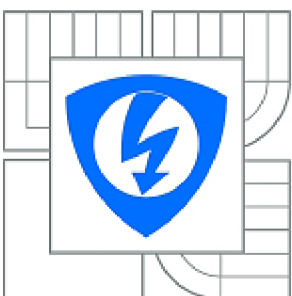




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ PÁJENÝCH SPOJŮ

MECHANICAL TESTING OF SOLDER JOINTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

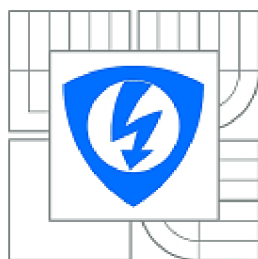
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ DRAB

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.

BRNO, 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Tomáš Drab

ID: 73063

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Mechanické testování pájených spojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši v oblasti mechanického testování pájených spojů a zpracujte metodiku provádění testů. Popište jednotlivé metody a navrhnete optimalizovaný postup pro srovnávání různých pájecích slitin a kompozic.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

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:

Práca obsahuje teoretické spracovanie elektrotechnickej výroby pre bezolovnaté spájkovanie pretavením. Obsahuje popis procesov prebiehajúcich v procese spájkovania. Zahŕňa spôsoby aplikácie spájkovacej pasty a princípy osadzovania súčiastok, ako aj proces samotného spájkovania pretavením. Práca vymenúva možnosti testovania pevnosti spájkovaného spoja zo zreteľom na odolnosť voči mechanickým vibráciám. Popisuje návrh metodiky a prípravu na testovanie pevnosti spájkovaného spoja mechanickými vibráciami. Porovnáva vplyv vibrácií na typy súčiastok a použité spájkovacie zliatiny.

Abstract:

The project contains theoretical research of electrotechnical manufacture for lead-free reflow soldering. It contains characterization of soldering processes. Includes variations of solder paste printing, principles of part placing and also reflow soldering process. The project appoints possibilities of testing solder joints strength, mainly focused on mechanical vibrations. It describes a design and preparation of solder joint strength test methods by mechanical vibrations. It compares influence of vibrations on part types and solder alloys.

Kľúčové slová:

bezolovnatá spájka, spájkovanie pretavením, spájkovaný spoj, elektronická zostava, pevnosť v strihu, pevnosť v ťahu, mechanické vibrácie

Key words:

Lead-free solder, reflow soldering, solder joint, electronic assembly, shear strength, pull strength, mechanical vibrations

Bibliografická citace díla:

DRAB, T. *Mechanické testování pájených spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 70 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. 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 jsem si plně vědom následků porušení.

V Brně dne 24. 5. 2012

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v průběhu zpracovávání diplomové práce. Dále děkuji doc. Ing. Ivanu Mazůrkovi, CSc., z Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství, za zapůjčení technického zařízení a pomoc při realizování praktické části.

Obsah

ÚVOD.....	9
1. ÚVOD DO SPÁJKOVANIA PRETAVENÍM	10
1.1. CHEMICKÁ VÁZBA	10
1.1.1. <i>Usporiadanie atómov do mriežky</i>	11
1.2. TAVENIE A TUHNUTIE	11
1.2.1. <i>Fázové diagramy</i>	12
1.2.2. <i>Intermetalické fázy</i>	14
1.2.3. <i>Difúzia</i>	14
1.2.4. <i>Zmäčavosť</i>	15
1.2.5. <i>Leaching (proces vylučovania)</i>	16
2. PROCES SPÁJKOVANIA	18
2.1. NÁVRH SPÁJKOVACÍCH PLÔŠOK PRE SPÁJKOVANIE PRETAVENÍM	18
2.1.1. <i>On-line DFM</i>	18
2.1.2. <i>Pravidlá pre návrh DPS</i>	19
2.2. SPÔSOBY NANÁŠANIA SPÁJKOVACEJ PASTY	19
2.2.1. <i>Šablónová tlač</i>	19
2.2.2. <i>Sieťotlač</i>	21
2.2.3. <i>Dávkovač</i>	21
2.3. OSADZOVANIE SÚČIASTOK	21
2.4. PROCES SPÁJKOVANIA PRETAVENÍM	22
2.4.1. <i>Predohrev</i>	23
2.4.2. <i>Pretavenie</i>	23
2.4.3. <i>Chladnutie</i>	23
3. MATERIÁLY PRE SPÁJKOVANIE.....	24
3.1. POVRCHY PRE SPÁJKOVANIE	24
3.1.1. <i>Povrchové úpravy DPS</i>	24
3.1.2. <i>Povrchové úpravy súčiastok</i>	25
3.1.3. <i>Spájkovanie na anorganickom substráte</i>	25
3.2. SPÁJKOVACIE PASTY	26
3.2.1. <i>Spájkovacie zliatiny</i>	26
3.2.2. <i>Tavivá</i>	26
3.2.3. <i>Pasty pre rôzne spôsoby nanášania</i>	27
4. MECHANICKÉ SKÚŠKY ELEKTRONICKÝCH ZOSTÁV.....	28
4.1. ELEKTRONICKÁ ZOSTAVA	28
4.1.1. <i>Delenie materiálov pre substráty</i>	28
4.1.2. <i>Organické základné materiály</i>	29
4.1.3. <i>Anorganické základné materiály</i>	29
4.2. ŠTANDARBY PRE TEST TESTOVANIE ELEKTRONICKÝCH ZOSTÁV	30
4.3. ODOLNOSŤ VOČI MECHANICKÝM VIBRÁCIÁM	32
4.3.1. <i>Vibračné testy podľa normy IPC-TM-650 2.6.9</i>	33
4.3.2. <i>Vibračné testy podľa normy ISO 60068-2</i>	34
4.3.3. <i>Doba životnosti spoja v záťažových podmienkach</i>	34
4.4. TEST DOSKY DOPADOM S VYUŽITÍM TENZOMETROV [23]	36
4.5. MECHANICKÁ PEVNOSŤ V STRIHU A ŤAHU	37
5. SIMULÁCIA CHOVANIA MATERIÁLU POD VPLYVOM VIBRÁCIÍ	41
5.1. METÓDA KONEČNÝCH PRVKOV.....	41
5.2. ANSYS	42
5.3. ŠTRUKTÚRA PRE SIMULÁCIU	42
5.4. SIMULÁCIA V PROGRAME ANSYS	44

5.4.1.	Štruktúrálna analýza.....	44
5.4.2.	Modálna (vidová) analýza	47
6.	EXPERIMENTÁLNA ČASŤ.....	49
6.1.	TESTOVACIA DPS	49
6.2.	NÁVRH DRŽIAKA PRE DPS	49
6.3.	VIBRAČNÉ ZARIADENIE.....	50
6.3.1.	Zosilňovač.....	51
6.3.2.	Zapojenie zariadenia.....	52
6.4.	VIBRAČNÉ TESTOVANIE	53
6.5.	NAMERANÉ HODNOTY	54
6.5.1.	Zmena odporu vodivej cesty pod vplyvom vibrácií	55
6.5.1.	Zmena rezonančnej frekvencie počas testovania	58
6.5.2.	Odpor vodivej cesty po časovom odstupe.....	59
6.6.	VYHOTOVENIE MIKROVÝBRUSU.....	59
6.7.	PEVNOSŤ V STRIHU SPÁJKOVANÝCH SPOJOV	62
	ZÁVER	64
	POUŽITÁ LITERATÚRA	66
	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK.....	69
	PRÍLOHA 1: VÝKRES DRŽIAKA DPS.....	70

Úvod

Mechanické testovanie elektronických zostáv tvorí neoddeliteľnú súčasť zisťovania ich spoľahlivosti. Sú dôležité predovšetkým z pohľadu simulácie namáhania v priebehu ich životnosti. Už pri návrhu sa musí dbať na cieľ a podmienky používania zariadenia, na čo slúžia počítačové modely, ktoré dokážu pomerne presne predpovedať chovanie štruktúr. Ďalšou časťou sú mechanické skúšky, v ktorých sa preverí spoľahlivosť reálneho zariadenia alebo jeho fyzikálneho modelu a porovnáva výsledky s matematickým modelom.

V súčasnej dobe sa kvôli smerniciam Európskej Únie používajú takmer výhradne spájky bez obsahu toxického olova, aj keď existuje rada výnimiek ako napríklad automobilový a letecký priemysel či lekárska technika. Dôvodom je skutočnosť, že bezolovnaté spájky vykazujú horšie vlastnosti počas procesu spájkovania, a tiež možno predpokladať ich zhoršenú spoľahlivosť a životnosť. Táto oblasť je momentálne vo svete veľmi sledovaná ale doposiaľ nie úplne popísaná. Momentálne poznáme množstvo druhov bezolovnatých spájok líšiacich sa svojim zložením a koncentráciou jednotlivých zložiek. Vyrábajú sa spájky pre náročné aplikácie a taktiež s cieľom znížiť finálnu cenu výrobku. Na zmapovanie ich chovania po pretavení je potrebné vytvoriť súbor testov, na overenie ich mechanických vlastností a odolnosti voči namáhaniu. Táto práca sa zameriava predovšetkým na odolnosť spájkovaného spoja voči mechanickým vibráciám.

V tejto práci je popísaná chemická a fyzikálna podstata procesov prebiehajúcich pri vytváraní spájkovaného spoja. Faktory ovplyvňujúce kvalitu spoja, odporúčania spojené s návrhom DPS a výberom technológie montáže. Ďalej sa uvádza prehľad základných používaných povrchových úprav DPS, spájok, tavív a spájkovacích pást, prehľad jednotlivých najpoužívanejších zliatin a trendy v ďalšom vývoji s cieľom znížiť výrobné náklady. Mechanickým testom vrátane testovaniu mechanickými vibráciami sa venuje rada noriem, ktorých prehľad sa uvádza v ďalšej časti spolu s popisom a požiadavkami na technické vybavenie a testované vzorky. Cieľom simulácií v programe ANSYS bolo ukázať chovanie elektronickej zostavy v záťažových podmienkach. Výsledky sú následne využité pri testovaní fyzikálneho modelu zostavy mechanickými vibráciami.

1. Úvod do spájkovania pretavením

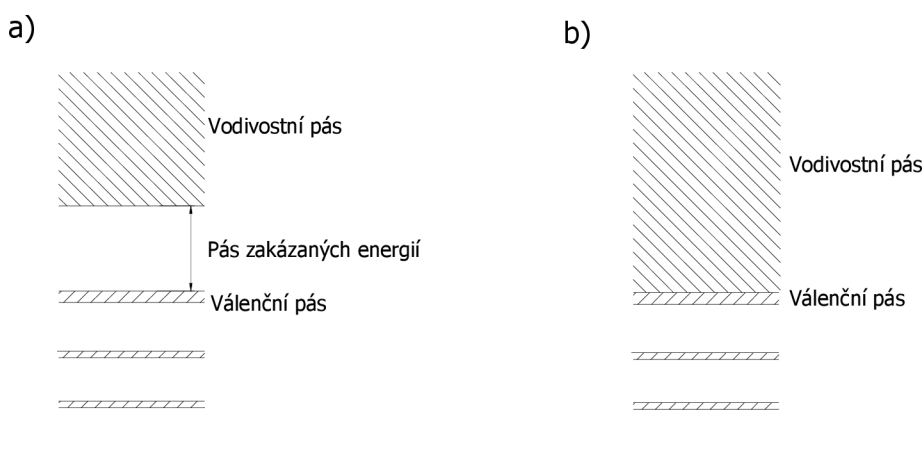
Spájkovanie pretavením je v súčasnej dobe najpoužívanejší spôsob vytvárania spájkovaného spoja, preto je veľmi dôležité správne pochopiť procesy prebiehajúce počas pretavenia. Prebiehajú rôzne chemické reakcie, vznikajú nové molekuly medzi spájkovanými kovmi, či prebiehajú nežiaduce oxidačné procesy. Taktiež popri tom prebiehajú fyzikálne procesy súvisiace so správaním eutektickej zliatiny, a prenikaním molekúl v dôsledku rozdielnych koncentrácií.

1.1. Chemická väzba

Na to, aby atómy prvkov držali pohromade je potrebná sila, ktorá vzniká interakciou vrchných vrstiev atómových obalov. Túto interakciu nazývame chemická väzba. Rozlišujeme niekoľko druhov chemickej väzby. [1]

Kovová väzba

Elektróny v atómovom obale sa pohybujú v určitých energetických hladinách, ktoré sú oddelené takzvanými pásmi zakázaných energií. Nad valenčnou (vrchnou) vrstvou sa nachádza zakázaný pás a pás vodivostný, v ktorom sa elektróny môžu voľne pohybovať (obr. 1.1 b). V kovovej väzbe tento pás splyva s valenčnou vrstvou. Tento fakt zabezpečuje pevnosť, kujnosť a elektrickú vodivosť kovov.



Obrázok 1.1: Pásový diagramy pre dielektrikum (a) a pre kov (b)

Kovalentná väzba

Elektronegativita je schopnosť atómu pútať k sebe elektróny. Kovalentná väzba vzniká vytvorením elektrónového páru z valenčných vrstiev dvoch atómov s rovnakou alebo podobnou elektronegativitou. Ak je rozdiel elektronegativít menší ako 0,4 hovoríme o nepolárnej väzbe, pokiaľ je v rozsahu 0,4 až 1,7 hovoríme o polárnej väzbe. Ak je rozdiel elektronegativít dvoch atómov väčší ako 1,7, výsledkom je iónová väzba.

Iónová väzba

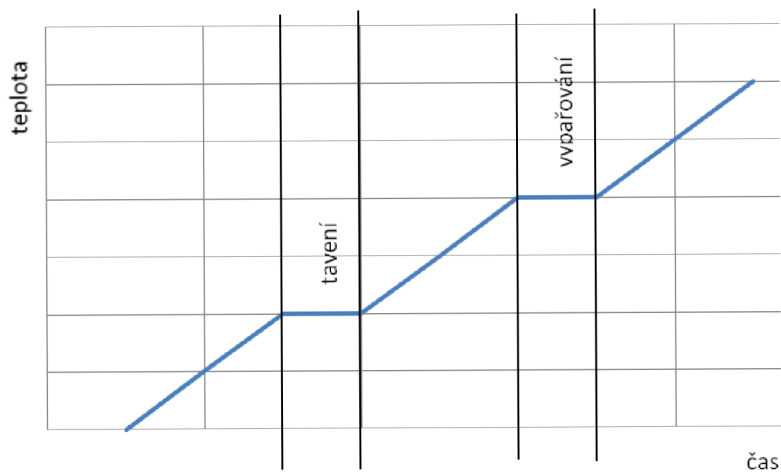
Iónová väzba vzniká podobne ako väzba kovalentná, rozdiel je v elektronegativite jednotlivých atómov. Ak jeden atóm podstatne silnejšie priťahuje elektrónový pár, ten sa k nemu presunie a vzniká tak dipól zo záporným nábojom na elektronegatívnejšom prvku. Medzi tie patria fluór, chlór, kyslík a dusík. Naopak medzi najmenej elektronegatívne patria prvky I.A skupiny.

1.1.1. Usporiadanie atómov do mriežky

Atómy sa vždy snažia zaujať stav s najmenšou energiou, preto sa usporadúvajú čo najtesnejšie a pri opakovaní rovnakých zložiek vzniká kryštálová mriežka. Pri zliatinách viacerých materiálov sa dané mriežky prekrývajú a atómy, prípadne molekuly, môžu difundovať a zaujať miesto v mriežke iného prvku. Tak vznikajú rôzne druhy porúch, ktoré môžu byť žiaduce, alebo nežiaduce. [1]

1.2. Tavenie a tuhnutie

V tuhom stave sú atómy usporiadané do mriežok, kde kmitajú v rovnovážnej polohe. Pri dodaní určitého množstva energie do systému sa zvýši teplota a kmity atómov vzrastú natoľko že sa dokážu uvoľniť z mriežky. Narastá entropia (neusporiadanosť) systému a my môžeme pozorovať tavenie tuhej fázy. Pri ďalšom dodaní energie teplota nerastie, naopak zostáva na hodnote ktorú nazývame teplota tavenia. Táto energia sa totiž spotrebúva na nárast entropie (obr. 1.2). Až sa kryštálová mriežka celkom rozpadne, môže opäť stúpať aj teplota. Rovnaký proces nastáva aj pri vyparovaní kvapalín.

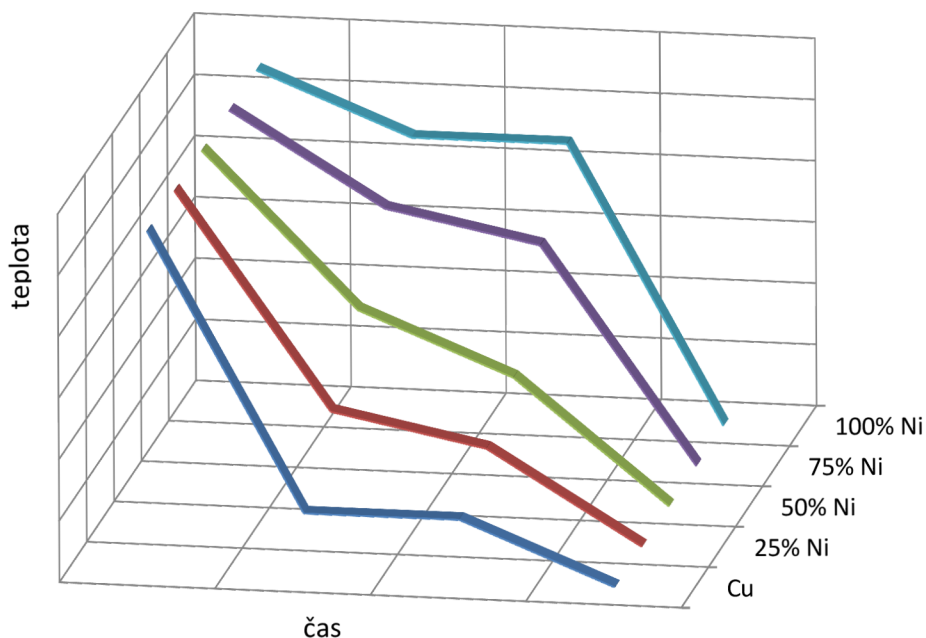


Obrázok 1.2: Závislosť teploty na čase pri tavení a vyparovaní [1]

Energia potrebná na zmenu skupenstva je omnoho väčšia ako energia potrebná na ohriatie materiálu o 1 °C. Preto je potrebné s touto energiou počítať v procese spájkovania.

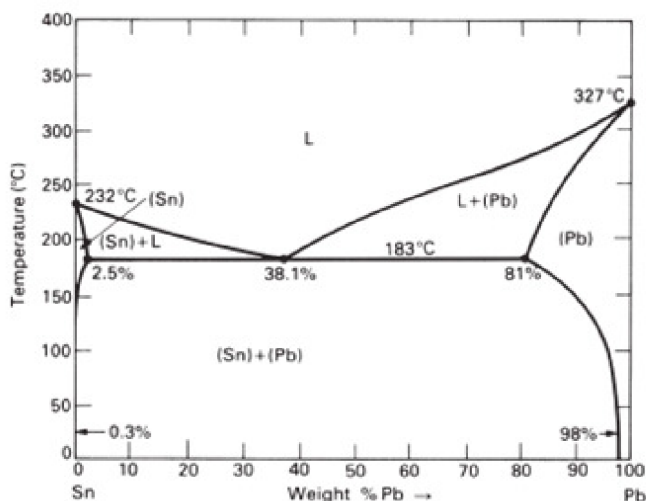
1.2.1. Fázové diagramy

Špecifické vlastnosti kovov môžeme ovplyvňovať pridávaním prímiesí, alebo vytváraním zliatin viacerých kovov. Štruktúra kryštálovej mriežky je narušaná a my môžeme pozorovať napríklad inú teplotu tavenia. Tá už nie je konštantná ale tavenie nastáva v istom intervale teplôt (obr. 1.3).



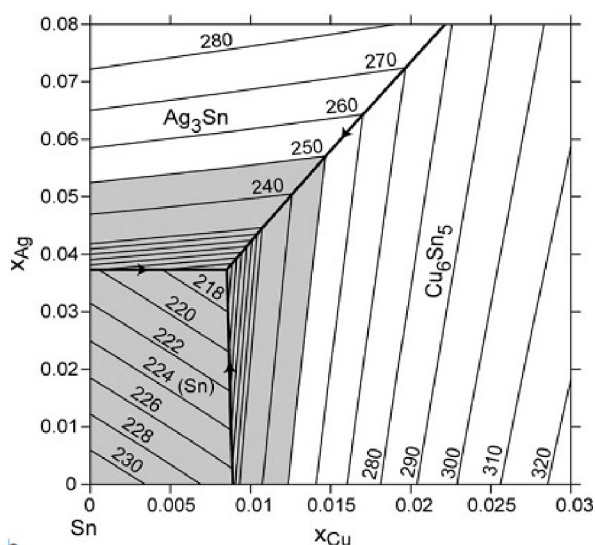
Obrázok 1.3: Závislosť teploty na čase pre rôzne podiely niklu a medi [1]

Tieto charakteristiky nás privádzajú k najznámejšiemu fázovému diagramu, zliatiny cínu a olova (Obrázok 1.4). Na jednej strane máme čistý cín s teplotou tavenia $t_{Sn} = 232^\circ\text{C}$ a na strane druhej čisté olovo $t_{Pb} = 327^\circ\text{C}$. Postupným pridávaním podielu olova do cínu sledujeme interval teploty tavenia zliatiny SnPb. Ideálny pomer je 62% cínu a 38% olova. Táto zliatina má teplotu tavenia 183°C pričom interval teplôt tavenia je nulový. To znamená že sa nevytvárajú žiadne prechodné stavy a rovnako pri tuhnutí sa nevytvára priestor na kryštalizovanie len jednej zložky zliatiny. [2]



Obrázok 1.4: Fázový diagram olovnatej spájky [2]

Zložitejšie vyzerá fázový diagram spájky SAC, pozostávajúcej z cínu, striebra a medi. Bol experimentálne určený Gebhardtom a Petzowom. Teplota tavenia eutektickej zliatiny je 217°C . [3]



Obrázok 1.5: Fázový diagram bezolvnatej SAC spájky[3]

1.2.2. Intermetalické fázy

Intermetalická fáza je chemická zlúčenina kovových prvkov. Vznikajú difúziou a reakciou dvoch a viacerých kovov. Pri spájkovaní sa vytvára intermetalická vrstva na rozhraní spájka-kontaktná ploška. Našou snahou je dosiahnuť aby sa tieto zlúčeniny nevytvárali. Majú horšiu elektrickú vodivosť a väčšiu krehkosť. Medzi najviac sa vyskytujúce patria Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn . Vytvárajú sa už počas procesu spájkovania. Obmedziť ich rast môžeme najmä použitím vhodných povrchových úprav a použitým tavivom [4]. Problémom pri bezolovnatých spájkach býva vytváranie intermetalických zlúčenín aj v objeme spájky medzi jednotlivými komponentami zliatiny. Vytvárajú sa tak zlúčeniny Ag_3Sn , či už spomínaná Cu_6Sn_5 [5].

1.2.3. Difúzia

Základom spájkovacieho procesu je difúzia. Je to prenikanie molekúl jednej látky medzi molekuly látky druhej. Difúzia zabezpečuje spojenie medzi substrátom a spájkou. Ak sa pri tavení častice uvoľňujú z mriežky masovo tak difúzia je proces keď samostatný atóm prekoná energetickú bariéru ktorá ho drží v mriežke a preskočí na iné miesto, alebo sa stane súčasťou štruktúry iného materiálu. Difúzia je závislá na teplote a druhu materiálu. Podľa S. A. Arrhenia môžeme písať [1]:

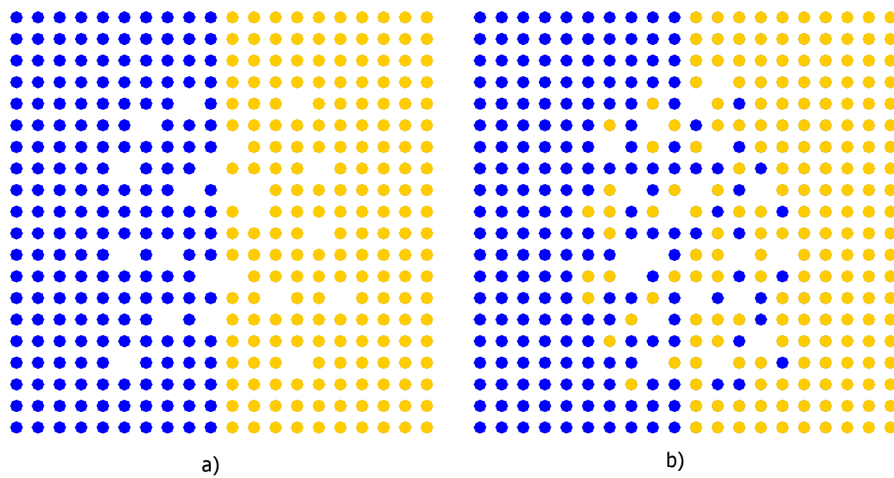
$$D_{(j)} = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (1)$$

kde: D_0 - materiálová difúzna konštanta

R - plynová konštanta (8,314472 J mol⁻¹ K⁻¹)

T - teplota

Q - aktivačná energia - energia ktorú je potrebné dostať do systému aby sa proces započal



Obrázok 1.6: Difúzia. a) spojenie materiálov b) prenikanie častíc [1]

1.2.4. Zmäčavosť

Základom zmáčavosti spájkovaného povrchu roztavenou spájkou je vytvorenie zliatiny s cínom. Aby sa vytvoril kontakt na molekulárnej úrovni, je veľmi dôležité dbať na čistotu oboch povrchov. Zmäčavosti jednotlivých kovov sú dané najmä schopnosťou vytvárať zliatinu s cínom.

Ak by sme mali čistú roztavenú spájkou v priestore bez gravitácie, vytvorila by sa z nej rovnomerná guľa. Je to dané vplyvom povrchového napätia a faktu, že každá sústava má snahu zaujať polohu alebo tvar s najmenšou energiou. Rovnaká teória platí aj napríklad pre sústavu spájka-med'. Pokiaľ je med' pokrytá vrstvou oxidov, povrch je nezmáčavý. Povrchové napätia v tomto prípade je menšie, ak sa spájka sformuje do sploštenej gule.

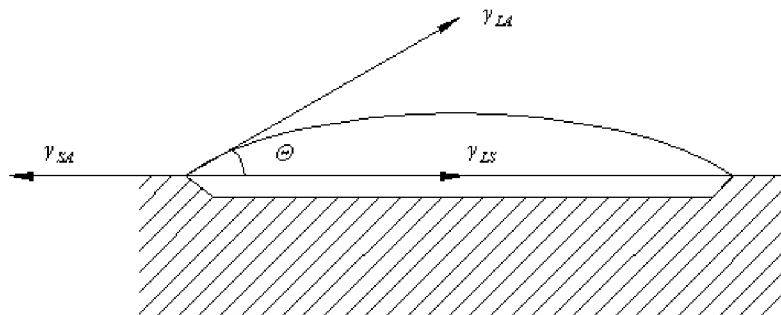
Naopak pri čistej medi molekuly cínu difundujú medzi molekuly medi, pričom sa spájka roztečie. Povrchové napätie je teraz menšie pri roztečenej spájke. Tento stav môžeme dosiahnuť z predchádzajúceho stavu pridaním taviva, ktoré odstráni vrstvu oxidov.

V tejto sústave vznikajú 3 sily pôsobiace na zmáčavosť (obr. 1.7). [4]

Vznikajú na troch prechodoch: Spájka-Med' (Liquid-Solid) = γ_{LS}

Med'-vzduch (Solid-Air) = γ_{SA}

Spájka-vzduch (Liquid-Air) = γ_{LA}



Obrázok 1.7: Rovnováha síl na rozhraní spájka-substrát-vzduch [4]

Tieto sily popisujeme Youngovou rovnicou:

$$\gamma_{SA} = \gamma_{LS} \cdot \gamma_{LA} \cdot \cos\theta \quad (2)$$

Po úprave dostaneme:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SA} - \gamma_{LS}}{\gamma_{LA}} \quad (3)$$

Našou snahou je dosiahnuť, aby veľkosť, zmáčacieho uhla Θ , bola menšia ako 90° . To znamená, že $\cos \Theta$ sa pohybuje v intervale od 0 do 1. Potom z rovnice vyplýva, že γ_{SA} by mala byť čo najväčšia, no γ_{LS} a γ_{LA} by mali byť čo najmenšie. [4]

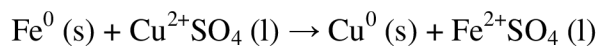
1.2.5. Leaching (proces vylučovania)

Je to proces kedy sa anorganické aj organické nečistoty, či rádionuklidy vylučujú z pevnej fázy do tekutej fázy. Je to spôsobené minerálnym rozpúšťaním, desorpciou, komplexačnými procesmi v závislosti na PH, rozpúšťaní anorganických látok a mikrobiologickou aktivitou. Proces je univerzálny pretože každý materiál, ktorý je v kontakte s vodou vylučuje komponenty z povrchu alebo vnútra materiálu v závislosti na pórovitosti. [5]

Komplexácia je prevedenie kationu v roztoku do zlúčeniny, kde je následne viazaný ako komplex a navonok sa javí že kation ovplyvňujúci potenciál z roztoku ubudol. Je to proces v ktorom je redukovaný kation kovu z roztoku na adekvátny kov iným kovom ktorý má negatívnejší potenciál. To ktorý kov má negatívnejší potenciál ukazuje Beketov rad kovov (Elektrochemický rad napätia kovov), ktorý rozdeľuje kovy podľa vodíka na ušľachtilé(napravo) a neušľachtilé(naľavo).

Na Mg Be Al Mn Ti Zn Cr Fe Cd In Tl Co Ni Sn Pb H₂ Bi Cu Os Ru Ag Hg Pt Au

Kovy naľavo majú schopnosť vytláčať vodík z kyselín, naopak ušľachtilé kovy s kyselinami nereagujú. Rovnako ako neušľachtilé kovy vytláčajú vodík môžu vyzrážať ušľachtilý kov z molekuly. Príkladom môže byť vyzrážanie medi z roztoku síranu meďnatého železom.



Vylučovanie je v mnohých prípadoch závislé na PH. Preto je PH vylučovací test základom pre porovnanie vylučovania a iných testov. Celkovo je známych asi 50 testov na vylučovanie, ktoré väčšinou nadväzujú na PH test. [5]

2. Proces spájkovania

Spájkovanie je zložitý proces, v ktorom prebieha rada chemických reakcií a ďalších sprievodných javov, ktoré významne ovplyvňujú výslednú kvalitu spájkovaného spoja. Preto je potrebné venovať pozornosť ovplyvňujúcim faktorom, z ktorých podstatné sú:

- Návrh spájkovacích plôch
- Výber spájkovacej pasty a spôsob nanášania
- Osadzované typy súčiastok
- Proces pretavenia

2.1. Návrh spájkovacích plôšok pre spájkovanie pretavením

Čím menšie ľahšie a funkčnejšie sa vyrábajú produkty, tým sa zužuje medzera medzi návrhom a výrobou. DFM je proces návrhu DPS vzhľadom na funkcionality, tvar a cenu produktu. Cieľom je minimalizovať čas medzi návrhom a dodaním výrobku na trh. Pri návrhu dosky plošných spojov je treba brať ohľad na celý výrobný proces, návrhové pravidlá nastaviť tak aby bolo možné produkt navrhnuť na jednom mieste a vyrobiť na inom. [6]

2.1.1. On-line DFM

V súčasnosti je na vysokej úrovni rozvinuté používanie počítačových sietí, ktoré uľahčujú a urýchľujú proces návrhu. To je využité práve v procese DFM, ktorý pozostáva z týchto častí[6]:

Model produktu

Na získanie kompletnej analýzy dosky plošných spojov (DPS) sú potrebné informácie ako o „holej“ doske, rovnako aj o plne osadenej. Model by mal obsahovať rámové značky, konštrukčné diery, či špeciálne značky ako polarizácie, alebo názvy súčiastok.

Modely súčiastok

CAD programy pracujú s knižnicami súčiastok, ktoré majú často rovnaké rozmery. Je potrebné aby sa tieto modely špecifikovali zvlášť pre každý typ súčiastky, aby sme zaručili bezproblémovú výrobu.

Model priemyselnej výroby

Už pri návrhu je potrebné brať ohľad na možnosti výroby. Jednotlivé montážne linky dokážu zabezpečiť osadenie jednostranných, či obojstranných dosiek, len SMD, alebo aj THT súčiastok. Tým sa zabezpečí optimalizácia výroby a minimalizuje sa chybovosť.

2.1.2. Pravidlá pre návrh DPS

Návrh DPS musí spĺňovať určité požiadavky ktoré možno zhrnúť do troch základných oblastí[6]:

Pravidlá pre SMD

Je potrebné dodržiavať dostatočné medzery na to aby mohli byť neskôr bezproblémovo osadené aj ostatné súčiastky osadzovacím automatom. Pri tesnom uložení vznikajú chyby spôsobené posunutím súčiastky mimo spájkovacích plôšok

Pravidlá pre proces spájkovania

Rozloženie súčiastok musí byť také aby sa citlivé súčiastky vyhli teplotnému namáhaniu. Napríklad nie je vhodné ak sa menej teplotne odolná súčiastka uloží na spodok PCB pri spájkovaní vlnou.

Pravidlá pre prepoje

Spájkovacie plôšky nie je vhodné umiestňovať v blízkosti prepojov, alebo naopak. Pri procese spájkovania môže medzi nimi vzniknúť most, ktorý spôsobí skrat v obvode a tým ohrozí jeho funkčnosť.

2.2. Spôsobyananášania spájkovacej pasty

Spájkovaciupastu je možné nanášať niekoľkými spôsobmi. Medzi základné a najpoužívanejšie patria:

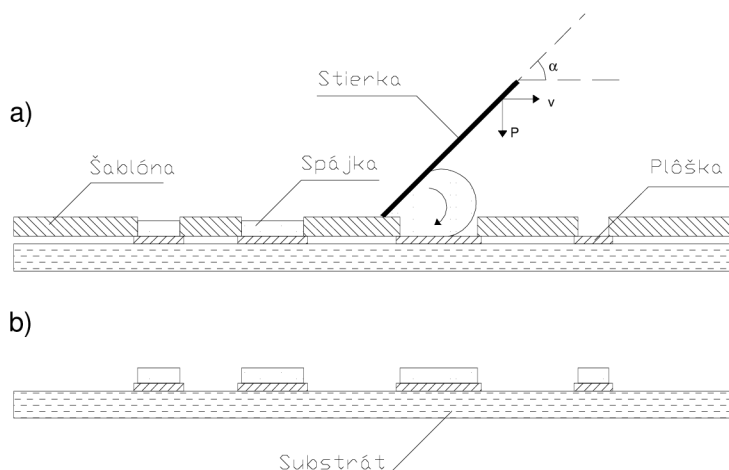
- Šablónová tlač
- Sieťotlač
- Nanášanie pomocou dávkovača

2.2.1. Šablónová tlač

Pôvodne bol tento princíp vymyslený pre potreby textilného priemyslu. Pasta sa tlačí stierkou cez kovovú šablónu na kontaktné plôšky. Cez šablónu môžeme tlačiť nielen pasty ale aj nevodivé, či vodivé lepidlá. Podľa typu materiálu určujeme aj parametre šablóny, ako hrúbka, použitý materiál, spôsob výroby. Na to aby sa pasta správne vytlačila na plôšky je potrebné presné zosúladenie s otvormi. V automatizovaných zariadeniach sa doska najprv uchyťí, kamera zameria rámové značky a následne sa poopraví poloha dosky. Na identifikáciu značky sa využívajú rôzne rozpoznávacie algoritmy.

Pri tlači sa stierka pohybuje definovanou rýchlosťou po šablóne a tlačí pred sebou spájkovaciupastu, ktorá vyplňa otvory. Stierka zachádza 3 cm až 7 cm za poslednú dieru. Často sa využíva systém dvoch stierok, aby bolo možné nanášanie v oboch smeroch. V moderných zariadeniach je možné presne nastaviť rýchlosť v , uhol stierky α , aj tlak stierky

na šablónu P (obr. 2.1). Medzi šablónou a substrátom by malo byť nulové odsadenie. Pri nenulovej medzere sa môže zničiť šablóna a pasta môže zatekať aj mimo kontaktných plôšok. [2]



Obrázok 2.1: Šablónová tlač, a) Počas nanášania, b) Po nanesení [2]

Po nanesení pasty je potrebná optická kontrola. Ak to nie je možné zabezpečiť pre každú DPS, tak aspoň v určitom časovom intervale. Pasta by mala byť rovnomerne nanosená na celej plôške, výška nanesenia by mala byť rovnaká na všetkých stranách DPS. Veľmi dôležité je aj čistenie. Zabezpečuje ho zväčša automatizované čistenie, vždy v určitom časovom intervale. Výsledkom je nie len presné nanesenie pasty, ale aj dlhšia životnosť šablóny.

Pri návrhu treba brať ohľad na zložitosť DPS, ktorá ovplyvňuje materiál, hrúbku šablóny aj techniku vytvárania otvorov. Typická hrúbka šablóny je od 0,02 mm do 0,3 mm. Platí že pomer plochy stien ku ploche otvoru má byť menší ako 1,5. [6]:

$$Pomer\ plôch = \frac{Plocha\ stien\ otvoru}{Plocha\ otvoru} = \frac{2 \cdot T \cdot (L+W)}{L \cdot W} < 1,5 \quad (4)$$

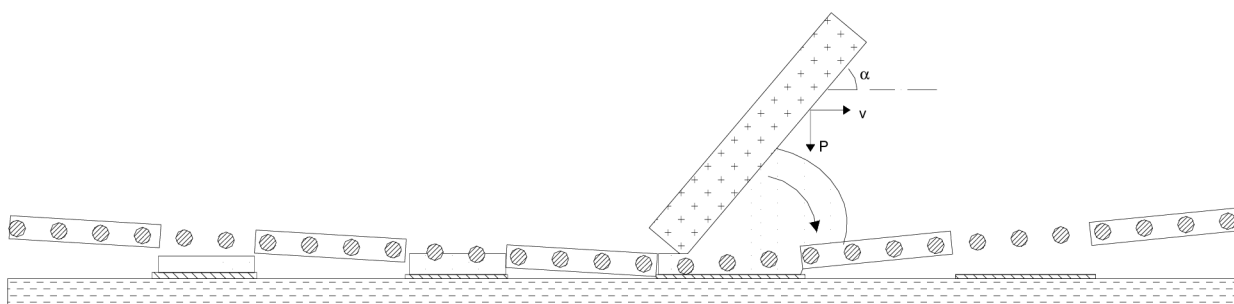
Z toho potom:

$$T = \frac{0,75 \cdot L \cdot W}{L+W} \quad (5)$$

Problémy pri nanášaní pasty môžu nastať pri fine-pitch QFP puzdrách, kde sa pasta nemusí rovnomerne rozložiť kvôli rôznej orientácii plôšok. Kvôli tomuto nepriaznivému efektu je vhodné použiť stierku ktorá bude otočená horizontálne o 45°. Podmienky tak budú rovnaké pre všetky otvory. [6]

2.2.2. Sieťotlač

Princíp tlačenia pasty cez sýto je rovnaký ako pri šablóne. Stierka pred sebou tlačí pastu ktorá prechádza cez sýto práve na miestach nad kontaktnými plôškami (obr. 2.2). Vzor sýta sa vytvára optickým vytvrdením vrstvy, cez ktorú pasta neprejde. Keďže sú oká sýta omnoho menšie ako otvory v šablóne, musí sa odlišovať aj použitá pasta. Mala by mať nižší hmotnostný podiel spájky, menší priemer zrn a mala by mať väčšiu viskozitu. Rozdielom oproti šablónovej tlači je odsadenie. Zatiaľ čo v prvom prípade je odsadenie nulové, pri sieťotlači je viac než potrebné. [2]



Obrázok 2.2: Sieťotlač [2]

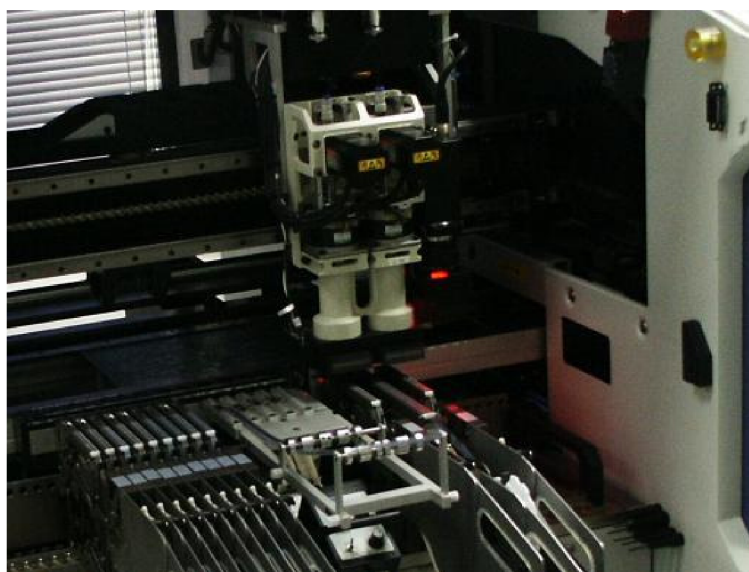
2.2.3. Dávkovač

Pasta sa môže aplikovať aj pomocou dávkovača. Najdôležitejšie je zabezpečiť správne množstvo nanesej pasty. Princíp dávkovania môže byť rôzny. Základným princípom je tlak za čas. Množstvo sa definuje časom pôsobenia tlaku na zásobník pasty. Tá sa vytlačí cez ihlu na kontaktnú plôšku. Je to konštrukčne jednoduchý princíp, no aj menej presný. Využíva sa napríklad pri poloautomatickom osadzovaní. Konštrukčne zložitejší princíp dávkovanie vychádza z presného pootočeného čerpadla, čas dávkovania sa skrátil a zvýšila sa presnosť. Táto a podobné konštrukcie sa môžu využiť aj v automatickom nanášaní pasty. [2]

2.3. Osadzovanie súčiastok

Základným princípom osadzovacích automatov je pick-and-place, alebo zdvihni a ulož. V prvom kroku stroj súčiastku dvihne zo zásobníka a v druhom ju uloží na DPS. To však nie je veľmi efektívne, keďže podstatou je hlavne uloženie súčiastky. Preto moderné stroje fungujú na princípe fee-and-place (naplň a ulož). Pri tomto procese sa najprv stroj naplní súčiastkami zo zásobníka a neskôr ich postupne ukladá na miesto. Vynechá sa tak časté presúvanie k zásobníku a doske. Samotný zdvih využíva nízkeho vákuu. Podtlakom sa súčiastka prisaje k tryske a tá sa s celou hlavou presunie nad DPS, kde uloží a uvoľní súčiastku. Automaty môžeme rozdeliť na sekvenčné ale simultánne, podľa toho či proces naberania a ukladania súčiastok prebieha postupne, alebo zároveň.

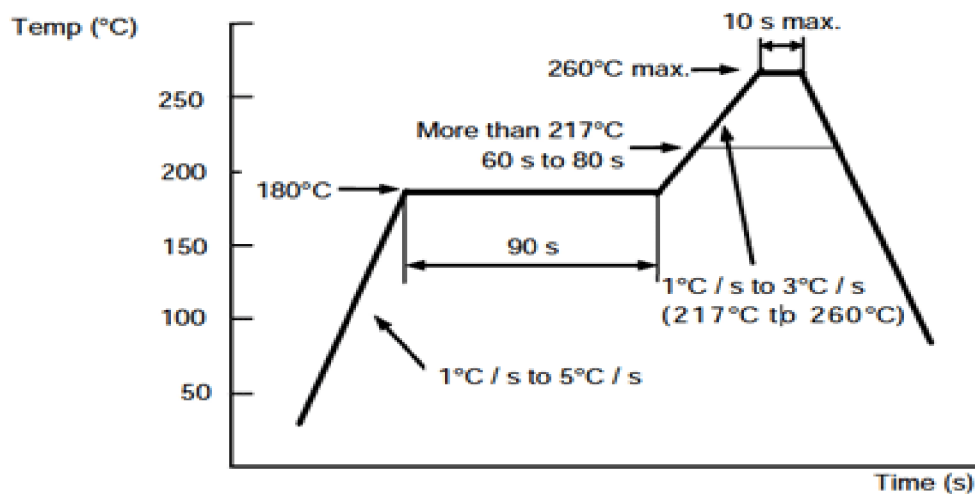
Medzi sekvenčné patria stroje pre osadzovanie fine-pitch súčiastok. Sú síce pomalšie ale spĺňajú požiadavku na veľkú presnosť. Súčiastka sa po zdvihnutí skontroluje a kamerou sa opraví jej poloha. Kamera môže byť uložená samostatne, čo je presnejšie, alebo priamo na osadzovacej hlave, čo je rýchlejšie. Následne sa uloží na programom zadané miesto. Simultánne osadzovanie je nepochybne rýchlejšie, ale taktiež menej presné. Z toho dôvodu sa hodí na osadzovanie súčiastok, ktoré nevyžadujú veľmi presné uloženie, ale je ich veľký počet. Medzi takéto patria napríklad odpory, kondenzátory či diódy. Často sa využíva spojenie oboch strojov pre rýchle aj presné osadzovanie. [2]



Obrázok 2.3: Osadzovací automat

2.4. Proces spájkovania pretavením

Pred začatím spájkovania musíme predpokladať že je povrch pokrytý vrstvou oxidu, ktorý znemožňuje dobré zmočenie povrchu. Na rozrušenie tejto vrstvy používame tavivo, ktoré navyše zlepšuje prenos tepla, a mechanicky vymýva nečistoty. V procese spájkovania pretavením je tavivo obsiahnuté v spájkovacej paste spolu s aktivátormi spájkovacomou zliatinou a pojivovými zložkami. Pri spájkovaní vlnou sa nanáša na povrch plošného spoja pred ponorením do spájky. Poznáme viaceré druhy aplikácie taviva (sprejom, penou, štetinami). Typický teplotný profil je znázornený na obrázku 2.4.



Obrázok 2.5: Pretavovací profil bezolovnatej SAC spájky[7]

2.4.1. Predohrev

Na začiatku pri izbovej teplote sú všetky zložky pasty neaktívne. Pred roztavením zliatiny je potrebné odstrániť oxidy z povrchu substrátu, preto systém nahrejeme na aktivačnú teplotu aby si tavidlo mohlo začať plniť svoju funkciu. Táto fáza sa nazýva predohrev. Teplota sa pohybuje v okolí 180 °C po dobu minimálne 100 sekúnd. Počas tejto doby sa odstránia oxidy a nečistoty z povrchu no tavidlo reaguje aj naďalej, tento krát so vzdušným kyslíkom, čím sa zabráňuje znovuoxidácii substrátu. [2]

2.4.2. Pretavenie

Po fáze predohrevu teplota opäť rastie a dostáva sa nad hranicu liquidu. Tu nastáva pretavenie pasty, spájka sa taví, prebieha difúzia častíc spájky do substrátu, nastáva zmáčanie povrchu. Na to aby bola spájka dostatočne tekutá musí teplota vystúpiť aspoň o 10 °C nad teplotu tavenia. Doba po ktorú je teplota presahuje teplotu tavenia by mala trvať približne 60 sekúnd. V tejto fáze je sa spájka správa veľmi reaktívne, preto je najviac potrebné chrániť ju pred vzdušným kyslíkom. Tavidlo je však aktívne už pomerne dlhú dobu počas ktorej reaguje s kyslíkom, preto sa môže stať, že v tejto fáze je už vyčerpané a nie je schopné si ďalej plniť svoju funkciu. A tu sa ukazuje podstata spájkovania v dusíkovej atmosfére. Dusík ako inertný plyn nereaguje s tavidlom a to je neskôr schopné zabrániť prípadnej oxidácii tekutej spájky zostatkovým kyslíkom a napomáhať znižovaniu povrchového napätia medzi spájkou a substrátom.[2]

2.4.3. Chladnutie

Behom chladnutia sa vytvára kryštalická mriežka spájky, vytvárajú sa intermetalické zlúčeniny a vzniká spoj. Tavidlo vytvorí plastickú hmotu na povrchu spoja. Tá slúži ako ochrana, zachytí ich v mriežke, pred kontamináciou iónmi, čo by zvyškami po aktivátoroch. Preto sa no-clean tavidlá nesmú čistiť.[2]

3. Materiály pre spájkovanie

Veľmi dôležitý pre spájkovací proces je výber materiálov. Tie musia splňovať podmienky pre daný výrobný proces a rovnako aj zaručiť dlhodobú funkčnosť pri používaní výrobku.

3.1. Povrchy pre spájkovanie

Vplyvom starnutia sa povrchy kontaktných plôšok a vývodov súčiastok pokrývajú vrstvou oxidov ktorá bráni dobrému spájkovaniu. Zoxidovaný povrch má menšie zmáčacie sily a zväčšuje sa hrúbka vzniknutej intermetalickej vrstvy. Čiastočne môžeme vrstvu oxidov odstrániť použitím agresívnejšieho taviva, to ale môže spôsobovať rýchlejšie starnutie výrobku. Preto je vhodné použiť aj povrchové úpravy materiálov, ktoré tejto oxidácii zabráňujú a zároveň nemajú vplyv na zmáčacie sily.

3.1.1. Povrchové úpravy DPS

Poznáme rôzne možnosti úpravy povrchov spájkovacích plôšok. Medzi sebou sa líšia kvalitou, cenou a vplyvom procesu úpravy na DPS. [1]

HAL

Odvođený z anglického Hot Air Leveling, spočíva v pokovení substrátu vrstvou cínu. Pokovenie prebieha pri ponorení DPS do roztaveného cínu s teplotou okolo 270 °C. Prebytočná spájka sa sfúkne horúcim vzduchom, takzvaným vzduchovým nožom. Vytvorí sa tak vrstva s hrúbkou od 1 µm do 40 µm. Výhodami je dobrá spájkovateľnosť, a nízka cena. Nevýhodou je teplotný šok ktorým prechádza DPS. Má to vplyv na jej mechanické vlastnosti. Ďalšou nevýhodou je možné vytvorenie vodivého mostu medzi dvoma blízkymi plôškami. Preto sa nemôže využívať pre náročné fine pitch aplikácie. Pre menej náročné dosky je však veľmi výhodný. Problémom taktiež býva možná rôzna hrúbka vrstvy cínu.

OSP

Organic Surface Protection. Spočíva v chemickom nanosené organického inhibítora oxidácie na báze imidazolu a benzoimidazolu. Tie sú viazané k povrchu Van der Waalsovými silami a vytvoria vrstvu s hrúbkou 200 nm až 400 nm. Výhodami je nízka cena a dobrá spájkovateľnosť. Oproti HAL nedochádza k teplotnému namáhaniu dosky. Nevýhodou je ale teplotná citlivosť povrchu a taktiež jeho rýchle starnutie.

NiAu

Galvanicky sa na povrch plôšok najprv naniesie vrstva niklu a následne rovnakým spôsobom vrstva zlata. Vrstva niklu má hrúbku 4-7 µm a zlato s hrúbkou do 0,1 µm. Výhodami je dobrá spájkovateľnosť, nízke teplotné namáhanie, možnosť kontaktovania hliníkovým drôtom a taktiež použitia vodivých lepidiel. Používa sa pri náročnejších aplikáciách. Hlavnou nevýhodou je vysoká cena.

Chemický cín

Na medený povrch sa nanesie tenká vrstva cínu. To sa deje ponorením očistenej dosky do roztoku obsahujúceho cín. Lepší výsledok dosiahneme ak budeme chemický cín nanášať za tepla napríklad valcovaním. Tento proces je však finančne aj technologicky náročnejší. Výhodou je cena a rovnomernosť vrstvy naneseného cínu.

3.1.2. Povrchové úpravy súčiastok

Chrániť pred oxidáciou musíme aj kontakty súčiastok. Používa sa najmä pokovenie, buď cínom alebo drahými kovmi. Medzi najpoužívanejšie patria nikel paládium(Ni-Pd), nikel paládium zlato(Ni-Pd-Au), striebro paládium(Ag-Pd), cín bizmut(Sn-Bi), cín meď(Sn-Cu), cín striebro(Sn-Ag). [1]

3.1.3. Spájkovanie na anorganickom substráte

Spájkovanie pretavením môžeme použiť aj pri anorganických substrátoch s vodivými cestami vytvorenými hrubovrstvou technológiou. Substrát tvorí oxid hlinitý Al_2O_3 , známy aj pod názvom korund. Korundová keramika je veľmi tvrdá a odoláva vysokým teplotám. Preto na nej môžeme pretaviť aj ťažko tavitelné kovy a vytvoriť tak vodivý motív. Nevýhodou je krehkosť substrátu.

Hrubá vrstva je vytvorená z vodivej zložky a zložky zabezpečujúcej jej pevnosť. Vodivé zložky zväčša pozostávajú z drahých kovov, často v kombinácii zlato-paládium-platina. Pastu môžeme naniesť napríklad tlačou cez šablónu a následne do nej položíme súčiastky. Pretavujeme podľa odporúčaného teplotného profilu pre danú pastu.

Pri testovaní štyroch zliatín (SnPb, SnAg, SnAgBi, SnAgBiAu) sa zistilo že najnižšiu pevnosť v ťahu aj tlaku vykazuje spájka SnPb a hneď po nej SnAg. Naopak najväčšiu pevnosť nameriame pri spájke SnAgBiAu. Testovalo sa metódou ring-in-plug. [8]

Tabuľka 1: Porovnanie mechanickej pevnosti v ťahu a tlaku [8]

Spájka	Pevnosť v ťahu [kg]	Pevnosť v tlaku [MPa]
SnPb	121	40
SnAg	166	55
SnAgBi	244	81
SnAgBiAu	254	83

3.2. Spájkovacie pasty

Spájkovacia pasta sa skladá z troch zložiek, spájkovacej zliatiny, taviva a zložky zabezpečujúcej jej viskozitu. Na rozdiel od spájkovania vlnou je výhodou presne definované množstvo taviva v spájke.

3.2.1. Spájkovacie zliatiny

Kedysi najpoužívanejšia olovnatá spájka SnPb sa dnes používa len vo vybraných prípadoch. Pre všetky ostatné aplikácie sa používajú spájky bezolovnaté, ktoré nie sú škodlivé k životnému prostrediu. Uvediem príklad dvoch najpoužívanejších

Spájka SAC

Táto spájka je pomerne rozšírená spomedzi bezolovnatých spájok. Je tvorená zliatinou troch kovov, cínu, striebra a medi. Najpoužívanejšou je zliatina SAC305, zloženie Sn 96,5%, Ag 3% a Cu 0,5%, posúva bod tavenia oproti čistému cínu na 217°C, no vyrába sa veľké množstvo variácií koncentrácie jednotlivých zložiek pre rôzne zamerania. V porovnaní s olovnatými spájkami je však tento rozdiel dosť podstatný a vytvára menšie technologické okno [2]. U väčšiny spájkovaných povrchov dosahuje dobré zmáčacie sily dobrú rýchlosť zmáčania. [9]

Spájka Sn100C

V porovnaní so spájkou SAC305 má ešte vyššiu teplotu tavenia, mala by však dosahovať lepšie zmáčacie sily. Skladá sa prevažne z cínu doplneného o malé množstvá medi a niklu. Teplota tavenia je až 227°C čo umožňuje len veľmi malé technologické okno. Výsledný spájkovaný spoj je porovnateľný so spájkou Sn63Pb37, dosahuje taktiež dobré zmáčacie rýchlosti a sily. [9] [10]

Spájky s nízkym obsahom striebra

S cieľom znížiť cenu bezolovnatej spájky sa pristupuje k zníženiu obsahu striebra v zliatine na minimum. To však nesmiem ovplyvniť vlastnosti spájky a preto sa pridávajú ďalšie prvky ako bizmut, nikel, či indium. Príkladom môže byť spájka M40 od výrobcu Senju Metal Industry. Obsah striebra sa znížil na 1% a pridaných bolo 1,6% bizmutu a 0,2% india. Táto spájka v porovnaní s SAC305 nevyžaduje zvýšenie teploty pretavenia. Navyše vďaka dvojitému vrcholu tavenia zabraňuje vzniku tombstoning efektu (efekt postavenia súčiastok). Ďalšia spájka M46 má ešte nižší obsah striebra, len 0,3%, no vyžaduje zmenu pretavovacieho profilu na vyššiu teplotu. [11]

3.2.2. Tavivá

Tavivo plní v procese spájkovania viacero funkcií. Napomáha procesu zmáčania, odstraňuje oxidy, zlepšuje prestup tepla, čistí povrch mechanicky. Môžu byť na organickej, alebo anorganickej báze.

Tabuľka 2: Klasifikácia tavidiel pre mäkké spájkovanie podľa ČSN EN ISO 9454-1

Typ taviva	Základná zložka	Aktivátor	Forma taviva
1. živicové	1. kolofónia 2. bez kolofónie 3. syntetická živica	1. bez aktivátoru 2. aktivované halogenidmi 3. aktivované bez halogenidov	A tekuté B tuhé C pasta
2. organické	1. rozpustné vo vode 2. nerozpustné vo vode	1. bez aktivátoru 2. aktivované halogenidmi 3. aktivované bez halogenidov	A tekuté B tuhé C pasta
3. anorganické	1. soli 2. kyseliny 3. zásady	1. HN_4Cl 2. bez HN_4Cl 1. kyselina fosforečná 2. iné kyseliny 1. amíny, alebo amoniak	A tekuté B tuhé C pasta

Výber taviva robíme na základe požiadaviek pre spájkované povrchy. Na povrch ošetrový vrstvou OSP je vhodnejšie použiť organické tavivo[9]. Tavivá obsahujúce halogenidy sú výborné v odstraňovaní oxidov, no ich zvyšky v dlhodobom horizonte ovplyvňujú kvalitu spoja, preto je potrebné ich odstrániť.

3.2.3. Pasty pre rôzne spôsoby nanášania

Pri rôznych technikách nanášania využívame rôzne druhy pást líšiac sa svojou viskozitou a veľkosťou zrn. Rozlišujeme spájky pre šablónovú tlač, sieťotlač a pre dávkovač. Pre tlač cez šablónu využívame pastu s veľkou viskozitou 600-1000 Pa.s a s veľkým podielom zliatiny. Pre sieťotlač potrebujeme pastu s nižšou viskozitou 400-700 Pa.s s menším podielom kovu. Tu je dôležitá aj veľkosť zrn ktorá by nemala byť väčšia ako tretina svetlej veľkosti oka. Do dávkovača potrebujeme pastu s ešte nižšou viskozitou 200-400 Pa.s. Výber pasty ovplyvňuje aj náročnosť danej dosky. Tu rozhoduje veľkosť zrn, podľa čoho delíme pasty do šiestich kategórií. V prvej triede sú pasty s najväčším priemerom častíc, 150-75 μm . Pre fine pitch aplikácie využívame aspoň triedu 2, s priemerom do 45 μm . Trieda 6 má veľkosť zrn len 15-5 μm . [2]

4. Mechanické skúšky elektronických zostáv

Pevnosť samotného spájkovaného spoja má význam pre porovnanie jednotlivých spájok či povrchov, no nevytvára o tom ako sa bude chovať ako súčasť väčšieho celku. Spolu s trendom minimalizácie sa zvyšuje integrácia obvodov do jediného puzdra, ktoré môže mať niekoľko stoviek vývodov. Tie sa vzájomne ovplyvňujú a vzniká stav kedy sú jednotlivé vývody v rámci jednej súčiastky zaťažované nerovnomerne.

4.1. Elektronická zostava

Podľa Electronic Code of Federal Regulations [12] je elektronická zostava súbor elektronických prvkov (obvodové prvky, diskkrétne prvky, integrované obvody, dosky plošných spojov, atď.) spoločne prepojených tak, aby splňali špecifickú funkciu, vymeniteľné ako celok a štandardne schopné rozloženia.

4.1.1. Delenie materiálov pre substráty

Základné materiály [2]:

- Organické
 - Neohybné
 - Výstuž
 - Sklená tkanina
 - Sklená rohož
 - Vystužený papier
 - Vlákna (Kremenné, Uhlíkové, Aramid, atď.)
 - Pojivo
 - Termoplast
 - Reaktoplast
 - Ohybné
 - Bez výstuže
 - S výstužou
 - Kombinované
- Anorganické
 - Berýliová keramika
 - Korundová keramika
 - Kovové jadro
 - Kremík
 - LTCC

4.1.2. Organické základné materiály

Organické materiály pre výrobu DPS sú elektroizolačné nosné materiály skladajúce sa z organických živíc a výstuže. Na základný materiál je spravidla naplátovaná medená fólia pre subtraktívne technológie zhotovenia vodivých motívov.

Výstuž

Určuje mechanické vlastnosti DPS, rozmerovú stálosť v danom teplotnom rozsahu, ovplyvňuje elektrické, chemické a teplotné charakteristiky. Výstuž tvorí kostru laminátu a ovplyvňuje vyrobiteľnosť a výslednú spoľahlivosť DPS [2]

Poznáme viacero druhov výstuže. Medzi najčastejšie používané patria:

- Sklené vlákno
- Tvrdený papier
- Aramidové vlákno
- Kremenné vlákno
- Uhlíkové vlákno

Pojivo

Zrovnomerňuje pôsobenie vonkajších vplyvov na výstuž, chráni ju pred mechanickým poškodením a účinkami chemikálií. Pojivo je na polymérnej báze, musí mať výborné dielektrické vlastnosti s malou hodnotou relatívnej permitivity a stratového činiteľa. Musí mať dobré mechanické vlastnosti, tepelnú a chemickú odolnosť. Delíme ich na použitie pre ohybné a neohybné DPS. Pre ohybné sa využívajú termoplastické polyméry (polyeterimid, PTFE, polyimidové živice, PET, PEN). Pre neohybné sa používajú termosety (Fenolformaldehydové živice, epoxidové živice, polyesterové živice, BT, CE)[2]

4.1.3. Anorganické základné materiály

Sú tvorené anorganickým materiálom. Výhodou je ich tepelná a chemická odolnosť, malá teplotná rozťažnosť a izotropné vlastnosti. Nevýhodou je vyššia hmotnosť, krehkosť a vyššia cena. Medzi najpoužívanejšie anorganické substráty patrí[2]:

Korundová keramika

Základom je oxid hlinitý Al_2O_3 s malým množstvom ichých kovových oxidov pre dosiahnutie požadovaných fyzikálnych vlastností. Používajú sa najmä v multičipových moduloch. Vodivé cesty sa vytvárajú hrubovrstvou alebo tenkovrstvou technológiou.

Berýliová keramika

Základom je oxid berýlnatý BeO . Výhodou oproti korundovému substrátu je 7-krát väčšia tepelná vodivosť. Nevýhodou je jeho toxicita a cena.

LTCC

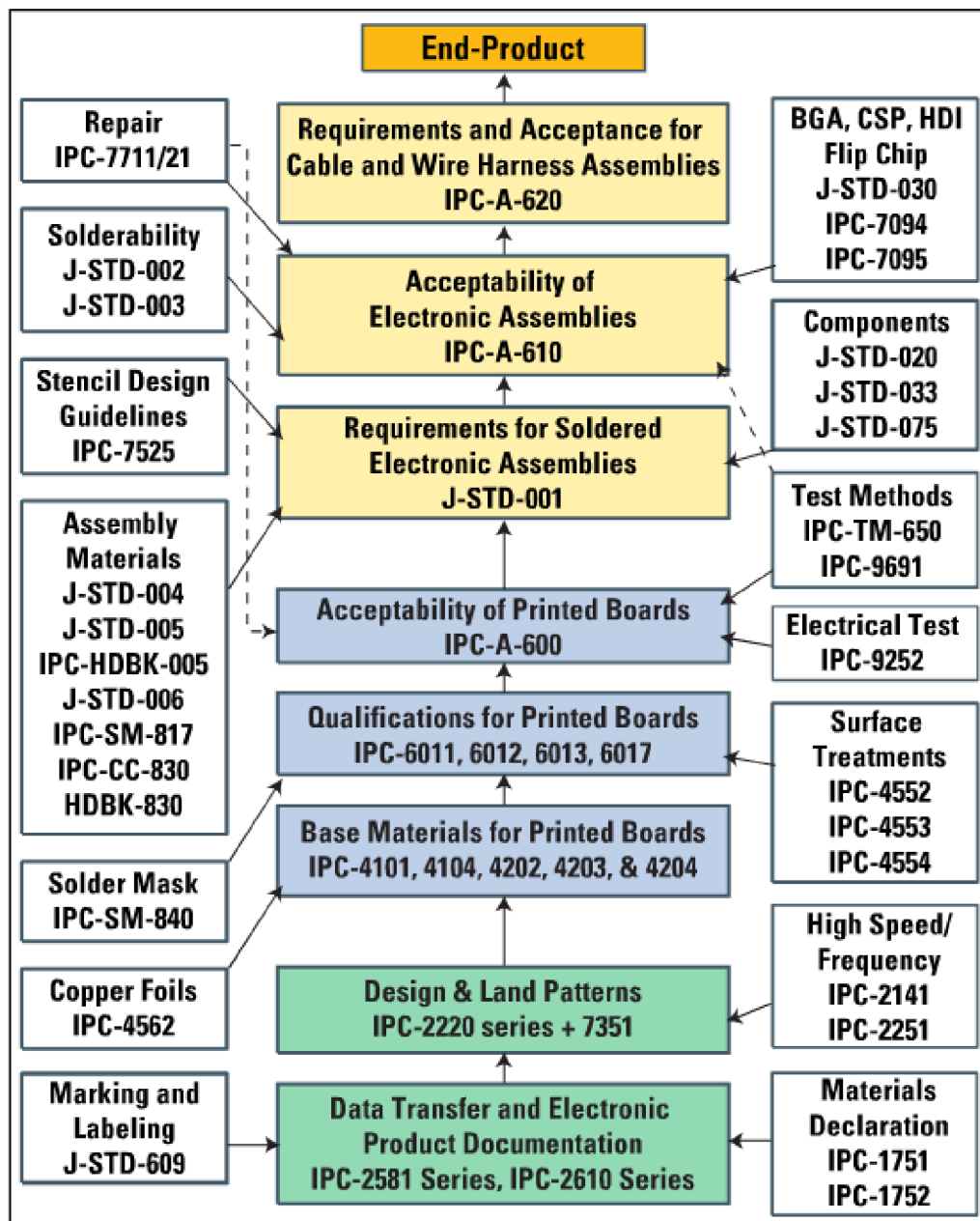
(Low Temperature Cofired Ceramic) Sklo-keramický substrát dodávaný vo fóliách. Vhodný na vytváranie 3D štruktúr

Ovrstvené kovové jadro

Využívajú sa pre aplikácie kde je veľmi dôležité prispôsobiť teplotnú rozťažnosť, rozťažnosti súčiastok (napr. flip-chip), a zabezpečiť dobrú tepelnú vodivosť.

4.2. Štandardy pre test testovanie elektronických zostáv

Asociácia IPC (skratka z anglického Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits) združuje organizácie zaoberajúce sa výrobou elektronických zostáv. Vydávané štandardy majú za úlohu zjednotiť proces výroby od návrhu až po testovanie, čoho cieľom je lepšia prenositeľnosť technológií, zlepšenie kvality produktu a v neposlednom rade zníženie výrobných nákladov. Prehľad jednotlivých štandardov vydávaných asociáciou IPC je zobrazený na obrázku 4.1.



Obrázok 4.1: Základný prehľad noriem IPC [www.ipc.org]

Základné normy pre proces výroby od návrhu až po testovanie podľa organizácie IPC [www.ipc.org]:

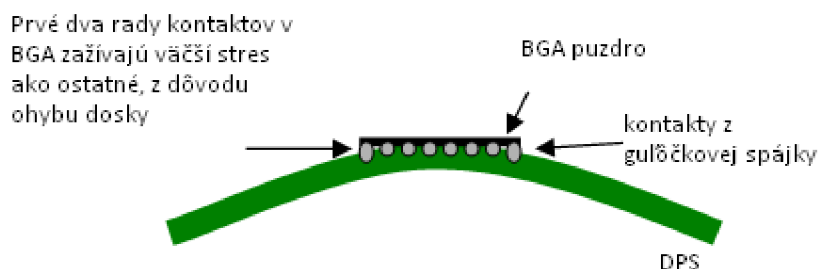
- Transfer dát a elektronická dokumentácia
 - IPC-2581: Tento štandard popisuje XML schému, ktorá reprezentuje dátový formát popisujúci dosku plošných spojov a zostavu produktu. Zahŕňa požiadavky na zariadenia, výrobu, montáž a kontrolu.

- Design plošných spojov
 - IPC-2220: Táto séria dokumentov zahŕňa výber materiálov pre dosky plošných spojov, prúdové kapacity, minimálne vzdialenosti vodivých ciest, design testovacích štruktúr, rozmerové požiadavky a hrúbku vodičov.
- Základné materiály pre dosky plošných spojov
 - IPC-4101: Zahŕňa požiadavky pre základné materiály, lamináty, prepregy, pevné a viacvrstvové DPS
 - IPC-4104: Popisuje materiály vhodné na použitie pre husto prepojené DPS a mikrorepeje.
 - IPC-4202: Flexibilné základné materiály pre flexibilné DPS
 - IPC-4203: Dielektrické filmy na prekrytie vrstiev pre flexibilné DPS
 - IPC-4204: Flexibilné metalizované dielektriká pre flexibilné DPS
- Prijateľnosť dosiek plošných spojov
 - IPC-A-600: Popisuje odporúčané, prijateľné a nevyhovujúce podmienky ktoré sú pozorovateľné na povrchu aj vo vnútri DPS. Ukazuje minimálne vizuálne požiadavky na DPS.
- Požiadavky na spájkované elektronické zostavy
 - J-STD-001: Pokrýva materiály pre spájkovanie a procesy pre bezolovnaté spájkovanie
- Prijateľnosť elektrických zostáv
 - IPC-A-610: Zbierka požiadaviek vizuálnej akceptability kvality elektrických zostáv
- Požiadavky a prijateľnosť káblových a drôtených prepojení a káblových zväzkov
 - IPC-A-620: Súbor požiadaviek na vizuálnu prijateľnosť kvality káblových a drôtených prepojení a káblových zväzkov.

4.3. Odolnosť voči mechanickým vibráciám

V reálnych podmienkach sú dosky plošných spojov vystavované širokému spektru vibrácií. Jedná sa najmä o elektroniku využívanú v dopravných prostriedkoch. Potreba testovania odolnosti spájkovaného spoja je preto nevyhnutná. Na testovanie sa využíva vibračné zariadenie s vertikálnymi kmitmi schopné produkovať frekvencie od desiatok Hz do 2000Hz. Dôležitým parametrom je zrýchlenie ktoré je udávané v násobkoch gravitačného zrýchlenia $G = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Je možné využiť taktiež rôzne druhy kmitania, ako sínusové kmity, náhodné kmity a rázové kmity.

DPS musí byť uchytená pevne vo všetkých štyroch rohoch. Najnamáhanejšie sú veľké súčiastky, najmä puzdra typu BGA kde je hlavným problémom nerovnomernosť namáhania jednotlivých spojov. Pri prehybe sa okrajové spoje namáhajú viac ako spoje uprostred. [13]



Obrázok 4.2: Znáznornenie namáhania kontaktov BGA puzdra pri ohybe dosky[13]

4.3.1. Vibračné testy podľa normy IPC-TM-650 2.6.9

Cyklický test

Prvý test spočíva v cyklickom krokovaní od 20 Hz do 2000 Hz a potom späť na 20 Hz po dobu 16 minút. Zrýchlenie by malo mať hodnotu 15 G v celom kmitočtovom rozsahu. [22]

Rezonančný test

V druhom teste podrobujeme vibráciám dosku po dobu 30 minút na rezonančnej frekvencii. Vstupné zrýchlenie je aspoň 25 G a výstupné merané v geometrickom strede testovanej dosky maximálne 100 G. Rezonančných kmitočtov je teoreticky nekonečno, no zaujímavý je hlavne prvý, kde nastáva najväčší prehyb dosky a tým sú aj najviac namáhané spoje. [22]

Rezonančná frekvencia sa môže matematicky spočítať, no výsledok bude len približný a presnú hodnotu musíme určiť experimentálne. V prípade že sú uchytené 4 rohy substrátu, sa môže použiť rovnica 6 [14].

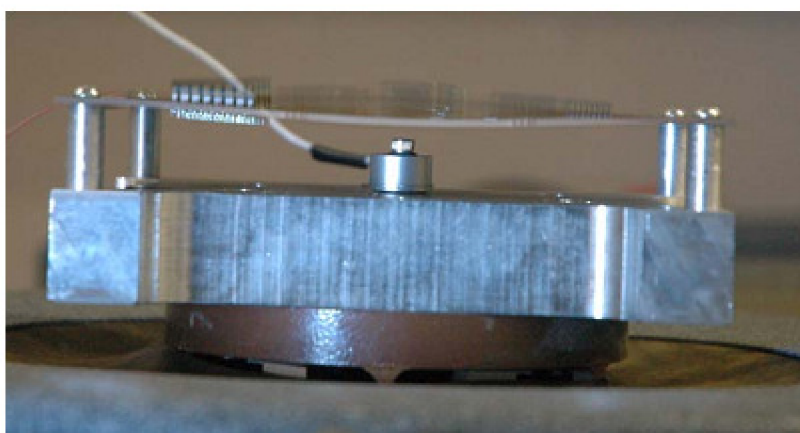
$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D}{\rho}} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \quad (6)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{W}{gab} \quad (8)$$

Kde: E = Modul elasticity
 h = Hrúbka DPS
 μ = Poissonovo rozdelenie
 W = Váha zostavy
 g = Gravitačné zrýchlenie
 a = Dĺžka strany a DPS
 b = Dĺžka strany b DPS

Pri vyhodnocovaní sa sleduje delaminácia dosky plošných spojov a praskliny v spájkovaných spojoch. Je potrebné vyhodnotiť zmeny vo vodivosti spojov pred a po teste.



Obrázok 4.3: Vibračné testovanie elektronickej zostavy na rezonančnej frekvencii [13]

4.3.2. Vibračné testy podľa normy ISO 60068-2

Testovanie je možné prevádzať aj pri rôznych typoch vibrácií. Venuje sa tomu norma ISO 60068-2. Rozlišujú sa sínusové vibrácie, pólusínusové (rázy) a náhodné vibrácie. Vibrácie nastávajú v smere osi x, y a z . Pri sínusovom priebehu používame zrýchlenie $5G$ a 10 krát rozmietame od 5 Hz do 500 Hz. Pri pólusínusovom priebehu používame zrýchlenie $30G$. Test na náhodné vibrácie budeme prevádzať po dobu 90 minút pri zrýchlení $1.9G$.

4.3.3. Doba životnosti spoja v záťažových podmienkach

Okrem skúšok uvedených v normách, by mohlo byť ďalším predmetom záujmu preskúmať vplyv vibračných cyklov na postupnú degradáciu spoja. S využitím Minerovho pravidla poškodenia (Miner's damage rule) je možné určiť ako dlho vydrží spoj v štandardných podmienkach. Minerovo pravidlo hovorí, že ak je k roznych stresujúcich podmienok a priemerný počet cyklov na dosiahnutie zlyhania, na i -tom strese S_i , je N_i , potom podiel poškodenia C je [16]:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = C \quad (9)$$

Kde n_i je počet cyklov naakumulovaných v stresovacích podmienkach S_i . C je časť životnosti spotrebovanej vystavením počtu cyklov pri rôznych stresovacích podmienkach. Vo všeobecnosti ak C dosiahne hodnotu 1, vzniká zlyhanie.

Ďalej môžeme vyjadriť index poškodenia W .

$$W_i = n_i \cdot S_i \quad (10)$$

$$W_{FAIL} = N_i \cdot S_i \quad (11)$$

Ak spojíme rovnice dostaneme:

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i \cdot S_i}{N_i \cdot S_i} = C \Rightarrow \frac{\sum_{i=1}^n n_i \cdot S_i}{W_{FAIL}} = C \quad (12)$$

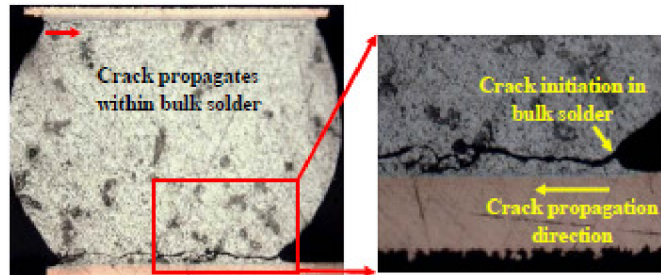
C predstavuje podiel kumulatívneho poškodenia na kritickú hodnotu. [16]

Pre vibračný test sú stresovacie podmienky S_i zastúpené zrýchlením G , na ktorom závisí vychýlenie dosky z rovnovážnej polohy. Podmienky je možné variovať v rôznych rozmedziach v rámci možností testovacieho zariadenia. Potrebné je vybrať tri rôzne akcelerácie, tak aby sa priemerné časy zlyhaní pohybovali v dostatočných rozstupoch (napríklad 100 sekúnd, 300 sekúnd a 1000 sekúnd). Počet cyklov sa jednoducho spočíta vynásobením frekvencie s časom:

$$n_i = f \cdot t \quad (13)$$

Vyhodnocuje sa odpor vodivej cesty. Dôležitým faktorom je určiť si kritérium zmeny odporu, kedy sa dá povedať že nastalo zlyhanie. Odvíja sa to od technológie a cieľového zamerania obvodu. Štandardnou hodnotou, ktorú možno použiť ako kritérium zlyhania, je nárast v odpore vodivej cesty o 100%.

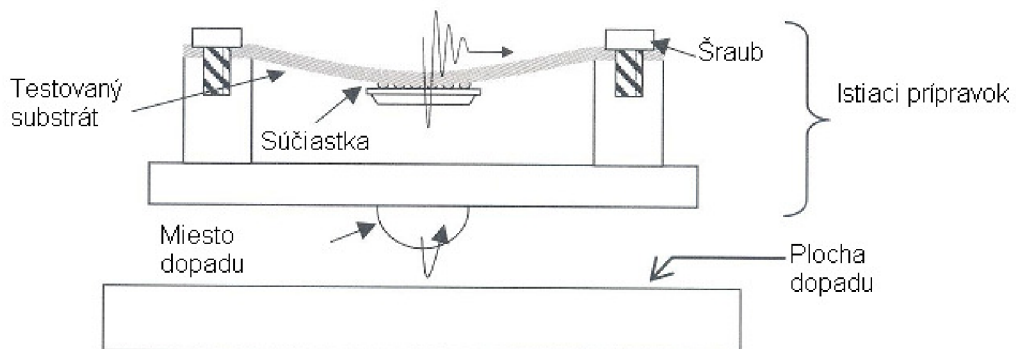
Dodatočne je možné zaznamenať aj typ zlyhania. Prvým požadovaným typom je vznik praskliny v spájkovanom spoji. Pri BGA puzdre môže vzniknúť na strane dosky ale aj na strane puzdra. Ďalšími typmi sú chyby vzniknuté na DPS. Vibrácie môžu spôsobiť pretrhnutie vodivej cesty, či delamináciu kontaktnej plôšky.



Obrázok 4.4: Vznik a propagácia trhliny v spájke [15]

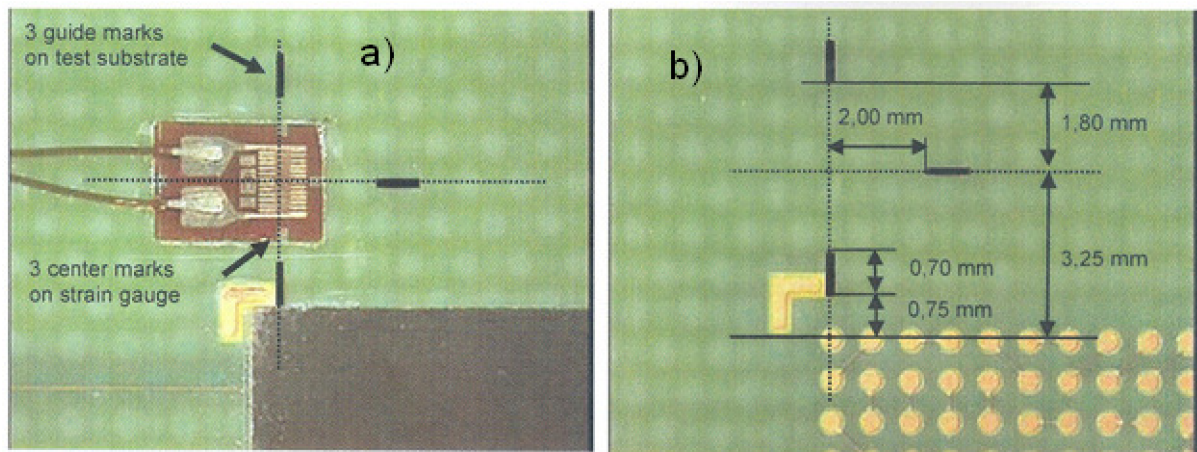
4.4. Test dosky dopadom s využitím tenzometrov [23]

Cieľom tohto testu je vyhodnotiť a porovnať odolnosť voči pádu plošne montovaných polovodičových súčiastok. Testovaná vzorka sa nechá voľne padnúť, čím vzniknú mechanické kmity ktoré sa šíria materiálom určitý čas. Využitím tenzometrov sa dá určiť napätie v materiáli, pomocou akcelometrov sa dá určiť zrýchlenie pri dopade. Testovaná vzorka musí umožňovať kontinuálne meranie. Substrát je pevne uchytенý v štyroch bodoch na okraji, pričom testovaná súčiastka by mala byť umiestnená v strede substrátu. Príkladom môže byť požadovaná vzdialenosť záchytných bodov pre mobilný telefón 50 mm až 80 mm. [23]



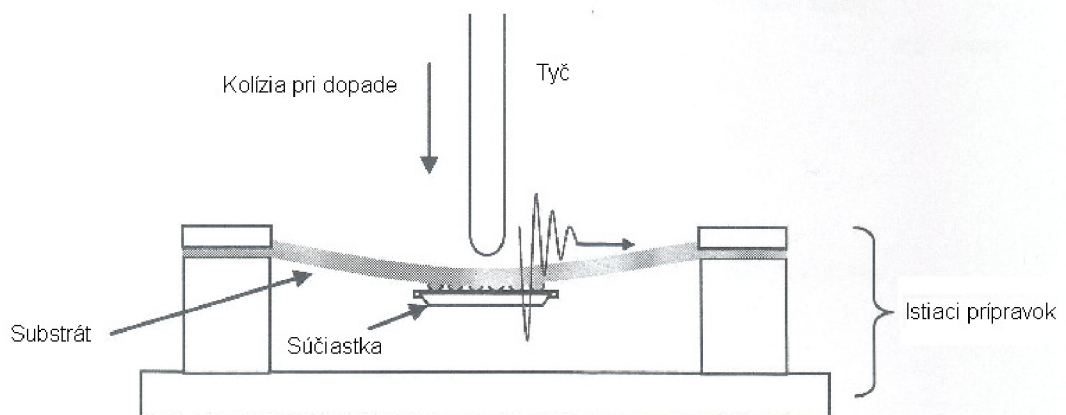
Obrázok 4.5: Uchytenie testovaného substrátu zo súčiastkou typu BGA pre drop test[23]

Tenzometer by mal mať rozmer 1 mm až 2 mm, mal by byť fóliového typu a popisovať jednu os. Merač mechanického napätia by mal mať vzorkovaciu rýchlosť minimálne 150 kHz. Ak by tomu tak nebolo, informácie o priebehu napätia v materiáli by mohli byť skreslené.



Obrázok 4.6: Príklad uchytenia tenzometra na substrát(a) a distančné vzdialenosti(b) [23]

Ďalšou obmenou tejto metódy je využitie tyče, ktorá dopadne na testovaný substrát a tým vyvolá ohyb. Výhodou je možnosť využitia väčšej pôsobiacej sily pri dopade a tým dosiahnutie väčšieho ohybu substrátu.



Obrázok 4.7: Drop test pri použití tyče, ktorá dopadá na testovaný substrát[23]

4.5. Mechanická pevnosť v strihu a ťahu

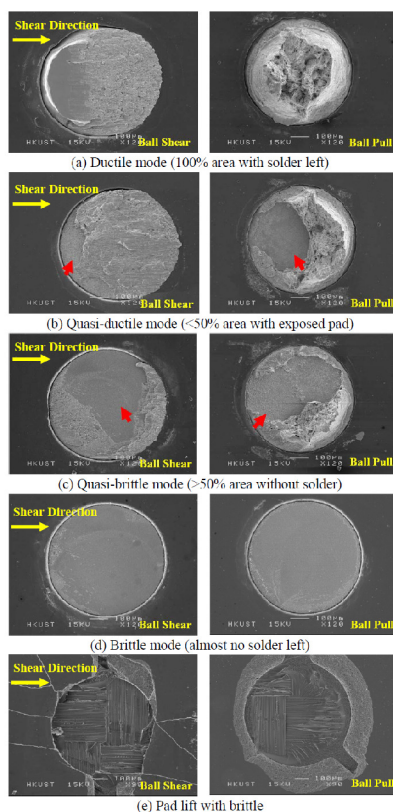
Najmä v strojárstve je veľmi využívanou metódou na určenie mechanickej pevnosti materiálov. Následne je vyhodnocovaný priebeh pôsobiacej sily na strihaný materiál. V elektrotechnike sa zvyčajne neumiesťujú merané vzorky do nožníc ako na obrázku 5.1, ale na spájkovaný spoj je vyvíjaný tlak v horizontálnom smere. Na obrázku 5.2 je ukážka testu

strihom na guľôčke spájky umiestnenej na BGA puzdre. Nastaviteľným parametrom je rýchlosť pohybu nožníc a odsadenie. Záleží to od typu testovaného spoja, podľa [17] je rýchlosť, pre guľôčku s priemerom 0,5 mm, 200 $\mu\text{m/s}$ a odsadenie nožníc 50 μm .

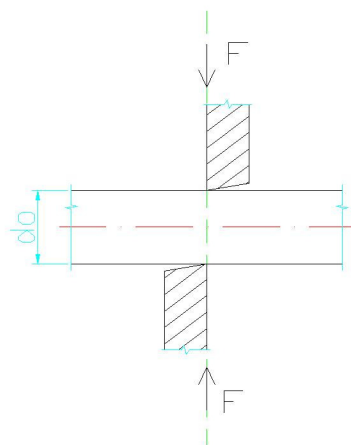
Rýchlosť pohybu je rozhodujúca aj v tom ako sa guľôčka spájky odtrhne od plôšky. Pri malých rýchlostiach (10 mm/s) zostáva na plôške vrstva spájky. Tento stav je žiadúci a dá sa povedať že spoj vyhovel požiadavkom. Pri väčších rýchlostiach (3000 mm/s) sa prejaví vplyv vzniknutých prasklín a intermetalických zlúčenín na rozhraní med'-spájka a môže nastať odtrh bez spájkového rezidua. Tento stav je nežiadúci a hovoríme tu o krehkom spoji.

Rozlišujeme viaceré typy odthnutia [18]:

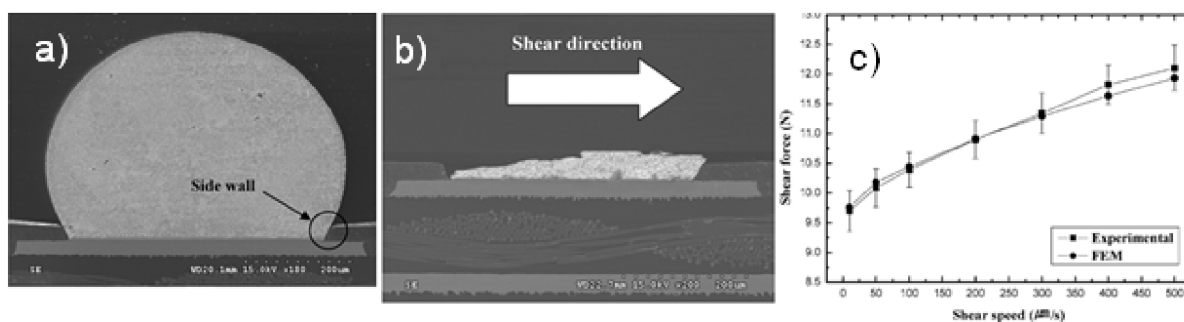
- Ťažný – po odtrhu na celej plôške zostáva vrstva spájky.
- Kvázi-ťažný – vrstva spájky nieje na celom povrchu plôšky, ale je pokrytých viac ako 50%.
- Kvázi-krehký – vrstva spájky ostáva na menej ako 50% plochy plôšky
- Krehký – po odtrhu na plôške nezostáva žiadna spájka
- Odtrhnutie plôšky – nastáva v prípade že adhézna sila plôšky na substráte je menšia ako pevnosť spoja



Obrázok 4.8: Rôzne typy strihu a odtrhu guľôčky spájky pri mechanickom testovaní [18]



Obrázok 4.9: Pevnosť v strihu



Obrázok 4.10: Test strihom na guľôčke spájky [17]

a) Rez guľôčkou spájky pripravená na test strihom

b) Rez štruktúrou po teste strihom

c) Vplyv rýchlosti posuvu na nameranú strihovú silu

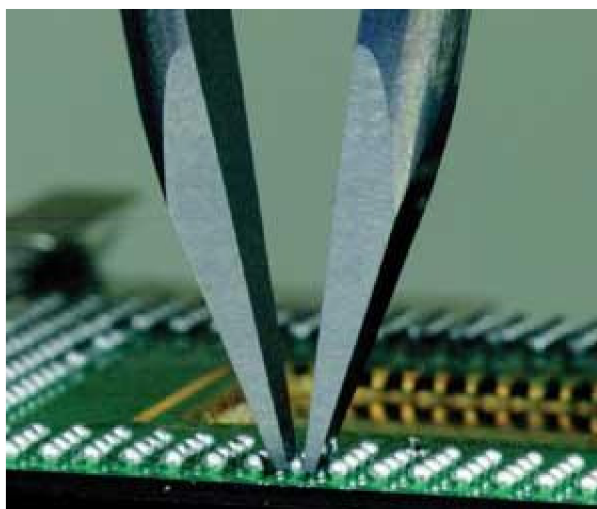
Ďalšou metódou mechanického testovania spoja je test pevnosti v ťahu. Spočíva v uchytení spájkovanej súčiastky alebo guľôčky spájky do zariadenia ktoré vyvolá ťahovú silu. Tá je potom vyhodnocovaná a pevnosť spoja je určená maximálnou hodnotou sily ktorú spoj dokáže uniesť.

Nastaviteľným parametrom je rýchlosť ťahu. Zvyčajne sa pohybuje v desatinách milimetra za sekundu, záleží to ale od typu súčiastky a meracieho zariadenia. Podľa dostupnej literatúry [18] sa rýchlosť pohybuje od 5 mm/s do 500 mm/s. Rovnako ako v teste ťahom rozlišujeme 5 rôznych typov odtrhu.

Existujú dve rôzne alternatívy testu ťahom pre BGA kontakty. Prvou je metóda horúcej guľôčky (hot ball), kedy sa horúci hrot priloží k spájke. Tá sa čiastočne nataví a následne po vychladnutí a stuhnutí vytvorí spoj s hrotom. Vtedy sa môže testovať odtrh guľôčky. Veľkou nevýhodou metódy je, že sa nedá povedať do akej miery teplota hrotu

ovplyvní metalurgický prechod medzi spájkou a medenou plôškou. Pri testoch zahŕňajúcich zrýchlené starnutie, či vibrácie, môže dôjsť k ovplyvneniu vzniknutých intermetalických zlúčenín, alebo k opätovnému pretaveniu vzniknutých prasklín, ktoré sú dôležité pre vyhodnotenie vibračné testov. Preto je relevantnosť výsledkov otázna. Metóda je navyše zdĺhavá, pretože vyžaduje opakované nahrievanie a chladnutie hrotu. [19]

Druhou je metóda studenej guľôčky (cold ball), kedy sa využívajú kliešte na uchytenie guľôčky spájky a následným ťahom nahor sa spoj pretrhne. [19]



Obrázok 4.11: Test ťahom metódou studenej guľôčky (cold ball pull test) [19]

5. Simulácia chovania materiálu pod vplyvom vibrácií

Pri návrhu elektronických zostáv sa kladie čoraz väčší dôraz na dôkladné preskúmanie vlastností ešte pred montážou, aby sa predišlo investíciám do výroby zostavy, ktorá by nespĺňovala požiadavky. V súčasnosti existuje niekoľko programov umožňujúcich simulovať správanie materiálu pri rôznych záťažových podmienkach, ako je mechanické a teplotné namáhanie, prúdové toky

5.1. Metóda konečných prvkov

Základom väčšiny simulačných programov je metóda konečných prvkov (FEM – Finite Element Method). Je to približná metóda riešenia úloh kontinua, pri ktorom sa kontinuum rozdelí na určitý počet častí s konečnými rozmermi (konečné prvky), ktorých vlastnosti určuje určitý počet parametrov. Riešením celého systému, ktorý je tvorený súhrnom jeho prvkov zviazaných v uzlových bodoch, sa vykoná rovnakým spôsobom ako pri úlohách diskrétného charakteru. Dôsledkom takéhoto postupu je, že vo výsledku nie sú funkcie popisujúce chovanie ale konkrétne hodnoty pre dané uzlové body. Za pomoci aproximačných metód sa potom dá približne vyjadriť výsledok na jednotlivých prvkoch. Každá rovnica obsahuje parametre, funkciu popisujúcu chovanie a funkciu popisujúcu akciu. [20]

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (14)$$

Kde K predstavuje parameter, u chovanie a F predstavuje akciu

Postup riešenia problému metódou konečných prvkov by sa dal zhrnúť do niekoľkých bodov [20]:

1. Výber typu analýzy

- Statická štruktúrálna analýza
- Modálna analýza
- Časová dynamická analýzy
- Deformačná analýza
- Termálna analýza
- Časovo premenná termálna analýza

2. Výber typu konečného prvku

Dôležité je určiť či sa jedná o 2D alebo 3D prvok. Taktiež je potrebné zvoliť aproximáciu, lineárnu, kvadratickú alebo kubickú

3. Materiálové vlastnosti

Definovanie materiálových vlastností alebo konštánt, s ktorými budú počítané uzlové rovnice.

4. Diskretizácia telesa

Rozdelenie telesa na jednotlivé prvky je jednoduchý proces pri ktorom musíme zachovať dané pravidlá aby sme dosiahli výsledok čo najviac sa približujúci realite. Uzlový bod volíme pri každej zmene prierezu alebo zaťaženia, úsek medzi dvoma uzlami je konečný prútový prvok.

5. Sústava uzlových rovníc

Neznáme uzlové veličiny určujeme z okrajových podmienok, či bilančných rovníc

6. Postprocessing

Vyhodnotenie výsledkov simulácie, zobrazenie v grafickom prostredí.

Výhodou je ľahké zvládnutie aj zložitejších geometrických tvarov, možnosť použitia na mnoho problémov ako mechanické, tepelné, elektrické, prúdenie. Nevýhodou je nemožnosť simulovať model pri zmene viacerých parametrov súčasne. Taktiež je dosiahnutý výsledok len aproximáciou skutočného stavu.

5.2. ANSYS

Spoločnosť ANSYS bola založená v roku 1970 ako Svanson Analysis Systems. ANSYS je inžiniersky simulačný program využívajúci metódu konečných prvkov k výpočtu chovania materiálov. Medzi základné simulácie patrí mechanické namáhanie, teplotné namáhanie, prúdenie kvapalín a elektromagnetizmus. Jeho cieľom je minimalizácia výrobných nákladov spojených s testovaním a taktiež minimalizácia času do uvedenia produktu na trh. V súčasnosti patrí medzi najpoužívanejšie simulačné nástroje.

5.3. Štruktúra pre simuláciu

Pre simuláciu boli zvolené rozmery testovanej dosky plošných spojov 20x20 cm. Substrát tvorí materiál FR4 skladajúci sa z vrstvenej sklennej tkaniny a pojiva na epoxidovej báze. Hrúbka dosky býva štandardne 1,6 mm. Uprostred DPS je umiestnené Puzdro BGA. V reálnych testoch sa bude využívať simulované BGA puzdro tvorené taktiež materiálom FR4, preto je tento materiál využitý aj pri simulácii. Puzdro má 225 vývodov usporiadaných v matici 15 x 15. Veľkosť použitých guľôčok je 20 mils čiže 0,508 mm.

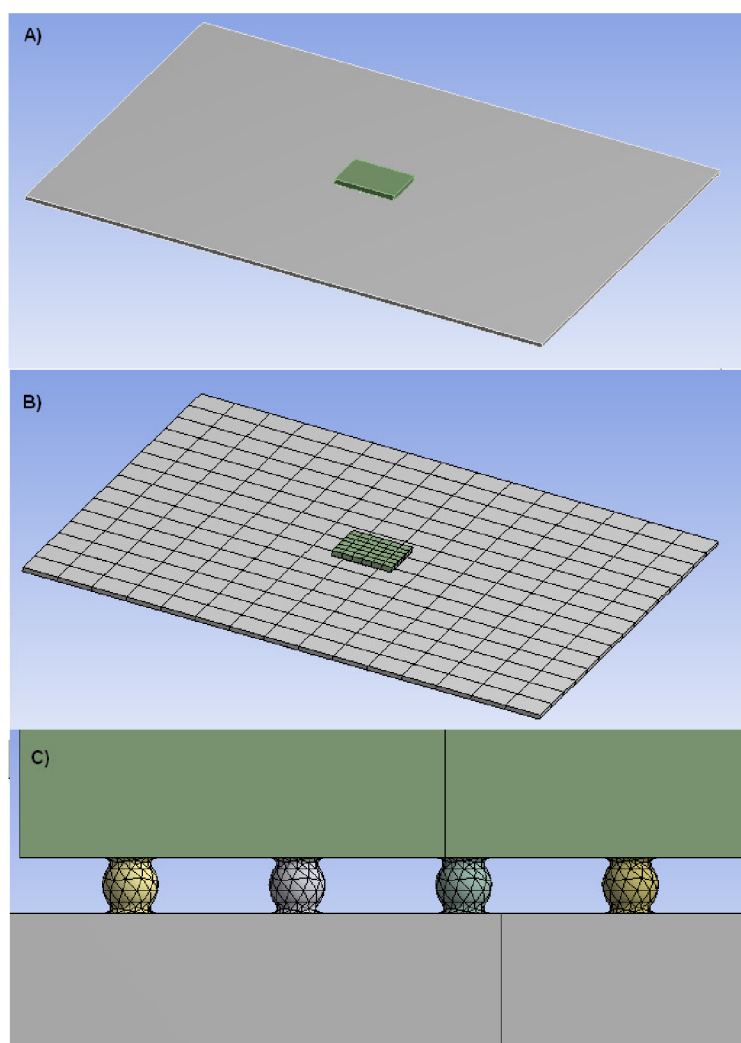
BGA puzdro je k základnému materiálu prispájkované pomocou spájky SAC305, ktorá je bližšie popísaná v kapitole 3.2.1. Pri simuláciách sa sledujú body, v ktorých sa spájka najviac namáha ale nebudú sa porovnávať jednotlivé spájky. Na ich porovnanie by je potrebný omnoho bližší popis materiálov a aj napriek tomu by to nemuselo zodpovedať

realite, pretože vlastnosti spájky ovplyvňujú faktory ako doba pretavenia, gradient chladnutia, zloženie atmosféry v spájkovacej peci, povrchová úprava substrátu a iné.

Vlastnosti jednotlivých materiálov použitých k simuláciám sú uvedené v Tabuľke

Tabuľka 3: Vlastnosti materiálov pre simuláciu [24] [25]

	Youngov modul pružnosti		Poissonova konštanta		Bod plastickej deformácie	Hustota
FR4	os X	$3,5 \cdot 10^6$ psi	rovina XY	0,136		$1,850 \text{ g.cm}^{-3}$
	os Y	$3 \cdot 10^6$ psi	rovina YZ	0,136		
	os Z	$3,5 \cdot 10^6$ psi	rovina XZ	0,118		
SAC305	$2,41 \cdot 10^6$ psi		0,4		25,3 Mpa	$7,4 \text{ g.cm}^{-3}$



Obrázok 5.1:

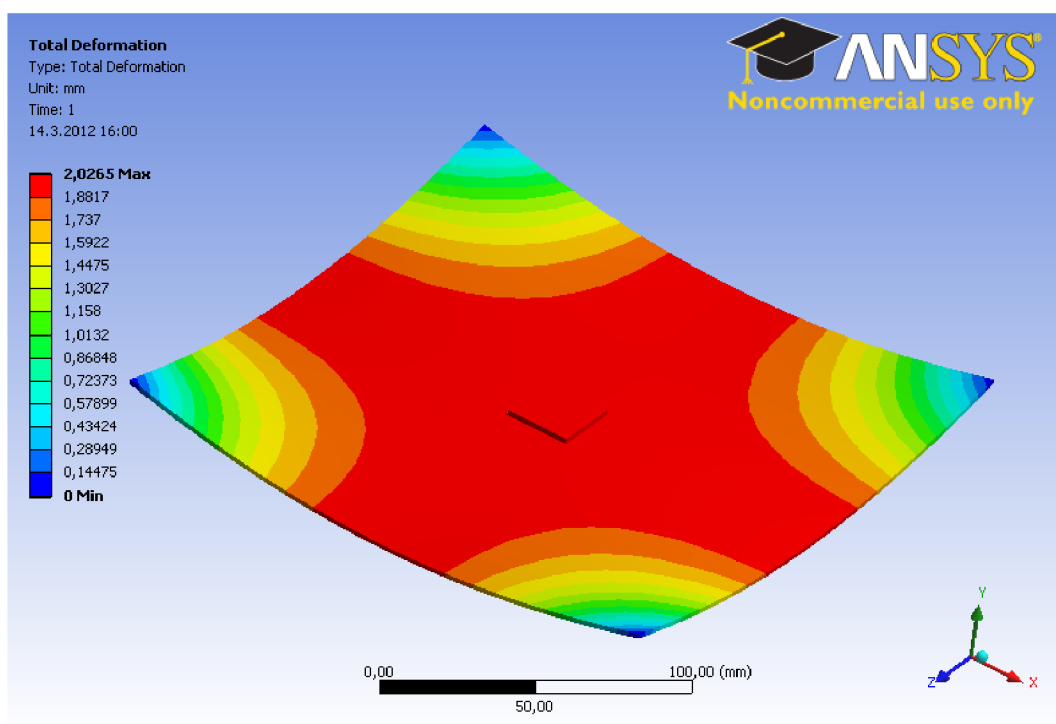
A) Geometria simulovanej štruktúry B) Sieť konečných prvkov

C) Zhustená sieť konečných prvkov pri guľôčkach spájky

5.4. Simulácia v programe ANSYS

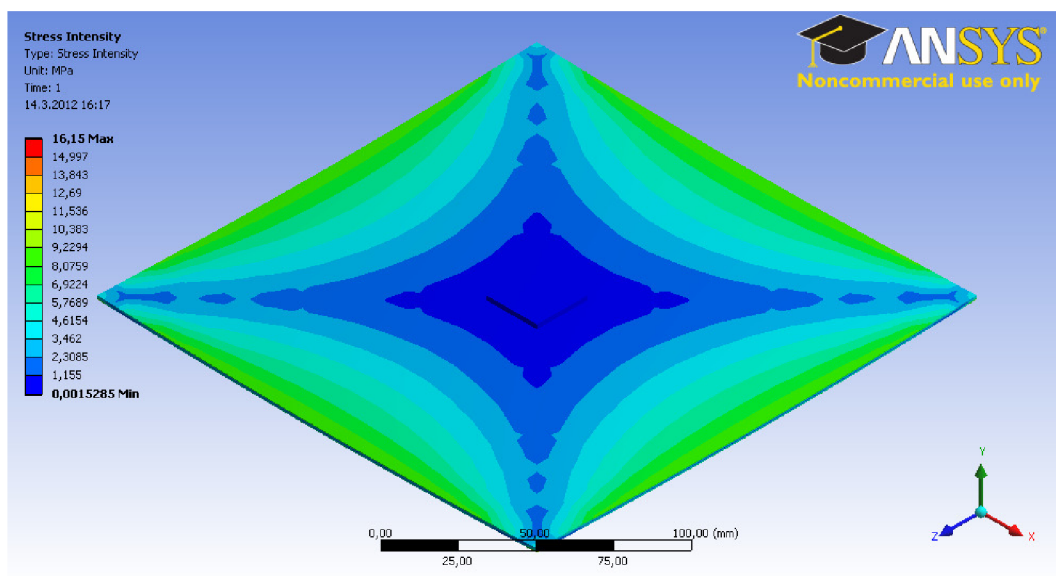
5.4.1. Štruktúrna analýza

V štruktúrálnej analýze bude pozorovaný vplyv gravitačného zrýchlenia na elektronický zostavu. Zrýchlenie sa volí na úrovni 100 m.s^{-2} , čo môžeme približne vyjadriť ako 10G. Smer zrýchlenia je v zápornom smere osi Y. Vyhodnocuje sa celkový prehyb dosky (Total Deformation) a intenzita pnutia v materiáli (Stress Intensity).



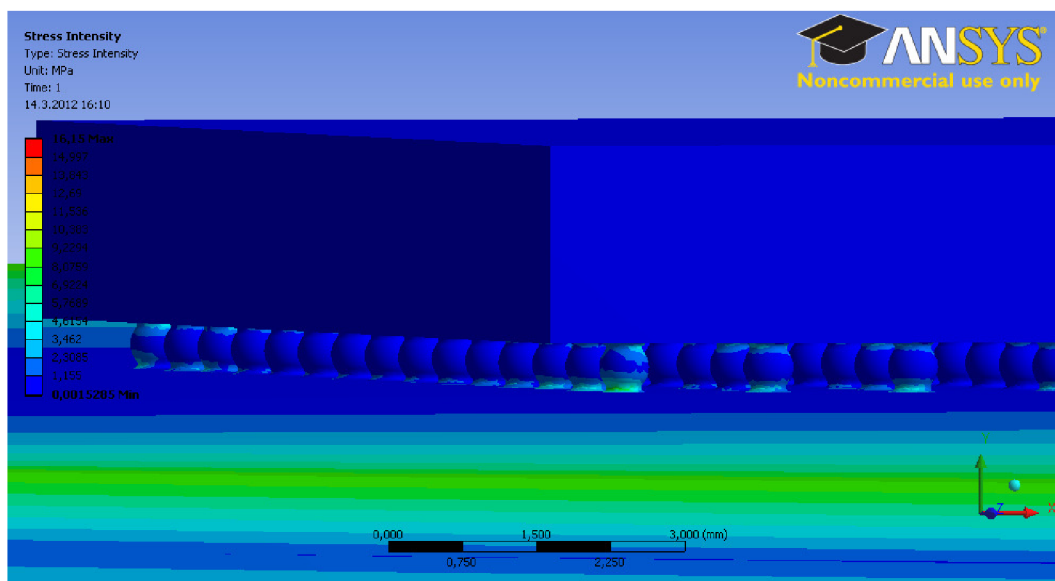
Obrázok 5.2: Deformácia elektronickej zostavy pri zrýchlení 10G

Na obrázku 7.2 je vidieť deformáciu simulovanej elektronickej zostavy s centrálne umiestneným puzdrom BGA. Maximálne prehnutie nastáva uprostred dosky a posun v tejto oblasti proti pôvodnej polohe činí 2,03 mm. Intenzita stresu, alebo pnutia v materiáli sa vypočítava ako vektorový súčet troch pnutí ktoré sú normálové (kolmé) na tri roviny v priestore. Dostávame tak veľkosť výsledného pnutia v materiáli.



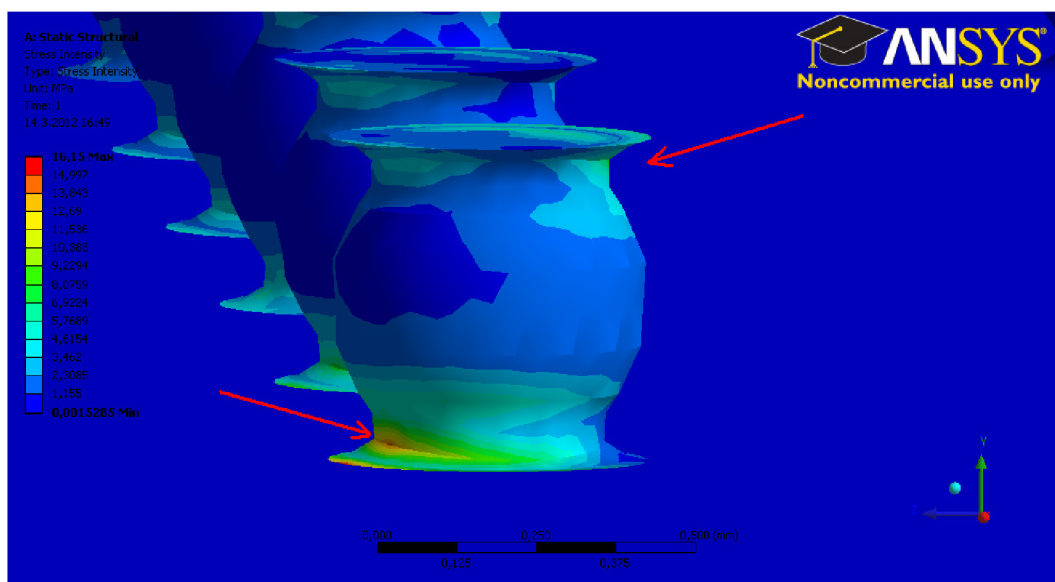
Obrázok 5.3: Intenzita pnutia

Na Obrázku 7.3 môžeme vidieť rozloženie intenzity stresu pre celú dosku. Najväčšie namáhanie na je okrajoch DPS, pričom samotné puzdro BGA je ovplyvnené len minimálne.



Obrázok 5.4: Pohľad na pnutie v guľôčkových vývodoch BGA

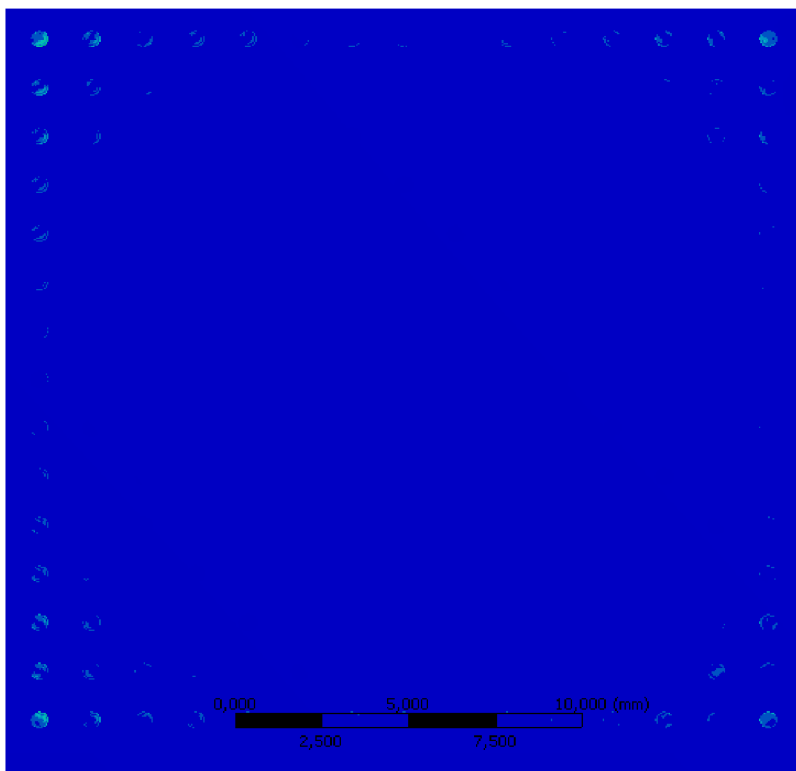
Pri detailnejšom pohľade (obrázok 8.4) je vidieť namáhanie v jednotlivých guľôčkových vývodoch.



Obrázok 5.5: Detail guľôčkového vývodu

Na obrázku 8.5 sú miesta s najväčším namáhaním označené šípkami. Stres v týchto miestach dosahuje hodnôt až 16 MPa. Z materiálových vlastností SAC spájky vieme že bod

plastickej deformácie je 25 MPa, pričom táto hodnota môže byť oslabená vplyvom intermetalických zlúčenín ktoré sú krehkejšie. Práve v týchto miestach sa očakáva vznik prasklín, ktoré sa budú rozširovať smerom k stredu guľôčky.

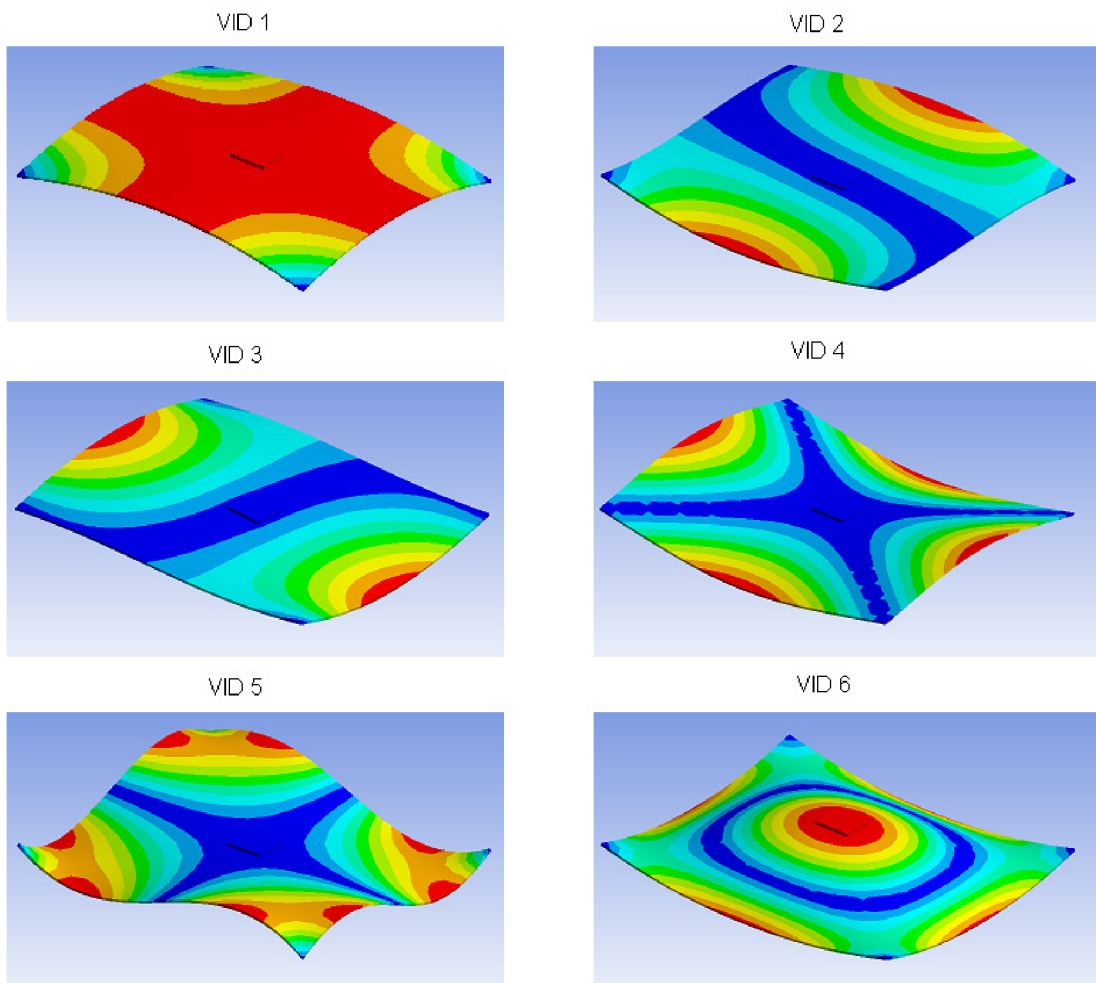


Obrázok 5.6: Rozloženie stresu medzi guľôčkovými vývodmi BGA

Pri pohľade na všetky vývody je jasne vidieť ktoré spoje sú najviac namáhané. Ako sa predpokladalo, jedná sa práve vývody na okrajoch a najmä v rohoch BGA. Smerom k stredu strany a stredu štvorca pozorujeme stále menšie pnutie, preto sa nepredpokladá vznik problémov v na týchto spojoch.

5.4.2. Modálna (vidová) analýza

Pri mechanickom testovaní na vibračnom zariadení sa testuje na pri rezonančných frekvenciách elektronických zostav. Pomocou rovnice 6 je možné jednoducho vypočítať rezonančnú frekvenciu DPS. V reálnych podmienkach sa však na dosku montujú súčiastky ktoré svojou váhou, polohou a spôsobom uchytenia túto frekvenciu ovplyvňujú a nedá sa tak jednoducho spočítať. Pomocou počítačovej simulácie však je možné spočítať rezonančné frekvencie ktoré sa od seba odlišujú rôznymi vidmi vlnenia dosky. Sleduje sa celková deformácia podobne ako pri štruktúrálnej analýze. Jednotlivé vidy sú znázornené na obrázku 5.7 a vypočítané frekvencie týchto vidov sú uvedené v tabuľke 4.



Obrázok 5.7: Znázornenie prvých šiestich vidov simulovanej elektronickej zostavy

Tabuľka 4: Frekvencie jednotlivých vidov

Vid	frekvencia [Hz]
1	31,751
2	65,801
3	65,833
4	141,83
5	168,89
6	179,95

Ak chceme sledovať degradáciu spájkovaných spojov pod vplyvom vibrácií musíme pre rezonančný test vybrať také vidy ktoré by najviac zaťažovali montovanú súčiastku. Z toho dôvodu nás bude prioritne zaujímať Vid 1 a Vid 6. Ako vidíme na obrázku 5.7 tak pre tieto vidy nastáva najväčší prehyb dosky práve v strede dosky kde je umiestnené aj BGA puzdro. Frekvencie pre tieto vidy sú $f_1 = 31,751$ Hz a $f_6 = 179,95$ Hz.

6. Experimentálna časť

6.1. Testovacia DPS

Pre potreby testovania sme mali k dispozícii DPS s rozmermi 50x50 mm. V simuláciách som použil rozmer 200x200 mm, no v reálnych podmienkach by výroby týchto dosiek bola príliš nákladná. Taktiež by bola náročná aj manipulácia s doskou, vyžadujúca prispôbenie testovacích zariadení týmto rozmerom. Ako ukážka pôsobenia síl v materiáli spájky však boli tieto rozmery vhodnejšie.

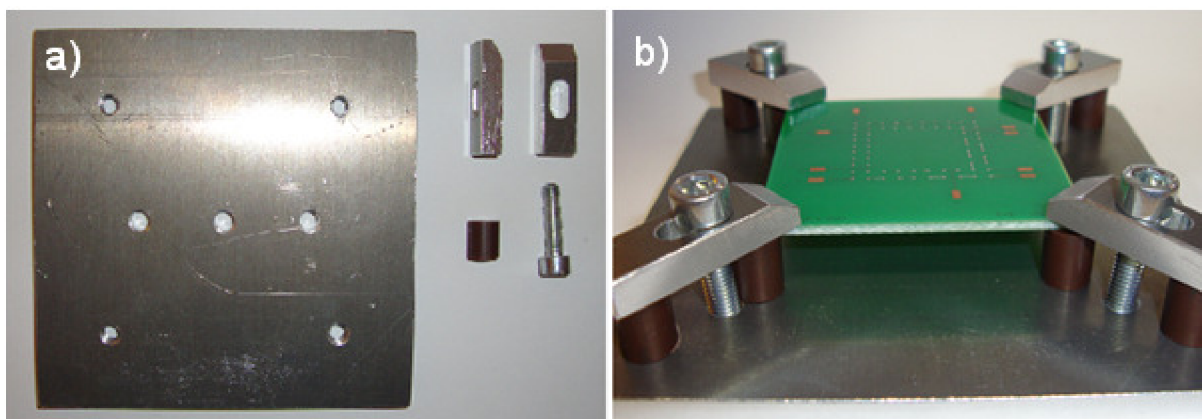
Doska má na vrchnej strane kontakty pre BGA puzdro zo 64 vývodmi. Tie sú umiestnené v dvoch radoch po obvode, na prispájkovanie puzdra sme využili zliatinu SAC305 guľôčky s priemerom 30 mils (0,762 mm) Medzi kontaktmi sú vytvorené vodivé spojenia, takže použitím BGA puzdra s podobným layoutom môžeme vytvoriť dva samostatné okruhy (daisy chain) na ktorých môžeme merať vodivosť cesty. Na spodnej strane sú vytvorené kontaktné plôšky pre SMD súčiastky veľkosti 0805 (21 krát) a 1206 (18 krát). Tie využijeme pre porovnanie v pevnosti v strihu.

6.2. Návrh držiaka pre DPS

Pre uchytenie dosky do vibračného zariadenia bolo potrebné vyrobiť vhodný držiak. Ten by tvoril spojnicu medzi zdrojom vibrácií a testovanou vzorkou, preto by hlavným požiadavkom bol dobrý prenos mechanickej sily, pričom by mal čo najmenej ovplyvňovať vzorku (napríklad jej rezonančnú frekvenciu). Nemal by vážiť príliš veľa aby neuberal z prenášaného výkonu. Mal by byť teda z materiálu s nízkou hustotou, pevnosť v ohybe by mala byť omnoho väčšia než DPS a taktiež by mal byť ľahko dostupný.

Na tento účel som si zvolil materiál hliník. Jeho Youngov modul pružnosti je 69 GPa (približne $10 \cdot 10^6$ psi) [26], čo je v porovnaní s $3,5 \cdot 10^6$ psi pre materiál FR4 viac ako dvakrát väčšia hodnota. Hliník je známy ako jeden z najľahších kovov, má hustotu $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, čiže nie omnoho vyššiu ako materiál FR4. S cenou násobne vyššou ako železo nepatrí medzi lacné materiály, no pre svoje vlastnosti je pre naše účely vhodnou voľbou.

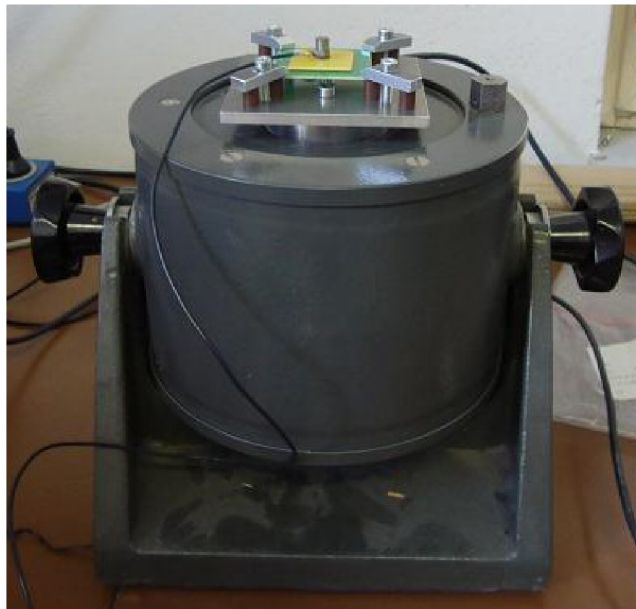
Samotný držiak tvorí hliníková základňa v tvare štvorca s rozmermi 100x100 mm. Vo vibračnom zariadení sú vyrezané 3 závit M5 vzdialené od seba 22 mm. Uchytenie je tvorené dvoma plastovými podstavcami s výškou 10 mm. Doska sa uchyť medzi podstavec a hliníkovú upimku pomocou šraub M5. Na tento účel sú v štyroch rohoch základne vyrezané závit M5. Výkres jednotlivých častí je uvedený v Prílohe 1. Na obrázku 6.1 je ukážka uchytenia dosky na zostavenom držiaku.



Obrázok 6.1: Držiak vzorky v rozloženom stave (a) a zloženom stave (b)

6.3. Vibračné zariadenie

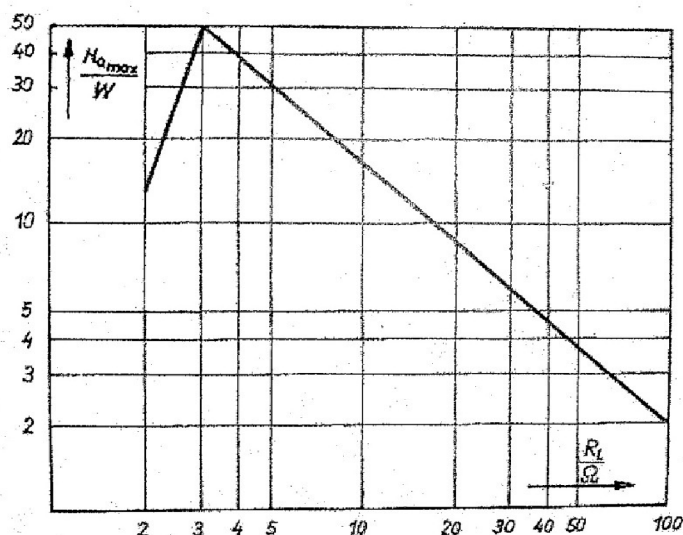
V spolupráci s Ústavom konštruování na Fakulte strojního inženýrství nám bolo umožnené otestovať vzorky na ich vibračnom zariadení. Jednalo sa o elektrodynamický budič firmy VEB RTF Messelektronik, ktorý spolu s 50 Wattovým zosilňovačom vyhovoval požiadavkom na testovanie. Boli však realizovať len rezonančný test, pretože riadený zdroj signálu, umožňujúci generovať lineárne zmeny frekvencie a náhodné kmity, je dlhodobo mimo prevádzky.



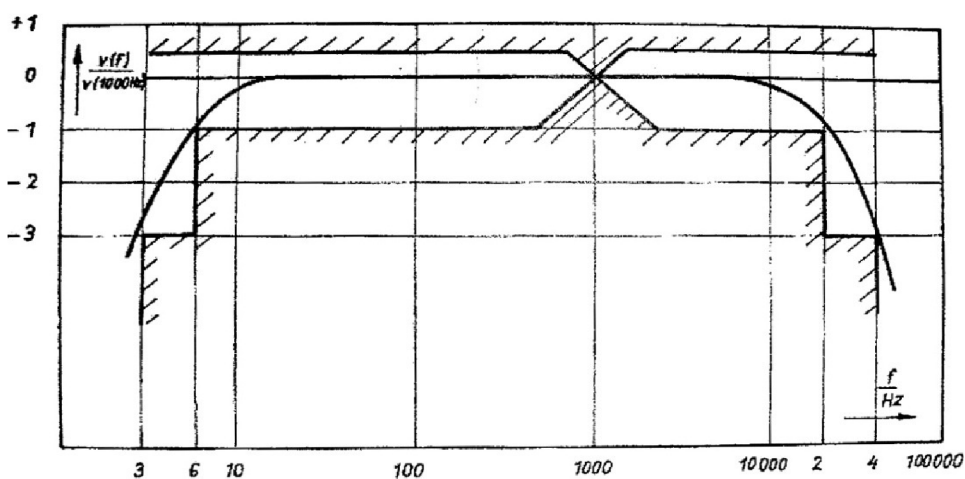
Obrázok 6.2: Elektrodynamický budič

6.3.1. Zosilňovač

Na zosilnenie signálu sa použil zosilňovač firmy VEB Metra Mess und Frequenztechnik, typu LV 102. Výstupný výkon zosilňovača je 50W pri zaťažovacom odpore $R_L = 3 \Omega$, čo je vlastne odpor vinutej cievky v elektrodynamickom budiči. Frekvenčný rozsah je od pre pokles 3 dB je 3 Hz do 40 kHz, pre útlm 1 dB je rozsah 6 Hz až 20 kHz. Pre plný výkon by malo byť vstupné napätia dosiahnuť 500 mV. Vstupný odpor má hodnotu 100 k Ω .



Obrázok 6.3: Závislosť výkonu zosilňovača na záťažovom odpore R_L [datasheet]

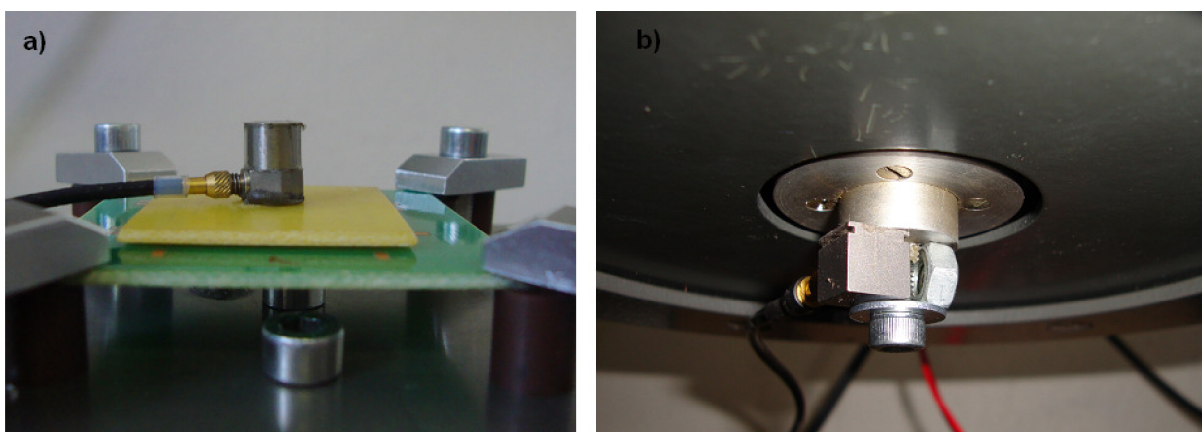


Obrázok 6.4: Frekvenčná závislosť útlmu zosilovača [datasheet]

6.3.2. Zapojenie zariadenia

Na vstup zosilňovača sa pripojil signálový zdroj HP 33120 pre generovanie sínusového signálu s amplitúdou špička-špička 1 V. Pomocou zosilňovača popísaného v kapitole 7.5.1 sa signál zosilnil a pripojil k vibračnej stoliči. Maximálne výstupné napätie zosilňovača je 15 V, čím sa obmedzilo aj maximálne zrýchlenie mechanických kmitov. Pre meranie zrýchlenia sa využil analyzátor firmy DEWETRON, DEWE 2010, s programom DEWESOFT 7.0. Pre nábojový akcelerometer bolo potrebné použiť prevodník náboja na napätie, na čo poslúžilo zariadenie Bruel & Kjaer Charge Amplifier Type 2635.

Meranie zrýchlenia zabezpečovali akcelerometry, pričom jeden sa umiestnil na spodnú stranu jadra vibrátora a druhý sa umiestnil uprostred testovanej vzorky aby bolo možné určiť rezonančnú frekvenciu a hodnotu zrýchlenia priamo na doske. Maximálna dosiahnuteľná hodnota zrýchlenia na základni bola 6 G. Namerané zrýchlenie na doske pri rezonancii sa rôznilo, v závislosti na DPS. Vzhľadom na porovnateľnosť výsledkov som zvolil hodnotu 150 G, ktoré bolo dosiahnuteľné na každej doske. Zrýchlenie na základni sa vtedy rôznilo od 4 G do 6 G.



Obrázok 6.5: Uloženie akcelerometrov. a) Na doske b) Na základni

Jednotlivé vodivé cesty vykazujú istý odpor v rade miliohmov. Ten bol meraný pomocou multimetra HP U3401A. Presnejšie meranie štvorbodovou metódou by eliminovalo vplyv odporu vodičov a kontaktov, no vyžadovalo by prispájkovanie kontaktov na každú dosku, ktoré by mohli ovplyvňovať vibrácie. Taktiež nebolo potrebné nasledovať presný odpor cesty, ale zmenu odporu, na čo postačuje aj meranie jednoduchšou dvojbodovou metódou. Ohmeter som skalibroval na nulovú hodnotu pri priložení skúšobného vedenia na medenú plošku, čím sa aspoň čiastočne eliminoval vplyv vodičov a kontaktov. Výrobca udáva minimálne rozlíšenie 1 m Ω a chybu 0,1%.

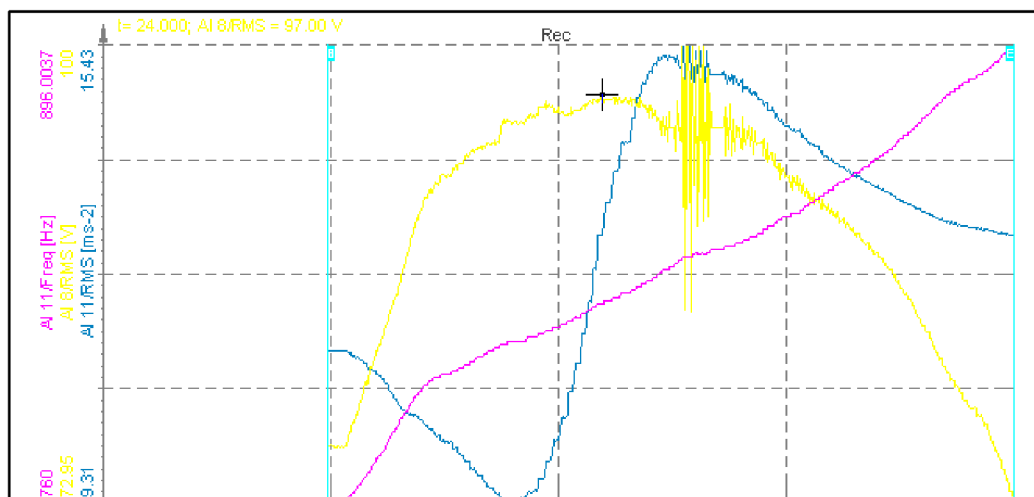
6.4. Vibračné testovanie

Cieľom testov bolo čo najviac sa priblížiť štandardu IPC-TM-650 2.6.9 a to konkrétne rezonančnému testu. Vibračný test som vždy niekoľkokrát prerušili aby som mohol zmerať zmenu vodivosti. Každá doska bola testovaná po dobu maximálne 30 minút. Z nameraného zrýchlenia a frekvencie sa dá, podľa rovnice 16, spočítať teoretická hodnota rozkmitu dosky. Vzhľadom na to že meranou hodnotou je efektívne zrýchlenie, tak vypočítaná hodnota vychýlenia dosky je len orientačná.

$$a = \frac{d}{t^2} \quad (15)$$

$$d = a \cdot t^2 = a \cdot \left(\frac{1}{f}\right)^2 \quad (16)$$

Pri hľadaní rezonančnej frekvencie sa postupne zvyšovala frekvencia a hľadal sa bod s najväčším zrýchlením na doske. Využili som na to analyzátor, kde som vykreslili jednotlivé závislosti.



Obrázok 6.6: Hľadanie rezonančnej frekvencie.

Tabuľka 5: Rezonančné frekvencie jednotlivých dosiek a vypočítaný rozkmit pre dané zrýchlenie

DPS	$f_{\text{Rezonance}}$ [Hz]	a_{DPS} [m.s ⁻²]	a_{Base} [m.s ⁻²]	Rozkmit DPS [mm]
1.	820	1481	58,86	2,203
2.	834	1481	42,183	2,130
3.	811	1442	49,05	2,193
4.	835	1442	43,164	2,068
5.	736	1442	45,126	2,662
6.	731	1442	42,183	2,699

6.5. Namerané hodnoty

Pred začiatkom vibrovania sa premeral odpor každej vodivej cesty pričom odpor cesty na vonkajšom obvode BGA (daisy chain 1) bol vždy vyšší ako odpor vnútornej cesty (daisy chain 2). Odpor medzi jednotlivými doskami sa líšili len minimálne, vonkajšia od 315 mΩ do 376 mΩ a vnútornej od 301 mΩ do 360 mΩ. Čo znamená, že BGA puzdro je prispájkované správne a jednotlivé simulované elektronické zostavy sú porovnateľné.

6.5.1. Zmena odporu vodivej cesty pod vplyvom vibrácií

Namerané hodnoty jednotlivých odporov vodivých ciest sú uvedené v tabuľke 6 spolu s časom v ktorých boli namerané. V poslednom stĺpci je uvedená hodnota odporu R_{after} , po časovom odstupe, jej ďalší popis je vysvetlený v kapitole 6.5.2.

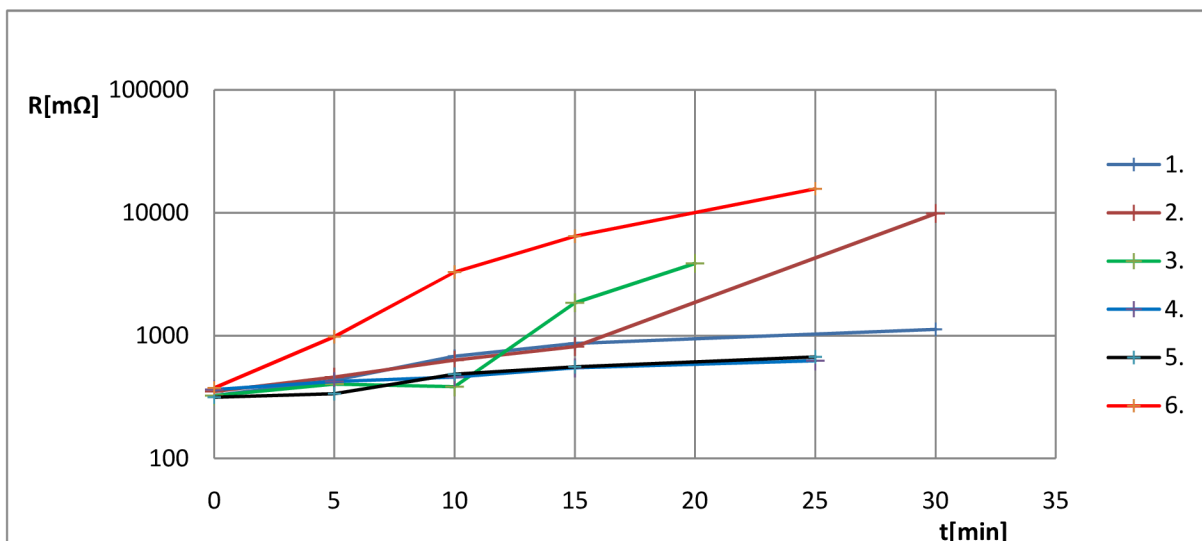
Tabuľka 6: Namerané hodnoty odporov vodivých ciest počas testovania vibráciami

a) Odpor vodivých ciest po jednotlivých časových úsekoch

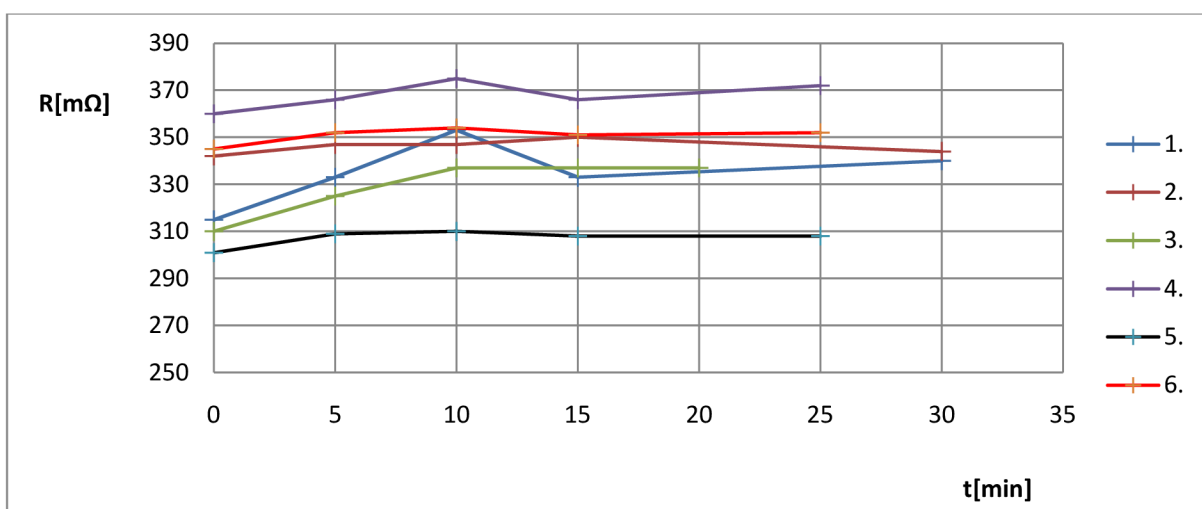
DPS	daisy chain	R_0 [mΩ]	T_1 [min]	R_1 [mΩ]	T_2 [min]	R_2 [mΩ]	T_3 [min]	R_3 [mΩ]	T_4 [min]	R_4 [mΩ]	R_{after} [mΩ]
1.	1	324	5	432	10	680	15	863	30	1124	753
	2	315	5	333	10	353	15	333	30	340	324
2.	1	350	5	460	10	631	15	812	30	9850	∞
	2	342	5	347	10	347	15	350	30	344	345
3.	1	324	5	403	10	383	15	1850	20	3870	1724
	2	310	5	325	10	337	15	337	20	337	312
4.	1	363	5	423	10	459	15	546	25	623	391
	2	360	5	366	10	375	15	366	25	372	366
5.	1	315	5	337	10	486	15	556	25	670	508
	2	301	5	309	10	310	15	308	25	308	306
6.	1	376	5	981	10	3290	15	6455	25	15700	520
	2	345	5	352	10	354	15	351	25	352	349

b) Percentuálny nárast odporu po časových úsekoch prepočítaných na počet cyklov

DPS	daisy chain	R_0 [mΩ]	Počet cyklov v t_1 [-]	R_1 [%]	Počet cyklov v t_2 [-]	R_2 [%]	Počet cyklov v t_3 [-]	R_3 [%]	Počet cyklov v t_4 [-]	R_4 [%]	R_{after} [%]
1.	1	324	2,5E+05	33,3	4,9E+05	109,9	7,4E+05	166,4	1,5E+06	246,9	41,4
	2	315	2,5E+05	5,7	4,9E+05	12,1	7,4E+05	5,7	1,5E+06	7,9	2,9
2.	1	350	2,5E+05	31,4	5,0E+05	80,3	7,5E+05	132,0	1,5E+06	2714,3	∞
	2	342	2,5E+05	1,5	5,0E+05	1,5	7,5E+05	2,3	1,5E+06	0,6	0,9
3.	1	324	2,4E+05	24,4	4,9E+05	18,2	7,3E+05	471,0	9,7E+05	1094,4	432,1
	2	310	2,4E+05	4,8	4,9E+05	8,7	7,3E+05	8,7	9,7E+05	8,7	0,6
4.	1	363	2,5E+05	16,5	5,0E+05	26,4	7,5E+05	50,4	1,3E+06	71,6	7,7
	2	360	2,5E+05	1,7	5,0E+05	4,2	7,5E+05	1,7	1,3E+06	3,3	1,7
5.	1	315	2,2E+05	7,0	4,4E+05	54,3	6,6E+05	76,5	1,1E+06	112,7	61,3
	2	301	2,2E+05	2,7	4,4E+05	3,0	6,6E+05	2,3	1,1E+06	2,3	1,7
6.	1	376	2,2E+05	160,9	4,4E+05	775,0	6,6E+05	1616,8	1,1E+06	4075,5	38,3
	2	345	2,2E+05	2,0	4,4E+05	2,6	6,6E+05	1,7	1,1E+06	2,0	1,2

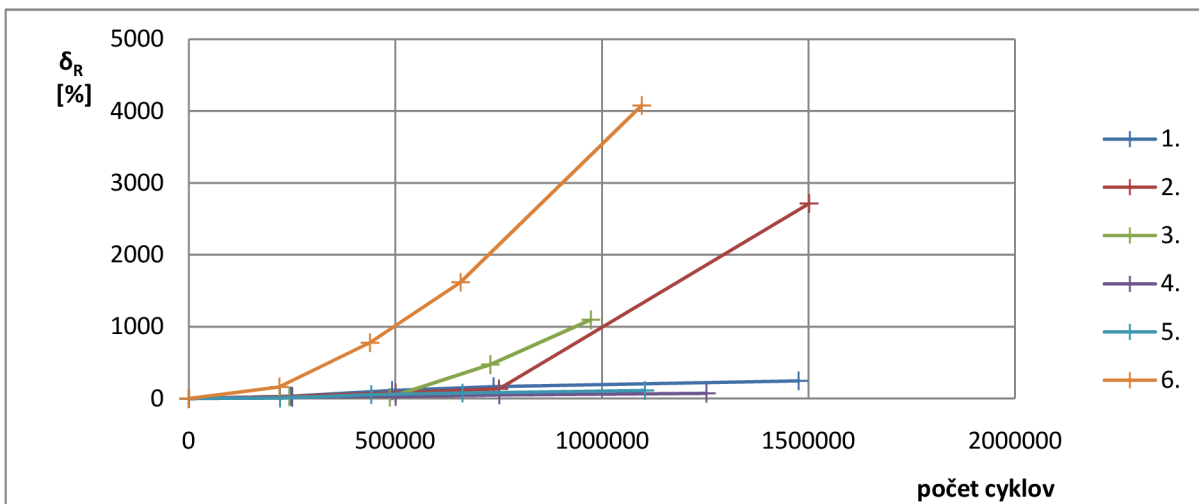


Obrázok 6.7: Zmena odporu vonkajšej vodivej cesty

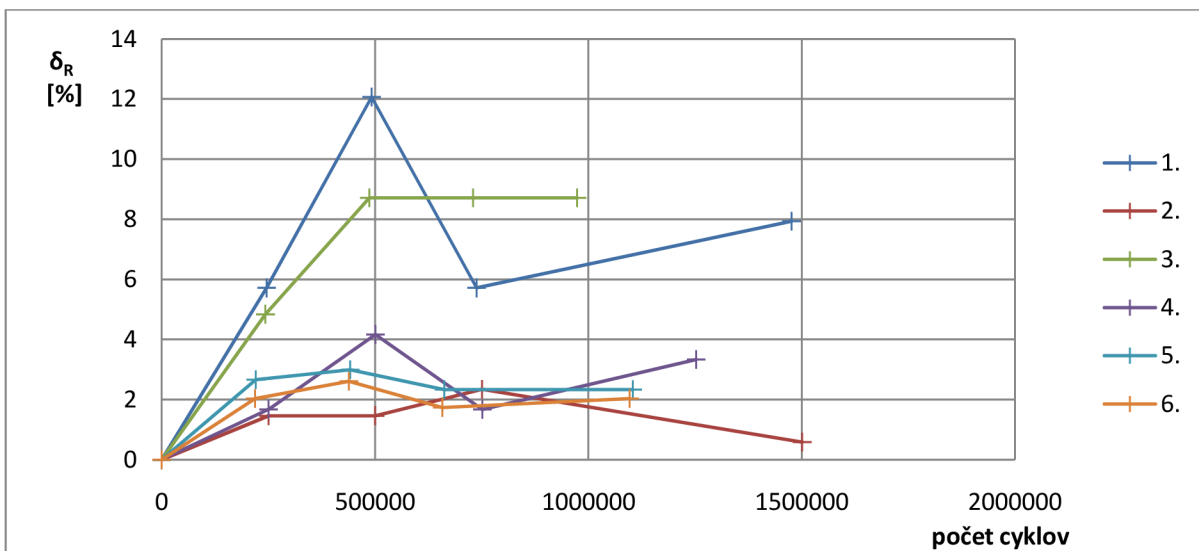


Obrázok 6.8: Zmena odporu vnútornej vodivej cesty

Po vynesení nameraných hodnôt odporu do grafickej závislosti s časom jasne vidieť, že vibrácie majú vplyv primárne na vodivosť vonkajšej cesty. V prípade druhej a tretej testovanej DPS sa odpor cesty dramaticky zvýšil po určitom čase a ďalej stúpala s exponenciálnou závislosťou. Vysvetľujem si to vznikom praskliny v spoji ktorá vznikne v istom čase a následne sa rozširuje cez celú plochu spájkovaného spoja. Šiesta testovaná DPS vykazovala strmý nárast odporu už od prvého premerania odporu. Zrejme nedokonalým spájkovaním vznikla prasklina už na začiatku vibrovania. V prípade vnútornej cesty sa odpor menil len minimálne, ale treba podotknúť že v ani jednom prípade neklesal. Táto skutočnosť súhlasí so simuláciou v programe ANSYS. Ako môžeme vidieť na obrázku 5.6, najviac zaťažované sú obvodové a zvlášť rohové kontakty. Zátťaž kladená na kontakty v druhom rade od kraja je podstatne nižšia.



Obrázok 6.9: Závislosť relatívnej zmeny odporu vonkajšej vodivej cesty na počte vibračných cyklov



Obrázok 6.10: Závislosť relatívnej zmeny odporu vnútornej vodivej cesty na počte vibračných cyklov

Pre úplnosť uvádzam aj závislosť relatívnej zmeny odporu na počte cyklov. Zásadný rozdiel v porovnaní s grafmi s časovou osou nie je vidieť. Opodstatnenie by to však malo ak by rezonančná frekvencia bola zásadne rozdielna medzi jednotlivými doskami. V tom prípade úlohu zohrá aj celková deformácia dosky, pretože pri rovnakom zrýchlení a menšej frekvencii dosiahne doska väčšieho ohybu a tým sa spoje namáhajú viac. Vtedy by bolo potrebné definovať rozkmit dosky a preň vypočítať hodnotu zrýchlenia analogickým spôsobom ako je uvedené v kapitole 6.4. rovnako čas medzi jednotlivými meraniami by musel byť prepočítavaný z definovaného počtu vibračných cyklov.

6.5.1. Zmena rezonančnej frekvencie počas testovania

Tento fenomén som pozoroval, keď počas vibrácií nastal pokles nameraného zrýchlenia na doske. To znamenalo že rezonančná frekvencia sa zmenila. V Tabuľke 7 je uvedený prehľad o tom v akom časovom úseku sa frekvencia menila. Veľká zmena nastala pri druhej DPS až v treťom časovom úseku po 15tich minútach vibrovania. Rezonančná frekvencia klesla z 834 Hz na 807,5 Hz a neskôr sa ustálila na 809,2 Hz. Ak sa pozrieme na grafy 7.1 a 7.3 môžeme vidieť že práve v poslednom časovom úseku podstatne narástol aj odpor vodivej cesty. V prípade tretej testovanej dosky sa frekvencia klesala postupne z 814Hz na 809 Hz. V poslednom časovom úseku nastal pokles o 7 Hz, čo môžeme taktiež pozorovať na zmene odporu cesty. V ostatných prípadoch nenastala radikálna zmena f_R čo potvrdzuje aj plynulosť zmeny odporu počas celej doby trvania vibrácií.

Tabuľka 7: Zmena rezonančnej frekvencie v jednotlivých časových úsekoch

DPS	$f_{\text{Rezonance}}$ [Hz]	a_{DPS} [m.s ⁻²]	a_{Base} [m.s ⁻²]	$f_{R(t_0-t_1)}$ [Hz]	$f_{R(t_1-t_2)}$ [Hz]	$f_{R(t_3-t_4)}$ [Hz]
1.	820	1481	58,86	820	820	820
2.	834	1481	42,183	834	834	807,5 809,2
3.	811	1442	49,05	814 812	810 809	808 801
4.	835	1442	43,164	833	833	833
5.	736	1442	45,126	733 731	730 727	726 725
6.	731	1442	42,183	727	726	726

Až na ojedinelé prípady, kde bol rozdiel len minimálny, rezonančná frekvencia v zásade vždy klesala. Vysvetľujem si to poklesom pevnosti spojov, čím sa DPS mohla viac deformovať, znížila sa frekvencia a zvýšilo sa zaťaženie spojov. Ak by sa porovnali, tak deformácia druhej dosky pri 834 Hz bola 217,1 μm , tak pri frekvencii 809,2 deformácia narástla na 230,6 μm . Väčší ohyb dosky sa opäť premietne do poklesu pevnosti a tým zväčšeniu odporu a poklesu frekvencie. Táto postupná závislosť by vysvetľovala exponenciálny charakter nárastu odporu.

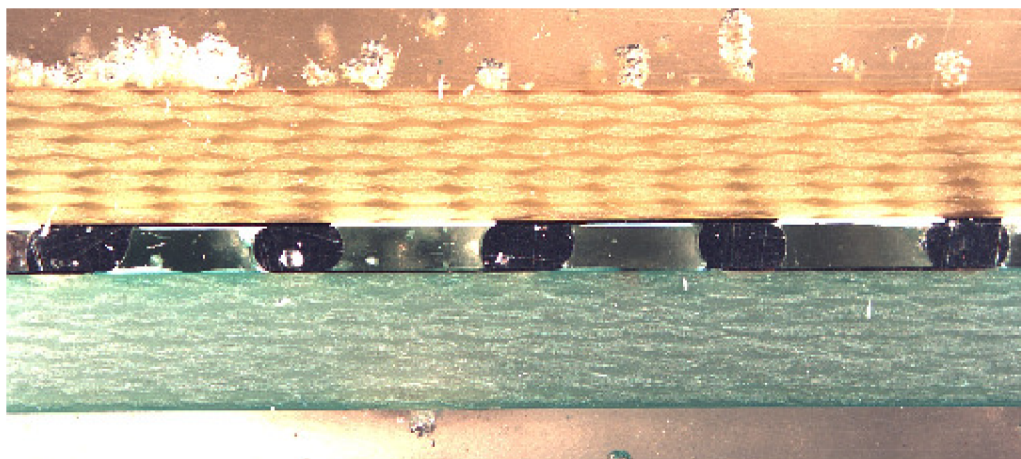
6.5.2. Odpor vodivej cesty po časovom odstupe

Ďalším pozorovaným javom bolo „zotavenie“ spoja po dlhšom časovom odstupe po teste vibráciami. Odpor R_{after} boli premerané minimálne 15 minút po skončení testu a ich hodnoty sú uvedené v tabuľke 6. Relatívny pomer pôvodnej a konečnej hodnoty sa pohybuje v rozmedzí od 1,2 % do 40 %, nikdy však nedošlo k úplnému návratu vodivosti. V prípade druhej DPS sa spoj neobnovil ale naopak vytvoril sa studený spoj.

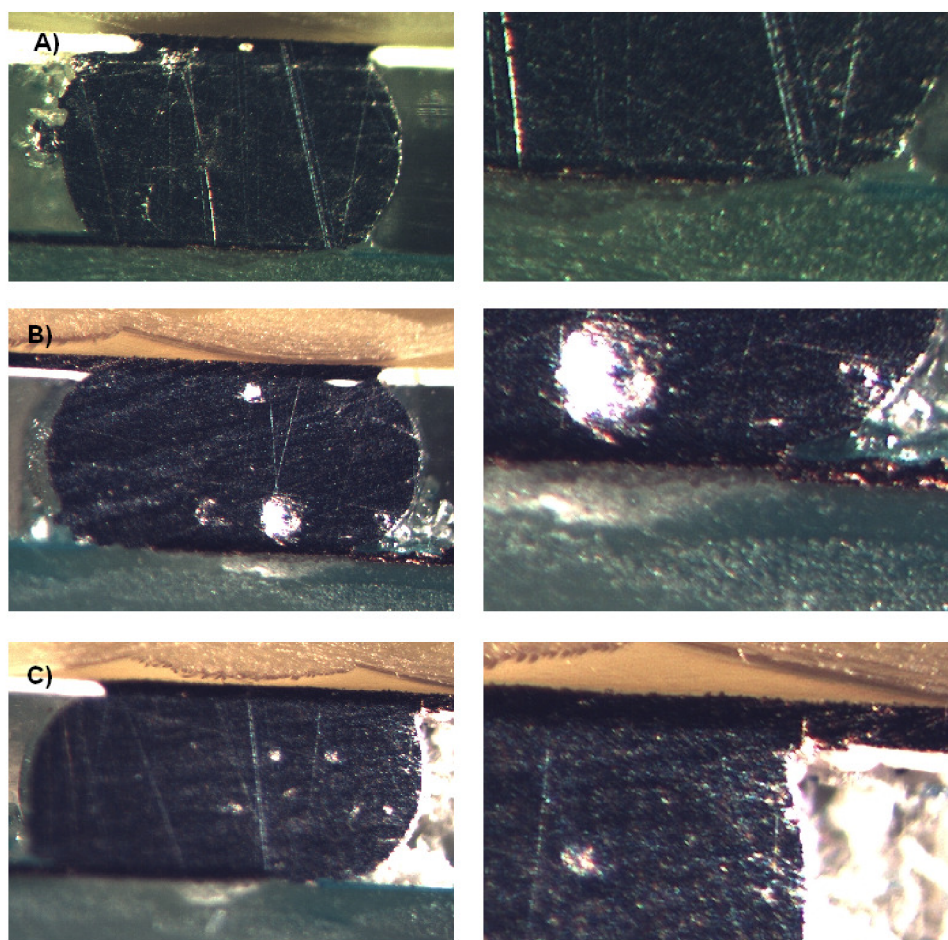
Mechanickým namáhaním vzniká trenie medzi jednotlivými časticami v materiáli a tým sa uvoľňuje teplo. Kovy majú kladný koeficient teplotnej rozťažnosti, konkrétne nami použitá zliatina SAC305 má rozťažnosť 30 ppm/°C [25]. Pri vzniku praskliny a zároveň nahrievaní spoja môže dôjsť odtiahnutiu strán praskliny, ktorá nepokrýva celú plochu spoja, a tým sa znižuje vodivosť. Pri následnom ochladnutí sa spoj stiahne a prasklina sa opäť spojí. V prípade druhej dosky pravdepodobne vznikla prasklina cez celý spoj ktorý sa následne opätovne nespojil. Pri vysokých frekvenciách vibrovania môže dôjsť vďaka uvoľnenému teplu k pretaveniu spoja, čo sa mohlo stať aj v našom prípade. Je ťažké odhadnúť kvalitu takéhoto kontaktu, ten by mohol mať menšiu pevnosť a pri vystavení ďalším vibráciám by jeho vodivosť poklesla oveľa skôr.

6.6. Vyhotovenie mikrovýbrusu

Pre vyhotovenie mikrovýbrusu je potrebné zaliat' vzorku dentakrylom, čo je dvojzložková metylakrylátová živica. Tuhne samovoľne a vytvorí chemický a mechanický odolný materiál podobný organickému sklu. Pomocou brúsneho papiera sa vytvorí rez štruktúrou, ktorú po vyleštení môžeme pozorovať pod mikroskopom.



Obrázok 6.11: Mikrovýbrus vzorky

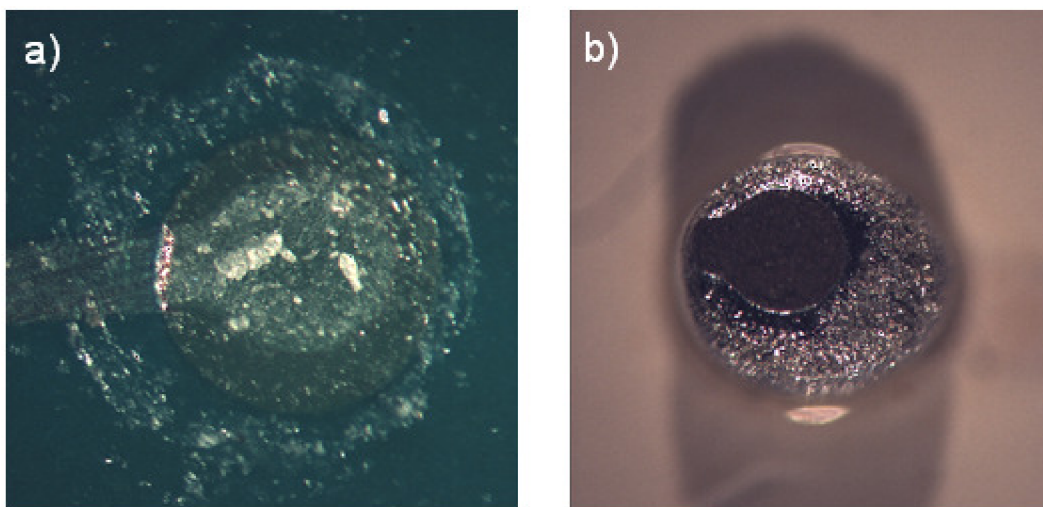


Obrázok 6.12: Identifikácia porúch vodivej cesty. V ľavo pohľad na rez guľôčkou spájky, v pravo detail poruchy

- A) delaminácia plôšky na DPS
- B) prerušenie plošného spoja na DPS
- C) prasklina plošného spoja na BGA

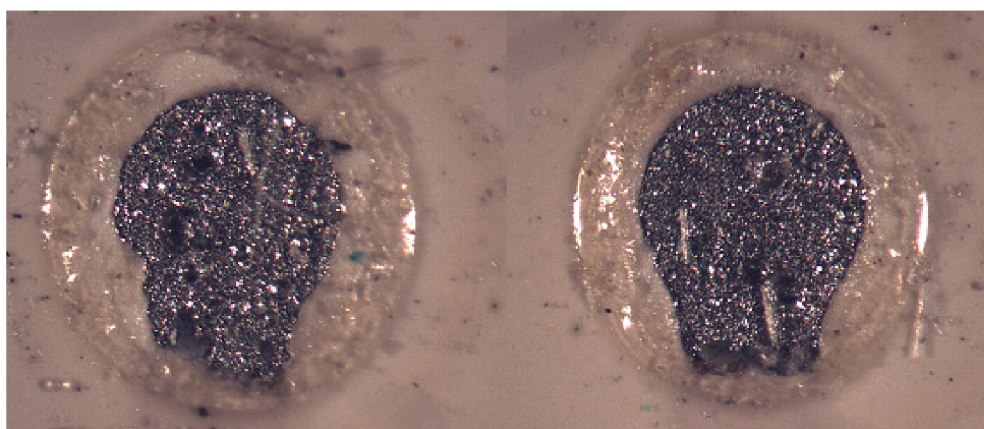
Mikrovýbrus ukázal 10 guľôčkových spojov z vonkajšej vodivej cesty testovanej vzorky. Ani v jednom z týchto spojov sa nenašli poruchy spôsobené vibráciami, ako napríklad praskliny. Dutiny ktoré vidno na obrázku 6.12 – B, sú spôsobené procesom spájkovania a nie mechanickým namáhaním. Poruchy ktoré sa dali pozorovať súviseli s plošnými spojmi na DPS a BGA. Pevnosť laminovaného substrátu FR4 je zrejme menšia ako pevnosť spájky SAC305. Na obrázku 6.12 je vidieť delamináciu substrátu pod medenou vrstvou, prerušenie medenej vodivej cesty na DPS, či na BGA.

Po odtrhnutí simulovaného BGA puzdra sa zistilo, že zo 64 guľôčok spájky len 2 ostali prichytené k substrátu DPS. Všetky ostatné guľôčky ostali prichytené k BGA puzdru, pričom zo sebou vytrhli aj medenú plôšku na ktorú boli prispájkované. Detail takéhoto odtrhnutia je zobrazený na obrázku 6.13. Môžeme pozorovať deformáciu laminátu DPS, takže sa dá povedať že problém nenastal v medenej vrstve, či adhézii vrstvy k laminátu ale v samotnom lamináte.



Obrázok 6.13: Detail odtrhnutia medenej plôšky (a), ktorá ostala prichytená na guľôčke spájky SAC305(b)

V prípade dvoch spojov kde nastalo odtrhnutie guľôčky zo strany BGA ostali kontaktné plôšky zachované. Nastal ťažný odtrh, na ktorom je možné pozorovať množstvo dutiniek, ktoré pravdepodobne spôsobili zníženú pevnosť spoja.



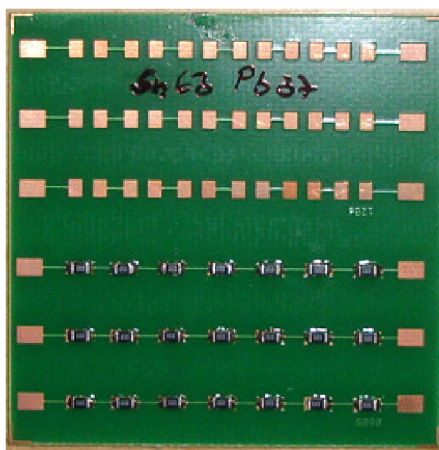
Obrázok 6.14: Detail dvoch plôšok po odtrhnutých guľôčkach na BGA

6.7. Pevnosť v strihu spájkovaných spojov

Na testovanie pevnosti spájkovaných spojov som využil druhú stranu testovacej DPS, kde sú vytvorené plošky pre osadenie súčiastok veľkosti 0805 a 1206. Spájkovacia pasta sa naniesla pomocou disperznej tlače aby sa dosiahlo definované množstvo spájky a tým aj porovnateľnosť výsledkov. K dispozícii boli pasty s dvoma zliatinami a to olovnatá Sn63Pb37 a SAC387, popísané v kapitole 3.2.1., do ktorých sa osadili rezistory veľkosti 0805 a pretavením prispájkovali. Pevnosť v strihu sa testovala na zariadení DAGE s parametrami testu uvedenými v tabuľke 8.

Tabuľka 8: parametre testu strihom

rýchlosť posuvu	50 $\mu\text{m/s}$
testovacia výška	100 μm
maximálna sila	10 kg
presah posuvu	500 μm
detekcia strihu	10%



Obrázok 6.15: Zadná strana testovacej DPS

Po sérii testov kde sa pre obe spájky odstrihlo po 8 súčiastok sa dosky zo zvyšnými súčiastkami podrobili testu vibráciami po dobu 30 minút na rezonančnej frekvencii pri meranom zrýchlení 150 G. Následne prebehla ďalšia séria testov ktorej cieľom bolo porovnať pevnosť spájkovaného spoja pred a po vibrovaní. Zaznamenané hodnoty síl potrebných na odtrhnutie súčiastky sú uvedené v tabuľke 9.

Tabuľka 9: Namerané hodnoty síl potrebných na odtrhnutie súčiastky

	pred vibrovaním		po vibrovaní	
	SnPb	SAC	SnPb	SAC
	F[kg]	F[kg]	F[kg]	F[kg]
1.	6,995	4,582	6,218	4,382
2.	6,463	5,981	4,722	5,483
3.	6,173	6,953	5,209	5,186
4.	4,169	5,188	7,51	3,823
5.	5,51	5,046	5,508	4,568
6.	5,405	4,569	5,134	4,594
7.	4,593	4,964	6,11	4,959
8.	4,549	4,457	5,576	4,135
9.			6,297	5,205
10.			6,603	5,66
11.			5,029	5,067
12.			4,629	4,533
13.			4,82	4,759
priemer	5,482125	5,2175	5,643462	4,796462
smerodajná odchýlka	1,008571	0,852912	0,855601	0,528853

Pri porovnaní jednotlivých výsledkov sa nedá jednoznačne povedať, že by bol značný rozdiel medzi jednotlivými výsledkami pred a po vibračnom namáhaní. Sila potrebná na odtrhnutie súčiastky, pre spájku SnPb, po vibrovaní nepatrne narástla, a naopak pre spájku SAC klesla. V oboch prípadoch je však smerodajná odchýlka väčšia ako zmena priemernej hodnoty sily, preto nemôžeme tieto výsledky považovať za relevantné. Predbežne sa dá povedať, že namáhanie mechanickým vibrovaním nemá vplyv na rozdiel v sile potrebnej na odtrhnutie súčiastky. Rozdiel medzi spájkou SnPb a SAC bol taktiež minimálny v porovnaní so smerodajnou odchýlkou, v oboch prípadoch však spájka SnPb vykazovala väčšiu pevnosť spoja. Pre ďalšie porovnanie a dosiahnutie jednoznačných výsledkov je potrebná niekoľkonásobne väčšia testovacia vzorka.

Príčinou nerozhodných výsledkov môžu byť aj malé rozmery testovaných SMD súčiastok. V prípade simulovaných BGA sa ukázalo že slabinou bola pevnosť laminátu FR4 a tak po odtrhnutí súčiastky sa odtrhli aj medené plôšky. V prípade SMD súčiastok boli všetky odtrhnuté spoje v kategórii ťažných alebo kvázi - ťažných (popísaných v kapitole 5.4). To by poukazuje na to že vibrácie majú na tento typ súčiastok len zanedbateľný vplyv.

Záver

Pri simuláciách elektronickej zostavy, tvorenej doskou z materiálu FR4 a fyzikálneho modelu BGA, v programe ANSYS sa ukázalo ktoré spoje sú najviac namáhané pri vibráciách. Jedná sa hlavne o rohové spoje, ktoré vykazovali najväčšiu intenzitu namáhania až 16 MPa. Ďalšie spoje na vonkajšom obvode boli namáhané čoraz menej v smere k stredu strany BGA. Spoje v druhom rade boli namáhané výrazne menej ako spoje na obvode BGA. Modálna analýza určila tvar vln pre jednotlivé rezonančné frekvencie. Ukázalo sa, že nie každá frekvencia je vhodná pre rezonančný vibračný test, lebo najväčšia deformácia dosky nastávala mimo sledovanú súčiastku. Pre spomínanú štruktúru, zo súčiastkou uloženou v geometrickom strede, je vhodný vid 1 s frekvenciou 31,7 Hz a vid 6 s frekvenciou 179,9 Hz.

Pri reálnom testovaní elektronickej zostavy na odolnosť voči vibráciám sa použila testovacia doska s rozmermi 50x50 mm s uprostred uloženým fyzikálnym modelom BGA puzdra. Hlavným pozorovaným parametrom bola zmena odporu vodivých ciest. Test prebiehal pod dobu maximálne 30 minút na rezonančnej frekvencii. Zrýchlenie namerané v strede testovanej zostavy činilo 150 G, čo je približne 1471 m.s^{-2} . Prvým pozorovaným javom bol nárast odporu vodivej cesty na obvode BGA, pričom odpor vnútornej cesty sa menil len minimálne. Táto skutočnosť súhlasí s výsledkami analýzy matematického modelu. Ak merané zrýchlenie pokleslo, znamenalo to zmenu rezonančnej frekvencie, ktorá takmer výhradne klesala. Ako sa neskôr ukázalo, zmena rezonančnej frekvencie má súvis s odporom vodivých ciest. Jej náhly pokles znamená zmenu pevnosti spoja, či jeho prasknutie. Posledný jav, ktorým je návrat vodivosti cesty takmer na pôvodnú hodnotu, je ťažko vysvetliteľný. Predpokladá sa že pri namáhaní vzniká teplo ktoré spôsobuje rozťahovanie materiálov a tak rozšírenie praskliny. Pri opätovnom vychladnutí sa spoj vráti do pôvodnej polohy. To je však ťažko pozorovateľné, pretože meranie priebehu teploty by bolo náročné na realizáciu. Vytvorenie rezu štruktúrou elektronickej zostavy ukázalo, že hlavným problémom nebola spájka ale laminát, ktorý tvoril substrát testovacej DPS. Ten nevydržal namáhanie spôsobené vibráciami a odtrhol sa aj spolu s medenou plôškou, ktorá sa oddelila od vodivej cesty

Pri testovaní pevnosti spájkovaného spoja strihom sa nezistili žiadne relevantné rozdiely medzi pevnosťou pred a po namáhaní vibráciami. Pri porovnaní olovnatej a SAC spájky bola pozorovaná mierne väčšia pevnosť olovnatej spájky. Smerodajná odchýlka bola stále väčšia ako ich rozdiel, preto ani tento výsledok nemôžeme považovať za určujúci. Na lepšie preskúmanie danej problematiky by bolo potrebné testovať väčšie množstvo vzoriek.

Týmito testami sme ukázali chovanie spájkovaného spoja pod vplyvom vibrácií. Pri návrhu elektronickej zostavy, ktoré sú určené do náročnejších podmienok, by sa mali tieto zistenia zohľadniť. Pomocou matematického modelu sa dá určiť miesto vhodné pre uloženie a minimalizovanie namáhania najcitlivejších súčiastok. Súčiastky by mali mať čo najmenšie rozmery, čím sa zníži vplyv ohybu DPS. Možným riešením pre BGA súčiastky je vytvorenie ďalšieho radu guľôčkových vývodov, ktoré by nemali elektrickú, ale len mechanickú funkciu. V prípade poruchy spoja by tak nedošlo k obmedzeniu funkcie súčiastky. Dôraz by sa mal klásť aj na odolnosť substrátu a na nej vytvorenej vodivej ceste, aby nedochádzalo k situáciám kedy sa substrát delaminuje a spájkovaný spoj ostane nepoškodený.

Rezonančný test je len jednou časťou súboru štandardov pre testovanie elektronických zostáv na odolnosť voči mechanickým vibráciám. Technická porucha neumožnila realizáciu ďalších testov ako je cyklický test, rázový test, či test na náhodné vibrácie. Rezonančný test ale umožňuje vytvoriť porovnanie jednotlivých spájkovacích zliatin využitím Minierovho pravidla. Určením kritickej hodnoty a meraním času zlyhania pre rôzne zrýchlenia je možné vyniesť do grafu jednotlivé body a ich extrapoláciou sa dá určiť životnosť spoja. Jednotlivé spájky by sa tak mali líšiť smernicou vynesenej priamky a jej polohou. Táto analýza však vyžaduje veľké množstvo vzoriek a je časovo náročná.

Použitá literatura

- [1] Bell, H. Grossman, G.: *Reflow Technology, Fundamentals of Reflow Soldering, Part 1: Fundamentals of Materials Technology in the Field of Soldering*. Nemecko, Rehm Termal Systems, 2009
- [2] Starý, J., Kahle, P.: *Plošné spoje a povrchová montáž*. Skripta VUT, Brno, 2003
- [3] Kattner, U.: *Phase Diagrams for Lead-Free Solder Alloys*, JOM, December 2002, strana 45-51, dostupné z [www: http://iweb.tms.org/PbF/JOM-0212-45.pdf](http://iweb.tms.org/PbF/JOM-0212-45.pdf)
- [4] Manuálové listy: *MUST System II User's Guide*. Multicore Solders
- [5] Van der Sloot, H. A.: *The Leaching Proces*, 2007, dostupné z [www: www.leaching.net](http://www.leaching.net)
- [6] Fraser, A., Van de Vall, L., Zarrow, P.: *SMT's Back to Basics*. Special Supplement to SMT the Magazine for Electronics Assembly, júl 1998
- [7] Pretavovací profil SAC spájky: *Soldering reflow profiles*, Seico Instruments Inc., dostupné z [www: http://www.sii-ic.com/en/solder.jsp](http://www.sii-ic.com/en/solder.jsp)
- [8] Hernandez, C.L., Hosking, M., Rejent, J. A., Vianco, P. T.: *Mechanical Properties of Pb-free Solder Alloys on Thick Film Hybrid Microcircuits*. USA, Albuquerque NM, Sandia National Laboratories, 1998, dostupné z [www: http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/642720-snhGGh/webviewable/642720.pdf](http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/642720-snhGGh/webviewable/642720.pdf)
- [9] Drab, T.: *Modifikace metody smáčecích vah pro měření smáčivosti SMD*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 50 s. Vedúci bakalárskej práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [10] Technické listy Sn100C: *Lead-free Wave Soldering Alloy*. AIM Solder, dostupné z [www: www.aimsolder.com/tds/SN100C%20Alloy%20TDS.pdf](http://www.aimsolder.com/tds/SN100C%20Alloy%20TDS.pdf)
- [11] Katalógové listy: *New Eco Solder, Cutting-Edge Lead-Free Solders*, Senju Metal Industry Co., Ltd, Tokyo, 2011
- [12] Definície pojmov: *Title 15: Commerce and Foreign Trade, Part 772 – Definition of terms*, Electronic Code of Federal Regulations, 2012, dostupné z [www: http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?c=ecfr&sid=ba2d5996d28cc22033ea2bfb857555cc&rgn=div5&view=text&node=15:2.1.3.4.44&idno=15](http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?c=ecfr&sid=ba2d5996d28cc22033ea2bfb857555cc&rgn=div5&view=text&node=15:2.1.3.4.44&idno=15)
- [13] Peres M., O'Keefe M., Colfax R., Vetter S., Murry D., Smith J., Kleine D., Amick P.: *Vibration Testing of Repaired Lead-Tin/Lead-Free Solder Joints*, stana 1493-1498, Electronic Components and Technology Conference, 2006, dostupné z [www: http://ecadigitallibrary.com/pdf/56thECTC/s33p6bg.pdf](http://ecadigitallibrary.com/pdf/56thECTC/s33p6bg.pdf)

- [14] Kaseb S., El-Hariry G.: *MPE 635: Electronics Cooling, Part E: Analysis of Thermal Failure of Electronic Components, Chapter 27. Vibration Fatigue in Lead Wires and Solder Joints*, Mechanical Power Engineering Department, Faculty of Engineering, Cairo University, Egypt, dostupné z www: <http://www.pathways.cu.edu.eg/ec/Text-PDF/Part%20E-27.pdf>
- [15] Shaw Fong Wong, Pramod Malatkar, Canham Rick, Vijay Kulkarni, Ian Chin: *Vibration Testing and Analysis of Ball Grid Array Package Solder Joints*, Kulim High Technology Park, Malaysia, 2007, dostupné z www: <http://ecadigitallibrary.com/pdf/57thECTC/s09p2mjd.pdf>
- [16] ReliaSoft Corporation, *Accelerated Life Testing Reference*, Tucson, AZ: ReliaSoft Publishing, 2007, dostupné z www: <http://www.weibull.com/hotwire/issue116/hottopics116.htm>
- [17] Jong-Woong K., Dae-Gon K., Seung-Boo J.: *METALS AND MATERIALS International, Mechanical Strength Test Method for Solder Ball Joint in BGA Package*, strana 121-129, Sungkyunkwan University Suwon, Korea, 2005, dostupné z www: <http://www.springerlink.com/content/f2n272413x3j2x04/>
- [18] Fubin Song, S. W. Ricky Lee, Keith Newman, Bob Sykes, Stephen Clark: *High-Speed Solder Ball Shear and Pull Tests vs. Board Level Mechanical Drop Tests: Correlation of Failure Mode and Loading Speed*, Center for Advanced Microsystems Packaging, Hong Kong University of Science & Technology, SUN Microsystems, DAGE Holdings Limited, Electronic Components and Technology Conference, 2007. Dostupné z www: <http://www.nordson.com/en-us/divisions/dage/support/Literature/Documents/High%20speed%20solder%20ball%20shear%20and%20pull%20tests.pdf>
- [19] PennWell Coporation: *Understanding the Complexities of Solder Ball Pull Test on BGAs*, dostupné z www: <http://www.electroiq.com/articles/ap/print/volume-14/issue-3/features/understanding-the-complexities-of-solder-ball-pull-testing-on-bgas.html>
- [20] Benča Š.: *Výpočtové postupy MKP pri riešení lineárnych úloh mechaniky*, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2004, dostupné z www: <http://www.mkp-fem.sk/>
- [21] IPC- Association Connecting Electronics Industries: *IPC-TM-650 Test Mmethods Manual: 2.6.9 Vibration, Rigid Printed Wiring*, Revision B, 2004, dostupné z www: <http://www.ipc.org>
- [22] DEHN + SÖHNE: *Vibration and shock tests according to EN 60068-2*, TÜV Rheinland, Nemecko, 2007, dostupné z www: http://www.dehn.nl/content/pdf_nl/vibration_tests.pdf
- [23] Standard IEC – International Electrotechnical Commission: *IEC 60749 - 40 Semiconductor Devices – Mechanical and Climatic Test Methods – Part 40: Board Level Drop Test Using a Strain Gauge*, 2011

- [24] NEMA Standards Publications: *Industrial Laminating Thermosetting Products*, National Electrical Manufacturers Association, Virginia USA, 1998
- [25] Indium Corporation: *Table of Speciality Solders & Alloys, Pb-Cd Free*, Indium Corporation of America, Europe and Asia, dostupné z www: <http://www.indium.com/products/alloysolderchart.php>
- [26] Engineering Toolbox: *Elastic Properties and Young Modulus for some Materials*, dostupné z www: http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html

Zoznam použitých skratiek

- BGA : z angl. Ball Grid Array – pole guľových vývodov, Typ púzdra pre SMT montáž
- DFM: z angl. Design for Manufacture – návrh pre výrobu
- DPS: Doska plošných spojov
- FR4: základný substrát tvorený epoxidovou živicom vystuženou sklenenou tkaninou
- HAL: z angl. Hot Air Leveling, druh povrchovej úpravy medi
- OSP: z angl. Organic Surface Protection, druh povrchovej úpravy medi
- SAC: druh spájky s tromi prvkami (cín, striebro, meď)
- SMD: z angl. Surface Mount Devices – súčiastky pre povrchovú montáž
- SMT: z angl. Surface Mount Technology – technológia pre povrchovú montáž

Príloha 1: Výkres držiaka DPS

