

Mechanické skúšky spájkovaných spojov

A. Pietriková, J. Ďurišin

Katedra technológií v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky, TU v Košiciach,

Park Komenského 2, Košice

E-mail : alena.pietrikova@tuke.sk

Anotácia:

Kvalita a životnosť spájkovaných spojov je ovplyvnená nielen samotnou spájkovacou pastou, teda zmesou guľôčok spájky a tavidla, ale aj samotným teplotným profilom spájkovania, povrchovou úpravou spájkovaného povrchu a v neposlednom rade starnutím. Na základe normalizovanej mechanickej skúšky je možné určiť vývoj a správanie sa mikroštruktúry spoja vplyvom týchto faktorov.

ÚVOD

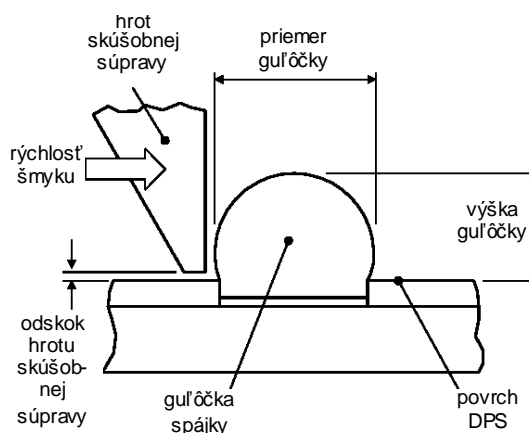
Mikroštruktúra spájkovaného spoja ovplyvňuje všetky jeho vlastnosti. Výsledky akýchkoľvek skúšok spájkovaného spoja odrážajú stav jeho mikroštruktúry. Mechanické skúšky samozrejme nie sú výnimkou. Účinnou metódou posudzovania mechanických vlastností spájkovaného spoja je norma Solder Ball Shear JESD22-B117A, vydanou JEDEC Solid State Technology Association v októbri 2006 [1]. Táto norma patrí ku štandardným spôsobom testovania spájkovaných spojov v oblasti technológií povrchovej montáže[2].

1. NORMA JESD22-B117A

Plastická čiže časovo nezávislá (trvalá) deformácia bezolovnatých spojov súvisí so správaním sa materiálov, ktoré sú pomerne rýchlo zaťažované. Približná hranica medzi pružnou (časovo závislou) a plastickou deformáciou sa pre spájky pohybuje na úrovni 10^{-4} až 10^{-5} s⁻¹[3]. Doteraz bolo študovaných mnoho javov, ktoré spôsobujú porušenie spájok, avšak v prípade spojov používaných v elektronike sa stretávame najmä s potrebou porozumieť tiež efektu správania sa materiálov, ak sa nachádzajú v malých objemoch, napr. ako spoje v elektronike, ktorých rozmery sú často menšie ako 100 μm. Testy vykonávané na spájkach malých rozmerov je možné vykonávať ťahom, tlakom alebo šmykovým namáhaním. Najjednoduchšou sa javí technika namáhania šmykovým namáhaním, avšak tento test je veľmi citlivý na geometriu, resp. úplné definovanie rozmerov spájkovaného spoja.

Účelom testu vykonaného v súlade s normou JESD22-B117A je stanoviť odolnosť guľôčok spájky voči mechanickým šmykovým silám resp. namáhaniu, ktoré môžu pôsobiť na spájkovaný spoj počas výroby, manipulácie, prepravy a pri samotnom používaní hotového zariadenia. Guľôčky spájky sú testované individuálne. Podstatná je nielen výsledná maximálna šmyková sila (odtrhová pevnosť), ale aj priebeh deformácie a spôsob porušovania spájkovaného spoja. Princíp skúšky na báze uvedenej

normy je znázornený na nasledujúcom obrázku (Obr. 1).



Obr. 1: Princíp skúšky odtrhu guľôčky šmykom [1]

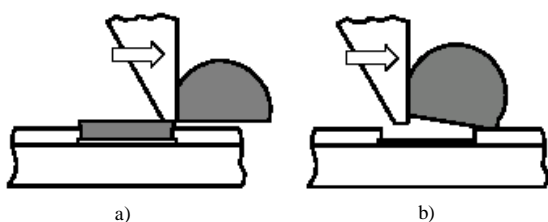
Norma JESD22-B117A je vhodná najmä pre bezolovnaté spájky na ľubovoľnej báze, napr.: SnAg, SnCu, SnAgCu atď. Taktiež základný materiál dosiek plošných spojov (DPS) a vodivých dráh, resp. ich povrchová úprava by mala zodpovedať bežne používaným štandardom v priemysle.

Pre stanovenie mechanických vlastností pomocou odtrhu guľôčky šmykovým namáhaním je dôležité presne stanoviť podmienky skúšky:

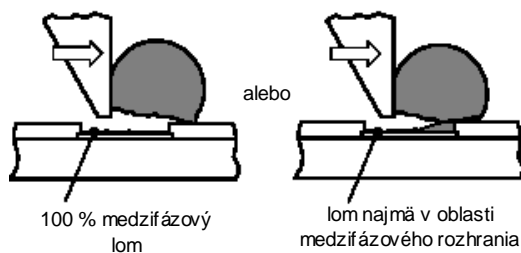
1. Umiestnenie testovaných guľôčok na DPS: poloha testovacích guľôčok sa volí na DPS tak, aby hrot testovacieho zariadenia pri svojom pohybe nepoškodzoval susedné guľôčky.
2. Pohyb hrotu nesmie byť ovplyvňovaný inými faktormi (neplanárna DPS, znečistenie, a pod.), aby záznam skúšky bol následne analyzovateľný, neskraslený.
3. Odskok hrotu od povrchu DPS by nemal byť viac ako 25 % výšky guľôčky (odporúča sa 10 %).
4. Kontrola kvality testovacieho hrotu: testovací hrot je potrebné pravidelne kontrolovať z dôvodu jeho opotrebenia vplyvom trenia o guľôčky.
5. Rýchlosť pohybu hrotu podstatne ovplyvňuje správanie sa materiálu. Môže sa pohybovať v oblasti malých rýchlostí v rozmedzí 100-800 μm/s alebo v oblasti vysokých rýchlostí

v rozmedzí (0,01-1 m/s), pričom v priemysle sa najčastejšie vyskytuje rýchlosť v rozmedzí 100-600 $\mu\text{m/s}$ [2]. Pri zaťažovaní vysokou rýchlosťou môže dôjsť k výskytu lomu na medzifázovom rozhraní spájka/spájkovacia ploška pravdepodobnejšie ako pri testovaní nízkou rýchlosťou. S nárastom rýchlosti rastie aj šmyková sila spájkovaného spoja.

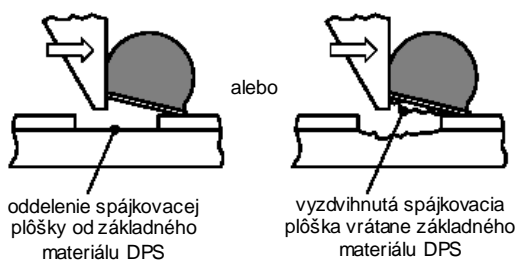
6. Výsledkom každého testu je nielen samotný grafický záznam priebehu samotného testu, ale aj možnosť vizuálneho posúdenia spôsobu porušenia spájkovaného spoja. Vizuálna kontrola spolu so záznamom umožňujú určenie presných príčin spôsobu porušenia spoja.



Obr. 2: a) Tvárny lom b) Zodvihnutie guľôčky spájky



Obr. 3: Krehký lom



Obr. 4: Vytrhnutie guľôčky spolu so spájkovacou ploškou [2]

K porušeniu môže dôjsť týmito základnými spôsobmi:

- a) tvárny lom (v celom objeme spájky) – Obr. 2a,
- b) zodvihnutie samotnej guľôčky spájky zo spájkovacej plošky (nedostatočná väzba medzi spájkou a spájkovacou ploškou) – Obr. 2b,
- c) krehký lom (na rozhraní spájka/intermetalická vrstva alebo na rozhraní intermetalická vrstva/spájkovacia ploška) – Obr. 3,
- d) vytrhnutie guľôčky spolu so spájkovacou ploškou – Obr. 4.

Analýza spôsobu porušenia má súvis so štruktúrou materiálu a inými vlastnosťami spájkovaného spoja.

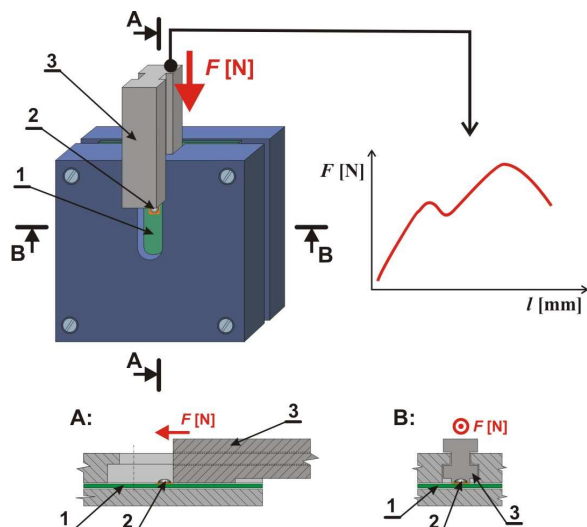
Medzi základné črty mikroštruktúry, ktorá ovplyvňuje mechanické vlastnosti patrí: veľkosť zrna, tvar zrna, distribúcia a typ intermetalických fáz v matici spájky, hustota a mobilita dislokácií a v neposlednom rade aj bodové poruchy. Mechanická skúška spojov šmykovým namáhaním je metódou, ktorou je možné interpretovať deformačný proces, resp. proces plastickej deformácie. Zvládnutie metódy mechanickej skúšky spojov šmykovým napätím závisí na mnohých parametroch, avšak základnou podmienkou je, aby miesto spoja bolo dostatočne veľké. Predpokladá sa, že priemer nie je menší ako 100 μm . Pretože mechanické vlastnosti spájkovaných spojov sú veľmi citlivé na geometriu, ku každej skúške šmykovým napätím je dôležité stanoviť presné rozmery spoja. Nemenej dôležitým parametrom je pôsobenie šmykového namáhania, resp. rýchlosť deformácie namáhaného spoja. Test šmykovým napätím patrí medzi jednoduché techniky, ktorými sa potvrdí prítomnosť, resp. priebeh plastickej deformácie a tiež náchylnosť na krehké porušenie v dôsledku prítomnosti intermetalických fáz v mieste spoja.

2. MECHANICKÉ SKÚŠKY SPÁJKOVANÝCH SPOJOV

Mechanické skúšky odolnosti spájkovaných spojov (guľôčok) voči šmykovému namáhaniu boli realizované na princípe snímania veľkosti pôsobiacej sily v priebehu deformácie a odtrhu guľôčky spájky vrátane záznamu postupnej deformácie.

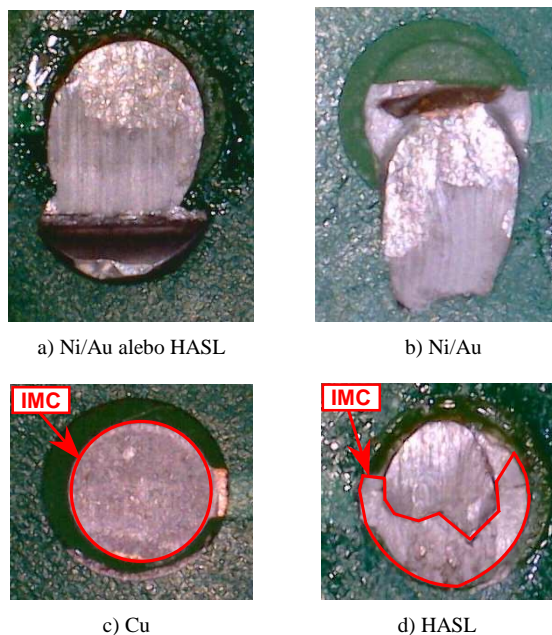
Pôsobenie hrotu skúšobnej súpravy na povrchu naspájkovaných guľôčok bolo prispôbené rozloženiu a kruhovej geometrii spájkovacích bodov s priemerom 1,524 mm. Výška spájkovacieho bodu bola na úrovni cca. 1000 μm . Pre skúšky bola použitá bezolovnatá spájka 96,5Sn3Ag0,5Cu. Povrchová úprava vodivých plôšok na DPS bola trojaká: na báze chemicky nanosených vrstiev Ni/Au, tiež vrstva cínu alebo spájkovacej zliatiny zarovnaná horúcim vzduchom (HASL - Hot Air Solder Leveling) a čistá chemická meď. Vrcholová teplota ručného spájkovania bola 260°C. Mechanické skúšky šmykovým namáhaním boli realizované na zariadení nemeckej výroby FP100/1 firmy Heckert Veb Thuringer Industrierwerk Rauenstein. Toto zariadenie umožňuje plynulú reguláciu rýchlosti deformácie v rozsahu, ktorý je stanovený príslušnou normou ako aj citlivé snímanie deformácie v rozsahu do 2 mm a tiež grafický záznam sila/deformácia. Test mechanickej skúšky šmykovým namáhaním spájkovaných spojov podľa JESD22-B117A bol realizovaný konštantnou rýchlosťou 200 $\mu\text{m/s}$. Upevnenie DPS sa realizovalo pomocou špeciálneho prípravku, ktorý umožňoval okrem prichytenia DPS, na ktorej boli umiestnené naspájkované spoje, tiež posun oceľového hrotu, ktorého odskok bol cca 100 μm od povrchu DPS. Posun hrotu sa realizoval

v nemeniacich sa podmienkach pozdĺž viacerých za sebou idúcich spojov. Detail prípravku pre skúšku mechanických vlastností šmykovým namáhaním je na Obr. 5.



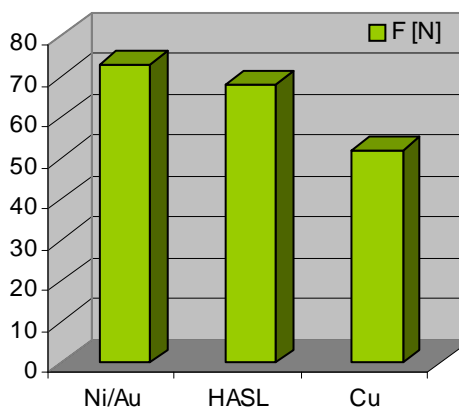
Obr. 5: Prípravok pre skúšku mechanických vlastností spojov šmykovým namáhaním (1- Doska plošného spoja, 2 – guľôčka spájky, 3 – skúšobný hrot)

Na základe vizuálneho vyhodnocovania miesta porušenia spájkovaných spojov (Obr. 6) je možné konštatovať, o aký spôsob porušenia spájkovaného spoja ide (v súlade s klasifikáciou podľa normy). Najkvalitnejší spájkovaný spoj je vytvorený na povrchovej úprave na báze Ni/Au. K porušeniu dochádza buď v celom objeme spájky (tvárny lom - Obr. 6a) alebo dochádza k oddeleniu spájkovacej plôšky od základného materiálu dosky plošného spoja (možný dôvod - výrobná chyba DPS, Obr. 6b). V prípade povrchovej úpravy na báze spájkovacej zliatiny typu HASL sú výsledky rozdielne. Buď došlo k tvárnemu lomu (Obr. 6a) alebo ku zmiešanému lomu (tvárny a krehký lom súčasne, Obr. 6d). Zmiešaný lom poukazuje na prítomnosť zvýšeného množstva intermetalických zlúčenín (IMC) v porovnaní s tvárnym lomom. Príčinou môže byť rozdielna vrcholová teplota a čas spájkovania – v dôsledku odvodu tepla DPS a rozdielnej hrúbky povrchu zliatiny nanesej technológiou HASL, taktiež lokálne rozdiely teplota/čas v procese technológie nanášania HASL alebo prítomnosť čistej medi pod vrstvou zliatiny nanesej technológiou HASL (v porovnaní s Ni/Au). Dôležitým faktorom je tiež skutočnosť, či počas spájkovania došlo k roztaveniu vrstvy zliatiny nanesej technológiou HASL (teplota, čas), pretože to podstatným spôsobom vplyva na rýchlosť difúzie Cu do tejto vrstvy, a tým aj na rast intermetalických zlúčenín. Výrazný rozdiel vo vzhľade povrchu lomu zaznamenali vzorky s povrchovou úpravou na báze čistej medi. Celá lomová plocha má jemnú zrnitosť a je homogénna.



Obr. 6: Rôzne spôsoby porušenia spájkovaného spoja (IMC – oblasť výskytu intermetalických zlúčenín, t.j. oblasti krehkého porušenia)

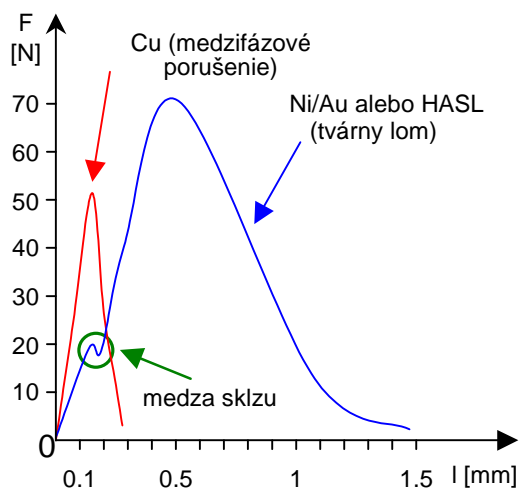
Jednoznačný vznik krehkého porušenia je výsledkom rovnomerného rozloženia intermetalických zlúčenín na celej ploche lomu. Príčinou je rýchla tvorba intermetalických zlúčenín Cu_6Sn_5 na rozhraní spájka/spájkovacia plôška, čo oslabuje spoj. V súlade s výsledkami vizuálnej kontroly boli namerané aj grafické závislosti šmyková sila /deformácia, z ktorých bolo možné odčítať hodnoty maximálnej sily pri porušení (Obr. 7). Pre povrchovú úpravu na báze Ni/Au a báze spájkovacej zliatiny nanesej spôsobom HASL boli hodnoty sily, pri ktorej nastalo porušenie v podstate len málo rozdielne. Pre povrchovú úpravu Ni/Au bola lomová sila 73 N, pre zliatiny typu HASL na úrovni 68 N.



Obr. 7: Porovnanie maximálnej sily porušenia pre tri rôzne povrchové úpravy

Porovnateľná hodnota lomovej sily pri povrchovej úprave typu HASL s povrchovou úpravou Ni/Au

svedčí o lokálnom náraste vrstvy intermetalických zlúčenín oslabujúcich spoj, tak ako to vyplýva z Obr. 6d). V súlade s výsledkami vizuálnej kontroly dopadla v tomto porovnaní med' najhoršie (Obr. 6c).



Obr. 8: Závislosť sila – deformácia pri mechanickej skúške pevnosti šmykovým namáhaním

Z diagramu sila/deformácia (Obr. 8) spájkovaného spoja vyplýva, že v prípade povrchovej úpravy na báze medi chýba oblasť plastickej deformácie a tiež výskyt medze sklzu. Typický je krehký lom bez náznakov plastickej deformácie. Nízka hodnota lomovej sily (53 N) súvisí s tým, že nastalo krehké porušenie na medzifázovom rozhraní intermetalická zlúčenina – med' s čiastočným narušením vrstvy medi na povrchu dosky plošného spoja (Obr. 3). Hlavnou príčinou je tvorba nežiadúcich oxidov na povrchu Cu (počas skladovania) a následná akumulácia iniciátorov krehkého porušenia, t.j. intermetalických zlúčenín, resp. nahromadenia bodových porúch a dislokácií. Grafický záznam sila/deformácia teda potvrdil závery vizuálnej kontroly (Obr. 8) pre všetky tri povrchové úpravy na doskách plošných spojov. Graf závislosti sily na deformácii poukazuje na podstatný fakt: pri porušení spoja v prípade tvárneho lomu je potrebná väčšia sila ako v prípade krehkého lomu (rozdiel plôch pod oboma krivkami). Nie je podstatná len hodnota maximálnej šmykovej sily, ale aj celkový priebeh procesu porušenia, resp. vyhodnotenie príspevku pružnej a plastickej deformácie, ktorý vyplýva z grafu na Obr. 8. Tvárny lom, typický pre Ni/Au, a čiastočne aj pre povrchovú úpravu na báze zliatiny nanesej technológiou HASL (zmiešaný lom) je sprevádzaný pružnou aj plasticou deformáciou ako aj výskytom medze sklzu.

ZÁVER

Táto práca poukazuje na možnosť interpretácie posudzovania mechanických vlastností spájkovaného spoja na základe analýzy závislosti šmyková sila/deformácia v porovnaní s výsledkami predbežnej

analýzy vzhľadu lomu po porušení. Mechanické skúšky spájkovaných spojov vo forme guľôčok spájky šmykom vykonané aplikáciou normy JESD22-B117A v praxi boli realizované na troch rôznych povrchových úpravách dosiek plošných spojov. Použitím normy je možné detekovať rozloženie intermetalických zlúčenín, prítomnosť bodových porúch a tiež dislokácií (alebo iných chýb v spájkovanom spoji ovplyvňujúcich jeho mechanické vlastnosti, napr. voids), rovnako tiež vizuálne vyhodnotiť príspevok krehkého a tvárneho lomu k porušeniu spoja.

Výsledky potvrdili predpoklad, že mechanické vlastnosti spájkovaných spojov sú odrazom stavu ich mikroštruktúry. Výrazne odlišné vlastnosti má spoj, ktorý je vytvorený, ak povrchovou úpravou na doske plošného spoja je chemická med'.

Použitá metóda namáhania spojov šmykovým namáhaním je vhodná aj pre rozmery priemerov spájkovacích guľôčok na úrovni 1,5 mm.

Podrobná kvalitatívna analýza v oblasti porušenia svetelným alebo elektrónovým mikroskopom, prípadne použitím iných metód štruktúrnej analýzy umožní presnejšiu analýzu príčin porušenia.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola financovaná MŠ SR v rámci riešených projektov VEGA No 1/3167/06, SK-CZ 0065-07 a KEGA 3/6465/08.

LITERATÚRA

- [1] JEDEC STANDARD Solder Ball Shear JESD22-B117A - [online]. JEDEC Solid State Technology Association, október 2006. Dostupné z WWW: <www.jedec.org>.
- [2] Newman, K. BGA Brittle Fracture – Alternative Solder Joint Integrity Test Methods - [online]. Sun Microsystems, Inc.
- [3] Dongkai Shangguan: Leadfree Solder, Interconnect reliability, ASM International® EDFAS, 2006, ISBN-13: 978-0-87170-816-8, p.69
- [4] Kolcunová, I., Cimbala, R.: The Transport Phenomena in Natural Liquid Esters, Scientific Proceedings of Riga Technical University, Riga seria 4 Volume 22, pp 55-62, 2008, ISSN 1407-7345
- [5] Cimbala, R.: Energetika a ekológia, časopis Životné prostredie, ÚKE SAV Bratislava, ISSN 0044 – 4863 číslo 6, 2004 str. 314-319
- [6] CIMBALA, R.: Dielectric spectroscopy of oil. In: Przegląd Elektrotechniczny Konferencje. vol. 5, no. 3 (2007), p. 42-44. ISSN 1731-6103