

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Pájení pouzder BGA

**vedoucí práce: Ing. Karel Rendl
autor: Martin Kubec**

2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin KUBEC**
Osobní číslo: **E08B0363P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Pájení pouzder BGA**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou výroby a připojování součástek BGA .
2. Popište metody pájení a oprav BGA .
3. Vytvořte přehled a porovnání kontrol pájených spojů u BGA .

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Karel Rendl**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce „Pájení pouzder BGA“ je rešerší zaměřenou na pouzdra BGA, obsahuje výčet hlavních druhů těchto pouzder, jejich vlastností a použití. Dále jsou uvedeny metody připojování čipů k pouzdru, pouzdra k deskám plošných spojů a testování správného připájení.

Klíčová slova

Pouzdro, BGA, pájení pouzder, připojení čipu, kontrola pájení, mikrodrátky, flip chip, TAB technologie, kontrolní metody

Abstract

This bachelor thesis presented „Soldering of BGA packages“ and it is focused on BGA packages and contains list of the main kinds of packages and its attributes and applications. Further, in this thesis are mentioned connecting chips to a package, connecting package to the printed circuit board and testing of the properly soldering.

Key words

Package, BGA, soldering packages, chip connection, soldering test, wire bonding, flip chip, TAB technology, control methods

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 11.6.2012

Martin Kubec

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlu Rendlovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 CHARAKTERISTIKA ZAPOUZDŘENÍ	10
1.1 POJEM "POUZDRO"	11
1.2 ÚROVNĚ PROPOJENÍ	11
1.3 ZÁKLADNÍ TYPY ČIPŮ (PRVNÍ ÚROVNĚ)	11
2 POUZDRA BGA	13
2.1 POUZDRA TYPU PBGA	14
2.2 POUZDRA TYPU CBGA	15
2.3 POUZDRA TYPU TBGA	15
2.4 POUZDRA TYPU μ -BGA	15
2.5 POUZDRA TYPU HSBGA	16
3 PŘIPOJENÍ ČIPU K POUZDRU	16
3.1 MIKRODRÁTKY ("WIRE BONDING")	16
3.1.1 Termokomprese	18
3.1.2 Ultrazvukové sváření	18
3.1.3 Termosonické sváření	19
3.1.4 Kontaktování na kuličku	19
3.1.5 Kontaktování hranou	19
3.2 FLIP CHIP A C4 ("CONTROLLED COLLAPSE CHIP CONNECTION")	20
3.2.1 Příprava poduškových vývodů vakuovým napařováním	21
3.2.2 Příprava poduškových vývodů fotolitograficky	22
3.3 TECHNOLOGIE TAB ("TAPE AUTOMATED BONDING")	22
4 MONTÁŽ POUZDER BGA	23
4.1 SESOUHLASENÍ VÝVODŮ A OSAZENÍ	23
4.2 PÁJENÍ	23
4.2.1 Stolní opravárenské stanice	24
4.2.2 Hystereze pouzder BGA	26
5 KONTROLNÍ METODY	27
5.1 MDA A IN-CIRCUIT TESTOVACÍ SYSTÉMY	27
5.2 KONTROLA POMOCÍ RTG	27
5.3 OPTICKÉ TESTOVACÍ SYSTÉMY	28
5.4 FUNKČNÍ TESTOVÁNÍ	28
5.5 SHRUTÍ	29
ZÁVĚR	30
POUŽITÁ LITERATURA	31
PŘÍLOHY	33
UKÁZKY DEFECTŮ U BGA	33

Seznam symbolů a zkratek

AOI.....	Automatic Optical Inspection
ASIC.....	Application-specific Integrated Circuit
BT.....	Bis-maleimidová triazinová pryskyřice
CCD.....	Charge-Coupled Device
DPS.....	Deska plošných spojů
DSP.....	Digitální signálový procesor
IR.....	Infrared nebo také Infrared Radiation
MDA.....	Manufacturing Defect Analysing
PLD.....	Programmable Logic Device
SMD.....	Surface Mount Device
SMT.....	Surface Mount Technology

Úvod

V dnešní době neustálého technického pokroku elektronika a mikroelektronika pronikla snad už do všech oblastí našeho života. Aby mohl vývoj pokračovat, přichází se se stále novými technologiemi výroby integrovaných obvodů, k čemuž je zapotřebí pokrok v mnoha dalších oblastech.

Jednou z nich je i pouzdření, kde nejde pouze o samotné zapouzdření čipu, protože pouzdření je velmi široký pojem. Musíme myslet také na správnou volbu pouzdra podle požadovaných parametrů, jako je například odvod tepla a klimatická odolnost, na připojení čipu k vývodům pouzdra nebo připojení samotného pouzdra na desku plošných spojů.

Pouzdra BGA byla od začátku zvláštní svým připojením k desce plošných spojů kvůli umístění kontaktů na spodní části pouzdra. To jim otevřelo cestu do počtu aplikací, kde je třeba co nejkratších vývodů z důvodu elektrických vlastností, ale také pro jejich možný velký počet, protože jsou zespona v malých vzdálenostech. Tím na druhou stranu vznikají nevýhody zvláště z pohledu následných kontrol správného připájení, protože je dobrý přístup pouze ke krajním kontaktům.

V předkládané práci je tedy uvedena charakteristika samotného zapouzdření, vlastnosti základních druhů pouzder BGA a jejich výčet. Dále se zabývá problematikou propojování čipů s těmito pouzdry a připojování pouzder samotných na desky plošných spojů. V poslední kapitole jsou rozebírány některé metody testování správného pájení pouzder BGA.

1 Charakteristika zapouzdření

Každá aktivní elektronická součástka se skládá z jednoho nebo více čipů, z pravidla křemíkových. Ty jsou umístěny na základně pouzdra součástky a propojeny s izolovaně upevněnými vývody. Tento celek je pak opatřen ochranným plastovým, keramickým nebo kovovým krytem. Pouzdro elektrické součástky tedy tvoří ochranný kryt, který chrání součástku před vnějšími vlivy, a základnou, která na sobě nese čip a také zajišťuje elektrické propojení zapouzdřeného čipu se zbytkem elektrického obvodu. U některých moderních druhů zapouzdření může tvořit základnu i samotný čip. Důvody a cíle pouzdření lze tedy shrnout do následujících bodů [1], [2], [4], [5]:

- rozvod napájecí energie
- rozvod elektrického signálu
- ochrana proti mechanickým, chemickým a klimatickým vlivům
- jednoduchá manipulace při montáži
- zajištění odvodu tepla
- spolehlivost a cena

Jednou z hlavních vlastností pouzdra jsou jeho elektrické vlastnosti, které jsou nejdůležitější u vysokofrekvenčních obvodů. Za ty považujeme třeba osobní počítač, mobilní telefon a mnohé další. Po takových zařízeních požadujeme, aby přenos signálu byl vždy co nejvěrnější, tudíž aby docházelo k co nejmenšímu ovlivnění (v ideálním případě nedocházelo k žádnému). Kvůli správné funkci součástky musí být zajištěn dostatečný odvod tepla, aby nedocházelo k přehřívání a teplotnímu ovlivnění její funkce. Zvláště pak u součástek, při jejichž práci dochází ke značným ztrátovým výkonům (např. součástky ve výpočetní technice). S ohledem na výrobu součástky je třeba dbát jak na jednoduchou manipulaci při montáži, tak na jednoduchost samotné montáže včetně případné pozdější opravy. Odolnost proti mechanickým, chemickým a klimatickým vlivům je nutná vzhledem k místu použití a skladování zařízení. [4]

1.1 Pojem "pouzdro"

Obecně lze říci, že pouzdro (angl. "*package*") tvoří základna umožňující připojení samotných součástek a jejich propojení s dalšími součástkami nebo vyššími celky a ochranný kryt, který ovšem nemusí být použit ve všech případech. [1]

Pro anglický výraz "*packaging*" není v češtině ekvivalentní výraz, jak je uvedeno v [1]: "Vyjadřuje multidisciplinární technologii, jejímž cílem je vytvoření pouzdra příslušné úrovně. V češtině je někdy pro tento výraz užíváno překladu pouzdření. Toto slovo je ale zpravidla chápáno jako proces vytváření a aplikace ochranného krytu elektronické součástky a neodpovídá širce slova "*packaging*". Nejvhodnějším překladem anglického slovního spojení "*electronic packaging*" je "montáž v elektronice", ale pouze při chápání tohoto výrazu v celém širokém spektru technologií týkajících se pouzdření. [1]

1.2 Úrovně propojení

Montáž první úrovně (na úrovni čipů) je proces montování čipu (součástky první úrovně) na základnu pouzdra první úrovně (na nosič čipu). Čip je při něm propojen s vývody této základny a výsledný celek je opatřen některým z typů ochranného krytu (např. kovovým nebo plastovým). Tato nová součástka se nazývá součástkou druhé úrovně a nemusí obecně obsahovat pouze jeden čip. Může být vytvořena i jako multičipový obvod. [1], [2]

Montáž druhé úrovně je proces, kdy jsou součástky druhé úrovně montovány na propojovací desku - základnu pouzdra druhé úrovně (například deska plošného spoje). Tím vznikne funkční karta (např. zvuková nebo síťová karta) a je nazývána dceřinou deskou. Jako výsledek tohoto procesu montáže druhé úrovně vznikne součástka třetí úrovně. [1], [2]

Montáží třetí úrovně se nazývá montáž součástek třetí úrovně na základnu pouzdra třetí úrovně, kterou je opět deska plošného spoje (např. v počítači tuto desku nazýváme "*motherboard*"). Ta zajišťuje jejich propojení s ostatními součástkami a deskami plošných spojů do vyššího celku nejčastěji přes přímé konektory a celá soustava je pak chráněna ochranným krytem. Takový celek vzniklý procesem montáží třetí úrovně se nazývá součástkou čtvrté úrovně. [1], [2]

1.3 Základní typy čipů (první úrovně)

Pouzďení první úrovně je nejnáročnější pouzdřicí technologií z důvodu vysoké citlivosti čipů na elektrické, mechanické, fyzikální a chemické jevy. To vyžaduje použití speciálních

technologií pouzdření, aby čipy nebyly poškozeny při technologii připojování zapouzdrěného čipu na základnu pouzdra vyššího typu. [1]

Základní typy pouzder pro vsazovanou montáž [1], [4]:

- DIP (dual in-line package) - pouzdro s vývody po obou delších stranách součástky, které i ve zmenšeném provedení SH-DIP, úzkém provedení SK-DIP, nebo tenkém provedení SL-DIP
- SIP (single in-line package) - pouzdro tenké, postavené na výšku s vývody po jedné straně
- ZIP (zig-zag in-line package) - pouzdro SIP s vývody na jedné straně střídavě vyhnutými do dvou řad
- PGA (pin grid array) - pouzdro ploché na spodní straně s polem kolíkových vývodů

Pro povrchovou montáž se nejčastěji používá pouzder [1], [4]:

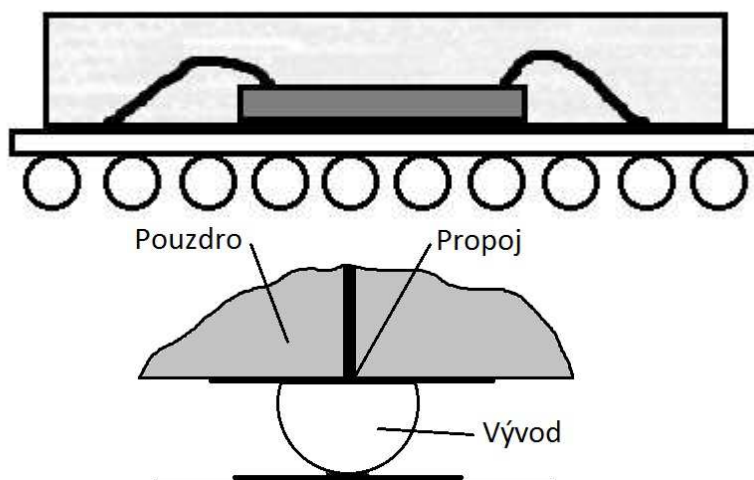
- SO nebo SOP (small outline nebo small outline package) - pouzdra malých rozměrů, které mají vývody na obou delších stranách s roztečí většinou 1,5 mm
- LCC (leadless chip carrier) - "bezvývodový" nosič čipu, pouzdro má vývody vytvořené přímo na svém těle (např. vypálenou vodivou pastou v keramice)
- PLCC, CLCC (plastic leadless chip carrier, ceramic leadless chip carrier) - plastový nebo keramický "bezvývodový" nosič čipu
- QFP (quad flat package) - obdélníkové pouzdro ploché, má vývody na všech stranách součástky
- DCA (direct chip attach) - propojovací deska je přímo připojena s čipem, který je chráněn například zakápnutím vhodným lepidlem
- COB (chip on board) - shodná technologie jako u DCA
- COF (chip on flex) - také totožná technologie jako DCA, ale základna je tvořena ohybným plošným spojem
- CSP (chip scale package, chip size package) - pouzdro má rozměry pouze o málo větší než samotný čip (rozměry čipu pouzdro přesahuje maximálně o 20%)
- SLICC (slightly larger than IC carrier) - další označení CSP pouzdra

- TCP (tape carrier package) - pouzdro realizované opět například zakápnutím vhodným lepidlem, ale čip je připojen na ohebný plošný spoj
- SLIM (single level integrated module) - modul obsahující jeden čip integrovaného obvodu, Jeho základna je ale vytvořena vícevrstvou strukturou vyrobenou pomocí tenkovrstvé technologie s integrovanými pasivními součástkami.
- BGA (ball grid array) - ploché pouzdro, které má na své spodní straně pole kulových vývodů tvořené pájkou

2 Pouzdra BGA

S postupným zmenšováním pouzder bylo potřeba přijít s pouzdrům malé velikosti ale s velkým počtem vývodů. To vedlo ke zrodu pouzdra BGA. [1]

Zkratka BGA (Ball Grid Array) označuje pouzdro s kuličkovými vývody (používané zejména paměťových čipů či procesorů). BGA vychází z PGA (Pin Grid Array), ale místo dlouhých pinů na PGA je na čípech BGA nanесena kulička pájky. Ta se při montáži zahřeje a připájí k patici nebo častěji přímo k desce plošných spojů. Takové řešení je mnohem méně náročné na prostor, zajišťuje lepší chlazení (teplo přejde do celé desky plošného spoje) a indukční a přechodový odpor je značně eliminován. Proto se používá do ultrapřenosných zařízení pro připájení procesoru či k připájení paměťových čipů zejména ke grafickým kartám, operačním pamětím, atd. [3], [6]



Obr. 1: Kontakty kulového tvaru u pouzdra BGA

V porovnání s tradičním pouzřením SMT má BGA tyto výhody: [4]

- vyšší hustotu propojení
- nižší náklady na montáž
- samočinné seřízení během probíhajícího přetavení
- snadné propojování
- snadné tepelné a elektrické vedení

Hlavní nevýhodou pouzder BGA je hodně obtížná kontrola správného připojení pouzdra po jeho montáži na desku plošného spoje a pak případná opravitelnost. V případě špatného připájení se musí celé pouzdro odpájet a celý proces opakovat. Druhou nevýhodou je nutnost správného zvolení materiálu pro výrobu pouzdra a jeho součiniteli tepelné roztažnosti, aby nedocházelo k uvolňování pouzdra vlivem teplotní roztažnosti. U těchto pouzder totiž nemůžeme počítat s tím, že zásadní část dilatačních změn absorbují pružné vývody pouzdra. [1], [9]

Pro stále se zvyšující nárůst požadavku na počet vývodů z pouzder se typ BGA stává jedním z dominantních typů pro pouzdra s vysokým počtem vývodů. Proti pouzdrům typu FPP, která byla vyvinuta také pro vysoký počet vývodů, je při manipulaci pouzdro BGA mnohem méně zranitelné. [1]

Počty vývodů pouzdra se liší. Nejméně se vyrábí 4 x 4 při velikosti pouzdra 7 x 7 mm. Největší z pouzder BGA dosahují počtu vývodů 49 x 49 při rozměrech 50 x 50 mm. [1]

Pouzdra BGA bývají většinou plastová nebo v náročnějších aplikacích keramická. Čipy uvnitř jsou k pouzdru připojeny buď mikrodrátky nebo jako "flip-chip". [1]

2.1 Pouzdra typu PBGA

Tato pouzdra mají základnu tvořenou oboustranně plátovanou destičkou BT pryskyřice (bis-maleimidové triazinové pryskyřice) s tloušťkou měděné fólie 18 μ m. Čip se připojuje přes pozlacenou plošku a je na základnu namontován lepením elektricky vodivým epoxidovým lepidlem se stříbrným plnivem a připojen mikrodrátky (Wire Bonding). Kryty tohoto pouzdra jsou většinou realizovány z plasu. I proto je jednou z hlavních výhod pouzdra PBGA jeho nízká cena. Tato pouzdra se používají například u grafiky, počítačových čipsetů (PLD, DSP), komunikačních sítí, mikroprocesorů a kontrolérů, hradlových polí a paměťových modulů. [1], [4]

2.2 Pouzdra typu CBGA

U pouzder typu CBGA tvoří základnu tří až pětivrstvý keramický substrát. Čip se k základně připojuje buď opět mikrodrátky (Wire Bonding) a nebo jako flip-chip. Základna se vyrábí buď z keramiky LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics, "Green Tape") nebo z keramiky HTCC (High Temperature Cofired Ceramics). Čip se na základnu montuje buď lepením elektricky vodivým lepidlem na připojovací plošku základny, a nebo, a to častěji, jako flip-chip. Při porovnávání tohoto pouzdra s pouzdrem předchozím má CBGA výhody. Těmi jsou podstatně lepší odvod tepla z pouzdra, vyšší hustota montáže a krátké vodivé spoje. Díky tomu pouzdro může bez problémů pracovat s vysokými hodinovými frekvencemi součástky. Kryty na pouzdrech CBGA bývají nejčastěji plastové nebo kovové. Tato pouzdra jsou dost nákladná, a proto také jejich využití zpravidla není v zařízeních a přístrojích spotřební elektroniky, ale u zařízení vyšších tříd, kde se kladou vyšší nároky na odolnost a spolehlivost. [1], [4]

2.3 Pouzdra typu TBGA

Typ pouzder TBGA má svůj název odvozený podle ohebné plastové základny pouzdra. Základna bývá dvoustranně plátovaná. V první vrstvě se nachází signálové spoje a druhá vrstva tvoří zemní rovinu. Čip u tohoto typu pouzder je montován technologií flip-chip. V současné době jsou TBGA pouzdra vyráběna jako čtverce s hranou v rozmezí velikostí 21 až 40 mm a obsahují řádově několik stovek vývodů. Jsou konstruována na velikost ztrátového výkonu součástky, který je až 15 W. Nevýhodou u těchto pouzder jsou jejich vysoké náklady, které jsou srovnatelné s náklady keramických pouzder. [1]

2.4 Pouzdra typu μ -BGA

Pouzdra typu μ -BGA se od standardních pouzder BGA liší zejména menší roztečí vývodů a vyšší hustotou vnitřních vodivých spojů. Mají velmi rozmanitá provedení, která jsou hodně závislá na výrobcu součástky. Největší a zásadní nevýhodou tohoto typu je jeho vysoká cena. [1]

2.5 Pouzdra typu HSBGA

Pouzdra HSBGA jsou BGA pouzdra teplotně náporová. Jsou v podstatě vylepšením neboli modernizací pouzder PBGA. Pouzdro tvoří hmota, do které je vpraven měděný materiál. Ten zlepšuje odvod tepla a tím je dosaženo menšího teplotního odporu. Oproti pouzdrům PBGA je teplotní odpor u HSBGA obecně o 20% menší a dosahuje hodnot 5 až 6 W na rozptyl tepla pod přirozenou frekvencí. Tento typ pouzder může být aplikován na všechny druhy čipů shora, tedy například na 2 nebo 4 vrstvá BT a kovová jádra, což je jeho výhodou. Pouzdra HSBGA, jelikož jsou to levná a efektivní pouzdra, jsou výborným řešením v aplikacích, kde se vyžaduje vysoký výkon a vysoká rychlost integrovaných obvodů. Příkladem může být využívání této technologie v grafických čipech, u kterých bývá odvod přebytečného tepla velký problém. Dále nacházejí uplatnění v komunikačních a síťových integrovaných obvodech, osobních počítačích, datové komunikaci a v obvodech určených především pro spotřebitelské a komunikační aplikace. [1], [4]

3 Připojení čipu k pouzdru

Obvykle se pro připojení čipu k pouzdru využívá jedna technika popsaná v dalších odstavcích. O tom, jaká technika bude pro danou aplikaci použita, rozhoduje počet připojovaných čipů, rozteč jejich vývodů a v neposlední řadě také předpokládaná cena výsledného obvodu. [1]

3.1 Mikrodrátky ("*wire bonding*")

Metoda připojení čipu pomocí mikrodrátků je založena na vytváření svaru mezi mikrodrátkem a připojovací ploškou na čipu nebo vývodu pouzdra. Jedná se o nejstarší techniku pro připojování Si čipů k vývodům pouzder. [1]

Mikrodrátky jsou tažené tenké drátky o velmi malém průměru (menším než 50 μm), které se dobře svařují. Těmto vlastnostem musí odpovídat výběr materiálu. Nejčastěji se používají následující [1]:

- Al s 1% Si (AlSi 1%) - toto je standardní materiál pro kontaktování mikrodrátky. Si se do Al přidává pro zlepšení tažnosti slitiny, čímž umožní vytažení drátku s mnohem menším průměrem oproti čistému Al. Další výhodou je při kontaktování touto slitinou na Si čipy, že se do soustavy nedostává další prvek.
- Al s 0,5-1% Mg (např. AlMg 1%) - slitina Mg s Al se vytváří prokazatelně nižší měrný odpor a lepší mechanické vlastnosti ve zvýšené teplotě. Negativní vliv na poruchovost vinou Mg prokázán nebyl a cena je srovnatelná s AlSi.
- Au - používá se velmi často už od počátků této techniky, protože je velmi měkké a lze ho dobře táhnout do velmi malých průměrů. Tato vlastnost se ještě zlepšuje při použití příměsí. Nejčastěji se přidává Be a Ca v koncentraci pohybující se v rozmezí 5-10 ppm. Pro termokompresní spojování je Au dotováno Pt, protože umožňuje snadné vytváření kuliček jiskrovým výbojem.
- náhrady Au pro spotřební elektroniku - pro plastová pouzdra se používá čistý Al a Cu. Al ale není vhodný pro kontaktování na kuličku kvůli porézности kuliček. U Cu nastává problém u hermeticky neuzavřených pouzder, kdy se projevují korozní problémy. [1]

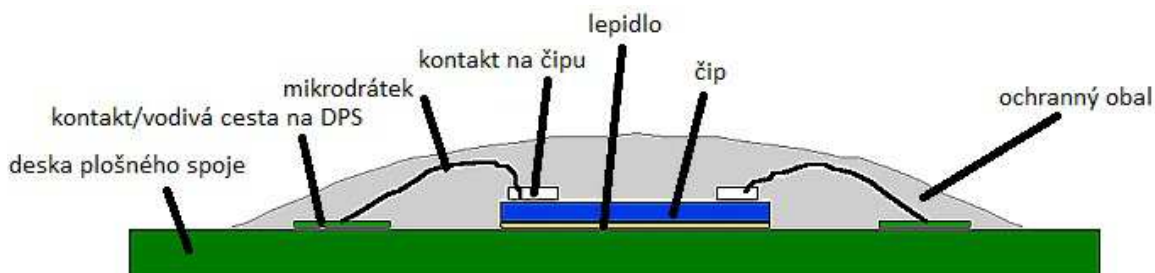
Připojování mikrodrátky se provádí známými základními metodami, které se používají řadu let nejen v technice polovodičů [1], [7]:

- termokompresie (u Au mikrodrátků)
- ultrazvukové sváření (u AlSi a AlMg mikrodrátků)
- termosonické sváření (kombinace ultrazvuku a termokompresie - u Au a Cu mikrodrátků)

Kontaktování je realizováno dvěma způsoby podle tvaru připojovacího nástroje a zakončení mikrodrátku [1], [8]:

- kontaktování na kuličku
- kontaktování hranou (klínem)

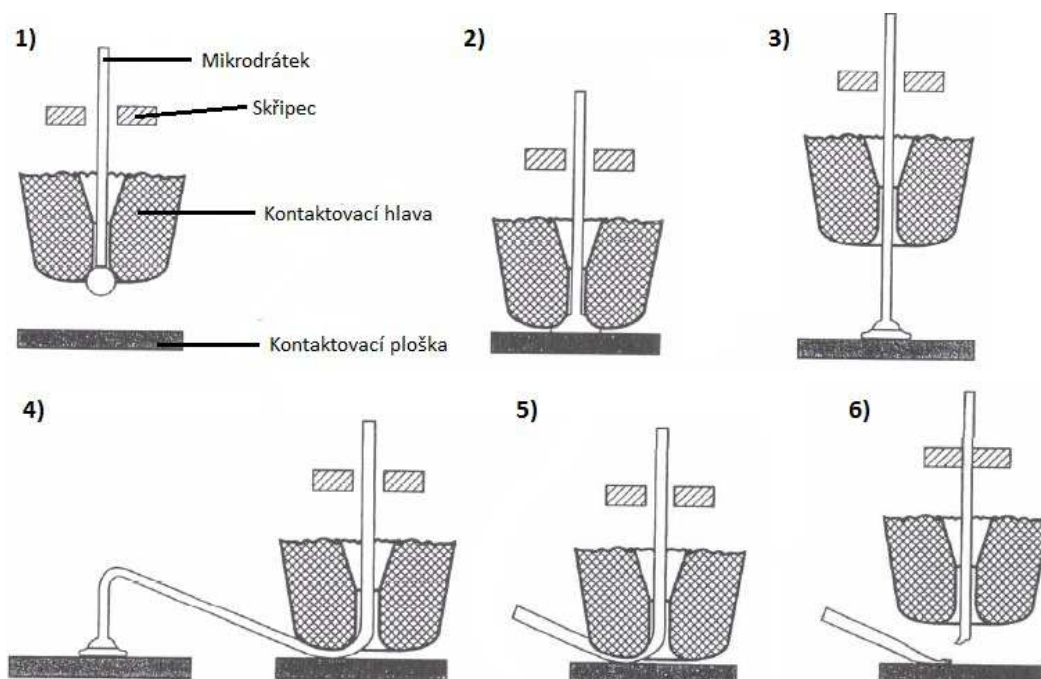
U většiny propojování čipů s pouzdry je využíváno kontaktování na kuličku (u více jak 90% případů). [1]



Obr. 2: Čip připojený mikrodrátky

3.1.1 Termokomprese

Čip ohřejeme na teplotu přibližně 250 - 300 °C (tuto teplotu musí mít kontakty čipu, které budeme připojovat mikrodrátkem). Tato teplota sama o sobě ale nestačí pro svaření kontaktu čipu s mikrodrátkem. Toho dosáhneme vzájemnou difuzí mřížek kontaktu s mikrodrátkem za pomoci tlaku. Díky tomu nemusíme čip ani drátek ohřívat až na teplotu tavení. Nejčastěji se při termokompresi používá Au, protože nekoroduje. [1], [8]



Obr. 3: Svařování termokompresí [8]

3.1.2 Ultrazvukové sváření

Používá se Al. Na něm se ale vytváří vrstvička oxidu, který brání při připojování termokompresí. Proto je kontaktování realizováno připojovací hlavou, která je rozkmitávána

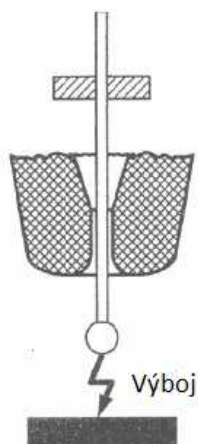
nejčastěji piezokeramickým měničem. Tato hlava tlačí drátek na kontakt, na který ho chceme přivařit, a při tom ho rozkmitává. Teplo k propojení vzniká třením, proto není potřeba kontakt ani drátek nijak jinak zahřívat. [8]

3.1.3 Termosonické sváření

Tato metoda je kombinací předchozích dvou, tedy termokomprese a ultrazvukového sváření. Čip ohříváme a na něj připojovaný drátek současně rozkmitáváme kontaktovací hlavou. [8]

3.1.4 Kontaktování na kuličku

Nejprve je na drátku vytvořena kulička. Ta se vytvoří buď vodíkovým plamenem nebo elektrickým výbojem. První zmíněná metoda byla používána jako první, ale později se ukázalo, že s ní není možné vytvářet kuličky s dostatečnou přesností a opakovatelností. Proto není vhodná pro kontaktování vysokého počtu vývodů s malou roztečí. V současnosti se pro vytvoření kuličky používá druhá metoda - elektrický výboj. [1], [7], [8]

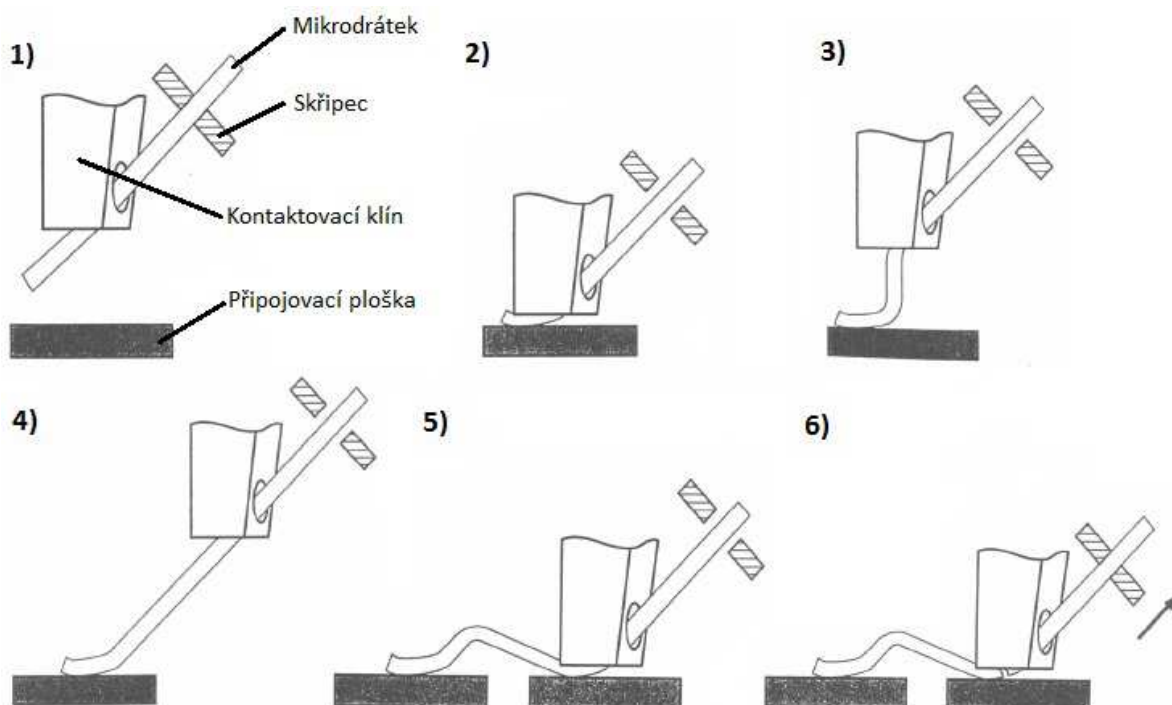


Obr. 4: Vytvoření kuličky pomocí elektrického výboje [8]

3.1.5 Kontaktování hranou

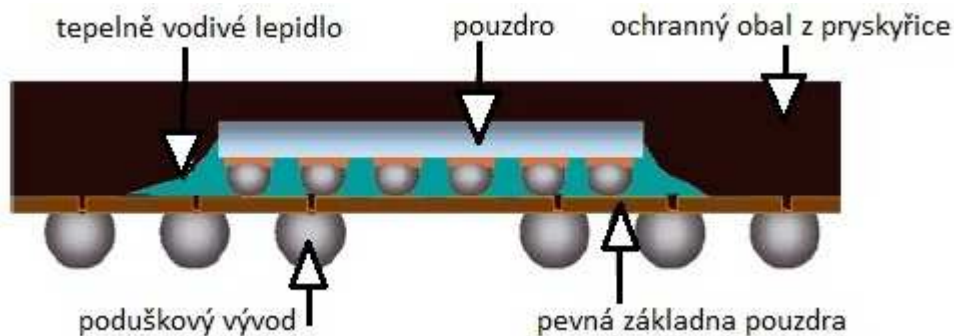
Při této metodě mikrodrátek prochází skrz kontaktovací hlavu. Na počátku je vysunut, aby vyčníval v potřebné délce, a skřípec, který kopíruje pohyb kontaktovací hlavy, ho drží sevřený. V dalším kroku hlava sjede dolů, skřípec se uvolní a mikrodrátek vytvoří kontakt s kontaktovací hlavou a kontaktem čipu. Hlava pak vyjede výš, přesune se nad další

kontaktovací plošku a tam vytvoří další kontakt. Pak se skřípec sevře a tím, že se kontaktovací hlava opět posune výš, se mikrodrátek oddělí. Tím je spoj vytvořen a postup se může opakovat. [1], [7]



Obr. 5: Svařování hranou [8]

3.2 Flip Chip a C4 ("Controlled collapse chip connection")



Obr. 6: Technologie Flip Chip

Tato technologie byla vytvořena asi v polovině šedesátých let. Čipy, které jsou její pomocí připojovány, mají poduškové vývody a připojují se lícni stranou dolů (obráceně než například mikrodrátky). Když jsou při této technologii používány vývody z pájky, bývá

označována v závislosti na výrobcí C4, ale také C⁴ nebo CCB ("*controlled collapse bonding*"). [1], [8]

Čipy se připojují na připojovací plošky pokryté vrstvou pájky. V průběhu připojování se čip převrátí "vrchní stranou dolů" a poduškové vývody se položí na jim odpovídající připojovací plošky podložky. Následně se to celé v peci přetaví a všechny vývody čipu se připojí najednou. Stává se, že po přetavení při připojování dochází k roztékání pájky i na místa, kam je to nežádoucí. Proto se plošky ohraničují nepájkivou maskou většinou z tlusté skleněné vrstvy, která má vyleptané otvory v místech připojovacích plošek. [1]

Podle [1] bývá průměr poduškových vývodů od 100 μm do 250 μm a na jedno čipu jich může být i více než 700.

U techniky C4, tedy připojování čipu metodou Flip Chip, není možnost využití vizuální kontroly kvality připájení čipu po jeho montáži na základnu pouzdra. U základny je nutností její vysoká rovinnost a stejná výška poduškových vývodů. Dalším problémem je odvod tepla, proto se chip špatně chladí. Sáláním a přestupem je chlazení jen malé a vedením se chladí pouze přes vývody. Pro lepší odvod tepla se prostor mezi čipem a základnou často vyplňuje tepelně vodivým lepidlem. [1], [8]

3.2.1 Příprava poduškových vývodů vakuovým napařováním

Nejdříve se na substrát pokrytý pasivační vrstvou, do které jsou vyleptány díry nad Al vrstvou kontaktující aktivní oblast čipu, přichytí kovová maska (nejčastěji planžeta z Mo, ve které jsou vyleptány otvory). Dále se vyčistí v Ar plasmě od povrchových kysličníků a dalších nečistot pro dosažení co nejmenšího odporu poduškových vývodů (dosahuje se hodnot menších než 10 $\text{m}\Omega$) a při nepřerušném vakuu se napaří jednotlivé vrstvy. Jako první se na Al vrstvu, která kontaktuje aktivní oblast čipu, napaří vrstva Cr. Ta k Al vrstvě zajistí dobrou adhezi poduškového vývodu a vytvoří bariéru zabráňující s ní reakci pájky. Jako druhá se napaří vrstva Cu, na kterou se nanese bleskovým odpařením vrstva Au, která je ale velmi tenká, zlepšuje smáčitelnost Cu vrstvy PbSn a také působí jako antioxidant pro Cu vrstvu. Jako poslední je napařena PbSn pájka a provede se přetavení v H₂ atmosféře. Tím získáme kulové tvary poduškových vývodů. [1]

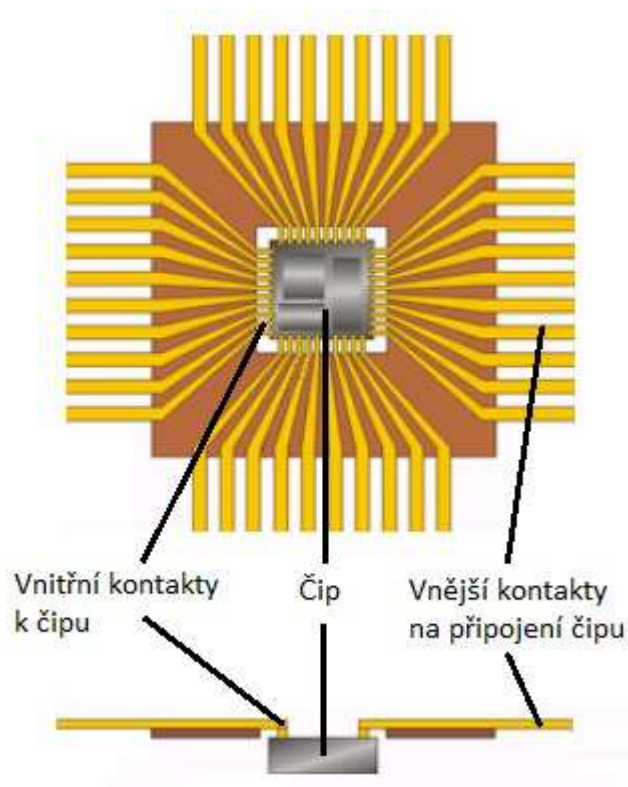
Příprava poduškových vývodů vakuovým napařováním je nejstarší technologií, která je ještě dnes v hojném počtu využívána. Jejím největším záporem ve spektru všech ostatních technologií je vysoká cena. [1]

3.2.2 Příprava poduškových vývodů fotolitograficky

Oproti předchozí technologii vakuovému napařování je příprava poduškových vývodů fotolitograficky využívána v mnoha různých variantách stále více, je levnější a dokážeme díky ní realizovat poduškové vývody ještě menších vývodů a roztečí, které nelze vytvořit pomocí nepřímých masek tvořených kovovými planžetami. Tato technologie se používá pomocí přímých fotoresistových masek (masek z vrstvy fotoresistu přímo na substrátu). Vrstvy se vytvářejí galvanickým nanášením v požadovaných tloušťkách. U této technologie existuje velké množství modifikací, které se ale v základu drží tohoto postupu. [1]

3.3 Technologie TAB ("*Tape automated bonding*")

Touto technologií je montováno několik procent světové produkce polovodičových integrovaných obvodů. Podobně jako u Flip Chip jsou i tady čipy opatřeny kulovými vývody ale s tím rozdílem, že zde je napojení na substrát provedeno za pomoci souboru vývodů z úzkých pásek vodivé fólie o šířce přibližně 100 - 200 μm , které jsou už předem připojené k čipu a fixované na páskový nosič. [1], [7]



Obr. 7: Technologie TAB [8]

4 Montáž pouzder BGA

Montáž pouzder probíhá ve dvou krocích. Nejdříve musíme pouzdro správně prostorově zorientovat s kontakty na desce plošného spoje a osadit. Pokud nedojde k přesnému osazení a přesah nepřevyšuje 50% šířky vývodu, projeví se samovystředovací schopnost pouzdra (viz. obr.8). Po přesném osazení můžeme pokračovat pájením. Celý proces se provádí buď automaticky společně s dalšími součástkami nebo ručně pomocí stolních opravárenských stanic. [10]

4.1 Sesouhlasení vývodů a osazení

Správná poloha pouzdra se ověřuje optickým porovnáním. Podle [10] existují dva způsoby tohoto porovnání:

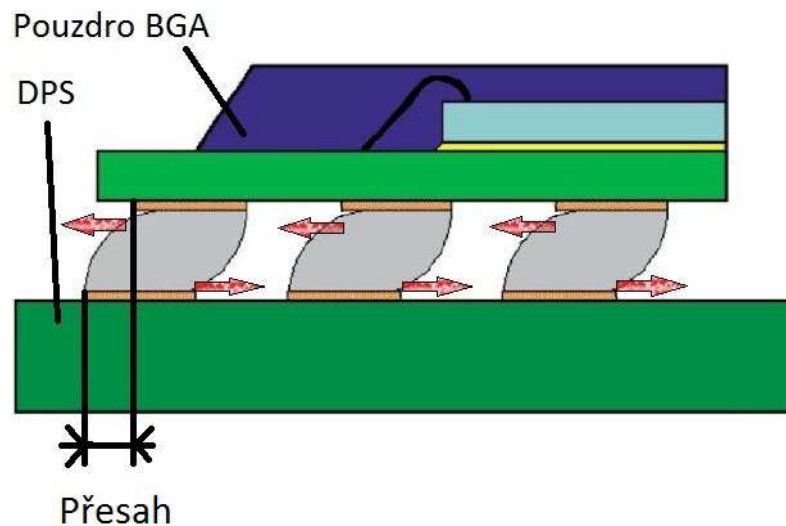
- obrysu pouzdra s potiskem na desce plošných spojů
- kuličkových vývodů s pájecími ploškami na DPS

Po sesouhlasení vývodů se sesouhlasená pouzdra automaticky nebo mechanicky osazují do předem naneseného tavidla nebo pájecí pasty. [7], [10]

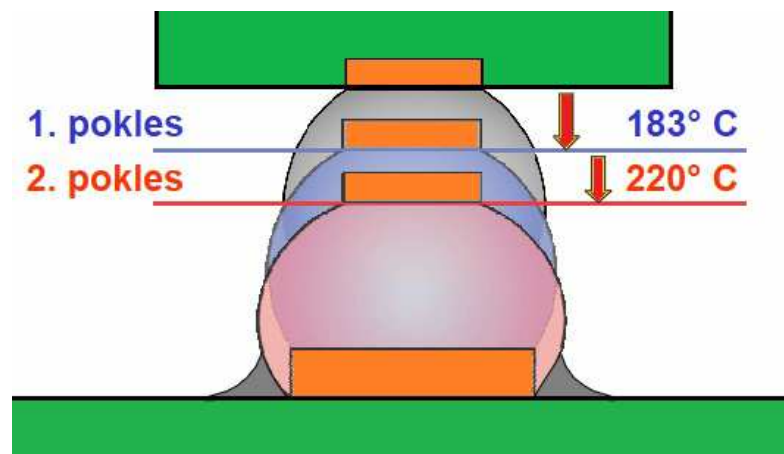
4.2 Pájení

To probíhá v přetavovacích pecích spolu s dalšími součástkami nebo opět samostatně za pomoci stolní opravárenské stanice. Při pájení pouzder BGA se projevují tři významné jevy [10]:

- samovystředovací schopnost pouzder BGA (viz. Obr. 8)
- efekt dvojího poklesu (nejvíce při osazení do pájecí pasty - viz. Obr. 9)
- teplotní a mechanická hystereze



Obr. 8: Samovystředovací schopnost při pájení BGA



Obr. 9: Efekt dvojího poklesu [10]

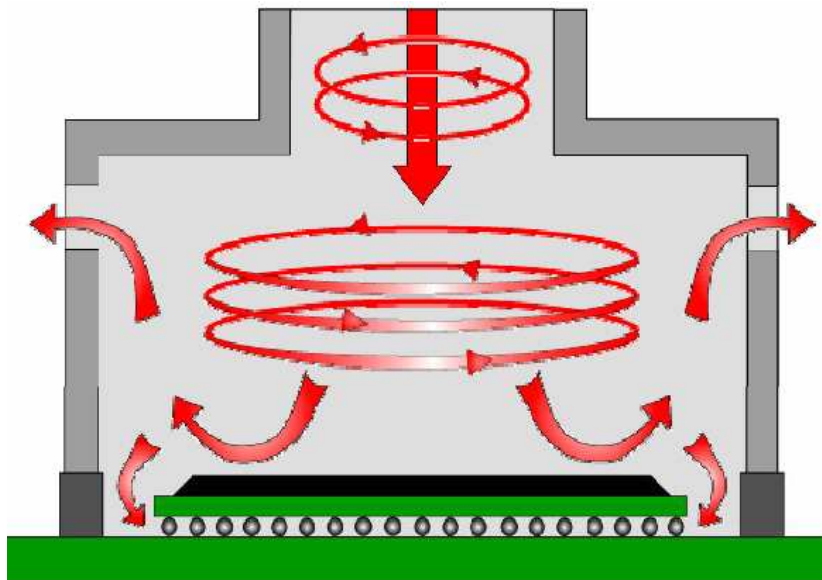
4.2.1 Stolní opravárenské stanice

Stolní opravárenské stanice jsou určeny pro ruční montáž, demontáž a opravy pouzder BGA. Rozdělujeme je podle způsobu ohřevu na dvě základní skupiny [10]:

- stanice horkovzdušné
- stanice s IR ohřevem

U horkovzdušných stanic jsou při pájení součástky ofukovány horkým vzduchem, který vychází ze speciálních trysek. Ty jsou vyměnitelné, abychom docílili ofukování celé plochy

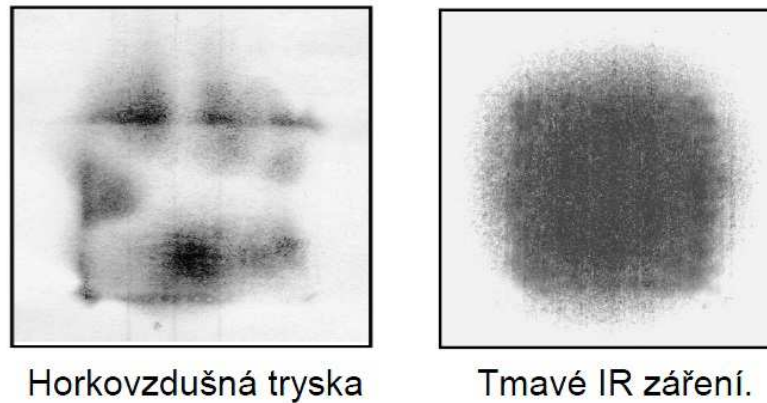
ve správné intenzitě a docházelo k rovnoměrnému ohřevu. Proto bývá k dispozici i spodní přehřev. Pro docílení bezchybného pájení je nutné správné nastavení teploty a tlaku horkého vzduchu, teploty přehřevu a také správné délky trvání jednotlivých fází pájecího cyklu. [10]



Obr. 10: Ukázka proudění vzduchu v trysce [10]

U stanic s IR ohřevem je místo horkého vzduchu pro ohřev využíváno IR záření a to i pro spodní přehřev. K regulaci ozařované a tím i ohřívané plochy se používají stínící lamely. Tento druh ohřevu má sice oproti horkovzdušnému vyšší pořizovací náklady, ale jeho nespornou výhodou je rovnoměrný ohřev celé plochy pouzdra. Dále neovlivňuje okolní součástky a skutečná teplota při pájení je neustále porovnávána se zadaným teplotním profilem, čímž nehrozí přehřátí součástky. Jelikož lze proces sledovat pomocí kamery, můžeme si jednoduše ověřit dvojí pokles. [10]

Pro horní i spodní IR ohřev se používá tmavé IR záření o vlnové délce 2 μm až 8 μm . U něj byl podle [10] prokázán optimální poměr absorpce a reflexe. Díky tomu jsou pouzdro, deska plošných spojů i vývody součástek zahřívány rovnoměrně. Tím se snižuje riziko poškození při pájecím procesu.



Obr. 11: Porovnání ohřevu horkovzdušnou tryskou a tmavým IR zářením pouzdra BGA 169
(převzato z [10])

4.2.2 Hystereze pouzder BGA

Při ochlazování zapájeného spoje dochází k tomu, že spoje tuhnou rychleji a při nižší teplotě než je bod tání slitiny. Tím může dojít k mírnému nadzvednutí pouzdra, které je ovšem pro nás nežádoucí. Tento jev závisí na velikosti a povrchové úpravě pájecích ploch, počtu a objemu spojů, ale také na vlastnostech pájecí slitiny a vlastní hmotnosti pouzdra. [10]

Další problém je vznik zkratů. Ty mohou vznikat z těchto důvodů: [10]

- pouzdro je příliš těžké
- je nastavena příliš vysoká teplota pájecí pasty
- příliš vysoký tlak horkého vzduchu
- bylo naneseno velké množství tavidla
- špatný nátisk pájecí pasty
- došlo k navlhnutí substrátu nebo BGA pouzdra, které zapříčinilo jejich následné prohnutí

5 Kontrolní metody

Již na začátku práce jsou popsány funkce, které pouzdro jako takové musí plnit. Mezi ně patří například rozvod napájecí energie, rozvod elektrického signálu, odbod tepla a další. Tyto jeho funkce je potřeba průběžně kontrolovat, neboť celý proces výroby je zatížen určitými chybami. K tomuto účelu existují kontrolní metody. Zde se budeme zabývat kontrolami správného připojení, což znamená hlavně elektrických vlastností pouzdra a jeho připojení na desku plošných spojů.

5.1 MDA a In-circuit testovací systémy

Tyto testovací systémy jsou naprosto běžným prostředkem pro kontrolu osazených desek plošných spojů. Princip je takový, že je každý uzlový bod elektrického schématu kontaktován měřicí jehlou (sondou). Ta je schopna snímat a přenášet naměřený signál z desky plošných spojů, který je v testovacím systému vyhodnocován. Lze takto snadno odhalovat triviální závady. Nevýhodou je nemožnost přesné simulace funkce desky. Jelikož ale triviální závady tvoří převážnou většinu závad podstatně převyšující (podle [11] dokonce o více jak 90%) závady funkční, má tento test velmi důležitou úlohu.

Jsme s ním schopni odhalit tyto závady [11]:

- přerušení
- zkrat
- vadné a chybějící součástky
- součástky mimo toleranci
- otočené součástky
- nezapájené vývody pouzder BGA, QFP a PLCC
- podle vybavení testovacího systému i závady funkce

5.2 Kontrola pomocí RTG

Tato metoda má nejen pro testování BGA vzhledem ke špatnému přístupu ke kontaktům největší význam, ale i vzhledem ke zvyšující se hustotě součástek a deskách plošných spojů. Je využíváno stejného principu jako v lékařství. Rentgenové paprsky se šíří testovaným předmětem a vytváří stínový obraz, který je založen na montážní hustotě a atomovém čísle

základních atomů předmětu. Když projdou předmětem, dopadají na fluorescenční stínítko, čímž se dostávají do viditelného spektra. Přes zrcadlo je kamera už snímá jako viditelné světlo. [9]

5.3 Optické testovací systémy

Metoda kontroly CCD kamerou je do jisté míry srovnatelná s klasickou optickou kontrolou, kdy zkušený pracovník pomocí mikroskopu odhaluje chyby. Ale aby se proces vylepšil a zautomatizoval, byly vyvinuty automatické optické testovací systémy AOI. Ty jsou schopny ihned odhalit následující technologické závady na desce plošných spojů [9], [11], [12]:

- chybějící a otočené součástky
- zaměněné součástky
- nezapájené vývody integrovaných obvodů
- chybné pájení

Základem této metody je získání obrazu kontrolované části desky plošných spojů, který se uloží do paměti a následně porovná se vzorem skrze matematické algoritmy. Jak už bylo řečeno, obraz se snímá za pomoci CCD kamer s vysokým rozlišením. Dnes už optické testovací systémy pokročily tak, že s jejich pomocí lze testovat i vývody pod pouzdra BGA a CSP, včetně zkoumání spájených spojů, v některých případech dokonce i lícni čip. [9], [11], [12], [13]

V případě zkoumání pouzdra BGA se hlava spustí k součástce tak, aby se na jedné straně součástky (zde pouzdra BGA) nacházel mikroskop a na druhé straně světelný zdroj, který pouzdro osvětluje ze zadní strany naproti mikroskopu. Pokud provádíme skenování podél součástky, tak je možné prohlížet i jednotlivé řady spojů, nastavováním zorného pole zase můžeme sledovat a hodnotit vnitřní propojení. Toto vše je vidět na monitoru s plochým stínítkem, protože součástí mikroskopu je právě i kamera CCD s vysokým rozlišením. [13]

5.4 Funkční testování

Základem principu testování u této metody je chápání desky plošných spojů jako uzavřeného celku, který má pouze vstupy a výstupy. Proto by měly k různým signálům na vstupu existovat definované druhy odezvy na výstupu. Tímto způsobem lze testovat desky plošných spojů s logickými obvody, kdy je možnost logickou sít' vysíláním logických stavů

a jejich čtením na výstupu. Dále následuje porovnání s definovaným stavem pomocí počítače a vyhodnocení, zda deska funguje správně. K testovacímu zařízení se deska připojuje jednoduše konektorem, někdy také jehlovým polem. Způsob připojení je závislý na druhu desky a také fázi jejího výrobního procesu. [9], [13]

U funkčního testování je nejobtížnější lokalizace závady a návrh optimálního testu. Pro něj existuje více způsobů. Navrhnout se dá ručně na základě zkušeností pracovníka (nejlépe přímo konstruktéra desky), ručně s ethalonem (snímají se odezvy na normálové desce), náhodnou generací vstupních signálů, které se ověřují na normálové desce, a nebo je může navrhnout počítač využívající pro tento úkon vhodného programového vybavení. Poslední možnost je ale velmi zdlouhavá a je k ní potřeba vysoce kvalifikovaných pracovníků. V praxi se ovšem nejvíce uplatňuje využití kombinace vyjmenovaných metod. [9], [13]

Výhodou funkčního testu tedy je jednoduché připojení desky k testovacímu zařízení, prověření dynamických parametrů desky a prověření logické sítě. Oproti tomu za nevýhody považujeme časovou náročnost určení závady, složité dohledání vadné součástky, nutnost kvalifikované obsluhy a velmi složitý a časově náročný návrh testovacího programu. [9], [13]

5.5 Shrnutí

Celý proces výroby desek plošných spojů je pod neustálou kontrolou již od první fáze, v průběhu, až do úplného konce výroby, kdy se testuje funkčnost hotového výrobku. Umístění i intenzita a složitost testovacích metod ve výrobě je dána náročností jednotlivých výrobních fází a cenou, která je závislá hodně na čase potřebném na onu operaci. Vždy je snaha co nejvíce minimalizovat chyby ve výrobě a v případě jejich vzniku je co nejdříve odhalit, protože pak jakákoli prodleva stojí nemalé peníze. Toto platí pro každou součástku, která bude tvořit část finálního výrobku včetně pouzder BGA. I jejich kontroly jsou závislé na výrobním procesu, složitosti a ceně. Proto jsou v této práci uvedeny ty nejvíce používané a jejich jednotlivé nebo i kombinované využití pro konkrétní účel závisí na velkém množství faktorů, stejně jako u výroby celého výrobku. Aby byla práce kompletní, vložil jsem do příloh příklady některých poruch se stručným popisem. [7], [9], [11]

Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se s problematikou výroby a připojováním součástek BGA, které byly patentovány již několik desítek let zpět, ale nebyly využity hlavně kvůli jejich ceně. Až technický pokrok, nové materiály a s tím vším nezadržitelné zmenšování v elektronice přineslo nutnost zmenšování i ke klasickým pouzdrům, které z tohoto důvodu přestaly v mnohých aplikacích dostačovat. To bylo důvodem počátku využívání pouzder BGA a obnovení jejich vývoje. Díky němu dnes známe už velké množství jejich druhů, které se liší nejrůznějšími vlastnostmi, aby vyhovovaly nárokům pro použití v širokém spektru aplikací. Proto jsem v druhé části nazvané "Pouzdra BGA" sestavil stručný přehled těch nejpoužívanějších vždy s krátkým popisem jejich předností, případných nedostatků a příkladem klasického využití.

Dále bylo cílem popsat některé z oprav, protože kvůli neustálé miniaturizaci se stávají opravy stále složitějšími a je pro ně stejně jako pro většinu úkonů spojených s těmito součástkami zapotřebí moderních technologických postupů za pomoci moderní techniky, což bývá dost finančně náročné, a proto se tomu snažíme předcházet. To je důvod, proč jsem v této práci vyčlenil pár stránek, kam jsem vyhledal a popsal seznam těch běžných kontrol, které jsou s pouzdry BGA nějak spojené.

Protože jde dopředu vývoj pouzder, objevují se i nové chyby pájení. Z tohoto důvodu i kontroly pájení, které se odvíjí od technologických postupů při výrobě a různě se kombinují, aby se co nejvíce předcházelo chybám ve výrobním řetězci, prochází stále novými změnami. Vyvíjí se neustále nové metody a technologie, jak chyby nejrychleji nalézt, ale hlavně jak jim předcházet. Ideální by bylo vymyšlení postupu, který by je minimalizoval do hodně malých čísel. Jak moc se tomuto cíli v budoucnu přiblížíme, nedokážu odhadnout.

Použitá literatura

- [1] MACH, P.; SKOČIL, V.; URBÁNEK, J.: *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 440 s. ISBN 80-01-02392-3
- [2] SZENDIUCH, I.: *Mikroelektronika a technologie součástek* [online], [cit. 2012-04-28]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2009-BMSTS-1-perspektivy.pdf>
- [3] SZENDIUCH, I.: *Mikroelektronika a technologie součástek* [online], [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2009-BMSTS-2-polovodicove-cipy.pdf>
- [4] HŘEŠIL T.: *Nové směry v pouzdření*. Brno 2011, Bakalářská práce, VUT v Brně, s. 8, 10-57.
- [5] Technicest: BGA (Ball Grid Array). [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.technicest.com/bga_menu.php
- [6] Svět hardware: BGA. [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.svethardware.cz/glos.jsp?doc=C353B6C812EA2CB9C125736E004D6FC0>
- [7] SZENDIUCH, I.: *Mikroelektronické montážní technologie*. Vyd. 1. Brno: Nakladatelství VUT, 1997. ISBN 80-214-0901-0
- [8] MACH, P.: *Kontaktování čipů* [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Kontaktovani%20cipu.pdf>
- [9] ABEL, M.: *SMT Technologie povrchové montáže*. Vyd. 1. Pardubice: Nakladatelství Platan, 2000. ISBN 80-902733-1-9
- [10] SZENDIUCH, I.: *Montáž pouzder BGA* [online], [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/cv_bga.pdf
- [11] ABEL, M.; CIMBUREK, V.: *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Vyd. 1. Pardubice: ABE.TEC, s.r.o., 2005. ISBN 80-903597-0-1
- [12] HORNA S.: *Elektrické testování desek plošných spojů*. Plzeň 2005, Bakalářská práce, ZČU Plzeň
- [13] Optická kontrola BGA. [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-kontrolnich-systemu/opticka-kontrola-bga-0/>

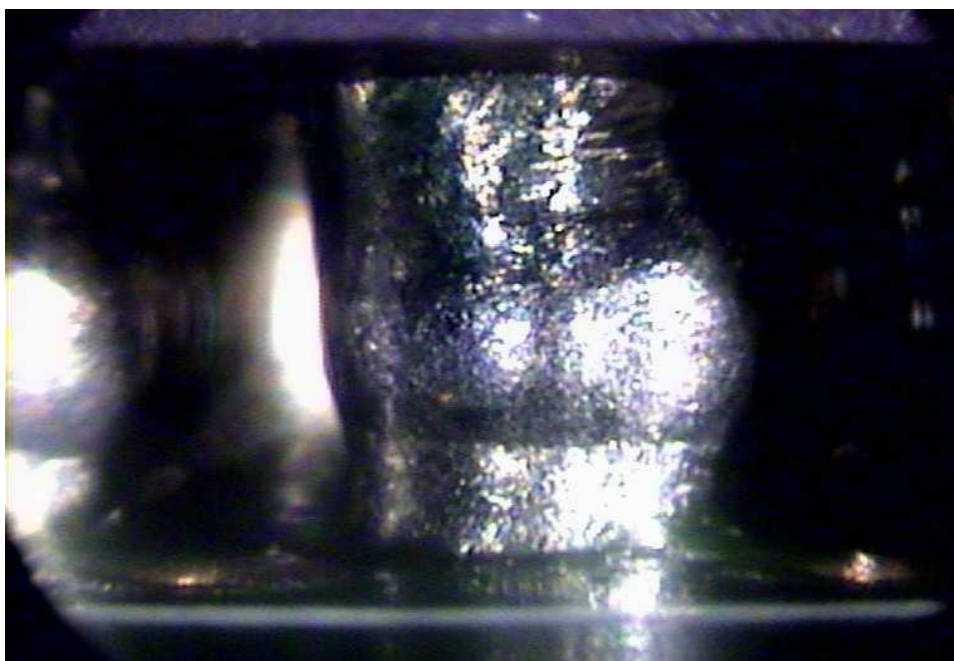
-
- [14] Soldering Defects Database [online]. [cit. 2012-05-26]. Dostupné z:
http://defectsdatabase.npl.co.uk/defectsdb/defects_query.php
- [15] SZENDIUCH, I.: *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Vyd. 1. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-3292-6
- [16] Palm Technology: COB Process [online]. [cit. 2012-05-27]. Dostupné z:
<http://www.palmtech.com.tw/COB-process.htm>
- [17] PBT: Technologická zařízení a materiály pro elektrotechniku [online]. [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://www.pbt.cz/dodavatele/phoenix-x-ray/28/33/>
- [18] XJ TAG: Testing BGA Devices [online]. [cit. 2012-05-27]. Dostupné z:
<http://www.xjtag.com/support-jtag/jtag-bga-devices.php>
- [19] PC MAG.com: BGA [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z:
http://www.pcmag.com/encyclopedia_term/0,1233,t=BGA&i=38577,00.asp
- [20] STARÝ, J.; KAHLE P.: *Plošné spoje a povrchová montáž* [online], [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/METMEL/studijni-pomucky/METMEL_11_SP_Plosne_spoje_a_povrchova_montaz.pdf

Přílohy

Ukázky defektů u BGA



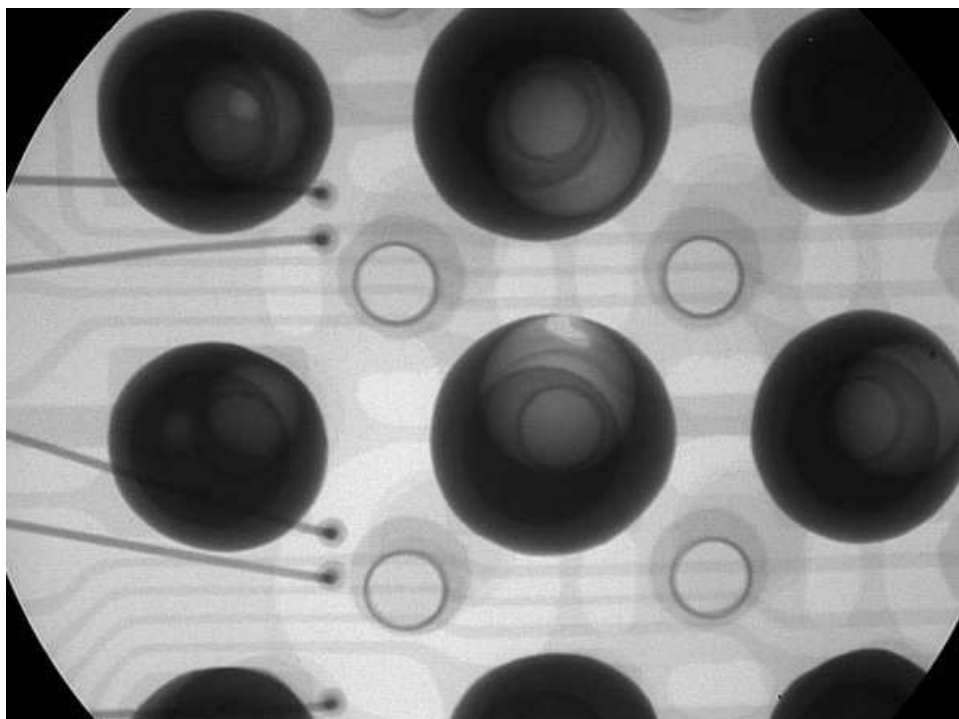
Obr. 12: Špatné připájení způsobené nečistotami a vlhkostí (převzato z [14])



Obr. 13: Špatná smáčitelnost kuliček při přetavení častá hlavně u CBGA (převzato z [14])



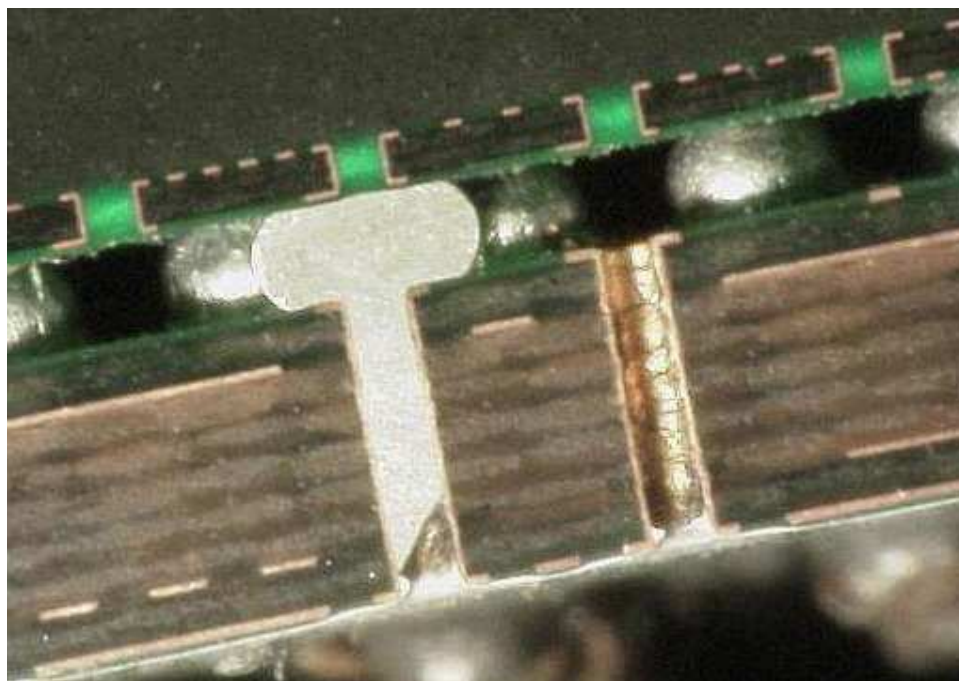
*Obr. 14: Špatné smáčitelnost na povrchu DPS, příčinou může být vlhkost
(převzato z [14])*



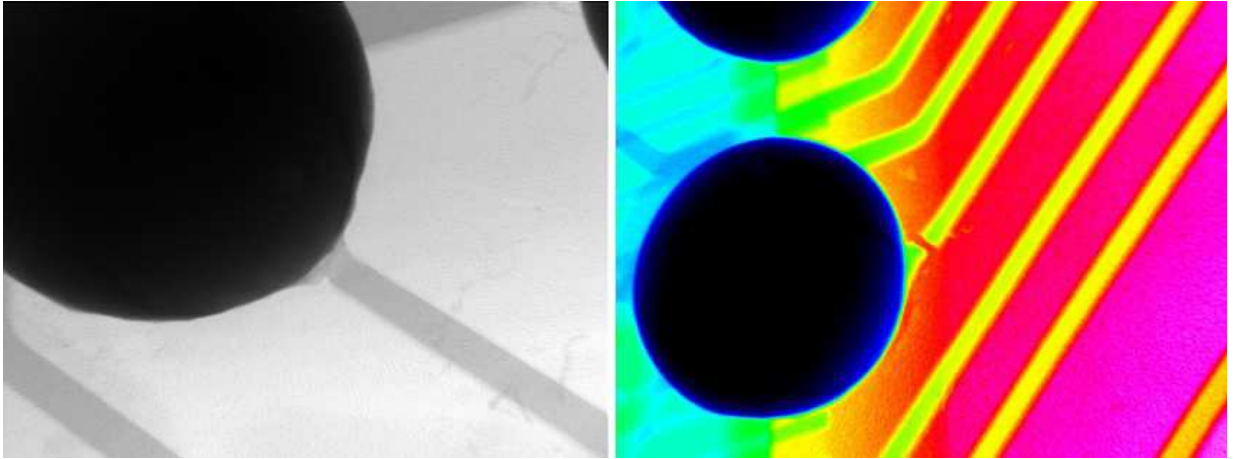
Obr. 15: Pohled pomocí RTG na prasklý spoj (převzato z [14])



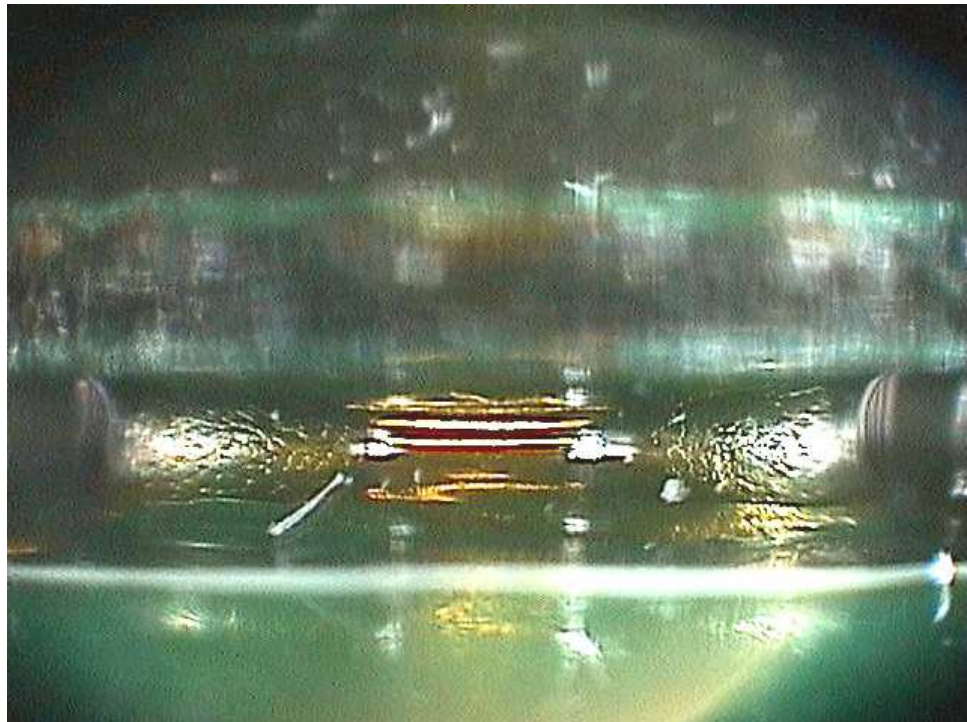
*Obr. 16: Trhlina na spoji, příčinou může být vlhkost nebo také délka a teplota pájení
(převzato z [14])*



Obr. 17: Přebytek pájky pod BGA po pájení vlnou (převzato z [14])



Obr. 18: Přerušená vodivá cesta pod BGA při kontrole rentgenem, způsobená pravděpodobně vysokou teplotou (různá teplotní roztažnost materiálů) (převzato z [14])



Obr. 19: Zkrat zjištěný optickou kontrolou způsobený velkým množstvím tavidla (převzato z [14])