České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Czech Technical University in Prague

Faculty of Electrical Engineering

Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Diagnostika poruch pájených spojů, kontrolní a testovací metody

Diagnostics of solder joint failures, inspection and testing methods

Summary

Electrical or optical inspections are the most commonly used methods of assembled and soldered components on printed circuit boards. Among optical inspection systems which are presently used in industrial production belong solder paste inspection (SPI), automated optical inspection (AOI) of assembled and soldered components and, in some cases, X-ray inspection. In contrast, electrical inspection systems are characterized by so-called needle array. Despite the use of these sophisticated systems, the discovery of the cause of error is usually very complicated. Numerous test methods are used for characterization of the causes of error. These are the wetting balance method, material analysis of samples including analysis of microsection, dilatometry, measuring of ionic contamination, differential scanning calorimetry (DSC), etc. This text begins with the overview of inspection methods that are commonly used within industrial reflow soldering lines and then continues with the description of diagnostics methods together with the analysis of specific errors.

Souhrn

Ke kontrole osazené a zapájené desky plošného spoje se v dnešní době používají nejčastěji optická anebo elektrická inspekční zařízení. Mezi optické inspekční systémy, které se v současnosti používají v průmyslové výrobě, patří: kontrola nanesení pájecí pasty SPI (solder paste inspection), optická kontrola AOI (automated optical inspection) osazení a zapájení součástek a v některých případech rentgenová inspekce. Pro elektrické kontrolní systémy jsou charakteristická tzv. jehlová pole. I přes tyto sofistikované inspekční systémy je odhalení příčiny výskytu chyby mnohdy velmi složité a pro charakterizaci příčiny chyb se používá četných testovacích metod jako například: metody smáčecích vah, materiálové analýzy vzorků včetně analýz vzorku na výbrusu, dilatometrie, měření iontové kontaminace, diferenční skenovací kalorimetrie DSC (differential scanning calorimetry) apod. Přednáška nejprve představí kontrolní metody, které se používají na průmyslových pájecích linkách u pájení přetavením a posléze se zaměří na vybrané diagnostické metody včetně analýz konkrétní chyb.

Klíčová slova

Pájené spoje, kontrolní metody, testovací metody, poruchy pájených spojů

Keywords

Solder joints, inspection methods, testing methods, solder joint failures

Obsah

1. Úvod 6

2. Kontrolní metody 7

2.1. Optické kontrolní metody 8

2.2. Kontrola pomocí RTG 8

2.3 Elektrické kontrolní metody 9

3. Diagnostické metody a jejich použití v praxi 10

3.1. Pájitelnost, měření povrchového napětí 10

3.2. Analýza termických dějů 17

3.3. Rentgenová defektoskopie 26

3.4. Defektoskopie pomocí výbrusu 29

3.5. Elektronová mikroskopie 29

4. Závěr 33

Literatura 34

Seznam symbolů a zkratek: 36

1. Úvod

Technologie pájení byla objevena před staletími. Rozvoj technologie pájení v elektrotechnickém průmyslu přišel především s nástupem sériové výroby a s nástupem desek plošných spojů, kdy již nepřipadalo v úvahu provádět vodivé propojování mechanicky. Zpočátku byly pájené spoje realizované ručním způsobem, s rostoucí produkcí v elektrotechnickém průmyslu byl pak tento proces velkosériově automatizován. Postupem doby dochází k vývoji technologií, ale i materiálů, které jsou používány. Počátkem sedmdesátých let se objevují první varianty nepájivé masky. Dochází ke stále vyšší miniaturizaci součástek, jsou kladeny vyšší nároky na spolehlivost a výrobní možnosti.

S nedávným přechodem na pájení pomocí bezolovnatých pájecích slitin a s rostoucí miniaturizací elektrotechnických zařízení je zvládnutí procesu pájení stále náročnější. Vytváří se nová inspekční zařízení, která kontrolují vytváření elektronického zařízení již v průběhu jeho výroby, zároveň vznikají sofistikovanější způsoby kontroly, které se snaží zachytit co nejdříve možnou chybu, a tak ušetřit náklady ve výrobním procesu. Kromě kontrolních metod na výrobní lince se rovněž sledují parametry používaných materiálů, které vstupují do výrobního procesu.

Chyby, ke kterým dochází při elektronické montáži součastek na desku plošného spoje (DPS), mohou být dány nejenom nevhodným nastavením technologického procesu, ale také nevhodným návrhem. Již při návrhu zařízení je zapotřebí brát v úvahu výrobní proces a použité materiály, aby nedocházelo k chybám, které se mohou projevit na výsledné kvalitě výrobku. Elektronická montáž tvoří velmi komplexním proces, do kterého vstupuje mnoho faktorů ovlivňujících výslednou kvalitu výrobku. I přes široké spektrum kontrolních metod není

mnohdy jednoduché odhalit co je příčinou vzniklé chyby. Proto se pro charakterizaci příčiny chyb používá četných testovacích metod, jako například: metody smáčecích vah, materiálové analýzy vzorků včetně analýzy vzorků na výbrusu, dilatometrie, měření iontové kontaminace, diferenční skenovací kalorimetrie a dalších. Charakterizace příčiny chyby je možná na základě dokonalé znalosti výrobního procesu, vlastností použitých materiálů a vlivu okolního prostředí.

Tato práce vychází nejenom z vědeckých publikací autora, ale i z jeho praktických zkušeností v této oblasti, které jsou dány autorovými četnými spolupracemi s průmyslem. Díky tomu níže uvedený text představuje nejen kontrolní a diagnostické metody, ale nastiňuje i možné způsoby diagnostiky konkrétních problémů z praxe v oblasti technologie povrchové montáže SMT (surface mount technology).

2. Kontrolní metody

Hlavním úkolem kontrolních metod je odhalit včas chybu, případně potencionální chybu a zamezit tak ve výrobě vadného produktu, respektive zamezit dalším výrobním nákladům. Obecně platí, že čím je chyba dříve identifikována, tím je úspora vyšší.

S ohledem na velkosériovou produkci, stále vyšší miniaturizaci součástek a přechod na bezolovnaté pájecí slitiny se kontrolní metody zavádějí po jednotlivých operacích na lince. Linky tvoří velmi komplexní proces, do interakce zde vstupují různé typy materiálů, zvýšená teplota, přesnost strojů, okolní prostředí a lidský faktor.

Kontrolní metody můžeme rozdělit na dvě základní kategorie:

- optické,
- elektrické.

2.1. Optické kontrolní metody

Mezi optické kontrolní metody v procesu pájení přetavením patří: kontrola nanesení pájecí pasty SPI (solder paste inspection) po šablonovém tisku (sleduje se správné nanesení pájecí pasty - přesnost nanesení, množství a tvar nanesené pájecí pasty), kontrola správného osazení součástek a kontrola součástek po zapájení AOI (automatical optical inspection), která následuje za osazovacími automaty a za přetavovací pecí. AOI kontroluje především správné osazení součástek (přesnost osazení, typ součástky, efekt náhrobního kamene (to nebude asi nikdo vědět co znameni apod.), kvalitu pájených spojů (tvar spoje, zkraty, chybějící pájku apod.).
Optické snímání zkoumaného vzorku se zpravidla provádí pomocí CCD videokamery s vysokým rozlišením a za pomoci různých zdrojů osvětlení. Následující rozhodnutí, zda vzorek je či není vyhovující, je pak předmětem matematických algoritmů.

2.2. Kontrola pomocí RTG

Kontrola pomocí RTG byla v nedávné době používána pouze pro diagnostické účely, nicméně díky zvyšující se míře integrace, zvyšujícím se nárokům na spolehlivost a kvalitu je RTG začleňováno i do výrobních linek. Tato inspekce má své uplatnění především v kontrole míst, která jsou pro optické metody nepřístupná. Obdobně jako v předešlém případě je i zde rozhodnutí o chybě předmětem matematických algoritmů. Kontrolována jsou především skrytá místa (pájené spoje pod pouzdry součástek), dutiny v pájených spojích (voidy) apod.
Sofistikovanější RTG se používá pro diagnostiké účely. O této metodě bude pojednáno níže, v rámci diagnostických metod.

2.3 Elektrické kontrolní metody

Testování elektrickými metodami patří ke standardním kontrolám v elektrotechnické výrobě. Zapájené DPS se kontrolují v několika úrovních testování.

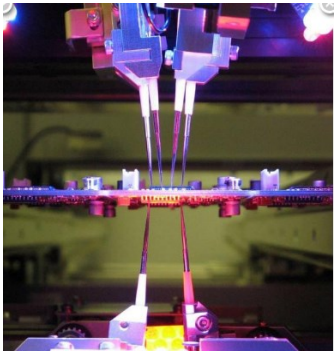
V první úrovni se proměřují základní parametry součástek po jejich zapájení. Jedná se o měření vnitroobvodové (in-circuit), tedy v obvodu. Provádí se připojením speciálních elektrod, které jsou zdrojem vnějších vnucených napětí a proudů. Připojení je realizováno pomocí jehlových polí.

Druhá úroveň kontroluje funkce jednotlivých dílčích celků, jedná se o funkční testování. Na vstupy a výstupy funkčních celků jsou pomocí jehlového pole přiváděny a následně kontrolovány příslušné signály.

Třetí úrovní jsou systémové testy. Desky připojené přes vstupní a výstupní konektory jsou ověřovány jako celek.

Jehlová pole slouží k připojení měřicího systému k osazené desce plošných spojů. Příklady statického a dynamického jehlového pole spolu s konektory jsou uvedeny na obrázku 1.

a)



b)

Obr. 1: Jehlové pole a) statické b) dynamické (flying probe tester)

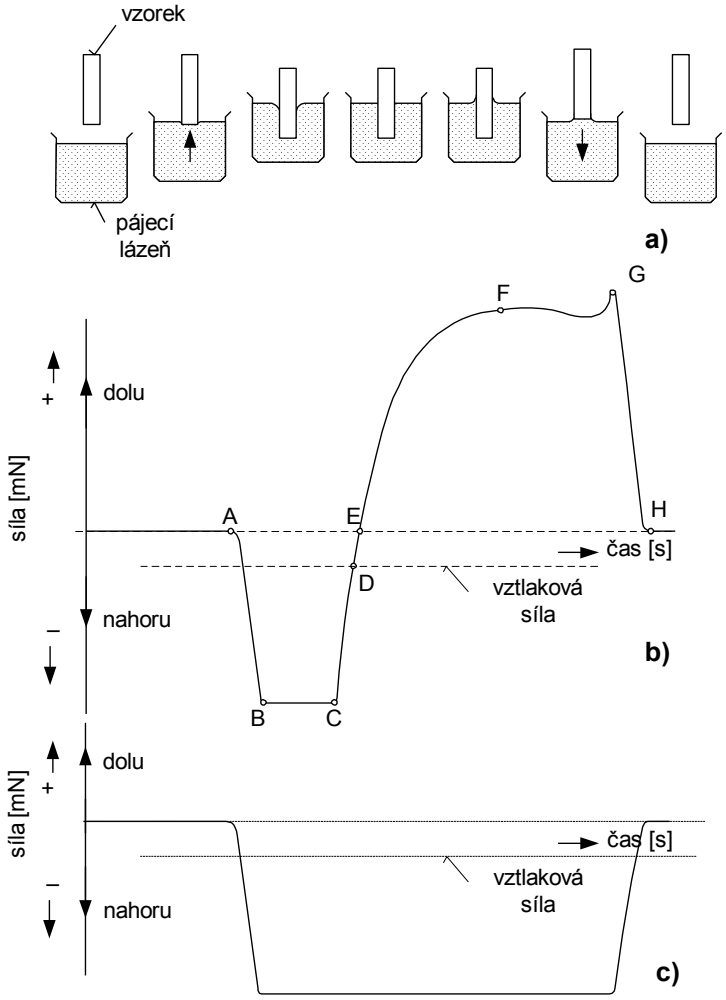
3. Diagnostické metody a jejich použití v praxi

Přes veškeré snahy dochází v průběhu osazení a zapájení součástek na DPS k některým efektům, které mohou mít dopad na výslednou kvalitu výrobku. Zjištění konkrétní příčiny je v mnohých případech velmi komplikované. Pro kvantifikaci příčiny chyby se používá celá řada metod. Některé vybrané metody spolu s příklady jejich použití jsou uvedené v následující části.

3.1. Pájitelnost, měření povrchového napětí

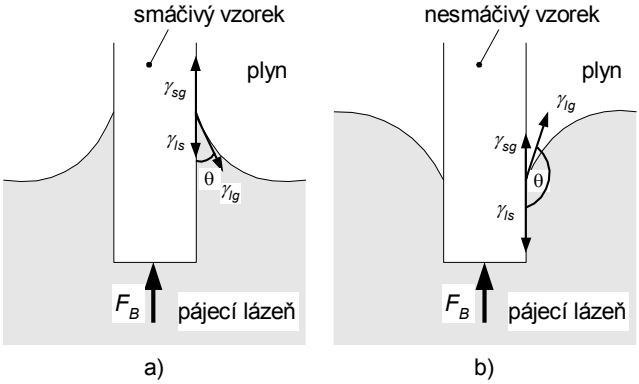
Metoda smáčecích vah umožňuje porovnání různých kombinací materiálu z pohledu pájitelnosti a za určitých podmínek umožňuje změření povrchového napětí pájecí slitiny. Princip metody spočívá v měření síly (smáčecí síly – F_{wet}), která působí na vzorek během jeho ponoření a posléze vytažení z pájecí lázně. Hmotnost zkušebního vzorku je na začátku měření kompenzována. Ilustrace časových průběhu měřené síly pro smáčivý a nesmáčivý vzorek spolu s vyznačením polohy pájecí lázně a vzorku, jsou znázorněný na obrázku 2.

Velikost povrchového napětí příslušné pájky je možné, za určitých podmínek, získat měřením na meniskografu, kdy při standardních metodách měření je zapotřebí znát hodnotu změřené smáčecí síly a hodnotu úhlu smáčení. Pro bližší představu je na obrázku 3 schematicky znázorněn smáčivý a nesmáčivý vzorek, spolu s jednotlivými vektory povrchového napětí (materiálu (s) – pájky (l) – atmosféry (g)), ponořený do roztavené pájecí lázně.



Obr. 2: Schematické znázornění závislost měřené síly na čase

a) poloha vzorku vzhledem k pájecí lázni
b) časový průběh síly pro smáčivý vzorek
c) časový průběh síly pro nesmáčivý vzorek



Obr. 3: Schematické znázornění a) smáčivého, b) nesmáčivého vzorku ponořeného do roztavené pájecí slitiny

Pro popis jednotlivých sil působících na smáčivý vzorek je možné použít vztahu:

$$0 = P \cdot \gamma_{lg} \cdot \cos\ \theta + P \cdot \gamma_{ls} - P \cdot \gamma_{sg} - \Delta\rho \cdot g \cdot V = P \cdot \gamma_{lg} \cdot \cos\ \theta - P \cdot (\gamma_{sg} - \gamma_{ls}) - F_b \qquad (1)$$

kde:

F_b – vztlaková síla (N),

γ_{ls} , γ_{sg}, γ_{lg} – povrchová napětí ($N.m^{-1}$),

P – obvod vzorku (m),

θ – úhel smáčení,

g – gravitační zrychlení ($m.s^{-2}$),

$\Delta\rho$ – je rozdíl hustot pájky a plynu ($kg.m^{-3}$),

V – ponořený objem vzorku (m^3),

Rozdíl mezi γ_{sg} a γ_{ls} je označován jako smáčecí síla na jednotku délky. Výsledná smáčecí síla je tedy rovna:

$$F_{wet} = P \cdot (\gamma_{sg} - \gamma_{ls}) \qquad (2)$$

Dosazením rovnice (2) do rovnice (1) získáme výsledný vzorec, který se běžně používá ke zjišťování hodnoty povrchového napětí při měření meniskografem:

$$F_{wet} = F_{\gamma} - F_b = P.\gamma_{\mathrm{lg}}.\cos\theta - \Delta\rho.g.V \qquad (3)$$

kde: F_{wet} – měřená smáčecí síla (N),
F_{γ} – síla povrchového napětí roztavené pájky (N),
F_b – vztlaková síla (N),
γ_{lg} – povrchová napětí (N.m^{-1}).

Nevýhodou této metody je, že pro určení hodnoty povrchového napětí pájecí slitiny je, kromě znalosti hodnoty měřené smáčecí síly, nutná znalost hodnoty úhlu smáčení. Ta se však běžně neměří.

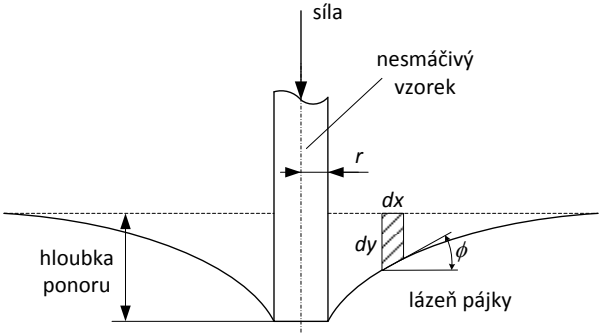
Zjištění povrchového napětí bez nutné znalosti úhlu smáčení je možné pomocí metody, která je podrobně popsána a odvozena v publikaci [1] Principem této metody je využití nesmáčivého vzorku, který bude ponořen do roztavené pájky, pouze po jeho spodní okraj viz obrázek 4. Za těchto podmínek je pak možné určit hodnotu povrchového napětí na základě následující rovnice:

$$\gamma_{\mathrm{lg}} = \frac{1}{P^2 \cdot \Delta\rho \cdot g} \cdot \left(\frac{F_{wet}}{y} + \frac{p \cdot r \cdot \Delta\rho \cdot g}{2} \right)^2 + \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot y^2}{4} \qquad (4)$$

kde:

γ_{lg} – povrchové napětí pájecí slitiny (N.m^{-1}),
P – obvod vzorku (m),
g – gravitační zrychlení (m.s^{-2}),
y – hloubka ponoru (m),
$\Delta\rho$ – je rozdíl hustot pájky a plynu (kg.m^{-3}),
F_{wet} – měřená smáčecí síla (N),
r – poloměr vzorku (m),
V – ponořený objem vzorku (m^3).

Všechny veličiny, kromě měřené smáčecí síly, jsou v rovnici (4) konstantní. Můžeme tedy říci, že velikost povrchového napětí je úměrná pouze velikosti měřené smáčecí síly F_{wet}.



Obr. 4: Schematické znázornění metody měření povrchového napětí pájky bez nutné znalosti úhlu smáčení.

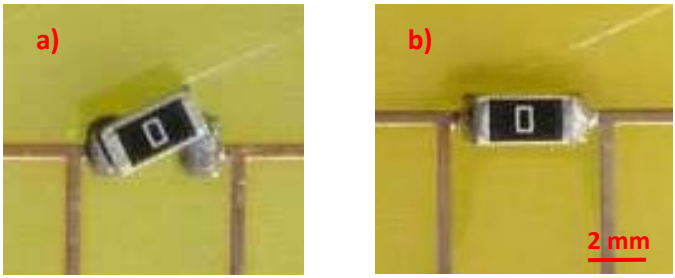
Pomocí výše zmíněné metody, byla změřena povrchová napětí pro vybrané typy pájecích slitin, při teplotě 250°C viz tabulka 1.

Tab. 1: Povrchové napětí pro vybrané typy pájecích slitin [1]

Pájecí slitina	Povrchové napětí (mN/m)
Sn63Pb37	418,3
SnAg3,8Cu0,7	559,9
Sn95Sb3,5Cu1,5	490,6
Sn99,75	553,3
Sn95Sb5	401,9
Sn97Bi2Cu1	480,9
SnAg4	560
SnCu1	552,1
SnCu3	567,0

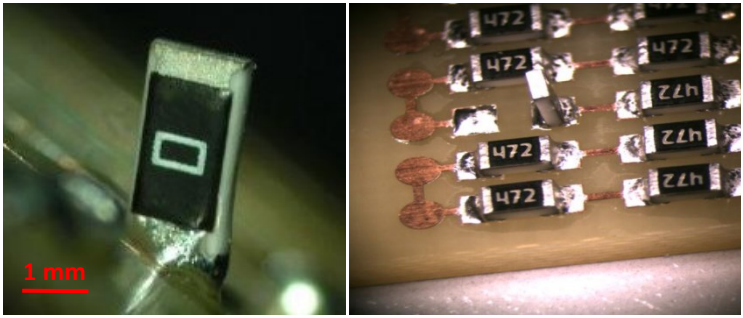
Povrchové napětí spolu se smáčecí silou mají za následek četné jevy, mezi které patří například: efekt samo-vyrovnání (self-alignment), efekt nahrobního kamene (tombstone), tvorbu zkratů apod.

Efekt samo-vyrovnání součástky – tento efekt je z pohledu spolehlivosti pozitivní, kdy v průběhu procesu pájení (při přetavení pájecí pasty) dochází vlivem povrchového napětí a smáčení k posuvu součástek. Součástka, která je nepřesně osazená, má tendenci se vůči pájecím ploškám vyrovnat. V publikaci [2] je tento efekt porovnán z pohledu vlivu velikosti úhlu natočení součástky vzhledem k ose správného osazení, vlivu charakteru a množství pájecí pasty a vlivu technologie přetavení. Lépe v experimentu dopadla olovnatá pájecí slitina než bezolovnaté pájecí pasty což je dáno rozdílnou hodnotou povrchového napětí a nižší mírou oxidace.

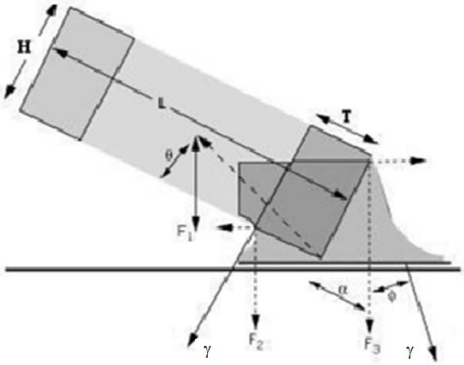


Obr.5: Efekt samo-vyrovnání součástky a) nepřesně osazená součástka před zapájením b) součástka po zapájení [2]

Efekt náhrobního kamene - je charakteristický pro dvou-vývodovou součástku pro povrchovou montáž (SMD surface mount device) , kdy vlivem rozdílné smáčecí síly, která působí na vývody součástky, dojde k jejímu nadzvednutí, viz obrázku 6. Porušení rovnováhy sil v kapalné fázi je zachyceno na obrázku 7.



Obr. 6: Fotografie efektu náhrobního kamene [3]



Obr. 7: Porušení rovnováhy sil v kapalné fázi [4]

Při matematickém vyjádření jednotlivých sil uvedených na obrázku 7, dostaneme rovnici (5), respektive (6). [4]

$$F1 + F2 < F3 \quad (5)$$

$$M.g.[(H+L)/2].\cos(\alpha+\theta)+ \gamma.T.\cos(\alpha/2)< \gamma.H.\cos(\alpha+\varphi) \quad (6)$$

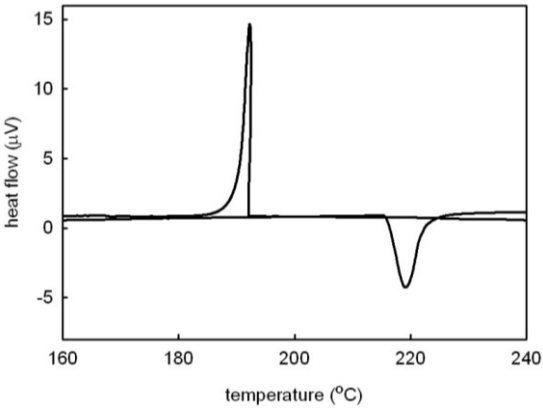
kde:
M - hmotnost součástky (kg),
γ - povrchové napětí roztavené pájecí slitiny (N/m),
α, θ, φ – úhly k příslušným vektorům síly,

H - tloušťka součástky (m),
T - pájecí pásmo součástky (m).

Jev obvykle nastává při rozdílné smáčivosti vývodů nebo plošek, nesymetrické geometrii plošek, výrazně rozdílného množství pastovité pájky na ploškách nebo nerovnoměrným ohřevem součástky apod.
Efektem náhrobního kamene z pohledu vlivu technologie na výskyt tohoto efektu jsem se zabýval v publikaci [3]. Výsledky této práce poukazují na vyšší pravděpodobnost výskytu tombstone effektu u technologie pájení v parách. Tato technologie je specifická použitím pájecí kapaliny (tzv.galdenu) která v průběhu procesu pájení kondenzuje na osazené desce plošného spoje.
Touto problematikou se v současnosti zabývám z pohledu působení pájecí kapaliny (galdenu – kapalina, která se používá u technologie pájení v parách) na změnu smáčení a povrchového napětí.

3.2. Analýza termických dějů

Jednou z metod pro analýzu termických dějů je diferenciální skenovací kalorimetrie DSC (differential scanning calorimetry). Princip metody je založen na měření změny dodané, respektive uvolněné, tepelné energie v případě, že je teplota měřeného a referenčního vzorku udržována na stejné hodnotě. Pomocí DSC se určuje zejména teplota a měrné skupenské teplo fázové přeměny. Tato metoda se široce využívá pro určení teploty tání/tuhnutí, měrného skupenského tepla fázové změny, teploty skelných přechodů apod. Příklad naměřeného průběhu pro slitinu Sn96,5Ag3Cu0,5 je uveden na obrázku 8.



Obr. 8: Naměřená křivka DSC při ohřevu/chlazení pájecí slitiny Sn96,5Ag3Cu0,5 [5]

Metodu DSC jsme použili při sledování vlivu teploty na tvorbu intermetalických sloučenin v pájených spojích pro pájecí slitiny Sn96Ag4, Sn99Cu1, Sn97Cu3, Sn96.5Ag3Cu0.5, Sn95.5Ag3.8Cu0.7 a Sn63Pb37. Výsledky jsou prezentovány v příspěvku [6]. Z výsledků je jasně patrné, že teplota má významný vliv na tvorbu intermetalických sloučenin, které ovlivňují vlastnosti pájecí slitiny, včetně její teploty tání/tuhnutí.
Termickou analýzu zahrnují i další metody jako je termogravimetrie, diferenční termická analýza DTA (Differential thermal analysis), dilatometrie a některé další méně používané metody.

Další metodou, která se používá při analýze termických dějů, je měření teplotního profilu.
Teplotní profil je závislost teploty na čase a je primárně měřen při nastavování a sledování teploty v pájecích pecích. Teplotní profil je jedním z důležitých aspektů, které mají vliv na výslednou kvalitu pájeného spoje. Jeho korektní nastavení je

důležité z pohledu správného přetavení pájecí slitiny, správné aktivace tavidla a nepřekročení maximálních doporučených teplot součástek a DPS.

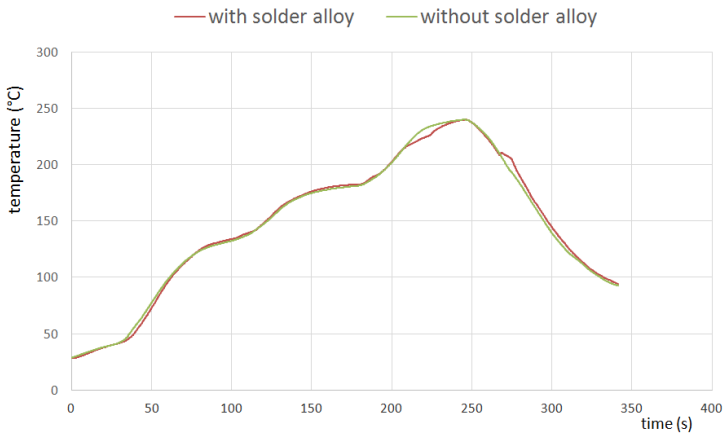
Teplotní profil je v průmyslové praxi nejčastěji měřen termočlánky a zařízením, které se nazývá profilometr. Profilometr umožňuje vícekanálové měření teploty a společně s termočlánky a DPS prochází pecí. Teploty jsou průběžně ukládány do paměti profilometru a následně vyhodnoceny. Termočlánky se fixují na DPS na predikovaná kritická místa, protože teplota na DPS není stejná, je dána materiálem a velikostí jednotlivých komponent, skladbou DPS, typem technologie apod.

Například technologie ohřevu pomocí infračerveného záření vykazuje mnohem větší rozdíly teploty na DPS oproti technologii pájení konvekcí nebo pájení v párách. Více o této problematice je pojednáno v příspěvku [7].

Monitoring teplotního profilu pomocí profilometru se rovněž používá při odhalování chyb, které jsou způsobené nesprávným průběhem teploty (maximální teplota, čas, gradient teploty apod.) Mezi tyto chyby mohou patřit nezapájené spoje, vznik trhlin (většinou díky rozdílné teplotní roztažnosti materiálů), prskání pájecí pasty, špatná smáčivost a další.

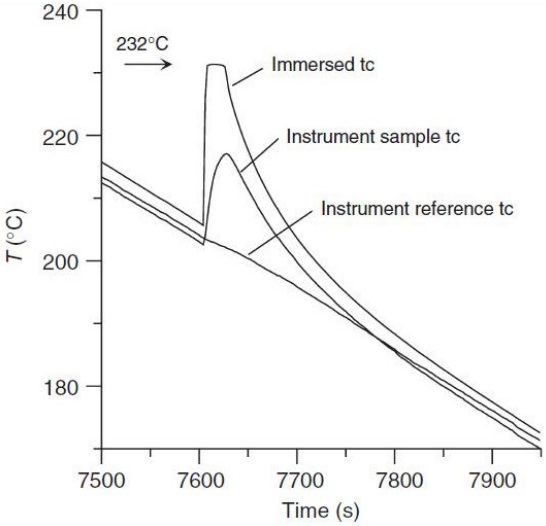
Za určitých podmínek, kdy se použije citlivých termočlánků, je možné při měření teplotních profilů zaznamenat vliv skupenského tepla tání/tuhnutí pájecí slitiny na okolní teplotu. Tento vliv je patrný z experimentu, kdy byl nejprve změřen teplotní profil u pájecí plošky bez přítomnosti pájecí slitiny a následně teplotní profil té samé pájecí plošky, na které byla přetavena pájecí slitina Sn96,5Ag3Cu0,5 (o hmotnosti 25 mg). Teplotní profil byl změřen pomocí termočlánku (typ K, průměr perličky 0,5 mm) fixovaného pod měděnou pájecí plošku o rozměrech 2 x 3 mm do předem připraveného otvoru o průměru

1 mm. Takto naměřené teplotní profily (bez a se slitinou na pájecí plošce) jsou uvedené na obrázku 9.

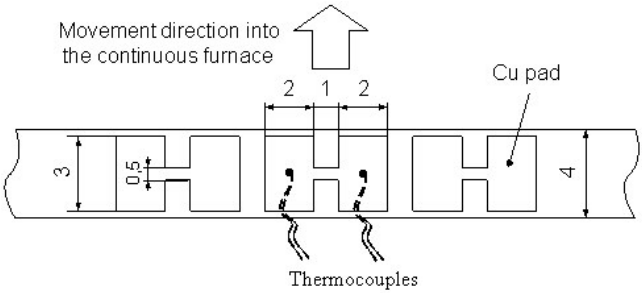


Obr. 9: Naměřené teplotní profily pro pájecí plošku bez přítomnosti pájecí slitiny a pro pájecí plošku, na které byla posléze přetavena pájecí slitina (25 mg, Sn96,5Ag3Cu0,5)

Literatura uvádí [8], že při chladnutí (rychlostí 5 K/min) malého množství (konkrétně 163,2 mg) čistého cínu může skupenské teplo vyvolat uvnitř tohoto kovu nárůst teploty až o 20-30°C. Díky skupenskému teplu dochází k okolní změně teploty, kdy roztavení pájecí slitiny okolní teplotu snižuje, zatímco její tuhnutí okolní teplotu zvyšuje. Změna teploty závisí na mnoha faktorech (hustota pájených spojů, množství pájky, tepelná vodivost apod.) Díky tomu se může teplota v okolí pájených spojů podstatně lišit oproti předpokládané teplotě, která je v peci. Příkladem muže být experiment, kdy byl měřen vliv skupenského tepla na vzorku DPS se dvěma pájecími ploškami, pod které byly umístěny termočlánky a které jsou propojené vodivou cestou. Schematicky je vzorek zachycen na obrázku 11.



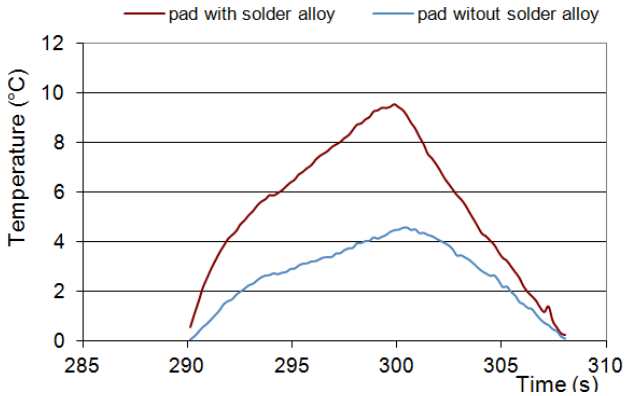
Obr. 10: Chladnutí čistého cínu 5K/min [8]



Obr. 11: Schematické znázornění testovacího vzorku

V případě že provedeme při procesu přetavení měření teploty s nanesenou pájecí pastou (25mg, Sn96,5Ag3Cu0,5) pouze na jedné pájecí plošce dojde v místě plošky s pájecí pastou při chladnutí (v době uvolnění skupenského tepla) k nárůstu teploty téměř o 10 °C. Tepelně je ovlivněna i ploška, na které nebyla

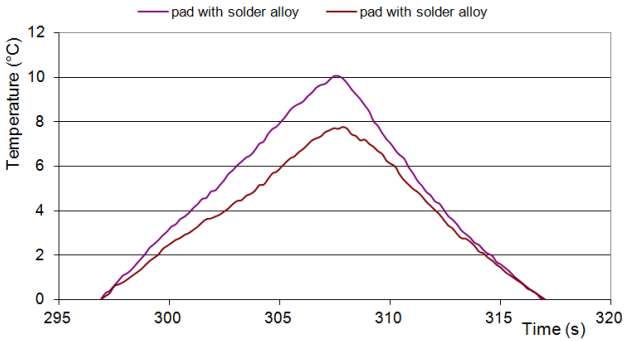
nanesena pájecí pasta a kde došlo k nárůstu teploty téměř o 5 °C - viz obrázek 12.



Obr. 12: Průběh nárůst teploty při chladnutí pájecí slitiny (25mg, Sn96,5Ag3Cu0,5) na pájecí plošce se slitinou a na pájecí plošce bez slitiny.

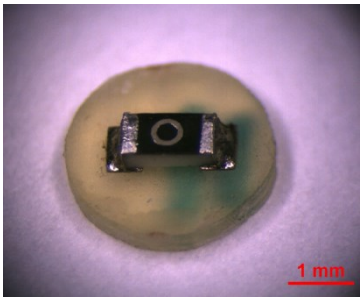
K vyššímu nárůstu teploty při tuhnutí pájecí pasty pak došlo v případě, kdy byla pájecí pasta (25mg, Sn96,5Ag3Cu0,5) nanesena na obě pájecí plošky. Výsledek nárůstu je patrný z obrázku 13.

Nárůst teploty při tuhnutí pájených spojů není stejný neboť i přes stejné množství pájecí pasty na obou ploškách začne pájecí slitina na jedné plošce tuhnout dříve. Toto je dáno nejenom okolními termickými vlastnostmi a nanesením nepřesného množství pájecí pasty, ale také strukturou pájeného spoje, tvorbou intermetalických sloučenin apod. Podrobněji jsou výsledky popsány v publikaci [5], [9].



Obr. 13: Průběh nárůst teploty při chladnutí pájecí slitiny (25mg, Sn96,5Ag3Cu0,5) na pájecích ploškách se slitinou.

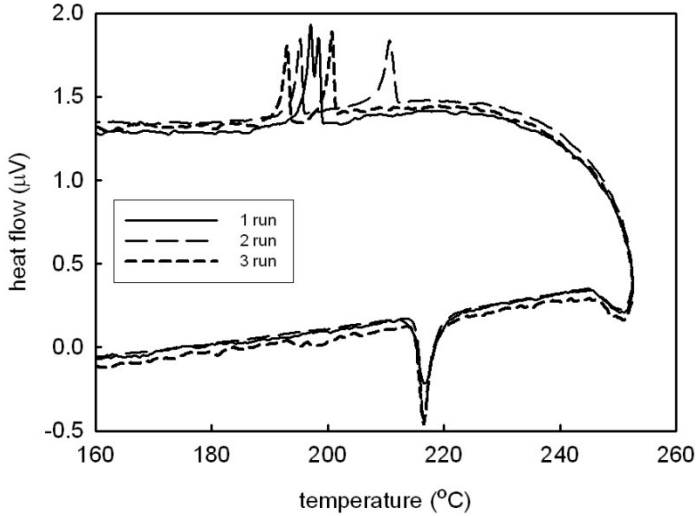
Vliv struktury spoje, respektive intermetalických sloučenin, je jasně patrný z dalšího experimentu, kde byl navržen experiment pro měření termických dějů na reálné sestavě – zapájená součástka (SMD odpor typ 0603, pájecí slitina Sn96,5Ag3Cu0,5) na DPS (měděné pájecí plošky bez povrchové úpravy). Fotografie vzorku je zachycena na obrázku 14.



Obr. 14: Fotografie vzorku (SMD odpor typ 0603) určeného pro měření v DSC

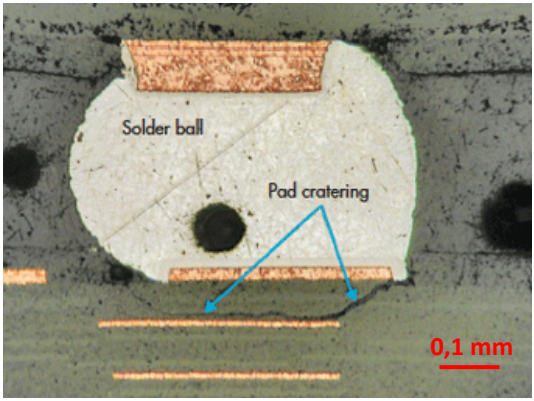
Tento vzorek byl vložen do DSC a byl aplikován několikanásobný cyklus ohřevu a ochlazení (celkem 3 běhy). Výsledky naměřených charakteristik pro jednotlivé běhy jsou

uvedené na obrázku 15. Na změřených průbězích jsou jasně patrné dvě špičky v oblasti tuhnutí, které prokazují vliv skupenského tepla. Uvolněné skupenské teplo při tuhnutí jednoho spoje ovlivňuje tuhnutí druhého spoje. Zároveň je patrné, že s každým dalším cyklem se mění teplota tuhnutí a doba mezi tuhnutím spojů, což způsobuje především změna vlastností vzorku (respektive vlastnosti pájecí slitiny, především tvorbou intermetalických sloučenin).



Obr. 15: Naměřené průběhy DSC pro ohřev/chlazení (3 běhy) zapájeného rezistoru (SMD odpor typ 0603, pájecí slitina Sn96,5Ag3Cu0,5) na DPS.

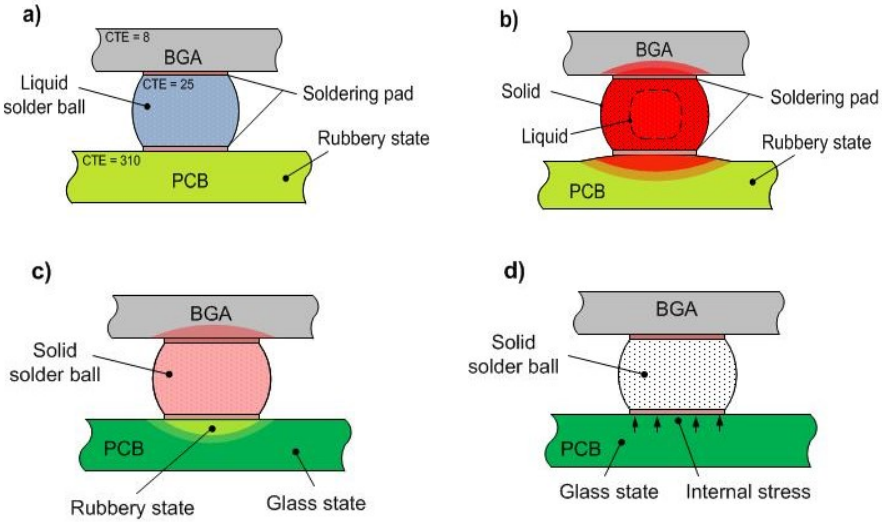
Uvolnění skupenského tepla, které má za následek další ohřev, může mít vliv na některé typy vad jako například již zmíněný efekt náhrobního kamene, ale i na mnohé další, které souvisí s tepelnou roztažností materiálu. Příkladem může být tzv. "pad cratering defect", kdy se jedná o trhlinu, která se objeví pod pájecí ploškou, viz obrázek 16.



Obr. 16: Fotografie výbrusu vývodu BGA připájeného na DPS s pad cratering defektem [10]

Zachycení vlivu skupenského tepla při tuhnutí pájecí slitiny na pad cratering defekt pro součástku BGA (ball grid array) je schematicky znázorněno na obrázku 17. Teplota celého systému (součástky, DPS, pájecí slitiny) se nachází ve stavu nad teplotou tavení pájecí slitiny, viz obr 17a. Pro běžně požívané bezolovnaté pájecí slitiny typu SnAgCu je teplota tuhnutí okolo 220 °C. Při této teplotě se běžné používané DPS (materiál FR 4 - na bázi skelné tkaniny a pryskyřice) nachází v elastickém stavu (ve stavu nad teplotou skelného přechodu - T_g) a má tedy jiné vlastnosti než v tuhém stavu (ve stavu pod teplotou skelného přechodu - T_g). Při tuhnutí nastává uvolnění skupenského tepla, což má za následek lokální nárůstu teploty, viz obrázek 17b. Celý systém dále vychládá a teplota DPS se dostává do tuhého stavu (pod teplotu skelného přechodu). Nicméně oblast DPS v okolí pájeného spoje se (díky uvolněnému latentnímu teplu z pájeného spoje) stále nachází nad teplotou Tg – viz obrázek 17c. Tato oblast je uzavřena mezi pájecí ploškou a již ztuhlou DPS a proto již nemůže libovolně měnit svůj objem a je zdrojem vnitřních pnutí – viz obrázek

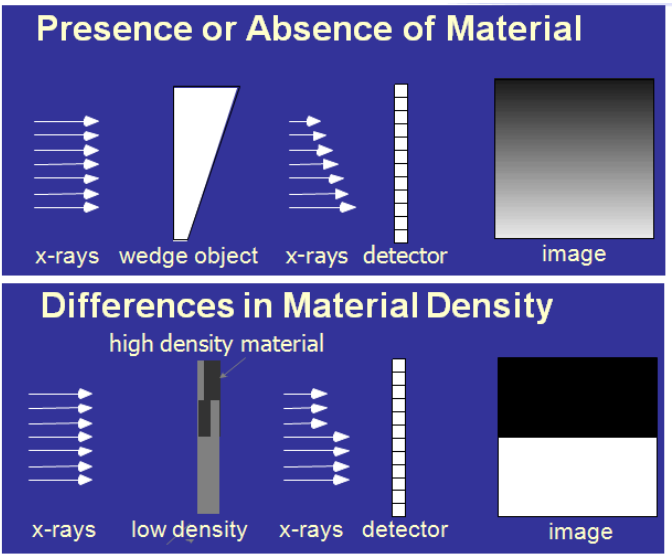
17d. Při následném mechanickém, tepelném namáhání mohou tato pnutí způsobit trhliny pod pájecími ploškami (pad cratering defect). Více o této problematice je uvedeno v publikaci [11].



Obr. 17: Schematické znázornění vlivu skupenského tepla na okolí v průběhu tuhnutí pájeného spoje u součástky BGA [11]

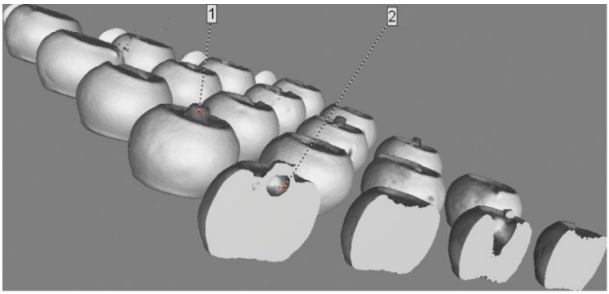
3.3. Rentgenová defektoskopie

Princip RTG defektoskopie spočívá v rozdílné materiálové absorpci rentgenového záření. Materiály absorbují rentgenové záření, úměrně v závislosti na jejich hustotě a tloušťce. Obecně řečeno, materiály z těžších prvků absorbují více rentgenových paprsků a jsou snadno zachyceny, zatímco materiály z lehčích prvků jsou pro rentgenové záření více transparentní. Tento princip je zachycen na obrázku 18.



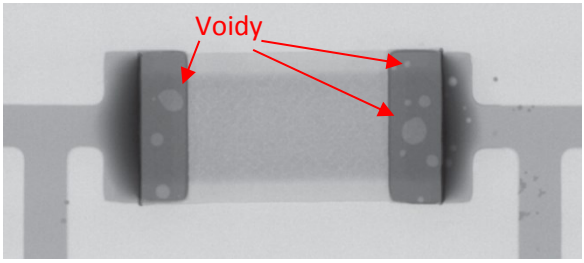
Obr. 18: Princip RTG inspekce - vliv materiálu

Proto se RTG defektoskopie s výhodou používá pro kontrolu skrytých vad (vady, které jsou uvnitř materiálu, nebo jsou špatně přístupné – nedetekovatelné běžnými inspekčními metodami). RTG určené pro diagnostické účely mají oproti inspekčním RTG, které jsou součástí výrobní linky, obvykle lepší pozorovací možnosti (rozlišení, zvětšení apod.) a většinou jsou vybavené počítačovou tomografii CT (computer tomography). Příklad snímku vývodů u BGA pouzdra vytvořeného RTG s CT je uveden na obrázku 19.



Obr. 19: RTG s CT - snímek vývodů BGA pouzdra [12]

V oblasti technologie montáže součástek na DPS se RTG defektoskopie používá pro inspekci zkratů, otevřených spojů, množství pájecí slitiny, trhlin, wirebondingu (kontaktování čipu k vývodům pouzdra), voidů (dutiny uvnitř pájených spojů) apod. RTG snímek s voidy v pájených spojích u osazené součástky (SMD rezistor, typ 1206) je uveden na obrázku 20.



Obr. 20: RTG snímek s voidy v pájených spojích u osazené součástky (SMD rezistor, typ 1206)

Tématikou RTG inspekcí voidů z pohledu vlivu použitého tavidla v pájecí pastě a teplotního profilu jsem se zabýval například ve článku [13] V publikaci bylo upozorněno především na signifikantní vliv tavidla na výskyt voidů v pájených spojích.

3.4. Defektoskopie pomocí výbrusu

Mnohé defekty, jako například výše uvedený pad cratering defekt jsou velmi špatně detekovatelné a neobjeví ho ani mnohé sofistikované metody, jako například RTG. Pro jeho nalezení se proto provádí metoda výbrusu vzorku. Jedná se o metodu, kdy se provede řez vzorku. Vyříznutý vzorek se zafixuje do fixační hmoty (plast, epoxidová pryskyřice, apod.), následuje broušení vzorku na oblast zájmu. Pro jemnější analýzu vzorku se oblast zájmu leští, případně leptá. Výbrus vzorku je většinou předmětem následné analýzy pomocí mikroskopie. Nevýhodou této metody je destrukce vzorku. Kromě trhlin se této metodiky používá k analýze intermetalických sloučenin, hodnocení struktury spoje apod.

3.5. Elektronová mikroskopie

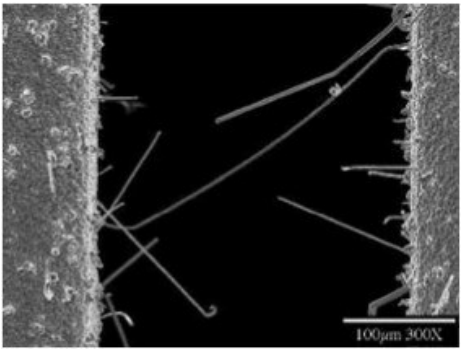
Elektronové mikroskopy se standardně dělí do dvou skupin:

- transmisní elektronová mikroskopie TEM (Transmission elektron microscope),
- rastrovací elektronová mikroskopie SEM (Scanning electron microscope).

U transmisního i skenovacího elektronového mikroskopu je pro tvorbu obrazu zásadní interakce urychlených elektronů se vzorkem. Je důležité si však uvědomit, že u SEM elektrony na vzorek dopadají, zatímco u TEM elektrony vzorkem prochází.

Při srážkách urychlených elektronů s elektrony v orbitalech atomů dochází mimo jiné k excitaci atomů a následné emisi charakteristického rentgenového záření. Toho se výhodou využívá pro analýzu chemického složení vzorku pomocí energiově disperzní rentgenové spektroskopie EDX (Energy dispersive X-ray spectroscopy).

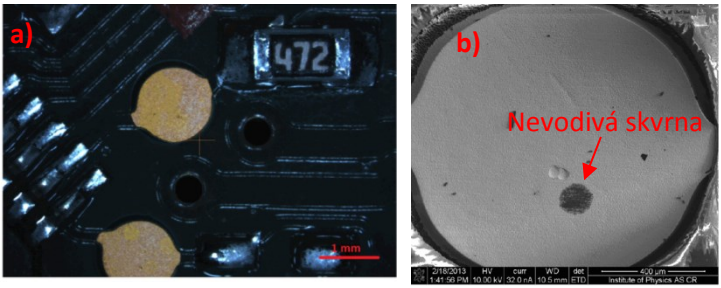
V oblasti analýz u technologie povrchové montáže ve většině případů používá rastrovací elektronová mikroskopie SEM, která primárně slouží k zobrazení povrchu sledovaných vzorků. S výhodou se elektronové mikroskopie SEM využívá pro: sledování whiskerů - nejčastěji se jedná o krystaly čistého cínu, které rostou z pájených spojů a z pocínovaných povrchů (viz obr. 21), analýzu struktury pájeného spoje včetně intermetalických sloučenin, ale také pro charakterizaci materiálového složení.



Obr. 21: Cínové whiskery

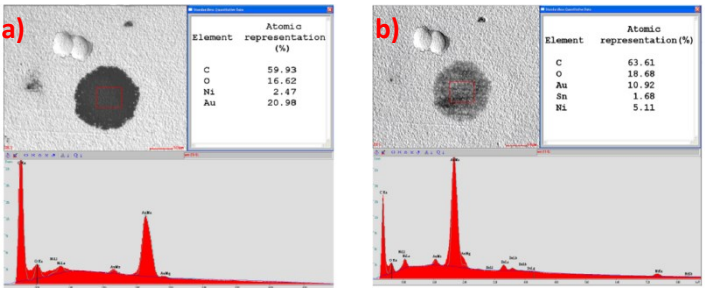
Elektronovou mikroskopii, respektive analýzu chemického složení vzorků pomocí EDX, jsme s výhodou využili například k identifikaci zdroje skvrn, které se objevovaly na testovacích ploškách (plošky určené pro kontaktování při elektrickém testu) při hromadné výrobě.
Fotografie testovacích plošek na DPS z optického mikroskopu je uvedená na obrázku 22a a fotografie samotné testovací plošky z elektronového mikroskopu je uvedena na obrázku 22b. Na obrázku 22b je jasně patrná černá skvrna residua a dva vpichy po testovacích jehlách elektrického testu. Černá skvrna má izolační charakter a v případě kontaktu testovacích jehel je

příčinou selhání testu, respektive elektrický test vyhodnotí výrobek, jako vadný, přestože je jinak plně funkční. Potencionálním zdrojem nevodivých skvrn mohou být chemické sloučeniny použité při výrobě DPS (například nepájivá maska), při šablonovém tisku (například nevhodná čistidla, kontaminace z pájecí pasty), použití nevhodných, nekompatibilních materiálů (například silikonový olej při údržbě stroje) apod.



Obr. 22: a) fotografie testovacích plošek na DPS
b) snímek testovací plošky z elektronového mikroskopu

Analýza zdroje residuí byla provedena pomocí elektronové mikroskopie SEM, kde kromě porovnání složení materiálů jsme především využili změny hloubky penetrace svazku elektronů urychlovacím napětím. Výsledky analýzy se změnou penetrace svazku jsou zachyceny na obrázku 23.



Obr. 23: Analýza chemického složení nevodivé skvrny za pomoci rozdílného urychlovacího napětí a) 5kV, b) 12kV

Díky vyššímu urychlovacímu napětí se nám pod nevodivou skvrnou podařilo objevit stopy cínu. Což potvrdilo, že zdrojem skvrn je tavidlo. Při procesu přetavení pájecí pasty dochází k rozstřikování tavidla z pájecí pasty, tavidlo při tom na sebe může navázat částice pájecí slitiny, ta má vyšší hustotu, než tavidlo a proto se pájecí slitina vyskytuje na testovací plošce pod nevodivou-tavidlovou skvrnou. Více o této problematice je uvedeno ve článku [14], kde kromě podrobnějších informací ohledně analýzy skvrn je poukázáno i na možné způsoby, jak tento defekt potlačit/odstranit.

4. Závěr

V omezeném rozsahu tohoto textu jsem se pokusil představit vybrané kontrolní a diagnostické metody, které se používají u technologie montáže součástek na desku plošného spoje. Kromě popisu diagnostických metod jsem se snažil uvést příklady použití těchto metod a to především z prakticky orientovaného pohledu s ohledem na různé typy problémů, které se mohou technologie montáže součástek na desku plošného spoje vyskytnout. Téměř u všech prezentovaných příkladů se odkazuji na vlastní vybrané publikace, které se touto problematikou podrobněji zabývají.

Tématika pájení je velice široká, pokrývá nejen oblast diagnostických metod, ale i oblast používaných materiálů, technologii pájení včetně navazujících technologií, spolehlivost a životnost spoje, hodnocení nákladů spojených s výrobou apod.

Díky vývoji nových materiálů, neustálé miniaturizaci komponent, inovacím v technologiích a diagnostice se v tomto oboru objevují další výzvy, které je třeba řešit.

Momentálně se v této oblasti zabývám růstem dendritů, vlivem heating faktoru na intermetalické sloučeniny, vlivem pájecí kapaliny (galdenu) na pájecí proces u pájení v parách, termickými vlastnostmi používaných materiálů a technologií ultrazvukového pájení.

Literatura

[1] K. Dušek, J. Urbanek, 'Surface tension measurement of the solders by non-wetting specimen', in *2008 31st International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2008, pp. 354–357.

[2] K. Dušek, M. Novak, A. Rudajevova, 'Study of the components self-alignment in surface mount technology', in *2012 35th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2012, pp. 197–200.

[3] K. Dusek, V. Straka, M. Brejcha, I. Beshajova Pelikanova, 'Influence of type of reflow technology and type of surface finish on tomb stone effect', in *Electronics Technology (ISSE), 2013 36th International Spring Seminar on*, 2013, pp. 132–135.

[4] I. Plotog, G. Varzaru, C. Turcu, T. C. Cucu, N. D. Codreanu, 'DFM SOLUTIONS FOR TOMBSTONING IN VAPOUR PHASE SOLDERING TECHNOLOGY BASED ON THE RESEARCH PROJECT'.

[5] K. Dušek, A. Rudajevová, M. Plaček, 'Influence of latent heat released from solder joints on the reflow temperature profile', *J Mater Sci: Mater Electron*, vol. 27, no. 1, pp. 543–549, Oct. 2015.

[6] A. Rudajevová, K. Dušek, 'Influence of the thermal history and composition on the melting/solidification process in Sn-Ag-Cu solders', *Kov. Mater.-Met. Mater.*, vol. 50, no. 5, pp. 295–300, 2012.

[7] K. Dušek, T. Váňa, 'Study of temperature profiles of the infrared continuous furnace', in *Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2011, pp. 188–191.

[8] J.-C. Zhao, *Methods for phase diagram determination*. elsevier, 2011.

[9] K. Dušek, M. Plaček, D. Bušek, A. Rudajevová, 'Influence of latent heat on the shape of temperature profile for different types of solder alloys', in *Electronics Technology (ISSE), 2016 39th International Spring Seminar on*, 2016, pp. 214–217.

[10] J. 5 and 2012 Darvin Edwards | Electronic Design, 'PCB Design And Its Impact On Device Reliability'. [Online]. Available:

http://electronicdesign.com/boards/pcb-design-and-its-impact-device-reliability. [Accessed: 20-Mar-2016].

[11] K. Dušek, A. Rudajevová, 'Influence of latent heat released from solder joints II: PCB deformation during reflow and pad cratering defects', *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, pp. 1–8.

[12] K. Dušek, J. Vlach, M. Brejcha, L. Hájková, P. Žák, L. Pospíšil, 'Influence of Humidity on Voids Formation Inside the Solder Joint', *Advanced Science, Engineering and Medicine*, vol. 5, no. 6, pp. 543–547, 2013.

[13] D. Bušek, K. Dušek ,D. Růžička, M. Plaček, P.Mach, J. Urbánek, J. Starý, 'Flux effect on void quantity and size in soldered joints', *Microelectronics Reliability*, vol. 60, pp. 135–140, 2016.

[14] K. Dušek, D. Bušek, 'Problem with no-clean flux spattering on in-circuit testing pads diagnosed by EDS analysis', *Microelectronics Reliability*, vol. 56, pp. 162–169, 2016.

Seznam symbolů a zkratek:

- SPI (solder paste inspection) – inspekce pájecí pasty
- AOI (automated optical inspection) – automatická optická inspekce
- DSC (differential scanning calorimetry) - diferenční skenovací kalorimetrie
- DPS - deská plošného spoje
- CCD (charge-coupled device) - zařízení s vázanými náboji
- RTG – rentgenový, rentgenové zařízení
- DTA (Differential thermal analysis) - diferenční termická analýza
- IR (Infrared) – infračervené
- SMD (surface mount device) - součástky určené pro povrchovou montáž
- SMT (surface mount technology) - technologie povrchové montáže
- BGA (ball grid array) - typ pouzdra integrovaného obvodu pro povrchovou montáž (SMD)
- CT (computer tomography) – počítačová tomografie
- EDX (Energy dispersive X-ray spectroscopy) - energiově disperzní rentgenové spektroskopie
- TEM (Transmission elektron microscope) - transmisní elektronová mikroskopie
- SEM (Scanning electron microscope) - rastrovací elektronová mikroskopie

Karel Dušek

Tituly: Ing. bc. Ph.D.
Datum narození: 19. 12. 1978
E-mail: karel.dusek@fel.cvut.cz
Resarcher ID: C-6557-2016

Pracovní zkušenosti

V roce 2003 absolvoval magisterské studium, obor technologické systémy na Fakultě elektrotechnické. Před dokončením magisterského studia nastoupil v roce 2002 jako odborný pracovník na Univerzitu Karlovu, 1. lékařskou fakultu, kde se v roce 2003 stal asistentem a působil zde na částečný úvazek až do roku 2015. Po dokončení magisterského studia nastoupil na Fakultě elektrotechnické na doktorské studium, obor: Elektrotechnologie a materiály. Při doktorském studiu vystudoval pedagogické minimum na MÚVS, ČVUT, které zakončil obhajobou bakalářské práce: Učební text pro výuku biostatistiky. Od roku 2004 působil na katedře elektrotechnologie ČVUT, FEL jako technik, později (rok 2008) jako odborný asistent. V současné době (od roku 2014) pusobí na ČVUT, FEL jako vedoucí katedry elektrotechnologie.

Pedagogická praxe

Pedagogickou praxi začal od roku 2005 na Univerzitě Karlově, 1. lékařské fakultě a v rámci doktorského studia na ČVUT, FEL. Od té doby cvičil a přednášel na 1. lékařské fakultě, na ČVUT vedl cvičení. Přednášet na ČVUT začal až poté co se v roce 2008 zde stal odborným asistentem.

V rámci 1. lékařské fakulty, UK, vedl celoroční přednášky z fyziky (přípravný kurz fyziky pro přijímací zkoušky), vedl cvičení z biofyziky pro obor: Všeobecné lékařství. Participoval

na přednáškách z biofyziky pro obory Intenzivní péče, Ošetřovatelská péče v anesteziologii, resuscitaci a intenzivní péči.
V rámci ČVUT, FEL vedl cvičení v předmětech Úvod do počítačových systémů, Programování a participoval na cvičeních v předmětu: Výroba výkonových zařízení. Již několik let cvičí v české a anglické verzi povinné předměty: Výkonové součástky a technologie/Technologies in Electrical Engineering a Materiály pro výkonovou elektrotechniku/Materials for Power Electrical Engineering. Dále přednáší v anglické verzi předmětu Manufacturing of Electronic Equipment a v předmětu Svařování a pájení v elektrotechnice, kde má na starosti i část cvičení.
Školitelem více jak 20 bakalářů a 10 diplomantů. Na základě studentské ankety byl několikrát fakultou ohodnocen za vynikající pedagogické výsledky.

Vedení oceněných studentských prací

- V roce 2014 ocenění práce Ing. Daniel Ružička: Studium vlivu množství tavidla na výskyt voidů v pájeném spoji, cena nadace ČEZ
- V roce 2015 ocenění práce Ing. Jan Umlauf: Jakost desek plošných spojů určených pro lakování, cena nadace ČEZ
- V roce 2015 ocenění práce bc. Veselý Petr: Risk analýza pájení čipů, cena nadace ČEZ
- V roce 2012 ocenění práce bc. Vojťecha Nahlíka: Testing of fluxes aggression v rámci konference POSTER 2012

Vědeckovýzkumná činnost za posledních 5 let:

- Je autorem/spoluautorem 8 impaktovaných publikaci (dvě jsou momentálně v tisku). Z toho je u 4 hlavním autorem. Momentální hodnota externích citací je 18 (H-index je 2).
- Je autorem/spoluautorem okolo 20 příspěvků na tuzemských konferencích a v časopisech, včetně dvou vyzvaných přednášek.
- Je autorem/spoluautorem okolo 20 příspěvků na mezinárodních konferencích. Z toho dvakrát oceněn cenou: best poster awards.
- Byl mu udělen užitný vzor s názvem: Zařízení pro sledování úniku těkavých složek a prskání látek.

Nejvýznamější publikace za posledních 5 let:

- **K. Dušek**, C. Stancu, P. V. Notingher, P. Mach, M. Plaček: Experimental and Numerical Analysis of Melting and Solidification of SnAgCu Joints, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, pp. 1445-1455, **2016**.
- **K. Dušek**, A. Rudajevová: Influence of latent heat released from solder joints II: PCB deformation during reflow and pad cratering defects. *Journal of materials science - materials in electronics*., pp. 1-8, **2016**
- **K. Dušek**, A. Rudajevová, M. Plaček: Influence of latent heat released from solder joints on the reflow temperature profile. *Journal of materials science - materials in electronics*., pp. 543-549, **2015**
- Bušek D., **Dušek K.,** Růžička D., Plaček M., Mach P., Urbánek J., Starý J.: Flux effect on void quantity and

size in soldered joints, *Microelectronics Reliability*, **2016**

- **K. Dušek**, D. Bušek: Problem with no-clean flux spattering on in-circuit testing pads diagnosed by EDS analysis. *Microelectronics Reliability*, pp. 162-169, **2016**
- A. Rudajevová, **K. Dušek**: Influence of the thermal history and composition on the melting/solidification process in Sn-Ag-Cu solders. *Kovové materiály*, pp. 295-300, **2012**
- A. Rudajevová, **K. Dušek**: Study of Undercooling and Recalescence During Solidification of Sn 62.5 Pb 36.5 Ag 1 and Sn 96.5 Ag 3 Cu 0.5 Solders in Real Electronic Joints. *Journal of Electronic Materials*, p. 2479-2486, **2014**
- J. Podzemský,V. Papež, J. Urbánek, **K. Dušek**: Influence of Intermetallic Compounds on RF Resistance of Joints Soldered with Lead Free Alloys, *Radioengineering.,* p. 573-579, **2012**

Průmyslové spolupráce za posledních 5 let

- **K. Dušek**: Thermomechanical tests of solder joints **2016**
- J. Sedláček, **K. Dušek**, P. Mach, T. Reichl: Analýza růstu dendritů, **2016**
- **K. Dušek**: Thermomechanical tests of soldered pins. **2015**
- **K. Dušek,** I. Beshajová Pelikánová: Nanášení vodivých vrstev na sklo. **2014**
- **K. Dušek**: Možnosti ultrazvukového pájení u palivových článků **2014**

- **K. Dušek**: Spolehlivost DPS. **2014**
- **K. Dušek**, P. Ježdík: Diagnostika pájených spojů u BGA pouzder. **2014**
- **K. Dušek:** Diagnostika residuí na pájecích ploškách. **2013**
- **K. Dušek**: RTG defektoskopie vadných snímačů PZN-1. **2013**
- **K. Dušek**, J. Vodrážka, M. Horák, M. Brejcha, M. Plaček: Analýza parametrů součástek elektroměrů s ohledem na klimatické podmínky. **2013**.
- **K. Dušek**, J. Vodrážka: Obrazová a RTG inspekce stavu elektorměrů. **2013**
- J. Vodrážka, **K. Dušek**, J. Horník, L. Hrstka: Analýza kvality provedení a součástkové základny elektroměrů - metodika a soubor testů. **2013**
- **K. Dušek**: Defektoskopie - obrazová analýza, RTG vybraných komponent. **2012**
- **K. Dušek**: Diagnostika nesmáčivosti pájecích plošek. **2012**