Obrázek 65: Součástky zapájené pájecí pastou 1, rychlý teplotní profil a) jeden průchod pecí, b) dva průchody pecí	51
Obrázek 66: Součástky zapájené pájecí pastou 2, pomalý teplotní profil a) jeden průchod pecí, b) dva průchody pecí	52
Obrázek 67: Součástky zapájené pájecí pastou 2, rychlý teplotní profil a) jeden průchod pecí, b) dva průchody pecí	52
Obrázek 68: Závislost roztékavosti pájecích past na teplotním profilu.....	55
Obrázek 69: Nejhorší výsledek solder ball testu u pájecí pasty 1	56
Obrázek 70: Nejhorší výsledek solder ball testu u pájecí pasty 2	56
Obrázek 71: Šablona pro slump test IPC-A-21 [32].....	57
Obrázek 72: Cold slump test pájecí pasty 1 a) šablona o tloušťce 100 μm , b) šablona o tloušťce 200 μm	58
Obrázek 73: Cold slump test pájecí pasty 2 a) šablona o tloušťce 100 μm , b) šablona o tloušťce 200 μm	58
Obrázek 74: Hot slump test pájecí pasty 1 a) šablona o tloušťce 100 μm , b) šablona o tloušťce 200 μm	59
Obrázek 75: Hot slump test pájecí pasty 1 a) šablona o tloušťce 100 μm , b) šablona o tloušťce 200 μm	59
Obrázek 76: Závislost smykového napětí na deformaci [34]	60
Obrázek 77: Inkubátor FRIOCELL 55	61
Obrázek 78: Klimatická zkušební komora WEISS WK 340/70.....	61
Obrázek 79: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, pomalým profilem, jeden průchod pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	62
Obrázek 80: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, pomalým profilem, dva průchody pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	62
Obrázek 81: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, pomalým profilem, jeden průchod pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	62
Obrázek 82: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, pomalým profilem, dva průchody pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	63
Obrázek 83: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, rychlým profilem, jeden průchod pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	63

Obrázek 84: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, rychlým profilem, dva průchody pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	63
Obrázek 85: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, rychlým profilem, jeden průchod pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	63
Obrázek 86: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, rychlým profilem, dva průchody pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	64
Obrázek 87: Příklad mikrovýbrusu.....	64
Obrázek 88: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, pomalým profilem, jeden průchod pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	65
Obrázek 89: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, pomalým profilem, dva průchody pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	65
Obrázek 90: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, pomalým profilem, jeden průchod pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	66
Obrázek 91: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, pomalým profilem, dva průchody pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	66
Obrázek 92: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, rychlým profilem, jeden průchod pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	67
Obrázek 93: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 1, rychlým profilem, dva průchody pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	67
Obrázek 94: Materiálový obraz vzorku zapájeného pájecí pastou 1, rychlým teplotním profilem, dva průchody pecí	67
Obrázek 95: Růst difuzní vrstvy po teplotním cyklování dle normy IPC-SM-785 a) pájecí pasta 2, pomalý teplotní profil, 2 průchody, b) pájecí pasta 1, rychlý teplotní profil, dva průchody	68
Obrázek 96: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, rychlým profilem, jeden průchod pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	68
Obrázek 97: Srovnání vzorků zapájených pájecí pastou 2, rychlým profilem, dva průchody pecí a) necyklovaný vzorek, b) cyklování dle IPC-SM-785, c) cyklování dle JESD22-A104D.....	69
Obrázek 98: Růst difuzní vrstvy ze spodního okraje terminálu rezistoru při použití pájecí pasty 2 a) jeden průchod, b) dva průchody	70
Obrázek 99: DAGE PC2400.....	70

Obrázek 100: Zkouška stříhem	71
Obrázek 101: Grafické znázornění výsledků zkoušky stříhem	72
Obrázek 102: Změna struktury spoje a) před teplotním cyklováním, b) po teplotním cyklování.....	73
Obrázek 103: Metra MULTIMETR MIT 291	73
Obrázek 104: Grafické znázornění výsledků měření elektrického odporu.....	74

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání tří nejrozšířenějších metod pájení přetavením [1].....	8
Tabulka 2: Vlastnosti pájecích past pro různé techniky nanášení [1].....	16
Tabulka 3: Rozdělení pájecích past dle velikosti částic [8].....	17
Tabulka 4: Rozdělení dle velikosti částic pájecí slitiny SAC 305 [7]	17
Tabulka 5: Výsledky SPI	47
Tabulka 6: Rozdělení vzorků dle testů	53
Tabulka 7: Výsledky testu roztékavosti.....	54
Tabulka 8: Výsledky zkoušky stříhem.....	71
Tabulka 9: Výsledky měření elektrického odporu.....	74

