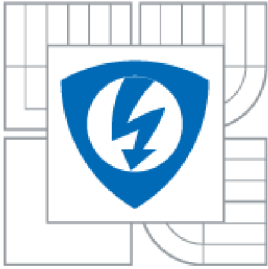




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**TERMOMECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ BEZOLOVNATÉHO  
PÁJENÉHO SPOJE**  
THERMO-MECHANICAL STRESS OF LEAD-FREE SOLDER JOINT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

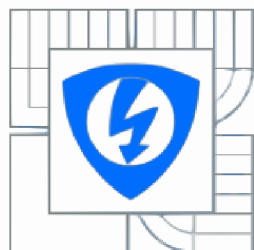
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**BC. JIŘÍ LIBICH**

**VEDOUČÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.**

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

## **Diplomová práce**

magisterský navazující studijní obor  
**Mikroelektronika**

**Student:** Bc. Jiří Libich  
**Ročník:** 2

**ID:** 73013  
**Akademický rok:** 2010/2011

### **NÁZEV TÉMATU:**

## **Termomechanické namáhání bezolovnatého pájeného spoje**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Navrhněte zkušební DPS s pouzdry Flip-Chip pro měření pevnostních charakteristik i elektrické vodivosti.

Zpracujte návrh metodiky měření stříhové a tahové pevnosti.

Prakticky sledujte vlivy rozdílných povrchových úprav a vybraných procesních parametru na stříhovou pevnost po přetavení a po izotermálním stárnutí. Vyhodnoťte typy defektu.

Zpracujte návrh budoucího modelu termomechanického namáhání takto navržených spojů v programu ANSYS.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 26.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Starý, Ph.D.

**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 č40/2009 Sb.

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá spolehlivostí bezolovnatých pájených spojů v různých propojovacích strukturách. Cílem je návrh zkušebního obrazce pouzdra BGA (FC) pro testování pevnosti bezolovnatých pájených spojů při stříhovém namáhání ve spojení s návrhem metodiky měření stříhové pevnosti při izotermálním stárnutí bezolovnatých pájených spojů. V návaznosti se stříhovým namáháním je prověřován vliv materiálové a procesní kompatibility, tj. povrchových úprav pájecích ploch, materiálu pájky a integrálu tepla dodaného při zapájení, na pevnost bezolovnatého pájeného spoje BGA vývodu.

## Abstract

This diploma thesis deals with the reliability of lead-free solder joints at a different interconnection structures. The first goal is to design the test cases shape BGA (FC) for testing the strength of lead-free solder joints at shear test in link with design of measuring method to detection shear strength during isothermal aging of lead-free solder joints. Following this shear stressing is investigating influence material and process compatibility, ie. pads finishing, material of solder and integrate of temperature (this mean thermal energy supplied during soldering) to lead-free solder joint strength.

## Klíčová slova

Bezolovnatý pájený spoj, spolehlivost, test stříhem, povrchová úprava, pevnost.

## Key words

Lead-free solder joint, reliability, shear test, finishing, strength.

## Bibliografická citace díla

Libich, J. *Termomechanické namáhání bezolovnatého pájeného spoje - diplomová práce*  
Brno, 2011. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D. FEKT VUT v Brně

## Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Termomechanické namáhání bezolovnatého pájeného spoje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. května 2011

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování své závěrečné diplomové práce.

Dále děkuji Ing. Olze Švecové za ochotu a vstřícnou pomoc při zpracování simulací a měření do diplomové práce.

V Brně dne 29. května 2011

.....  
podpis autora

# Obsah

Úvod .....	7
1 Povrchová úprava pájecích ploch pro strojní pájení.....	8
1.1 Vhodné povrchové úpravy pájecích ploch.....	8
1.2 Pájecí slitiny.....	10
1.3 Plazmatické čištění povrchu mědi před povrchovou úpravou/pájením .....	12
2 Stříhové namáhání - teorie.....	15
2.1 Test stříhem v různých rychlostních provedeních, vliv na namáhání a spolehlivost kulového vývodu.....	15
2.2 Návrh metodiky měření stříhové a tahové pevnosti spoje .....	22
2.2.1 Měření stříhové pevnosti – Shear test .....	22
2.2.2 Měření tahové pevnosti – Tweezer pull test.....	22
2.3 Norma pro testování pevnosti kulových vývodů stříhem, JEDEC – JESD22-B117A ...	24
2.4 Norma pro testování pevnosti kulových vývodů tahem, JEDEC – JESD22-B115 .....	27
3 Testování pevnosti jednotlivých kulových vývodů stříhem na stroji DAGE PC 2400 .....	32
3.1 Příprava vzorku.....	32
3.2 Vlastní test stříhem (Shear test) .....	33
3.3 Zhodnocení testu .....	35
4 Stříhové namáhání BGA pouzder – první etapa praktických zkoušek.....	36
4.1 Stříhové namáhání .....	37
4.2 Vlastní provedení pokusu .....	37
4.2.1 Stříhové namáhání sady vzorků kategorie 1 .....	38
4.2.2 Stříhové namáhání sady vzorků kategorie 2 .....	38
4.3 Vyhodnocení získaných výsledků .....	39
4.3.1 Fotografie kulových vývodů po testu stříhem.....	41
5 Návrh testovacího obrazce DPS – druhá etapa praktických zkoušek.....	43
5.1 Testovací schéma DPS.....	43
6 Stanovení parametrů po přetavení .....	45
7 Stříhové testování sady BGA pouzder.....	46
7.1 Výsledky stříhového testu na stroji DAGE 2400.....	49
7.2 Vyhodnocení stříhového testu .....	51
8 Simulace v prostředí ANSYS Workbench .....	56
8.1 Vytvoření grafického modelu – vstupní data.....	57
8.2 Získané výsledky .....	61
9 Tepelné stárnutí BGA pouzder .....	66
9.1 Simulace tepelného stárnutí v programu ANSYS .....	66
9.2 Zhodnocení simulovaných výsledků .....	70
10 Závěr .....	71
11 Seznam literatury použité při zpracování práce .....	73
12 Seznam použitých výrazů a zkratk .....	74

## Úvod

Spolehlivost (synonymem spolehlivosti je kvalita) je sama o sobě komplexní vlastnost. Z hlediska technologie pájených spojů si pod ní lze představit vysokou pevnost, výborné elektrické, mechanické a tepelné vlastnosti spolu s jejich udržitelností a stabilitou (neměnnost dosažených parametrů v rozmezí daných podmínek). Dnes v době silné tržní konkurence, vysokých nákladů na servisní opravy, má spolehlivost značný význam pro udržení dobré pozice a pověsti společnosti na trhu.

V oblasti elektrotechnologie jsou dnes vyráběny mikroelektronické elementy (např. SMD součástky, čipy v různých provedeních apod.), na něž jsou kladeny vysoké požadavky nejen z hlediska technologicko-ekonomického ale především z pohledu environmentální politiky spojené s šetrností k životnímu prostředí. V oboru technologie pájených spojů to znamená nahrazení olovnatých slitin pro pájený spoj bezolovnatými slitinami obsahujícími v největším zastoupení cín, stříbro a měď. S těmito novými podmínkami vyvstal otazník nad vhodným typem bezolovnaté pájky dosahující minimálně stejných nebo lepších vlastností nežli olovnatá slitina. Tato práce se zabývá výzkumem spolehlivosti pájených bezolovnatých spojů v elektrotechnice.

Pro náš výzkum se vychází z jedné z nejpoužívanější bezolovnatých slitin v elektroprůmyslu, a to slitiny SAC 305. Jako testovací matrice byla zvolena velmi hojně používaná a rozšířená skupina Flip-Chipů s kulovými vývody tzv. BGA pouzdra, viz obrázek 11. Hlavním záměr práce je tedy vyhodnotit vliv technologických a environmentálních parametrů na výslednou pevnost a soudržnost spoje (materiálová a procesní kompatibilita, teplota) s následným otestováním mechanické pevnosti celého BGA pouzdra pomocí stříhového testu. Dále pak porovnat tyto výsledky získané při mechanickém testování BGA pouzder s predikcemi získanými z dnes hojně využívaných simulačních programů. Pro naše účely bude použit kvalitní simulační program ANSYS – Workbench, který nalézá své uplatnění v strukturálních a termodynamických simulacích, kde lze uskutečňovat analýzu proudění, analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí a akustické analýzy.

# 1 Povrchová úprava pájecích ploch pro strojní pájení

Z hlediska přilnavosti spoje k pájecí plošce je velmi důležité zvolit vhodnou povrchovou úpravu měděných pájecích ploch, která musí být přizpůsobena procesu pájení, typu pájecí slitiny jakožto i zamýšlenému použití aplikace.

Povrchové úpravy jsou aplikovány na DPS k ochraně měděné folie před oxidací, zajištění dlouhé doby skladovatelnosti a dobré pájitelnosti povrchu. Typ povrchové úpravy výraznou měrou ovlivňuje spolehlivost pájených spojů.

Všeobecné požadavky na volbu povrchové úpravy:

- **Materiálová kompatibilita**
  - chemicko-fyzikální kompatibilita s měděným povrchem DPS (dobrá smáčivost povrchů, slučitelnost s působením různých tavidel i ochranné atmosféry)
  - kompatibilita s nepájecí maskou
- **Procesní kompatibilita**
  - rovinnost povrchu
  - tloušťka vrstvy (0,1 – 0,5)  $\mu\text{m}$
  - vhodnost pro fine - pitch aplikace
  - možnost kontaktování
  - malý teplotní stres substrátu
  - snadné řízení procesu i údržba lázně
  - teplotní odolnost povrchové úpravy DPS pro vícenásobný teplotní cyklus a dobré mechanické a elektrické vlastnosti v relaci k pracovním podmínkám.
  - dlouhodobá skladovatelnost i spolehlivost
- **Environmentální kompatibilita**
  - netoxická povrchová úprava
  - ekologické zpracování odpadních vod
  - kompatibilita s environmentálními vlivy (migrace stříbra, růst intermetalických vrstev, růst whiskerů)

## 1.1 Vhodné povrchové úpravy pájecích ploch

### ● **Imersní stříbro (Ag Imm.)**

Bezproude nanášením atomů stříbra na povrch mědi vzniká ochranná vrstva zvaná imersní stříbro. Z důvodů minimalizace ztráty lesku stříbrné vrstvy přidáváme do stříbra organické inhibitory, který vytváří na jeho povrchu hydrofobní vrstvu.

Tloušťka závisí na chemickém složení (0,08 – 0,25)  $\mu\text{m}$ .

Máme dva typy chemických procesů. Jeden lze řídit pouze v horizontálním směru a druhý v horizontálním i vertikálním směru.



Tyto povrchy jsou vhodné pro SMT, flip čip, BGA a klasické „through hole“ technologie. Jsou kompatibilní se všemi typy pájecích masek, snesou 5 teplotních přechodů během osazování a při správném skladování je jejich skladovatelnost až 1 rok.

Vlastnosti:

- rychlost aplikace
- malé technologické okno
- vysoká bezpečnost procesu
- malá energetická náročnost, velké množství chemického odpadu

Perspektiva:

- bezolovnatý proces „lead-free“
- jednoduchá a levná výroba

### ● Imersní cín (Imm. Sn)

Tato metoda využívá nanášení iontů z roztoku cínu na měděný povrch DPS. Tento typ povrchu je kompatibilní s technologií SMT, flip čip, BGA a klasickou „through hole“ technologií. Skladovatelnost asi jeden rok.

Vlastnosti:

- tvoří cínové whiskery
- podléhá cínovému moru
- nemožnost kontaktování

Perspektiva:

- výborná rovinnost povrchu (vhodné pro technologii fine pitch)
- bezolovnatý proces „lead-free“
- fine-pitch použití
- odolnost proti vícenásobnému teplotnímu cyklu

### ● NiAu - Chemický nikl / Imersní zlato

Při tomto typu povrchové úpravy se na vrstvu niklu, chemicky nebo galvanicky nanesenou na měděném povrchu, nanese tenká ochranná vrstva zlata. Charakteristické vlastnosti niklu (např.: tvrdost, pájitelnost a stejnoměrnost povrchu) činí z tohoto typu povrchové úpravy výbornou alternativu pro použití. Tenká vrstva imersního zlata zajišťuje dobrou pájitelnost povrchu a ochranu vysoce aktivního niklu před oxidací. Ni/Au povrchy mohou beze ztráty pájitelnosti přestát šest i více teplotních cyklů.

Šířka vrstvy niklu je zpravidla (3 – 5)  $\mu\text{m}$  a šířka vrstvy zlata je zpravidla (0,05 – 0,2)  $\mu\text{m}$ .

Ni/Au povrchová úprava je kompatibilní jak s technologiemi SMT, flip - čip a BGA, tak také s technologií „through hole“. Tento povrch je také kompatibilní s kontaktováním Al drátů.

Skladovatelnost DPS s Ni/Au povrchovou úpravou je 2 roky i více.

Vlastnosti:

- nízká rychlost výroby Ni/Au
- velký odpad z výroby Ni/Au je vyšší než z výroby HASL, protože nelze opravit nikl.
- malé technologické okno
- „black pad syndrome“ způsobený špatným chemickým složením lázně se zlatem, což způsobí erozi niklu a ve finále vznik křehkého pájeného spoje.

- difúze zlata z povrchu DPS do spoje (u silnějších vrstev Au – 3 μm). Dochází k vytvoření křehkých intermetalických sloučenin. Spoje jsou křehké a mají horší mechanické vlastnosti.

Perspektiva:

- rovinnost povrchu (vhodné pro technologii fine pitch)
- možnost kontaktování [7]
- bezolovnatý proces „lead-free“

### • OSP (Organic Solderability Preservative)

Chemická metoda nanášení organických inhibitorů mědi, před vlastním nanesením OSP je třeba odhalený povrch mědi řádně vyčistit (smítka prachu, oxidy nečisto apod.) děje se tak pomocí ultrazvuku nebo plazmového čistícího procesu (perspektivní). Po očištění projde deska oplachem, který zaleptá odkryté měděné plošky a poté je deska ponořena do lázně OSP. Po vytažení je osušena a připravena na pájení, skladovatelnost je asi 6 měsíců. Vazba mezi padem a OSP je zajištěna slabými Van der Valsovými silami.

Vlastnosti:

- kratší skladovatelnost
- dobrá procesní kompatibilita
- nízké náklady

Perspektiva:

- rovinnost, lead – free
- fine-pitch užití

## 1.2 Pájecí slitiny

### • Olovnaté pájecí slitiny

např.: SnPb 60-63 hmotnostních % cínu Sn a 40-37 hmotnostních % olova Pb.

Vlastnosti: - teplota tavení 183 - 189°C – malé teplotní namáhání substrátu a součástek

- cín vykazuje velmi dobré smáčecí charakteristiky a lesklý povrch
- pájecí slitina nevytváří křehké intermetalické vrstvy
- příznivá cena

Tyto slitiny se málo používají pro svoji vysokou toxicitu (olova), normy WEE- Waste electrical and electronic equipment a RoHS- Restriction of hazardous substances! Jejich použití je možné pouze ve velmi náročných aplikacích, nebo v aplikacích pro vojenské účely.

### • Bezolovnaté pájecí slitiny

např.: Sn-Ag-Cu, typ SAC387 obsahuje 95,5 hmotnostních % Sn, 3,8 hmotnostních % Ag a 0,7 hmotnostních % Cu také SAC305 která se skládá z 96,5 hmotnostních % Sn dále z 3 hmotnostní % Ag a 0,5 hmotnostních procent Cu. Další hojně používanou bezolovnatou pájkou je SN100C která obsahuje přibližně 99 hmotnostních % Sn, 0,7 hmotnostních % Cu a 0,05 hmotnostních % Ni + Ge.

Vlastnosti (oproti olovnaté pájce):

- vyšší teplota tavení > 185°C a křehkost spoje
- vznik intermetalických vrstev, (mezi spojovanými kovy - horší vodivost)

- horší smáčecí charakteristiky [2]

Bezolovnaté pájecí slitiny se dnes používají prakticky všude ve spotřební elektronice tj. tam kde nejsou kladeny příliš vysoké nároky na zařízení a na prostředí ve kterém zařízení budou provozována.

Tato práce má za úkol seznámit se s metodami testování pevnosti bezolovnatých pájených spojů pro mechanické namáhání a otestovat pevnost bezolovnatých spojů pouzdra BGA (Ball Grid Array). Až 70% poruch v elektrotechnice je způsobeno špatným vodivým spojeními mezi prvkem a propojovací strukturou.

### • Intermetalická vrstva (IMC - Intermetallic Compound) pro bezolovnatou pájku

Tato křehká vrstva vzniká na rozhraní dvou materiálů Cu – padu a materiálu pájky (slitiny) má obrovský vliv na mechanické vlastnosti spoje především pevnost přichycení k padu a jeho elektrické vlastnosti a tím ovlivňuje jeho spolehlivost a životnost. Tato vrstva má vyšší podtavení než pájka a taky jiné složení. Mezi povrchovou úpravou padu OSP/ENIG/Imm. Sn a bezolovnatou pájkou SAC vznikají obvykle tyto druhy sloučenin:

- $\text{Cu}_3\text{Sn}$  – vzniká po stárnutí, teplota tavení -  $670^\circ\text{C}$
- $\text{Cu}(\text{Ni})_6\text{Sn}_5$  -vzniká okamžitě na rozhraní padu s povrchovou úpravou a pájky,  $415^\circ\text{C}$ .
- $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$

Šířka ochuzené vrstvy resp. velikost směsných krystalů (CD) závisí především na poměrném složení pájky - padu a jeho povrchové úpravy (OSP, Imm. Sn atd.), pracovních teplotách při přetavení, době pájení – integrálu teploty).

Intermetalická vrstva je složena z směsných krystalů (CD) u kterých pozorujeme jejich velikost jakožto důležitý parametr k určení vlastností intermetalické vrstvy.

Růst intermetalické vrstvy se skládá se dvou prolínajících se fází:

1. Difúze – začíná se tvořit intermetalické oblasti okamžitě po smáčení tuhého povrchu roztavenou pájkou a její velikost je výrazně závislá na koncentračním gradientu (koncentrační spád). Při difúzi dochází vždy k přenosu hmoty tj. atomy tuhých materiálů přechází do tekuté pájky. Tento růst tloušťky IMC pokračuje podstatně menší rychlosti i za běžných teplot skladování a používání.
2. Rozpouštění – při naleptání povrchu padu roztavenou pájkou vznikají na povrch padu tuhé eutektické fáze, atomy těchto fází, které dosáhly díky energii dodané při pájení určité energie přecházejí do tekuté pájky.  
Naleptání padu pájkou probíhá tak že se roztavená tekutá pájka dostane mezi zrna tuhého kovu a tím se poruší jeho soudržnost. Největší tečení pájky nastává na počátku jejího roztavení a smočení povrchu. [2]

IMC vzniká také na rozhraní Cu pad/povrchová úprava např. Imm. Sn kde ohrožuje dobrou pájitelnost padu.

Odhady rychlosti narůstání IMC jsou různé, avšak jako vodítko je možno předpokládat, že při prvním přetavení se vytvoří vrstva asi  $0,7 \mu\text{m}$ , a poté (v závislosti na skladovacích okolních

podmínkách) tento nárůst pokračuje rychlostí 1  $\mu\text{m}$  za rok. Pro zjištění se používá umělé stárnutí.

Je paradoxem, že tenké rovné povlaky jsou často lepší, než povlaky tlusté a nerovné, protože intermetalické sloučeniny mají sklon napadat povrch rychle v "tenkých" místech nerovnoměrného povlaku. [9]

### 1.3 Plazmatické čištění povrchu mědi před povrchovou úpravou/pájením

Plazma, jedná se o ionizovaný plyn, který je tvořen ionty (kationty – kladně nabitě částice a anionty – záporně nabitě částice), volnými elektrony a neutrálními částicemi (atomy, molekuly).

Plazma vzniká ionizací plynu, kdy dodáme energie (větší nebo rovnou než je minimální ionizační energie), která způsobí odtržení elektronu z el. obalu atomu => vznik kladně nabitě částice tzv. kationtu. Naopak zabudování elektronu do atomového obalu vytvoří záporně nabitou částici => aniont. Energie nutná k ionizaci se dodává prostřednictvím fotonu tj. pomocí záření o určitých vlnových délkách např. RTG záření o vlnové délce (10 až 0,1) nm.

Vlastnosti plazmatu:

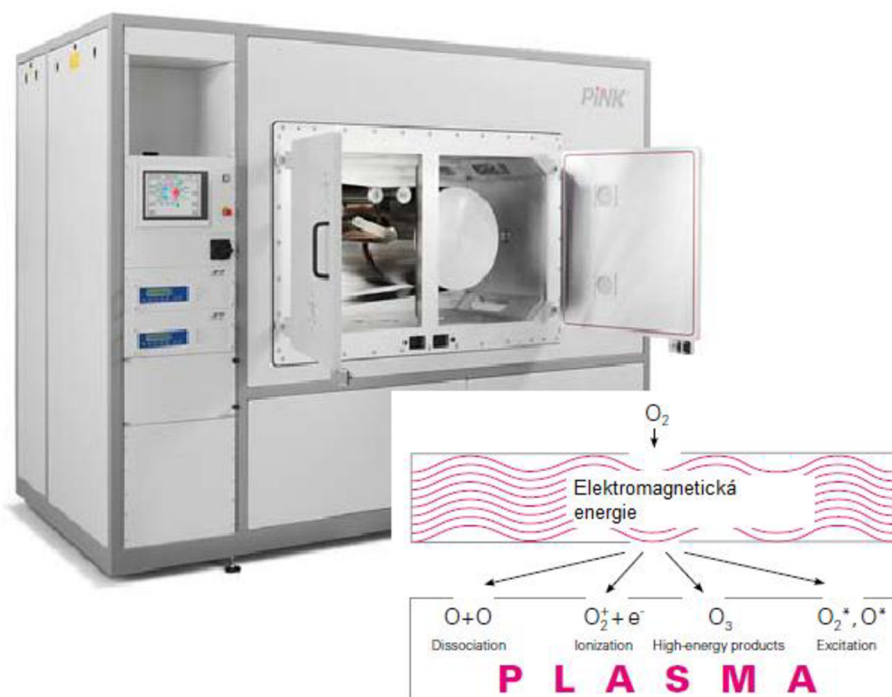
- výborná elektrická a tepelná vodivost
- kvazineutralita tj. přibližně rovná koncentrace kladně a záporně nabitých částic
- neutralizace náboje v plazmatu

Plyn proniká mnohem lépe do nepatrných děr, prasklin na rozdíl od mokrého čistícího procesu. Při procesu dochází ke zplynování organických nečistot jako voda a oxidy. Anorganické nečistoty je třeba odstranit v kombinaci s předčištěním pomocí mokrého procesu. Při čištění povrchu plazmou je možnost dosáhnout čistoty až  $\leq 5\text{mg}$  na  $\text{m}^2$  čištěné plochy.

Hlavní výhody:

- nízké pracovní teploty
- pronikání i do těch nejmenších štěrbin a prasklin
- minimální náklady na likvidaci odpadu a nízké provozní náklady
- ekologický proces
- minimální zbytky, není nutná jakákoliv úprava po procesu

Na obrázku 1 níže je zařízení V240 – 2Gk, toto zařízení je navrženo jako inLine tj. integrací do výrobní linky. Hlavní výhodou je možnost vysoké reprodukovatelnosti procesu. Toto zařízení je vybaveno dvěma vysokofrekvenčními generátory o frekvenci  $\sim 2,5\text{ GHz}$ . Tyto generátory vytvářejí elektromagnetické vlnění, které se stará o ionizaci vzduchu a tím vytváří nízkotlakou plazmu.



Obrázek 1: Zařízení pro plazmatické čištění Cu ploch.

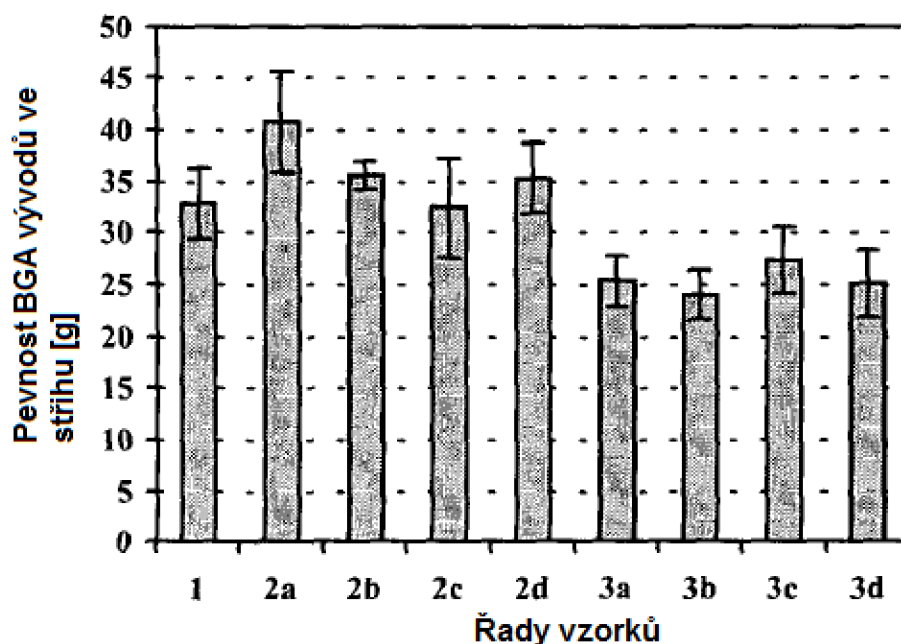
Některé plyny se stávají chemicky aktivními již při pokojové teplotě, ale musejí být v silně ionizované formě – plazmatu. Plazmové čištění probíhá ve vakuové komoře, tato komora je vybavena izolovaným nosičem substrátu. Zásobník je umístěn na roštovém držáku. Zdroj plazmy je složen z vyhřívaného vlákna uloženého v oddělené dutině. Tato dutina je spojena s vakuovou komorou prostřednictvím jakéhosi hrdla. Plyn obvykle Argon (Ar) je přiváděn do dutiny, kde je ionizován el. výbojem. DC potenciálem mezi vyhřívaným vláknem a zemí o velikosti (20 - 30) V dává proud mezi (10 – 200) A. Energie ionizovaného plynu je dostatečně velká k zlepšení chemické reakce na rozhraní plyn(plazma)/opracovaný povrch, ale příliš malá k odstraňování materiálu z opracovaných míst.

Pokud na substrát (opracovaný povrch) připojíme určité napětí, které bude větší nežli specifické prahové napětí opracovaného materiálu, začnou se vytvářet vysokoenergetické ionty, které při dopadu na opracovaný povrch začnou odstraňovat jeho atomy a tím jej odleptávat. Například pro měď má tento práh velikost 17 eV.

Ve srovnání s chemickým čištěním má fyzikální čištění „sputtering“ zásadní nevýhodu v tom, že část odstraněných částic z opracovaných ploch nebo nosného rámečku se pohybuje uvnitř komory, kde usedá na stěny a na jednotlivé opracované vzorky, které může kontaminovat. Z nosného rámečku neboli upínacího zařízení je možné do prostoru komory dostat různé prvky jako např. stříbro, uhlík apod.. Problémem je také to, že pokud do komory přicházejí různé druhy vzorků z různých materiálů tak dochází k další kontaminaci, která způsobuje další nepředvídané změny parametrů.

Oba typy čištění byly aplikovány na sadu vzorků (padů) následně osazenými kulovými vývody. Tyto vzorky byly posléze zapájena přetavení za stejných technologických podmínek

tj. stejného teplotního profilu, ve stejné přestavovací peci. Posléze byl proveden stříhový test s grafickým vyhodnocením na obrázku 2 níže.



Obrázek 2: Vzorek 1 byl na padu bez úpravy plazmou, vzorky řady „2“ byly upraveny chem. čištěním a vzorky sady „3“ byly upraveny fyzikálním čištěním. [11]

Z grafu na obrázku 2 je patrné, že mnohem větší silou – lepší adhezí vývodu k padu disponovaly vzorky ošetřené chemickým plasmatickým čištěním, naproti tomu vzorky upravené fyzikálním čištěním dopadly hůře nežli vzorek bez chemické úpravy. Je to možné tím, že docházelo k zpětnému usedání dříve odstraněných atomů, které se volně pohybovaly po komoře. [11]

Oba typy plazmového čištění velmi dobře odstraňují organické nečistoty. Ovšem díky zpětně nanášeným nečistotám u fyzikálního čištění je vhodnější pro spolehlivost používat reaktivní plazmové čištění.

## 2 Střihové namáhání - teorie

### 2.1 Test střihem v různých rychlostních provedeních, vliv na namáhání a spolehlivost kulového vývodu

Pokus se dvěma rychlostmi pohybu testovacího hrotu u shear testu. Vysoko nebo nízko rychlostní střihový test, byl prováděn u lead-free pájky, konkrétně u modelu SAC305 (3% stříbra a 0,5 % mědi, zbytek cín). Střihová pevnost rostla spolu se zvyšující se rychlostí testovacího hrotu. Praskliny v IMC vznikaly častěji a snáze u vyšších rychlostí. Střihová síla nutná k odtrhnutí vývodu klesala v závislosti na výšce testovací elektrody od základního materiálu. Pro vysoké umístění elektrody vůči kulovému vývodu docházelo k neočekávaně vysokým, odchylkám od běžných hodnot nebo ke sklouznutí hrotu po povrchu kulového vývodu.

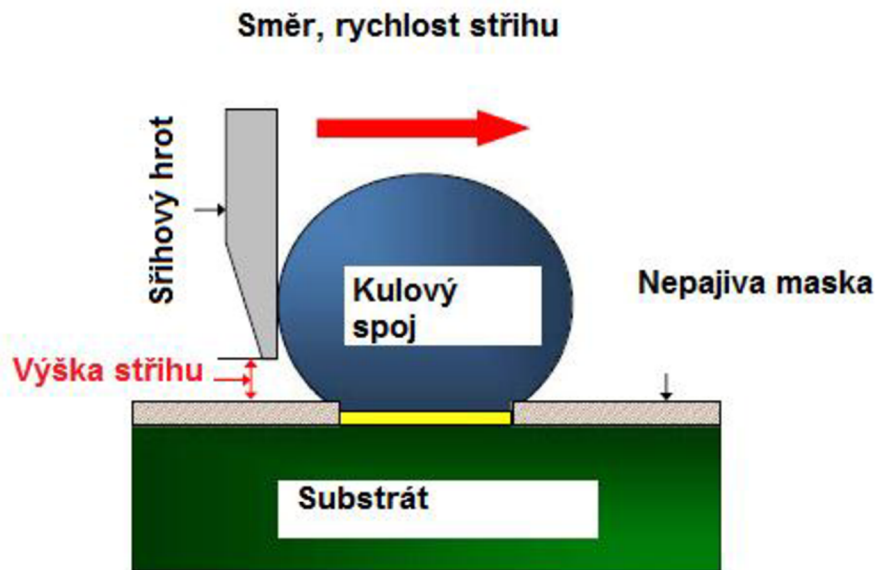
Spolehlivost pájeného spoje je vhodné testovat vzhledem k prostředí, v němž bude běžně zařízení používáno. Pro simulaci rychlých vlivů ovlivňujících spolehlivost pájeného spoje jako např. spadnutí, ohnutí apod. je v oblibě pro svoji jednoduchost drop test (nárazový test).

Běžná rychlost hrotu při střihovém namáhání je kolem 5 mm/s což je podstatně méně nežli nárazová rychlost při nárazovém testu. Upravené zařízení může provádět vysokorychlostní střihový test. Toto zařízení je schopno dosáhnout rychlosti až několik metrů za sekundu a tím může nahradit nárazový test.

- Základní parametry které mají nejvýznamnější vliv na výslednou střihovou sílu a typ /místo/ poruchy /selhání/ kulového spoje.
  - střihová výška (maximálně 25% velikosti kulového vývodu)
  - střihová rychlost

Tyto parametry a další byly hlavními proměnnými, viz obrázek 3 níže.

Při testování působily na testovaný vývod stěny nepájkivé masky a tím došlo k zvýšení jeho pevnosti vůči střihovému hrotu.



Obrázek 3: *Proměnné parametry vyznačeny červeně.*

Parametry vzorků:

- průměr vývodu: 500  $\mu\text{m}$
- průměr padu: 460  $\mu\text{m}$
- rozteč: 1 mm
- povrchová úprava Ni/Au tloušťky 7,15  $\mu\text{m}$
- zapájeno přetavením, za pomoci středně aktivovaných tavidel
- počet vzorků: 20 ks kulových vývodů

V programu ANSYS byl po zadání všech výše uvedených parametru a dalších doplňujících jako teplota zkušebního prostředí (300K) vytvořen 3D model kulového vývodu při namáhání (obrázek 4). Pro modelaci chování kulového vývodu pod tlakem působícího hrotu byla použit Garofalo-Arrhenius Creep Model, tento model představuje tečení (creep) jako funkci plasticity materiálu, teploty a celkové deformace viz vztah [1] níže.

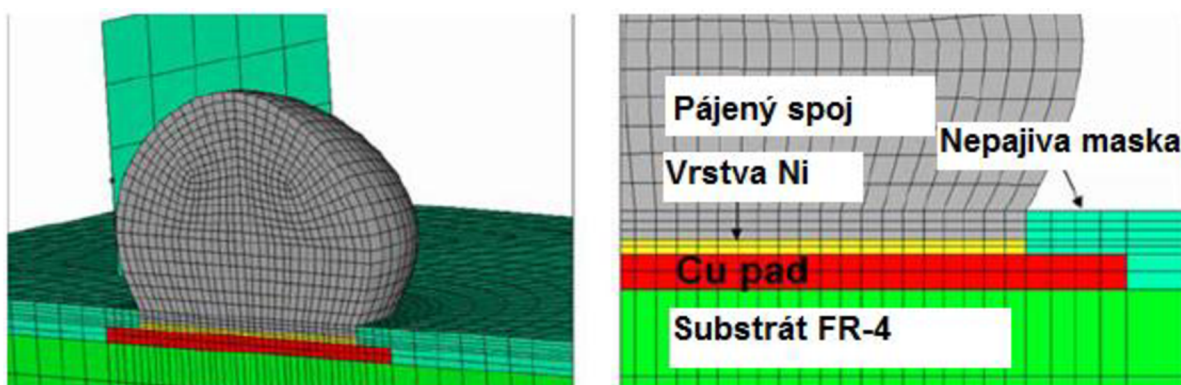
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = C_1 [\sinh(C_2 \sigma)]^{C_3} \exp\left(\frac{-C_4}{T}\right) \quad (1)$$

kde  $d\varepsilon/dt$  protažení (kluz) za jednotku času

$\sigma$  je aplikované namáhání

$T$  ... teplota v [K] a konstanty C charakterizují vlastnosti materiálu (pájky SAC305) v závislosti na teplotě



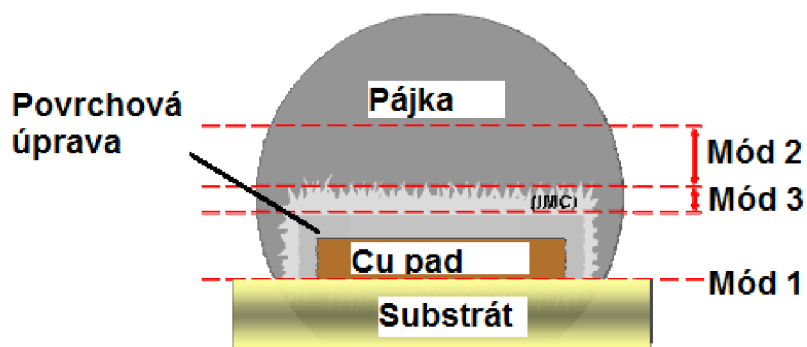


Obrázek 4: Vpravo zvětšená oblast rozhraní. [4]

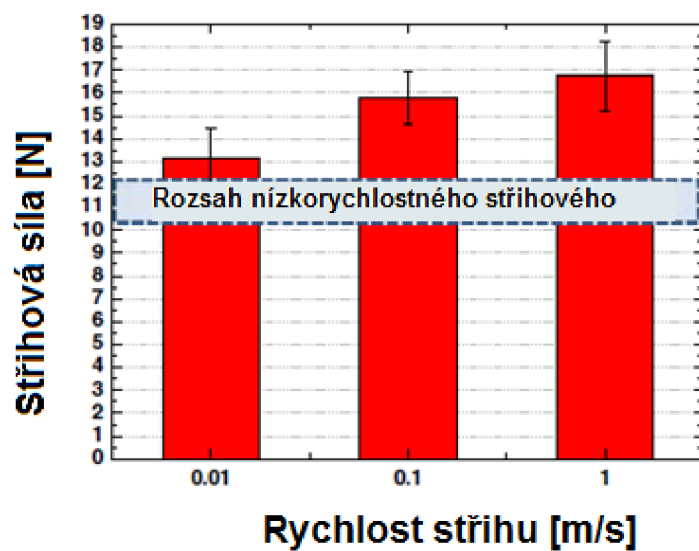
Nízko/Vysoko rychlostní stříh byl proveden na pevně nastavené stříhové výšce (50  $\mu\text{m}$ ) v rozmezí rychlostí od 0,01 m/s do 1 m/s. Výsledky jsou zobrazeny na obrázku 6 níže. Z grafu na obrázku je zřejmé, že největší stříhové síly bylo dosaženo při nejvyšší stříhové rychlosti. To může být důsledkem dvou základních materiálových vlastností: časově nezávislou plastickou deformaci – elastická deformace úměrná přiloženému mechanickému napětí, (hardening) [2] a časově závislou deformací tečením – kdy materiál pájky se pod nepřetržitě působícím namáháním neustále deformuje (creeping) na rozhraní pájky, povrchové úpravy s prolínáním do mědi viz obrázek 5.

$$\varepsilon_{pl} = \left(\frac{\sigma}{A}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

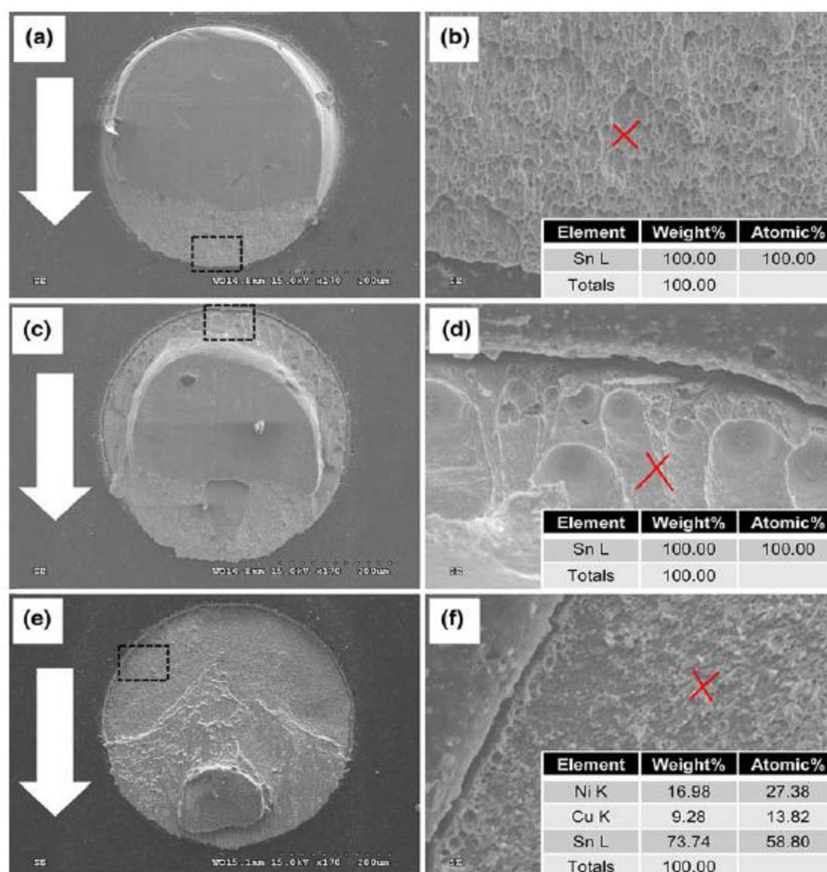
kde  $\varepsilon_{pl}$  je plastická protažení (kluz),  $\sigma$  je silové namáhání.  $A$  je neměnná konstanta působící síly a  $n$  je



Obrázek 5: Na obrázku je vyznačena oblast nejčastějšího selhání – intermetalická vrstva. [4]

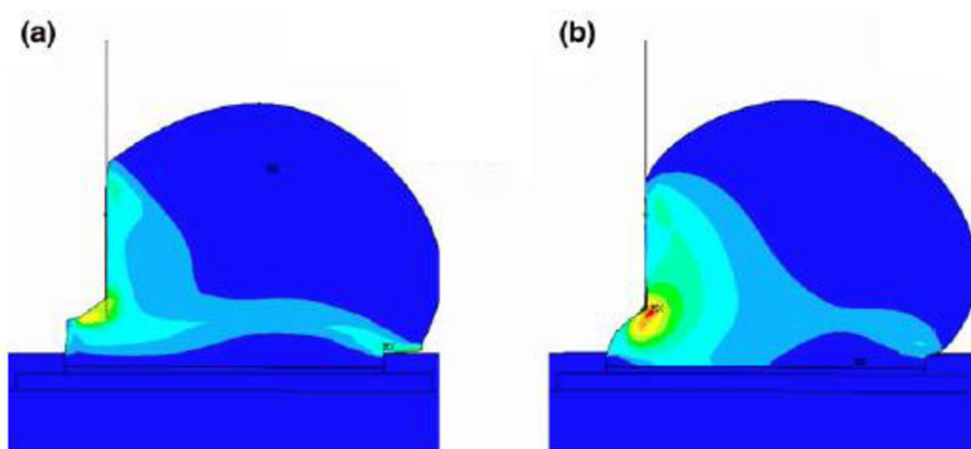


Obrázek 6: Výsledky stříhové síly u nízkorychlostního stříhového testu.[5]



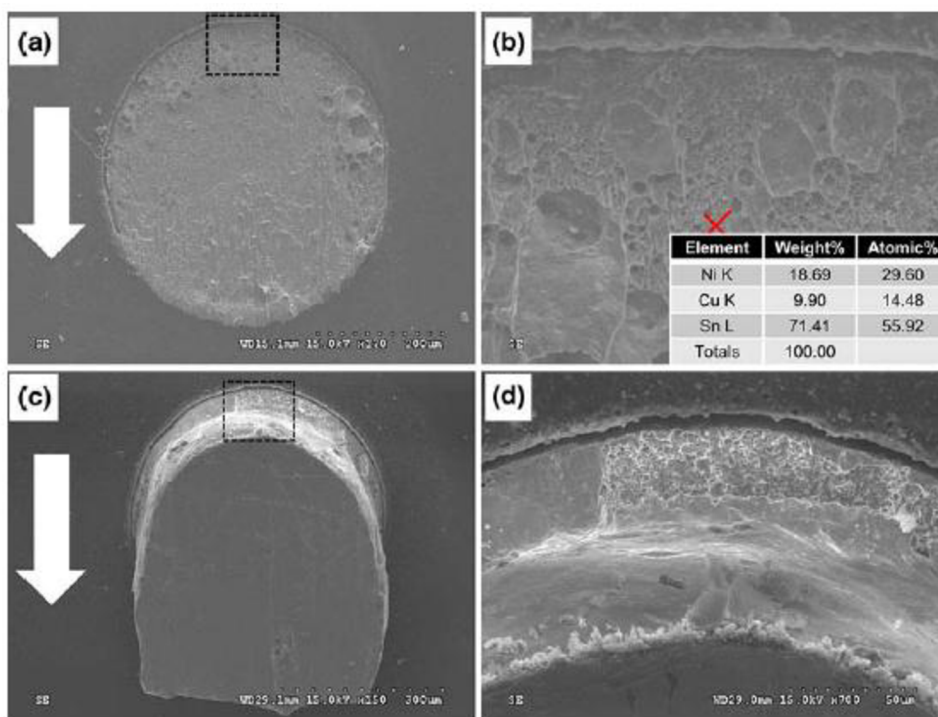
Obrázek 7: Fotografie povrchu padů po odtržení kulových vývodů, pro různé rychlosti.[4]

Na obrázku 7 výše je jasně vidět detail utrženého vývodu nízkou rychlostí (0,01 m/s), části (a, b) kdy je vývod protažený /roztažený/ v hmotě kulového vývodu. V části c a d byla použita rychlost hrotu 0,1 m/s a je patrné menší protažení spolu s nepatrným prasknutím v oblasti křehkých intermetalických vrstev. V části e a f je vidět selhání v oblasti křehkých intermetalických vrstev na rozhraní Ni a vývod, tyto vrstvy jsou velmi křehké a při dopadu mohou vlivem rychlého impulzu síly, který na ně působí prasknout. V tomto případě byla použita rychlost elektrody 1 m/s. Všechny tyto testy byly provedeny ve stejné výšce 50  $\mu\text{m}$ . Na obrázku 8 níže jsou vidět vymodelované průřezy kulových vývodů při mezních rychlostech stříhu. Červené oblasti ukazují největší intenzitu namáhání. V části (b) je vidět že namáhá, které značně působí i na IMC rozhraní oproti části (a) kde se oblasti s vysokou intenzitou namáhání k IMC oblasti nepřibližují.



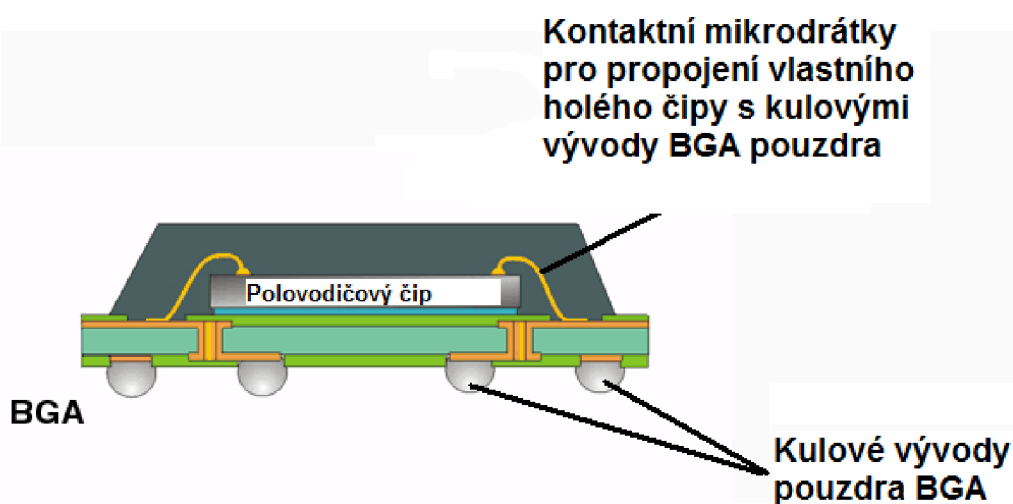
Obrázek 8: Profily zobrazující intenzitu plastické deformace pro rychlosti (a) – 0,01 m/s a (b) – 1 m/s.[3]

Závislost selhání pájeného spoje na testované výšce je význačná tím že při nízké testovací výšce dojde k selhání spoje v oblasti intermetalických vrstev obrázek 7 část (a), oproti tomu pokud umístíme testovací hrot do podstatně větší výšky cca 80% celkové výšky kulového vývodu tak dojde k silnému protažení hmoty vývodu a k vniknutí hrotu hluboko do bezolovnaté slitiny SAC305 viz obrázek 7 část (b). Lze říct, že čím větší výška testovacího hrotu tím menší je nutná síla k odtržení vývodu od padu. Rozdíl je jasně patrný na obrázku 9 níže.

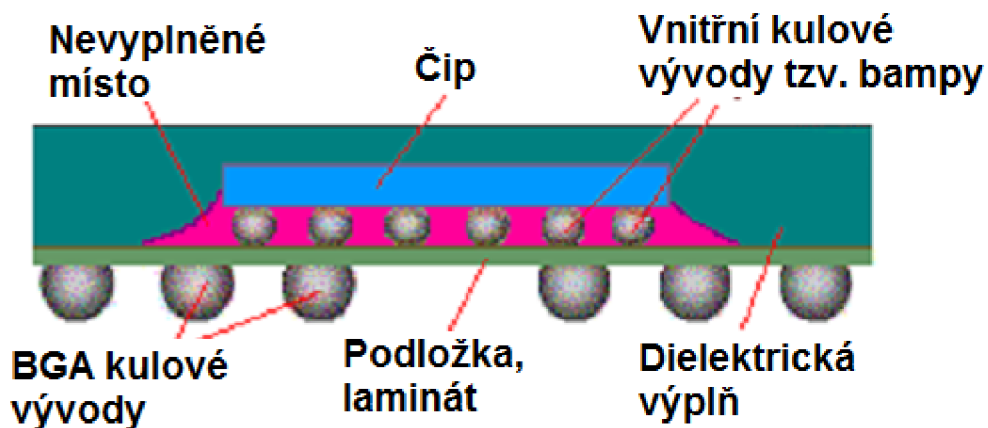


Obrázek 9: Část (a) testovací výška 10  $\mu\text{m}$  a část (b) výška 100  $\mu\text{m}$ . [3]

Test stříhem je základním nástrojem schopným otestovat pevnost bezolovnatých spojů na pouzdrech BGA - Ball Grid Array. Pouzdra BGA mohou obsahovat klasický čip spojený tenkým drátkem (kontaktování mikrodrátkem) a takzvaným Flip Chipem (FC), rozdíl mezi těmito způsoby kontaktování je vidět na obrázcích 10 a 11 níže.

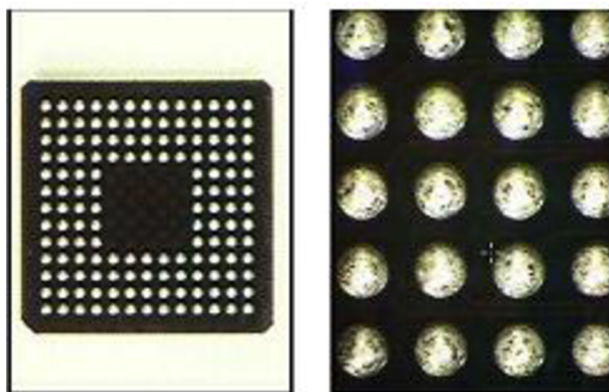


Obrázek 10: BGA pouzdro s kulovými vývody (Solder Balls) spojenými s vlastním čipem drátovými vývody. [3]

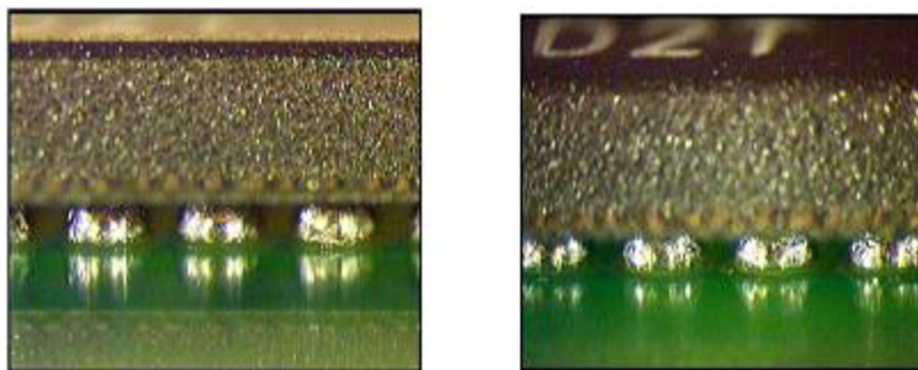


Obrázek 11: BGA pouzdro typu FC ve kterém je vlastní čip propojen s pouzdrem kulovými vývody tzv. bumpy. [4]

Na obrázcích 12 a 13 můžeme vidět fotografie kulových vývodů pouzdra BGA před a po zapájení, jedná se o bezolovnatou slitinu SAC.



Obrázek 12: Zobrazuje spodní stranu BGA pouzdra, s BGA kulovými vývody z bezolovnaté slitiny SAC (teplota přetavení 240°C).



Obrázek 13: Boční pohled na ukázkově přetavené BGA vývody bezolovnaté slitiny SAC po přetavení na substrátu FR-4.

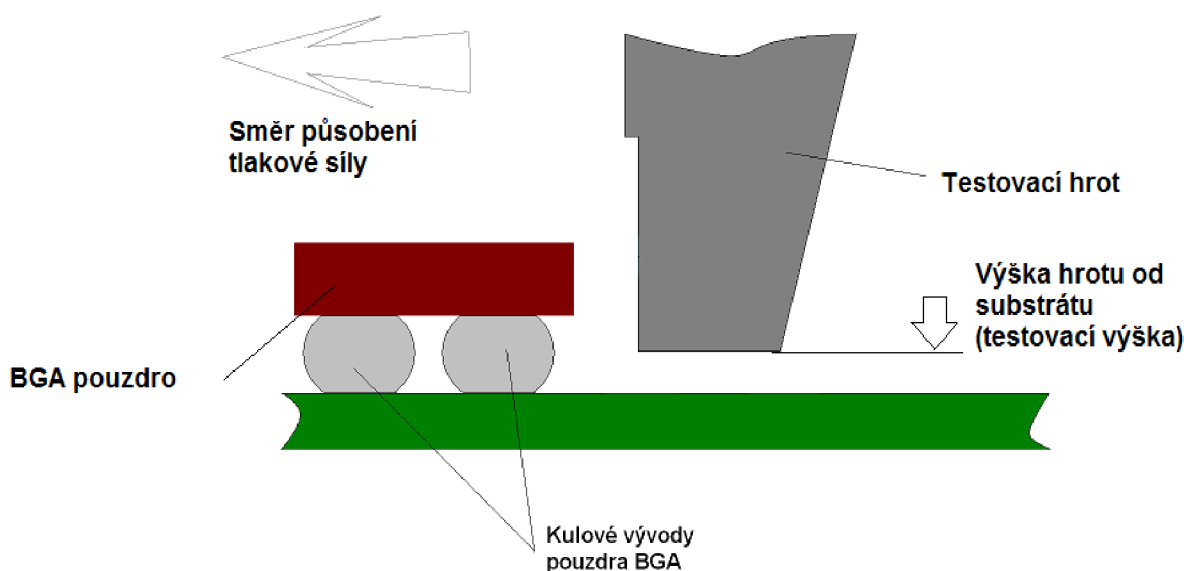
## 2.2 Návrh metodiky měření stříhové a tahové pevnosti spoje

### 2.2.1 Měření stříhové pevnosti – Shear test

Soubor vzorků o dostatečně velkém počtu (vhodné pro relevantní statistické výsledky) otestujeme na přístroji DAGE 2400, který působí definovanou zaznamenávanou silou na vzorek, která způsobuje jeho posunutí (BGA pouzdro vůči substrátu) až odtržení. Přístroj udává hodnoty v hmotnostních jednotkách kilogram, tyto jednotky lze přepočítat na tlakovou sílu.

Testovaný vzorek upneme do přípravku. Celý přípravek byl uchycen v testovacím zařízení, které definovanou silou „stříhem“ působilo na části vzorku. Dané zařízení je propojeno s počítačem, který vyhodnotí velikost síly nutné k oddělení obou částí vzorku od sebe.

Výstupem tohoto měření byla tedy velikost síly potřebné k oddělení obou částí vzorku od sebe a také vzdálenost, ve které došlo k jejich oddělení. Princip testu stříhem je znázorněn na obrázku 14 níže.

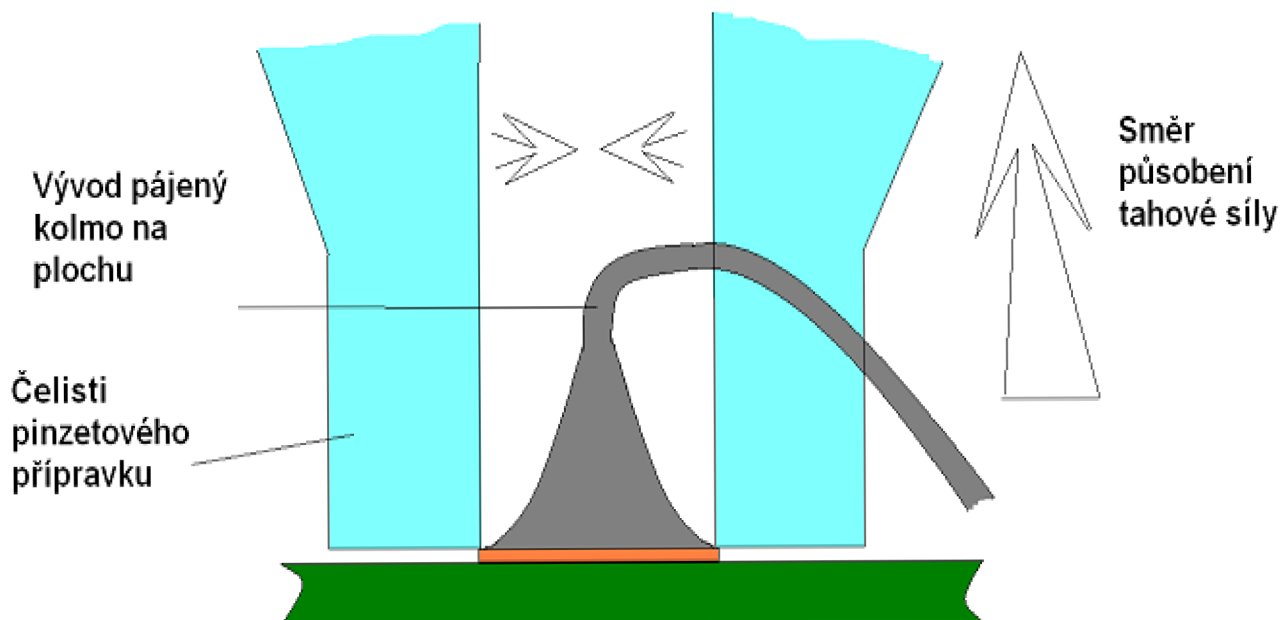


Obrázek 14: Princip zkoušky stříhem pouzdra BGA.

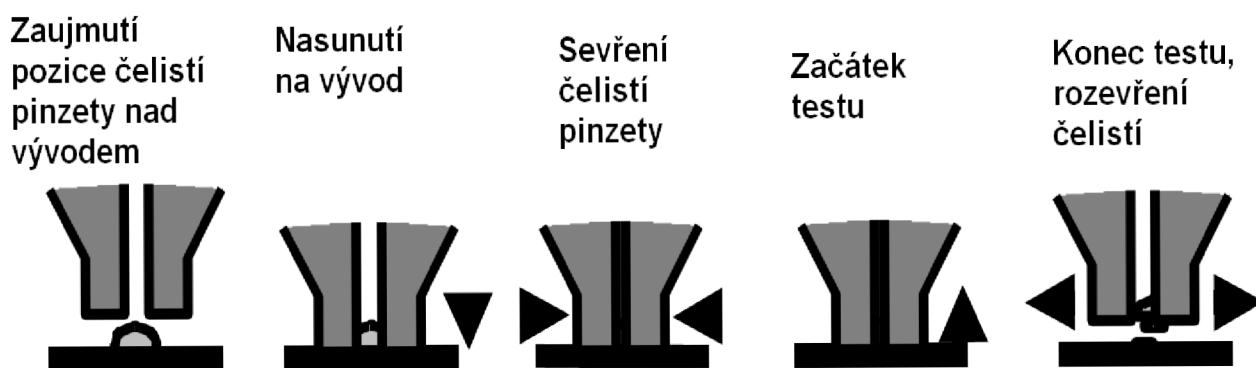
### 2.2.2 Měření tahové pevnosti – Tweezer pull test

Měřením tahové pevnosti se zkouší schopnost spoje odolávat síle působící kolmo na rovinu substrátu. Data získaná při tahovém testu mohou pomoci získat lepší představu mechanické kvality spoje. Data získaná při tomto testu mohou pomoci při sestavování dokonalejšího modelu v programu ANSYS. Vlastní testovací hlava pro uchopení spoje (viz obrázek 15) má

tvar pinzety, která v několika krocích provede uchopení a odtažení spoje od substrátu viz obrázek 16.



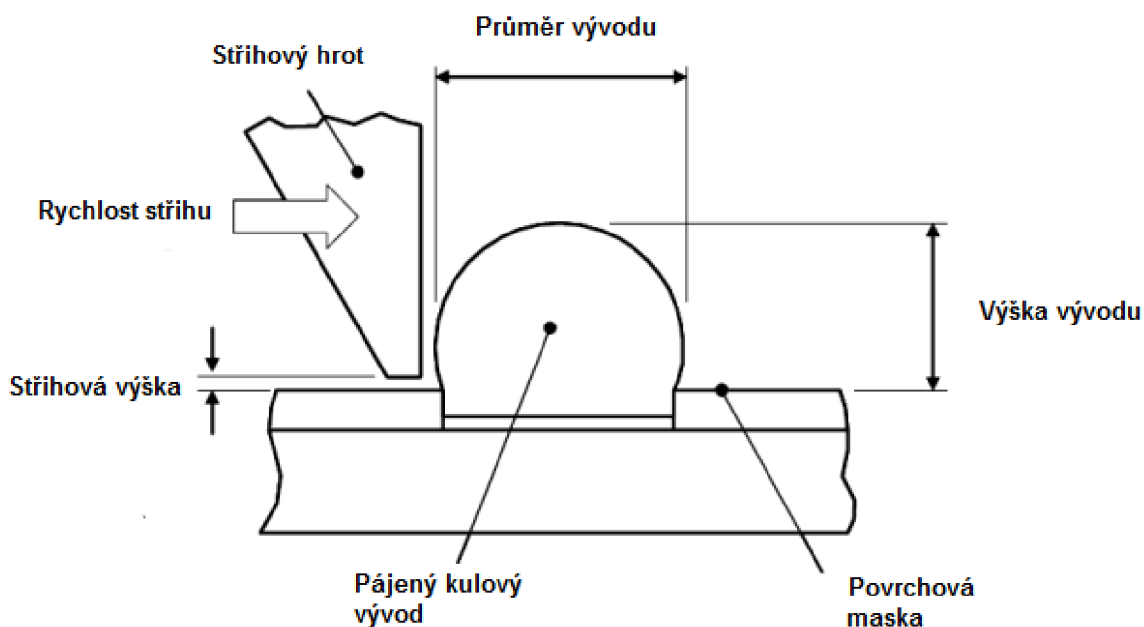
Obrázek 15: Princip uchopení a tahového testování spoje s vývodem pájeným kolmo na pájecí plošku.



Obrázek 16: Jednotlivé fáze testování pevnosti spoje tahem kolmým na substrát.

## 2.3 Norma pro testování pevnosti kulových vývodů stříhem, JEDEC – JESD22-B117A

Tato norma definuje základní požadavky na stříhové testování kulových vývodů, jsou v ní zahrnuty jednotlivé termíny, nastavované parametry a způsoby sběru vyhodnocení získaných údajů. Zařízení, na kterém je prováděno měření by mělo být vybaveno kalibrovaným siloměrem nebo snímacím prvkem. Zařízení pro testování pevnosti musí být schopno působit silou minimálně o 10 % větší nežli síla měřená při testování jednotlivých částí. Zařízení také musí mít možnost sledovat a měnit rychlost pohybu testovacího hrotu to znamená plynule měnit rychlost stříhu od nízké po vysokou. Tyto parametry splňuje při pokusech používané zařízení DAGE 2400. Na obrázku 17 jsou pro názornost popsány jednotlivé parametry



Obrázek 17: *Uspořádání a popis jednotlivých sledovaných parametrů.* [8]

Norma dále specifikuje požadavky na upnutí vzorku tak, aby nedošlo k jeho přemístění a posunutí v jakémkoliv směru. Dále pak norma uvádí potřebné počty testovaných vzorků pro vhodné statistické vyhodnocení tak, aby byly reprezentovány požadované technologické cíle, např. 22, 30, 45, ... kulových vývodů na 3, 5, ... modulech.

Před testem musí být testované spoje prohlédnuty, zda splňují požadavky a zda nejsou kontaminovány nečistotami spojenými s reflow procesem jako zbytky tavidla apod.



- Stříhový hrot na obrázku 17 by měl být z tvrdého neohebného materiálu jako např. keramika nebo kalená ocel. Co se týče rozměrů stříhového hrotu měl by mít šířku odpovídající přibližně šířce trhaného kulového vývodu tak, aby se nedotýkal při testu sousedících vývodů.

Při testování je důležitý sklon stříhového hrotu vůči povrchu na Obrázku 17 „povrchová maska“ v toleranci  $(90 \pm 5) \%$ . Stříhová výška od povrchu z obrázku 17 „Shear tool standoff“ by neměla být větší, nežli 25% výšky kulového vývodu ideálně 10% zároveň se nesmí dotýkat konec stříhového hrotu povrchu v žádné fázi pohybu při testu. Během umístování stříhového hrotu do vhodné pozice, nesmí dojít k náhodnému kontaktu se zamyšleně testovaným vývodem, protože tím by mohlo dojít ke zkreslení výsledku.

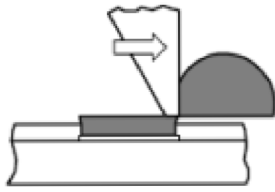
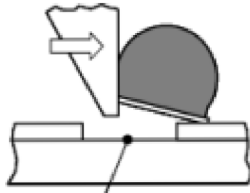
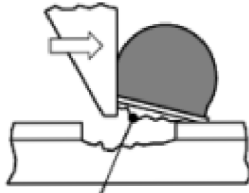
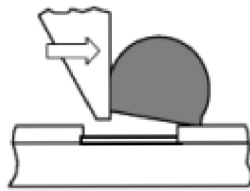
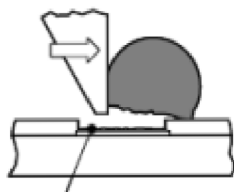
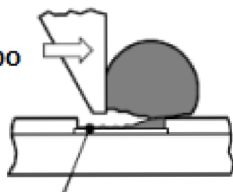
Při požívání je třeba dát pozor na opotřebení špičky hrotu, kde mohou vzniknout dlouhodobým namáháním rýhy, zaoblení, zuby které mají negativní vliv na test v podobě nepřesného snímání působící síly a nebo mohou mít vliv na způsob selhání kulového spoje.

- Rychlost stříhu je důležitá pro dosažení relevantních výsledků během testu, rychlost stříhu ovlivňuje způsob selhání vývodu a měla by být konstantní pro všechny testované vývody.

Norma rozlišuje dva druhy testu:

- High speed Shear test (vysoko rychlostní test):  $0,01 \text{ m.s}^{-1}$  až  $1 \text{ m.s}^{-1}$   
tj.  $10 \text{ mm.s}^{-1}$  až  $1000 \text{ mm.s}^{-1}$ .
- Low speed Shear test (nízko rychlostní test) s rychlostmi  $0,0001 \text{ m.s}^{-1}$  až  $0,0008 \text{ m.s}^{-1}$   
tj.  $0,1 \text{ mm.s}^{-1}$  až  $0,8 \text{ mm.s}^{-1}$ .

- Vyhodnocení probíhá prostřednictvím vhodného optického pozorovacího zařízení (např. mikroskop) se zvětšením alespoň stonásobným. Norma uvádí čtyři nejtýpější případy selhání spoje, viz obrázek 18 níže. [6]

Mód	Druh	Popis	Znázornění
1	Tažný, vazký	Porušení uvnitř kulového vývodu nad nepájivou maskou	
2	Zvednutí padu	Utrhnutí vývodu spolu s padem, může být doprovázeno porušením substrátu	 <span style="margin-left: 20px;">nebo</span> 
3	Zvednutí kulového vývodu	Zvednutí vývodu, pad není celý pokryt pájkou a povrchová úprava padu je vidět	
4	Prasknutí na rozhraní	Prasklina je rozhraní pájka/IMC nebo na rozhraní IMC/materiál padu. Prasklina na rozhraní se může táhnout napříč celým padem nebo převažuje prasklina v kontaktní oblasti hrotu	 <span style="margin-left: 20px;">nebo</span> 

Obrázek 18: Nejčastější případy selhání kulového spoje při stříhovém namáhání.[8]

Pozn.:

Pokud je pozorováno více různých případů selhání na jednom vývodu, je zaznamenám a vyhodnocen pouze dominantní druh selhání /poruch/ spoje. Vliv na selhání má také prodleva /doba/ mezi přetavením a dobou testu, tj. čas po který jsou vzorky uskladněny v specifických podmínkách (teplota, tlak, změny teploty).

## 2.4 Norma pro testování pevnosti kulových vývodů tahem, JEDEC – JESD22-B115

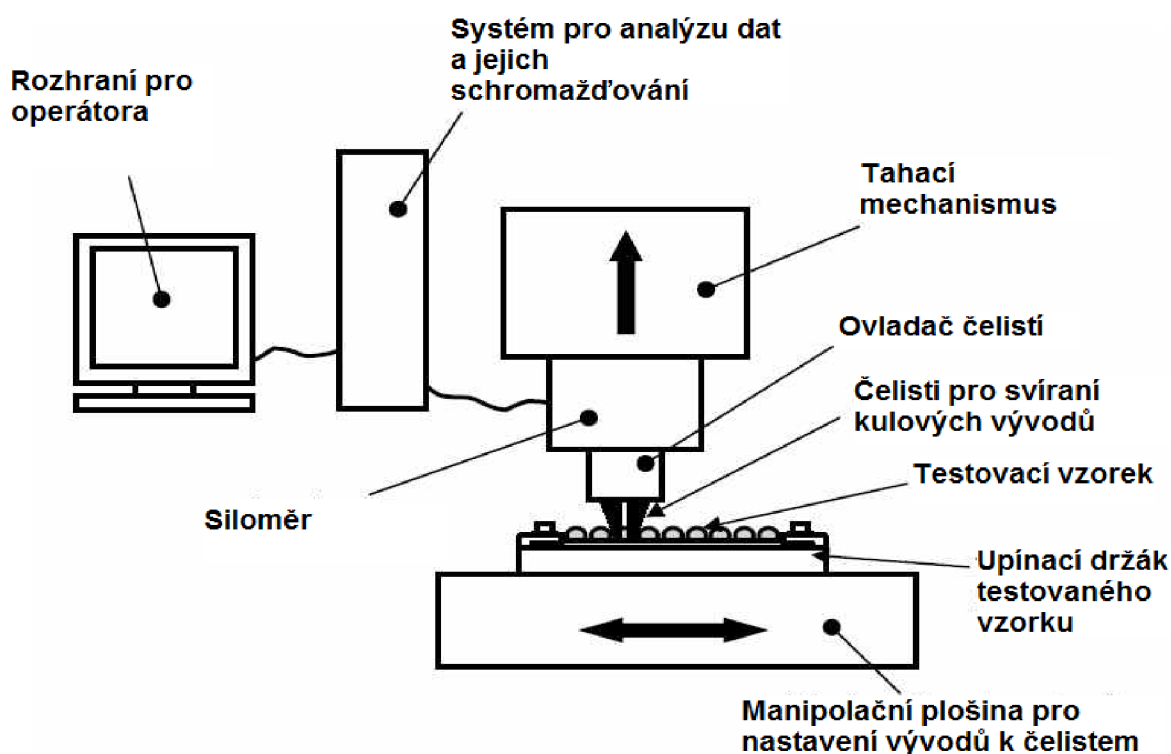
Zařízení sloužící k tahovému testu BGA vývodů je schématicky znázorněno na obrázku 19 níže, toto zařízení musí splňovat základní vlastnosti nutné k definování a vyhodnocení tahového testu kulových vývodů.

Základní vlastnosti:

- provést tahový test přesně definovanou konstantní rychlostí
- musí zaznamenat tah, kterým působí testovací hlavice na kulový vývod

Před přetavením je nutné sušit vzorky, pokud byly vystaveny vysoké vlhkosti.

Upínací zařízení (test sample holder) musí zabezpečit, aby povrch upnutého vzorku byl kolmo k testovací hlavici (gripping jaws) a aby nedošlo k pohybu vzorku při namáhání nebo ke zkroucení či prohnutí vzorku. Toho lze dosáhnout vhodným upínacím přípravkem, který využívá podtlak (vakuum) k přidržení plochy vzorku k podkladové desce.

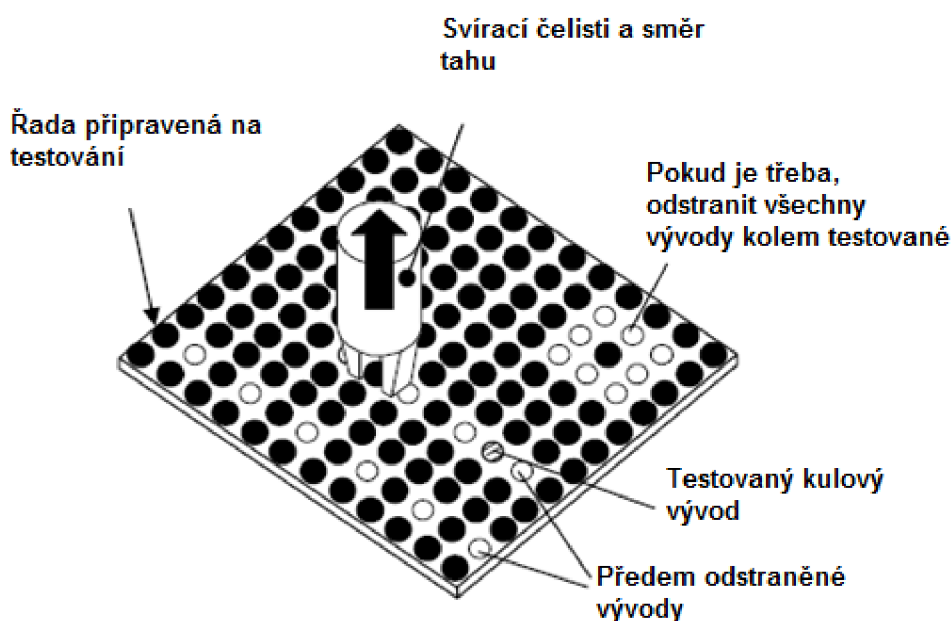


Obrázek 19: Schématické znázornění zařízení pro test tahem. [8]

Před testem je vhodné vybrat odpovídající velikost upínacích čelistí vzhledem k průměru kulového vývodu. Po vybrání vhodné hlavice je třeba nastavit pokud možno co nejmenší sílu, kterou je kulový vývod uchopen (stisknut) tak, aby jej hlavice udržela po celou dobu testu spolu s minimální deformací spoje. Pro velké síly dochází k promačkávání vývodu, deformaci

a vytlačování pájky. Sílu stisku je třeba nastavit konkrétně pro každou individuální materiálovou kombinaci. Síla stisku výrazně ovlivňuje druh selhání spoje.

- Příprava vzorku je nutné, aby byl vzorek před zkouškou zbavený všech reziduí a dalších nečistot. Je třeba zabránit, aby čelisti při přemísťování nezavadily nebo se nedostaly do kontaktu s přílehlými/sousedními vývody. Tomuto je možno zabránit odstraněním sousedních vývodů tak, aby při přesunu čelistí nedocházelo ke kontaktu se zbytky po odstraněných vývodech. Možné kombinace odstranění nadbytečných kulových vývodů jsou vidět na obrázku 20 níže.



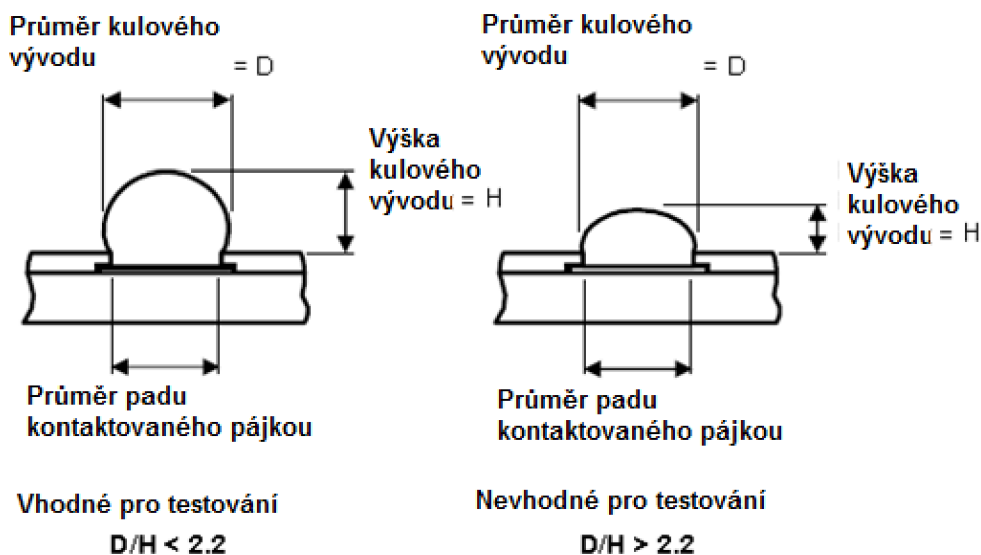
Obrázek 20: Možná odstranění sousedících vývodů pře tahovým testem. [8]

- Poměr vhodné výška kulového vývodu ve vztahu k jeho průměru je důležitý pro správné uchopení vývodu a správné působení tahové síly čelistí na něj viz obrázek 20. Aby byl kulový vývod vhodný pro tahové testování musí být poměr průměru vývodu a průměru padu větší nebo stejný 1,1, viz obrázek 21.

$$1,1 \geq \frac{\text{průměr vývodu}}{\text{průměr padu}} \quad (3)$$

a poměr průměru vývodu a jeho výšky by měl splňovat následující rovnici viz obrázek 31 níže

$$2,2 \geq \frac{\text{průměr vývodu}}{\text{výška vývodu}} \quad (4)$$



Obrázek 21: Parametry nutné k posouzení vhodnosti kulových vývodů pro test stříhem.[8]

● Parametry testovacích čelistí:

- měly by být z tvrdého materiálu jako např.: kalená ocel, keramika
- orientace hlavice by měla být kolmo k povrchu tj.  $90^{\circ} \pm 1^{\circ}$
- při umisťování čelistí je třeba dbát na to, aby nešlo k stranovému namáhání
- vhodná výška konce čelistí od nosného substrátu spolu se správným horizontálním a vertikálním vrovnáním

● Rychlost tahu je velmi důležitá veličina na kterou je třeba brát ohledy při vyhodnocování a nastavování testovacích parametrů vzhledem k požadované oblasti ,která má být u kulových vývodů prověřena.

Zkušební rychlost by měla být zvolena na základě účelu testu. Níže je uvedena přehledná tabulka definující účel/zkoumaný problém v tahovém testu, viz tabulka 1.

Platí, že s rostoucí rychlostí tahu roste síla v objemu testování slitiny, proto je třeba při vyhodnocování na základě kritérií přihlídnout k rychlosti stříhového testu.

Tabulka 1: Doporučení pro požití optimální rychlosti tahu.

účel/zkoumaný problém	rychlost tahu
síla v objemu spoje	nízká
zlomení materiálu	nízká
nesmáčení/kontaminace/znečištění padu	nízká nebo vysoká

dutinky (voidy) na rozhraní spoj/pad	vysoká
Křehkost intermetalické vrstvy (IMC)	vysoká
nárazový test/šok	vysoká

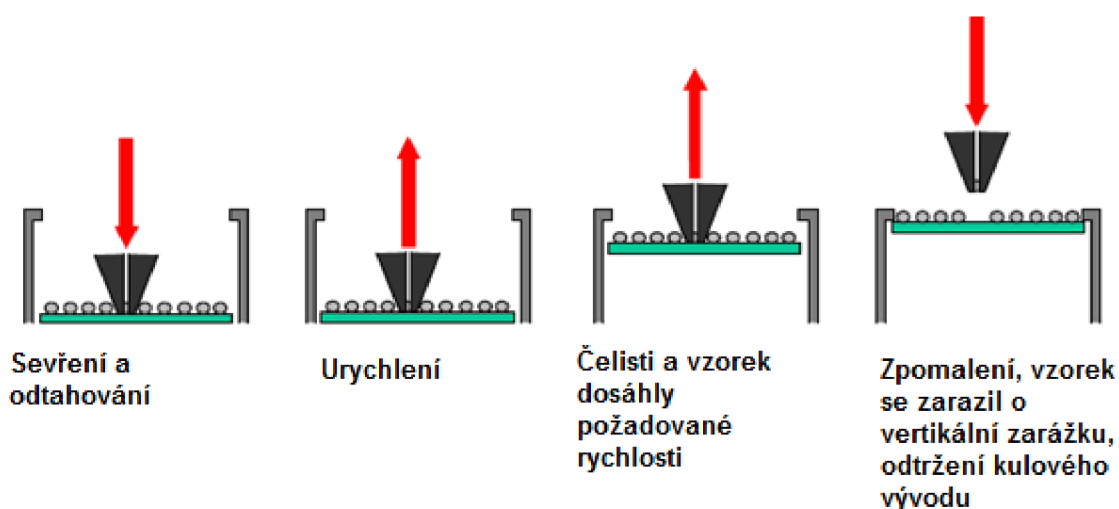
Pokud nelze dosáhnout vysoké rychlosti nutné ke zkoumání daného problému je nevhodné jej substituovat nízkorychlostním testem, který přenáší mylné výsledky.

- vysoko rychlostní test: 15 mm/s až 1000 mm/s (10 cm/s), možno i více dle potřeb
- nízko rychlostí test: 0,1 mm/s až 15mm/s

Rychlost testu volíme podle cíle našeho zájmu viz tabulka 1 výše.

Při hledání vhodné tahové rychlosti je důležité prvně vyzkoušet celý rozsah rychlostí (od 0,1 mm/s po více než 1000mm/s) pro definování optimální takové rychlost v návaznosti na jednotlivé případy selhání.

Pro dosažení vysoké rychlosti simulující šokové namáhání se používá speciální aparatura disponující zarážkou, přehledné schéma kroků je na obrázku 22 níže.

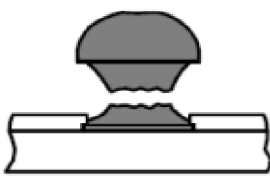
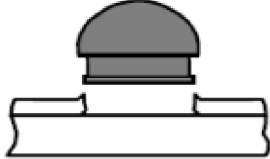

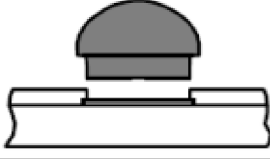
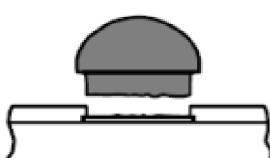



Obrázek 22: Znáznornění vysokorychlostního testu s využitím speciálního přípravku jako zarážky. [8]

Při tomto druhu vysokorychlostního testu dochází k akceleraci na požadovanou hodnotu tahové rychlosti. Při běžných podmínkách není možné dosáhnout takového gradientu rychlosti simulujícího šokové namáhání.

- Vyhodnocení probíhá prostřednictvím vhodného optického pozorovacího zařízení (např. mikroskop) se zvětšením alespoň stonásobným. Norma uvádí pět nejtypičtější případy selhání spoje po tahovém testu, viz obrázek 23 níže.
- Požadavky na údržbu čelistí testovací hlavičky a na vyhodnocení jejich poškození:
  - čištění od zbytků materiálu testovaných vývodu a jiných reziduí

- po každé sérii testů prohlédnutí a očištění pomocí kartáče, stlačeného vzduchu, speciální tenké kovové násady apod.
- při jakémkoliv viditelném poškození je nutné vyměnit čelisti resp. hlavici

Mód	Druh	Popis	Znázornění
1	Tažení, prasknutí	Prasknutí vývodu nad nepájivou maskou v objemu pájky vývodu	
2	Zvednutí padu	Zvednutí padu s vývodem, možnost zvednutí padu s utrženým základním materiálem	 nebo 
3	Zvednutí vývodu	Vývod se zvednul z padu, pad není celý pokrytý zbytkem pájky, povrchová úprava padu je vidět	
4	Zlomení na rozhraní	Prasklina je na rozhraní pájka/IMC nebo na rozhraní IMC/materiál padu. Prasklina na rozhraní se může rozšířit napříč celým padem nebo v určité části rozhraní, poté proniká do objemu vývodu	
5	Protažení vývodu	Vývod je protažený ale není prasklý, neplatné selhání - opakovat test s nahrazeným vývodem po vhodné úpravě	

Obrázek 23: Pět nejčastějších případů selhání kulového spoje při tahovém namáhání.[8]

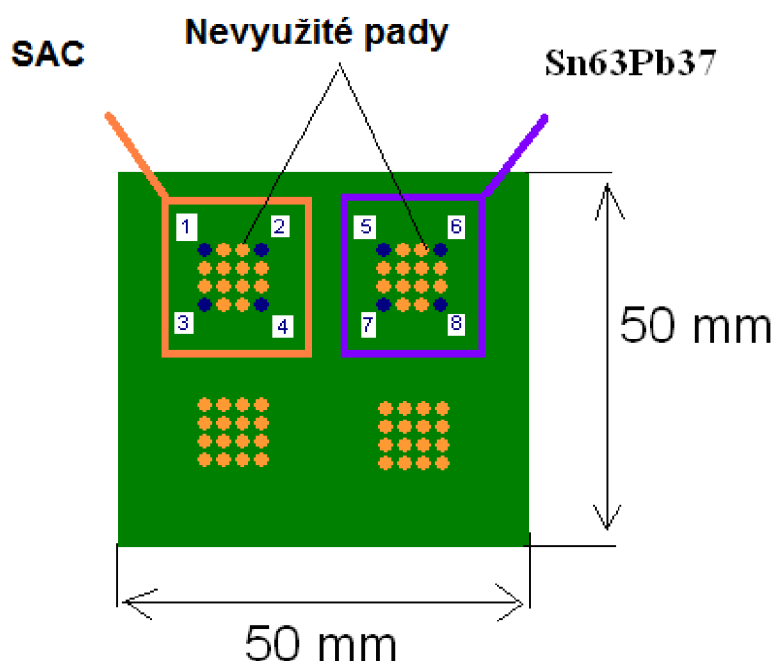
Pokud je pozorováno více různých případů selhání na jednom vývodu, je zaznamenám a vyhodnocen pouze dominantní druh selhání/poruch spoje. Vliv na selhání má také prodleva/doba mezi přetavením a dobou testu, tj. čas po který jsou vzorky uskladněny v specifických podmínkách (teplota, tlak, změny teploty). [8]

### 3 Testování pevnosti jednotlivých kulových vývodů stříhem na stroji DAGE PC 2400

Pro získání praktických zkušeností s testem stříhem, byla provedena série pokusů, které měly potvrdit všeobecně známé předpoklady v rozdílné mechanické pevnosti při stříhovém namáhání mezi olovnatými a bezolovnatými BGA vývody.

#### 3.1 Příprava vzorku

Pro test bylo použito osmi kuliček s průměrem 0,760 mm. Čtyři kuličky byly z olovnaté slitiny – Sn63Pb37 a další čtyři kuličky byly z bezolovnaté slitiny SAC305. Na obrázku 24 je znázorněno rozmístění vývodů.



Obrázek 24: Rozmístění BGA vývodů na vzorku.

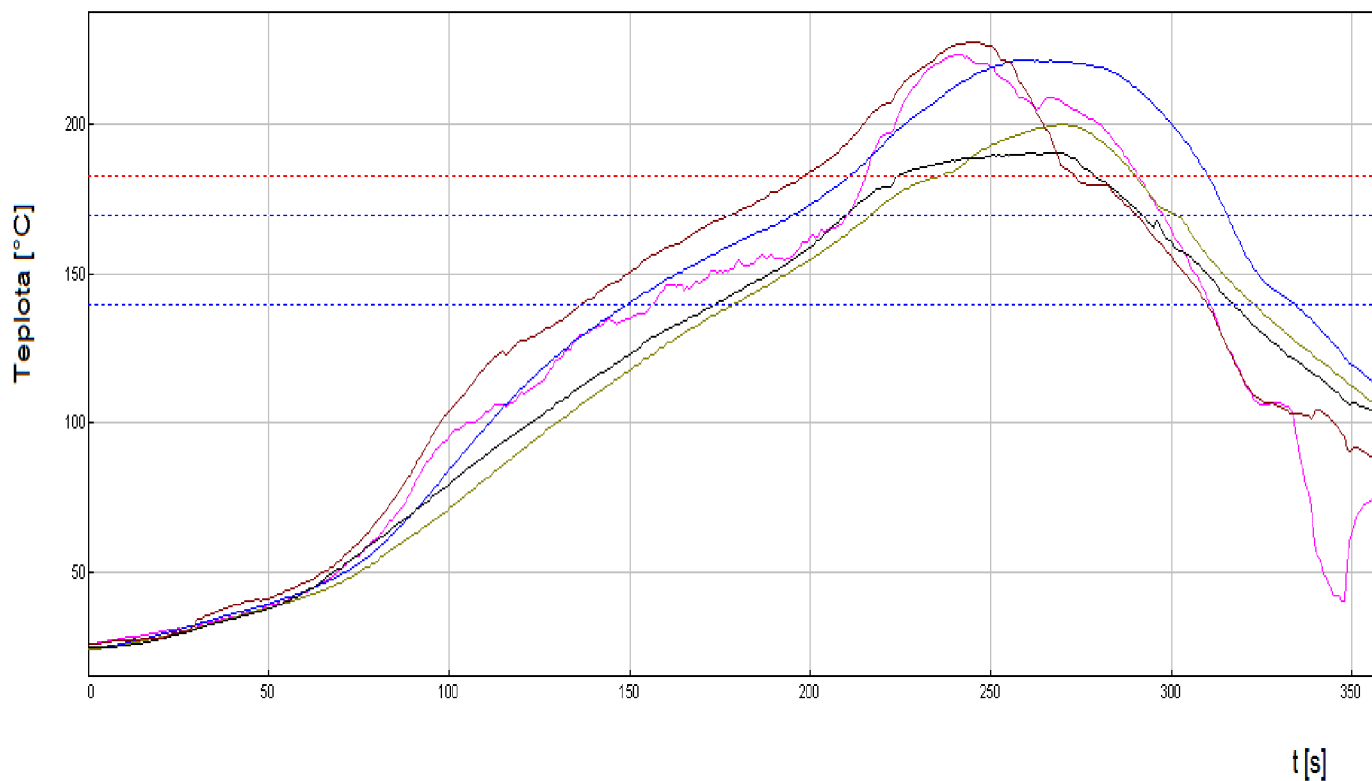
Před vlastním osazením kulovými vývody byl změřen průměr kulových pájecích plošek tzv. padů. Všechny plošky měly průměr 0,766 mm. Jako povrchová úprava pájecích ploch byl použit imersní (vylučovaný bez přítomnosti el. proudu) Sn – cín.

- Osazení plošek kulovými vývody proběhlo pomocí pinzety pod zvětšovací optickým přístrojem. Každá jednotlivá kulička byla nejprve namočena v tavidle na přírodní bázi (Rosin) značky KESTER označení TSF 6502.



- přetavení proběhlo v horkovzdušné peci vybavené IR zářiči. Teplotní profil byl zvolen teoreticky dostatečně vysoký i pro bezolovnatou slitinu viz obrázek 25.

- Maximální vrcholová teplota: 224 °C
- Doba přetavení: 6 minut tj. 360 sekund



Obrázek 25: Teplotní profil použitý při přetavení kulových vývodů ze slitin SAC a Sn63Pb3.

### 3.2 Vlastní test stříhem (Shear test)

Test stříhem byl prováděn na zařízení Dage PC 2400 viz obrázek 26, s nastavením následujících parametrů:

- Destruktivní test – dokud testovaný kulový vývod neutrhne
- Rychlost posuvu testovacího hrotu: 500  $\mu\text{m/s}$
- Výška ve které se nachází hrot při testu od nosného substrátu: 100  $\mu\text{m}$
- Rychlost posuvu upínacího stolečku: 310  $\mu\text{m/s}$
- Maximální síla která je vyvíjena na spoj: 15kg
- Vzdálenost kterou ujede hrot po utrnutí: 50  $\mu\text{m}$



Obrázek 26: Zařízení Dage PC 2400 které umožňuje nejen test stříhem ale také tzv. Tweezer pull test a Wire pull test.

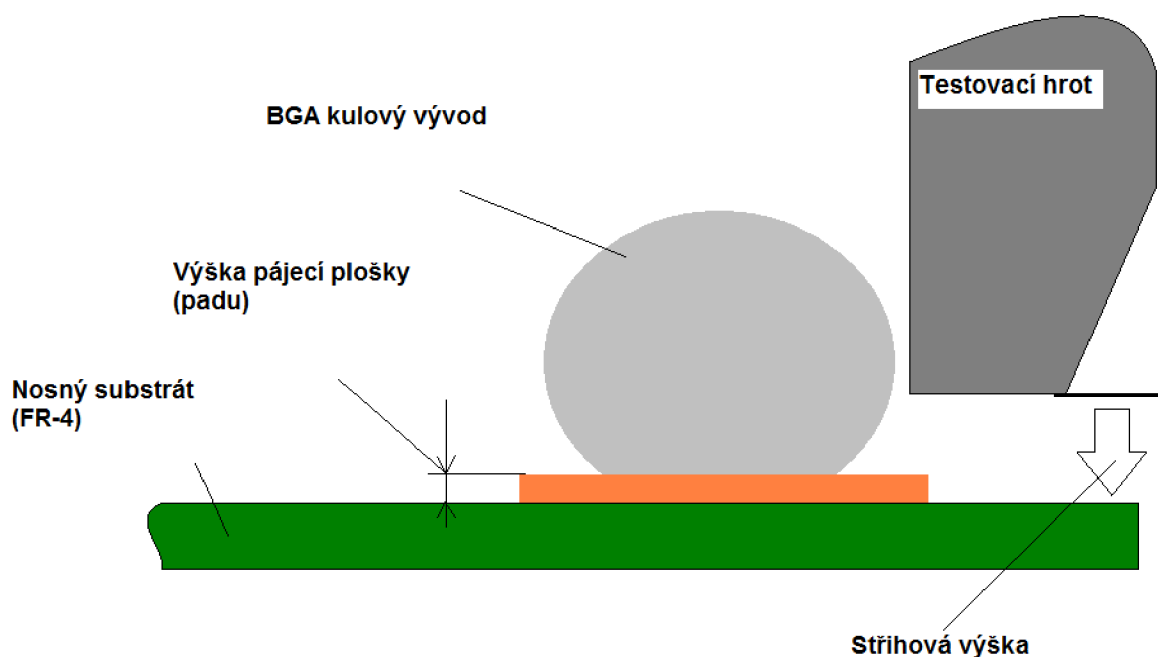
- Po upevnění vzorku do stolečku jsme provedly test stříhem přičemž jsme prvně testovaly čtyři olovnaté kulové vývody (Sn63Pb37) a posléze čtyři bezolovnaté kulové vývody (SAC305). Tyto změřené hodnoty byly zaneseny do tabulky 2 níže.

Tabulka 2: Naměřené hodnoty.

typ slitiny	číslo kulového vývodu	síla při které došlo k odtržení [kg]
Sn63Pb37	8	2,649
	7	2,617
	6	2,825
	5	2,554
SAC305	4	2,536
	3	2,351
	2	2,454
	1	2,462

### 3.3 Zhodnocení testu

Při stříhovém testování kulových vývodů byly jednotlivé kuličky přestřiženy ve své spodní čtvrtině tj. spoj mezi kulovým vývodem a pájecí ploškou vydržel více nežli kovové slitiny, z kterých byly vyrobeny kuličky, pouze jedna kulička se utrhla kompletně s pájecí ploškou. Pro měření s větší vypovídací hodnotou by bylo třeba nastavit výšku ve které se nachází hrot při testu od nosného substrátu na výšku pájecí plošky (padů) jak naznačuje obrázek 27.



Obrázek 27: Optimální umístění testovacího hrotu přesně na výšku pájecí plošky. Výšku plošky je možné změřit na vybraném vzorku pomocí mikrovýbrusu.

Naměřené hodnoty uvedené v tabulce 2, byly zprůměrnovány pro jednotlivé slitiny i celkově pro soubor všech testovaných spojů do tabulky 3 níže.

Tabulka 3: Zprůměrnované výsledné hodnoty.

	síla při které došlo k odtržení [kg]
průměr - Sn63Pb37	2,661
průměr - SAC	2,451
průměr u obou slitin	2,556

Z vypočtených hodnot v tabulce 3 jasně vyplývá závěr že síla nutná k odsunutí (přestříhnutí) kulového vývodu z olovnaté slitiny Sn63Pb37 je o 0,21 kg větší než u bezolvnaté slitiny. Kulové vývody z bezolvnaté slitiny SAC mají menší tvrdost a jsou náchylnější na

mechanické poškození. Průměrná síla nutná k přestřížení kulového vývodu o průměru 0,760 mm je 2,556 kg. Spoje mezi pájecí ploškou s povrchovou úpravou imersní cín (Sn) a kulovým vývodem vydržely vždy – nedošlo k jejich porušení. Problematika bude předmětem dalšího zkoumání.

## 4 Stříhové namáhání BGA pouzder – první etapa praktických zkoušek

Při tomto pokusu byl otestován soubor dvanácti BGA pouzder kde každé pouzdro disponovalo čtyřmi kulovými vývody. Pouzdra byla osazena celkem na třech DPS jak je vidět na obrázku 28 níže.

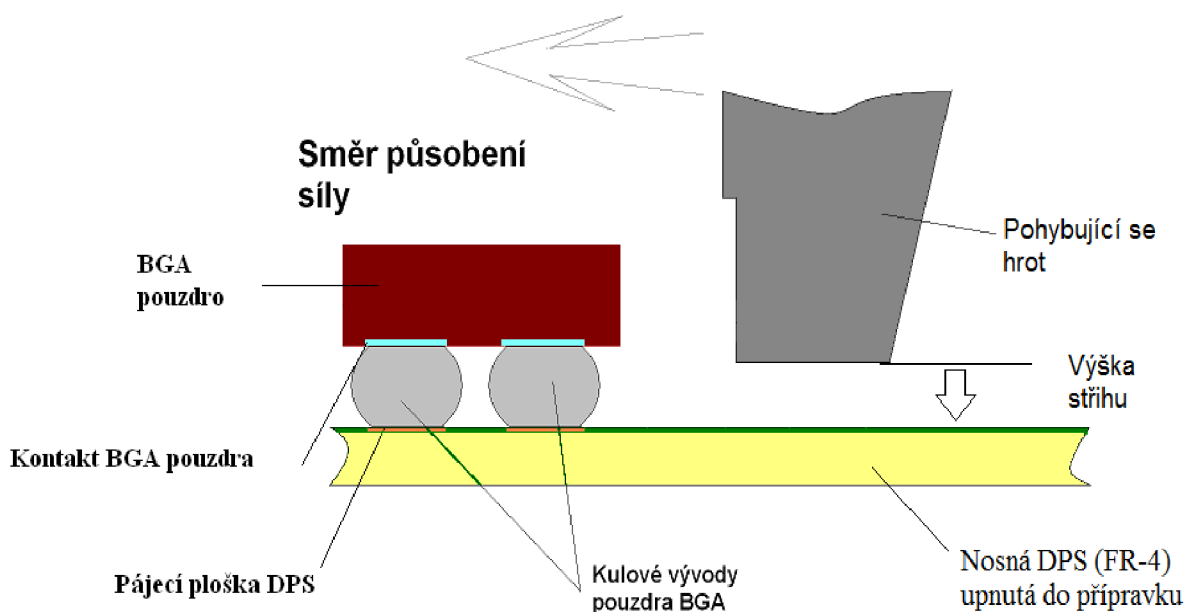


Obrázek 28: Dvanáct testovacích BGA pouzder na třech DPS.

Každé BGA pouzdro je tvořeno z materiálu FR-4 a připojeno k DPS (substrátu) čtyřmi kulovými vývody. Z bezolovnaté slitiny (SAC305) o průměru 0,760 mm. Pady na DPS nebyly před pájením vystaveny žádné povrchové úpravě.

## 4.1 Stříhové namáhání

Vlastní stříhové testování bylo provedeno opět na zařízení Dage PC 2400. Celá DPS byla upnuta do přípravku který ji držel za pomoci vakua v nehybné pozici. Pohybující se testovací hrot působil stříhovou silou na BGA pouzdro viz obrázek 29, dokud nedošlo ke změně vzájemné polohy testovaného BGA pouzdra a nosné DPS, tj. k selhání spojů.



Obrázek 29: Princip testování BGA pouzdra stříhem s kulovými vývody o průměru 0,760 mm.

## 4.2 Vlastní provedení pokusu

Při měření se testovaly **nestárnuté** vzorky které byly rozděleny do dvou kategorií, tyto kategorie byly rozděleny podle počtu kulových vývodů na BGA (FC) pouzdro. Základní DPS byla tvořena z materiálu FR-4, s zelenou nepájevou maskou a bez povrchové úpravy mědi tvořící pájecí a kontaktní plošky..

*Kategorie 1* tvořená BGA (Flip Chip) pouzdry 9 ks na jedné DPS, přičemž každé pouzdro bylo připevněno k nosné DPS 4 kulovými vývody (2x2) o průměru 0,760 mm. Celkem 36 kulových vývodů.

Kategorie 2 tvořená BGA (Flip Chip) pouzdry 12 ks na 3 DPS. Každé pouzdro bylo připevněno k nosné DPS 9 kulovými vývody (3x3) o průměru 0,760 mm. Celkem 108 kulových vývodů.

- Při vlastním stříhovém namáhání byly zaznamenávány síly v [kg] nutné k odtržení jednotlivých BGA (FC) pouzder.

#### 4.2.1 Stříhové namáhání sady vzorků kategorie 1

V tomto pokusu bylo odtrženo 9 ks BGA (FC) pouzder kde jedno pouzdro bylo připevněno k základní (nosné) DPS čtyřmi kulovými vývody (2 x 2) o průměru 0,760 mm. Opět byla na všechny testované BGA vyvíjena síla v z jednoho směru. Výsledné síly nutné k odtržení jednotlivých pouzder jsou zapsány v tabulce 4 níže.

Tabulka 4: Naměřené hodnoty síly nutné k odtržení BGA (FC).

		Číslo BGA (FC)								Průměrná síla pro DPS 1 v [kg]
DPS 1		1	2	3	5	6	7	8	9	
	Stříhová síla v [kg]	7,207	7,128	8,273	6,819	7,434	6,473	8,499	6,088	7,225
Průměrná stříhová síla nutná k odtržení jednoho BGA (FC) z testovaného souboru										7,225 kg

#### 4.2.2 Stříhové namáhání sady vzorků kategorie 2

Při pokusu bylo odtrženo 12 ks BGA (FC) pouzder (každé pouzdro 9 ks kulových vývodů, tj. 3x3 bezolovnaté kulové vývody) na které působil měřící hrot jedním definovaným směrem. Výsledné síly nutné k odtržení jednotlivých pouzder jsou zapsány v tabulce 5 níže.

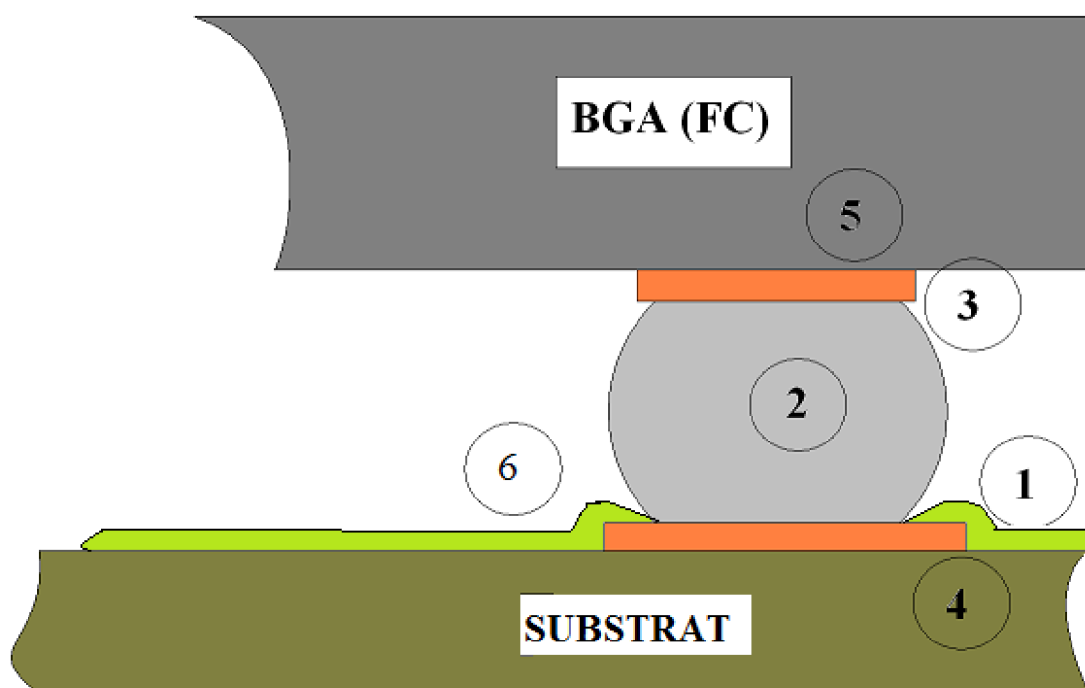
Tabulka 5: Naměřené hodnoty síly nutné k odtržení BGA (FC).

		Číslo BGA (FC)				Průměrná síla pro každou DPS v [kg]
DPS 1		1	2	3	4	
	Stříhová síla v [kg]	9,228	7,590	10,359	6,719	8,474
DPS 2		5	6	7	8	
	Stříhová síla v [kg]	8,128	7,132	9,783	4,326	7,342

DPS 3		9	10	11	12	
	Střihová síla v [kg]	5,357	13,895	10,395	10,326	9,993
Průměrná střihová síla nutná k odtržení jednoho BGA (FC) z testovaného souboru						8,603 kg

### 4.3 Vyhodnocení získaných výsledků

Výsledky získané při střihovém testu BGA (FC) pouzder byly vyhodnoceny podle místa selhání spoje viz obrázek 30 níže.



Obrázek 30: Na obrázku jsou znázorněna možná místa selhání kulového vývodu.

- Legenda týkající se obrázku 30 popisující jednotlivá sledovaná místa selhání tj. kde došlo k porušení pevnosti spoje.

- 1 Utržení kulového vývodu od pájecí plošky na DPS.
- 2 Prasknutí, rozlomení nebo rozpadnutí kulového vývodu ve svém objemu.
- 3 Utržení kulového vývodu od pájecí plošky na BGA (FC) pouzdru.
- 4 Utržení pájecí plošky od nosné DPS.

5 Utržení pájecí plošky od BGA (FC) pouzdra.

6 Špatně vyvolaná pájecí maska – malá kontaktní plocha pájecí plošky na DPS.

V tabulce 6 níže jsou uvedeny místa selhání pozorované na vzorcích první kategorie tj. BGA pouzdra s čtyřmi kulovými vývody. Dále pak tabulka 7 uvádí míst selhání kulových spojů u BGA pouzder s devíti kulovými vývody.

Tabulka 6: Místa na kterých došlo k selhání spoje ve vzorcích první kategorie.

	DPS 1								
Pouzdro č.	BGA 1	BGA 2	BGA 3	BGA 4	BGA 5	BGA 6	BGA 7	BGA 8	BGA 9
Místo selhání spoje	Počet kulových vývodů v [ks]								
1:	4	3	4	3	4	4	4	3	3
2:	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3:	-	1	-	1	-	-	-	1	1
4:	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5:	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Počet špatně vyvolaných kontaktních plošek [ks]								
6:	3	4	3	2	4	4	4	4	4

Tabulka 7: Místa na kterých došlo k selhání spoje ve vzorcích druhé kategorie.

	DPS 1				DPS 2				DPS 3			
Pouzdro č.	BGA 1	BGA 2	BGA 3	BGA 4	BGA 5	BGA 6	BGA 7	BGA 8	BGA 9	BGA 10	BGA 11	BGA 12
Místo selhání spoje	Počet kulových vývodů v [ks]				Počet kulových vývodů v [ks]				Počet kulových vývodů v [ks]			
1:	7	9	6	8	5	6	6	7	9	7	5	8
2:	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
3:	1	-	3	1	4	3	3	-	-	2	4	1
4:	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

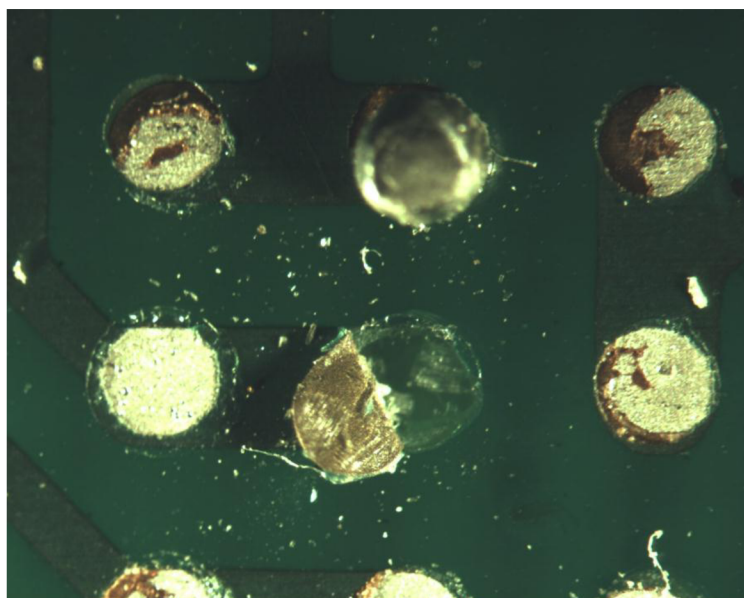


5:	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
	Počet spatně vyvolaných kontaktních plošek [ks]				Počet spatně vyvolaných kontaktních plošek [ks]				Počet spatně vyvolaných kontaktních plošek [ks]			
6:	5	2	3		4	4	4	6	7	4	4	6

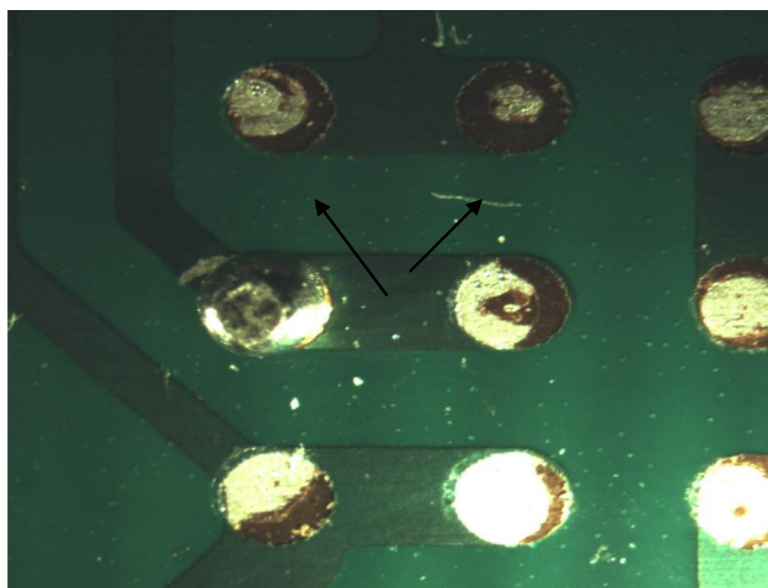
#### 4.3.1 Fotografie kulových vývodů po testu stříhem

Při vyhodnocování vzorků získaných výsledků byl použit optický mikroskop s až devadesátinásobným zvětšením jehož výstup byl zobrazen na PC.

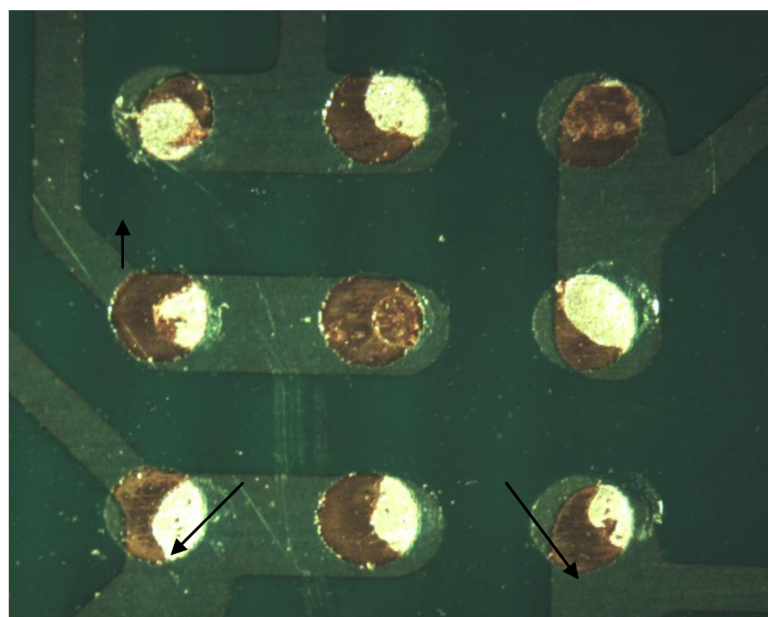
Byly pořizovány obrázky typických a jakýkoliv způsobem atypických deformací spojených s testováním nebo s výrobou testovacích vzorků. Na následujících obrázcích (obrázek 31, 32 a 33) jsou tyto deformace zdokumentovány.



Obrázek 31: Na obrázku je zobrazeno selháni (4:) tj. utržení měděného „padu“ od nosné DPS.



Obrázek 32: Obrázek znázorňuje špatně roztečení pájky (ukazují šipky) po pájecí plošce v porovnání s dobře zapájeným vývodem.



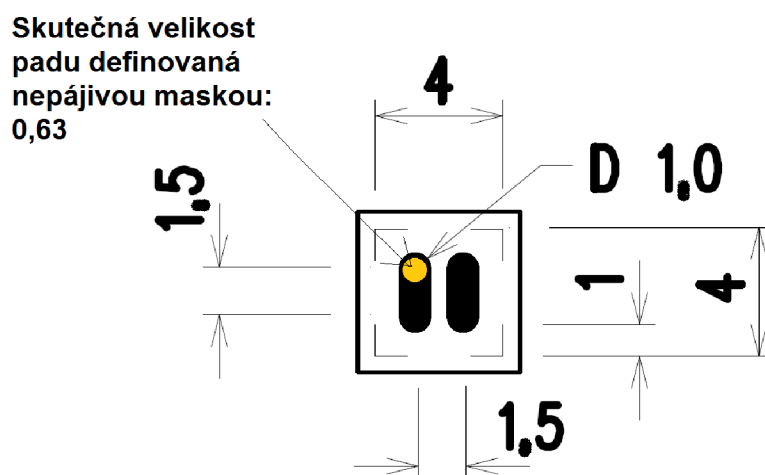
Obrázek 33: Znázorňuje špatně vyvolanou nepáživou masku a následné špatné roztečení pájky po pájecí plošce.

## 5 Návrh testovacího obrazce DPS – druhá etapa praktických zkoušek

Při vytvoření testovacího obrazce pro stříhové namáhání se počítalo s využitím vzorků na další měření a zkoumání nemechanického charakteru. Proto byly obrazce navrženy tak, aby bylo možné testovat proudovou hustotu po různých teplotních působeních, nebo naopak namáhat vývody konstantním proudem po definovanou dobu a následně měřit vodivosti resp. odpor kulových vývodů.

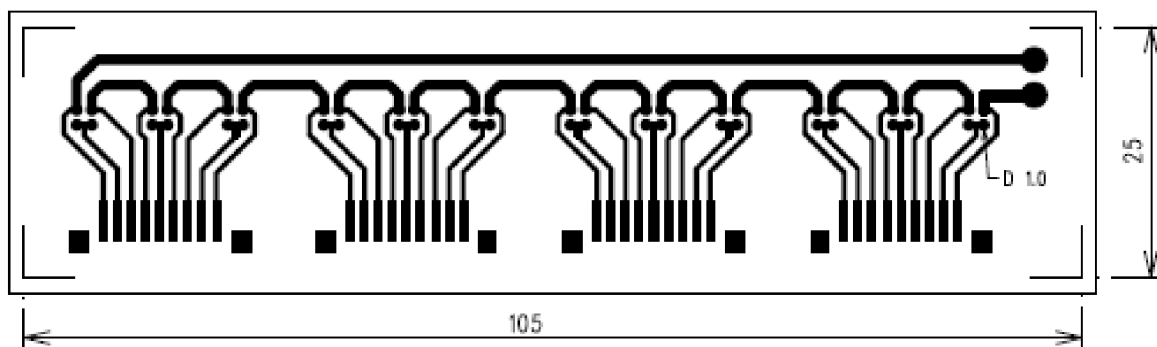
### 5.1 Testovací schéma DPS

Schéma DPS a BGA pouzdra určeného k testování je znázorněno na obrázcích 34 a 35 níže. Jako základní materiál DPS i pouzdra byl použit průmyslově hojně rozšířený substrát FR-4.



Obrázek 34: Rozvržení testovacího BGA pouzdra, velikosti definované v mm.

Průměr padu a kulového vývodu byl navržen tak, aby plnil podmínku v normě JESD22-B115 vzorec [3], tj. náš poměr je 1,2 [-]. Tabulka 8 níže podává stručný přehled základních parametrů. Velikost padu je přesně definována nepájivou maskou po předcházejících negativních zkušenostech s pady jejich průměr byl stejný jako průměr na předloze pro nepájivou masku.



Obrázek 35: Schéma testovacího substrátu (DPS), rozměry definované v mm.

Tabulka 8: Přehled technických parametrů testovací struktury.

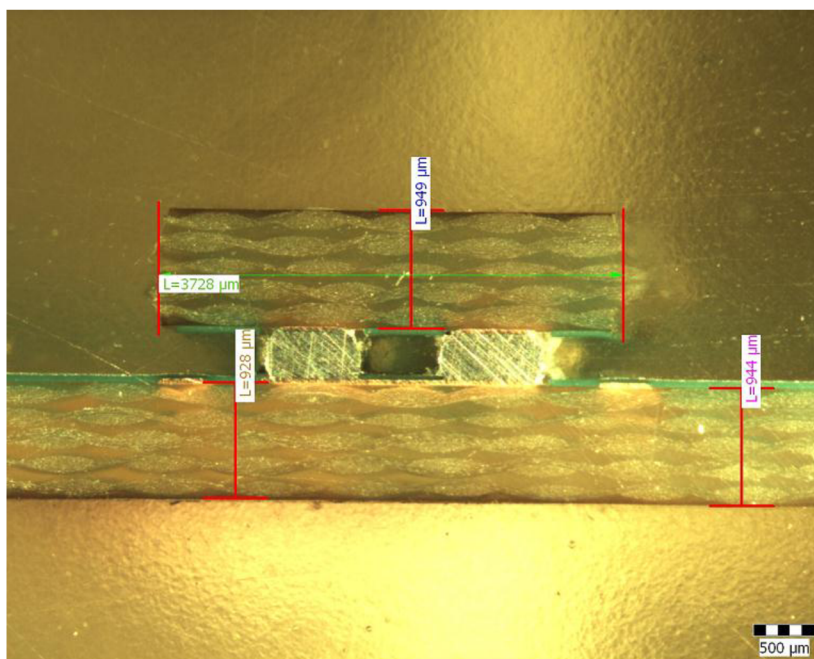
Název parametru	Rozměr	Jednotka	Poznámka
Průměr padu (DPS, BGA)	0,630	mm	
Kulový vývod (SAC305)	0,760	mm	Poměrné složení: 96,5 hmotnostních % Cínu (Sn) 3 hmotnostních % Stříbra (Ag) 0,5 hmotnostních % Mědi (Cu) Teplota tavení: 217-219°C
Základní materiál (DPS, BGA)	FR-4	–	Typické vlastnosti: povrchový izolační odpor: $4 \cdot 10^{12} \Omega$ vnitřní izolační odpor: $8 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ permitivita: 4,7 [–] ztrátový činitel: 0,019 [–] teplota skelného přechodu Tg: 130°C TCE xy/z: 13/60 ppm.K <sup>-1</sup>
Povrchové úpravy pájecích plošek	–	–	OSP – organický inhibitor oxidace mědi
Nepájivá maska	XV501T-4 (Barva – zelená) Odolnost: 30s při 288°C	–	Sítotisková teplem vytvrzovaná, dvousložková světlocitlivá nepájivá maska, schne odpařováním. Splňuje normy řady IPC SM840B.
Tloušťka mědi	35,0	μm	

## 6 Stanovení parametrů po přetavení

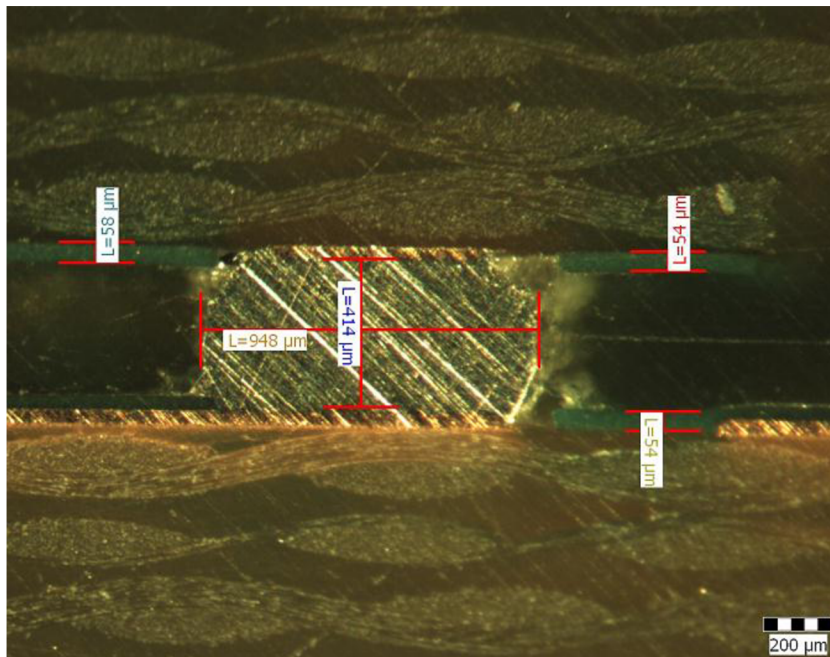
Pro provedení vlastní simulace v programu ANSYS – Workbench bylo zapotřebí zjistit skutečné parametry vzorků tj. jejich fyzické parametry po zapájení přetavením. Z těchto důvodů byl zhotoven výbrus vzorku, na jehož rozměrech bude sestaven trojrozměrný simulační model.

Po přetavení vzorku byl udělán mikro výbrus pro zjištění výšky kulových vývodů. Tento parametr je velmi důležitý pro realizaci co nejvěrohodnějšího modelu a následné simulace v prostředí ANSYS – Workbench.

- Postup měření výšky kulového vývodu po zapájení:
  - zalití vzorku dentakrylem ve formě, schnutí
  - broušení vzorku až do požadované úrovně viz obrázek 36.
  - měření výšky kulového vývodu pomocí mikroskopu spojeného s PC viz obrázek 37.



Obrázek 36: Výbrus vzorku v dentakrylu pro zjištění výšky vývodu a rozměrů.



Obrázek 37: Výška kulového vývodu stanovena ze série měření na 415  $\mu\text{m}$  a šířka na 948  $\mu\text{m}$ .

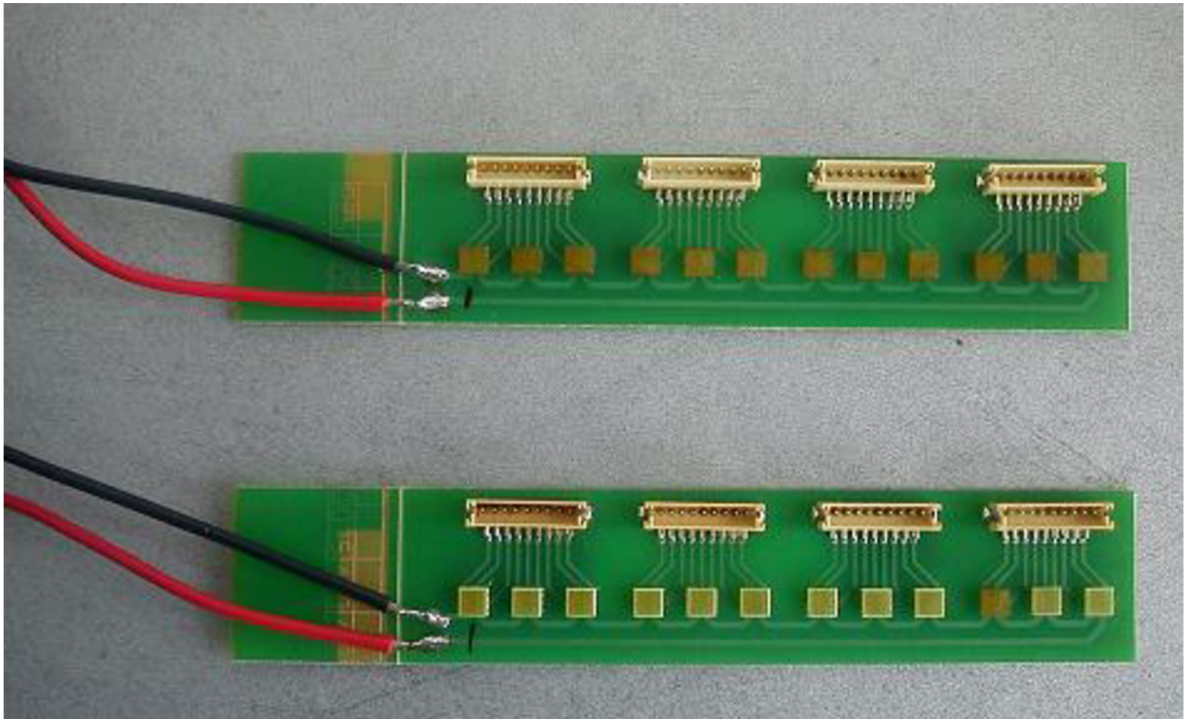
- Soupis geometrických parametrů:
  - výška vývodu po zapájení: 414  $\mu\text{m}$
  - šířka vývodu po zapájení: 948  $\mu\text{m}$
  - tloušťka mědi: 35  $\mu\text{m}$
  - tloušťka nepájivé zelené masky: 54  $\mu\text{m}$

## 7 Stříhové testování sady BGA pouzder

Pro test stříhem byly vybrány substráty s povrchovou úpravou OSP (pady BGA vývodů měly taktéž povrchovou úpravu OSP, každý jednotlivý substrát (DPS) obsahoval 12 ks BGA pouzder viz obrázek 38.

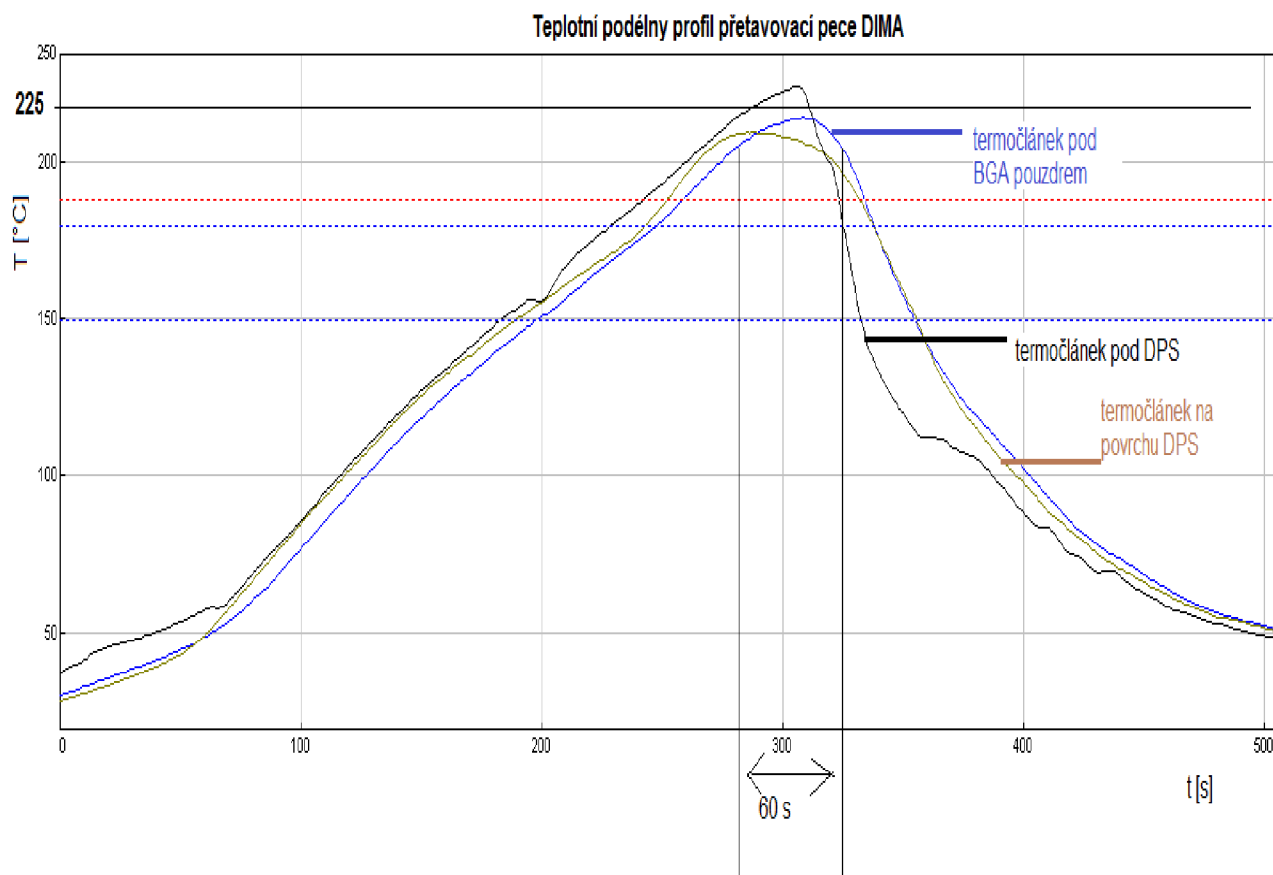
Pro náš pokus byly dva substráty s celkem 24ks BGA pouzder ponechány bez tepelného stárnutí resp. stárnutý za běžných skladovacích podmínek při stále teplotě kolem 25°C. Další dva substráty byly izotermálně stárnutý po dobu 1 hodiny při 150°C a další dva substráty byly opět izotermálně stárnutý po dobu 8 hodin při 150°C.

Takto upravené tři sady totožných vzorků, jejichž jediným rozdílem bylo různé izotermální stárnutí byly podrobeny stříhovému testu mechanické pevnosti na zařízení DAGE PC 2400.



Obrázek 38: *Dvě testovací DPS s 12 kusy BGA vývodů.*

Zapájení vzorků proběhlo v přetavovací peci DIMA po optimalizaci RTS profilu na pájku SAC305 kde optimální teplota pro přetavení je 217°C až 219 °C. Na obrázku 39 níže je námi nastavený teplotní profil přestavovací pece DIMA změřený pod BGA pouzdem u kulových vývodů, dále na DPS a na spodní straně DPS. Z profilu je patrné, že požadovaných teplot nutných ke vzniku kvalitního spoje bylo dosaženo a hodnoty námi změřené odpovídají procesnímu oknu pro bezolovnatou pájku SAC305.



Obrázek 39: Použitý přestavovací profil pro zapájení testovacích vzorků.

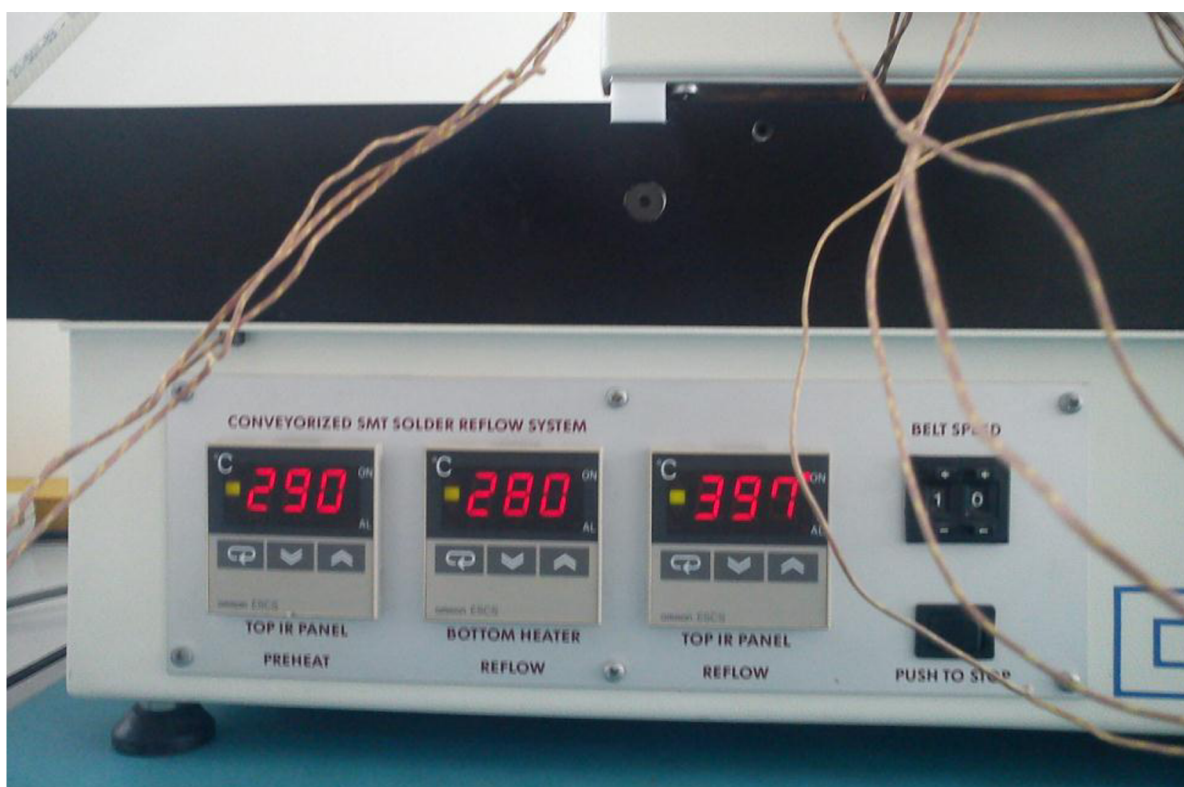
Z celkového počtu 72 kusů BGA pouzder se nepodařilo zapájet vlivem špatné manipulace 2 ks BGA pouzder, tedy celkový soubor pro vyhodnocení činí 70 ks BGA pouzder tj. 280 kulových vývodů z bezolovnaté pájky SAC305. Tudiž v námi testovaném souboru bylo 560 spojů/IMC rozhraní.

Při přetavení byly nastaveny teplotní parametry v jednotlivých částech přetavovací pece DIMA, tak jak to ukazuje obrázek 40 níže.

Nastavené parametry:

- horní IR zářič pro předehřev: 290 °C
- spodní vyhřívač: 280 °C
- horní IR zářič pro přetavení: 397 °C
- rychlost pohybu pásu: 10 dílů





Obrázek 40: Nastavení jednotlivých tepelných zdrojů přetavovací pece DIMA.

## 7.1 Výsledky stříhového testu na stroji DAGE 2400

Pro testování byl opět zvolen běžný nízko rychlostní stříh, nastavené parametry jsou uvedeny v tabulce 9 níže. Naměřené hodnoty stříhového zatížení, které vedlo k selhání spojů resp. BGA pouzder jsou uvedeny pro sady vzorků v tabulce 10 níže.

Tabulka 9: Parametry nastavené na zařízení DAGE 2400 při testování vzorků.

parametr	hodnota	jednotka
Stříhová rychlost	200	μm/s
Testovací výška	100	μm
Maximální zatížení	15	kg
Stroj byl nastaven na destruktivní test – vždy testované BGA pouzdro utrhnul		

Tabulka 10: Tabulky výsledných hodnot při stříhovém testu.

Číslo BGA pouzdra	Nestárnuté vzorky				Izotermálně stárnuté po dobu 1 hodiny				Izotermálně stárnuté po dobu 8 hodin			
	DPS 1		DPS 2		DPS 1		DPS 2		DPS 1		DPS 2	
	<i>síla</i> [Kg]	<i>p</i> [MPa]	<i>síla</i> [Kg]	<i>p</i> [MPa]	<i>síla</i> [Kg]	<i>p</i> [MPa]	<i>síla</i> [Kg]	<i>p</i> [MPa]	<i>síla</i> [Kg]	<i>p</i> [MPa]	<i>síla</i> [Kg]	<i>p</i> [MPa]
1.	5,30	14,76	4,69	13,07	5,48	15,27	4,67	13,01	4,10	11,42	3,97	11,05
2.	5,31	14,80	4,10	11,42	5,23	14,58	4,07	11,35	4,28	11,92	5,13	14,29
3.	5,44	15,16	5,12	14,26	4,59	12,80	4,40	12,27	–	–	4,78	13,31
4.	5,62	15,65	4,27	11,90	5,03	14,01	5,58	15,56	4,58	12,76	4,83	13,46
5.	5,87	16,36	5,31	14,79	4,71	13,13	4,94	13,75	5,35	14,91	4,76	13,27
6.	6,01	16,74	5,07	14,12	5,47	15,24	5,22	14,55	5,39	15,03	5,54	15,43
7.	5,53	15,41	4,60	12,81	4,86	13,55	4,30	11,98	5,29	14,73	4,60	12,82
8.	5,66	15,78	5,99	16,70	5,65	15,75	4,42	12,32	4,99	13,89	5,32	14,83
9.	5,87	16,37	5,29	14,73	5,23	14,58	5,49	15,29	5,14	14,31	5,12	14,28
10.	5,64	15,70	–	–	4,97	13,84	5,11	14,23	5,07	14,13	4,40	12,27
11.	5,63	15,68	5,32	14,82	4,68	13,05	4,54	12,66	4,97	13,84	5,32	14,82
12.	5,69	15,84	5,72	15,95	5,25	14,63	4,70	13,11	5,42	15,11	4,66	12,99
Ø	5,63	15,69	5,01	12,70	5,10	14,20	4,79	13,34	4,96	13,82	4,87	13,57

Pozn.:

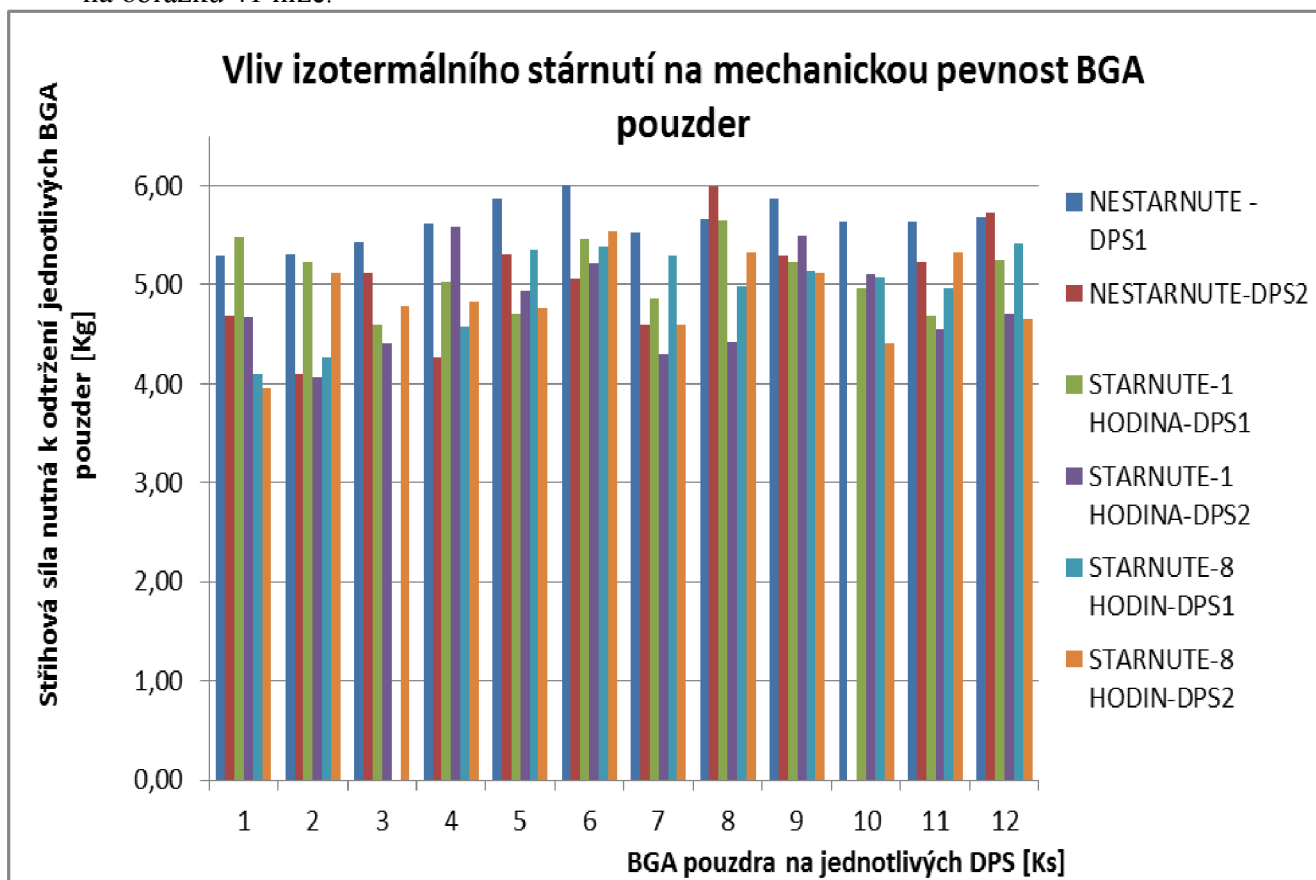
– ...nezměřeno z důvodu nezapájení BGA pouzdra

Příklad výpočtu talkové síly pro první řádek tabulky, vyjdeme ze vzorců [5] a [6]:

$$F = m \cdot g = 1,10 \cdot 9,81 = \underline{51,99 \text{ N}}$$

$$P = \frac{F}{S} = \frac{51,99}{3,52 \cdot 10^{-6}} = \underline{14,76 \text{ MPa}}$$

Naměřené výsledky byly pro porovnání různě izotermálně stárnutých vzorků shrnuty do grafu na obrázku 41 níže.

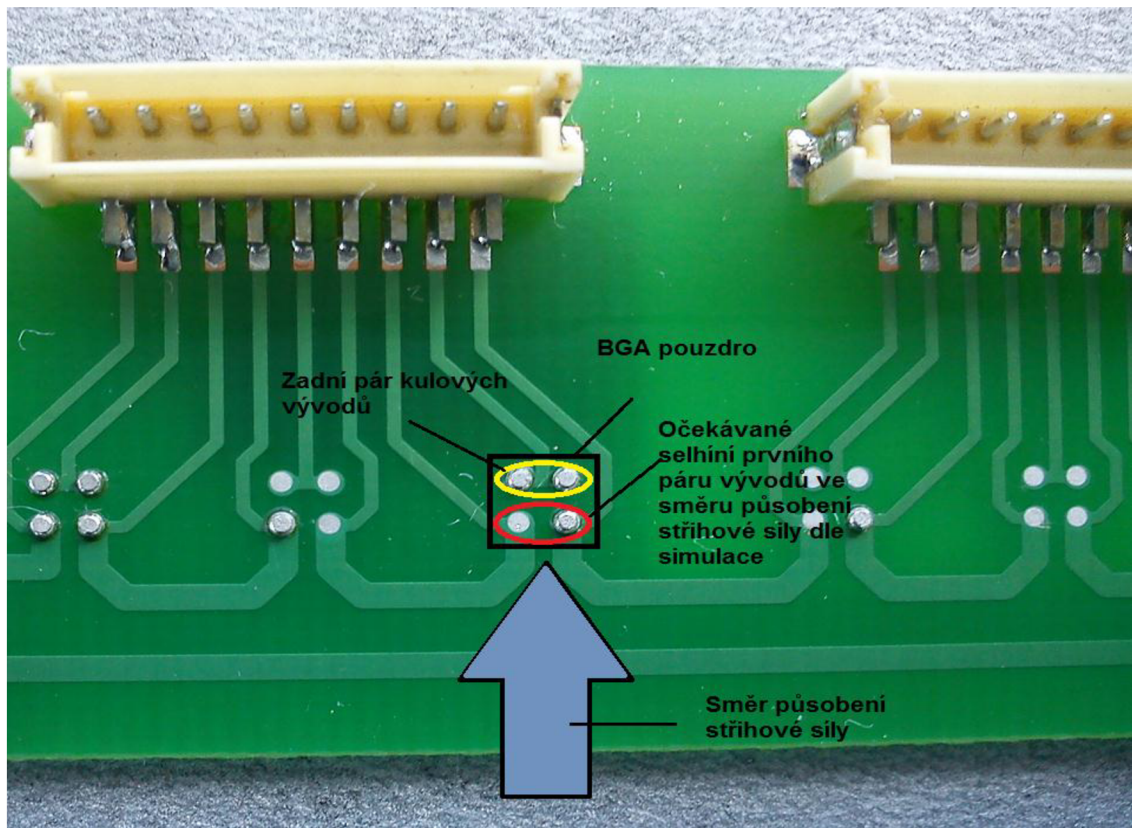


Obrázek 41: Znárodnění měnící se pevnosti BGA pouzder ve stříhu po teplotním stárnutí.

Z grafu na obrázku 41 výše je vidět, že rozdíly v izotermálním stárnutí nejsou nikterak výrazné, přesto je patrný jakýsi průměrný rozdíl asi 0,4 kg (viz. Tabulka 14 výše) mezi nestárnutými vzorky a mezi vzorky stárnutými 8 hodin. Pro jasnější rozdíly by bylo třeba dobu stárnutí prodloužit či zvýšit teplotu stárnutí vzorků

## 7.2 Vyhodnocení stříhového testu

Po stříhovém testu bylo provedeno optické zkoumání utržených BGA pouzder spolu s vyhodnocením typů jejich selhání. Při vyhodnocování byla uvažována rozdílná tloušťka IMC vrstev mezi kulovým vývodem a padem BGA pouzdra – prošlo dvěma teplotními cykly, tudíž vznikla širší IMC vrstva oproti tloušťce IMC vrstvy na rozhraní kulovým vývodem a padem nosného substrátu/DPS. Dále se vyhodnocovala korelace simulace s praktickým pokusem, kdy se zkoumal vliv vyššího stříhového napětí prvních dvou kulových vývodů ve směru působení stříhové síly oproti selhání vzdálenějšího páru vývodů, pro ilustraci obrázek 42 níže.



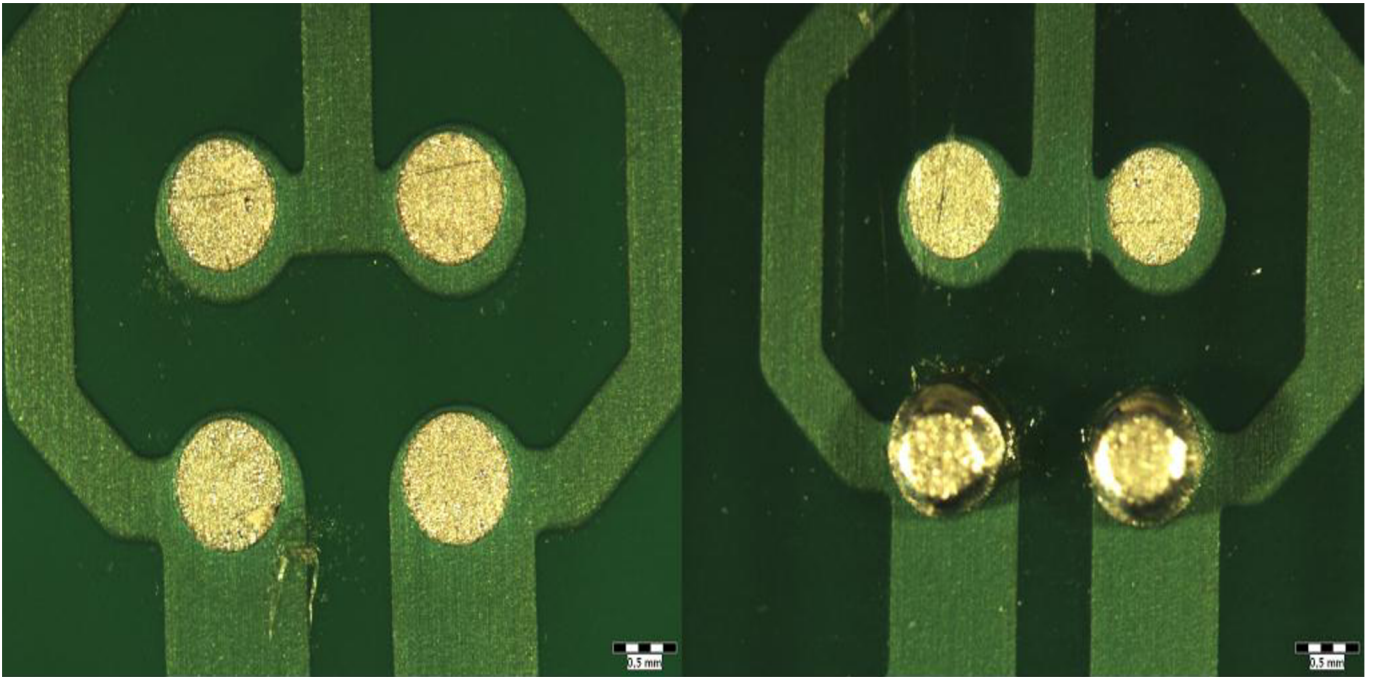
Obrázek 42: Posouzení simulačních prognostik vůči testu.

Na následujících obrázcích jsou detailní snímky selhaných kulových vývodů. U všech pouzder došlo k selhání v IMC vrstvách, nebyl zaznamenána případ delaminace padu od substrátu/DPS nebo od BGA pouzdra případně odtržení padu s kouskem podkladu, taktéž nebyl zaznamenán případ prasknutí kulového vývodu v objemu pájky.

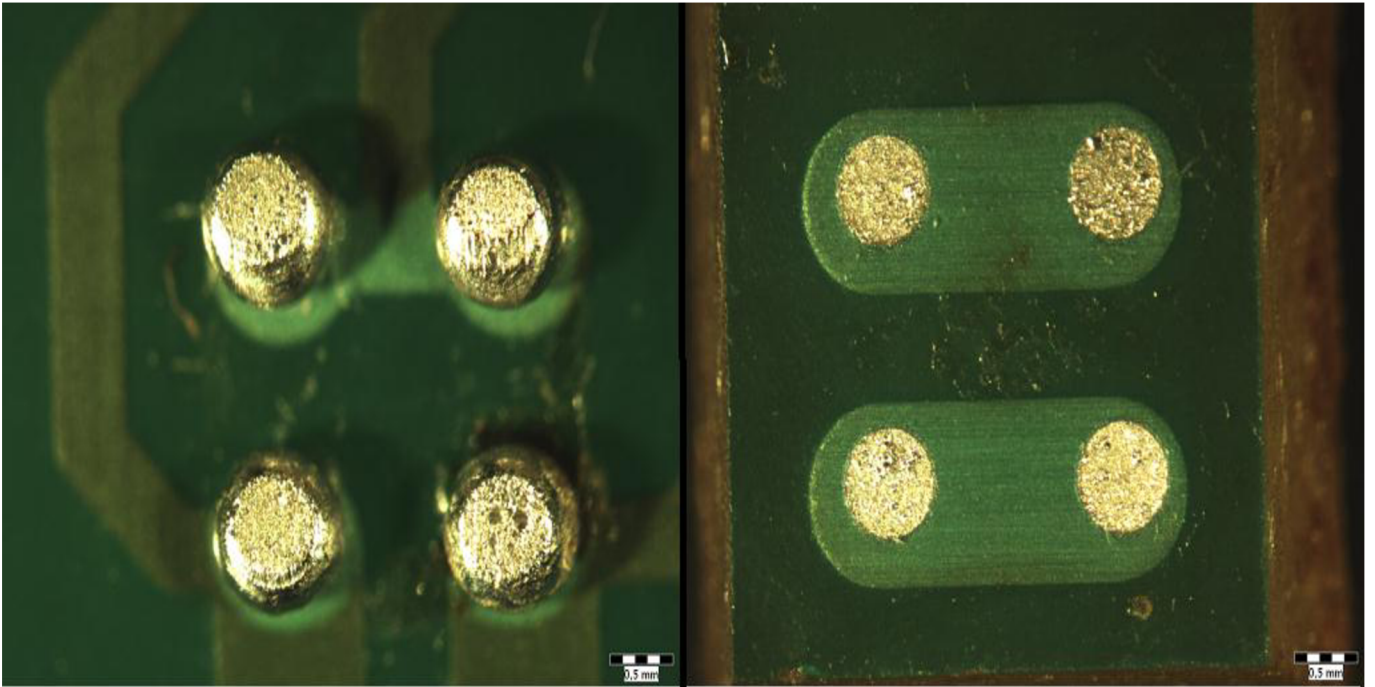
Při selhání v oblasti intermetalických vrstev se vyhodnocovala, která ze dvou IMC vrstev kulového vývodu selhala ve zkoumaném souboru vícekrát (zkoumán vliv větší tloušťky IMC u BGA vývodu). Dalším vyhodnocovaným parametrem byl vztah tepelného stárnutí jednotlivé IMC vrstvy.

Na obrázku 43 níže jsou vidět dobře zapájené a odtržené vývody ze základního substrátu/DPS.

Na obrázku 44 níže je vidět snímek vývodů odtržených od BGA pouzdra, vývody na pouzdru byly také dobře zapájený po celé ploše padu. V tabulce 11 níže jsou vyhodnoceny dva typy četnosti výskytů selhání IMC vrstev viz Obrázek 59. Tedy pokud došlo k selhání „IMC DPS“ tak se kulový vývod odtrhnul od substrátu/DPS a zůstal připevněn k BGA pouzdru. Naopak při „IMC BGA“ se kulový vývod odtrhnul od BGA pouzdra a zůstal připevněný k substrátu/DPS.



Obrázek 43: Vývody kvalitně zapájené po celé ploše padu.



Obrázek 44: Utržení BGA pouzdra od kulových vývodů které zůstaly pevně spojeny se substrátem/DPS.

Tabulka 11: *Vyhodnocení četnosti selhání.*

		Místo selhání	
		IMC DPS	IMC BGA
Nestárnuté vzorky	DPS 1	23	21
	DPS 2	28	20
	Σ	51	41
	poměr	1,2:1	
Vzorky stárnuté 1 hodinu	DPS 1	29	19
	DPS 2	23	25
	Σ	52	44
	poměr	1,2:1	
Vzorky stárnuté 8 hodin	DPS 1	17	31
	DPS 2	21	23
	Σ	38	54
	poměr	0,7:1	
Σ 280		141	139
poměr		1:1	

Pozn.: Hodnoty v tabulkách byly zaokrouhleny na jedno desetinné místo podle matematických pravidel.

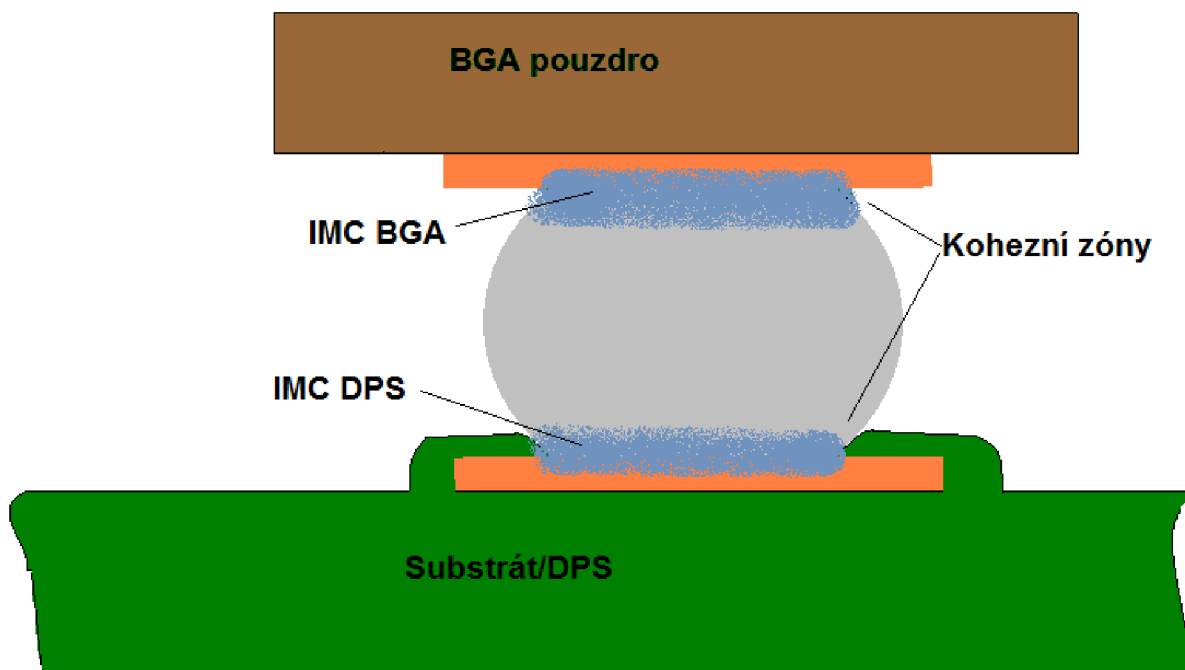
Celkem ze souboru 280 kusů bezolovnatých kulových vývodů selhalo 141 kusů na IMC rozhraní kulový vývod substrátu/DPS a 139 kulových vývodů na tlustší vrstvě IMC rozhraní kulový vývod/pad BGA pouzdra. Tento poměr je prakticky totožný.

Z hlediska různé doby izotermálního stárnutí se ukázala lehká převaha selhání na IMC rozhraní s Substrátem/DPS pro nestárnuté a 1 hodinu stárnuté vzorky. Při izotermálním stárnutí po dobu 8 hodin se tento poměr výrazně obrátil, tato změna byla zapříčiněna již projevující se větší tloušťkou křehké IMC vrstvy na rozhraní s BGA pouzdrem.

Do tabulky 12 níže byl uveden pro názornost měnící se poměr obou typů selhání IMC vrstvy v závislosti na době stárnutí.

Tabulka 12: *Typ selhání v závislosti na době izotermálního stárnutí.*

	Nestárnuté vzorky	Vzorky stárnuté 1 hodinu	Vzorky stárnuté 8 hodin	poměr
IMC DPS	51	52	38	1:1:0,7
IMC BGA	41	44	54	1:1:1,3



Obrázek 45: Vyhodnocení selhání spoje.

Při vyhodnocení stříhových zkoušek byla také zkoumána shoda predikce simulací a skutečně naměřených výsledků z pohledu topologie vývodů. Dle výsledků simulací v kapitolách 8 a 9 níže bylo předpovězeno, že největší pravděpodobnost selhání mají první dva kulové vývody na rozhraní IMC DPS viz obrázky 42 a 45. Dle této úvahy byla sestavena tabulka 13 zjištěných výskytů, tato tabulka rozlišuje a porovnává dva stavy:

- Typ 1 – selhání prvního páru vývodů ve směru stříh spolu se zachováním druhého páru vývodu ve směru stříhu z pohledu IMC DPS, viz obrázky 42 a 45.
- Typ 2 – selhání druhého páru vývodů ve směru stříh spolu se zachováním prvního páru vývodu ve směru stříhu z pohledu IMC DPS, viz obrázky 42 a 45.

Tabulka 13:

	Nestárnuté vzorky		Vzorky stárnuté 1 hodinu		Vzorky stárnuté 8 hodin		$\Sigma$	poměr
	DPS 1	DPS 2	DPS 1	DPS 2	DPS 1	DPS 2		
Typ 1	0	0	0	0	0	0	0 : 1	
Typ 2	7	2	5	4	4	4		

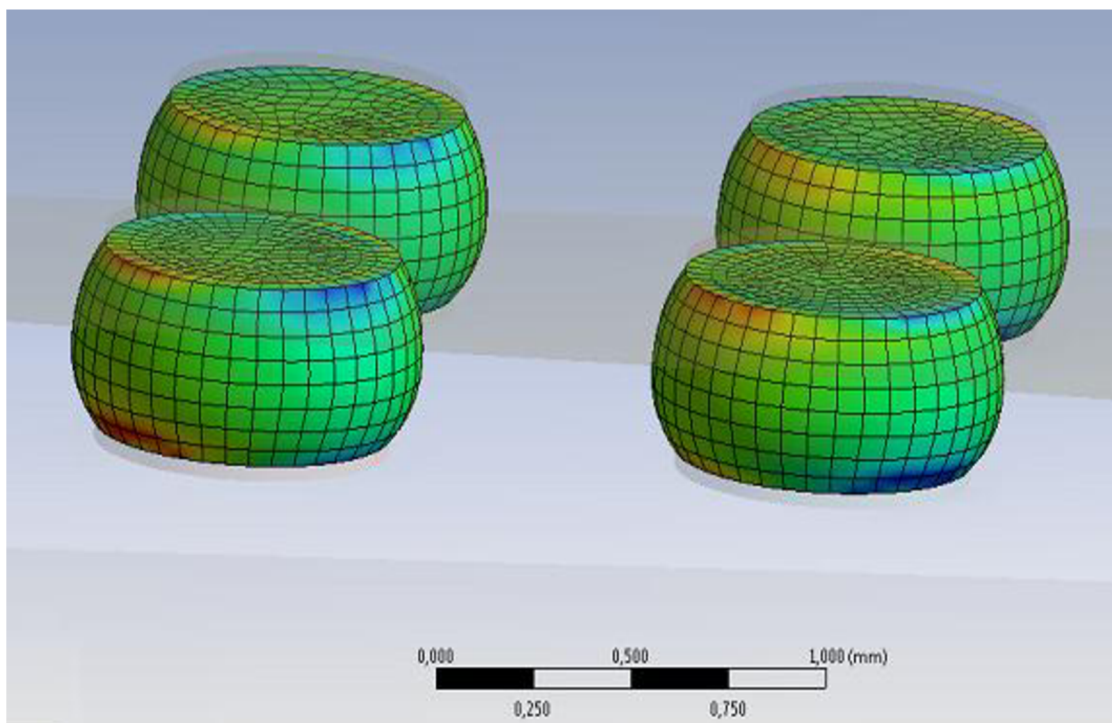
Pozn.: Při zkoumání byly brány v úvahu pouze dva výše uvedené typy, ostatní kombinace selhání nebyly v tomto vyhodnocení zohledněny.

Z výsledků uvedených v tabulce 13 výše je jasné, že předpovědi dle simulací se nepotvrdily a že docházelo k přesně opačnému jevu.

## 8 Simulace v prostředí ANSYS Workbench

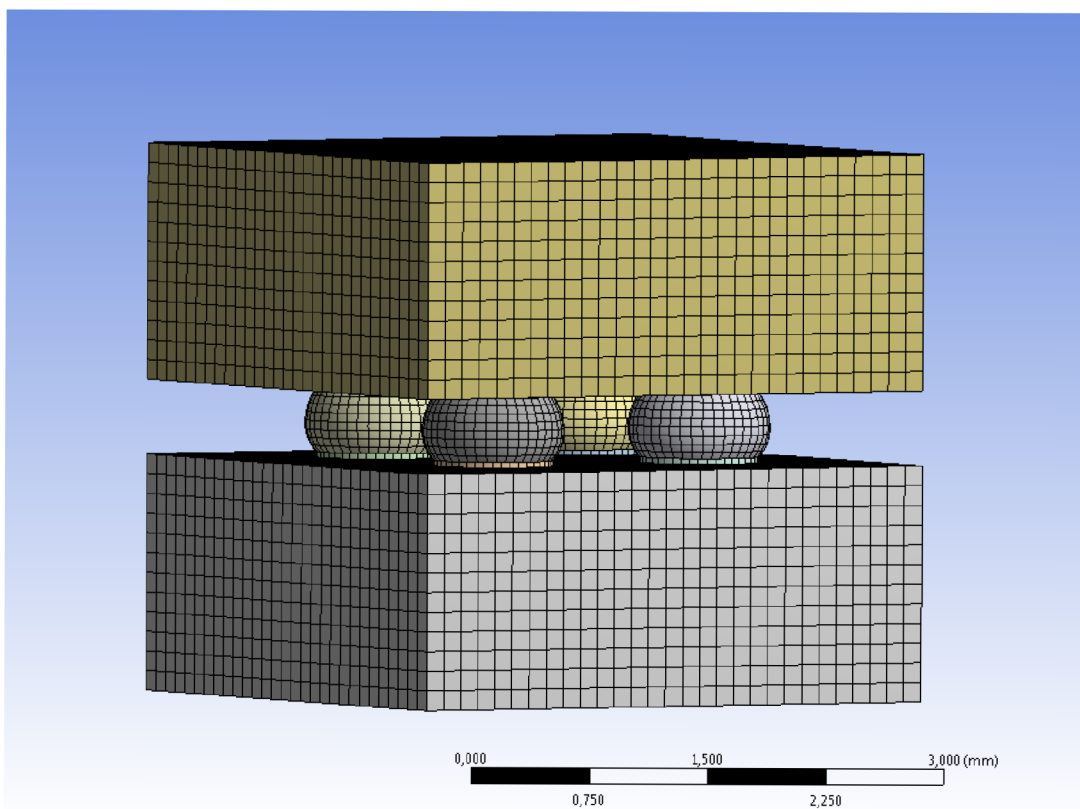
Tato simulace má za úkol zkoumat shodu výsledků získaných na základě provedené simulace a má sloužit jako srovnávací bod s výsledky, kterých bylo dosaženo praktickým měřením. Jako nejvhodnější ze simulačních programů byla zvolena platforma ANSYS Workbench ver. 12.1 jako všeobecně rozšířený a respektovaný profesionální software pro řešení problémů z oblasti mechaniky, elektromagnetismu, tepla, akustiky a jejich kombinací v 2D a 3D zobrazení.

ANSYS Workbench pracuje na principu dělení objemu simulovaného objektu na určité konečné množství čtverců – krychliček tzv. mesh viz obrázky 46 a 47 níže. Tyto krychličky představují základní simulační elementy tato metoda se nazývá Metoda Konečných Prvků (MKP) v anglickém originále Finite Element Method (FEM). Tato metoda vznikla z potřeby řešení úloh statické mechaniky, princip metody spočívá v sestavení parciální diferenciální rovnice pro každý dílčí element (rovnice musí být sestavena tak, aby případné chyby ve vstupních datech se nekumulovaly a nevedly k scestnému výsledku), tyto rovnice jsou vyřešeny na základě vstupních dat a komplexní výsledek je průměrem ze všech elementárních prvků tvořících objem simulovaného objektu. [12]



Obrázek 46: *Konečný počet elementů reprezentující objem vývodu.*





Obrázek 47: Rozdělení celého modelu metodou konečných prvků.

Pro počty čtverců (krychliček) platí, že vyšší počet elementů (krychliček) podává přesnější (kvalitnější) výsledky, ale také delší dobu potřebnou pro výpočet. Velmi hustá síť může neúměrně prodloužit výpočet až na několik hodin s tím, že výsledky se budou nepatrně lišit od výsledků získaných během pár minut při nižším počtu čtverců. Proto je vhodné volit rozumný kompromis mezi požadovanou přesností výpočtu a dobou výpočtu.

Celková doba výpočtu záleží také na kvalitě výpočetního hardwaru.

## 8.1 Vytvoření grafického modelu – vstupní data

Parametry zaznamenané na obrázcích 36 a 37 získané výbrusem vzorku posloužily jako podklady pro tvorbu modelu. Jednotlivé hodnoty parametrů použitých materiálů nutných pro simulaci (známé jako Engineering data) byly zaznamenané do tabulky 14 níže.

Data, které byly vloženy do programu ANSYS Workbench byly následně vyexportovány na školní server kde jsou dostupné pod odkazem [13].

Tabulka 14: Důležité materiálové konstanty a parametry zadané při sestavování simulace.

	Materiálové parametry nutné pro simulaci mechanického namáhání			
	Parametr:	Popis:	Hodnota:	Jednotka:
FR – 4* (materiál substituující pouzdro a DPS substrát)	<i>Youngův modul pružnosti</i> [Pa]	směr X	21000	MPa
		směr Y	7720	MPa
		směr Z	21000	MPa
	<i>Poissonova konstanta</i> [-]	XY	0,39	–
		YZ	0,39	–
		XZ	0,18	–
	<i>Modul pružnosti ve smyku</i> [Pa]	XY	3114	MPa
		YZ	3114	MPa
		XZ	8898	MPa
	<i>TCE</i> [K <sup>-1</sup> ]	směr X	0,000018	°C <sup>-1</sup>
		směr Y	0,000018	°C <sup>-1</sup>
směr Z		0,000073	°C <sup>-1</sup>	
<i>Tepelná vodivost</i> [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	–	0,00049	W.mm <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	
<i>Měrné teplo</i> [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	–	1260000	mJ.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	
Cu** (materiál padu bez PÚ)	<i>TCE</i> [K <sup>-1</sup> ]	–	0,000017	°C <sup>-1</sup>
	<i>Tepelná vodivost</i> [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	–	0,401	W.mm <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>
	<i>Měrné teplo</i> [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	–	385000	mJ.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>
	<i>Youngův modul pružnosti</i> [Pa]	–	128700	MPa
	<i>Poissonova konstanta</i> [-]	–	0,34	–
	<i>Modul pružnosti ve smyku</i> [Pa]	–	48022	MPa
	<i>Modul objemové pružnosti</i> [Pa]	–	134060	MPa
SAC305** (bezolovnatá pájka)	<i>TCE</i> [K <sup>-1</sup> ]	–	0,000026	°C <sup>-1</sup>
	<i>Tepelná vodivost</i> [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	–	0,0587	W.mm <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>
	<i>Měrné teplo</i> [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	–	232000	mJ.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>
	<i>Youngův modul pružnosti</i> [Pa]	–	52600	MPa
	<i>Poissonova konstanta</i> [-]	–	0,35	–

	<i>Modul pružnosti ve smyku [Pa]</i>	–	19481	MPa
	<i>Modul objemové pružnosti [Pa]</i>	–	58444	MPa
Nepájivá maska** (zelená)	<i>TCE [K<sup>-1</sup>]</i>	–	0,000029	°C <sup>-1</sup>
	<i>Youngův modul pružnosti [Pa]</i>	–	8000	MPa
	<i>Poissonova konstanta [-]</i>	–	0,4	–
	<i>Modul pružnosti ve smyku [Pa]</i>	–	2857,1	MPa
	<i>Modul objemové pružnosti [Pa]</i>	–	13333	MPa

Vysvětlivky:

\*\* – materiál je Izotropní, tedy jeho mechanické a teplotní vlastnosti jsou ve všech rovinných směrech totožné.

\* – materiál je Ortotropní, tedy všechny jeho mechanické a teplotní vlastnosti jsou v každých dvou navzájem kolmých směrech stejné, jde o speciální případ Anizotropie.

Abychom mohli definovat průběh působení tlakovou silou pro ANSYS Workbench co nejdříve je nutné získat údaje průběhu zatížení přímo z pokusu na testovacím vzorku. Obslužný software pro zařízení DAGE 2400 udává zatížení působící na testovací vzorek pomocí testovacího hrotu v [Kg]. Takto získané hodnoty získané měřením byly přepočteny na tlakovou sílu v [Pa].

Vlastní měření probíhalo tak, že se nastavila rychlost stříhu v našem případě nízkorychlostní stříhový test s rychlostí hrotu 50 μm/s tj. 0,05 mm/s. Takto malá rychlost bylo zvolena z důvodu co nejpřesnějšího odečtu hodnot zatížení každé 3s tj. Δt = 3s. Tyto získané hodnoty byly zaznamenány do Tabulky 10 níže. Hodnotu tlakové síly jsme určily podle následujícího přepočtu viz vzorec [5] a [6].

$$F = m \cdot g [N] \quad (5)$$

$$P = \frac{F}{S} [Pa] \quad (6)$$

Za  $m$  byla dosazena hmotnost naměřená na zařízení DAGE 2400 (viz tabulka 15) a tíhové zrychlení  $g$  bylo určeno pro naše zeměpisné podmínky  $g = 9,809 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

Plocha BGA na kterou síla hrotu působí, byla vypočtena podle parametrů z Obrázku 36, jelikož šířka hrotu je 5,7 mm a šířka BGA pouzdra je 3,7 mm tlačí hrot na celou plochu strany pouzdra. Tedy plocha, na kterou působí tlaková síla je

$$S = 0,0037 \cdot 0,00095 = \underline{\underline{3,52 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}}$$

Tabulka 15: Údaje naměřené při trhání zkušebního vzorku na zařízení DAGE 2400.

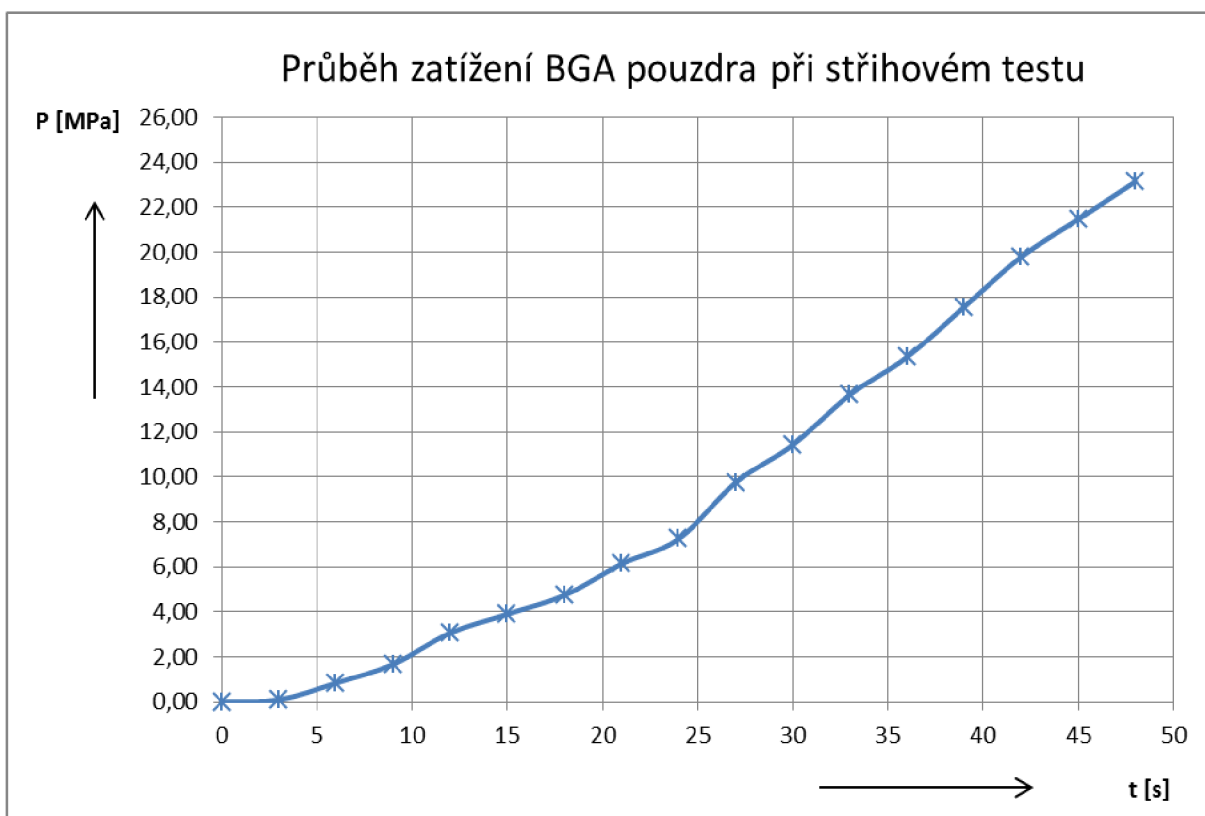
síla [Kg]	čas [s], $\Delta t = 3$ s	$F$ [N]	$p$ [MPa]
0,00	0	0,00	0,00
0,03	3	0,29	0,08
0,30	6	2,94	0,84
0,60	9	5,89	1,67
1,10	12	10,79	3,07
1,40	15	13,73	3,90
1,70	18	16,68	4,74
2,20	21	21,58	6,13
2,60	24	25,51	7,25
3,50	27	34,33	9,75
4,10	30	40,22	11,43
4,90	33	48,07	13,66
5,50	36	53,95	15,33
6,30	39	61,80	17,56
7,10	42	69,65	19,79
7,70	45	75,54	21,46
8,30	48	81,42	23,13

Příklad výpočtu pro jeden řádek tabulky:

$$F = m \cdot g = 1,10 \cdot 9,81 = \underline{10,79 \text{ N}}$$

$$P = \frac{F}{S} = \frac{10,79}{3,52 \cdot 10^{-6}} = \underline{3,07 \text{ MPa}}$$

Hodnoty získané v měření byly zaznamenány do grafu na obrázku 48, kde jsou vidět přepočtené hodnoty udávané při stříhovém testu BGA pouzdra na stroji DAGE 2400. Tyto hodnoty byly přeneseny do modelu stříhového namáhání v programu ANSYS Workbench, aby co nejvěrohodněji nasimulovaly zatížení při nízkorychlostním stříhovém testu.



Obrázek 48: Vynesené hodnoty z průběhu zatížení BGA pouzdra při testu stříhem.

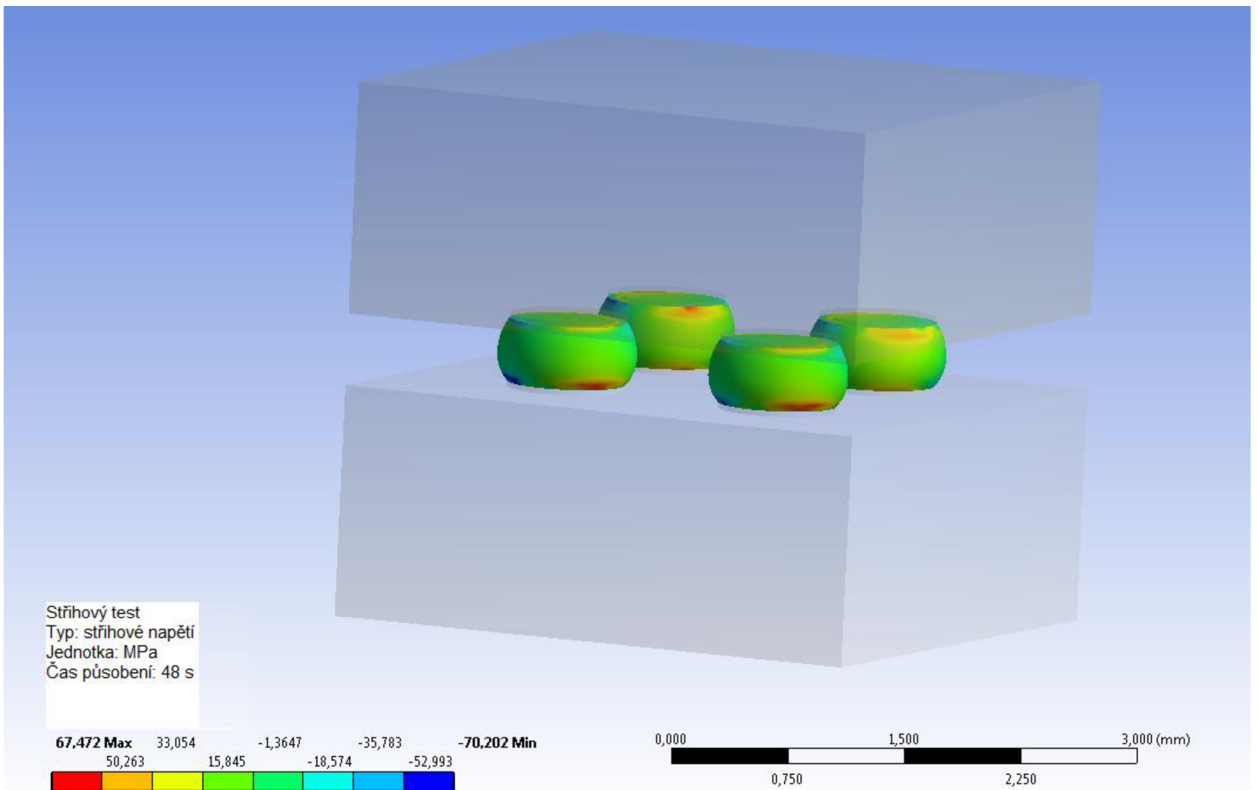
## 8.2 Získané výsledky

Po zadání vstupních dat viz tabulka 14 a odkaz [13] do programu ANSYS Workbench se provedla řada simulací. Tyto simulace měly ukázat ve kterých místech při stříhovém testu dochází k největšímu namáhání a kde dochází k největší deformaci, tudíž oblasti kde je největší pravděpodobnost selhání spoje.

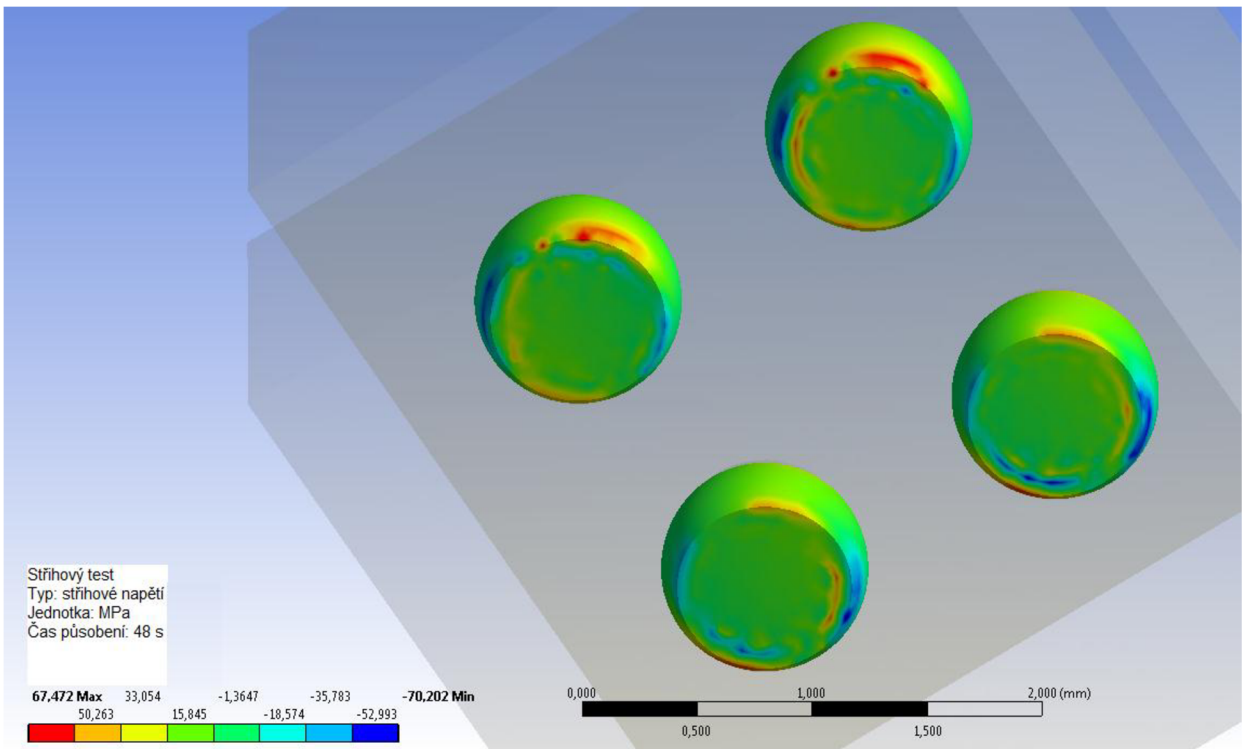
Vyhodnocovaly se dva základní aspekty při stříhovém namáhání:

- Shear stress – stříhové napětí, jednotka [Pa]. Udává jaké napětí působí v daných oblastech.
- Elastic strain – pružná deformace, dochází k nevratné změně polohy atomů materiálu v důsledku působení síly. Deformace vznikající v bezolovnatém kulovém vývodu se jeví jako prakticky nevratná. Hodnota deformace je vztahována vůči původnímu stavu tedy před změnou vzniklou působením tlaku a udává prodloužení připadající na jednotku délky tělesa. Většinou v procentech nebo bezrozměrně.

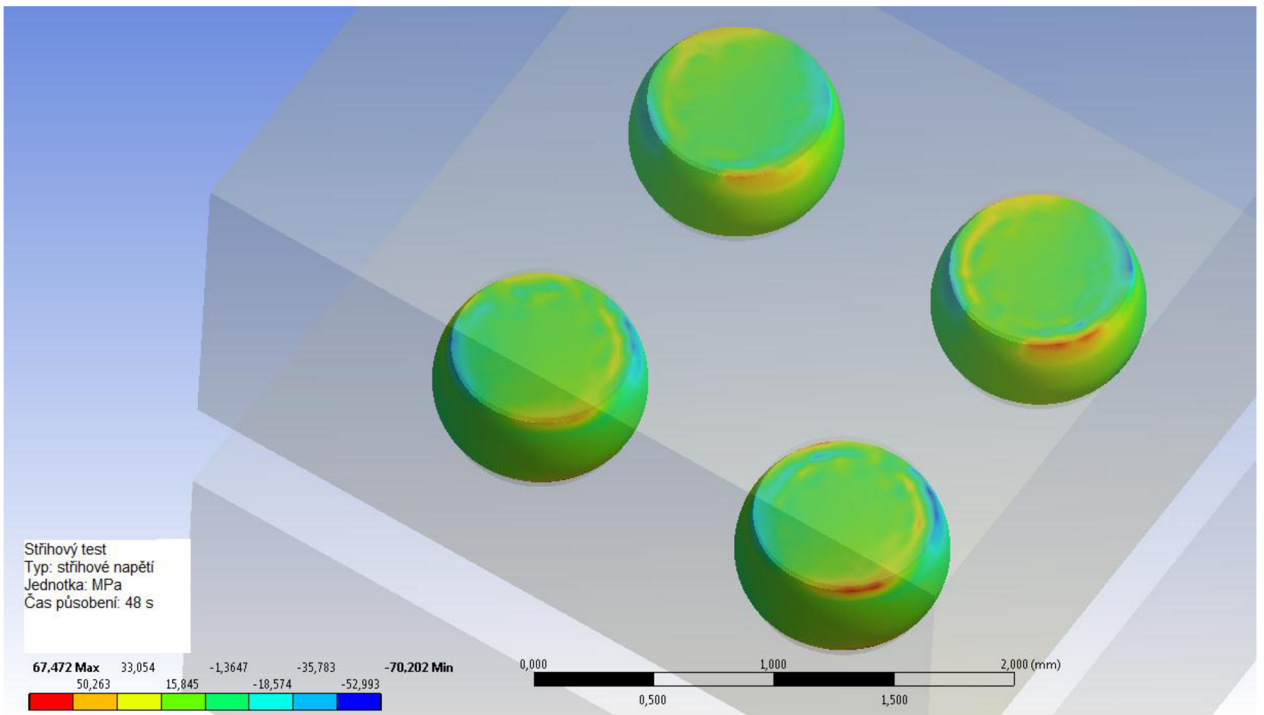
Na obrázcích 49, 50, 51 a 52 níže je znázorněno vzniklé stříhové napětí na BGA vývodech. Na obrázcích je také vyznačena barevná stupnice pro grafické rozlišení intenzity namáhaných oblastí. Červená znamená nejvíce namáhané oblasti a modrá naopak nejméně.



Obrázek 49: Maximální stříhové napětí BGA vývodů 67,5 MPa.

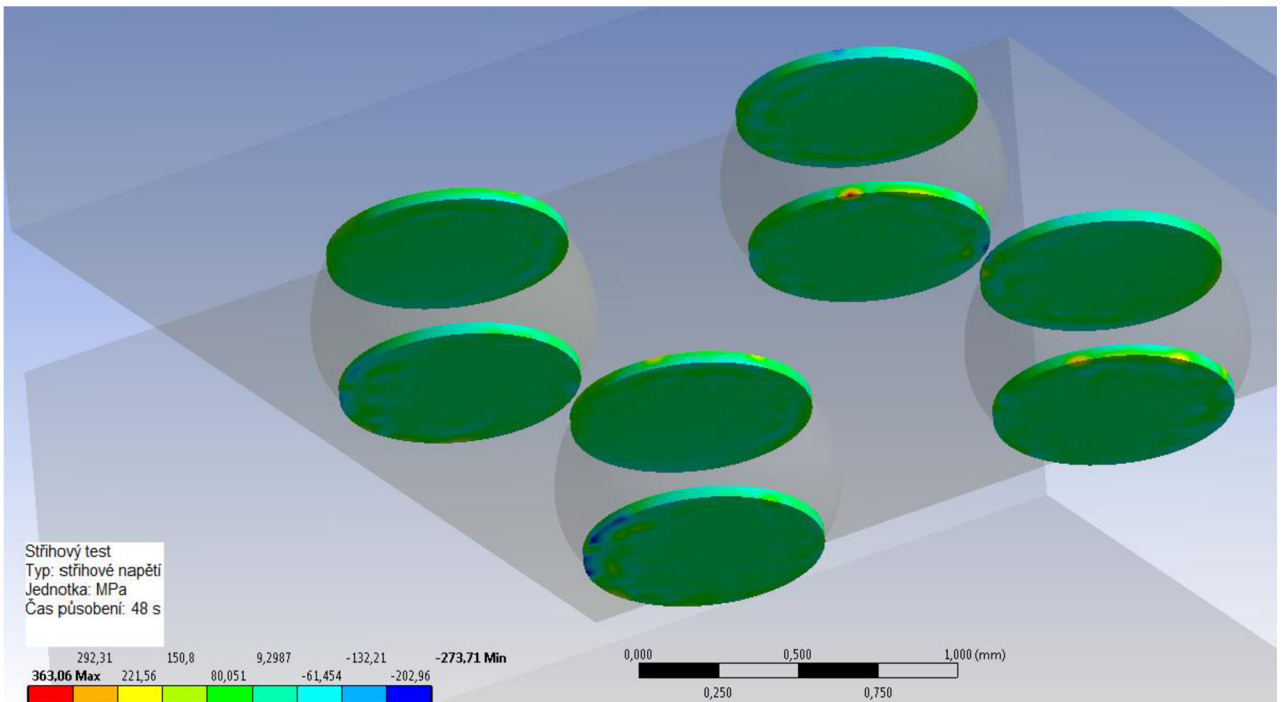


Obrázek 50: Pohled z pozice substrátu na namáhané spoje.

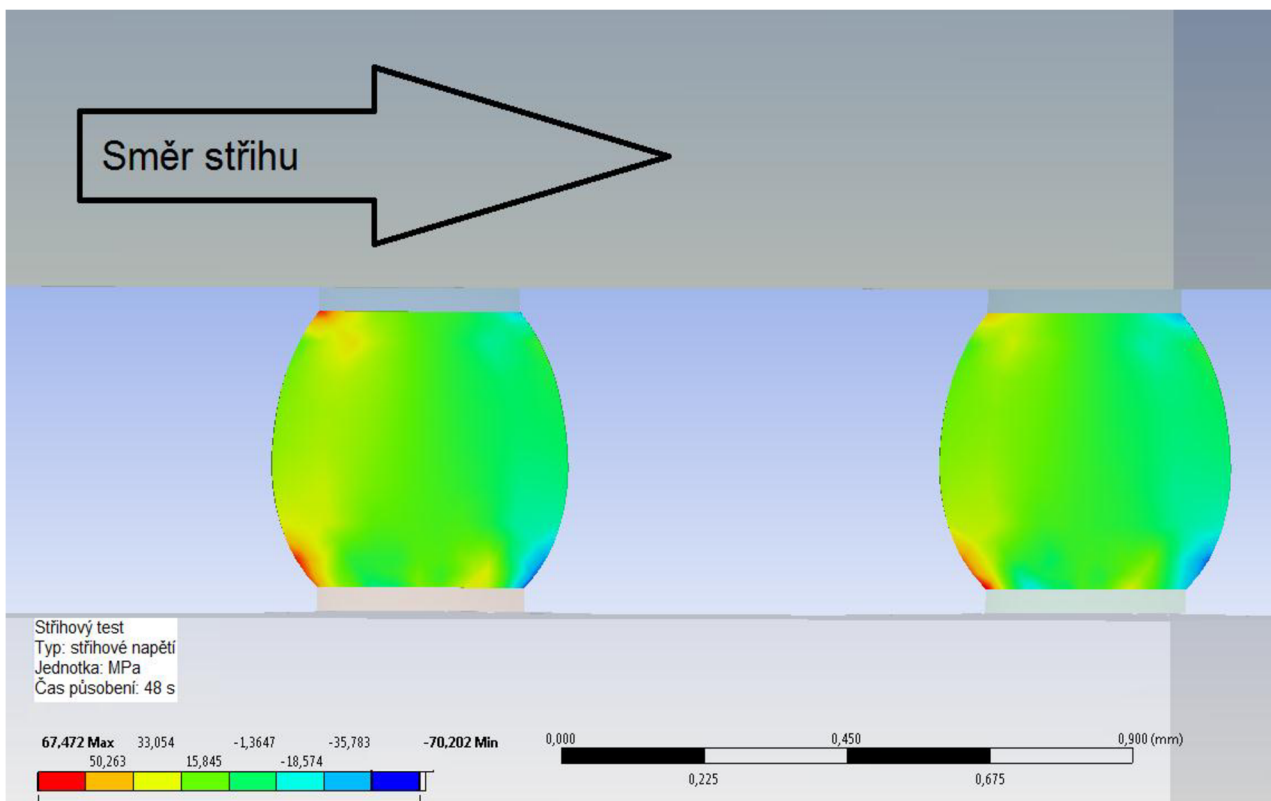


Obrázek 51: *Pohled z pozice BGA pouzdra na namáhané spoje.*

Další simulací bylo zjišťováno namáhání padů na substrátu spolu s vyhodnocováním velikosti střihového napětí v určitých oblastech, viz Obrázek 43.



Obrázek 52: *Působení střihové síly přibližně ve směru hlavní diagonály.*



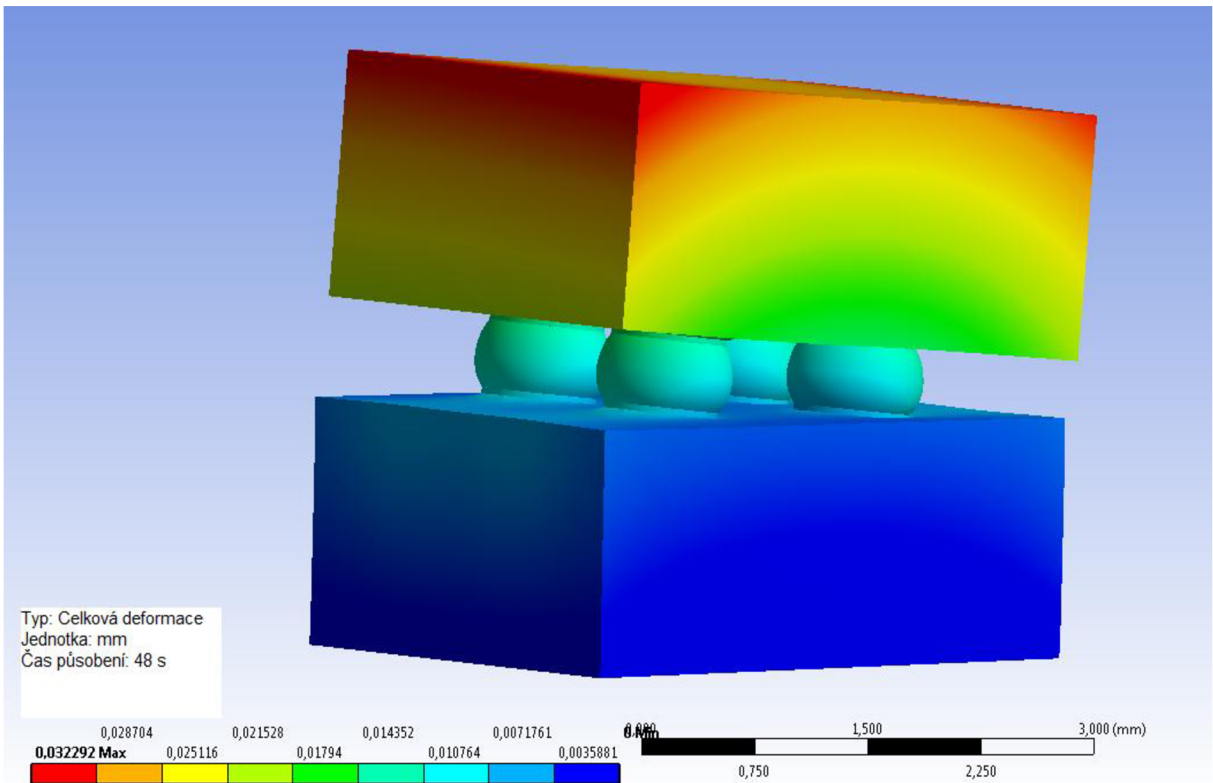
Obrázek 53: Průřez objemu BGA vývody při stříhovém namáhání.

Jako další jsme pomocí programu ANSYS Workbench nasimulovaly deformaci ke které dojde v limitním případě při zatížení BGA pouzdra stříhem. Vývoj působení síly probíhal podle teoreticky nasimulovaných hodnot vynesných do grafu na obrázku 48 výše.

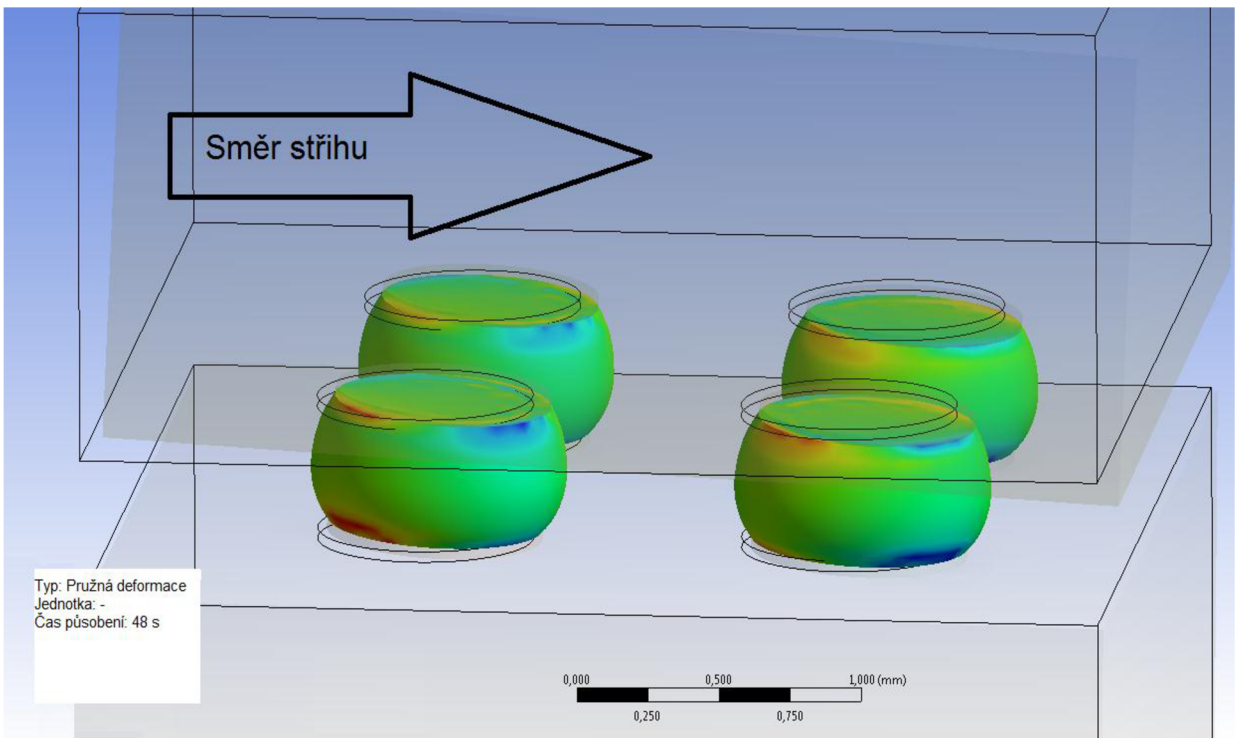
Při aplikaci stříhové síly působí na vývody kombinace deformací v tahu, ohybu a smyku. Na obrázku 54 je nasimulována maximální deformace, která nastane těsně před odtržením (selháním) BGA pouzdra.

Obrázek 55 níže ukazuje změnu polohy BGA vývodů při deformaci oproti jejich původní poloze před působením stříhového testu. I tato nepříliš velká změna způsobuje velké namáhání v červeně vyznačených oblastech což vede k narušení kontinuity a selhání spoje





Obrázek 54: Celková deformace.



Obrázek 55: Změna polohy BGA vývodů při maximální deformaci (těsně před utržením) oproti původní poloze.

## 9 Tepelné stárnutí BGA pouzder

Pro získání představy o tom jak moc se změní mechanická pevnost kulových vývodů BGA pouzder při jednorázovém zvýšení teploty nad běžné limity byl proveden malý pokus s tepelným stárnutím. Pokus spočíval v izotermálním stárnutí jedné sady 24 ks BGA pouzder po dobu 1 hodiny při konstantní teplotě 150 °C a dalších sady 24 ks BGA pouzder, které byly nechány stárnout po dobu 8 hodin taktéž při konstantní teplotě 150°C, viz tabulka 16.

Tedy celkem dvě sady BGA pouzder každá po 24 kusech. Pro pokus byly vybrány substráty s povrchovou úpravou OSP (Organic Solderability Preservative). Povrchová úprava padů BGA pouzder byla taktéž OSP typu.

Tabulka 16: *Izotermální stárnutí vzorků.*

	doba stárnutí [h]	Teplota stárnutí [°C]
sada 1	1	150
sada 2	8	150

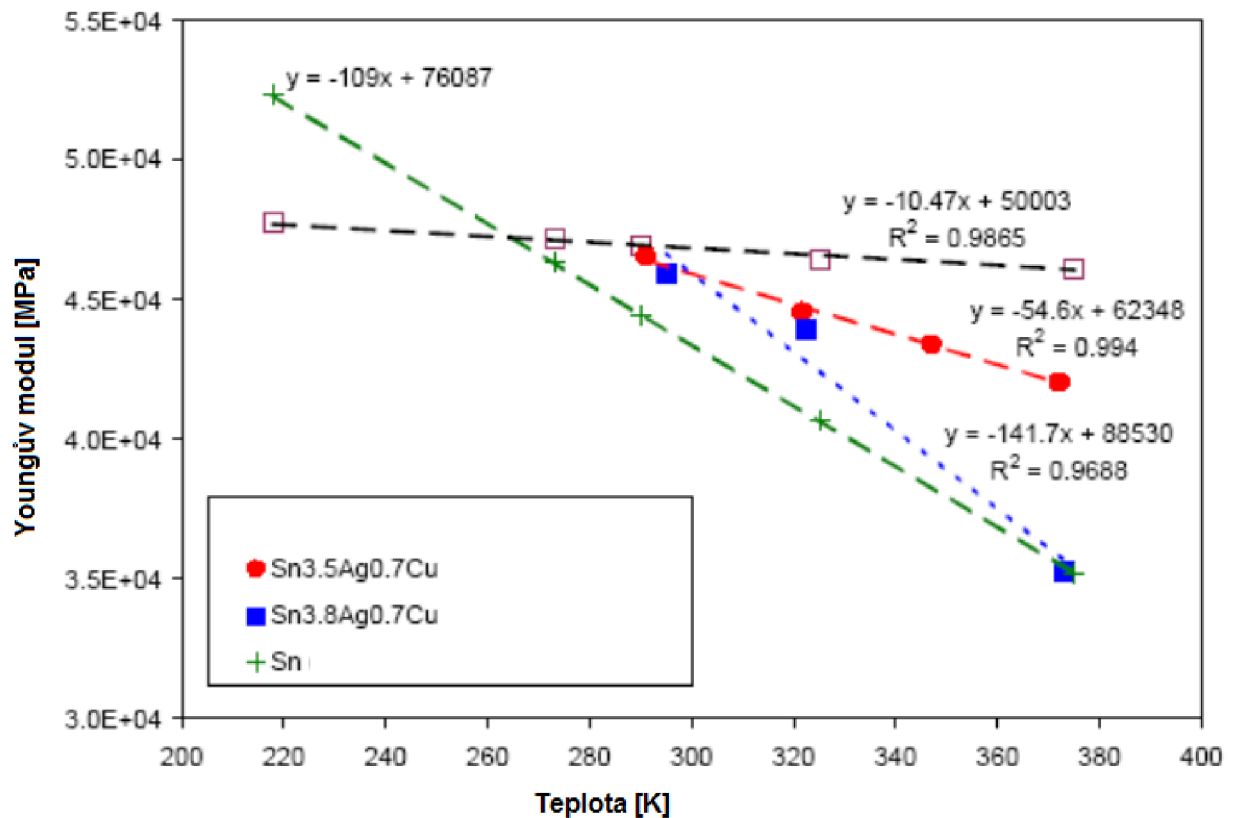
### 9.1 Simulace tepelného stárnutí v programu ANSYS

Pro budoucí porovnání byla provedena simulace, která ukazuje změnu pevnosti spoje spolu s rozložením stříhového napětí po izotermálním stárnutí, viz tabulka 16.

Při simulace změny vlastností pájky po tepelném stárnutí dochází k výrazné změně modulu pružnosti v tahu neboli Youngově modulu a také ke změně poměrného prodloužení neboli Poissonově konstantě. Tyto parametry výrazně ovlivňují pevnost spoje při mechanickém – stříhovém namáhání.

Pro naši teplotu a čas se dle úvah Poissonova konstanta prakticky nezměnila, zato Youngův modul se již výrazně měnil. Pro co nejvhodnější simulaci by bylo třeba stárnuté vzorky poslat na analýzu do laboratoře zabývající se mechanickými vlastnostmi kovů a slitin. Tuto operaci nebylo možné provést, z důvodů finanční a časové náročnosti.

Proto se po konzultaci použily hodnoty získané z grafu na obrázku 56 níže. Tyto hodnoty Youngova modulu jak je patrné z grafu na obrázku 56 jsou v závislosti na rostoucí teplotě klesající. Na základě těchto závislostí byla aproximačně stanovena změna Youngova modulu s teplotou a následně provedena simulace.

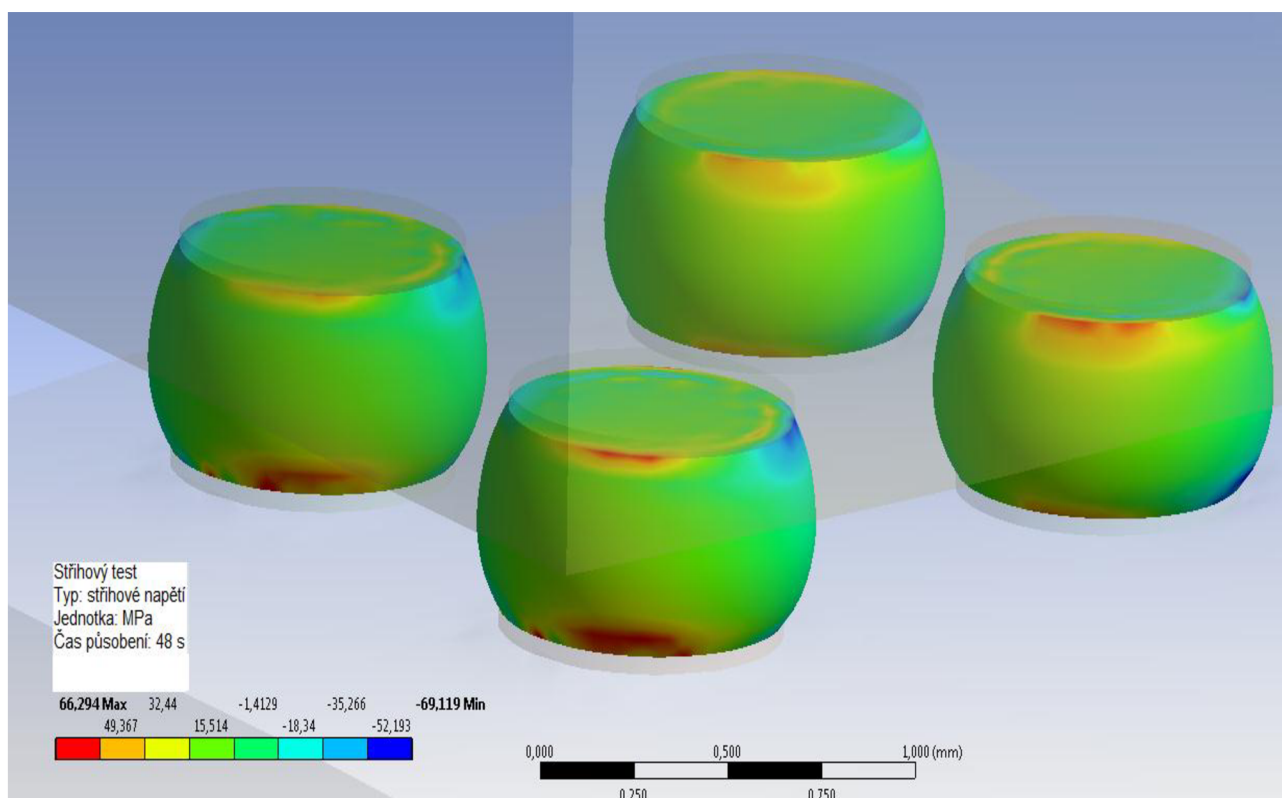


Obrázek 56: Změna Youngova modulu pružnosti s teplotou pro bezolovnatou pájku SAC. [14]

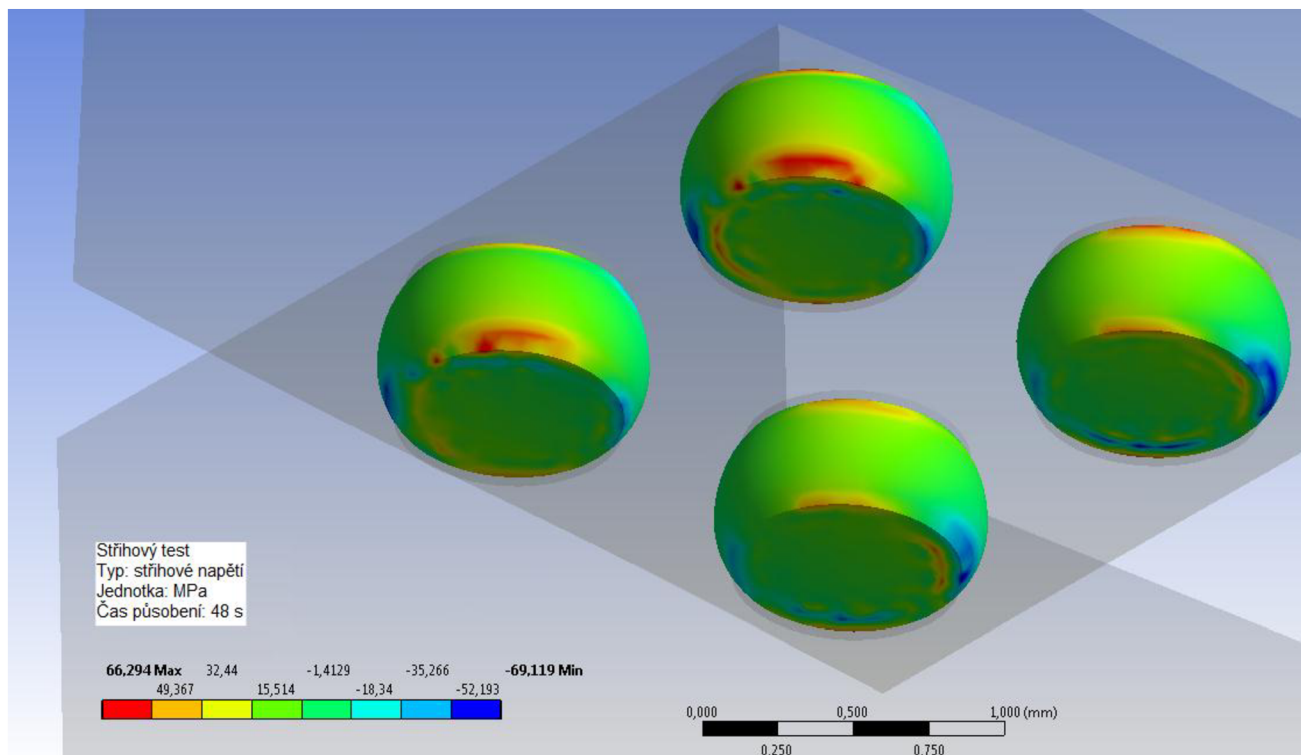
Výsledky získané simulaci jsou na obrázcích níže. Na obrázcích 57 a 58 je vidět rozložení a intenzita stříhového napětí po stárnutí 1 h.

Při porovnání maximálního stříhového napětí mezi jednotlivými stárnutými vzorky je patrná klesající tendence maximálního stříhového napětí spolu s rostoucí dobou izotermálního stárnutí.

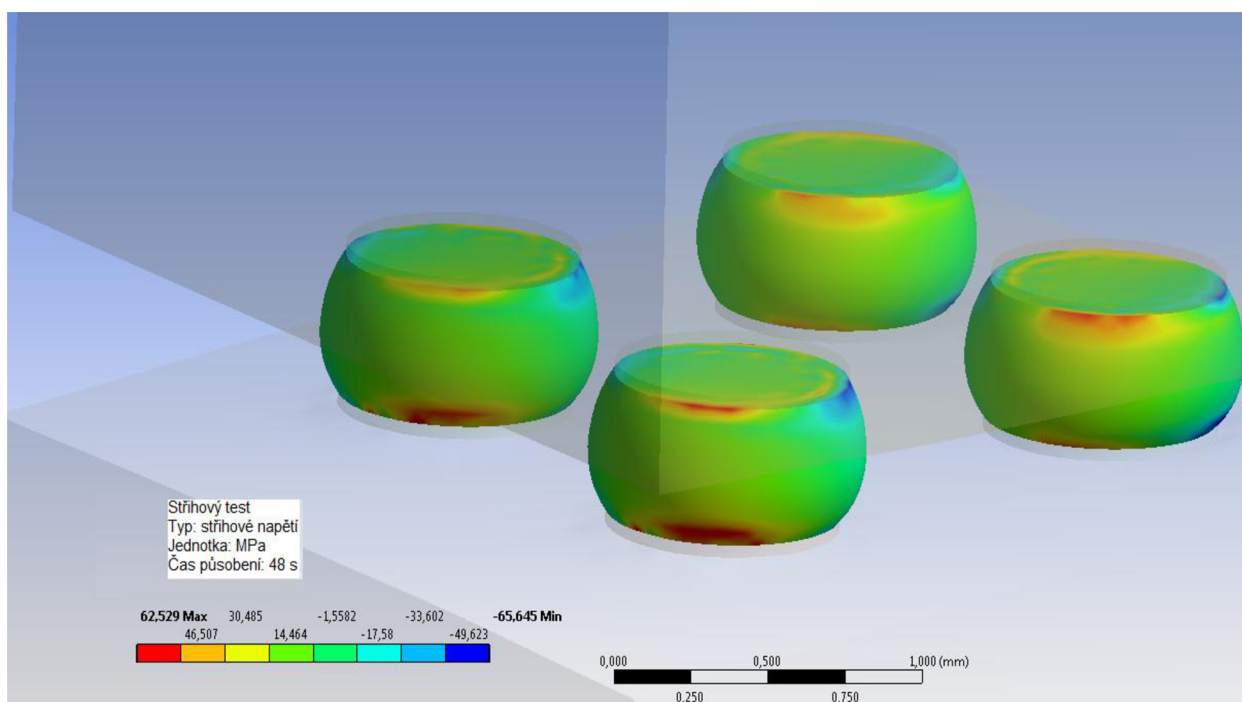
Na následujících obrázcích číslo 59 60 je vidět rozložení intenzity stříhového napětí při izotermálním stárnutí pod dobu 8 hodin při 150 °C.



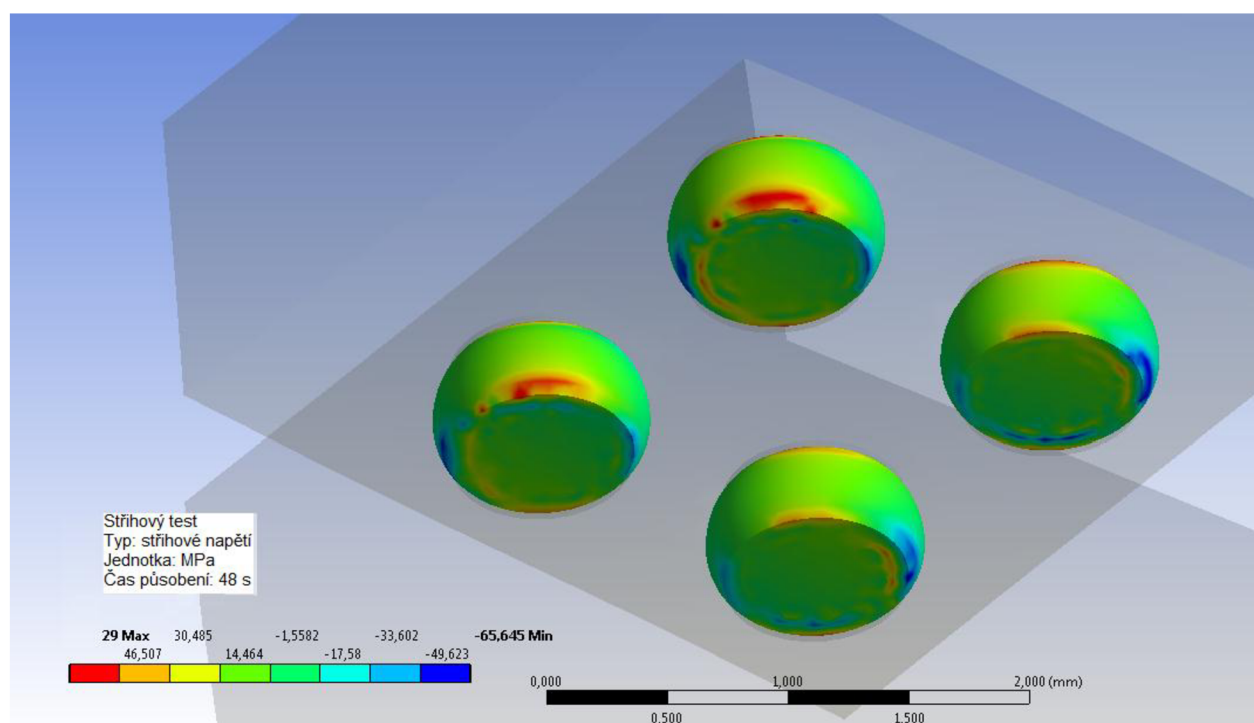
Obrázek 57: Maximální střihové napětí na kulovém vývodu 66,3 MPa.



Obrázek 58: Spodní pohled na kulové vývody BGA pouzdra.



Obrázek 59: Maximální střihové napětí na kulovém vývodu 62,5 MPa



Obrázek 60: Spodní pohled na kulové vývody BGA pouzdra po 8 hodinovém izotermálním stárnutí.

## 9.2 Zhodnocení simulovaných výsledků

Při jednotlivých simulacích jsme se snažili předpovědět a graficky vyobrazit kde ve spoji mezi substrátem (DPS) a BGA pouzdem dojde k selhání v důsledku nerovnoměrného působení resp. rozložení stříhového napětí, na obrázcích vyznačeno tmavě červenou barvou. Naproti tomu místa kde je působení stříhového napětí minimální jsou vyznačeny tmavě modrou barvou.

Z obrázků uvedených je patrné že největšího namáhání se dostává spojům nejbližší testovacímu hrotu. Hodnoty stříhových napětí pro jednotlivá izotermální stárnutí uvedené v tabulce 17 níže. Je vidět, že s rostoucím teplotním stárnutím se namáhání nutně k selhání spoje snižuje, jinými slovy, klesá pevnost izotermálně unavovaného materiálu.

Tabulka 17: *Simulované hodnoty stříhového napětí pro různé izotermální stárnutí.*

typ izotermálního stárnutí	T [°C]	t [h]	max. stříhové napětí [MPa]
nestárnuté resp. stárnuté za běžné pokojové teploty	25	–	67,5
stárnuté za konstantní zvýšené teploty	150	1	66,3
stárnuté za konstantní zvýšené teploty	150	8	62,5

## 10 Závěr

V první části práce jsme se zabývali zkoumáním rozdílu mechanické pevnosti bezolovnatých a olovnatých kulových vývodů, celý postup je popsán v kapitole 3. Z výsledků v tabulce 3 je zřejmé, že při stejných parametrech a technologických podmínkách dosahovaly olovnaté spoje větší stříhové pevnosti oproti bezolovnatým kulovým vývodům. Tento rozdíl v pevnosti spojů asi 0,2 kg oproti očekávání že bezolovnatá pájka bude mít vyšší stříhovou pevnost, mohl být způsoben nevhodným přetavovacím profil pro bezolovnatou slitinu. Nicméně z testů plyne, že bezolovnatá pájka SAC 305 je vhodnou alternativou k olovnaté pájce.

Další část práce se zabývala testováním mechanické pevnosti celých BGA pouzder. Testování probíhalo opět stříhovým testem na zařízení DAGE 2400, jako vzorky jsme použily dvě sady nestárnutých BGA pouzder s kulovými vývody z bezolovnaté slitiny SAC305. Tyto dvě sady pouzder se lišily počtem kulových vývodů na pouzdro (4 nebo 9). Cílem této části bylo zjistit technické možnosti stroje DAGE 2400 při trhání BGA pouzder a seznámit se s vyhodnocováním odtržených vzorků.

Bylo zjištěno, že 9 kulových vývodů na BGA pouzdro je příliš velký a nenabízí rezervu pro destruktivní test. Při vyhodnocování byly zjištěny různé typy selhání jako např. delaminovaný pad, rozdrcený kulový vývod ve svém objemu. Ovšem většina selhání byla v IMC fázi na rozhraních kulový vývod/pad, viz Tabulka 5 a 6. Při testování byly také zjištěny nedostatky v kvalitě zapájených vzorků (spoj po zapájení nepokryl celou plochu padu, nepřesné sesouhlasení nepájivé masky a padu), tyto nedostatky byly posléze odstraněny při návrhu zkušebních vzorků změnou poměru mezi průměrem kulového vývodu a padu viz vzorec [3] v kapitole 2.4 a změnou postupu definice padu za pomoci nepájivé masky. To tedy znamená, že vlastní průměr padu je definován při vyvolání nepájivé masky a jistá jeho část je jí překryta.

V poslední části diplomové práce jsme zhotovili 6 ks substrátů/DPS kde každá DPS obsahovala 12 ks BGA pouzder. Pro naše pokusy byla zvolena povrchová úprava OSP díky svému rozšíření v méně náročných aplikacích kde poskytuje obdobné vlastnosti jako bezolovnatý HAL ovšem s nižšími náklady. Naše vzorky byly podrobeny izotermálnímu stárnutí ve třech různých tepelných integrálech, viz tabulka 10 v kapitole 7.1 .

Ze získaných výsledků viz graf na obrázku 41 je patrné že, při izotermálním stárnutí za pokojové teploty nebo v peci po dobu 1 hodiny není výraznější rozdíl v mechanické pevnosti vývodů. Rozdíl je patrný až při 8 hodinovém stárnutí kdy síla nutná k selhání BGA pouzdra klesla přibližně v průměru o 0,4 Kg.

Při vyhodnocování způsobu selhání jsme se inspirovali normou uvedenou v kapitole 2.3 . Z námi vyhodnocovaného počtu spojů všechny spoje selhaly v IMC rozhraní, toto zjištění jsme vyhodnotili z hlediska dvou IMC rozhraní, které vznikají na spoji viz obrázek 45. Základní představa vycházela z předpokladu, že IMC vrstva na rozhraní kulový vývod a pad BGA pouzdra bude tlustší než IMC vrstva na rozhraní vývodu s substrátem/DPS. Tento jev je dán dvojnásobným přetahovacím cyklem, kterému byla vystavena IMC BGA vrstva (zapájení vývodů k pouzdru a následné zapájení celého pouzdra k substrátu).

Z výsledků uvedených v tabulce 11 vyplývá, že počet selhání na jednotlivých rozhraních je prakticky totožný. Při porovnání selhání na jednotlivých rozhraních při izotermálním stárnutí za pokojových teplot nebo v peci po dobu 1 hodiny je lehká převaha selhání na IMC DPS

rozhraní, což je pravděpodobně zapříčiněno vyšším namáháním na IMC DPS rozhraních při stříhovém testu.

Při porovnání se sadou vzorků po 8 hodinovém stárnutí je zřejmé, že se tento poměr výrazně mění a dochází k selhání na IMC BGA rozhraní, kdy šířka této vrstvy narostla natolik, že k jejímu selhání dochází dříve i oproti více namáhané vrstvě IMC DPS.

V rámci prováděných simulací v programu ANSYS Workbench jsme přepokládali, že největší náchylnost na selhání budou mít vývody, kterou jsou první ve směru stříhu (viz obrázek 42) jak znázorňují obrázky 55, 57, 58, 59, a 60 tento předpoklad se nevyplnil, jak ukazuje tabulka 13, došlo k právě opačnému jevu. Tento výsledek je možná zapříčiněn jiným tečným a normálovým napětím, které vzniká při stříhu, jelikož materiál FR-4 z kterého byla naše BGA pouzdra vytvořena se při kontaktu se stříhovým hrotem jaksi promáčknul (nebyl ideálně tvrdý) a tím mohlo dojít k změně těchto stříhových a tečných napětí v kulových spojích.

Při simulaci izotermálního stárnutí kulových vývodů BGA pouzder je vidět z hodnot v tabulce 17, že maximální stříhové (tj. maximální napětí které ve spoji vznikne těsně před jeho selháním/utržením) napětí klesá s rostoucí dobou izotermálního stárnutí, což se nám při praktických testech potvrdilo, viz graf na obrázku 41.

Tato práce se věnuje testování mechanické pevnosti BGA pouzder jakožto kulovým BGA vývodům z bezolovnaté slitiny SAC305 při izotermálním stárnutí a porovnává je s hodnotami získanými ze simulací. Pro další výzkum by bylo vhodné netestovat již uměle tvořená pouzdra, ale skutečná pouzdra nebo jen samotné vývody, které by mohly být vyhodnocovány dle norem, např. dle normy JEDEC – JESD22-B117A, protože podle této normy nelze vyhodnocovat celá BGA pouzdra. Pro další zkoumání korelace simulací a měřených hodnot je třeba lépe rozvinout materiálové vlastnosti zkoumaných prvků např. stárnuté vzorky určené ke stříhovému testu nechat materiálově vyšetřit ke zjištění aktuálních hodnot Youngova modulu, Poissonovy konstanty a různých dalších koeficientů. Tyto a další hodnoty je třeba zjistit vždy pro aktuální stav nejen stárnuté pájky, ale i IMC vrstvy, která pak slouží k modelaci kohezních zón. Tyto zóny jsou potřebné k plné simulaci utržení BGA pouzdra od substrátu v programu ANSYS. Tedy lepší materiálové znalosti testovaných vzorků mohou zvýšit přesnost simulací a přispět k relevantnějším výsledkům.



## 11 Seznam literatury použité při zpracování práce

- [1] Okáč, Z. *BEZOLOVNATÉ PÁJENÍ A SLEDOVÁÍ SMÁČIVOSTI RŮZNÝCH POVRCHOVÝCH ÚPRAV NA DESKÁCH S POLOŠNÝMI SPOJI*, *Bakalářská Práce*. Brno: VUT, 2005. [cit. 2010-26-11].
- [2] Starý, J. – Zatloukal, M.- Stejskal, P. *Pracovní verze 80509 skript, MONTÁŽNÍ A PROPOJOVACÍ TECHNOLOGIE (MMOT)*. Brno: VUT, 2009. [cit. 2010-26-11].
- [3] Internet [online]. Dostupné z:  
URL: <<http://www.google.cz/search?hl=cs&client=opera&rls=cs&q=BGA+flip+chip+picture&btnG=Hledat&lr=&aq=f&oq>>, [cit. 2011-18-02].
- [4] Internet [online]. Dostupné z:  
URL: <<http://www.springerlink.com/content/b872205705t45376/>>, [cit. 2011-21-03].
- [5] Internet [online]. Dostupné z:  
URL: <<http://www.google.cz/search?client=opera&rls=cs&q=BGA+Package+Component+Reliability+After+Long+Term+Storage&sourceid=opera&ie=utf-8&oe=utf-8>>, [cit. 2011-21-03].
- [6] Internet [online], *Dage Holdings Ltd*. Dostupné z:  
URL: <<http://www.dage-group.com/technical-papers-bondtesters>, >, [cit. 2011-26-02].
- [7] ROSS, W. M. *A Comprehensive Guide to the Design and Manufacture of Printed Board Assemblies Volume 2*, *Electrochemical Publications Limited*, 1999. [cit. 2011-26-01].
- [8] Internet [online], *JEDEC – Global Standards for the Microelectronic Industry*. Dostupné z: URL: <<http://www.jedec.org/about-jedec>, >, [cit. 2011-20-02].
- [9] Internet [online], *SMT centrum*. Dostupné z:  
URL: <<http://www.smtcentrum.cz/vyroba-desek-plosnych-spoju/intermetalicke-slouceniny/>, >, [cit. 2011-12-03].
- [10] Internet [online], *Matweb – Material property data*. Dostupné z:  
URL: <<http://www.matweb.com/search/CompositionSearch.aspx>, >, [cit. 2011-28-03].
- [11] Internet [online]. Dostupné z:  
URL: <<http://www.docstoc.com/docs/51020098/Method-Of-Cleaning-And-Conditioning-Plasma-Reaction-Chamber---Patent-6350697>, >, [cit. 2011-04-01].
- [12] Internet [online]. Dostupné z:  
URL: <<http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/?q=node/32>, >, [cit. 2011-04-04].

- [13] Internet [online], ANSYS Workbench – Engineering a Material data. Dostupné z:  
URL:< <file://localhost/D:/Skola/Letní/Diplomka/Libich.mht>, >, [cit. 2011-05-04].
- [14] Internet [online], Material Measurement Laboratory. Dostupné z:  
URL:< [http://www.metallurgy.nist.gov/solder/clech/Sn-Ag-Cu\\_Other.htm](http://www.metallurgy.nist.gov/solder/clech/Sn-Ag-Cu_Other.htm) ,>,  
[cit. 2011-14-05].

## 12 Seznam použitých výrazů a zkratk

<i>BGA</i>	Ball Grid Array
<i>FP</i>	Flip Chip
<i>Balls</i>	kulové vývody
<i>Die</i>	vlastní holý čip
<i>Bumps</i>	kulové vývody pro připojení čipu k BGA pouzdrzu
<i>Bonding wire</i>	drátové vývody pro připojení čipu k BGA pouzdrzu
<i>Tweezer test</i>	jednotlivé spoje jsou uchyceny a kolmým tahem odtrženy
<i>SMD</i>	Surface Mount Devices
<i>TCE</i>	Temperature Coefficient of Expansion [Teplotní Koeficient délkové Roztažnosti]
<i>PÚ</i>	Povrchová Úprava pájecích plošek (padů)
<i>RTS</i>	Ramp to Spike
<i>IMC</i>	Intermetallic Compounds [mezifázová sloučenina]
<i>HAL</i>	Hot Air Levelling