

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

Výzkum jakosti pájených spojů u pouzder BGA a QFN

RESEARCH OF THE QUALITY OF SOLDER JOINTS BY BGA AND QFN PACKAGES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Alexandr Otáhal

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Alexandr Otáhal

ID: 72327

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Výzkum jakosti pájených spojů u pouzder BGA a QFN

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte problematiku pouzder s kulovými vývody (BGA) a bezvývodových pouzder (QFN). Rozeberte možnosti zjišťování jakosti výše uvedených zapájených pouzder a navrhnete vhodný testovací substrát. Určete vliv vybraných technologických faktorů dostupnými diagnostickými postupy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

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

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce popisuje specifika technologií a výrobu pouzder BGA a QFN. Dále shrnuje jejich nejpoužívanější metody zkoušek a kontroly jakosti. Popisuje výrobu zařízení pro pájení v dusíkové atmosféře s následným porovnáním pájených spojů vzniklých v různých atmosférách pouzdra BGA. Nakonec shrnuje poznatky o procesu pájení a odpájení bezolovnatými pájkami pro pouzdra BGA s následným experimentálním vyhodnocením příčin nefunkčnosti opravovaných vzorků.

Klíčová slova

bezolovnaté pájky, pájení přetavením, BGA, QFN, kulové vývody, jakost, dusíková atmosféra, pájení v parách, opravy

Abstract

This diplomas thesis deals with specific technologies and the manufacturing of BGA and QFN packages. There are also summarized the most used test methods for assessing the reliability for these packages. Part of this work describes the designed construction of equipment for soldering in a nitrogen atmosphere, followed by comparison solder joints of BGA forming in different atmosphere. Finally, there is summarized some experience about the process of soldering and desoldering of BGA packages using lead-free solders, followed by experimental evaluation of the causes of malfunction of repaired samples.

Keywords

lead-free solder, reflow soldering, BGA, QFN, ball terminals, quality, nitrogen atmosphere, vapor phase soldering, repair

Bibliografická citace

OTÁHAL, A. Výzkum jakosti pájených spojů u pouzder BGA a QFN. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci téma Výzkum jakosti pájených spojů u pouzder BGA a QFN 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 24. Května 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Rovněž děkuji panu Ing. Jankovskému a dalším pracovníkům laboratoře mikroelektronických technologií, kde jsem diplomovou práci zpracovával, za užitečné rady.

V Brně dne 24.5.2012

.....
podpis autora

Obsah

1	ÚVOD	7
2	POUZDRA	8
2.1	BGA	8
2.2	QFN.....	9
3	NÁVRHOVÁ PRAVIDLA VYTVÁŘENÍ DPS	14
3.1	BGA	14
3.1.1	<i>Vodivé cesty</i>	14
3.1.2	<i>Pájecí plošky</i>	15
3.2	QFN.....	18
4	PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ JAKOST PÁJENÉHO SPOJE	20
4.1	POVRCHOVÁ ÚPRAVA	20
4.2	PRACOVNÍ ATMOSFÉRA	21
4.3	TEPLOTNÍ PROFIL.....	21
4.4	ZÁSADY U OPRAV A PŘEPRACOVÁNÍ.....	22
4.5	REBALLING POUZDER BGA.....	23
5	METODY TESTOVÁNÍ JAKOSTI	24
5.1	ELEKTRICKÉ TESTY	24
5.1.1	<i>Testovací patice</i>	24
5.1.2	<i>Metoda sériového spojení vývodů</i>	26
5.2	MECHANICKÉ TESTY	26
5.2.1	<i>Stříhová a tahová síla</i>	26
5.3	OPTICKÉ TESTY	27
5.3.1	<i>Rentgen</i>	27
5.3.2	<i>Optická inspekce</i>	28
6	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
6.1	NÁVRH A KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ PRO PÁJENÍ V DUSÍKOVÉ ATMOSFÉŘE	30
6.1.1	<i>Termočlánkové pole</i>	31
6.1.2	<i>Topné těleso</i>	31
6.1.3	<i>Izolace topného tělesa od stěn exsikátoru</i>	35
6.1.4	<i>Regulace a napájení topného tělesa</i>	36
6.1.5	<i>Konečné provedení exsikátoru</i>	37
6.2	VLIV RŮZNÝCH ATMOSFÉR NA PEVNOST VE STŘIHU U PÁJENÉHO SPOJE BGA	40
6.2.1	<i>Návrh testovacích substrátů</i>	40
6.2.2	<i>Příprava vzorků</i>	42
6.2.3	<i>Testování stříhové síly</i>	46
6.2.4	<i>Výsledky a vyhodnocení</i>	48
6.3	KONTROLA PÁJENÝCH SPOJŮ U NEFUNKČNÍCH KOMPONENT PRO PC S OPRAVOVANÝMI BGA POUZDRY.....	49
6.3.1	<i>Postup</i>	49
6.3.2	<i>Optická inspekce</i>	49
6.3.3	<i>Mikrovýbrusy</i>	53

6.3.4	<i>Održené pouzdro vlivem přípravy na mikrovýbrusy</i>	57
6.3.5	<i>Zhodnocení dosažených výsledků</i>	58
7	ZÁVĚR	60
	POUŽITÁ LITERATURA	61
	SEZNAM ZKRATEK	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ	63
	SEZNAM TABULEK	65
	SEZNAM SYMBOLŮ	66
	SEZNAM PŘÍLOH	66
	PŘÍLOHA Č.1	67

1 Úvod

Vlivem rychlého vývoje v miniaturizaci elektronických obvodů a systémů způsobené zvyšující se hustotou prvků na polovodičových čipech bylo nutné zajistit také potřebnou jakost a spolehlivost výsledného produktu za co nejmenší cenu odpovídající každé konkrétní aplikaci. Z těchto důvodů postupně vznikala nová pouzdra a způsoby pouzdření čipů, jež sledovaly požadavky na lepší elektrické vlastnosti a také splňovaly požadavky na rostoucí počet vývodů. Přitom docházelo postupně také k vývoji technologie připojování pouzder na substrát, čehož výsledkem jsou různé typy provedení pouzder a také různé tvary vývodů. Od prvních pouzder používaných po mnoho let, jako jsou například pouzdra DIL s vývody na dvou protilehlých stranách, QFP s vývody na všech čtyřech stranách, která měla převážně klasické vývody tvořené poniklovanými dráty, se zásadně změnil tvar vývodů a způsob připojení do obvodu. Dnes se již běžně používají pro prvky se složitější architekturou (mikroprocesory, flash paměti atd.) nové typy pouzder s kontakty vytvořenými na spodní straně součástky. Jsou to především pouzdra BGA, QFN a některé další, jako např. pouzdra CSP (Chip Scale Package) nebo přímo polovodičové čipy v provedení Flip chip. Díky těmto moderním způsobům pouzdření a propojování je proces montáže elektronických sestav ekonomicky výhodnější. Především dochází k velké úspoře místa a také značnému zlepšení elektrických parametrů.

Jedním z hlavních problémů, který zasáhl do montáže elektronických komponent je v dnešní době nutnost používání bezolovnatých slitin namísto dříve používaným a osvědčeným pájkám na bázi SnPb. Dalším zásadním problémem, který se projevuje stále více, jsou snižující se rozměry pájecích plošek. Proto při vytváření spojů dochází často k defektům, jejichž původ je v mnoha faktorech, jako např. z důvodu náchylnosti na přesnost procesu pájení, jakost použitých materiálů a také samotných součástek.

Tato práce je právě zaměřena na optimalizaci montáže pouzder BGA a QFN, resp. na zajištění jakosti jejich připojování včetně výměny, jež je častým případem oprav. Zvolený způsob experimentů se zaměřuje na pájení pouzder BGA a QFN s bezolovnatými slitinami v různých atmosférách a nahlíží na možnosti zvýšení jakosti vzniklých vodivých spojení. Shrnuje také používané testovací metody pro zjišťování jakosti zapájení pouzder BGA a QFN. Pro tento účel byl navržen a realizován exsikátor, který umožňuje provádění řízených experimentů v ochranné atmosféře.

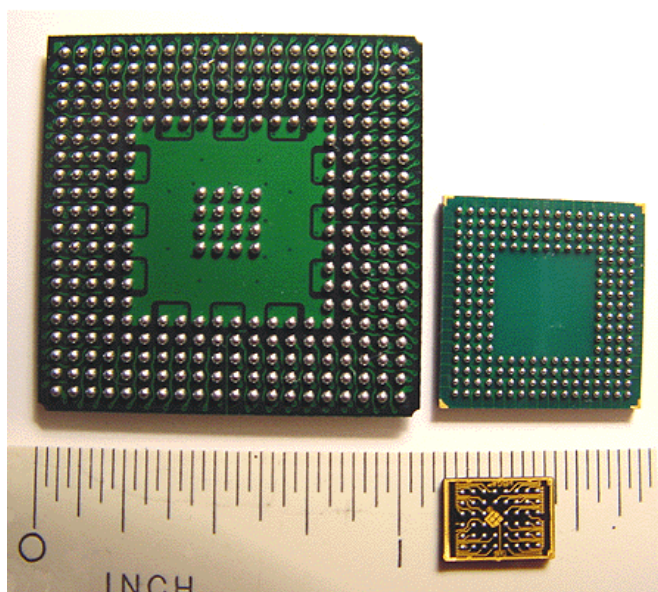
2 Pouzdra

2.1 BGA

Pouzdro samo o sobě je nejčastěji čtvercového tvaru, kde je na spodní straně pole pájecích plošek. Na ploškách jsou nataveny buď pájkové válečky, nebo ve většině případů pájkové kuličky. Těmito kuličkami se BGA zapájením připojuje do obvodu. Hlavní výhody tohoto způsobu provedení vývodů jsou menší plocha součástky, menší rozteč a parazitní vlastnosti, jako jsou kapacita a indukčnost.

Existuje celá řada různých typů pouzder BGA, jež se liší nejen počtem a uspořádáním vývodů, ale především použitým materiálem nosného substrátu. Podle toho můžeme rozlišit čtyři základní provedení, pouzdra CBGA (keramický substrát), MBGA (s kovovou nosnou částí), PBGA (plastová), a také TBGA (na pásku). Vlastní čip může být v pouzdře připojen různými technikami: kontaktovacím drátkem (ultrazvukem nebo termosonicky), provedením na páskovém nosiči TAB, lepením elektricky vodivým lepidlem nebo s bradavkovými vývody jako Flip Chip. [1]

From Computer Desktop Encyclopedia
© 2001 The Computer Language Co. Inc.

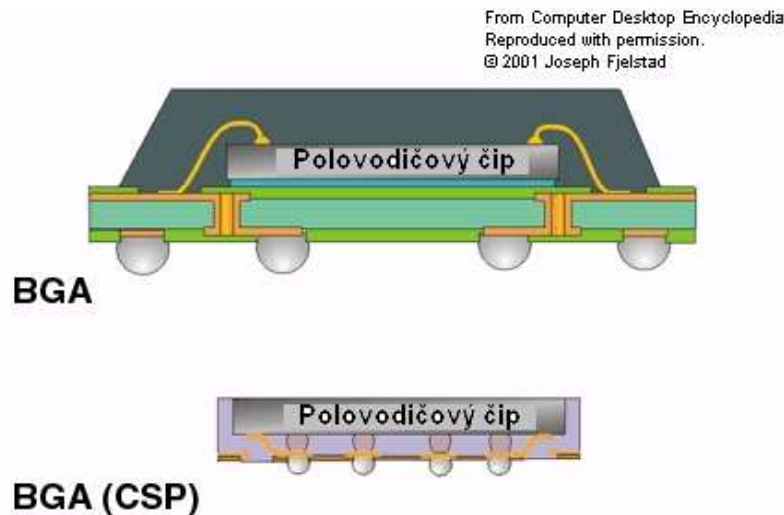


Obr. 1: Pouzdra BGA a mikro BGA (spodní pouzdro umístěné na stupnici) [2]

BGA mají ještě jeden typ pouzder, jež tvoří samostatnou kategorii, která v sobě nezahrnuje pouze pouzdra s kulovými vývody, a to CSP. Jedná se o anglickou zkratku Chip Scale Package, což v překladu znamená „pouzdro velikosti čipu“. Každý výrobce vyrábí svá provedení těchto pouzder, avšak jsou dodržovány dva charakteristické požadavky [1]:

- velikost pouzdra se blíží velikosti čipu a nepřevyšuje 1,5 násobek jeho plochy,
- způsob připojení na substrát musí být kompatibilní s povrchovou montáží.

Materiály substrátu se používají organické (lamináty) a anorganické (keramika)[1]. Samotné propojení čipu s kontaktními ploškami je provedeno drátkem nebo Flip Chipem (viz. obr. 2). Na obr. 2 je vidět rozdíl mezi standardní součástkou BGA s čipem připojeným drátkem a pouzdem CSP s Flip Chipem.

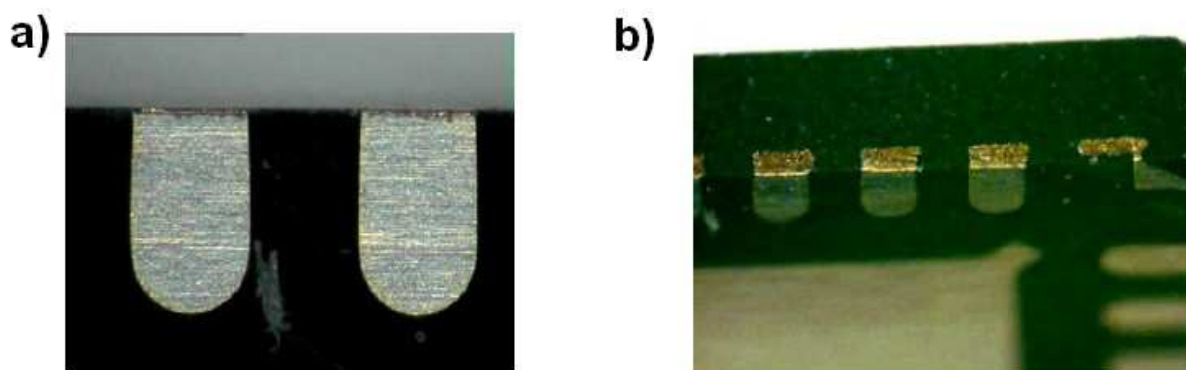


Obr. 2: Pohled na klasické pouzdro BGA a pouzdro BGA CSP [2]

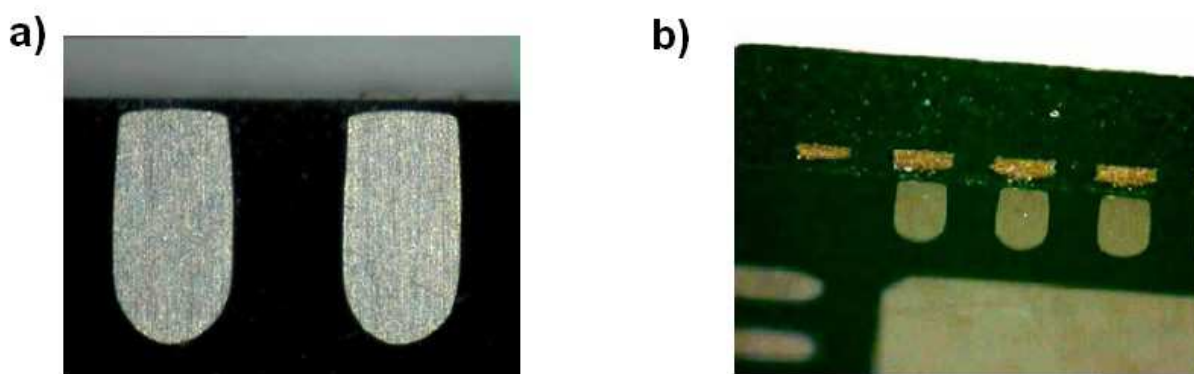
Počet vývodů u PBGA může dosahovat až kolem 1500 při velikosti 45 x 45 mm. Tento typ pouzření je používán například pro flash paměti u firmy Intel [3], programovatelné logické obvody (PLD) ad.

2.2 QFN

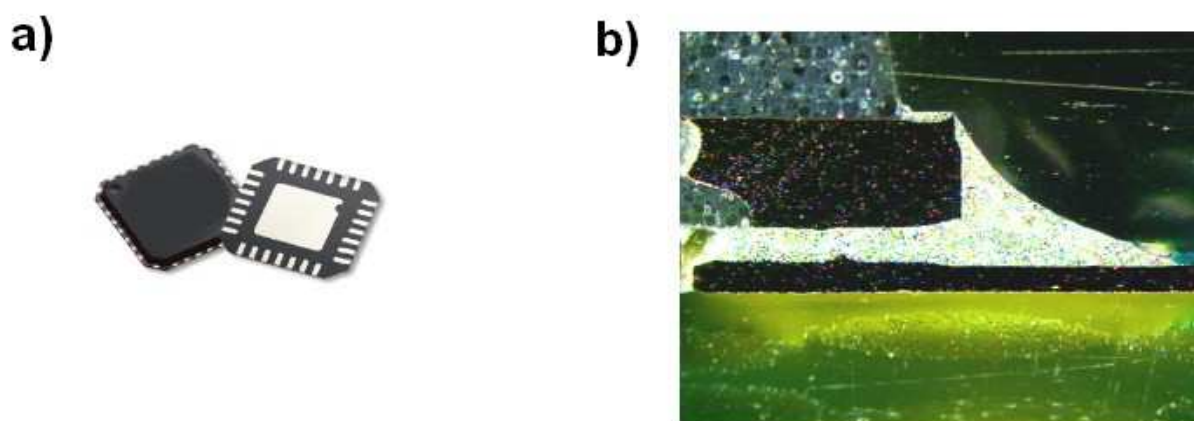
QFN je zkratkou z anglického názvu „Quad Flatpack No-lead“. Jak již název napovídá, jedná se o pouzdro, které je bez klasických drátových vývodů. Pro připojení do obvodu slouží ploché kontakty umístěné na všech čtyřech okrajích spodní strany pouzdra (viz. obr. 5-a)). Podle provedení, resp. vytváření, těchto kontaktů se QFN pouzdra rozdělují na tři základní typy. Je to typ „E“, „S“ a „Punch“. Jak je vidět na obr. 3, typ „E“ má pájecí plošky vyvedeny po stranách pouzdra. Typ „S“ (viz. obr. 4), resp. saw (řez), má plošky pouze na spodní straně. Vyrábí se vystřížením součástky z pásku s několika QFN pouzdry. Typ „Punch“ (viz. obr. 5), resp. shear (stříh), má plošky vyvedeny po stranách, kdy jsou vývody viditelné i z vrchu. Jejich vytvoření se provádí vystřížením zapouzdřené součástky z vyrobené série pouzder. [4]



Obr. 3: QFN s "E" typem vývodů: a) Vývody zespodu; b) Vývody z boku [4]



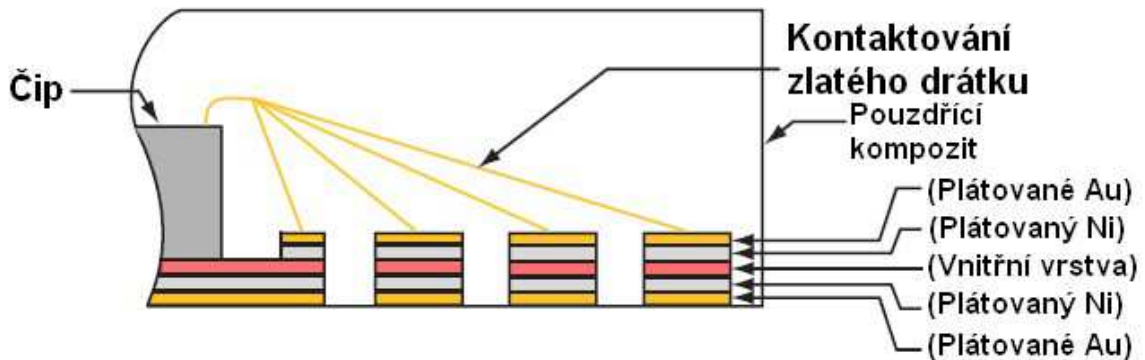
Obr. 4: QFN s "S" typem vývodů: a) Vývody zespodu; b) Vývody z boku [4]



Obr. 5: QFN s "Punch" typem vývodů: a) Vývody zespodu; b) Vývody z boku [4]

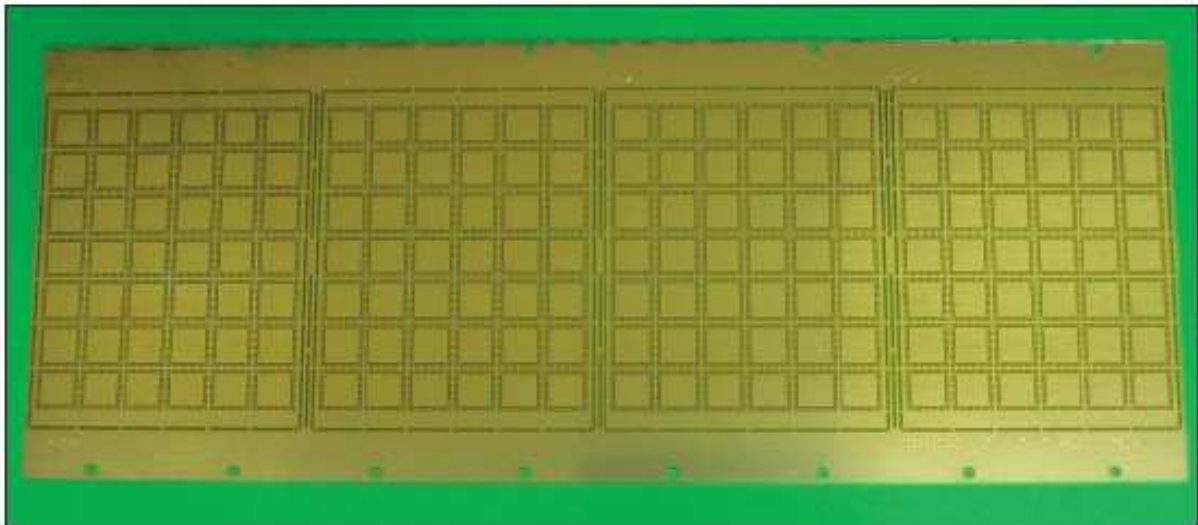
Tato pouzdra mohou mít i více řad vývodů, než jak tomu bývá u QFP, kde je z hlediska konstrukce jen jedna řada. Dnes se vyrábějí QFN v provedení s jednou, dvěma nebo i více řadami vývodů (viz. obr. 6), která se nazývají například aQFN (Advanced QFN). Výhodou je samozřejmě možnost použití složitějších a menších obvodů uvnitř pouzdra, popřípadě se využívá i vrstvení čipů na sebe. Velikost pouzdra se blíží velikosti čipu, tzn. CSP, a nejmenší vzdálenost vývodů je 0,5 mm. Ojedinele se vyskytují i rozteče 0,4mm.

Existují i nestandardní pouzdra a to s více termálními ploškami, tzn. s více čipy rozmístěnými vedle sebe, tzv. SiP (System in Package). [5][6]



Obr. 6: Vnitřní náčrt QFN pouzdra s provedením vývodů ve třech řadách [5]

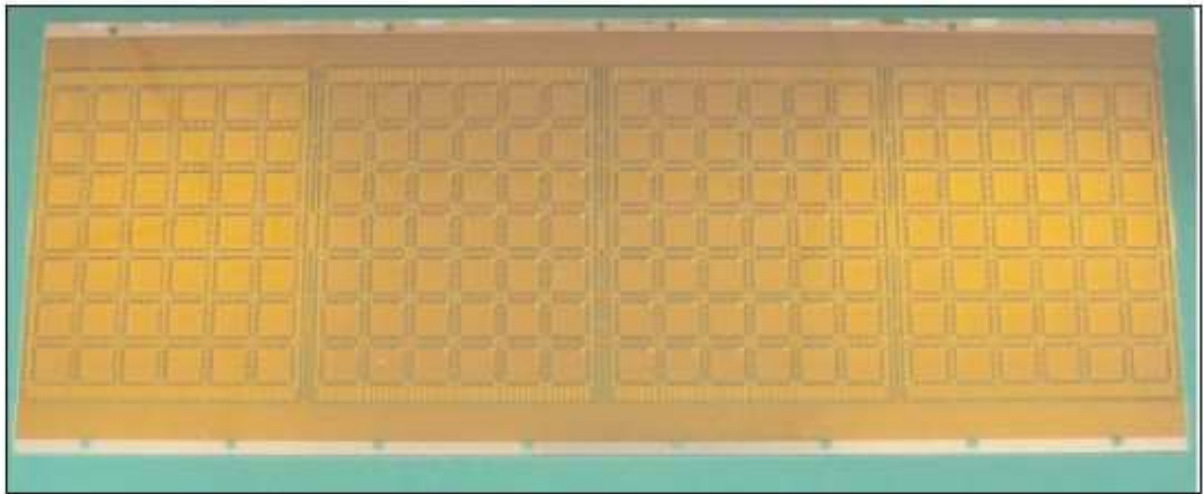
Základem při výrobě pouzdra QFN typu S je měděný plech tloušťky 200 μ m. Tento plech je leptán na požadovaný obrazec, čímž se vytvoří nosič s viditelnými kontaktními ploškami a termální ploškou pro připevnění čipu. Na obr. 7 je matice motivů vytvořena čtyřikrát, kde každá obsahuje 42 QFN nosičů. [6]



Obr. 7: Holý nosič, tzv. lead frame, pouzdra QFN typu S [6]

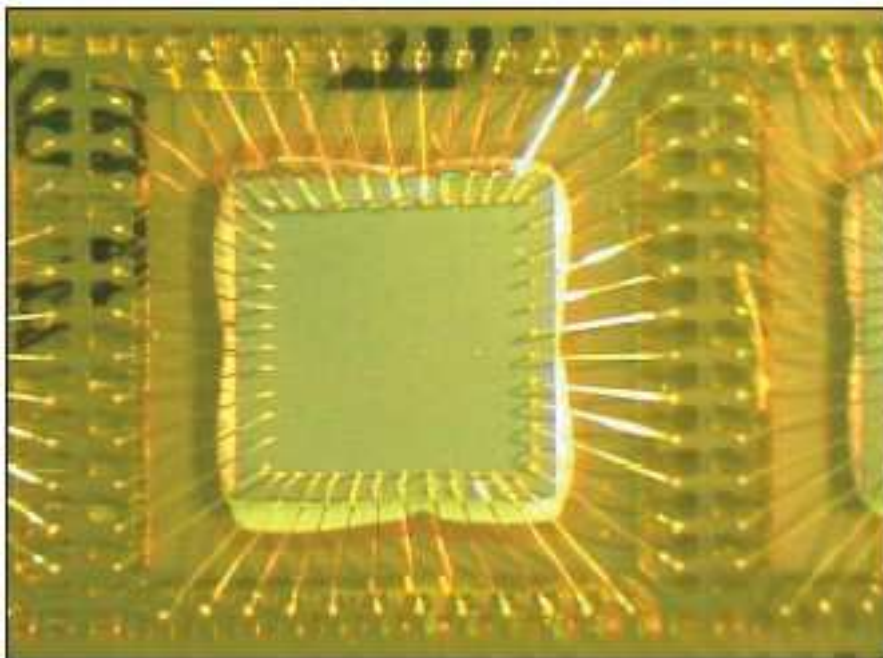
Nosič je následně plátován vrstvou NiPdAu, ale jen na místech kde dojde ke kontaktování mikrodrátkem nebo k pájení (pájecí plošky na spodní straně pouzdra). Holá měď je ponechána především na místě připevnění čipu kvůli lepší adhezi. Důvodem je kompatibilita povrchu se zlatým mikrodrátkem při kontaktování. Tloušťka jednotlivých vrstev bývá v rozmezí 0,5 – 2 μ m pro nikl, 0,02 – 0,15 μ m pro paladium a 0,003 – 0,015 μ m pro zlato.

Jako ochrana vytvořené vrstvy NiPdAu při pouzdření slouží kaptonová páska. Ta zabrání roztékání zalévacího kompozitu na bázi epoxidové pryskyřice (viz. obr. 8). [6]



Obr. 8: Holý nosič s vytvořenou vrstvou NiPdAu (19)

Samotný čip je ještě na waferu zbroušen na velikost $250 - 300 \mu\text{m}$, aby byla zajištěna výška pouzdra 1mm. Výška pouzdra QFN se může pohybovat v rozmezí $0,4 - 1,4 \text{ mm}$. Wafer je poté rozřezán a připevněn na modrou fólii pro testování. Po kontrole a odstranění vadných kusů dojde k připevňování funkčních čipů na připravený měděný nosič pomocí teplovodivého epoxidového lepidla. Následná operace je termosonické kontaktování zlatým mikrodrátkem ($25\mu\text{m}$). Nakontaktovaný čip (viz. obr. 9) je pouzdřen kompozitním plastovým materiálem se základem epoxidové pryskyřice. [5] [6]



Obr. 9: Nakontaktovaný čip v pouzdře QFN typu S [6]

Nakonec tedy osvětlení základních parametrů tohoto pouzdra. Využívá se pro integrované obvody s počtem vývodů 100 a méně. Díky konstrukci má lepší vlastnosti oproti ekvivalentním pouzdrům (QFP, PLCC ad.), tzn. menší parazitní kapacita a indukčnost, a proto se používá u obvodů pracujících na frekvenci až 10 GHz (standardně kolem 2 GHz).

3 Návrhová pravidla vytváření DPS

Používání pouzder BGA a QFN je mimo jiné díky většímu počtu elektrických propojů a menším rozměrům než je tomu u ostatních pouzder jako jsou QFP či PLCC. Nezanedbatelnou předností jsou také lepší elektrické vlastnosti, jako je například parazitní kapacita. Návrhová pravidla pro vytváření DPS s BGA a QFN jsou popsána v následujících podkapitolách.

3.1 BGA

Výrobci vytvářejí spoustu různých druhů pouzder BGA s rozdílnými uspořádáními a roztečí pájkových kuliček, a proto je potřeba na začátek zdůraznit, že budou popisována návrhová pravidla pro standardní pouzdra s roztečí pájecích plošek 1 mm. Parametry návrhu pro další typy pouzder s jinou roztečí jsou shrnuty v tabulce na konci této podkapitoly nebo vycházejí z níže popsaných všeobecných vztahů.

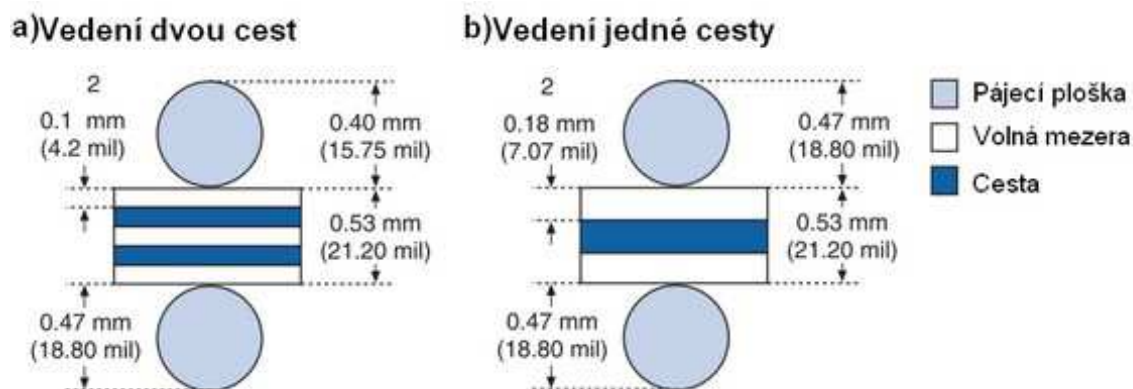
3.1.1 Vodivé cesty

Vedení vodivých cest závisí na počtu vrstev a uspořádání pájecích plošek. Vzhledem k tomu, že se BGA pouzdra používají hlavně u vícevrstvých desek tak je vedení většinou provedeno ve více vrstvách. Hlavně však bude popsáno vedení vodivých cest na vrchní straně DPS vzhledem k tomu, že vedení vnitřních cest je již určeno základními návrhovými pravidly.

Obr. 10 ukazuje vedení signálových cest mezi pájkovými ploškami na povrchu DPS. Je zde ukázána realizace jedné a dvou vodivých cest mezi měděnými kontakty. Pro různé rozteče vývodů lze mezi jednotlivými měděnými kontakty vést i více vodivých cest než dvě. Prostor mezi pájecími ploškami je dán následujícím vztahem [7]:

$$g = (\text{rozteč BGA}) - d \quad (1)$$

,kde g je volný prostor mezi dvěma pájkovými kuličkami a d je průměr pájecí plošky. Volný prostor g se použije jako hodnota k určené šířky vedených cest ze vzorců, jak je ukázáno v tab. 1.



Obr. 10: Vedení signálových cest mezi ploškami [7]

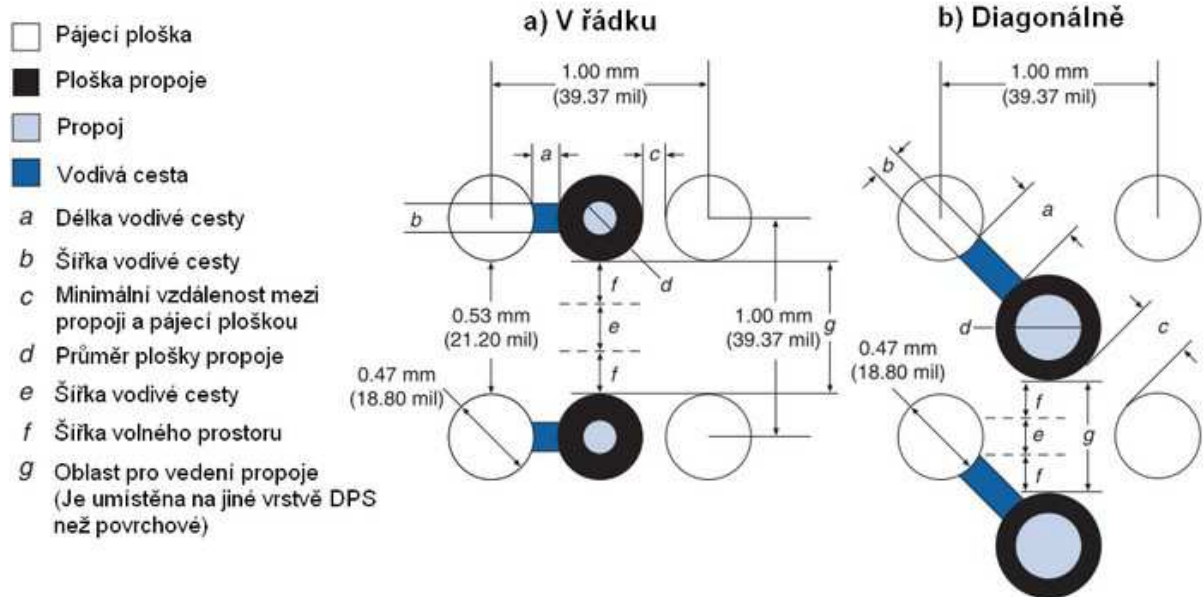
Tab. 1: Vzorce pro výpočet šířky signálové cesty [7]

Počet signálových cest	Vzorec
1	$g \geq [2 \times (\text{šířka prázdné plochy})] + \text{šířka signálové cesty} \quad (2)$
2	$g \geq [3 \times (\text{šířka prázdné plochy})] + [2 \times (\text{šířka signálové cesty})] \quad (3)$
3	$g \geq [5 \times (\text{šířka prázdné plochy})] + [3 \times (\text{šířka signálové cesty})] \quad (4)$

3.1.2 Pájecí plošky

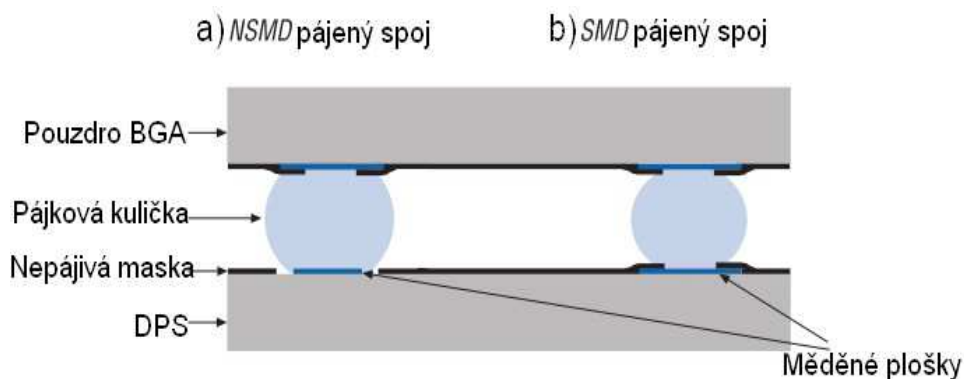
Základní typy pouzder s poli kulových pájených spojů, založené na rozteči mřížky, byly doporučeny sdružením JEDEC a to rozteče 1,5 mm, 1,27 mm a 1 mm. Obecně jsou pouzdra s menší roztečí než je 1 mm nazývána CSP. [8]

Na obrázku obr. 11 jsou znázorněny dva způsoby provedení mikropropojů s různou orientací vzhledem k pájecím ploškám. Prvním způsobem je umístění propoje v řadě mezi pájecími ploškami (viz. obrázek obr. 11-a)) a druhým je vytvořit propoj diagonálně k pájecím ploškám (viz. obrázek obr. 11-b)). Velikost plošky propoje tedy ovlivňuje počet vodičů, které mohou být vedeny mezi pájkovými ploškami. Jak je vidět tak propoj v řadě je menší a v diagonále větší.



Obr. 11: Orientace VIA propojů mezi pájecími ploškami a jejich rozměry pro BGA pouzdro s rozestupy mezi pájkovými kuličkami 1,00 mm [7]

Dalším parametrem v návrhu je realizace nepájivé masky v okolí pájecích plošek. Rozdělují se na dvě metody a to podle toho jestli mají definovanou nepájivou masku (tzv. SMD) nebo nemají. Při definované nepájivé masce (viz. obr. 12-b)) je jí pokryta část pájecí plošky. Výhodou je lepší přilnavost měděné plošky k DPS. Nedefinovaná nepájivá maska (tzv. NSMD) je realizována mimo pájecí plošku, jak je vidět na obr. 12. Pájitelná je tedy celá pájecí ploška. To zaručuje větší plochu pro zapájení kulového vývodu, než je tomu u SMD.



Obr. 12: Způsoby provedení nepájivé masky na pájecích ploškách: a) NSMD (nedefinovaná nepájivá maska); b) SMD (definovaná nepájivá maska) [7]

V tab. 2 jsou shrnuty parametry návrhu DPS pro BGA pouzdra s roztečí 1 mm.

Tab. 2: Parametry návrhu DPS pro BGA pouzdra s roztečí 1 mm [7]

Rozteč vývodů (druh připojení čipu)	Průměr pájecí plošky na BGA (mm)	Průměr pájkové kuličky (mm)	Průměr plošky s SMD (mm)	Průměr plošky s NSMD (mm)
1 mm (drátkem)	0,45	0,63	0,45	0,38
1 mm (flipchip)	0,55	0,63	0,55	0,47

Tab. 3 obsahuje shrnutí hodnot pro určení rozměru pájecí plošky v závislosti na rozteči vývodů a velikosti pájkových kuliček. Ve třetím sloupečku je doporučená velikost pájecích plošek a ve čtvrtém sloupci je jejich povolená tolerance (kuličky 0,75; 0,60 = 25%, ostatní = 20%) [9].

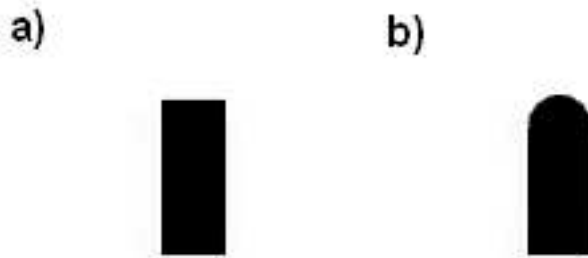
Tab. 3: Parametry výběru velikosti pájecí plošky podle kuličky nebo rozteče [9]

Velikost kuličky (mm)	Rozteč kontaktů (mm)	Pájecí ploška (mm)	Rozsah velikosti pájecích plošek (mm)
0,75	1,5; 1,27	0,55	0,60 – 0,50
0,60	1,0	0,45	0,50 – 0,40
0,50	1,0; 0,80	0,40	0,45 – 0,35
0,45	1,0; 0,80; 0,75	0,35	0,40 – 0,30
0,40	0,80; 0,75; 0,65	0,30	0,35 – 0,25
0,30	0,80; 0,75; 0,65; 0,50	0,25	0,25 – 0,20
0,25	0,40	0,20	0,20 – 0,17
0,20	0,30	0,15	0,15 – 0,12
0,15	0,25	0,10	0,10 – 0,08

3.2 QFN

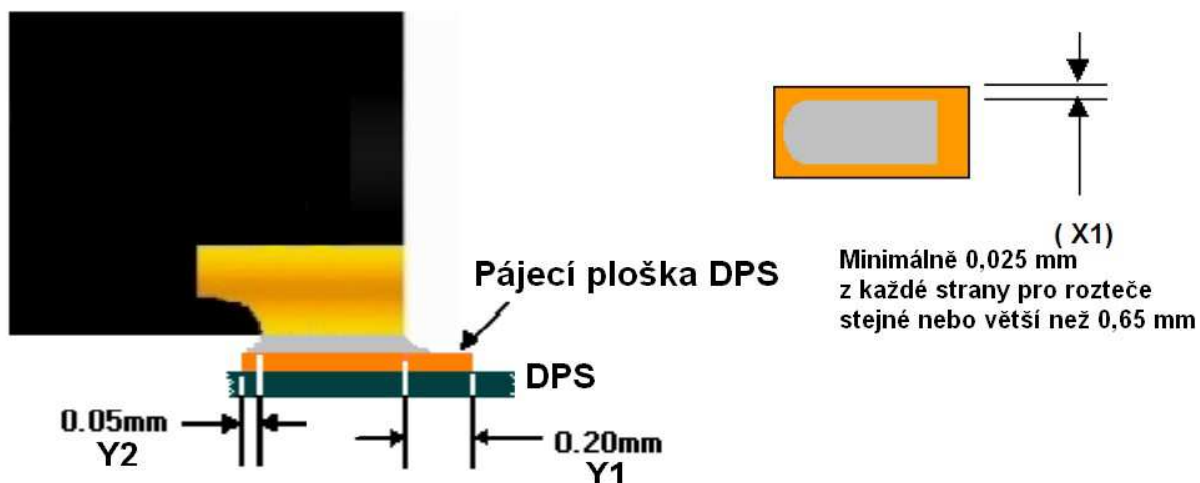
Dnes nejvíce využívaná pouzdra QFN jsou s jednou řadou vývodů. Díky tomu odpadá nutnost vytváření mikropropojů na DPS a cesty jsou vedeny, většinou, po vrchní straně desky. Pájecí ploška uprostřed pouzdra, je provedena s mikropropoji na vnitřní vrstvy vylité mědi a slouží k chlazení čipu. Vzhledem k různým rozměrům a typům pouzder bude dále snaha o obecný popis návrhu DPS s následnou ukázkou na konkrétní velikosti pouzdra s určitou roztečí vývodů. Každý výrobce preferuje svá návrhová pravidla, avšak je vždy dodržen základ pocházející z norem JEDEC a IPC.

Pájecí plošky jsou z hlediska tvaru dvojího druhu. Jedny jsou obdelníkové (viz. obr. 13 – a)), jako se vytvářejí u klasických QFP pouzder, a druhé jsou s kulatým zakončením na jedné straně pod pouzdrém, tzv. tvar prstu (viz. obr. 13 – b)).



Obr. 13: Tvary pájecích plošek na DPS: a) obdelníkový; b) tvar prstu

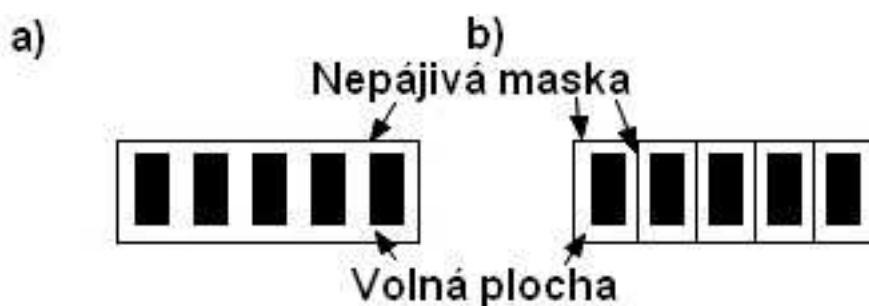
Prvním obecným parametrem návrhu jsou přesahy, tzn. pájecí plošky na DPS by měly být větší, než plošky na pouzdře. Je však nutné rozlišovat typ pouzdra a pájecí plošky. U typů E a Punch se obecně volí přesah 0,2 mm na vnější straně a 0,05 mm na vnitřní straně u obdelníkového tvaru, jak je znázorněno na obr. 14. Někdy je volen větší vnější přesah a to 0,4 mm. Typ S má oba dva přesahy, vnitřní i vnější, 0,05 mm, z důvodu provedení vývodu jen pod pouzdrém. U roztečí 0,65 mm a vyšších se ještě zvětší šířka o 0,05 mm. Menší rozteče mají stejnou šířku kontaktu na DPS jako na pouzdře. Důvodem je prevence vytváření můstků (zkratů), s čímž také souvisí minimální vzdálenost mezi kontakty (0,2 mm) a mezi kontakty a termální ploškou (0,15 mm). Kontakty tvaru prstu nemají boční přesahy a ani vnitřní. K velikosti kontaktu pouzdra se připočítává pouze vnější přesah 0,2 – 0,5 mm. [10] [11]



Obr. 14: Přesahy pájecích plošek na DPS vzhledem k ploškám na pouzdře [11]

Velikost termální plošky na DPS se doporučuje volit stejně velká jako na pouzdře, nebo menší o 0,65 mm, vlivem nepájivé masky. Podle jejich rozměru se volí počet propojů do vnitřních vrstev a to tak, že průměr propoje je 0,3 až 0,33 mm s roztečí 1,2 mm. [11]

Tak jako u BGA jsou dva typy provedení nepájivé masky, SMD a NSMD. Ve většině případů se preferuje typ nedefinované pájecí plošky nepájivou maskou, kdy je volná plocha (mezera) volena 0,06 – 0,075 mm. Pro rozteče 0,65 mm a větší je možné vytvořit nepájivou masku i mezi jednotlivými kontakty (viz. obr. 15 – b)). Nepájivá maska vytvořená jen kolem skupiny plošek se používá u roztečí 0,5 mm a méně (viz. obr. 15 – a)).



Obr. 15: Nedefinovaná pájecí ploška nepájivou maskou: a) pro rozteče 0,5 mm a menší; b) pro rozteče 0,65 mm a větší

4 Parametry ovlivňující jakost pájeného spoje

Na obr. 16 jsou vypsány činitele výrazně se podílející na jakosti zapájení pouzder BGA. Hned první činitelé pocházejí z principu pájení přetavením, který se používá, jak už bylo popsáno výše, pro pájení kulových vývodů. Jsou to tedy celková doba pájení, čas strávený nad teplotou tavení pájky, maximální teplota dosažená během procesu, rychlost náběhu a rychlost chlazení.

Následné vlastnosti pájkových kuliček jako je typ tavidla, složení, čistota a stáří se dají charakterizovat jako jedny z důležitých parametrů, jelikož přímo ovlivňují výsledný pájený spoj. Tvar a velikost kuliček by měla být stejná, což bývá většinou kontrolováno a dodržováno.

U pájecích ploch je rozhodující tvar, čistota a povrchová úprava. Defekty bývají většinou způsobeny při procesu výroby nebo úprav a mají také zásadní vliv na výslednou jakost.

Jako poslední činitele jsou znalosti a zkušenosti operátora. Pokud například pracovník neví jak správně sesouhlasit kulové vývody s kontakty na DPS, tak se výsledná jakost snižuje.



Obr. 16: Diagram s činiteli ovlivňujícími jakost zapájení pouzder BGA

4.1 Povrchová úprava

Před samotným zapájením součástky je důležitá příprava povrchu pájecích plošek na DPS, aby nedošlo k odsmáčení pájky při pájení vlivem zoxidované mědi. Měla by být zajištěna potřebná povrchová úprava ať již nejpoužívanější pomocí organických inhibitorů oxidace mědi (OSP), nebo některá z dalších metod kompatibilní s použitou bezolovnatou pájkou. U pouzder BGA a QFN je důležitým parametrem rovinnost pájecích plošek, což nespĺňuje metoda pocínování HAL. Nejčastěji se používá OSP, imerzní cín a ENIG. Předností není pouze rovinnost, ale také cena a u ENIG i doba pájitelnosti.

4.2 Pracovní atmosféra

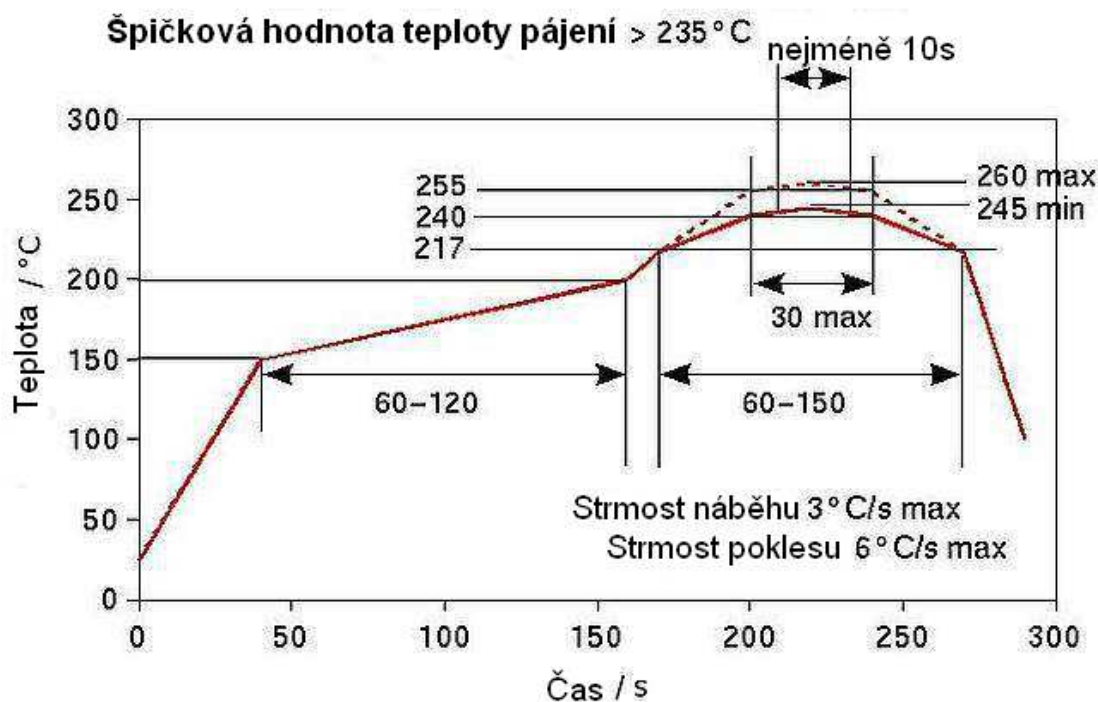
Je všeobecně známo, že při pájení za přítomnosti kyslíku (normální atmosféra) dochází k rychlé oxidaci vznikajícího pájeného spoje. Toto má velký vliv na kvalitu (pevnost, elektrickou vodivost ad.). Jako řešení se používá dusíková atmosféra. Její výhody jsou následující:

- Menší aktivace tavidla a tím menší množství tavidlových zbytků.
- Lepší čištění tavidlových zbytků (nezoxidované).
- Lepší roztékavost pájky.
- Menší oxidace pájeného spoje.

Problémem je hlavně vyšší cena procesu. Právě udržení dostatečně malé koncentrace kyslíku v pracovním prostoru je nákladné. Přetavovací pece dosahují s dusíkovou atmosférou méně než 100 ppm kyslíku v oblasti pájení.

4.3 Teplotní profil

Pro součástky s vývody umístěnými na spodní straně pouzdra se používá technika pájení přetavením. Podmínkou pro dosažení kvalitního pájeného spoje je co nejpřesnější dodržení doporučeného teplotního profilu pro pájení, který je uveden většinou v katalogovém listu pájecí pasty nebo pájkových kuliček. Jak je vidět na obr. 17 je nutné dodržet pět základních podmínek. Strmost náběhu teploty, dobu předehřevu kvůli aktivaci tavidla, čas strávený nad teplotou tavení, maximální teplotu a strmost poklesu na konci procesu. Kromě sedlového pájecího profilu, tzv. RSS (Ramp-Soak-Spike), se používá ještě lineární pájecí profil, tzv. RTS (Ramp To Spike). Použití závisí na pájecí pastě, konkrétně na použitém tavidle. U středně aktivovaných tavidel na bázi syntetických pryskyřic, tzv. RMA (Resin Medium Activated), a u bezoplachových tavidel se používá pájecí profil RTS. RTS se naopak aplikuje na pájení vodou rozpustných past a těžce pájitelných slitin a součástek. [12]



Obr. 17: Sedlový pájecí profil s vyznačenými parametry pro bezolovnaté pájky [13]

Dalším parametrem souvisejícím s předešlou podmínkou je dodržet dostatečně větraný prostor se stálou teplotou, malou prašností a malou vlhkostí. Nedodržení může způsobit například zkroucení DPS, na kterou je součástka pájena, nebo její delaminaci.

Při odpájení by měly být dodrženy stejné podmínky jako při pájení až na dobu jakou je montáž vystavena zvýšené teplotě. Je to kvůli tomu, že ihned po roztavení pájky je součástka vyjmuta a DPS odstraněna z dosahu topných těles nebo horkovzdušných trysek.

4.4 Zásady u oprav a přepracování

Opravy montážních celků jsou v dnešní době důležité. Každá firma v oblasti montáže DPS by chtěla mít velkou výtěžnost procesu, avšak jí v tom může často bránit nemalá část porouchaných, nebo díky špatnému procesu, nedopracovaných výrobků. Tyto problémy nastávají i u podniků zabývajících se přímo opravami. Je to z důvodů špatného nastavení výrobního nebo opravárenského procesu.

Jako prvním krokem v procesu oprav BGA bývá odstranění stávajícího porouchaného nebo špatně zapájeného pouzdra. Na první pohled může jít o nepodstatnou část procesu, ale v případě nedodržování určitých zásad může dojít k poškození DPS. První zásadou je především dodržení předepsaného pájecího profilu pro odstranění pouzdra. Do toho spadá nepříliš rychlý náběh teploty k teplotě tavení pájky, který je maximálně 3°C/s, a co nejkratší doba celého procesu pájení. Docílí se tak menšího zatěžování DPS a okolních součástek. Z toho plyne použití lineárního teplotního profilu, tzv. RSS.

Při osazení již funkčního pouzdra je postup stejný jako při procesu výroby s tím rozdílem, že je vše prováděno selektivně, tzn. čištění pájecích plošek, tisk pájecí pasty, osazení součástky, zapájení ad.

4.5 Reballing pouzder BGA

Pokud nejsou pájkové kuličky na kontaktech pouzdra BGA již od výroby, tak je nutné provést reballing, např. v případě oprav a přepracování. Proces reballing spočívá ve znovuvytvoření pájkových vývodů ve tvaru kuliček. Existují hned dvě základní metody.

První a nejstarší metodou je reballing pomocí již vytvořených pájkových kuliček. Celý proces může mít různé technologické postupy. Základem je vždy nanesení pastovitého tavidla nebo pájecí pasty, na které se následně pájkové kuličky přichytí. Kuličky mohou být naneseny buď ručně po jedné, přes šablonu nebo pomocí již vytvořené samolepící matrice. Po nanesení musí být kuličky přetaveny, aby byl vytvořen vodivý spoj.

Druhou metodou je vytvoření pájkových kulových vývodů přetavením pájecí pasty. Na pouzdro je umístěna šablona pro nanesení pájecí pasty. Její tloušťka je větší, než v předešlém způsobu reballingu. Následně se nanese a protlačí pájecí pasta pomocí stěrky. Po nanesení je pasta přetavena a tím se vytvoří kulové vývody na pájecích ploškách pouzdra.

V tomto procesu je nutno dávat pozor na rovinnost znovuvytvořených pájkových kuliček a také na to, aby byly vytvořeny všechny kulové vývody. Špatná koplanarita může způsobit osazeného pouzdra.

5 Metody testování jakosti

Testování jakosti je důležitou součástí výroby elektrotechnických výrobků. Nejinak je tomu u výroby DPS s pouzdry BGA a QFN.

Vzhledem k provázanosti zkoušek spolehlivosti a jakosti je vhodné popsat jejich provázanost. Vlastní zkoušky spolehlivosti se tedy provádí pomocí různých zatěžujících vlivů, které mohou působit na součástku při provozu. Jsou to především teplota, vlhkost, vibrace nebo ohyb. Před, po a během provádění těchto testů jsou použity specifické metody právě na ověřování jakosti, tzn. do jaké míry dané testy ovlivnily výslednou kvalitu samotného pouzdra, pájených spojů nebo způsobilost použitých materiálů. V této práci jsou popsány především metody pro ověřování jakosti např. způsobilosti procesu a použitých materiálů pájek, ať již při procesu výroby nebo oprav.

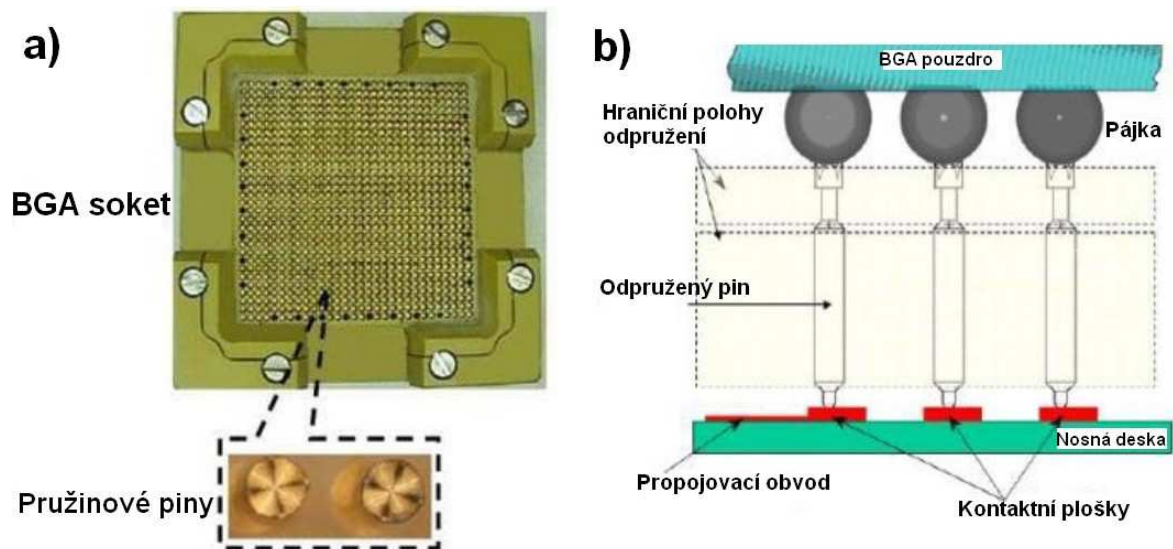
Z hlediska provedení testů můžeme tyto rozdělit do tří skupin:

- Elektrické testy
- Mechanické testy
- Optické testy

5.1 Elektrické testy

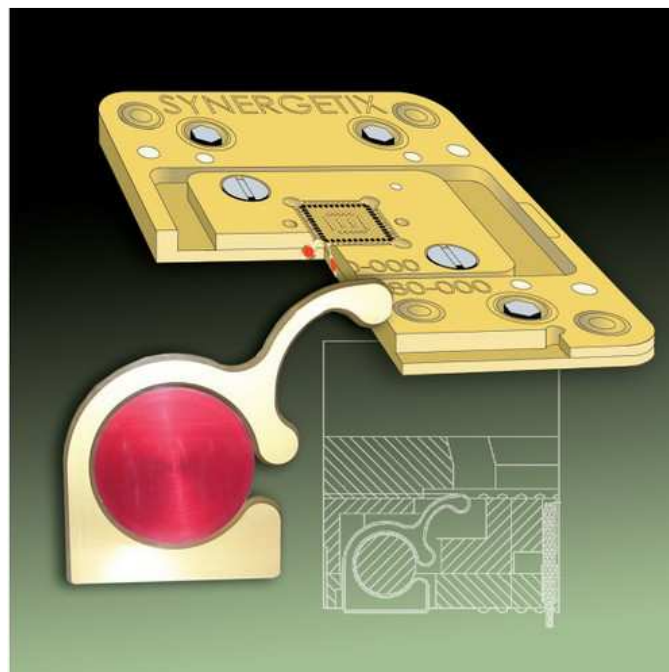
5.1.1 Testovací patice

Testovací patice se využívají pro elektrické testování při výrobě a opravě pouzder BGA. Existují dva základní druhy. První typ patice se využívá pro měření elektrické funkčnosti vyrobených nebo opravených pouzder BGA bez kuličkových vývodů. Kontakty jsou nepohyblivé hroty, které dosedají na měděné plošky pouzdra. Může se totiž stát, že dojde k poškození vnitřního obvodu vlivem teploty, např. v procesu oprav, a je nutné součástku zkontrolovat. Před samotnou kontrolou je však nutné pájecí plošky vyčistit od pájky a jiných nečistot, aby nedošlo k poškození nebo zlomení hrotů. Druhý typ patice (viz. obr. 18-a)) je již méně náchylný na poškození a to díky pružným kontaktům. Tyto kontakty jsou vidět na obr. 18-a) dole a na obr. 18-b). Obr. 18-b) ukazuje také princip, jakým dochází ke kontaktu kuliček a pružných pinů. Po umístění testovaného vzorku do patice se do pájkových kuliček zapustí hroty měřících kontaktů a dojde tím k vyrovnání nerovností díky pružině.



Obr. 18: : a) Testovací patice na BGA pouzdra s detailem na pružinové kontakty; b) Ukázka principu kontaktu pájkových kuliček a kontaktních pinů [14]

Stejný princip je použit u testování obvodů v QFN pouzdrech s tím rozdílem, že je patice uzpůsobena dané velikosti. Na obr. 19 je ukázána jedna z používaných patic. V řezu je vidět zvětšený měřicí kontakt. Způsob propojení je znázorněn na bílém technickém nákresu vpravo dole.



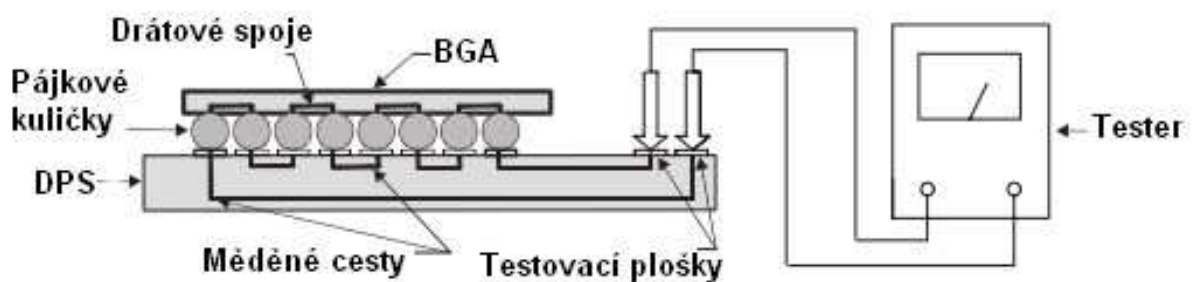
Obr. 19: Testovací patice pro QFN pouzdra [15]

Testování probíhá pomocí počítačových programů, které mají nastavený testovací algoritmus pro daný integrovaný obvod uvnitř pouzdra.

5.1.2 Metoda sériového spojení vývodů

Tato metoda se anglicky nazývá „Daisy-Chain“. Její princip spočívá, jak už vyplývá z nadpisu, v sériovém spojení několika skupin měděných kontaktů v pouzdře BGA i QFN a na DPS. Na obr. 20 je znázorněno jakým způsobem probíhá měření jedné skupiny vývodů. Jak je vidět tak jsou spojené vývody vyvedeny na testovací plošky a prozkoušeny měřícím přístrojem. Měří se jejich vodivost resp. odpor.

Využití je například pro měření správnosti zapájení vývodů při zavádění nového procesu, nových materiálů a postupů. Dále slouží k hlídání vodivého propojení vývodů nebo změnu odporu pájeného spoje při šokových testech na ohyb nebo při stárnutí vzorku pro vyhodnocení spolehlivosti.

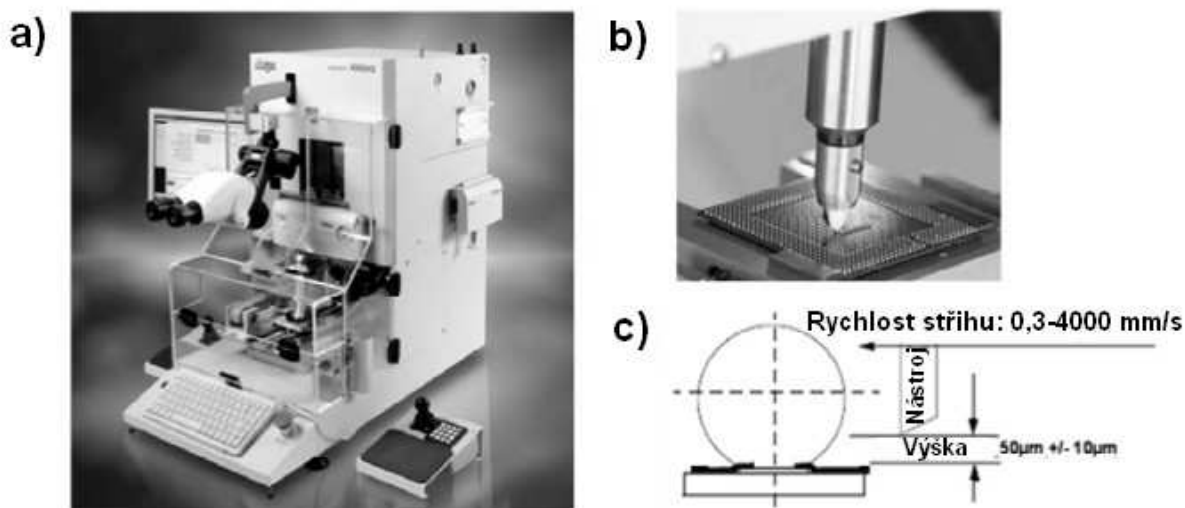


Obr. 20: Princip metody sériového spojení vývodů [16]

5.2 Mechanické testy

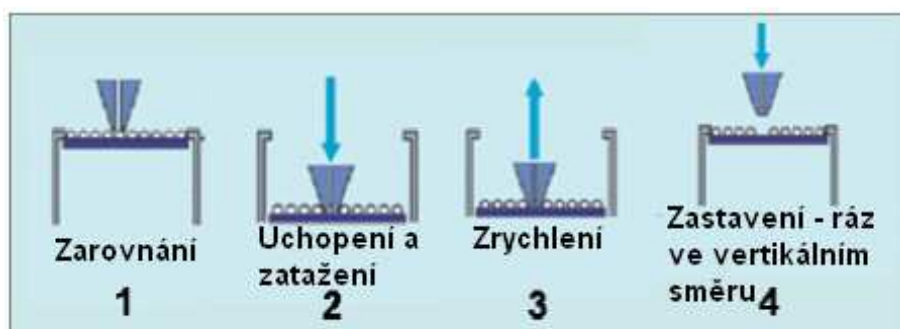
5.2.1 Stříhová a tahová síla

Pro zjištění stříhové síly je vytvořeno více zařízení, ale nejznámějším je přístroj Dage. Vyrábí se několik verzí, kde každá má své přednosti. Z nich lze jmenovat základní Dage 4000, dále Dage 4000HS a další. Dage 4000HS (viz. obr. 21-a)) je univerzální zařízení pro měření nejen stříhové a tahové síly u BGA pouzder, ale také u kontaktování drátkem ad. Jeho výhodou je možnost zvolení větší rychlosti pohybu nástroje při testování. Na obr. 21-b) je vyfocen detail hlavy pro měření stříhové síly. Princip měření je ukázán na obr. 21-c). Nástroj je umístěn do určité výšky, podle oblasti kde je potřeba měřit stříhovou sílu, a následně určitou rychlostí posouván směrem k zapájené pájkové kuličce. Dochází k působení na stříh a k jeho měření.



Obr. 21: a) Příklad přístroje na měření síly stříhu Dage 4000HS; b) Detail hlavy pro měření stříhové síly; c) Princip měření stříhové síly [17]

Zjišťování tahové síly se provádí na stejném přístroji jako zjišťování stříhové síly. Princip měření na zařízení Dage 4000HS je znázorněn na obrázku obr. 22. V prvním kroku je pouzdro umístěno do držáku a následně sesouhlaseno s testovacím nástrojem. Poté dochází k uchopení kuličky a zatažení pouzdra směrem dolů. V dalším kroku je nástroj zrychlen směrem vzhůru, až dojde ve čtvrtém kroku k odtržení kuličky a změření tahové síly. Tato síla je tedy úměrná síle, kterou bylo nutno působit na pájkovou kuličku, aby došlo k odtržení. Výsledkem je tedy zjištění kvality zapájení a pevnosti spoje.



Obr. 22: Princip měření tahové síly na zařízení Dage [18]

Zjištěné hodnoty stříhové a tahové síly slouží ke kvalitativnímu zjišťování spolehlivosti pájeného spoje BGA pouzdra.

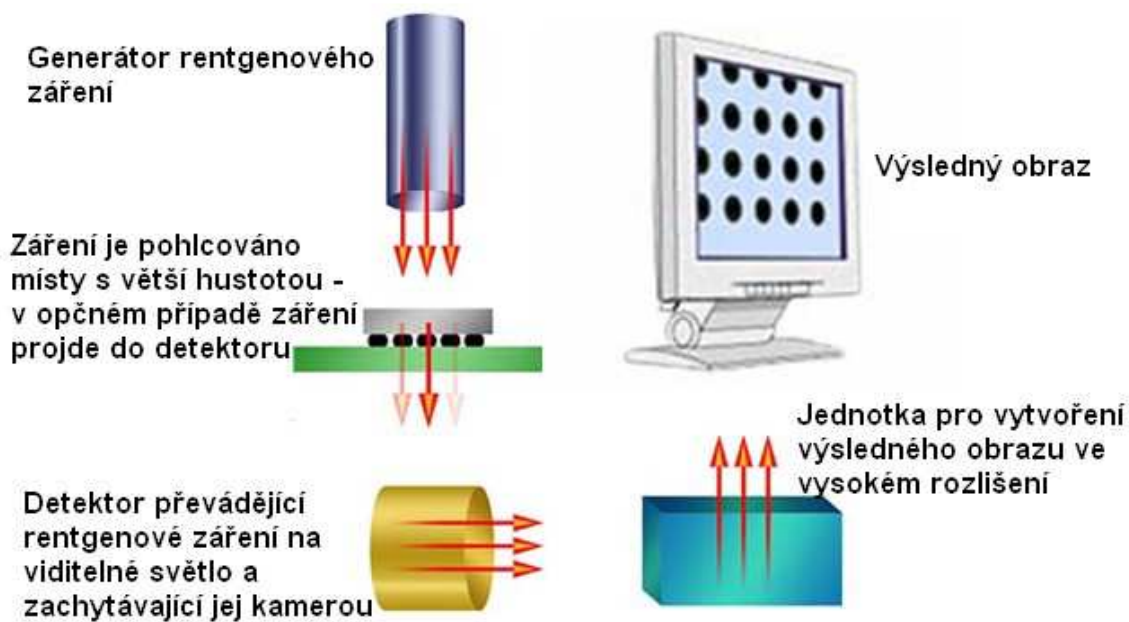
5.3 Optické testy

5.3.1 Rentgen

Jako jediný nedestruktivní způsob kontroly správného zapájení BGA pouzder je za pomoci rentgenového záření. Princip metody je znázorněn na obr. 23. Zdroj rentgenového

záření je umístěn nad zkoumaným vzorkem a prosvěcuje ho. Záření je pohlceno místy s větší hustotou a místy s menší hustotou projde na druhou stranu do detektoru. Detektor záření přemění na viditelné světlo a pošle jej přes kameru na zpracování do procesorové jednotky. Ta již zpracuje výsledný obraz a zobrazí jej na monitoru. Nevýhodou je především nemožnost odhalení všech defektů. Zásadně je to ovlivněno rozlišením přístroje.

Tímto způsobem se zjišťují dutiny v pájkových kuličkách, zkratky nebo také, při dobré rozlišovací schopnosti zařízení, studené spoje. Metoda je však poměrně drahá. V určitých mezích ji lze automatizovat. Automatická inspekce pomáhá právě při hledání zkratů a většího množství dutin ve spoji.



Obr. 23: Základní princip testování spolehlivosti pomocí rentgenových paprsků [19]

5.3.2 Optická inspekce

Optická inspekce slouží jako základní nástroj pro ověřování jakosti, např. zapájení kulových vývodů. Používají se především různé mikroskopy vybavené mikrokamerou pro zachytávání a následné zpracování obrazu. Často se využívají i elektronové mikroskopy. Zpracovávání dat probíhá většinou za pomoci personálu, který musí vyhodnotit správnost nebo chybovost podle vlastních zkušeností. U BGA pouzder totiž nelze použít automatickou kontrolu, protože není možné prohlédnout tímto způsobem vnitřní řady kulových spojů. Ke kontrole i vnitřních spojů je nutno použít v předešlé kapitole zmiňovanou metodu, která pracuje s rentgenovým zářením, nebo použít destruktivní metodu mikrovýbrusů.

Mikrovýbrusy se provádí broušením vzorku zalitého nejčastěji do epoxidu nebo Dentakrylu. Broušení se provádí pomocí brusných papírů nebo odřezávání vodním paprskem (angl. waterjet). Výbrus se dělá po vrstvách, tj. řadách kuličkových vývodů u BGA. Tyto vrstvy jsou pozorovány právě optickými metodami. Na obrázku obr. 24 je ukázán

system ERSASCOPE s mikrokamerou určen k optické inspekci zapájení především BGA pouzder.



Obr. 24: ERSASCOPE - systém pro kontrolu špatně dostupných míst na DPS pomocí mikrokamery

6 Experimentální část

V této části je popsán návrh a výroba zařízení pro pájení v dusíkové atmosféře, které bylo základem pro realizaci měření vlastností vzniklých pájených spojů. Dále jsou provedeny testy stříhem pájkových kuliček (Sn63Pb3, SAC305) a optická kontrola u zapájených BGA. Vzorčky byly zapájeny v parách a při normální atmosféře. Poslední část se zabývá mikrovýbrusy opravovaných BGA dodaných firmou ASUS s jejich vyhodnocením nejpravděpodobnějšího důvodu nefunkčnosti.

6.1 Návrh a konstrukce zařízení pro pájení v dusíkové atmosféře

Z důvodu potřeby zkoumání pájených spojů vznikajících při dusíkové atmosféře, bylo zapotřebí vyvinout zařízení, které by toto měření umožňovalo. Při zavedení dusíku v průběžné pájecí peci docházelo k jeho velké spotřebě. Tento problém bude řešit právě nové experimentální zařízení vytvořené z plastového exsikátoru (viz. obr. 25). Exsikátor se používá např. k vysoušení různým materiálů a látek v chemických, ale i jiných laboratořích. Jeho úpravou mělo být docíleno řízené atmosféry v pracovním prostoru pájení, což znamená znatelně menší spotřeba dusíku. Samotný proces bude založen na vyčerpání vnitřní atmosféry pomocí vývěvy a nahrazení dusíkovou atmosférou. Tento úkon se bude provádět až do vytvoření požadované atmosféry.



Obr. 25: Plastový exsikátor před provedením změn

Vnitřní průměr exsikátoru je 250 mm a vnější průměr 280 mm. Jeho výška z vnější strany je 270 mm a z vnitřní 240 mm.

Při konstruování byl kladen důraz i na vizuální stránku, nejen na funkčnost. Vzhledem k problémům s financemi byla snaha používat, pokud možno, nejdostupnější materiály a způsoby výroby.

Na vytváření jsem se podílel společně se studentem Bc. Radkem Valou, v jehož semestrální práci jsou popsány některé části (návrh chlazení, vedení médií, utěsnění).

6.1.1 Termočláňkové pole

Vzhledem k nutnosti měření teploty uvnitř exsikátoru, bylo potřeba navrhnout provedení průchodky do pracovního prostoru. Samotný exsikátor je dimenzován na podtlak maximálně 1 atm, s čímž se muselo počítat. Jako první možnost byla navržena průchodka od firmy LEMO, jež se specializuje na konektory a průchodky do vysokého vakua. Zkontaktovaná Brněnská firma napsala datum dodání 8 a více týdnů s cenou přes 1000 Kč. Vzhledem k ceně a času dodání konektoru bylo nutno zvolit jiný způsob provedení. Jako levné a praktické řešení byla navržena průchodka vytvořená z univerzální prokovené DPS z materiálu FR4. Původní záměr byl protáhnout jednotlivé vodiče termočláňku prokovenými dírami a zapájet je v požadované pozici. U nepoužitých děr došlo k zapájení. Dodané termočláňky byly typu K (model 5TC-TT-K-36-36 od firmy Omega) s průměrem drátu 13 μm a s teflonovou izolací. Kvůli malé velikosti a nemožnosti odizolování v jiném místě, např. uprostřed vodiče, než na konci, bylo zvoleno protáhnutí celého termočláňku jedinou dírou a následné zakápnutí epoxidovým lepidlem. Hotové pole osazené sedmi termočláňky je vidět na obr. 26.



Obr. 26: Termočláňkové pole se sedmi termočláňky typu K

6.1.2 Topné těleso

Původním záměrem bylo použít zakoupené topné těleso o rozměrech 120 x 120 mm, kruhového tvaru, o výkonu 1000 W a napájecím napětí 230 V. Z důvodu snahy o co největší bezpečnost zařízení, bylo prvním parametrem při výběru topného tělesa napájecí napětí. Toto napětí bylo zvoleno 24V, díky možnosti použití dostupného spínaného zdroje jako napájení.

Topná tělesa se s tímto napájecím napětím nevyrábí, a proto bylo nutno jej navrhnout a vytvořit.

Při návrhu topného tělesa se vycházelo z několika počátečních parametrů. Prvním parametrem byl dostatečný výkon, který byl zvolen 300W. V těchto výkonech jsou vyráběny klasické hot plate stanice. Ohřev uvnitř zařízení bude tedy pomocí vedení tepla kondukcí, tzv. horkou plotnou (hot plate). Z toho plyne použití odporového drátu pro ohřev. Dalšími parametry byly materiál a rozměr plotny. Aby mohlo dojít k dosažení dostatečné teploty pro pájení (max. 260°C na DPS, max. 300°C na plotně) musel být materiál dobře tepelně vodivý a ne příliš velkých rozměrů. V tomto případě by připadala v úvahu buď měď, nebo dural (hliník). Vzhledem k dostupnosti byla zvolena duralová deska s rozměry 100x100x4mm. V této chvíli bylo potřeba vypočítat potřebnou délku a tloušťku odporového drátu a způsob umístění na plotnu. Ze vzorce pro výpočet výkonu byl zjištěn proud zajišťující výkon 300W při 24V:

$$P = U * I \text{ [W, V, A]}, \quad (5)$$

kde P je elektrický výkon, U je napětí a I je proud.

$$\Rightarrow I = \frac{P}{U} \Rightarrow I = \frac{300 \text{ W}}{24 \text{ V}} = 12,5 \text{ A}$$

Z Ohmova zákona se vypočetl potřebný odpor drátu:

$$R = \frac{U}{I} \text{ [\Omega, V, A]}, \quad (6)$$

kde R je elektrický odpor.

$$\Rightarrow R = \frac{24 \text{ V}}{12,5 \text{ A}} = 1,92 \Omega$$

Vzhledem k prodáváním odporovým drátům, v metrových kusech, byl zvolen kanthalový (maximální teplota 1200 °C) o hodnotě odporu 4,2 Ω /m a průměru 0,65 mm. Při paralelním zapojení dvou drátů vznikne odpor 2,1 Ω /m, což by mělo být dostačující. Kvůli menšímu průměru bude drát více zatěžován, avšak bude také docházet k rychlejšímu předávání tepla topné desce. Jeho zatížitelnost byla vyzkoušena na holém odporovém drátu. Pro zjištění rychlosti ohřevu bylo potřeba vypočítat množství skupenského tepla potřebného k ohřátí destičky na 300°C (přenos tepla kondukcí):

$$Q = m * c * (T_2 - T_1) \text{ [J, kg, } \frac{\text{J}}{\text{Kkg}}, \text{ K, K]}, \quad (7)$$

kde Q je skupenské teplo, m je hmotnost tělesa, c je tepelná kapacita (hliník = 896 J/Kkg), T₂ je konečná teplota a T₁ je počáteční teplota.

$$\Rightarrow Q = 0,202 \text{ kg} * 896 \text{ J/Kkg} * (573,15 \text{ K} - 293,15 \text{ K}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 49,7 \text{ kJ}$$

Dále bylo potřeba zjistit, za jak dlouho se do tělesa naakumuluje požadované teplo. Vycházelo se ze vzorce pro výpočet tepelného výkonu:

$$P = \frac{Q}{t} \quad [\text{W, J, s}], \quad (8)$$

kde P je tepelný výkon a t je čas.

$$\Rightarrow t = \frac{Q}{P} \Rightarrow t = \frac{49700 \text{ J}}{300 \text{ W}} = 160 \text{ s} = 2 \text{ min } 40 \text{ s}$$

Strmost náběhu teploty se určí podělením požadované teploty 300 °C a vypočteného času 160s, což je 1,8 °C/s. Vzhledem k tomu, že se u pájecích profilů pohybuje rychlost náběhu 1 – 2 °C/s, tak je hodnota dostačující.

Pro upevnění kanthalového drátu byla v duralové destičce vyfrézována drážka o šířce 3 mm a hloubce 2 mm s tvarem meandru. Na obr. 27 vlevo je již vytvořená plotna pro umístění topného elementu.



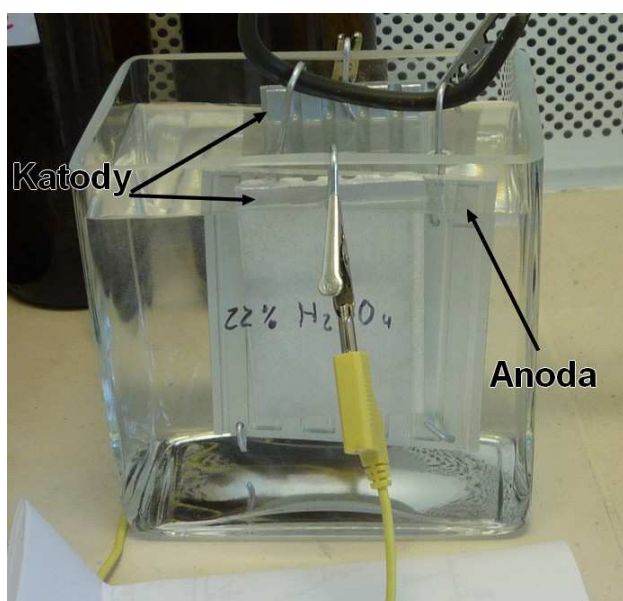
Obr. 27: Vlevo je opracovaná hliníková destička a vpravo je hliníková destička po anodizaci hliníku (eloxování)

Kvůli izolaci drátu od hliníku byla na povrchu desky vytvořena vrstva oxidu hlinitého (viz. obr. 27). Kromě izolace slouží tato úprava také proti otěru a poškození hliníku. Při procesu anodizace hliníku (eloxování) se vycházelo z literatury [20] a [21]. Postup byl následující:

1. Čištění opracované hliníkové destičky (vyfrézovaná drážka, vyvrtané díry se závitem M3). Odmaštění probíhalo za pomoci Solviny a kartáčku. Zbytky

mastnoty byly odstraněny ve 20 % roztoku hydroxidu sodného (NaOH). Doba v roztoku NaOH byla 30 s.

2. Oplach v destilované vodě po dobu 30 s, aby nedošlo ke znečištění eloxovací lázně.
3. Samotná anodizace hliníku probíhala v roztoku 22 % kyseliny sírové (H_2SO_4) po dobu 59 minut (viz. obr. 28). Eloxovaný předmět, anoda, byl připojen na kladný pól napájecího zdroje. Katodou byly dvě hliníkové desky s plochou o polovinu menší než eloxovaný předmět. Minimální plocha katody měla být 1/3 plochy anody. Při samotném procesu protékal proud 1,2 A při napětí 10,5 V.



Obr. 28: Eloxování hliníkové desky určené pro topné těleso

4. Po uběhnutí 59 minut v eloxovací lázni byl opět oplach v destilované vodě a to po stejnou dobu (59 minut).
5. Uzavírání povrchu oxidu hlinitého v destilované vodě o teplotě 95 °C po dobu 60 minut.

Vytvořená vrstva měla tloušťku kolem 7 μm , což bylo změřeno na mikroskopu Jenavert.

Izolace drátu probíhala pomocí skleněných mikrokuliček, tzv. balitony o velikosti 0,07 – 0,11 m. Kanthalový drát se ohřál za pomoci procházejícího proudu na vysokou teplotu, kdy se balotina začala na drát nabalovat a tavit se. Výsledná izolace nebyla homogenní (viz. obr. 29), avšak dostačovala pro udržení vzdálenosti odporového drátu od povrchu eloxované desky.



Obr. 29: Odporový drát izolovaný skleněnými mikrokuličkami (balotinou)

Připevnění odporového drátu do vyfrézované drážky eloxované desky bylo provedeno pomocí tmelu. Tento tmel se skládal z trimovacího prášku a vodního skla, které byly smíchány v poměru 1:1. Výsledné topné těleso je na obr. 30.

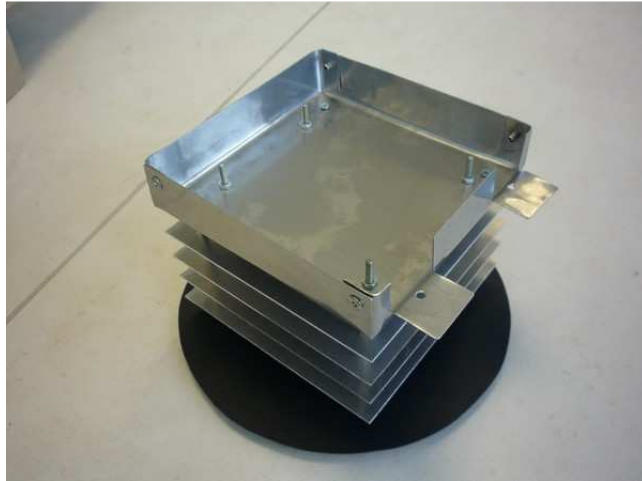


Obr. 30: Vytvořené topné těleso po upevnění odporového drátu

6.1.3 Izolace topného tělesa od stěn exsikátoru

Vzhledem k použitým materiálům exsikátoru bylo potřeba oddělit topné těleso od zbytku zařízení. Spodní část exsikátoru je vyrobena z polypropylenu (PP), jehož teplota tavení je kolem 160 °C. Horní část je odlita z polykarbonátu (PC), který má teplotu tavení kolem 260 °C a teplotu skelného přechodu 150 °C. Teploty na topném elementu se pohybují do 300 °C, což by v případě kontaktu s plastovou stěnou způsobilo její tavení.

Vytvořená struktura je svým způsobem chladicí věž složená z šesti hliníkových plátů o rozměru 120 x 120 mm z hliníkového plechu. Spojení jednotlivých částí je provedeno nerezovými distančními slupky délky 1 cm, díky čemuž dochází při provozu k znatelnému zahřívání pouze nerezové misky a prvního hliníkového plátu. Výsledná distanční věž je vidět na obr. 31.



Obr. 31: Distanční věž pro topné těleso

6.1.4 Regulace a napájení topného tělesa

Po vytvoření a odzkoušení topného tělesa bylo potřeba navrhnout způsob regulace. Jako vhodné zařízení se ukázal univerzální regulátor R500 (viz. obr. 32).



Obr. 32: Regulátor R500

Ovládání a nastavení regulátoru R500 je popsáno v mé bakalářské práci **Optimalizace procesu pájení na zařízení IR-400**.

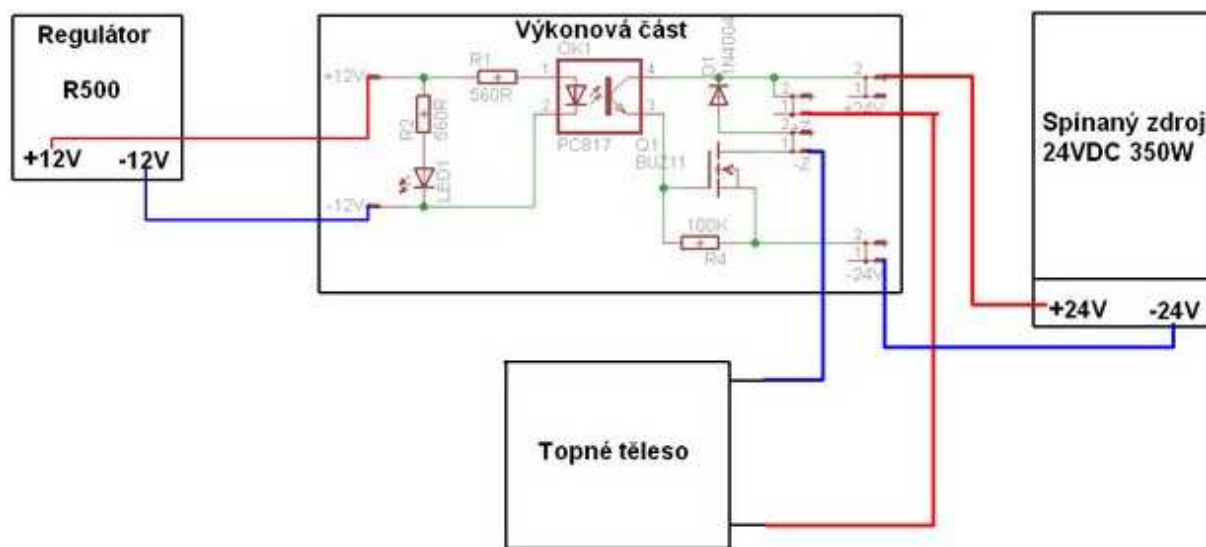
Na řídicím výstupu regulátoru je napětí 12 V s maximálním odběrem 50 mA. Tento výstup má ovládat spínání 24 VDC a proud maximálně do 13 A. Pro napájení byl použit

spínaný zdroj WEI HAO (S-350-24) 24 VDC s maximálním proudovým odběrem 14,6 A (viz. Obr. 33). Jako spojovací část byl sestrojen jednoduchý obvod s výkonovým MOSFET (BUZ11) tranzistorem na výstupu, který je spínán přes tranzistor optočlenu (LTV-817). Schéma i s motivem DPS je v příloze č. 2 na CD.



Obr. 33: Spínaný zdroj 24VDC 14,6A

Blokové schéma propojení regulátoru R500, spínaného zdroje a topného tělesa je vidět na obr. 34.

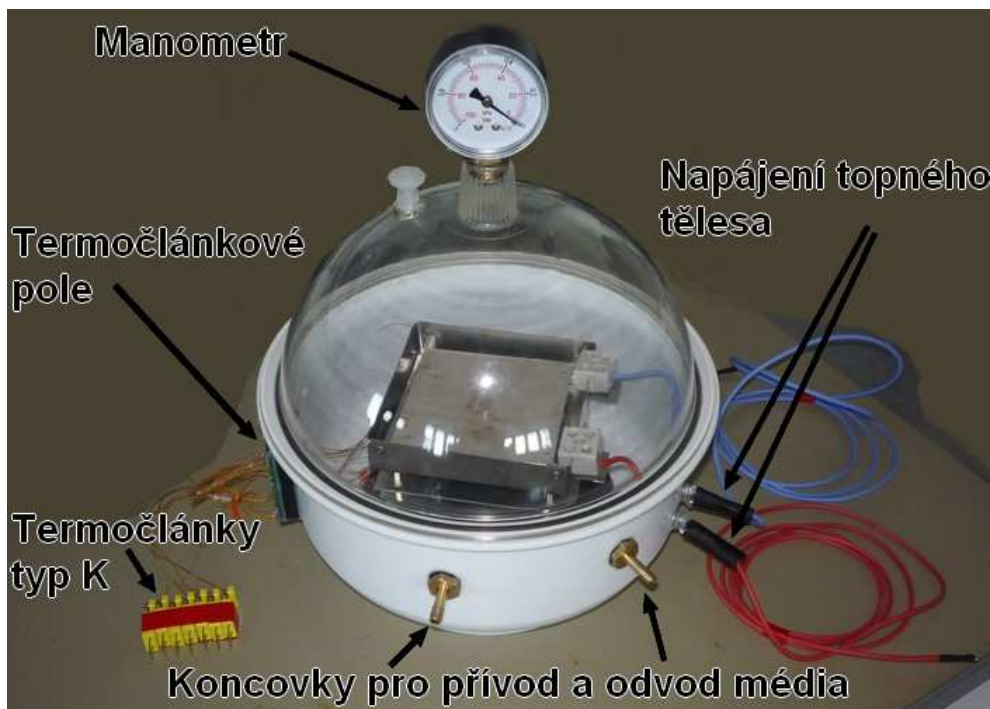


Obr. 34: Blokové schéma propojení regulátoru R500, spínaného zdroje a topného tělesa

6.1.5 Konečné provedení exsikátoru

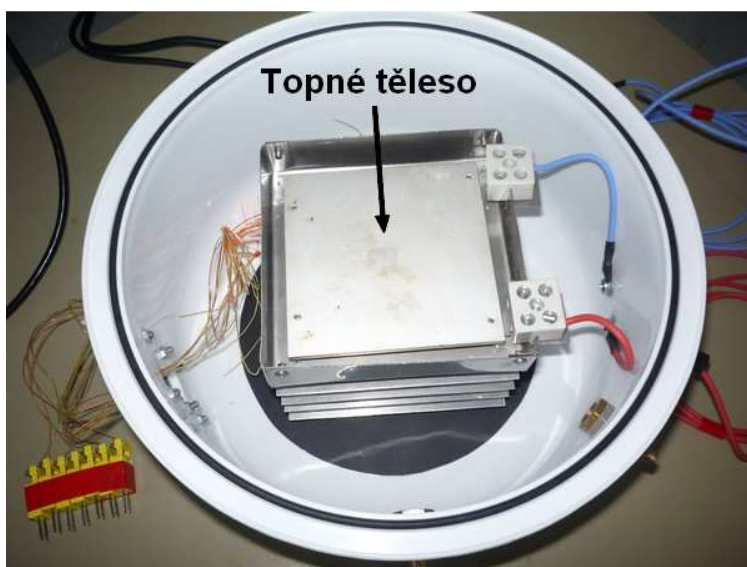
Na obr. 35 je ukázáno vytvořené zařízení pro pájení v dusíkové atmosféře. Součástí víka je manometr na orientační měření podtlaku (od 0 bar do -1 bar). Pokud by nebyl hlídán podtlak ve fázi vyčerpání, mohlo by dojít ke zničení exsikátoru. Ve spodní části

jsou namontovány koncovky pro odvod/přívod média (vzduch, dusík), přívody napájení topného tělesa a termočlánková průchodka.



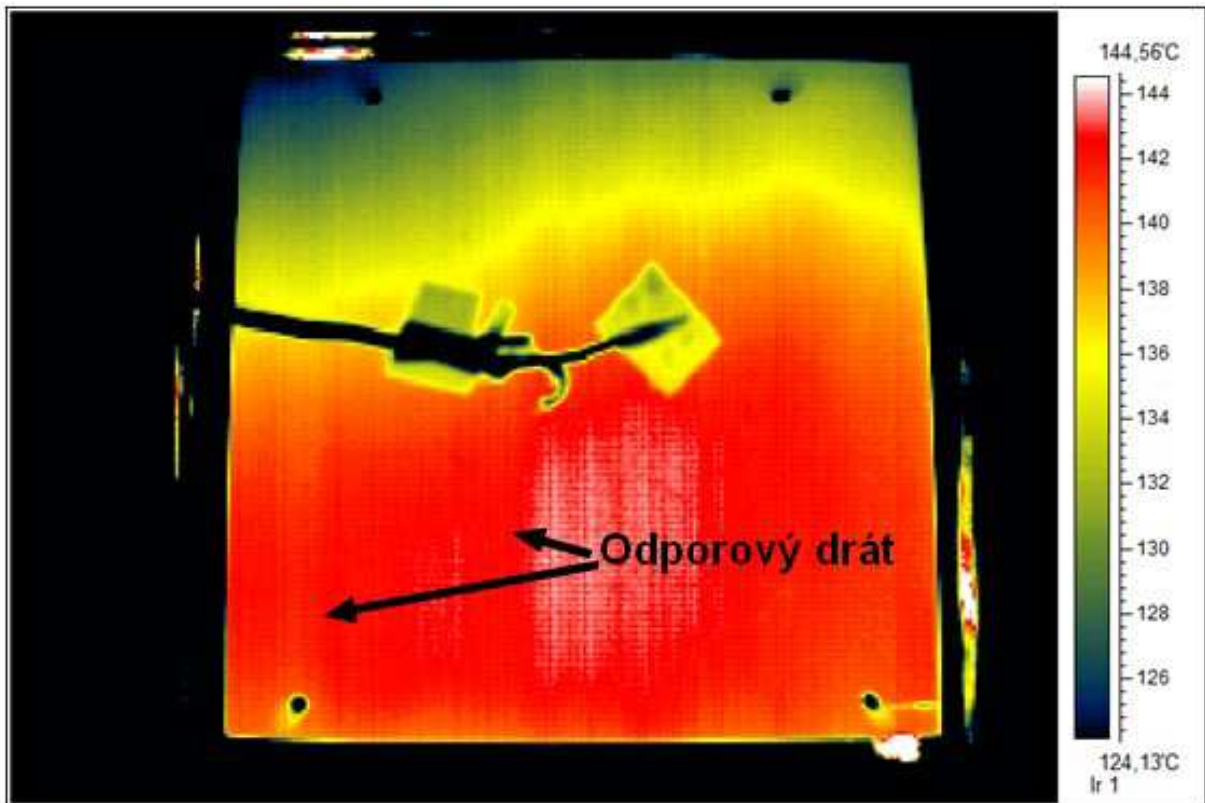
Obr. 35: Zařízení pro pájení v dusíkové atmosféře

Topné těleso je upevněno na distanční věži, která jej odděluje od stěn exsikatoru (viz. obr. 36). V průběhu vytváření tohoto ohřevu byly vyzkoušeny metody izolace jak odporového drátu, tak hliníkové desky. Na odporový drát byla natavena vrstva křemenných mikrokuliček (balotina o velikosti 0,07 – 0,11 mm) a na hliníkovou destičku byla vytvořena vrstva oxidu hlinitého. Upevnění drátu do vyfrézované drážky na spodní straně tělesa bylo provedeno pomocí pasty připravené z trimovacího prášku (oxid hlinitý) a vodního skla.



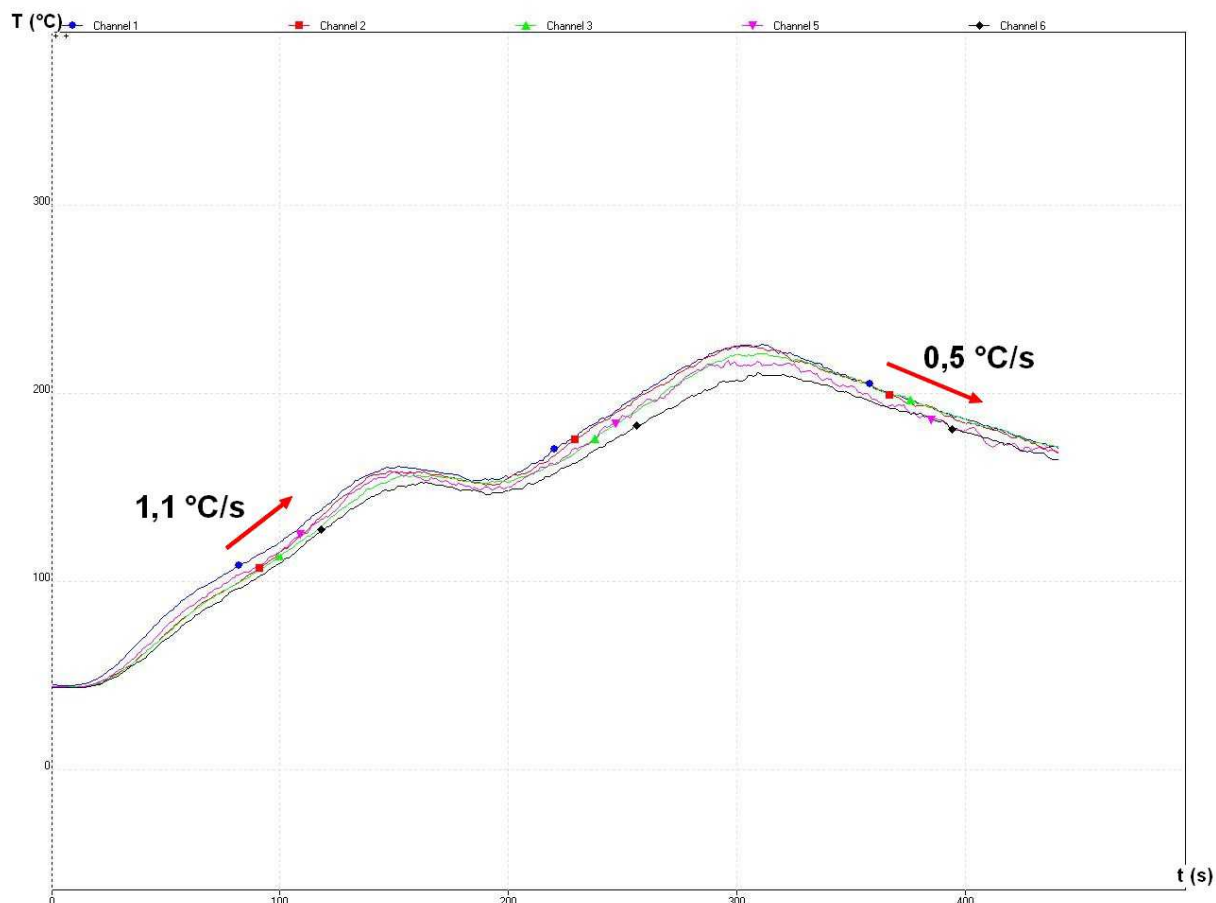
Obr. 36: Topné těleso uvnitř exsikatoru

Měření rovnoměrnosti rozložení teploty na topném tělese jsou vidět na obr. 37. Jedná se o snímek z termokamery HY6800. Výsledkem tedy je, že maximální rozdíl teplot dosahuje 3 °C mezi odporovými dráty. Uprostřed tělesa je větší teplota z důvodu upevnění desky na distanční věži v horní části obrázku.



Obr. 37: Snímek topného tělesa z termokamery

Obr. 38 ukazuje pájecí profil pro olovnatou pájku. Lze vidět, že rychlost náběhu teploty topného tělesa je dostačující. Odchylka od vypočtené hodnoty je způsobena ochlazováním okolní atmosférou a materiálem použitým pro připevnění odporového drátu. Rychlost poklesu teploty v části chlazení je příliš malá. Absence chladicího aparátu tedy znemožňuje pájet uvnitř zařízení. Chlazení bude realizováno v rámci budoucích navazujících projektů.



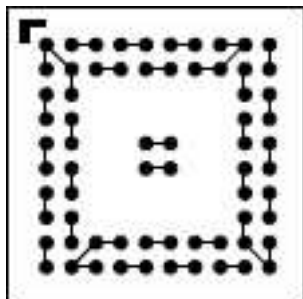
Obr. 38: Pájecí profil pro olovnatou pájku

6.2 Vliv různých atmosfér na pevnost ve stříhu u pájeného spoje BGA

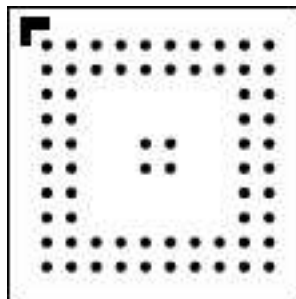
Cílem tohoto experimentu bylo zjistit velikost stříhové síly u pájeného spoje BGA. Přesněji se jednalo o jednotlivé pájkové kuličky zapájené v různých atmosférách, pájením v parách a při okolní atmosféře.

6.2.1 Návrh testovacích substrátů

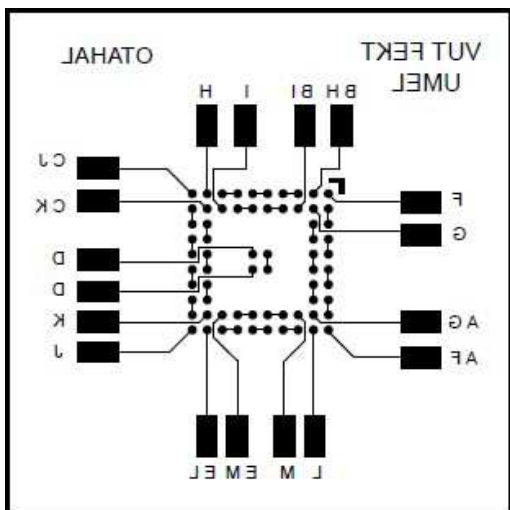
Pro tyto testy byl navrhnut substrát z FR4, který imituje pouzdro BGA (viz. obr. 39), a substrát pro zapájení pouzdra (viz. obr. 41 obr. 40). Oba dva substráty jsou s motivem daisy chain, aby po jejich zapájení vznikl vodivý spoj. Nepájivá maska byla vytvořena typu SMD, tzn. s definovanými pájecími ploškami nepájivou maskou (viz. obr. 40, obr. 42). Zdrojové soubory jsou na CD v příloze č.3.



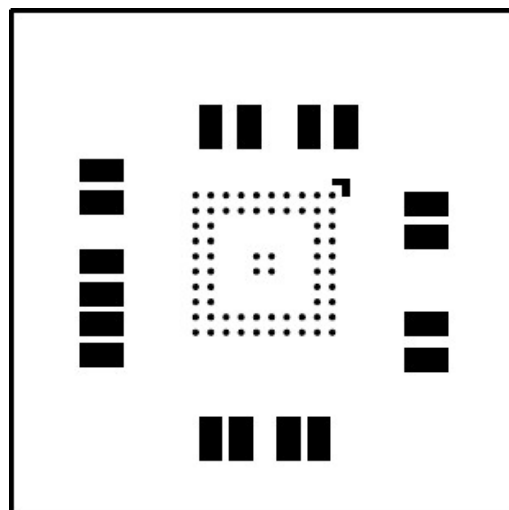
Obr. 39: Vodivý motiv pouzdra BGA (není v poměru)



Obr. 40: Motiv pro nepájivou masku pouzdra BGA (není v poměru)



Obr. 41: Vodivý motiv substrátu pro BGA (není v poměru)



Obr. 42: Motiv nepájivé masky substrátu pro BGA (není v poměru)

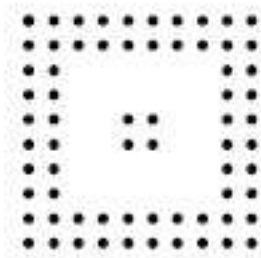
Parametry vyrobených substrátů jsou shrnuty v tab. 4. Velikost kuliček byla volena z důvodu dostupnosti v laboratoři mikroelektronických technologií.

Tab. 4: Parametry vytvořených substrátů

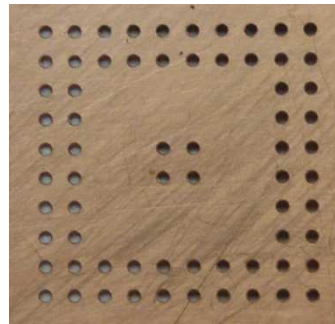
Parametr	Rozměr (další parametry)
Tloušťka (materiál)	1,5 mm (FR4)
Tloušťka mědi	35 μm
Velikost substrátu (pouzdro, DPS)	18 x 18 mm, 50 x 50 mm
Použité kuličky	\varnothing 0,76 mm (Mechanic Sn63Pb37, Senju SAC305)
Měděné plošky	\varnothing 0,75 mm
Nepájivá maska	\varnothing 0,55 mm (zelená)
Šířka čáry	0,2 mm
Povrchová úprava	Ni – 5 - 10 μm , Au – 0,05 - 0,1 μm (ENIG)
Počet vývodů	68

6.2.2 Příprava vzorků

Při vytváření pájkových vývodů na BGA bylo použito způsobu osazení pájkových kuliček do pájecí pasty. Na obr. 43 je vidět motiv pro vytvoření šablony a na obr. 44 již zhotovená šablona. Pro realizaci byl použit měděný plech tloušťky 150 μm a proces leptání. Průměr apertur je 0,5 mm.

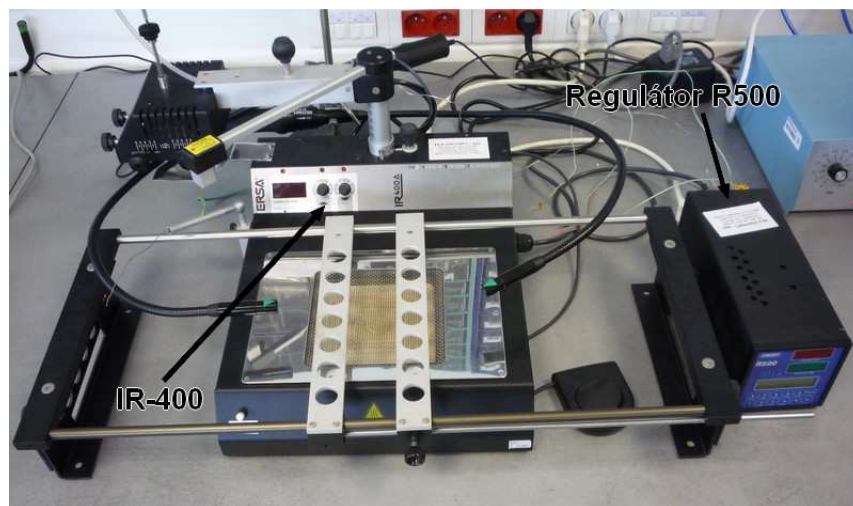


Obr. 43: Motiv pro vytvoření šablony



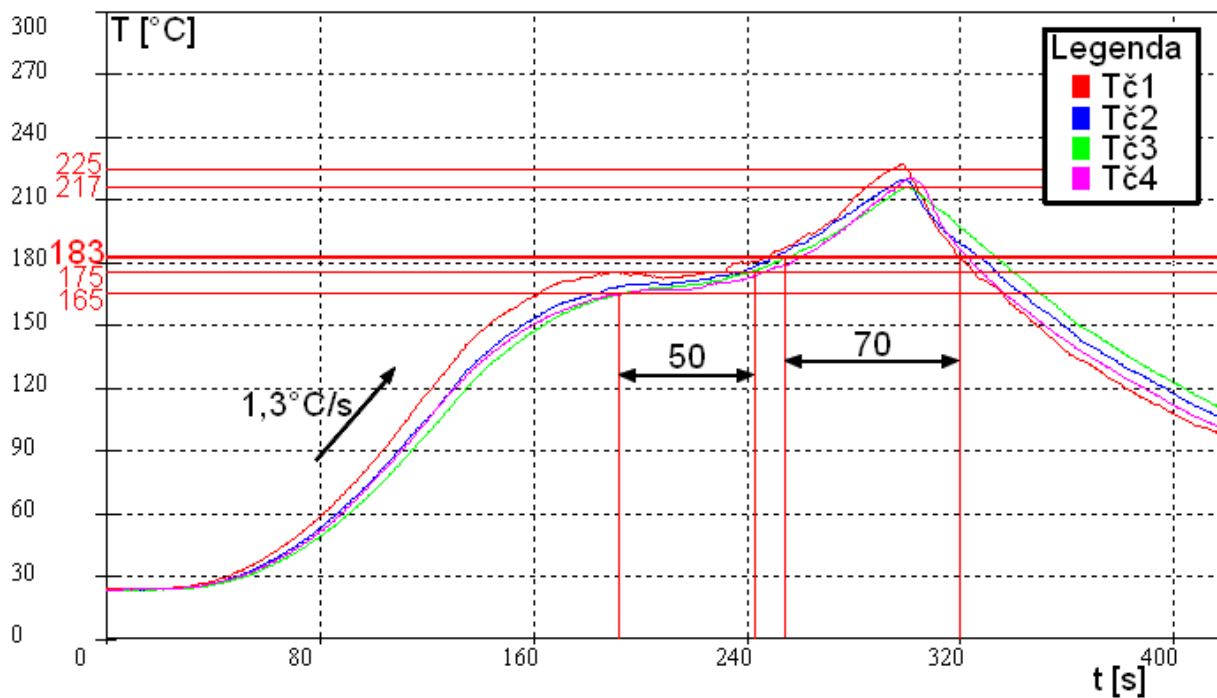
Obr. 44: Vytvořená šablona pro tisk pájecí pasty na BGA

Pájení při normální atmosféře bylo provedeno na upravené opravářské stanici IR-400 (viz. obr. 45). Jedná se o pájení pomocí infračerveného záření z tmavých infrazářičů, tzn. vlnová délka záření je 2 – 8 μm . Topná tělesa jsou umístěna ve spodní části přístroje pro předehřev a v horní hlavě pro přetavení.

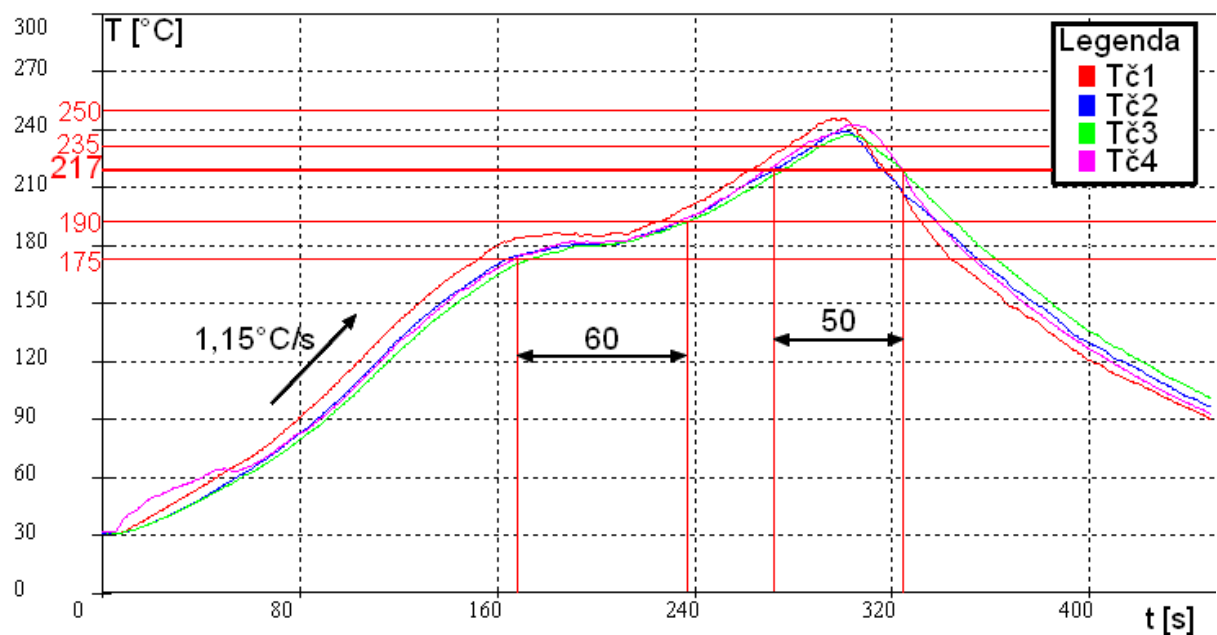


Obr. 45: Upravená opravářská stanice IR-400 (uprostřed) s regulátorem R500 (vpravo)

Pájecí profily jsou optimalizovány pro použité pájecí pasty od firmy COBAR (S6M-XM35, SAC3-XF3) a jsou ukázány na obr. 46 a obr. 47 s vyznačenými nejdůležitějšími parametry.



Obr. 46: Pájecí profil pro pájecí pastu S6M XM35

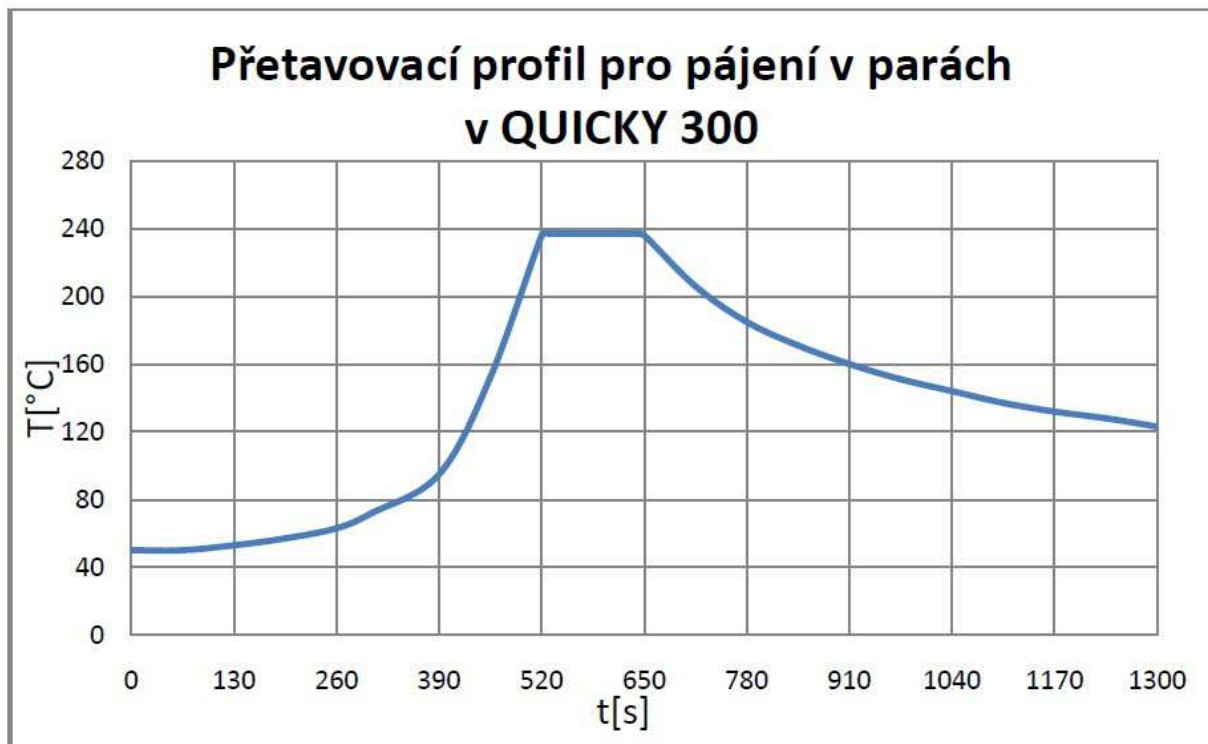


Obr. 47: Pájecí profil pro pájecí pastu SAC3-XF3

Druhým pájecím zařízením bylo QUICKY 300 od firmy ASSCON, které slouží pro pájení v parách (viz. obr. 48). Teplotní profil (viz. obr. 49) je rozdílný od pájecího profilu na opravárenské stanici IR-400, což je způsobeno technologií procesu. Ohřátá pracovní kapalina se odpařuje a následně kondenzuje na pájené DPS. Tím dochází k rovnoměrnému ohřívání všech částí pájené desky.



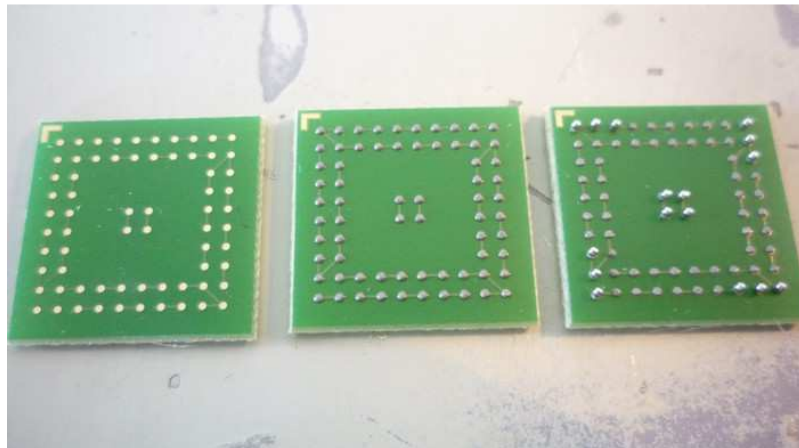
Obr. 48: Zařízení QUICKY 300 sloužící pro pájení v parách



Obr. 49: Přetavovací profil pájení v parách [22]

Postup přípravy vzorků:

1. Čištění pájecích plošek vzorků izopropylalkoholem. Připravený vzorek je vidět na obr. 50 vlevo.
2. Příprava přípravku pro ruční šablonový tisk (upevnění šablony, nastavení zarážek, upevnění vzorku do zarážek a sesouhlasení pájecích plošek se šablonou).
3. Temperování (30 minut na pokojovou teplotu) a rozmíchání pájecí pasty (kvůli homogenitě).
4. Nanesení pájecí pasty na šablonu v dostatečném množství.
5. Protlačení pájecí pasty přes šablonu pomocí stěrky (sklon přibližně 45°, konstantní rychlost a tlak). Natisknutý vzorek je na obr. 50 - uprostřed.
6. Osazení pájkových kuliček do pájecí pasty (viz. obr. 50 - vpravo).
7. Zapájení v daném zařízení (IR-400, QUICKY 300).



Obr. 50: Vzorky v jednotlivých fázích přípravy

6.2.3 Testování stříhové síly

Destruktivní testování síly ve stříhu u pájkových kuliček bylo prováděno na zařízení DAGE 2400. Na obr. 51 lze vidět jak zařízení, tak detail na nástroj a trhanou pájkovou kuličku.



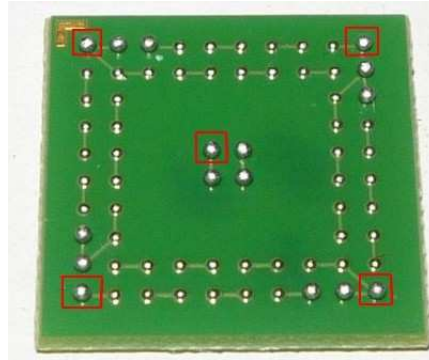
Obr. 51: Zařízení DAGE 2400 s detailem na trhací nástroj a pájkovou kuličku

Nastavené parametry při provádění trhání jsou sepsány v tab. 5. Rychlost pohybu nástroje byla 300 $\mu\text{m/s}$. Výška nástroje znamená pozici nástroje nad substrátem testovaného vzorku. Přesahem se rozumí, jak daleko hlava pojede po odtrhnutí kuličky.

Tab. 5: Parametry při testování stříhové síly na zařízení DAGE 2400

Parametr	Hodnota
Rychlost nástroje	300 $\mu\text{m/s}$
Výška nástroje	50 μm
Přesah po odtrhnutí	550 μm
Hranice síly	2000 g

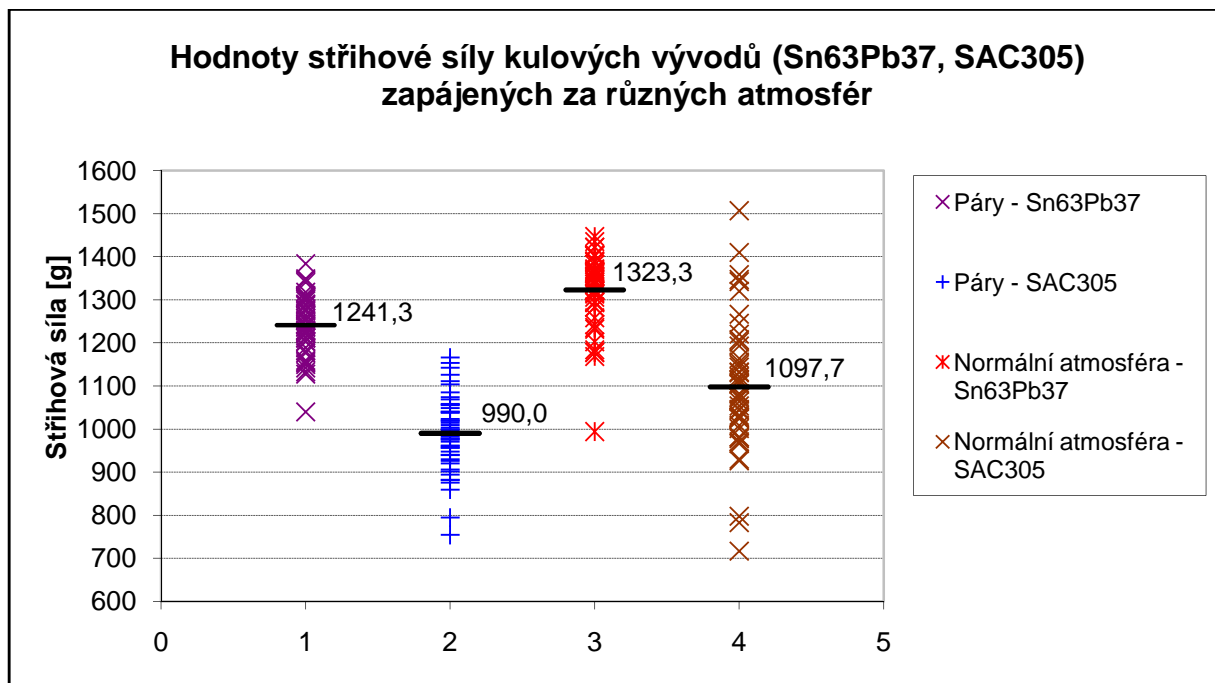
Testováno bylo celkem 20 vzorků pro normální atmosféru a 20 vzorků pro pájení v parách. V každé atmosféře bylo zapájeno 10 vzorků jak pro bezolovnaté (SAC305), tak 10 vzorků pro olovnaté pájkové kuličky (Sn63Pb37). Trháno bylo vždy po pěti kuličkách na každém vzorku (viz. obr. 52).



Obr. 52: Označené trhané kuličky

6.2.4 Výsledky a vyhodnocení

Pro každý typ vzorku bylo trháno 50 kuliček na celkem deseti vzorcích. Obr. 53 ukazuje rozptyl jednotlivých stříhových sil a jejich průměrnou hodnotu pro pájkové kuličky Sn63Pb37 a SAC305 pájené při normální atmosféře a v parách. Naměřené hodnoty jsou v příloze č.1. Ze středních hodnot vyznačených v grafu je vidět, že pájený spoj má menší pevnost ve stříhu po zapájení v parách než pájený spoj vytvořený při normální atmosféře. Také lze vyčíst větší rozptyl hodnot u pájení na stanici Ersa IR-400, výrazný především u bezolovnatých kuliček. Důvodem může být ovlivnění procesu proudícím vzduchem v místnosti.



Obr. 53: Graf znázorňující stříhovou sílu pro jednotlivé pájecí kuličky a různé atmosféry

6.3 Kontrola pájených spojů u nefunkčních komponent pro PC s opravovanými BGA pouzdry

V této části budou vzorky opravovaných BGA pouzder podrobeny zkoumání na defekty způsobené procesem pájení. Na úvod bude popsán postup přípravy na optickou inspekci před a po mikrovýbrusech. V titulcích obrázků jsou vždy popsány nalezené vady, které mohly způsobit nefunkčnost.

6.3.1 Postup

Vzorky BGA pouzder poskytnuté firmou ASUS byly vyřezány z dodaných montáží (viz. tab. 6) pomocí mikrovrtáčky s řezným kotoučem.

Tab. 6: Použité vzorky a jejich identifikační a sériová čísla

Vzorek (identifikace)	Identifikační číslo	Sériové číslo
Grafická karta (GPU ATI)	026110016500	8AC0AIZR00ZW
Základní deska (Chip SIS)	026020004021	NS1S87126806540
Základní deska (N-Vidia)	026190015200	82MCAI005281

Optická inspekce byla provedena zařízením ERSASCOPE (viz. obr. 24). Toto zařízení má mikrokameru a software, pomocí kterého se obraz zaznamenává na PC. Jeho využití je především pro zobrazení těžko dostupných míst jako je například pájený spoj pouzdra BGA nebo PLCC ad.

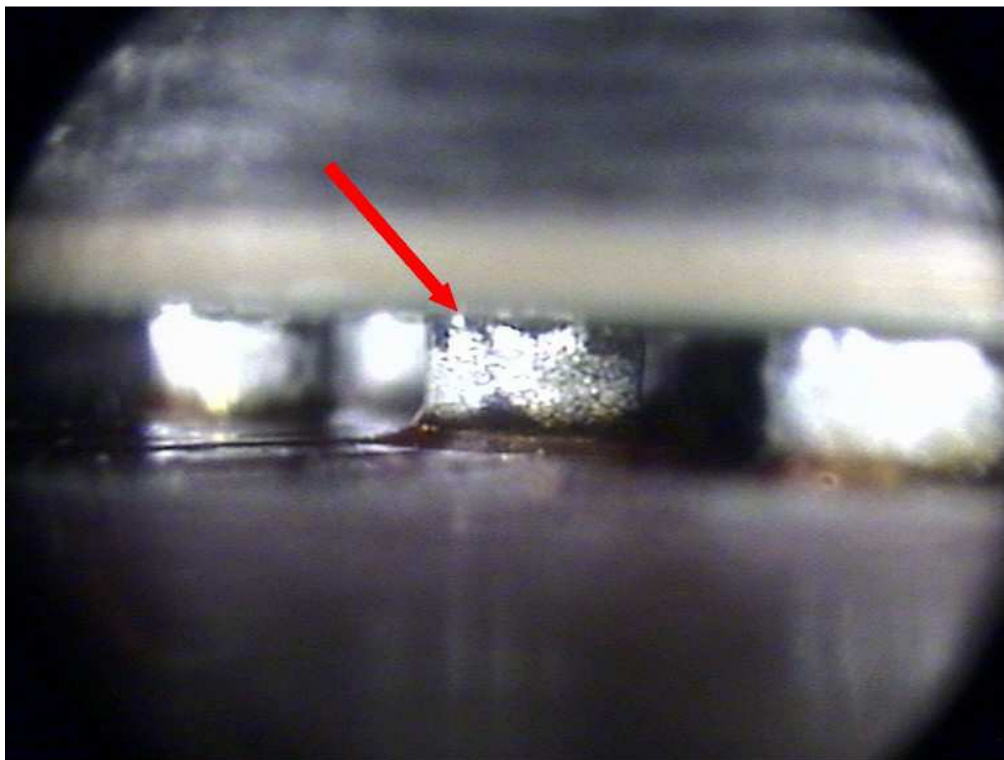
V tomto případě je vidět na obrázcích v kapitole Optická inspekce, že je mikrokamera schopna zaznamenat jen krajní 2-3 řady pájených spojů. Z toho důvodu byla v dalším kroku použita technika mikrovýbrusů, která sloužila pro přesnější určení nalezených vad na ERSASCOPIU a zjištění dalších defektů zjiitelných pouze odtržením pouzdra nebo X-Ray (rentgen) zařízením. Odřezané vzorky byly zality do Dentakrylu a po vytvrzení vybroušeny. Výsledky mikrovýbrusů jsou ukázány a popsány níže v kapitole 6.3.3.

6.3.2 Optická inspekce

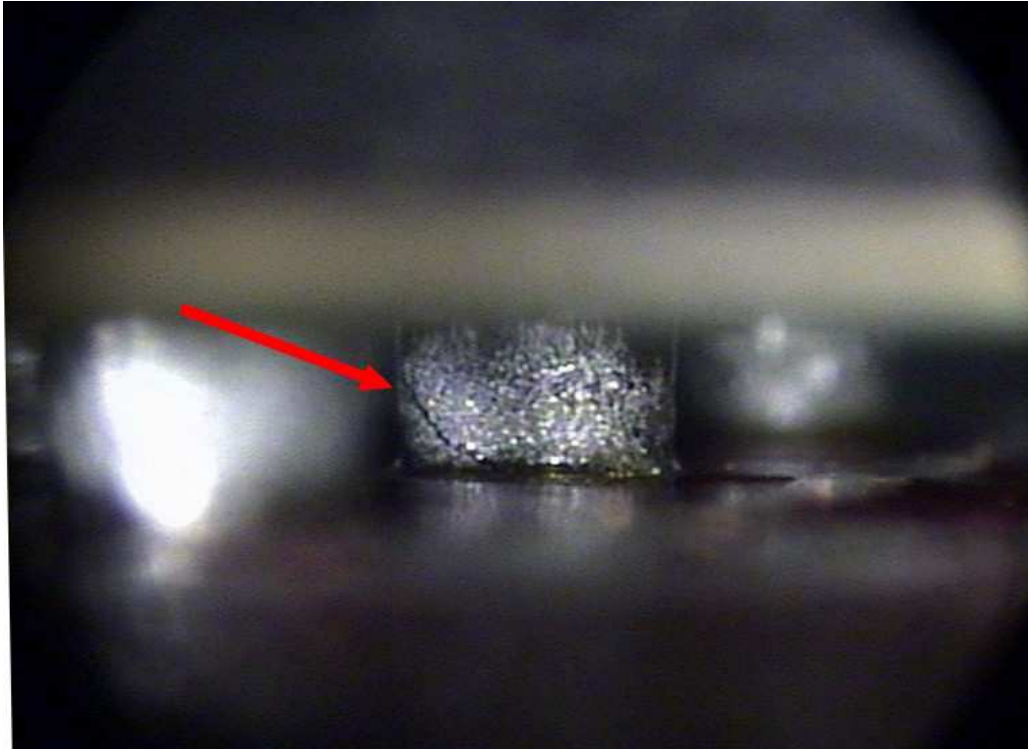
Obr. 54 a obr. 55 ukazují nesprávný tvar zapájeného spoje. To mohlo být způsobeno deformací DPS nebo malým množstvím pájky v kuličce. Ve druhém obrázku je také spoj naprasklý, což mohlo být také způsobeno popsánými činiteli nebo vzhledem k tomu, že byla „kulička“ na kraji došlo ke špatnému průběhu teplotního profilu vlivem nepříznivé cirkulace vzduchu (tj. lokálního rychlého ochlazení).

Na obrázcích obr. 56, obr. 58 a obr. 59 jsou znatelné rezidua tavidla společně s neznámým materiálem. Takové znečištění by mohlo vyvolat zkrat a také zjevně znesnadňuje optickou kontrolu.

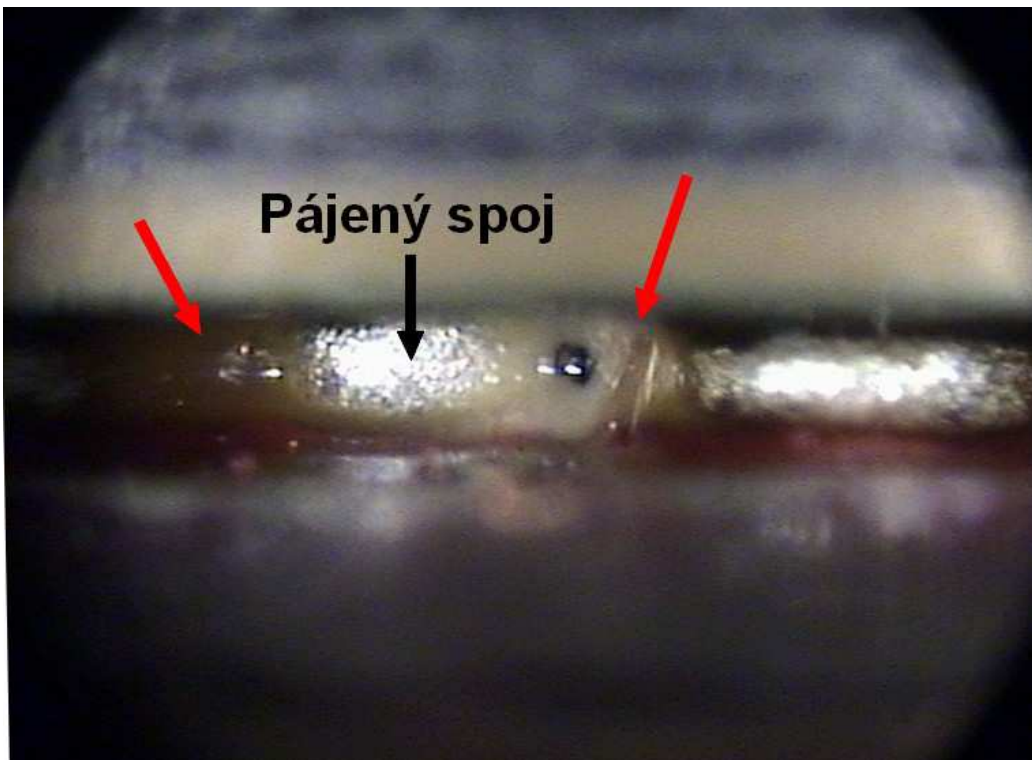
V posledním obr. 57 jde vidět void. Je to dutina vytvořená výpary tavidla, které se vlivem velkého povrchového napětí nedostalo ven z pájeného spoje. Důvodem mohl být nekvalitní materiál kuliček (pájka a tavidlo).



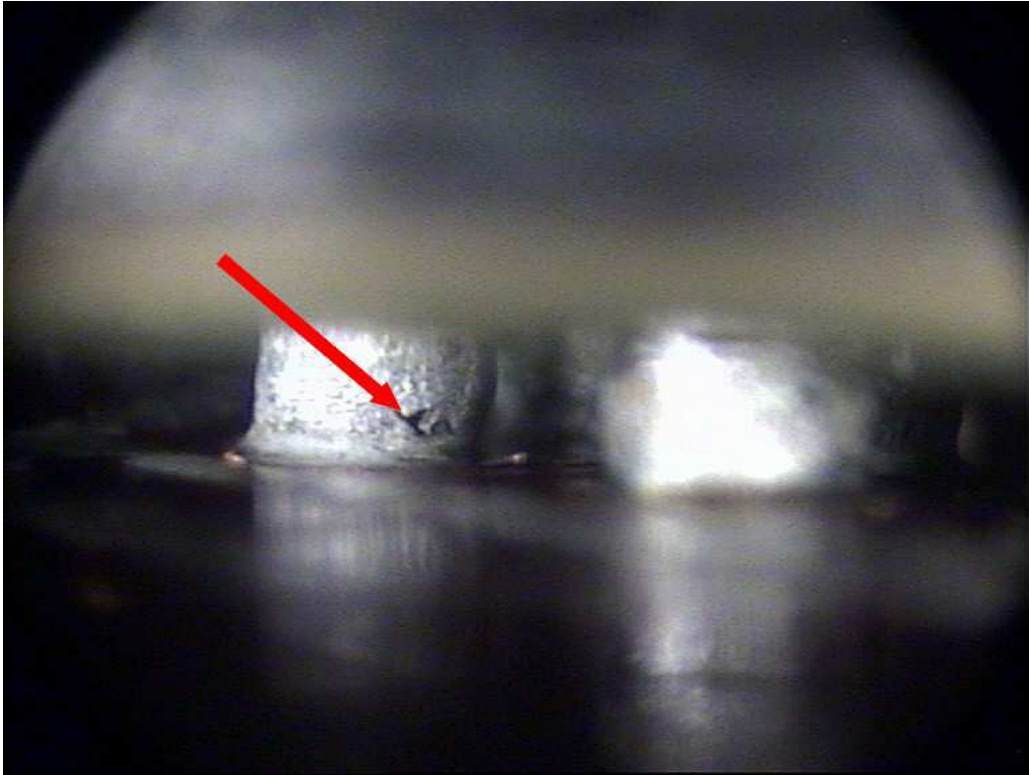
Obr. 54: Málo pájky nebo deformace desky plošných spojů vedla ke špatnému tvaru pájeného spoje (GPU ATI)



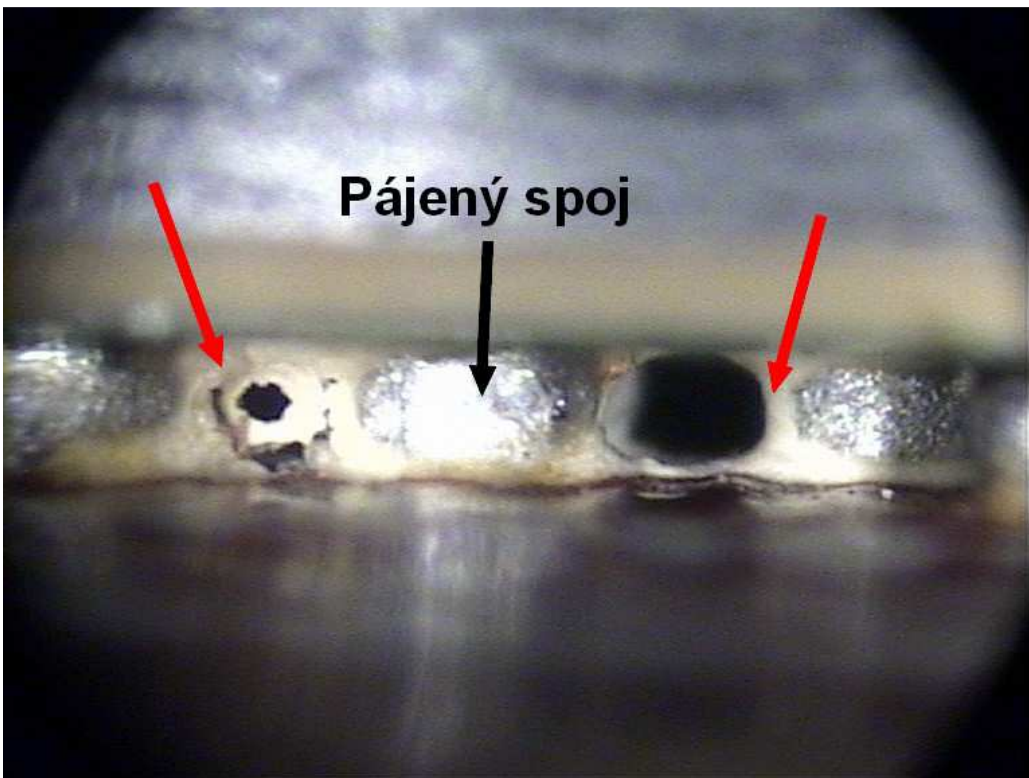
Obr. 55: Prasklina (tzv. crack) (GPU ATI)



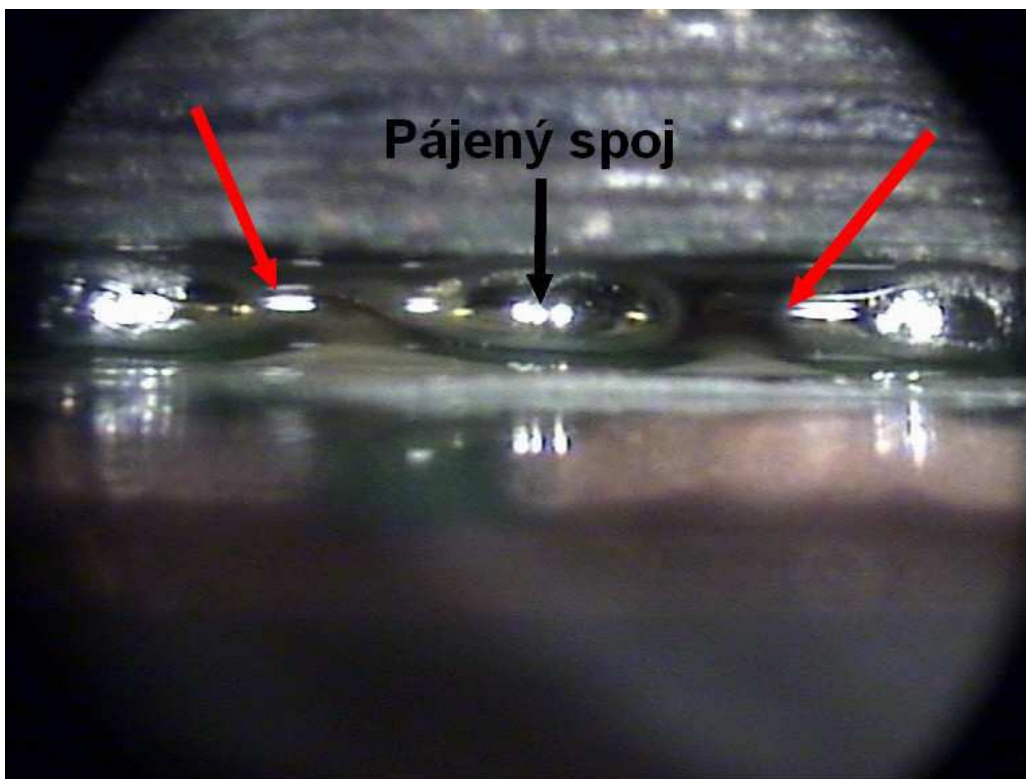
Obr. 56: Rezidua tavidla s další neznámou látkou (GPU ATI)



Obr. 57: Dutina ve spoji, tzv. void (GPU ATI)



Obr. 58: Rezidua tavidla nebo dále nspecifikované látky v procesu (GPU ATI)



Obr. 59: Tavidlo znesnadňující optickou kontrolu a podporující možný zkrat (Chip SIS)

6.3.3 Mikrovýbrusy

Mikrovýbrusy na obr. 60, obr. 61 a obr. 64 se našly zkratky a shluky kuliček nejspíše způsobené uvolněním kuličky při procesu pájení nebo nedopatřením při osazování pouzdra na DPS. V případě obr. 64 se může jednat i o studený spoj.

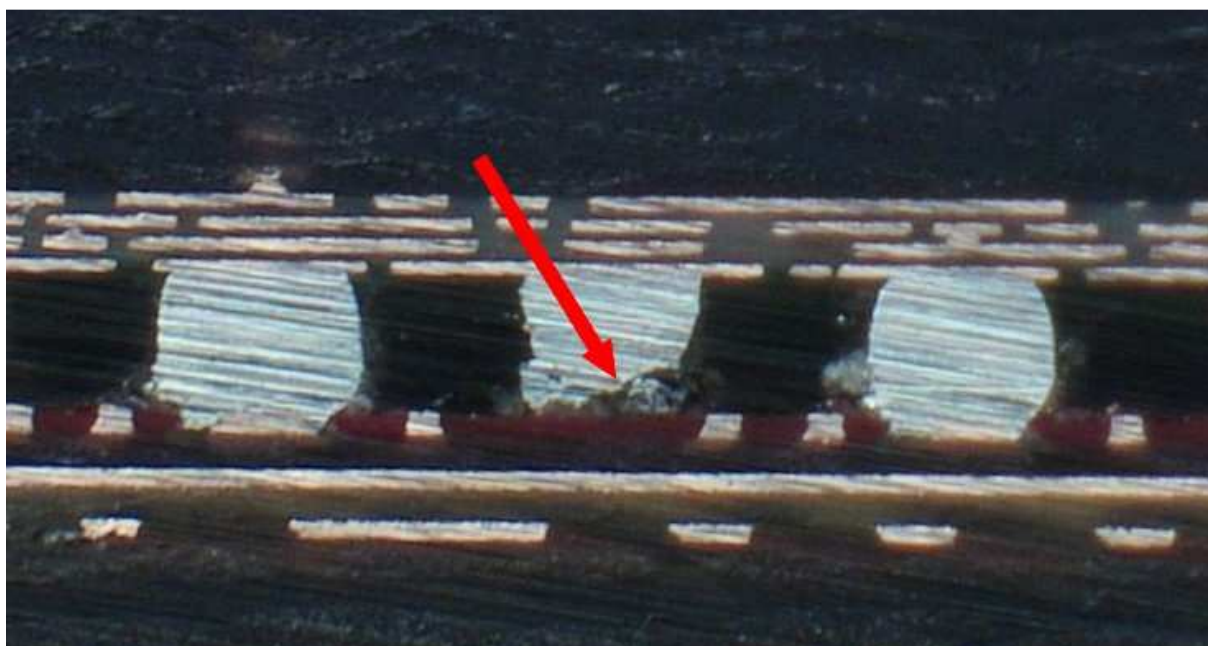


Obr. 60: Pájková kulička v prostoru mezi správně zapájenými vývody vytvářející zkrat (GPU ATI)

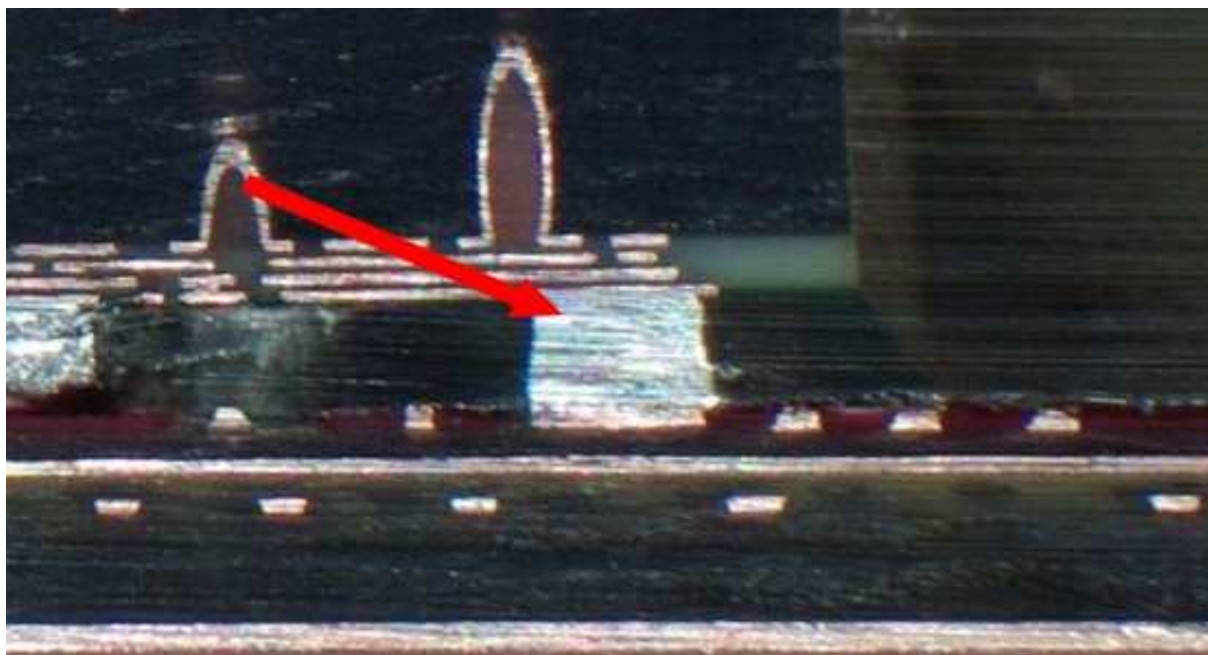


Obr. 61: Zkrat způsobený pájkovou kuličkou, která nezůstala na svém místě při pájení (GPU ATI)

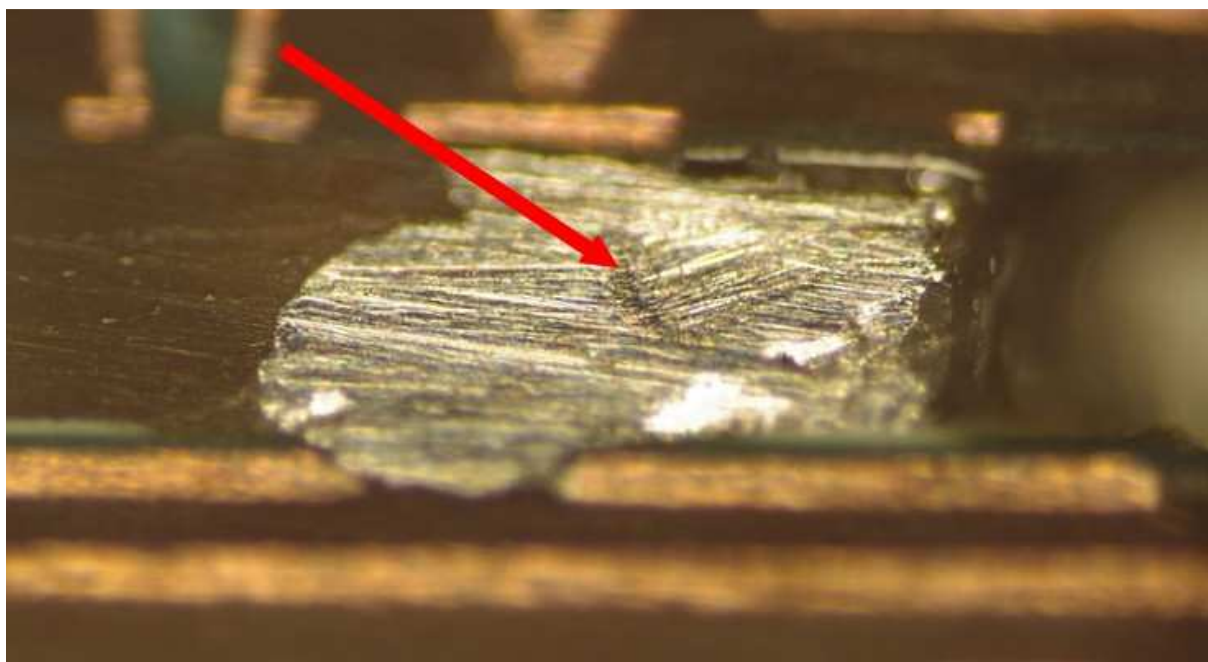
Obr. 62 a obr. 63 ukazují defekty, jejichž původ je v neodpovídajícím tvaru dobře zapájenému spoji.



Obr. 62: Tvar kuličky na horní straně neodpovídá správně tvarovanému pájenému spoji (GPU ATI)

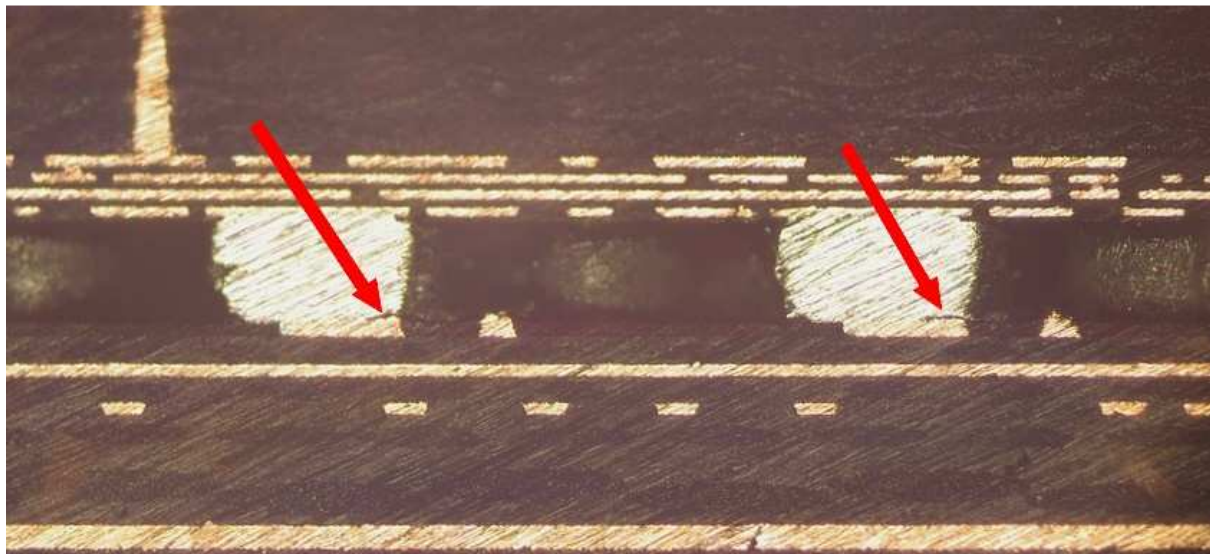


Obr. 63: Mikrovýbrus spoje viditelného na obr. 54 (GPU ATI)



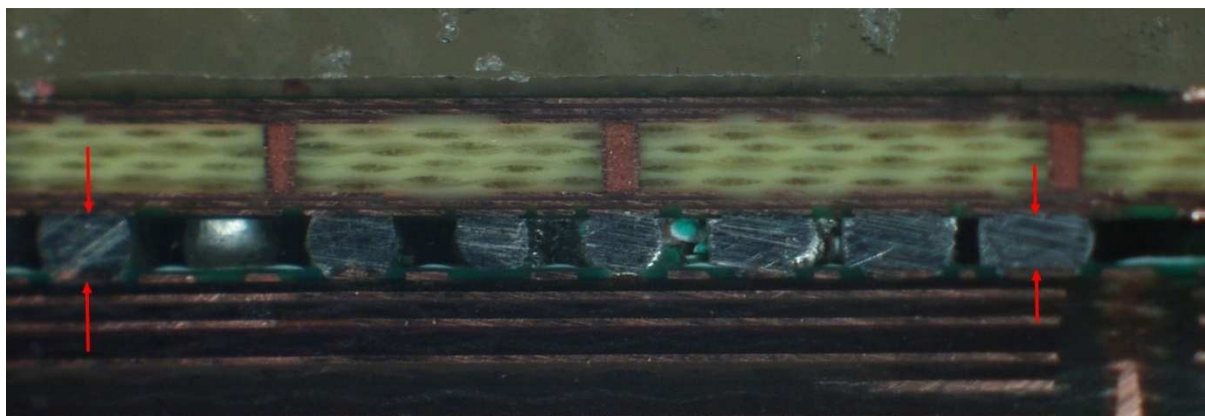
Obr. 64: Shluk pájkových kuliček, který nejspíše vytváří studený spoje (GPU ATI)

Šipkami jsou na obr. 65 znázorněny nesmáčené části pájecích plošek DPS. Je otázkou, jestli nebyla v tomto místě použita nepájitvá maska, nebo jiný materiál zamezující vytvoření kvalitního pájeného spoje.



Obr. 65: Deformovaný tvar spoje v důsledku špatné smáčivosti na spodních pájecích ploškách (GPU ATI)

Pokles BGA na jedné straně vyfocený na obr. 66 mohl být zapříčiněn vnějším silovým působením na pouzdro při procesu pájení.



Obr. 66: Přílišný pokles pouzdra na jedné straně (N-Vidia)

Poslední mikrovýbrus na obr. 67 ukazuje posunutí pouzdra vůči DPS. Mohlo k tomu dojít při sesouhlasení nebo při manipulaci už osazeného pouzdra. Posuv není více jak přes 50% pájecí plošky, takže se dá brát jako vyhovující. Avšak v těchto případech stoupá pravděpodobnost vzniku prasklin, studených spojů a uhnutí pájkových kuliček ze svých pozic.

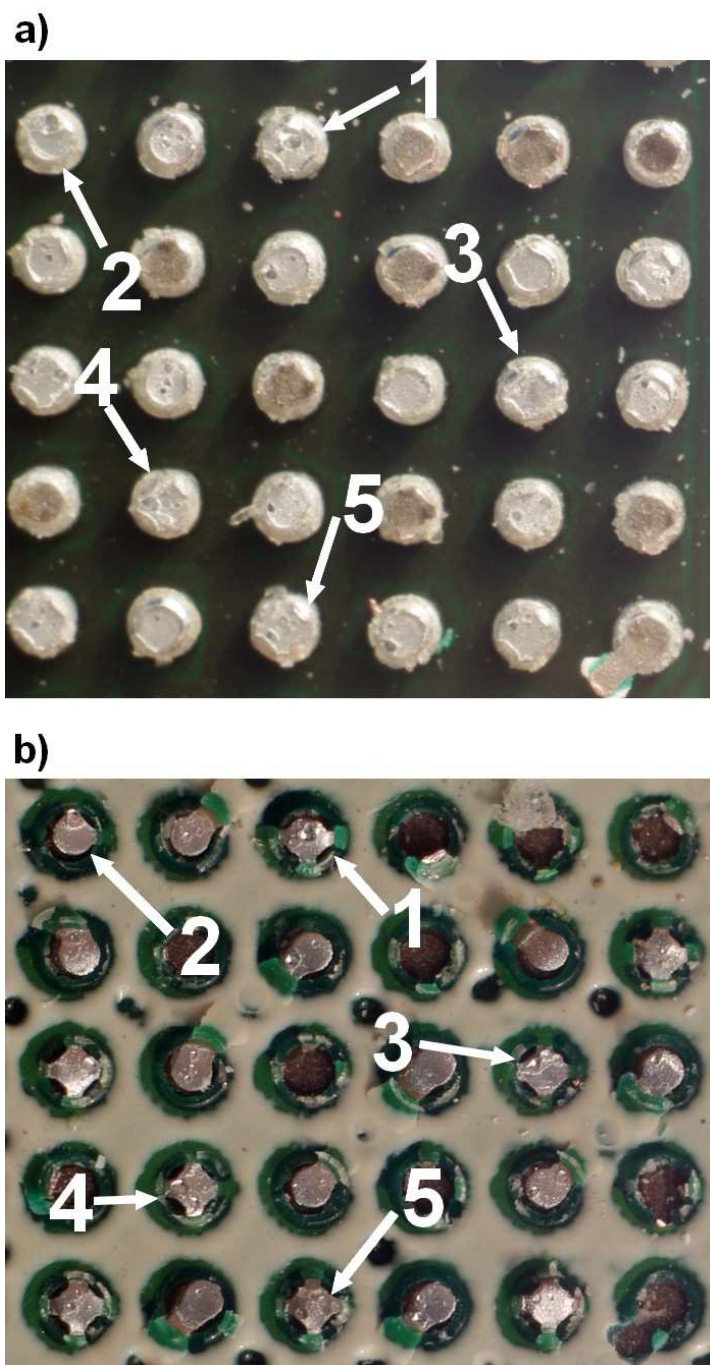


Obr. 67: Posunutí nebo pootočení pouzdra způsobilo špatné sesouhlasení pájecích plošek na desce plošných spojů (GPU ATI)

6.3.4 Održené pouzdro vlivem přípravy na mikrovýbrusy

Na obrázku a) je část odtrženého pouzdra BGA a na obrázku b) je odpovídající část DPS, na které bylo pouzdro připájeno (oba obrázky jsou stejně orientovány pro porovnání). Pájené spoje, které byly od sebe odtrženy, jsou označeny stejným číslem

V jednotlivých odtržených pájených spojích na obr. 68-a),b) lze vidět dutiny (tzv. voidy) způsobené odpařeným tavidlem, které se kvůli velkému povrchovému napětí bezolovnaté pájky nedostalo ven z kuličky. Díky tomu má spoj menší pevnost. Čísla v obou obrázcích ukazují odpovídající pájené spoje s velkými dutinami.



Obr. 68: a) Část odtrženého pouzdra BGA; b) Odpovídající část DPS, na které bylo pouzdro BGA připájeno (N Vidia)

6.3.5 Zhodnocení dosažených výsledků

Z analýzy vyplývá, že výskyt zbytkových nečistot je zásadní problém. Na obr. 56, obr. 58 a obr. 59 jsou vidět rezidua tavidla a dalšího neidentifikovaného materiálu. Tento problém se vyskytoval u všech opravovaných vzorků. V tomto případě dochází ke zhoršování elektrických vlastností a může docházet až ke zkratům. Doporučení je hlídat nebo zlepšit

proces oprav tak, aby nedocházelo ke znečištění neznámým materiálem a aby nezůstávalo tolik tavidla mezi kuličkami.

Obr. 54, obr. 63 a obr. 66 ukazují nesprávné tvary pájených spojů, které se vyskytovaly v rozích na kraji pouzder. Následný případ, který může nastat vlivem situací na obr. 54 a obr. 63 je na obr. 55. Předcházení těmto nesprávným tvarům spojů je rovnoměrné rozložení teploty při procesu pájení.

Z výsledků mikrovýbrusů je patrné, jak je vidět na obr. 60, obr. 61 a obr. 64, že došlo ke spojení kuliček. Mohlo to být způsobeno špatným sesouhlasením kuliček pouzdra BGA s pájecími ploškami na desce plošných spojů (viz. obr. 67 a také částečně obr. 65) nebo pájkovou kuličkou, která se dostala před popř. během procesu pájení do prostoru, kde neměla být.

Obr. 68 ukazuje část odtrženého pouzdra i s odpovídající částí DPS kde bylo pouzdro připájeno. V pájkových kuličkách se vyskytovalo velké množství voidů (viz. obr. 57, obr. 68). Jako možné řešení je použití jiných materiálů pájkových kuliček (tavidlo, pájecí slitina) nebo přesnější průběh doporučeného pájecího profilu k čemuž patří i rovnoměrné rozložení teplot.

Z optické inspekce na Ersascope i z mikrovýbrusů je patrné, že nejvíce nalezených vad bylo u GPU ATI.

Použité metody při zjišťování vad a nedostatků vzniklých procesem jsou nedostatečné. Z výsledků tedy plyne, že by měly být provedeny další testy pomocí rentgenu (X-Ray), který dokáže zachytit zkratky a při vyšší rozlišovací schopnosti i voidy. Pro mikrovýbrusy by mohla být použita i přesnější metoda a to řezání pomocí waterjetu.

7 Závěr

V práci byla zaměřena pozornost na montáž a demontáž pouzder BGA a QFN, jež jsou dnes jednou z hlavních příčin poruch a následných oprav elektronických systémů v informačních a komunikačních technologiích.

V teoretické části práce jsou popsána specifika pouzder BGA a QFN, jejich provedení, specifika výroby a jsou představeny některé typy standardních pouzder. Jsou uvedena základní návrhová pravidla a parametry ovlivňující jakost pájených spojů a také metody jejich testování. Dále jsou popsány nejpoužívanější metody testování aplikované při zjišťování jakosti a spolehlivosti pájených spojů pouzdra BGA i QFN a jsou zpracovány parametry ovlivňující jakost těchto pájených spojů.

Před provedením samotných experimentů a ověřování jakosti pájených spojů zkoumaných pouzder, bylo potřeba navrhnout a sestavit zařízení pro pájení s dusíkové atmosféře. Proto bylo vyvinuto zařízení, ve kterém se dokáže vytvořit dusíková atmosféra přibližně až do koncentrace 1000 ppm kyslíku. Zařízení nebylo dostatečně utěsněno, čímž docházelo k mírnému vnikání vnější atmosféry a pomalému zvyšování koncentrace kyslíku uvnitř zařízení. Řešením je jemné připouštění dusíku do prostoru exsikátoru. Pájecí profil lze vytvořit s požadovanými parametry, avšak bez dostatečně rychlé části chlazení (0,5 °C/s). Pájení v reprodukovatelných podmínkách tedy nebylo zatím možné, a proto nebyly provedeny testy i v dusíkové atmosféře. Těsnost zařízení a chlazení v pájecím procesu je předmětem řešení navazujících projektů.

V experimentální části byly provedeny zkoušky na zjištění stříhové síly u BGA pájkových kuliček pájených v různých atmosférách. Materiály pájkových kuliček byly Sn63Pb37 a SAC305. Z naměřených hodnot vyplývá, že po pájení v parách mají vytvořené spoje menší odolnost ve stříhu. Také bylo zjištěno, že hodnoty u pájení na zařízení IR-400 mají větší rozptyl. Důvodem bylo pravděpodobně proudění okolního vzduchu při pájecím procesu. To vedlo k horším parametrům pájecího profilu.

U opravovaných pouzder BGA u PC komponent dodaných firmou ASUS bylo zjištěno, že důvodem velkého počtu nefunkčních desek byly zbytkové nečistoty v procesu. Snaha o čistější proces vedla ke snížení počtu vadných opravovaných desek, což tuto hypotézu potvrdilo.

Použitá literatura

- [1] Szendiuch, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. VUTIUM Brno. 2006. 379s. ISBN 80-214-3292-6
- [2] Computer desktop encyclopedia. *BGA* [online]. ©2010. [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: http://lookup.computerlanguage.com/host_app/search?cid=C000438&term=BGA
- [3] Intel corporation. *Chip scale packaging (CSP)*. [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: www.intel.com/assets/PDF/pkginfo/ch_15.pdf
- [4] Freescale Semiconductor, Inc. AN1902, *Quad Flat Pack No-Lead (QFN)*. 2004, last revision September 2008 [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: http://www.freescale.com/files/analog/doc/app_note/AN1902.pdf
- [5] Actel. *Assembly and PCB Layout Guidelines for QFN Packages*. 2003, last revision May 2008 [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: http://www.actel.com/documents/QFN_AN.pdf
- [6] Test, assembly and packaging times. *Fabricating Overmolded QFN Packages*. 2011 [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: http://www.promex-ind.com/press_releases/QFN%20Article%20Series_TapTimes.pdf
- [7] Altera Corporation. *Designing with high-density BGA packages for Altera device*. ©2007. [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: <http://www.altera.com/literature/an/an114.pdf>
- [8] Smithsonian corporation. *10 Grid Array Packaging: BGA and CSP*. ©2009. [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: http://smithsonianchips.si.edu/ice/cd/PKG_BK/CHAPT_10.PDF
- [9] IPC-7351B. *Generic Requirements for Surface Mount Design and Land Pattern Standard*. 2005. 92s. Dostupné také z: http://pcbget.ru/Files/Standarts/IPC_7351.pdf
- [10] Intersil Corporation. *PCB Land Pattern Design and Surface Mount Guidelines for QFN Packages*. 2002, last revision April 2009 [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/tb38/tb389.pdf>
- [11] Carsem. *QFN Package Users Guide*. 2002 [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/Packaging/Carsem%20MLP%20users%20guide.pdf>
- [12] AIM, SURASKI, D. Reflow Profiling. 2002 [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: [http://www.smtnet.com/library/files/upload/374_RSS_vs_RTS_revised_12-99_\(no_pics\).doc](http://www.smtnet.com/library/files/upload/374_RSS_vs_RTS_revised_12-99_(no_pics).doc)
- [13] VLSI Solution. *RoHS* [online]. ©2010. [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: <http://www.vlsi.fi/en/support/rohs.html>

- [14] CHING-MAI, Ko, kol. *Testing the reliability of BGAs*. ©2009. [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: <http://www.primedistributing.com/infocenter/prime/Testing-The-Reliability-Of-BGAs.pdf>
- [15] Interconnect devices, Inc. *Dyno™ Test Sockets For QFN Devices*. 2010. Dostupné z: <http://www.idinet.com/IdiNet/media/PDF/Dyno.pdf>
- [16] Texas Instruments. *Microstar BGA packaging reference guide*. ©2000. [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: <http://focus.ti.com/lit/wp/ssyz015b/ssyz015b.pdf>
- [17] ROBERTS, H., kol. *Analysis_of_BGA_Solder_Joint_Reliability_for_Selected_Solder_Alloy_and_Surface_Finish_Configurations* [online]. ©2009. [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: http://www.atotech.com/fileadmin/pdf/papers/el/Analysis_of_BGA_Solder_Joint_Reliability_for_Selected_Solder_Alloy_and_Surface_Finish_Configurations.pdf
- [18] ROBERTS, H., kol. *Evaluation of Pb-free BGA Solder Joint Reliability on Ni-based Surfaře Finishes usány Alternative Sudar and Pull Metrologies*. ©2009. [cit. 2011-1-5]. Dostupné z: http://www.atotech.com/fileadmin/pdf/papers/el/Evaluation_of_Pb-free_BGA_Solder_Joint_Reliability.pdf
- [19] Glenbrook Technologies Inc. *Basic Principles of X-Ray Inspection for BGA 's*. ©2005. [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: http://www.gsaservice.com/X-Ray_Inspection_BGA_Glenbrook_Technologies.ppt
- [20] HROCH, M. *Eloxování hliníku* [online]. © 2007-2012 [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: <http://www.astronom.cz/procyon/chemistry/elox.html>
- [21] NEWMAN, R. *Anodizing Aluminum* [online]. 2011. [cit. 2012-5-20]. Dostupné z: <http://www.focuser.com/atm/anodize/anodize.html>
- [22] SOMER, J. *Parametry spojů BGA na Al₂O₃ keramických substrátech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 64 s. Vedoucí bakalářská práce Ing. Michal Nicák.

Seznam zkratek

DIL – pouzdro s vývody na dvou protilehlých stranách (Dual In Line)

QFP – pouzdro s vývody na všech čtyřech stranách (Quad Flat Pack)

PLCC – pouzdro v vývodu tvaru J na všech čtyřech stranách (Plastic Leaded Chip Carrer)

Flip Chip – obrácený čip (způsob připojení čipu v pouzdře)

BGA – provedení pouzdra s kuličkovými kontakty (Ball Grid Array)

HAL – povrchová úprava pomocí cínu (Hot Air Levelling)

JEDEC – organizace vytvářející standardy pro mikroelektronický průmysl

HDI – desky s vysokou hustotou propojů (High Density Interconnections)

SMD – definovaná pájecí ploška nepájívou maskou (Solder Mask Defined)

NSMD – nedefinovaná pájecí ploška nepájívou maskou (Non-Solder Mask Defined)

PLD – programovatelné logické obvody (Programmable Logic Devices)

CSP – pouzdro s mezisubstrátem nepřevyšující 1,5 násobek plochy čipu (Chip Scale Packaging)

DPS – deska plošných spojů

OSP – povrchová úprava mědi organickými inhibitory mědi (Organic solderability preservative)

ENIG – povrchová úprava mědi chemický nikl a imerzní zlato (Electroless Nickel Immersion Gold)

Crack – prasklina (studený spoj)

Void – dutina vytvořená výpary tavidla, které neuniklo z pájky

Seznam obrázků

Obr. 1: Pouzdra BGA a mikro BGA (spodní pouzdro umístěné na stupnici) [2]	8
Obr. 2: Pohled na klasické pouzdro BGA a pouzdro BGA CSP [2]	9
Obr. 3: QFN s "E" typem vývodů: a) Vývody zespodu; b) Vývody z boku [4]	10
Obr. 4: QFN s "S" typem vývodů: a) Vývody zespodu; b) Vývody z boku [4].....	10
Obr. 5: QFN s "Punch" typem vývodů: a) Vývody zespodu; b) Vývody z boku [4].....	10
Obr. 6: Vnitřní náčrt QFN pouzdra s provedením vývodů ve třech řadách [5].....	11
Obr. 7: Holý nosič, tzv. lead frame, pouzdra QFN typu S [6]	11
Obr. 8: Holý nosič s vytvořenou vrstvou NiPdAu (19).....	12
Obr. 9: Nakontaktovaný čip v pouzdře QFN typu S [6]	12
Obr. 10: Vedení signálových cest mezi ploškami [7]	15
Obr. 11: Orientace VIA propojů mezi pájecími ploškami a jejich rozměry pro BGA pouzdro s rozestupy mezi pájkovými kuličkami 1,00 mm [7].....	16
Obr. 12: Způsoby provedení nepájívé masky na pájecích ploškách: a) NSMD (nedefinovaná nepájívá maska); b) SMD (definovaná nepájívá maska) [7].....	16
Obr. 13: Tvary pájecích plošek na DPS: a) obdelníkový; b) tvar prstu	18
Obr. 14: Přesahy pájecích plošek na DPS vzhledem k ploškám na pouzdře [11].....	19

Obr. 15: Nedefinovaná pájecí ploška nepájivou maskou: a) pro rozteče 0,5 mm a menší; b) pro rozteče 0,65 mm a větší.....	19
Obr. 16: Diagram s činiteli ovlivňujícími jakost zapájení pouzder BGA	20
Obr. 17: Sedlový pájecí profil s vyznačenými parametry pro bezolovnaté pájky [13].....	22
Obr. 18: : a) Testovací patice na BGA pouzdra s detailem na pružinové kontakty; b) Ukázka principu kontaktu pájkových kuliček a kontaktních pinů [14].....	25
Obr. 19: Testovací patice pro QFN pouzdra [15].....	25
Obr. 20: Princip metody sériového spojení vývodů [16]	26
Obr. 21: a) Přístroj na měření síly stříhu Dage 4000HS; b) Detail hlavy pro měření stříhové síly; c) Princip měření stříhové síly [17]	27
Obr. 22: Princip měření tahové síly na zařízení Dage [18].....	27
Obr. 23: Základní princip testování spolehlivosti pomocí rentgenových paprsků [19].....	28
Obr. 24: ERSASCOPE - systém pro kontrolu špatně dostupných míst na DPS pomocí mikrokamery	29
Obr. 25: Plastový exsikátor před provedením změn	30
Obr. 26: Termočlánekové pole se sedmi termočláneků typu K.....	31
Obr. 27: Vlevo je opracovaná hliníková destička a vpravo je hliníková destička po anodizaci hliníku (eloxování)	33
Obr. 28: Eloxování hliníkové desky určené pro topné těleso	34
Obr. 29: Odporový drát izolovaný skleněnými mikrokuličkami (balotinou).....	35
Obr. 30: Vytvořené topné těleso po upevnění odporového drátu.....	35
Obr. 31: Distanční věž pro topné těleso	36
Obr. 32: Regulátor R500	36
Obr. 33: Spínaný zdroj 24VDC 14,6A	37
Obr. 34: Blokové schéma propojení regulátoru R500, spínaného zdroje a topného tělesa.....	37
Obr. 35: Zařízení pro pájení v dusíkové atmosféře	38
Obr. 36: Topné těleso uvnitř exsikátoru	38
Obr. 37: Snímek topného tělesa z termokamery	39
Obr. 38: Pájecí profil pro olovnatou pájku.....	40
Obr. 39: Vodivý motiv pouzdra BGA (není v poměru)	41
Obr. 40: Motiv pro nepájivou masku pouzdra BGA (není v poměru)	41
Obr. 41: Vodivý motiv substrátu pro BGA (není v poměru)	41
Obr. 42: Motiv nepájivé masky substrátu pro BGA (není v poměru).....	41
Obr. 43: Motiv pro vytvoření šablony.....	43
Obr. 44: Vytvořená šablona pro tisk pájecí pasty na BGA	43
Obr. 45: Upravená opravárenská stanice IR-400 (uprostřed) s regulátorem R500 (vpravo)	43
Obr. 46: Pájecí profil pro pájecí pastu S6M XM35	44

Obr. 47: Pájecí profil pro pájecí pastu SAC3-XF3	44
Obr. 48: Zařízení QUICKY 300 sloužící pro pájení v	45
Obr. 49: Přetavovací profil pájení v parách [22].....	45
Obr. 50: Vzorky v jednotlivých fázích přípravy	46
Obr. 51: Zařízení DAGE 2400 s detailem na trhací nástroj a pájkovou kuličku	47
Obr. 52: Označené trhané kuličky	48
Obr. 53: Graf znázorňující stříhovou sílu pro jednotlivé pájecí kuličky a různé atmosféry	48
Obr. 54: Málo pájky nebo deformace desky plošných spojů vedla ke špatnému tvaru pájeného spoje (GPU ATI)	50
Obr. 55: Prasklina (tzv. crack) (GPU ATI)	51
Obr. 56: Rezidua tavidla s další neznámou látkou (GPU ATI).....	51
Obr. 57: Dutina ve spoji, tzv. void (GPU ATI).....	52
Obr. 58: Rezidua tavidla nebo dále nespécifikované látky v procesu (GPU ATI)	52
Obr. 59: Tavidlo znesnadňující optickou kontrolu a podporující možný zkrat (Chip SIS)	53
Obr. 60: Pájková kulička v prostoru mezi správně zapájenými vývody vytvářející zkrat (GPU ATI).....	53
Obr. 61: Zkrat způsobený pájkovou kuličkou, která nezůstala na svém místě při pájení (GPU ATI).....	54
Obr. 62: Tvar kuličky na horní straně neodpovídá správně tvarovanému pájenému spoji (GPU ATI).....	54
Obr. 63: Mikrovýbrus spoje viditelného na obr. 54 (GPU ATI).....	55
Obr. 64: Shluk pájkových kuliček, který nejspíše vytváří studený spoje (GPU ATI)	55
Obr. 65: Deformovaný tvar spoje v důsledku špatné smáčivosti na spodních pájecích ploškách (GPU ATI).....	56
Obr. 66: Přílišný pokles pouzdra na jedné straně (N-Vidia)	56
Obr. 67: Posunutí nebo pootočení pouzdra způsobilo špatné sesouhlasení pájecích plošek na desce plošných spojů (GPU ATI).....	57
Obr. 68: a) Část odtrženého pouzdra BGA; b) Odpovídající část DPS, na které bylo pouzdro BGA připájeno (N Vidia).....	58

Seznam tabulek

Tab. 1: Vzorce pro výpočet šířky signálové cesty [7].....	15
Tab. 2: Parametry návrhu DPS pro BGA pouzdra s roztečí 1 mm [7].....	17
Tab. 3: Parametry výběru velikosti pájecí plošky podle kuličky nebo rozteče [9]	17
Tab. 4: Parametry vytvořených substrátů.....	42

Tab. 5: Parametry při testování stříhové síly na zařízení DAGE 2400	47
Tab. 6: Použité vzorky a jejich identifikační a sériová čísla	49

Seznam symbolů

g	m	Šířka signálové cesty
d	m	Průměr
P	W	Elektrický výkon
U	V	Napětí
I	A	Proud
R	Ω	Elektrický odpor
Q	J	Skupenské teplo
m	Kg	Hmotnost
c	J/Kkg	Tepelná kapacita
T	K	Teplota
t	s	Čas

Seznam příloh

Příloha č.1 – naměřené hodnoty pevnosti ve stříhu pro pájkové kuličky (Sn63Pb37, SAC305) pájené v různých atmosférách (páry, normální atmosféra).

Příloha č.1

Páry_Sn63Pb37

Vzorek č.	Stříhová síla (g)
1	1142,1
	1133,3
	1127,8
	1159,5
	1212,7
2	1150,0
	1228,2
	1243,7
	1211,1
	1238,1
3	1349,2
	1305,6
	1251,6
	1176,6
	1211,9
4	1306,3
	1288,9
	1303,6
	1310,3
	1317,9
5	1275,4
	1302,4
	1243,7
	1384,1
	1308,3
6	1258,3
	1252,0
	1286,5
	1264,7
	1297,6
7	1346,4
	1290,1
	1236,5
	1202,8
	1230,2
8	1257,1
	1340,9
	1181,3
	1226,6
	1228,2
9	1188,9
	1274,2
	1154,0
	1220,6
	1204,0
10	1040,1

Páry_SAC305

Vzorek č.	Stříhová síla (g)
1	1055,6
	1142,1
	1009,5
	1003,2
	1014,3
2	1000,0
	991,1
	920,1
	985,2
	947,8
3	960,4
	956,3
	977,5
	859,4
	881,7
4	1040,5
	997,6
	940,1
	977,8
	794,8
5	1073,8
	1037,7
	1165,9
	875,4
	926,2
6	1103,6
	1048,8
	882,1
	893,7
	961,9
7	1125,8
	1039,7
	901,6
	970,6
	906,3
8	1085,3
	1111,1
	1019,0
	929,8
	975,0
9	1069,0
	982,9
	1153,6
	1023,4
	1057,1
10	1058,3

	1241,3
	1223,8
	1157,1
	1279,4

	1019,4
	956,7
	939,7
	754,0

IR-400_Sn63Pb37

Vzorek č.	Stříhová síla (g)
1	1320,6
	1372,2
	1323,0
	1336,9
	1353,2
2	1341,3
	1388,9
	1344,4
	1364,3
	1283,3
3	1422,2
	1242,5
	1306,3
	1178,6
	1282,9
4	1168,3
	1235,7
	1177,8
	1184,1
	994,2
5	1202,8
	1356,0
	1295,6
	1365,9
	1336,5
6	1313,5
	1447,2
	1404,0
	1422,6
	1403,2
7	1346,4
	1404,8
	1435,3
	1232,1
	1294,8
8	1369,8
	1360,7
	1403,2
	1355,6
	1293,7
9	1390,9
	1401,6
	1382,1

IR-400_SAC305

Vzorek č.	Stříhová síla (g)
1	1107,1
	1358,7
	1032,1
	1053,6
	1082,1
2	1071,4
	1163,9
	1008,3
	1045,6
	981,3
3	1121,4
	1347,2
	1507,1
	1115,1
	1410,3
4	1342,5
	1063,9
	1027,0
	1105,6
	926,6
5	1024,2
	1027,4
	1024,6
	981,3
	782,5
6	1131,0
	1220,6
	1320,2
	1202,4
	977,8
7	1044,0
	1150,0
	1104,0
	1266,7
	797,6
8	1192,9
	1245,6
	1132,9
	1113,1
	930,2
9	1001,2
	1075,4
	1144,0

	1367,1
	1258,7
10	1316,3
	1321,4
	1387,7
	1321,0
	1352,8

	970,6
	716,7
10	1027,4
	1080,6
	1207,5
	1156,0
	966,3