



**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**

# **ZVÝŠENÍ VÝTĚŽNOSTI BGA OPRAVÁRENSKÉHO PROCESU**

**INCREASING THE YIELD OF BGA REPAIR PROCESS**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. MARTIN JANÍČEK**

**VEDOUcí PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. Bc. Pavel Řihák**

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Mikroelektronika**

**Student:** Bc. Martin Janíček

**ID:** 136602

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Zvýšení výtěžnosti BGA opravárenského procesu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s procesem oprav BGA komponentů a vlivy působící na výtěžnost. Vytvořte nástroj pro sledování aktuální výtěžnosti a navrhnete zlepšení současného procesu pro zvýšení výtěžnosti.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 10.2.2015

**Termín odevzdání:** 28.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Bc. Pavel Řihák

**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:**

Předkládaná práce se zabývá možnostmi zvýšení výtěžnosti BGA opravárenského procesu v prostředí reálné výroby. Nejprve je zde uvedena základní problematika, její pojmy, problémy a možnosti. Dále se zabývá technologickými aspekty oprav součástek v pouzdrech BGA. Rovněž je zde zpracována základní problematika vyhodnocování výtěžnosti. Je uveden současný stav řešení problému spolu s návrhem na vytvoření nového systému, který by vykazoval optimálnější možnosti vyhodnocování výtěžnosti procesu. Práce obsahuje výsledky praktických testů vlivu metody nanášení tavidla a druhu použitého tavidla na kvalitu pájeného spoje. Závěrem jsou uvedeny možné způsoby dalšího zlepšení výtěžnosti procesu oprav součástek v pouzdře BGA.

## **Abstract:**

This thesis deals with possibilities of increasing the yield of BGA repair process. First there is mentioned basic problematics and its notions, problems and possibilities. Next it deals with technological aspects of repairing of devices in BGA covers. Also there is mentioned basic problematics of evaluating of yield. There is stated current state of solving the problem and also there is suggested new design of application which would be more optimal for evaluation of the yield of process. This thesis contains results of practical testing of methods of application of flux affecting final quality of solder joints as well as kind of flux which was used. At the end there are mentioned possible ways of another increasing of yield of BGA repair process.

## **Klíčová slova:**

BGA, výtěžnost, IR, testování, oprava, tavidlo.

## **Keywords:**

BGA, yield, IR, testing, repair, flux.

## Bibliografická citace díla:

JANÍČEK, M. *Zvýšení výtěžnosti BGA opravárenského procesu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bc. Pavel Řihák.

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení.

V Brně dne 27. 5. 2015

.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu práce Ing. Bc. Pavlu Řihákovi za poskytnutí odborných rad, věcné připomínky, ochotu a vstřícný přístup při realizaci práce. Rovněž děkuji ostatním pracovníkům firmy SANMINA, kteří mi věnovali svůj čas a znalosti pro zpracování některých kapitol práce.

# Obsah

Úvod .....	6
1 BGA.....	7
1.1 PBGA.....	8
1.2 CBGA.....	9
1.3 MBGA .....	9
1.4 TBGA.....	9
1.5 $\mu$ BGA.....	9
1.6 FBGA.....	10
2 Technologie ohřevu.....	11
2.1 Infračervený ohřev (IR).....	12
2.2 Horkým plynem .....	13
2.3 Hot plate.....	14
2.4 Vyhřátým nástrojem.....	14
3 Zařízení.....	15
3.1 PDR XT5P a E3 .....	15
4 Proces opravy BGA .....	17
5 Technologické aspekty oprav .....	18
5.1 Teplota okolí.....	18
5.2 Vlhkost.....	18
5.3 Pájecí profil.....	19
5.4 Použitá pájka a tavidlo .....	21
5.5 Práce operátora.....	21
5.6 Manipulace a skladování (ESD) .....	22
6 Technologie testování .....	23
6.1 Elektrický test .....	23
6.2 J-TAG .....	23
6.3 X-Ray.....	24
6.4 Vizuální kontrola.....	25
7 Vyhodnocování výtěžnosti .....	26

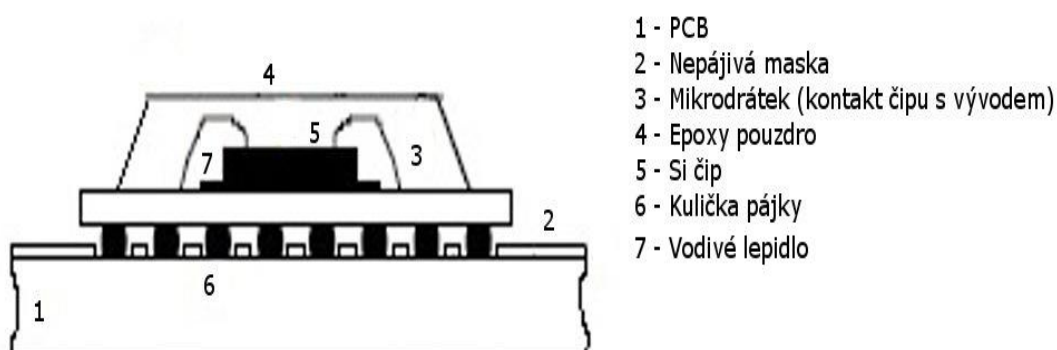
7.1	Jak sledovat .....	26
7.1.1	Final Yield (FY) .....	26
7.1.2	Throughput Yield (TPY).....	27
7.1.3	Rolled Throughput Yield (RTY) .....	27
7.1.4	Normalized Yield (NY).....	27
7.2	Současné řešení.....	28
7.3	Navrhované řešení .....	29
8	Praktická část.....	31
8.1	Vyhodnocování kvality spojů.....	32
8.2	Tavidlo .....	33
8.2.1	Skladování tavidel.....	34
8.3	Metodika nanášení.....	35
8.3.1	Nanášení tavidla na kuličky pájky pouzdra BGA.....	36
8.3.2	Nanášení tavidla na desku plošných spojů.....	37
8.3.3	Nanášení na desku plošných spojů i na kuličky BGA.....	39
8.3.4	Vyhodnocení metody nanášení.....	42
8.4	Vliv použitého tavidla.....	43
8.4.1	Vzorek 1.....	43
8.4.2	Vzorek 2.....	45
8.4.3	Vzorek 3.....	46
8.4.4	Vzorek 4.....	48
8.4.5	Vzorek 5.....	50
8.4.6	Vzorek 6.....	51
8.4.7	Vzorek 7.....	53
8.4.8	Vzorek 8.....	55
8.5	Společné zhodnocení .....	56
8.6	Další fenomény pozorované během testování .....	58
8.6.1	Poškození vodou .....	59
8.6.2	Neočištěná deska .....	60
	Závěr.....	62
	Zdroje použité literatury .....	65
	Seznam zkratk .....	67

## Úvod

Vzhledem k neustálému rozvoji v oblasti elektrotechniky vyvstala přibližně v 80. letech 20. století potřeba vytvořit pouzdro na čipové součástky, které by vyhovovalo moderním trendům. Byla to zejména nutnost zmenšit plochu potřebnou k zapouzdření čipu a vyvedení jeho vývodů z pouzdra ven tak, aby tyto vývody byly dostupnými technologiemi pájitelné. Tehdy používaná pouzdra se stranovými vývody, např. SIP (Single In-line Package) či DIP (Dual In-line Package) přestávala vyhovovat a do popředí se začaly dostávat technologie obecně založené na povrchové montáži s využitím pájení přetavením pájecí pasty. Po postupném vývoji se velmi využívanými stala pouzdra s maticí kulových vývodů, kuliček pájky, obecně známá pod zkratkou BGA (Ball Grid Array). V současnosti jsou tato pouzdra velmi rozšířena, vzdálenosti jednotlivých kuliček od sebe se od prvních aplikací této technologie zmenšily. BGA klade značné nároky na technologie a know-how pracovišť, která se tímto procesem zabývají. Dalším znakem současného elektrotechnického průmyslu, možná s výjimkou zvláštních oblastí jako je aerospace, zdravotnický či armádní sektor, je nutnost klást značný důraz na ekonomičnost každého kroku tak, aby konkurenceschopnost finálního řešení byla co největší. Právě z toho důvodu je mnoho výrobků designováno jako tzv. „neopravitelných“ neboť není ekonomicky přínosné, aby docházelo k jejich opravám. Naproti tomu existuje i dostatek výrobků, u nichž je oprava montážní sestavy výhodná, přičemž problematika pouzder BGA je u takovýchto oprav hojně zastoupena. Jak bylo zmíněno, je tento proces spojen s nutností uvažovat vliv velkého množství faktorů a právě jejich optimalizace v reálném provozu je cílem této práce.

# 1 BGA

BGA je druh maticového pouzdra, jehož základní podoba je nejčastěji čtverec či obdélník, který má na spodní straně matici kulových vývodů, odtud tedy název Ball Grid Array. Tyto kuličky jsou tvořeny pájkou a po přetavení realizují vodivé i mechanické spojení pouzdra se základní deskou. Zavedení tohoto typu pouzdrění přineslo oproti dříve používaným typům pouzder např. DIP, SIP atd. zejména úsporu místa na desce, kterou součástka zabírá při stejném počtu vývodů. Zároveň se také zlepšily parazitní vlastnosti cest jako je kapacita a indukčnost, což přispívá k možnosti použití vyšších frekvencí tam, kde je to žádoucí. Dalším přínosem jsou lepší tepelné vlastnosti pouzder BGA oproti jejich předchůdcům.



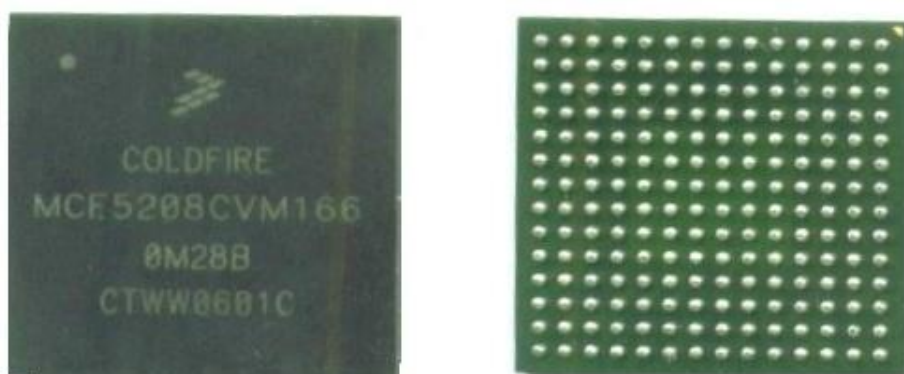
Obr. 1 : Schéma pouzdra BGA

První aplikace využívající čipy pouzdrěné do BGA se objevovaly v 80. letech a postupně tato metoda získávala na rozšíření. Dnes se hojně využívá například pro pájení mikroprocesorů, flash pamětí, specializovaných zákaznických obvodů (ASIC – Application Specified Integrated Circuit) či obvodů FPGA (Field Programmable Gate Array). Samotná montáž čipu v pouzdře může být provedena různými metodami. Čip může být přilepen na substrát elektricky vodivým lepidlem, může být na páskovém nosiči, tzv. TAB (Tape Automated Bonding) či jako flip chip. Elektrické propojení čipu pak zajišťují mikrodrátky připojené buď pomocí ultrazvukové (ultrasonické) metody, termokomprese (termosonicky) nebo termickou metodou. Drátky zajišťují spojení čipu s vývody pouzdra a teprve pouzdro samotné je pak pájeno přetavením. Je možné, aby v jednom BGA pouzdře bylo obsaženo

více čipů, toto je obecně označováno jako MCM (Multi Chip Module). Z důvodu úspory místa je možná i realizace dvou pouzder (a dvou čipů) nad sebou, takzvaný PoP (Package on Package). Pro pájení BGA je doporučováno, aby průměr kontaktní plošky na substrátu byl přibližně 0,8 násobkem průměru kuličky. [1] V praxi jsou pouzdra BGA například podle substrátu, na kterém je umístěn čip či podle vzdálenosti sousedních kuliček na pouzdře (pitch) označována různými písmeny před názvem BGA. Řada z těchto názvů je nejednotná, používána různými výrobci dle jejich interpretace a vytváří tak nepřehlednost při výběru vhodného typu pouzdra. Existují ovšem taková označení, která lze považovat za univerzálně platná. Ta nejdůležitější z nich jsou uvedena níže.

## 1.1 PBGA

Je zkratkou pro Plastic Ball Grid Array. Toto provedení je nejpoužívanější ve většině běžných aplikací. Slovo plastic vyjadřuje substrát, na kterém je čip umístěn. Jako substrát je využíván materiál pro výrobu desek plošných spojů (PCB). Nejčastěji je to FR4 a FR5 typické tloušťky 0,2mm s 18um mědi na každé straně. Ten má dostačující elektrické i tepelné vlastnosti, přičemž příznivě se jeví i z ekonomického hlediska. Výbornou vlastností je stejný koeficient teplotní roztažnosti jako u materiálu základní desky (předpokládáno použití FR4 či FR5). To má za výsledek menší namáhání spojů mechanickým pnutím a zvyšuje tak výslednou spolehlivost aplikace. Čip je na substrát připojen lepidlem, které je tepelně vodivé. Elektrické propojení čipu je realizováno pomocí mikrodrátků, které vedou na plošky umístěné na substrátu, která jsou propojeny pomocí prokovů na kontaktní vrstvu kuliček.



Obr. 2: Typická podoba pouzdra PBGA [2]

## 1.2 CBGA

Ceramic Ball Grid Array. Substrát v tomto typu pouzdra je tvořen vícevrstvou keramickou podložkou, na níž je připojen čip. Výhodou tohoto řešení je větší tepelná odolnost pouzdra. Z tohoto důvodu je využíváno tam, kde je nutno zajistit odvod většího množství tepla, například v aplikacích pracujících na vysokých kmitočtech (procesor v PC). Nevýhodou je jednak větší ekonomická náročnost oproti PBGA ale zejména pak rozdílná teplotní roztažnost oproti běžně používaným materiálům základních desek. Velikost tohoto typu pouzdra je tudíž limitována tak, aby v pracovním rozsahu teplot nedošlo k narušení pevnosti pájených spojů.

## 1.3 MBGA

Metal Ball Grid Array. Jako materiál substrátu je využit kov, většinou měď nebo hliník. Kromě dobrých tepelných vlastností se využívá rovněž jeho stínění pomocí kovu. Toto vede na využití pouzder MBGA v oblastech přenosu vysokofrekvenčních signálů či jiných signálů náchylných k rušení.

## 1.4 TBGA

Tape Ball Grid Array. Principem je připevnění čipu, např. technologií flip chip, na polyamidovou podložku, která je oboustranně pokovena mědí. Měď je z jedné strany uzemněna což zlepšuje odolnost pouzdra proti rušení. Svými vlastnostmi stojí mezi PBGA a CBGA. Oproti plastu má lepší tepelné vlastnosti a stabilitu ve velkém rozsahu teplot. Výhodou je rovněž flexibilita substrátu. Je udáváno, že je na něm možno docílit vytvoření přesnějšího motivu než u PBGA. [2]

## 1.5 $\mu$ BGA

Touto zkratkou je označováno pouzdro Micro Ball Grid Array. Samotné označení je v podstatě shodné s obecnějším CSP (Chip Scale Package). CSP je však používáno nejen v souvislosti s pouzdry BGA. Vyjadřuje, že pouzdro je svými rozměry přibližně shodné s velikostí vlastního čipu. Výhodou je možnost zvýšení zástavbové hustoty součástek na desce a díky zmenšení délky cest dochází i k zlepšení parazitních vlastností (kapacita, indukčnost) což umožňuje zvýšit pracovní frekvenci obvodu.

## 1.6 FBGA

Zkratka vyjadřuje Fine pitch Ball Grid Array. V literatuře jsou uvedeny hranice, které vymezují označení tohoto typu pouzdra, poměrně nejednotné. Podle JEDEC (Joint Electron Devices Engineering Council Solid State Technology Association) je za FBGA možné považovat takové BGA, které má rozteč mezi vývody kuliček (pitch diameter) menší než 1mm.[3] Přínosem tohoto typu pouzdra je možnost dalšího zmenšení pouzdra při zachování stejného počtu vývodů. V souvislosti se zmenšující se vzdáleností kuliček od sebe ovšem vyvstává technologický problém, kdy při nesprávně nastaveném procesu dochází ke slévání kuliček a tvorbě zkratu. Lze se setkat i s označením UFBGA, což vyjadřuje Ultra Fine pitch Ball Grid Array. Někteří autoři tak označují pouzdra, u nichž je rozteč mezi vývody kuliček menší než 0,4 mm. Toto označení však není jednotné a není obecně přijato. Z hlediska formálního se tedy stále jedná o FBGA a právě takto by mělo být pouzdro označováno.

## 2 Technologie ohřevu

Pro pájení či opravy součástek technologie SMT je k dispozici celá řada metod, jejichž velmi dobrá znalost je předpokladem spolehlivě vytvořeného spoje. V současné době ustupuje do pozadí metoda strojního pájení vlnou, která není pro SMT součástky zcela vhodná. Problémy představuje především vysoká zástavbová hustota moderních desek a také fakt, že pro pájení vlnou je potřeba navrhovat plošky pro SMT součástky větší než je tomu potřebné u ostatních metod. Při požadavku opravy součástky, tedy jejího odpájení, je pak tato metoda zcela nepoužitelná. Do popředí se tak dostávají řešení principiálně založená na procesu přetavení pájky či pájecí pasty pomocí jejího ohřevu na teplotu vyšší, než je teplota tavení. Pro kvalitu výsledného spoje má tato operace velmi významnou roli, přičemž každá z dostupných technologií přináší své výhody pro jinou oblast použití. Před zvolením konkrétní technologie je tedy nutno prostudovat její možnosti a nedostatky vzhledem k jejímu konkrétnímu účelu. Typickou otázkou, kterou je nutno zodpovědět je, zda je požadována aplikace pro hromadnou výrobu desek, či zda se jedná o výrobu testovací či laboratorní. Odlišný přístup je nutno zvolit i v případě, kdy je kromě výroby požadována i možnost opravy součástek na již osazených deskách. Rozhodující je pochopitelně i druh použitých komponentů, jejich zástavbová hustota a způsob montáže na desce.

Součástky typu BGA kladou na použití a rovněž „zvládnutí“ dané technologie poměrně vysoké nároky, přičemž jejich zmenšující se rozměry spolu se zvyšováním počtu vývodů tyto nároky činí stále vyššími. V těsném spojení s technologií osazování je i otázka návrhu desky, na kterou se osazuje. Je-li její návrh proveden zdařile, lze při správně nastaveném procesu osazování a pájení očekávat schopnost pouzdra BGA se vycentrovat, přičemž se udává schopnost vystředění až do 50 % přesahu plošky a kuličky pájky.[4] I toto je výhoda technologie pájení přetavením oproti staršímu strojnímu pájení vlnou, kde navíc bylo nutné SMT součástky ještě osazovat do speciálních lepidel. Fyzikálně se při ohřevu uplatňují všechny tři způsoby přenosu tepla. Je to vedení (kondukce), proudění (konvekce) a záření (radiace). Je nutné si uvědomit, že v některých případech jsou tyto fyzikální pochody žádoucí, a jindy naopak tvoří nedostatek daného řešení. Jako příklad lze uvést přenos tepla prouděním při lokálním horkovzdušném ohřevu, což je vlastně cíl operace, nicméně nevhodný je již

následující přenos tepla vedením na ostatní součástky na desce, jež jsou v blízkosti ohřívané součástky. Mezi frekventované technologie ohřevu pak patří následující řešení.

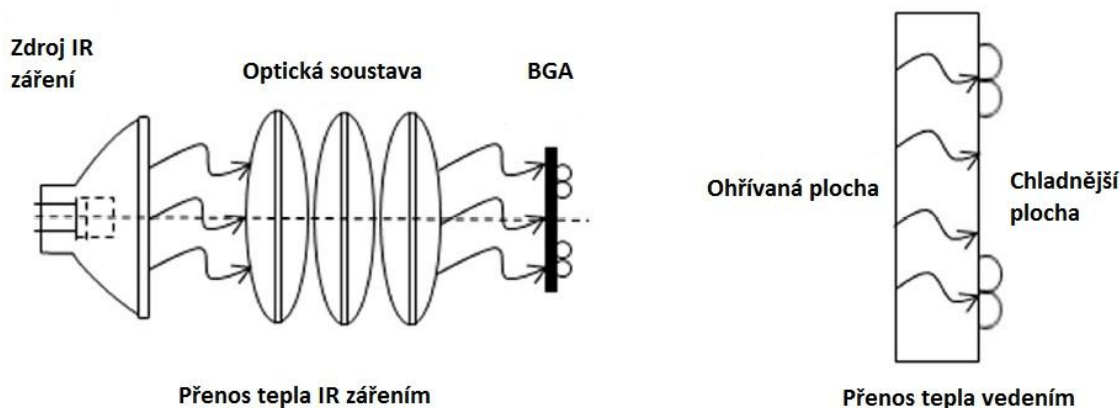
## 2.1 Infračervený ohřev (IR)

Fyzikálním principem této technologie je přenos tepla zářením ze zářičů na součástky, jejichž vývody chceme zapájet. Používány jsou většinou průběžné (in-line) pece, vybavené vrchním i spodním ohřevem. Pec je rozdělena do několika „úseků“ přičemž v každém z nich jsou zářiče, jež je možno nastavit na určitou teplotu. Spolu s rychlostí průjezdu pece je pak vytvářen požadovaný pájecí profil. Toto řešení se hodí spíše pro hromadnou výrobu a je rovněž nevhodné pro opravy, neboť neumožňuje odpájení součástky. Jeho další nevýhodou je problém s homogenitou prohřátí součástek. Uplatňuje se zde totiž vliv rozdílného pohlcování záření tělesy dle typu jejich materiálu a rovněž barvy. Tento problém eliminuje použití tzv. temných (dark) zářičů. Ty vyzařují v neviditelné části IR spektra (okolo vlnové délky 2  $\mu\text{m}$ ) a vykazují rovnoměrnější pohlcování tepla jednotlivými součástkami. Často jsou tyto zářiče kombinovány se standardními zářiči používající vlnové délky 2  $\mu\text{m}$  – 750 nm, jež spadají do oblasti tzv. blízkého IR záření. Ty se částečně překrývají se spektrem viditelného světla. [5]

V principu je ovšem IR technologie schopna sloužit i pro opravy součástek a je pro ně hojně využívána. Konstrukce opravárenského přístroje se od pece liší. Zářiče jsou zpravidla umístěny z obou stran, spodní tvoří předehřev desky, čímž je eliminován přílišný spád příčného teplotního profilu a nedochází k tak velkému tepelnému namáhání desky. Vrchní zářič je pak kryt pomocí lamel tak, aby vyzařoval ideálně pouze na součástku, kterou chceme opravovat – odpájet, znovu přetavit či zapájet. V tomto je technologie velmi podobná selektivnímu horkovzdušnému ohřevu, nicméně oproti němu zde odpadá problém s turbulentním prouděním, které může vyústit v odfouknutí součástky.

Moderní metodou, jež rovněž spadá do této kategorie je metoda označovaná jako FILSS. To je zkratka pro Focused Infra red Light Soldering Systems. Velmi vhodná je právě pro pouzdra BGA, neboť odstraňuje nedostatky klasického IR ohřevu. Vyznačuje se dobrou distribucí tepla napříč součástkou a vysokou selektivností. Výhodou je i dobrá možnost měření aktuální teploty např. pomocí termokamer. Principem funkce takovýchto zařízení je lampa emitující IR záření, které je přenášeno soustavou čoček na požadované místo. Tam je

pak zacílen IR svazek. Lze to připodobnit k „pájení světlem“, které je v některých pohledech blízké laserovému pájení.



Obr. 3: Schéma principu ohřevu pomocí FILSS [6]

## 2.2 Horkým plynem

Do této kategorie lze zařadit konvekční pece, které jsou používány ve výroбах větších objemů zakázek, zejména jako průběžné. Využívají zejména nucenou konvekci, kdy je ohřátý plyn vháněn na desku tak, aby ji ohřál. Pece jsou rozděleny do několika sekcí tak, aby rozdílným nastavením teplot v nich, společně s rychlostí posuvu dopravníku, mohl být vytvořen požadovaný pájecí profil. Tento způsob je vhodný i pro velké zástavbové hustoty a stal se modernějším nástupcem staršího způsobu strojového pájení. V souvislosti s potřebou využívání bezolovnatých pájek je také velmi často využíváno proudění jiného plynu než vzduchu, například dusíku, což vede ke zlepšení smáčivosti pájky a tudíž spolehlivějšímu zapájení. Velká část pouzder BGA je po osazení zapájena touto metodou, nicméně při procesu opravy ji nelze využít, neboť proces není selektivní. Podobně jako u metody IR se tak využívají malé opravárenské stanice s odlišnou konstrukcí. Po upnutí do stanice je součástka ofukována speciálními tryskami horkým vzduchem tak, aby bylo docíleno vyšší teploty, než je teplota tavení použité pájky. Tyto trysky mají různé tvary dle typu součástky. Zpravidla je využit i spodní přehřev, často jinou technologií (IR, hotplate). Nutné je nastavení času, teploty a přehřevu, což vytváří profil. Nevýhodou je zde jednak možnost vzniku turbulentního proudění, které způsobuje nerovnoměrnou distribuci tepla a také nutnost „přikrytí“ součástky nástavcem, což znemožňuje její optickou kontrolu v průběhu procesu.

V případě většího množství druhů součástek, které procesem prochází, se navyšuje potřeba různých druhů nástavců, což cenu pracoviště dále navyšuje. I přes používání těchto nástavců jsou však teplotně ovlivňovány součástky v okolí. U desek s vyšší zástavbovou hustotou může dojít i k odfouknutí komponent v těsné blízkosti opravované součástky.

## **2.3 Hot plate**

Principem je vyhřívání deska, na níž je umístěna deska plošných spojů se součástkami, u jejichž kontaktů má dojít k přetavení pájky. Výhodou je dobrá kontrola součástky během procesu přetavení a jednoduchost aplikace jak pro návrh (což se odráží v ceně) tak na obsluhu. Může být použita i jako předeřev u jiných aplikací. Nevýhodou je problémové pájení na substrátech s malou tepelnou vodivostí a nízkou teplotní odolností. Proto se používá zejména pro keramické substráty. Zároveň nemůže být tato technologie použita při nutnosti osadit desku z obou stran. Vyznačuje se nízkou produktivitou a neschopností selektivity. Z tohoto důvodu je vhodná spíše pro laboratorní aplikace nebo velmi malé objemy zakázek.

## **2.4 Vyhřátým nástrojem**

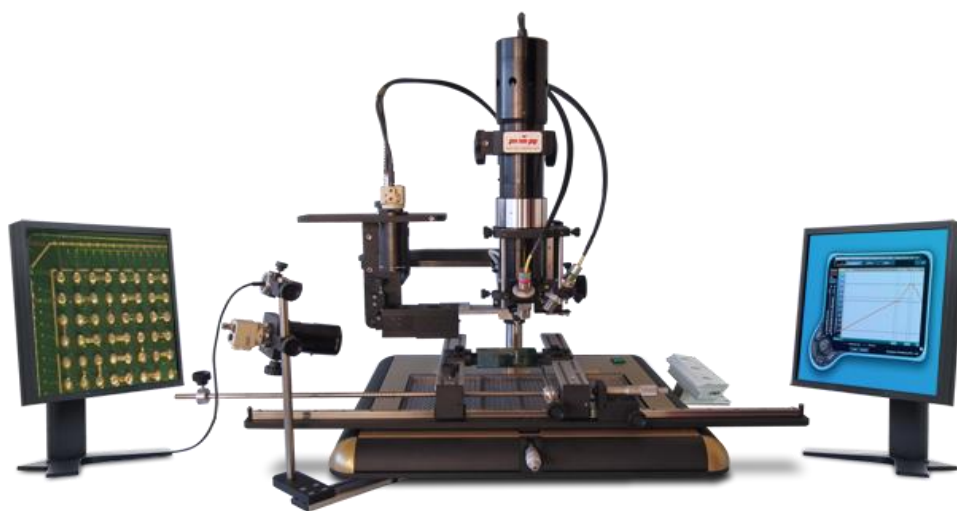
Metoda ohřevu horkým nástrojem je velmi rozšířená zejména v amatérských podmínkách. Vyniká svou jednoduchostí, selektivností a cenou. Pro profesionální aplikace je ovšem nutné znát co nejpřesněji teplotu na hrotu, jinak se spolehlivost spoje snižuje. Rovněž je nutné disponovat nástavci na všechny druhy zpracovávaných součástek. Metoda je vhodná zejména pro opravy, neboť se vyznačuje velkou selektivitou, ale má nízkou produktivitu. Ve výrobě je taktéž používána na selektivní pájení takových součástek, které nemohou být z nějakých důvodů pájeny stejnou metodou jako zbytek montážní sestavy.

### 3 Zařízení

Pro opravu BGA existuje na trhu celá řada specializovaných zařízení. Ta používají rozdílné fyzikální metody ohřevu tak, aby využily výhod daného systému co nejlépe. Mezi jednotlivými zařízeními pochopitelně existují rozdíly, které se mohou promítnout i do kvality výsledného procesu, nicméně z ekonomického hlediska je zcela nutné po výběru konkrétního zařízení toto zařízení využívat co nejefektivněji a nejlépe. Lze tedy říci, že opravárenské stanice, které pro opravu používáme, jsou jakýmsi výchozím bodem, přičemž snahou je ostatní technologické parametry nastavit tak, aby oprava na těchto zařízeních probíhala kvalitně a s co nejvyšší výtěžností. V této práci jsou zmíněna ta zařízení, která jsou fyzicky k dispozici a na nichž probíhá proces opravy BGA součástek, jehož výtěžnost je žádoucí zvýšit.

#### 3.1 PDR XT5P a E3

XT5P a E3 opravárenské stanice firmy PDR jsou zařízení pracující na bázi infračerveného ohřevu. Jsou schopna oprav na jednostranných či dvoustranných deskách včetně oprav kombinované montáže na deskách plošných spojů. Řadí se mezi moderní FILSS systémy, tedy systémy s fokusovaným IR svazkem.



Obr. 4: Vyobrazení opravárenské stanice firmy PDR XT5P

Systémy jsou vybaveny kamerou pro sesouhlasení součástky a desky a také systémem předehřevu o celkovém výkonu až 3 kW. Ten je realizován klasickým středovlnným IR zářičem. Jeho přínosem je na jedné straně předehřátí desky, což pomáhá i k prohřátí komponentu a na druhé straně také redukce nebezpečí termálního šoku desky v důsledku příliš strmého průběhu příčného teplotního profilu, což může vést například k delaminaci desky či úplnému prasknutí. Ze spodní části přichází v normálním režimu asi 60-70% tepla, z vrchní pak zbývajících 30-40%. Toto teplo dodává 150W krátkovlnný IR zářič, který je nejdůležitějším prvkem celého systému. Skládá se z lampy dodávající záření o vlnové délce přibližně 1 $\mu$ m a optické sestavy. Sestava je tvořena třemi logickými celky. Vrchní obsahuje čočku, která kolimuje záření z IR lampy do svazku. Svazek pak prochází prostředním segmentem, clonou. Jejím úkolem je regulovat svazek procházející skrz ni tak, aby bylo možno měnit průměr svazku dopadajícího na samotnou komponentu. Toho je docíleno ve spolupráci se spodním dílem, který finálně ostří svazek prošlý clonou do jednoho bodu. Velikost tohoto bodu je ovlivněna změnou úhlu čoček. Do tohoto segmentu jsou k dispozici výměnné komponenty, čímž lze docílit optimální velikosti dopadajícího svazku záření pro každý typ součástky. Na ní pak lze při procesu opravy aplikovat stejný profil, jako byl použit při původním procesu osazování součástky. Technicky je toho dosaženo pomocí software, který vytváří 5-6 po sobě jdoucích režimů včetně předehřevu tak, aby napodoboval proces standardního přetavení v průběžném zařízení. Díky IR teploměřům lze nastavený profil v reálném čase porovnávat s reálnou situací procesu. [7]

## 4 Proces opravy BGA

Proces opravy BGA je součástí komplexního celku opravy celé desky, kterou je nutné zvládnout jak technologicky, tak také logisticky. Začátek celého procesu spočívá v zaevidování zakázky, přidělení specifických čísel zakázky a následném předání desky diagnostikovi. Pokud je určena jako příčina závady součástka BGA, dojde k jejímu odpájení na opravárenských stanicích PDR, ONYX či ručně. Proces demontáže je, zejména u větších zástavbových hustot součástek, náročnou operací, která vyžaduje určitou míru zkušeností. Vždy totiž existuje riziko ohrožení součástek v okolí opravovaného pouzdra, případně tepelné účinky prohřívání na druhé straně desky u oboustranných montáží. Následuje výměna součástky a její zapájení na opravárenských stanicích. Pro každý typ součástky na každém typu desky je nutné, aby existoval speciální profil. Profily se pro každou součástku dále rozlišují dle toho, zda jím je součástka odpájena, nebo naopak dochází k jejímu osazení. Při opravě součástek v pouzdře typu BGA tak zásadní know-how spočívá právě v přesném nastavení všech profilů tak, aby byly výsledky uspokojivé, s co nejvyšší výtěžností a opakovatelností.

Kromě profilu se však na výsledku opravy podílí řada dalších faktorů, jak bude popsáno níže. Součástka v pouzdře BGA se může použít buď nová, nebo, v některých případech, dochází k jejímu reballingu na dostupném reballovacím zařízení. Rovněž může být rozhodnuto o opětovném přetavení (prohřátí) již osazené BGA součástky. Tím mohou být odstraněny studené spoje popř. open spoje. Pokud je nastaven nový profil, dochází po zapájení ke kontrole všech kusů pomocí testu X-Ray. Jestliže je již profil ověřený, dochází k testování v určitých intervalech. Když X-Ray test neodhalí chyby, pokračuje deska k diagnostikovi na funkční test. Ten může dopadnout buď s pozitivním výsledkem, deska je uvolněna a přijata do skladu jako opravená, nebo s výsledkem negativním kdy se celý proces opakuje znovu od diagnostika. Při opravách je nutné dbát zásad práce s ESD součástkami. Odpovídajícím způsobem jsou vybaveni nejen pracovníci, ale i pracoviště.

## 5 Technologické aspekty oprav

Opravou rozumíme proces eliminace a nápravy chyb, vedoucí k uvedení výrobku či zařízení zpět do funkčního stavu. Způsob, jakým je toho dosaženo, je závislý na charakteru výrobku, ale zejména procesu opravy. U opravy velmi malého počtu kusů výrobků většinou není nutno zavádět určité standardy, nicméně v případě oprav velké série výrobků je to základním předpokladem ziskovosti celého provozu. Je potřebné sledovat řadu vlivů, jež působí na proces a zajistit tak, aby vysoká opakovatelnost kvalitního výsledku vedla k vysoké výtěžnosti. Nejdůležitější aspekty související s opravou součástek v pouzdře BGA jsou uvedeny níže.

### 5.1 Teplota okolí

Teplota okolí patří mezi důležité faktory při procesu opravy pouzder BGA. Problémem je zejména fakt, že pájecí profil je pro celý proces nutné nastavit poměrně přesně a odchylky v řádu několika stupňů mohou z odpovídajícího profilu učinit profil zcela nevyhovující. Toto se projeví zejména v případě, kdy není možno měřit teplotu v reálném čase během operace přetavení a systém tedy pracuje na základě proměnného času, kterým se profilu dosahuje. Pokud je teplota okolí odlišná od té, při které byl profil vytvořen, dochází k přehřívání desky, nebo naopak nedojde k dosažení odpovídající teploty. Řešením tak musí být sledování vnější teploty a rovněž výsledků procesu, přičemž při větší změně je nutno vytvořit nový profil. Profesionálnějším řešením je vytvoření takového prostoru, kde bude stálost klíčových parametrů, tedy i teploty, zaručena, což má za výsledek zlepšení výtěžnosti.

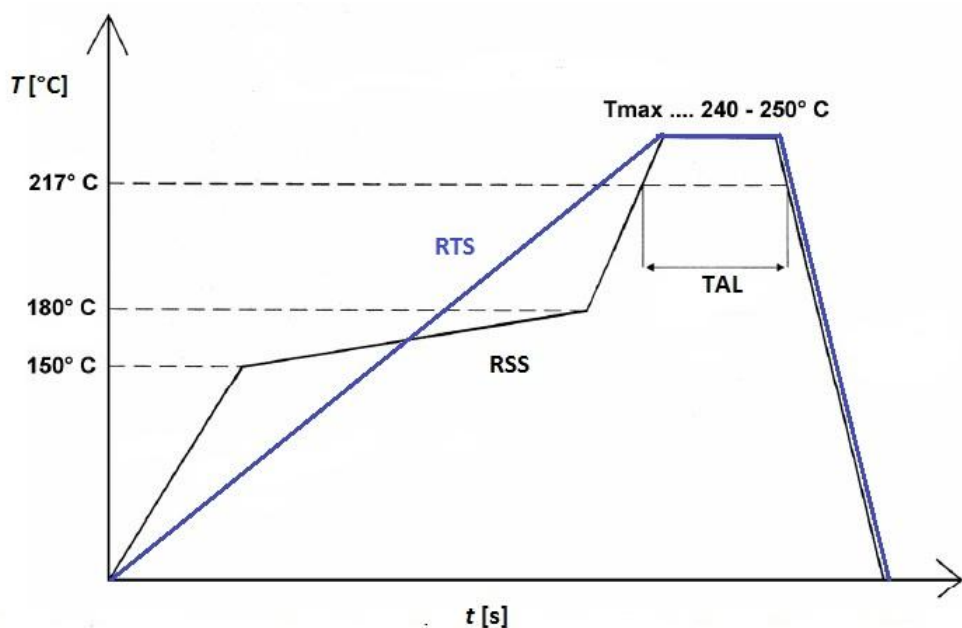
### 5.2 Vlhkost

Vlhkost je parametrem, který je v principu velmi podobný teplotě. V praxi rovněž dochází k jejímu velkému kolísání, přičemž žádoucí by bylo vytvoření prostoru s její konstantní, či málo proměnnou, hodnotou. Vlhkost nahromaděná v součástkách pak nepříznivě působí na kvalitu spoje či dokonce může poškodit součástku. Řešením je vysoušení součástek ve vysoušecích pecích. Parametry pro vysoušení definuje norma pro součástky citlivé na vlhkost (MSDS). Otázka vlhkosti se pak dotýká i problematiky elektrostatického náboje, ESD. Pod hranici 30 % vlhkosti totiž norma neumožňuje považovat prostory za vhodné pro manipulaci se součástkami citlivými na ESD. [8]

## 5.3 Pájecí profil

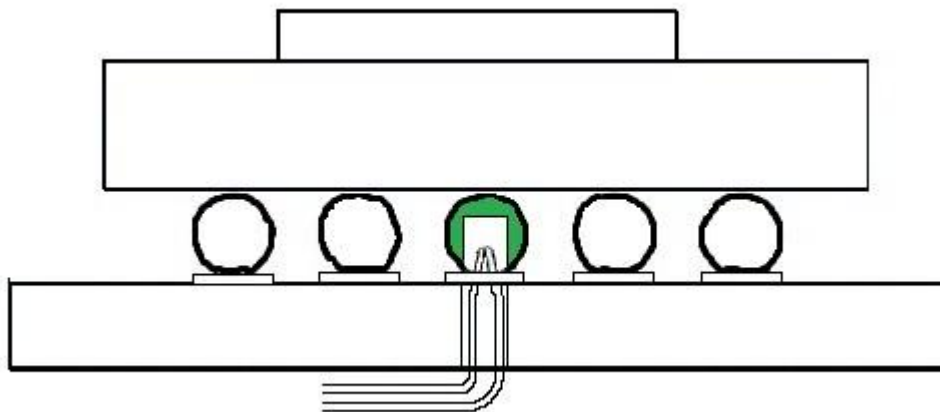
Pájecí profil lze považovat za jeden z nejdůležitějších parametrů pro vytvoření kvalitního spoje a tím dosažení vysoké výtěžnosti procesu. Lze říci, že vliv některých dalších parametrů lze dokonce precizně nastaveným pájecím profilem odstínit. Jako příklad lze uvést kompenzaci teploty okolí. Pájecí profil se dělí na čtyři základní části. V první dochází k prohřátí desky a opravované součástky tak, aby se předešlo teplotním šokům. Ke stabilizaci teploty, je nutno počkat na její vyrovnaní u všech součástek bez ohledu na jejich tepelnou kapacitu. Pro tento účel slouží druhá část profilu. Po vyrovnaní teploty následuje proces samotného přetavení. Teplota, kterou je nutno v případě bezolovnatého profilu dosáhnout, leží přibližně mezi 245 – 250 °C. Zároveň je ale nežádoucí, aby se teplota na desce pohybovala výše než kolem cca 200 °C, neboť při takové teplotě by již hrozila možnost ovlivnění spoju ostatních součástek na desce. Doba, po kterou je deska vystavena působení teploty nad teplotou přetavení se označuje jako TAL (Time Above Liquid) a měla by se pohybovat okolo 60s. Jako poslední následuje chlazení. Doporučuje se, aby rychlost chlazení byla přibližně 4 °C/s.[9]

Hodnoty, které jsou zde uvedeny, ovšem do značné míry závisí na zkušenostech daného pracoviště a na empirických poznatcích. V zásadě se rozlišují dva typy pájecích profilů pro technologii přetavení. Je to RTS (Ramp To Spike) a RSS (Ramp Soak Spike). RTS, pro svůj tvar někdy též nazývaný „tent profile“ je upřednostňován v případě malé tepelné kapacity použitých součástek. V takovém případě lze zkrátit celkovou dobu potřebnou k celému procesu. Tím se snižuje spotřeba chemie nutné k redukci oxidů a předpokládá se i lepší aktivita tavidla a jeho dokonalejší roztékavost, neboť se nestihne do přetavení vypařit tolik rozpouštědla. RSS je naopak vhodnější volit v případě větší tepelné kapacity součástek. Je ovšem nutné poznamenat, že rozhodnutí, jaký profil použít, není v řadě případů možno učinit příliš lehce. Kromě zmíněné tepelné kapacity je potřebné vzít v úvahu i použité technologie, používanou chemii či pájecí slitiny. Vhodné je držet se doporučení výrobců, kteří v řadě případů vhodný profil předepisují. I přesto je ovšem běžné, že vhodný typ teplotního profilu a zejména jeho další podrobné nastavení je záležitostí empiricky získaných poznatků, zkušeností a vyžaduje průběžnou kontrolu a korekce.



Obr. 5: Porovnání teoretického průběhů profilů RSS a RTS

Velmi důležitým aspektem je i měření nastaveného teplotního profilu. U součástek BGA probíhá tak, že místo několika kuliček pájky je umístěn termočlánek. Proto je nutné vyvrtat do desky malý otvor, kterým prochází vodiče vedoucí od termočlánu do vyhodnocovacího zařízení. Pájka musí být z prostoru původní kuličky odsáta, aby nedocházelo k nadzvednutí pouzdra. Je vhodné, aby pod pouzdem BGA byly umístěny alespoň tři termočláanky. Ty pak měří teplotu v protilehlých rozích pouzdra a uprostřed pouzdra. Toto rozložení nám dává informaci o teplotním gradientu mezi jednotlivými stranami pouzdra, přičemž žádoucí je, aby byl gradient co nejmenší. V takovém případě dochází ke stejnoměrnému prohřívání pouzdra, které je tak chráněno od teplotních stresů a případných mechanických poškozeních vzniklých jeho účinkem.



Obr. 6: Schéma principu měření teplotního profilu u BGA pouzder

## 5.4 Použitá pájka a tavidlo

Výslednou kvalitu spoje ovlivňuje silně i použitá pájka a tavidlo. V případě pájky je nutno respektovat, s jakým typem slitiny posílá výrobce součástek pouzdro BGA a v případě vlastního reballingu se takového standardu rovněž držet. Jen tak lze totiž využívat nastavené profily pro opravy jak s novými BGA, tak se součástkami reballovanými. Otázka tavidla je pak do značné míry záležitostí empirickou. Ze zkušeností se ukazuje, že nejvhodnější jsou tavidla pastovitá. Ta jsou u různých výrobců označována také pojmy tacky flux, gelové tavidlo či pasta. Principiálně se ovšem jedná o tu samou formu. Z hlediska procesního je vhodné preferovat no-clean tavidla, i když je často i v takovém případě přikročeno k jejímu čištění.

## 5.5 Práce operátora

Do určité míry je možno jako proměnlivý faktor u opravy považovat i práci operátora. Jako v každém procesu, do kterého lidský faktor vstupuje, je totiž nutné počítat s možností jeho chyby, či ne zcela přesného provedení daného úkonu. V konkrétně popisovaném procesu opravy BGA na strojích ONYX a PDR je odpovědností operátora zejména sesouhlasení BGA součástky vůči desce. Lze ovšem předpokládat, že v porovnání s ostatními faktory se jedná o zanedbatelný vliv a pro zjednodušení lze považovat práci jednotlivých operátorů za shodnou. Až po technologickém odladění celého procesu na stabilní úroveň je možno

zhodnotit, zda by kvalitnějším proškolením či způsobem práce operátorů nebylo možno přispět k dalšímu zvýšení výtěžnosti oprav.

## **5.6 Manipulace a skladování (ESD)**

Pro zajištění spolehlivého procesu opravy je nutné dbát i na skladování a manipulaci se součástkami. Týká se to součástek citlivých na vlhko, označených MSDS, a součástek citlivých na elektrostatický náboj ESD. Normy definují postupy pro skladování, vysoušení a manipulaci s těmito součástkami. I přesto, že dodržování parametrů definovaných v těchto normách s sebou nese určité ekonomické nároky, bývá v konečném důsledku jejich zavedení přínosem i z finančního hlediska. Lze totiž předpokládat, že při dohledávání faktorů způsobujících procesní chyby bude možno vyloučit takové situace, kdy chyba nalezená při testování nebude způsobena špatně nastaveným technologickým parametrem, ale „pouze“ nevhodným skladováním či zacházením se součástkou či výrobkem. Právě z tohoto důvodu je vhodné otázku skladování a manipulace nepodceňovat, přestože se o „primární“ technologický aspekt nejedná.

## 6 Technologie testování

Pro zjištění závad, stejně tak, jako pro ověření, zda byla závada odstraněna, je nutné testovat výrobek. Některé typy testů umožňují dokonce získat zpětnou vazbu pro technologické nastavení některých procesů, např. teplotního profilu u oprav BGA. Základní typy testů, se kterými se lze v praxi setkat v souvislosti s opravou desek osazených součástkami BGA, jsou uvedeny níže spolu se stručným popisem jejich podstaty a funkce.

### 6.1 Elektrický test

Elektrickým testem je test diagnostika. Tento test je klíčovým a zároveň nejméně schematickým krokem pro opravu desky jako celku. Obecně ho lze popsat jako měření elektrických signálů, např. osciloskopem či logickým analyzátozem, tak, aby byl diagnostik schopen určit nejpravděpodobnější příčinu poruchy. Při tomto testu hraje velkou roli zkušenost konkrétního diagnostika a také znalost konkrétního typu zpracovávané desky. Tímto typem testu se tedy odhaluje funkčnost celého zařízení, a proto není pro hodnocení nastavení parametrů konkrétního procesu, např. pájení BGA, vhodný. Mezi tento typ testu lze zařadit i funkční test, kdy je zařízení zapnuto a ve standardním režimu pak diagnostikem testována funkčnost zařízení.

### 6.2 J-TAG

Smyslem tohoto testu je ověření velkého počtu funkčních stavů v závislosti na vstupních proměnných. Je nutné vytvořit testovací vektory a těmi pak ve formě testplánů ověřovat funkčnost zařízení, jež musí být upnuta ve speciálních přípravcích. Z toho také vyplývá ekonomická nevýhoda tohoto testu při použití na malé sérii výrobků. Další podmínkou testu je také přítomnost testovacích plošek (testpinů) na desce. Pokud je deska navržena jako neopravitelná, neobsahuje většinou takové piny. V takovém případě je možno využít J-TAG sběrnici. Ta má i některé nevýhody. Ne všechny desky jsou touto metodou testovatelné, přičemž může nastat i situace, že zařízení, které projde tímto testem, neprojde testem funkčním. V takovém případě nepokrývají testovací vektory všechny případy, jedná se o tzv. neúplný test. Podobně jako předchozího elektrického testu se zde přistupuje k zařízení

jako k celku a není tudíž vhodný pro vyhodnocování konkrétního procesu. J-TAG je kromě testování často využíván i pro aktualizaci firmware na nejnižší programovatelné úrovni.

### 6.3 X-Ray

Kontrola X-Ray, tedy kontrola pomocí rentgenového svazku je nezastupitelnou nedestruktivní metodou kontroly pájených spojů. Pro vyhodnocování technologických parametrů procesu pájení BGA je zcela klíčový. Představuje možnost jak prověřovat kvalitu procesu na právě zapájených součástkách, kde spoje leží pod součástkou, např. u BGA. Díky této zpětné vazbě pak lze upravit proces či zjišťovat příčiny nefunkčnosti desky. V zásadě lze tímto typem kontroly odhalit čtyři druhy závad. První jsou voidy. Jako voidy se označují prázdná místa (bublinky) v pájecí slitině, která jsou vyplněna nejčastěji vzduchem, případně plynem atmosféry ve které se pájí. Rovněž se může jednat o zkapalněné tavidlo. Norma udává, že v kuličce pájky (ve spoji) nesmí být více než 25% objemu tvořeno voidem. Toto platí i v součtu několika menších voidů. Void vzniká převážně při odpařování tavidla nad teplotou přetavení v pájce. Pokud je ovšem doba nad teplotou přetavení příliš krátká, nestihnou páry tavidla „proublat“ přes kuličku a zůstanou vázány v pájce. Empiricky je jako ideální označována doba, po kterou je pájecí profil nad teplotou přetavení, tzv. TAL, přibližně 60 sekund. Dalším typem chyby jsou open spoje, tedy spoje, kdy není vytvořen vodivý kontakt kuličky pájky s pájecí ploškou. Tento typ chyby je nejčastěji způsoben příliš nízkou teplotou přetavení. S tímto souvisí i tvar kuličky, ze kterého lze většinou poznat, zda byla dosažena optimální teplota. Takto lze s určitou pravděpodobností diagnostikovat i potenciálně se vyskytující studený spoj. Třetím typem časté chyby jsou praskliny. Způsobuje je špatně nastavený profil chlazení, který vyvolává teplotní šoky. Aby se tomuto zamezilo, doporučuje se pokles teploty při chlazení přibližně 4 °C/s.[9] Posledním typem chyby jsou slité spoje, neboli zkraty. Prvotní příčinou bývá nerovnoměrný přenos tepla vedoucí k rozdílnému prohřívání jednotlivých částí pouzdra. To pak v částech, které jsou již prohřáty nad teplotu přetavení, svoji vahou působením gravitace tlačí na kuličky pájky, které se slijí. Druhotně může takto dojít ke vzniku open spojů na opačné straně pouzdra.

## **6.4 Vizuální kontrola**

Vizuální kontrola je nejběžnějším typem kontroly a probíhá prakticky neustále. Pracovníci, kteří přichází do styku s deskou, jsou vyškoleni na rozeznávání základních vad a hodnocení jejich závažnosti. Tento typ kontroly tak dokáže odhalit hrubé chyby jako je např. prasklá deska, chybějící součástka, viditelně zaměněná (špatná) součástka, odpadávající součástka a podobně. Díky této kontrole jsou eliminovány hrubé nedostatky či je zamezeno zbytečnému vkládání nákladů do desek, jež nemohou být opraveny. Pro kontrolu konkrétního procesu je ale nevhodná, neboť dokáže odhalit jen zcela zásadní nedostatky procesu, např. velmi špatně nastavený profil vedoucí k praskání desky.

## 7 Vyhodnocování výtěžnosti

Vyhodnocování výtěžnosti je velmi důležitým krokem každého výrobního procesu. Přestože představuje určité nároky na zpracovávání dat, vytvoření systému jejich ukládání a archivace a vyžaduje věnovat se neustálé jejich správě, je přínos takového řešení obrovský. Tento přínos je možno pozorovat směrem do dvou oblastí. Tou první, která bývá rovněž impulzem pro zavedení takovýchto systémů, je oblast ekonomická. Formou periodických zpráv, grafických výstupů a různých prezentací se mohou odpovídající pracovníci jednoduše seznámit s ekonomickými aspekty výroby a zvážit, jaké postupy přináší větší zisky či jaké jsou pro společnost neekonomické. Rovněž lze takto definovat strategii pro zlepšování dílčích kroků operací a odhalit tak, kam je vhodné zaměřit své úsilí. Neméně důležitým přínosem vyhodnocování dat o výtěžnosti procesů je i hledisko technologické. Představuje zpětnou vazbu, která vypovídá, na kolik je daný proces zvládnut a jak kvalitně jsou nastavené jeho parametry. Pokud se tedy hodnota, např. výtěžnosti procesu, náhle větším způsobem odchýlí od hodnoty běžně dosahované, je to signálem ke změně nastavení procesu. V každém případě je nutno zmapovat původ takové změny a přijmout opatření, která odstraní působení nežádoucích faktorů, nebo naopak do výroby zaimplementovat působení takových faktorů, které se ukázaly jako prospěšné.

### 7.1 Jak sledovat

Pro sledování výtěžnosti procesů se používají nejčastěji čtyři základní indikátory známé pod svými anglickými názvy, tak jak budou uvedeny níže.

#### 7.1.1 Final Yield (FY)

Vyjadřuje procentní zastoupení zařízení akceptovatelných na konci celého výrobního procesu. Nezohledňuje počet kroků a rovněž se do něj nepromítne, zda výrobek prošel celým procesem napoprvé, či zda bylo nutno učinit jeho opravu (rework) a projít tak některý proces, či procesy, vícekrát. Jeho výpočet se provádí dle následující rovnice.[10]

$$FY = \frac{\text{počet vyhovujících kusů na konci procesu}}{\text{počet kusů vstupujících do procesu}} \quad (1)$$

### 7.1.2 Throughput Yield (TPY)

Někdy také nazýván First Pass Yield (FPY), což vlastně vyjadřuje jeho podstatu. Slouží k indikaci počtu akceptovatelných kusů na konci procesu vztažených k počtu kusů vstupujících do procesu. Oproti FY má ovšem to omezení, že kusy, které je nutno opravit, zhoršují výsledek tohoto indikátoru. Jako vyhovující bere totiž pouze ty kusy, které všechny dílčí procesy absolvovaly pouze jednou a na konci celého procesu byly vyhodnoceny jako vyhovující. Výpočet je pak proveden následovně.[10]

$$TPY = \frac{\text{počet kusů, které prošly procesem pouze jednou, a jsou vyhovující}}{\text{počet všech kusů vstupujících do procesu}} \quad (2)$$

### 7.1.3 Rolled Throughput Yield (RTY)

Vyjadřuje pravděpodobnost, že celý proces bude generovat kus, vyhodnocený jako akceptovatelný. Představuje vlastně součin TY jednotlivých dílčích kroků celého procesu. Pro jeho výpočet je tedy nutné nejdříve stanovit TPY. Výpočet se provádí následovně.[10]

$$RTY = TPY_1 \times TPY_2 \times TPY_n \quad (3)$$

### 7.1.4 Normalized Yield (NY)

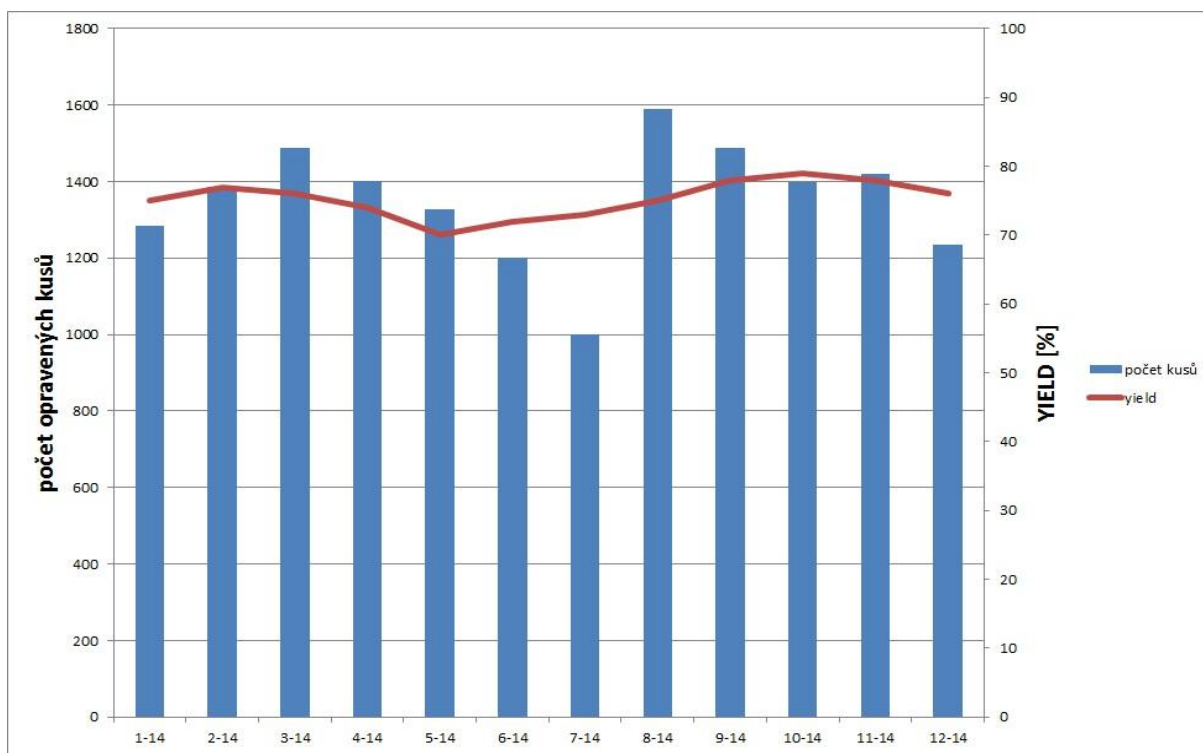
Představuje průměrnou výtěžnost jednoho kroku celého procesu. Pro jeho výpočet je nutné stanovit nejprve RTY a dále počítat dle následující rovnice.[10]

$$NY = RTY^{\frac{1}{k}} \quad (4)$$

k je počet kroků procesu

## 7.2 Současné řešení

Současné řešení vyhodnocování výtěžnosti je realizováno jednak formou databázového systému Tesseract, nicméně vyhodnocování dat je velmi složité. Druhá, jednodušší, forma je vkládání dat do sešitů aplikace Microsoft Excel a jejich ukládání do cloudového úložiště na Google drive. Z těchto dat je pak možno vytvořit graf výtěžnosti procesu a rovněž vést přehled o počtu kusů prošlých procesem. Toto řešení má ovšem řadu nevýhod. Neexistuje kontrola, zda byla data skutečně zapsána, dochází k pozdnímu vkládání dat, přičemž komplikací je i jejich zpracování v aplikaci Excel, která postrádá některé z funkcí programů specializujících se na statistické analýzy. Omezujícím prvkem je i nutnost vícenásobného vkládání některých dat (např. číslo zakázky) při různých operacích, nemožnost sdílení některých dat s rozdílnými úrovněmi přístupu a celkově složitost a nepřehlednost práce s daty. Z toho důvodu bylo rozhodnuto o nutnosti vytvoření nového řešení.



Graf 1: Současný stav vyhodnocování výtěžnosti

### 7.3 Navrhované řešení

Navrhované řešení specifikuje požadavky kladené na aplikaci pro sledování výtěžnosti oprav součástek BGA. Ke změnám na úrovni firmy je nutno přistupovat obezřetně a systémově. Proto bude tato aplikace součástí rozsáhlejšího systému, jež bude zahrnovat sledování celého procesu opravy desek, tedy nikoli pouze jeden krok tohoto procesu – opravu BGA. Samotná aplikace pro sledování výtěžnosti BGA opravárenského procesu by měla disponovat následujícími funkcemi. Měla by být schopna poskytnout snadno interpretovatelná data o výtěžnosti procesu tak, aby mohla být považována za zpětnou vazbu pro technologické nastavení procesu. Dále by mělo být možno rozdělit výsledky do tzv. „rodin“ a sledovat výtěžnost každého tohoto typu samostatně. Toto představuje přínos zejména pro ekonomické rozhodnutí o ziskovosti oprav jednotlivých „rodin“ desek. Technologickým přínosem by měla být možnost zobrazení výsledků jednotlivě dle typu použitého procesu (IR, horkovzdušně) a rovněž dle konkrétní stanice. Dále by bylo vhodné umožnit vyfiltrování negativního ovlivnění výtěžnosti v případě dvojnásobného zápisu FAIL na stejném BGA, případně trojnásobného zápisu FAIL u různých BGA stejné desky. V takovém případě je totiž dle interních předpisů nutné desku vyhodit (scrapovat). V původním systému ale takovýto postup znamenal dvojí, případně i trojí zápis špatného kusu do databáze, přestože reálně se jedná stále o tu samou desku. Dalším přínosem by měla být možnost rozlišení počtu teplotních cyklů. Rozdíl spočívá ve faktu, že proces výměny součástky znamená dva teplotní cykly, zatímco prohřátí (reflow) „potřebuje“ pouze jeden teplotní cyklus. Počet teplotních cyklů, kterým je možno desku vystavit, je omezen doporučením od výrobce. Doplnkovými informacemi by pak byl počet spotřebovaných součástek BGA pro výměny a důvod vyřazení (scrapování) desky. Některé typy problémů totiž nemusí být ovlivněny chybou v nastavení procesu opravy součástek BGA a přesto se do její výtěžnosti v současné době promítají.

Výstupem celé aplikace pro sledování výtěžnosti BGA by pak měl být objem zpracovávaných zakázek a výtěžnost procesu. Bude existovat možnost analyzovat příčiny výpadků dle typu chyby a rovněž bude umožněno sledování výtěžnosti v proměnných časových limitech s určeným nejmenším krokem. Jak bylo zmíněno, aplikace pro sledování výtěžnosti BGA se stane součástí rozsáhlejšího systémového řešení, jež by mělo pokrývat kompletní proces oprav. Nový systém by měl odstraňovat nevýhody současného řešení,

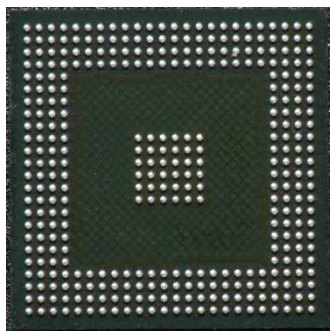
zavést několik úrovní přístupu dle oprávnění (inženýr, diagnostik, X-Ray kontrola atd.) a pracovat s novou databází dat. Zároveň je ale bezpodmínečně nutná spolupráce se starou databází. Proces kontinuity je důležitý z hlediska zpětného dohledání zakázek jak pro vnitřní potřeby firmy, tak pro vyřizování požadavků zákazníků. Součástí celkového řešení tak bude kromě sledování výtěžnosti BGA oprav i sledování výtěžnosti celého procesu a detailní rozbor důvodů vedoucích k vyřazení desky. Výstupy budou realizovány v grafické formě a povedou k možnosti detailní analýzy vzniku chyb a sledování počtu použitých součástek při opravách.

## 8 Praktická část

Úkolem praktické části je zvýšení výtěžnosti opravárenského procesu součástek typu BGA na deskách plošných spojů. Toto zadání bylo vytvořeno firmou Sanmina, která se zabývá opravou zejména spotřební elektroniky. Jako testovací byla zvolena nejčastěji používaná deska, na ní pak součástka v pouzdře typu BGA, která se velmi často ve firmě vyměňuje. Konkrétně se jedná o procesor, přičemž technologické parametry součástky jsou uvedeny v tabulce 1. Na obrázku 7 je zobrazena zmiňovaná součástka ze strany kulových vývodů. Bližší informace nejsou uvedeny s ohledem na „confidential“ politiku firmy.

Tabulka 1: Parametry osazované součástky BGA

Parametr	Hodnota
Velikost kuliček	350 $\mu\text{m}$
Rozteč kuliček	500 $\mu\text{m}$
Počet kuliček	356
Pouzdro	14x14 mm



Obr. 7: Spodní strana osazované součástky BGA - procesoru

Pro zvýšení výtěžnosti opravárenského procesu bylo jako klíčové vybráno tavidlo, aplikované na spoj při výměně součástky typu BGA. Tento postup vyplynul z požadavku na zvýšení kvality výsledného spoje, tedy zvýšení výtěžnosti u opravovaných desek, v reálném prostředí firmy. Z tohoto důvodu bylo nutno se zaměřit na takový parametr, jehož změna není

spojena s přílišnými finančními náklady, ovšem která může přinést kvalitativní posun směrem vpřed. V neposlední řadě bylo toto rozhodnutí ovlivněno i faktem, kdy zkušenosti z praxe naznačují, že vliv použitého tavidla a problematika s tím spojená (forma, způsob nanášení, typ tavidla) má mnohem větší efekt, než bylo dosud obecně předpokládáno.

Prvním realizovaným krokem bylo ověření způsobu nanášení tavidla. Teprve po jeho vybrání má smysl přikročit k dalším testům konkrétních vzorků tavidel. Tím se šetří nejen čas, ale i náklady nutné pro pořízení různých typů tavidel, neboť ta již nebudou aplikována způsoby, jež se ukázaly v předchozích testech jako nevyhovující. Celé testování je spjaté rovněž s důrazem na co nejefektivnější využití desek plošných spojů, neboť jejich cena je poměrně vysoká.

## **8.1 Vyhodnocování kvality spojů**

Pro nedestruktivní vyhodnocení kvality zapájených spojů pod celým pouzdrům BGA je nutno použít zařízení pracující na principu rentgenového záření. Jelikož je kvalitní a komplexní vyhodnocení jakosti zapájeného spoje klíčovým prvkem pro zjištění vlivu technologických změn v postupech souvisejících s výměnou a osazením BGA součástky, bylo nutno použít pro vyhodnocení právě rentgenového přístroje. Nejčastěji je tato metoda uváděna jako X-Ray inspekce.

Samotné vyhodnocení probíhalo na zařízení Nordson DAGE XD7600NT Ruby FP, zachycené na obrázku 8. Firma Nordson se zabývá zejména konstrukcí rentgenových zařízení pro inspekci v oblasti elektrotechniky a pro vyhodnocování používá moderní technologie. Základem zařízení je bezúdržbový rentgenový zářič a 2 Mpix CMOS detektor s vysokým rozlišením při práci v reálném čase. Zařízení je konstruováno s dokonalým odstíněním okolí pomocí olova a bezpečnostním ovládním dvířek pro vkládání vzorků. Zaručuje tedy poměrně snadnou obsluhu s minimalizací rizik spojených s používáním rentgenového záření.



**Obr. 8 Zařízení Nordson DAGE XD7600NT Ruby FP**

Při vlastní inspekci je možno prohlížet součástku a spoje z různých úhlů, což je umožněno pohybem detektoru v ose x a y, přičemž samotná podložka se může dále pohybovat ve směru z-osy. Pozorované jevy je možno zachytit buď jako obrázek formátu .jpg nebo uložit videosekvenci ve formátu .avi.[11]

## 8.2 Tavidlo

Obecná definice tavidla je přibližně následující. Jde většinou o kapalnou, plynnou, nebo pevnou látku, napomáhající při ohřevu k vytvoření kvalitnějšího pájeného spoje. Její funkce spočívá ve zrychlení a podpoření lepšího smáčení pájky na plochy vytvářející pájený spoj. [9]

Základní funkce tavidel lze spatřovat v následujících procesech:

- Pomáhá, spolu s působením tepla, odstranit z povrchu pájeného materiálu oxidy a nečistoty
- Chrání pájený spoj proti oxidaci během procesu pájení a brání následné reoxidaci
- Zvýší povrchové napětí a tím zlepší smáčivost
- Zlepšuje přenos tepla od tepelného zdroje k pájenému místu

Tavidla mohou být různého skupenství, ale rovněž různého složení. Existuje několik způsobů dělení tavidel do kategorií. Vzhledem k informacím uvedeným v technických listech je v tabulce 2 zmíněn používaný způsob dělení a to dle nejnovější normy IPC J-STD-004. [12]

Tabulka 2: Základní dělení tavidel dle IPC J-STD-004

ZÁKLAD TAVIDLA	ZKRATKA	aktivita tavidla			aktivováno halidy?	
přírodní pryskyřice	RO	L	M	H	0	1
syntetické pryskyřice	RE	L	M	H	0	1
organické kyseliny	OR	L	M	H	0	1
anorganické kyseliny	IN	L	M	H	0	1
<p>L - nízká  M - střední  H - vysoká  0 - ne  1 - ano</p> <p><i>Příklad: ROLO = tavidlo na bázi přírodní pryskyřice, nízká úroveň aktivace, bez obsahu halidů</i></p>						

### 8.2.1 Skladování tavidel

Jedním z faktorů, který do problematiky tavidel v elektrotechnice vstupuje, je i jejich skladování. Je faktem, že doporučené podmínky pro skladování a používání tavidel se velmi liší, což může mít dopad i na kvalitu jejich funkce při samotném přetavení pájeného spoje. Požadavky, které výrobce uvádí pro správnou funkci, se mnohdy dosti liší, a proto je nutno věnovat pozornost technickým listům daných tavidel. Nejhorší je pochopitelně případ, kdy výrobce podobná doporučení v technickém listu neuvádí. V takovém případě totiž není příliš jasné jak se k tavidlu chovat, což může vést k jeho nesprávnému používání a tudíž ke zhoršeným či zcela nevyhovujícím výsledkům.

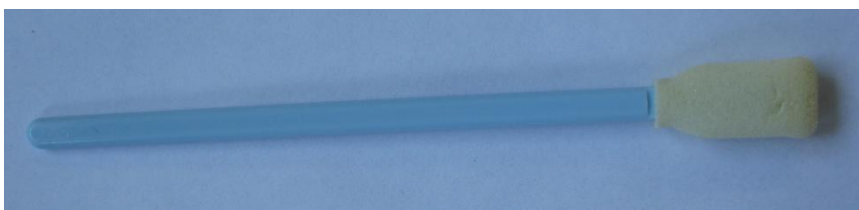
Pro ilustraci nutnosti rozdílu v přístupu k jednotlivým tavidlům lze využít informace z technických listů vzorků 4, 7 a 8. V případě vzorku 4 výrobce doporučuje skladování víčkem, případně hrotem stříkačky dolů v teplotě 0-30 °C. Po otevření je nutno nechat tavidlo 4 hodiny při pokojové teplotě odstát a teprve poté ho lze používat. Dále výrobce doporučuje spotřebovat tavidlo do doby 1 roku od data výroby. V případě vzorku 7 výrobce vyžaduje skladování v chladničce, v rozmezí teplot 0-10 °C. Uvádí pouze, že před použitím je zapotřebí tavidlo nechat ohřát na pokojovou teplotu, nikoli ovšem maximální dobu. Jako nejzazší datum

použití uvádí 6 měsíců po datu výroby. U vzorku 8 pak výrobce doporučuje skladování mezi 4-10 °C. Jako dobu spotřeby uvádí maximálně 6 měsíců od data výroby a jako dobu nutnou pro ustálení tavidla na pokojové teplotě poté 24 hodin.

Pro reálnou praxi je asi nejnutnějším doporučením doba, po jakou je nutno tavidlo nechat vytemperovat po vytažení z chladicího boxu. Přestože v ostatních parametrech si mohou být tavidla velmi podobná, včetně klasifikace dle IPC J-STD-004, mohou doby nutné pro vytemperování tavidla dosahovat od několika minut po 24 hodin.

### 8.3 Metodika nanášení

Předtím, než je možno přistoupit k testování vlivu různých druhů tavidel na kvalitu pájeného spoje u součástky typu BGA, je nutné zmapovat vliv způsobu nanášení tavidla. Teprve po nalezení optimálního způsobu, jak a kam tavidlo nanést, má smysl hledat další způsoby, které povedou ke zlepšení opakovatelnosti kvalitního zapájení spoje a tedy ke zvýšení výtěžnosti procesu. Dalším nesporným důvodem, jenž potvrzuje smysl tohoto postupu, je ekonomické hledisko. Nalezení vhodného způsobu nanášení tavidla přináší potenciální zlepšení procesu s nulovými náklady, neboť není nutno přecházet na jiný typ tavidla či hledat jiného dodavatele. Vzhledem k charakteru procesu opravy v reálném procesu a zavedených způsobů postupu je vhodné se soustředit na skupinu tzv. gelových tavidel (tacky fluxes). Zde připadá v úvahu nanášení gelu pomocí aplikátoru v zásadě třemi možnostmi. První je natření kuliček pájky, tedy spodních vývodů pouzdra BGA, tenkou vrstvou tavidla. Druhý způsob představuje vytvoření tenké vrstvy tavidla na desce plošných spojů, na kterou bude součástka BGA pájena. Poslední logická možnost je pak kombinace obou typů najednou, tady aplikace jak na kuličky pouzdra BGA, tak na desku. Pro všechny možnosti bylo zvoleno shodné tavidlo, které je ve firmě používáno pro procesy oprav součástek typu BGA.

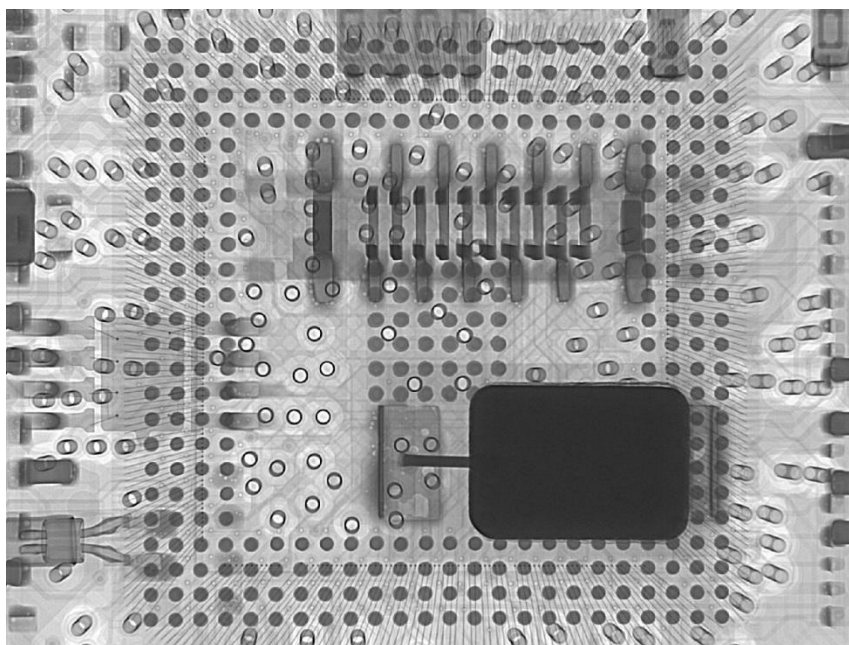


Obr. 9: Aplikátor pro nanášení tavidla

### 8.3.1 Nanášení tavidla na kuličky pájky pouzdra BGA

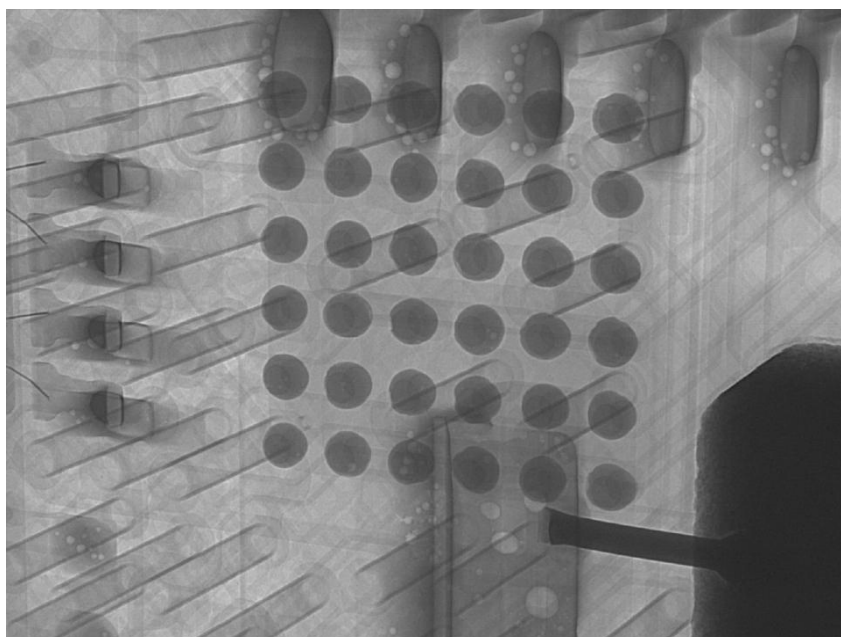
Při tomto způsobu nanášení je tenká vrstva tavidla aplikována na kuličky vývodů součástky typu BGA. Pro aplikaci gelového tavidla je využit aplikátor zobrazený na obr. 9.

Z testů vyplynulo, že tento způsob nanášení tavidla je neoptimálnější. Hodnota výtěžnosti pro tento případ nanášení byla stanovena jako 80%. Optimální se tento způsob jevil i z hlediska času potřebného k nanesení tavidla, čímž nedojde k prodloužení času potřebného k opravě zařízení. Dobrých výsledků je při této metodě dosahováno mimo jiné proto, že dochází k aktivaci tavidla při teplotě, která se shoduje s teplotou vývodů BGA komponentu. Není zde tedy teplotní rozdíl mezi tavidlem a kulovým vývodem komponentu.



Obr. 10: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – nanášení BGA

Na obrázcích 10 a 11 jsou zachyceny desky, u kterých bylo tavidlo nanášeno pouze na kuličky součástky typu BGA zachyceny na fotografiích pořízených na 3D inspekčním X-Ray zařízení.



Obr. 11: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – nanášení BGA

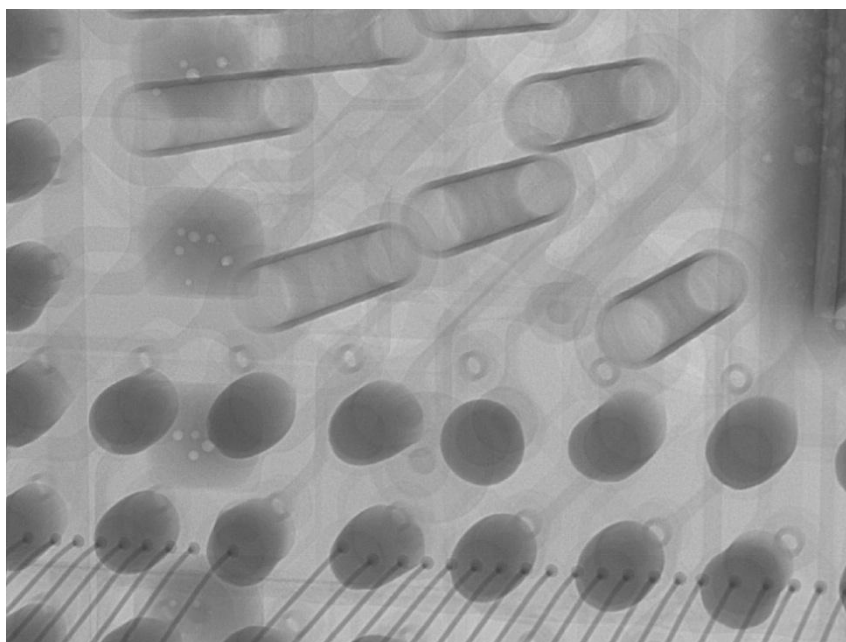
### 8.3.2 Nanášení tavidla na desku plošných spojů

V tomto způsobu je tavidlo pomocí aplikátoru nanášeno v tenké vrstvě na plošky desky plošných spojů, kam bude následně osazena součástka typu BGA.

V testech dosáhla tato metoda výtěžnosti 60%. Ukázalo se, že výsledný spoj byl na rozdíl od předchozího postupu náchylnější k vadám. Nejčastěji se jednalo o studené spoje nebo o deformaci kuliček pájky. Lze usuzovat, že takovéto typy vad jsou patrně způsobeny nedostatečným odstraněním oxidů z kuliček pájky na pouzdře BGA. To může mít spojitost s dosažením aktivace tavidla v nevhodném čase, popřípadě horším kontaktem tavidla s kuličkami pájky, na které nepůsobí do takové míry, jako když je nanášeno přímo na ně. Zmíněné problémy mohou rovněž souviset s nedostatečným množstvím nanášeného tavidla. Je pravděpodobné, že při jednoduché aplikaci gelového tavidla pomocí aplikátoru neulpí na ploškách desky takové množství tavidla, jako je tomu u kuliček pájky na spodní straně pouzdra. Pozorované vady pak souvisí s vadami typickými pro příliš malé množství tavidla nanášeného při pájení spoje. Mezi tyto charakteristické vady patří zejména následující. Špatný smáčecí úhel, zpravidla větší než  $45^\circ$ , mezi deskou a kuličkou pájky ve spoji. Dále dochází k nedokonalému odstranění oxidů, což může negativně ovlivnit parazitní vlastnosti spoje.

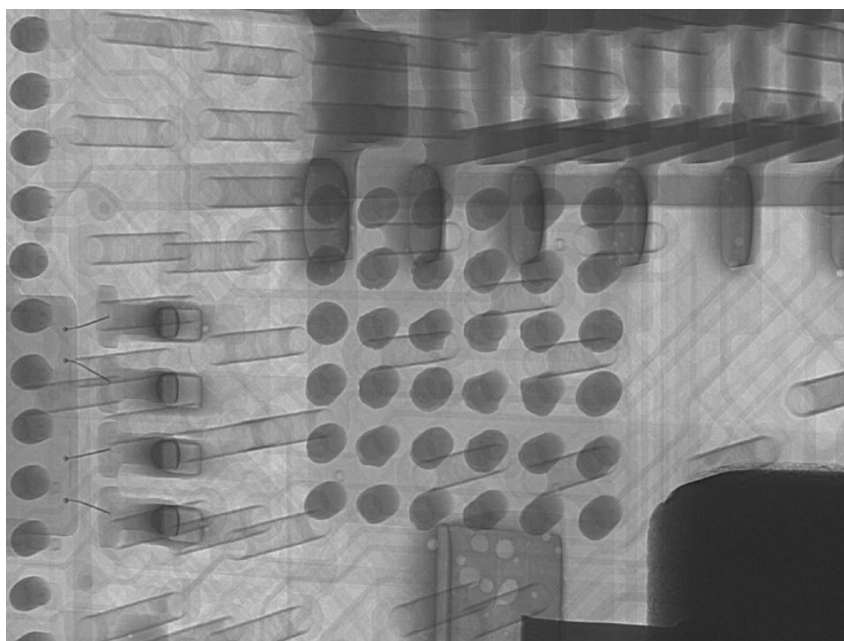
Toto je kritickým problémem zejména u součástek pracujících na vyšších kmitočtech, například procesory, paměti atd. Pro součástky typu BGA je tento problém nezanedbatelný, neboť se velmi často jedná právě o komponenty pracující na vyšších frekvencích. Pro malé množství aplikovaného tavidla lze uvažovat i možnost, že se tavidlo odpaří ještě dříve, než je dosaženo teploty liquidu u pájky. Z toho důvodu je nevhodné používat tavidlo ve formě liquidu, u kterého dochází k tomuto jevu velmi často. Výsledky takového případu se pak budou velmi blížit případu, kdy by tavidlo nebylo aplikováno vůbec.

Vzhledem k pozorovaným chybám, jejich vyššímu počtu než u předchozího způsobu, a jejich pravděpodobným příčinám byla tedy aplikace tavidla touto metodou pro další testy zavržena.



**Obr. 12: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – nanášení na desku**

Na obrázku 12 a 13 je zdokumentováno natažení kuliček pájeného spoje způsobeného nevhodným způsobem nanášení tavidla fakticky vedoucímu k jeho nedostatku v případě přetavení.



Obr. 13: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – nanášení na desku

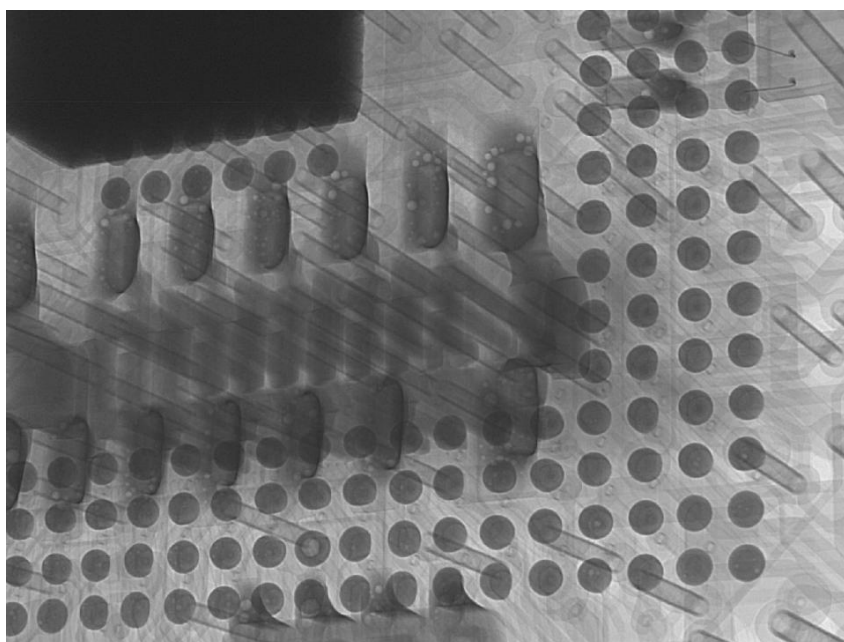
### 8.3.3 Nanášení na desku plošných spojů i na kuličky BGA

Tento způsob v sobě kombinuje oba předchozí způsoby nanášení tavidla. Jeho nevýhodou je vyšší potřeba času pro nanášení tavidla a rovněž vyšší spotřeba tavidla.

Z výsledků vyplynulo, že tento způsob dosahuje nejnižší výtěžnosti a to 40%. Nejčastějšími vadami tohoto způsobu nanášení byly zkraty ve spojích a rovněž velké množství voidů zachycených v kuličkách pájky během procesu přetavení. Tyto pozorované vady odpovídají fenoménům, které se pojí s aplikací přílišného množství tavidla. Pro ni je typická právě tvorba velkého množství voidů. Malé množství voidů ve spoji je sice dovoleno, nicméně jejich objem v kuličce pájky nesmí v součtu překročit 25% objemu celé kuličky pájky. Přílišná tvorba voidů je ovšem podezřelá už sama o sobě a většinou odkazuje na mezery v technologickém nastavení procesu či ve výběru vhodných postupů či chemikálií (tavidla, pájecí pasta atd.). Voids vznikají v důsledku faktu, že velké množství tavidla se není schopno odpařit dostatečně rychle a „probublat“ tak v potřebné době kulovým vývodem od DPS k součástce. To způsobí jeho „uvěznění“ uvnitř spoje. S přílišnou aplikací tavidla se pojí také možnost špatného „osazení“ součástky. BGA součástka se při kontrole po zapájení jeví jako by byla špatně osazena, např. o jednu řadu kuliček posunutá. Důvod ovšem spočívá

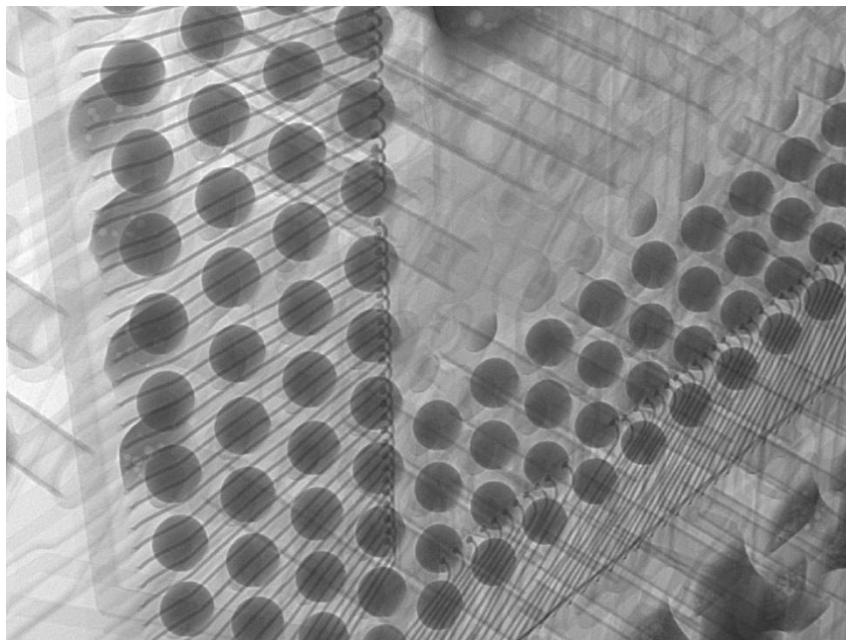
v tom, že správně sesazená součástka je při procesu přetavení nadzvednuta a „zaplave“ na velkém množství tavidla, čímž se posune. Po zapájení se pak jeví, jako by byla špatně osazena. Je ovšem obvyklé, že tuto chybu provází další typické chyby spojené s aplikací přílišného množství tavidla a proto si ji prakticky nelze splést s chybně osazenou součástkou vlivem špatného nastavení osazovacího stroje či vlivem chyby operátora. Je pochopitelné, že takováto chyba vede k naprosté nefunkčnosti součástky. Další pozorovanou chybou je tvorba zkratů, kdy přílišný objem tavidla umožní slítí sousedních kuliček do sebe. Tento typ chyby je ovšem častější u menších rozměrů rozteče mezi jednotlivými kuličkami, např. u FBGA. V neposlední řadě je nutno počítat i s nutností čištění desek, na které bylo aplikováno větší množství tavidla, než bylo nutno a nedošlo tak k jeho dokonalému odpaření v procesu přetavení. Tavidlové zbytky totiž negativně ovlivňují vlastnosti desky plošných spojů, zejména pak povrchový izolační odpor, tzv. SIR (Surface Insulation Resistance). Čištění tavidlových zbytků je často požadováno i kvůli kosmetickému vzhledu desek plošných spojů.

Vlivem výše popisovaných chyb a problémů spojených s nanášením tavidla jak na desku, tak na kuličky pájky součástky typu BGA bylo od dalšího použití této metody pro testy upuštěno.



Obr. 14: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – nanášení na desku + BGA

Na obrázku 14 je zachycen pohled spoje součástky typu BGA, v jejichž některých spojích jsou neakceptovatelné voidy způsobené příliš velkým množstvím aplikovaného tavidla.

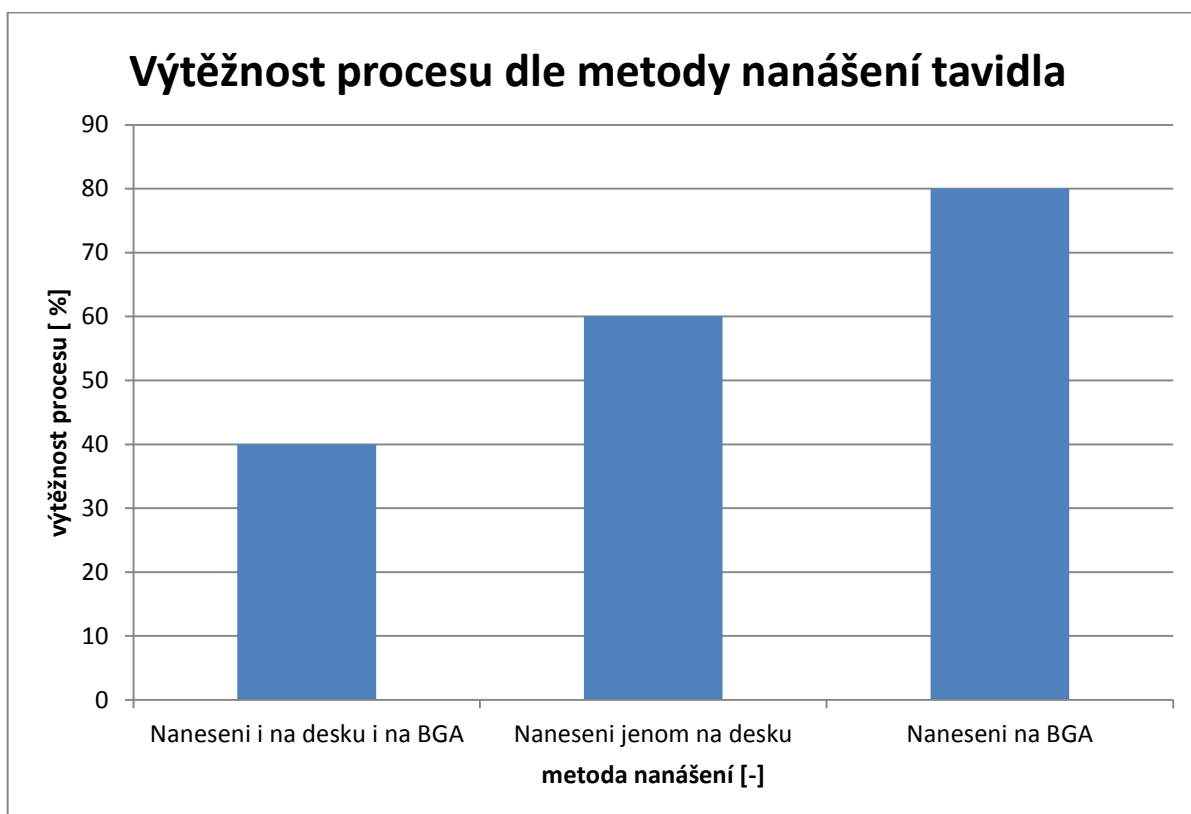


**Obr. 15: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – nanášení na desku + BGA**

Na obrázku 15 je zachycena situace, kdy vlivem velkého množství tavidla došlo k nadzvednutí a „zaplávání“ součástky. Na první pohled nemusí být patrný fakt, že kuličky pájky se ve skutečnosti nachází „o řadu vedle“.

### 8.3.4 Vyhodnocení metody nanášení

Vzhledem k výsledkům jednotlivých metod, které jsou popsány výše, bylo rozhodnuto o dalším pokračování testů pouze s metodou nanášení na kuličky pájky součástky BGA. Ta nenavýšuje čas potřebný k aplikaci tavidla a rovněž zachovává, či dokonce mírně snižuje spotřebu tavidla, oproti dříve používané metodě nanášení na desku. Statistické vyhodnocení testů metody nanášení tavidel je zachyceno v grafu 2. Je patrné, že rozdíly výtěžnosti dosažené pomocí jednotlivých metod se liší dostatečně na to, aby mohly být obě ostatní metody, tedy nanášení na DPS a na DPS i na kuličky BGA zároveň, z dalších testů vyřazeny. To zjednodušuje následující testy tavidel, kdy lze předpokládat, že vybraná metoda nanášení přináší nejlepší výsledky a snižuje tak negativní ekonomické dopady testů, pro něž je nutno používat poměrně drahé desky plošných spojů. To má ovšem své opodstatnění, neboť účelem testů je nalézt takovou metodu a tavidlo, které bude vhodné použít v reálném procesu oprav konkrétních desek, které firma zpracovává.



Graf 2: Vyhodnocení výtěžnosti procesu dle metody nanášení tavidla

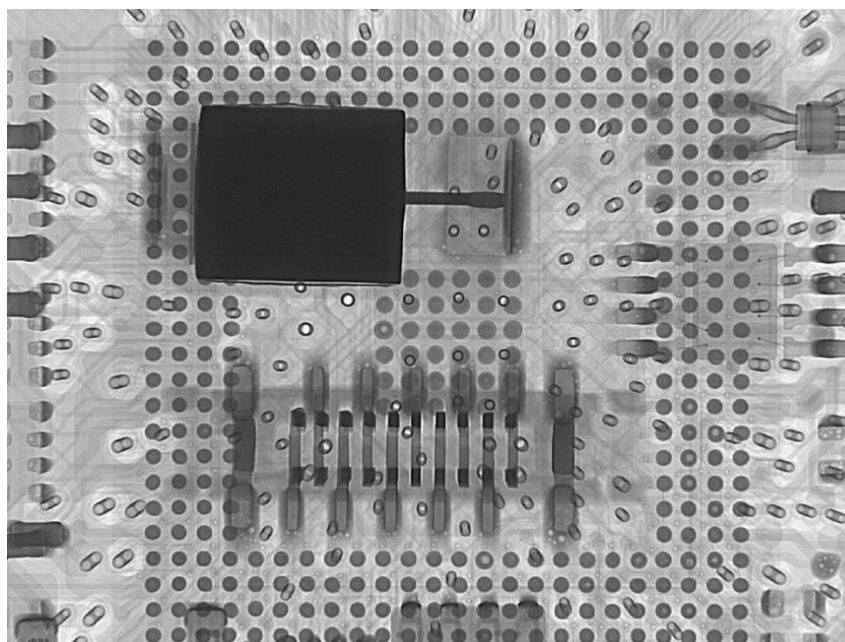
## 8.4 Vliv použitého tavidla

Po vybrání vhodné metody nanášení tavidla mohlo být přikročeno k testům jednotlivých druhů tavidel. Ty budou, v rámci zachování firemního tajemství, tedy „confidential“ politiky, uvedeny pouze jako vzorky označené číslem. U každého pak bude stručně uveden popis a charakteristika, kterou pro dané tavidlo udává výrobce. Veškeré testy byly provedeny na zařízení XT5 firmy PDR, pracující na principu FILSS infračerveného záření. Vyhodnocení probíhalo na zařízení Nordson DAGE XD7600NT Ruby FP a vyhodnocovány dle standardů definovaných v normě IPC 7095 – C [13].

### 8.4.1 Vzorek 1

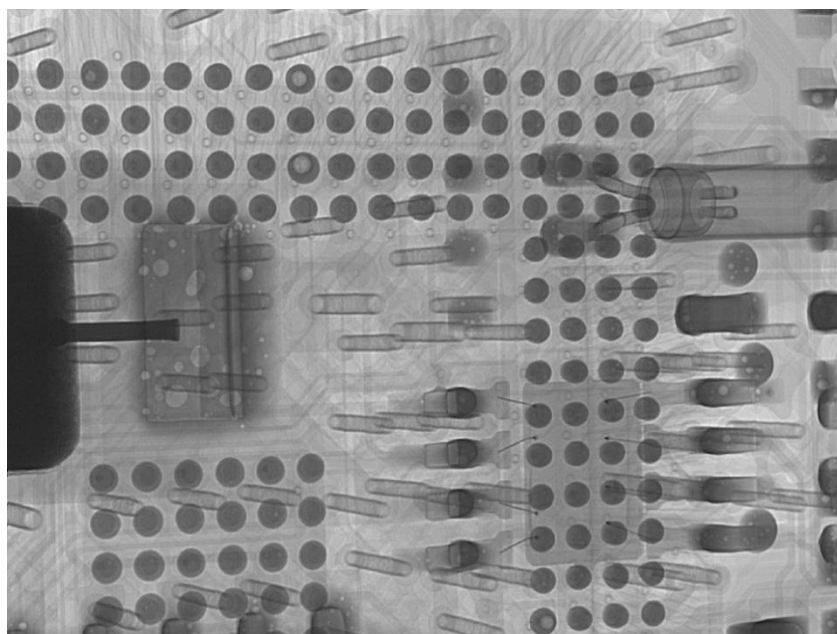
Vzorek 1 představuje tavidlo dle normy IPC J-STD-004 klasifikované jako ROL0. Výrobce uvádí, že se jedná o gelové tavidlo vyvinuté pro široké spektrum aplikací s důrazem na co největší procesní okno, speciálně pak pro použití při osazování  $\mu$ BGA pouzder. Zároveň je zmíněno, že se jedná o tavidlo bez nutnosti čištění tavidlových zbytků. Výrobce také okrajově zmiňuje informaci, že tavidlo bylo optimalizováno pro použití při horkovzdušném procesu pájení.

Při testech tavidla se ukázalo, že v používaném procesu velmi náchylné na tvorbu voidů. Na jednotlivých testovaných kusech se voidy vyskytovaly ve 100% případech. Pro účely těchto testů nebylo rozlišováno, zda by voidy netvořily 25% objemu pájené kuličky nebo ano. Empiricky bylo dosaženo s některými použitými tavidly stavu, kdy voidy nebyly v kuličkách pájky přítomny vůbec. Z toho důvodu byly jako nevyhovující hodnoceny i ty desky, které obsahovaly v kuličkách voidy menší než 25% objemu. Výtěžnost vzorku 1 byla tedy v testech vyhodnocena jako 0%.



**Obr. 16: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 1**

Obrázek 16 představuje celkový pohled na desku v okolí měněné součástky typu BGA. Je z něj patrné, že ve spojích se vyskytují voidy, v některých případech i větší než povolené.



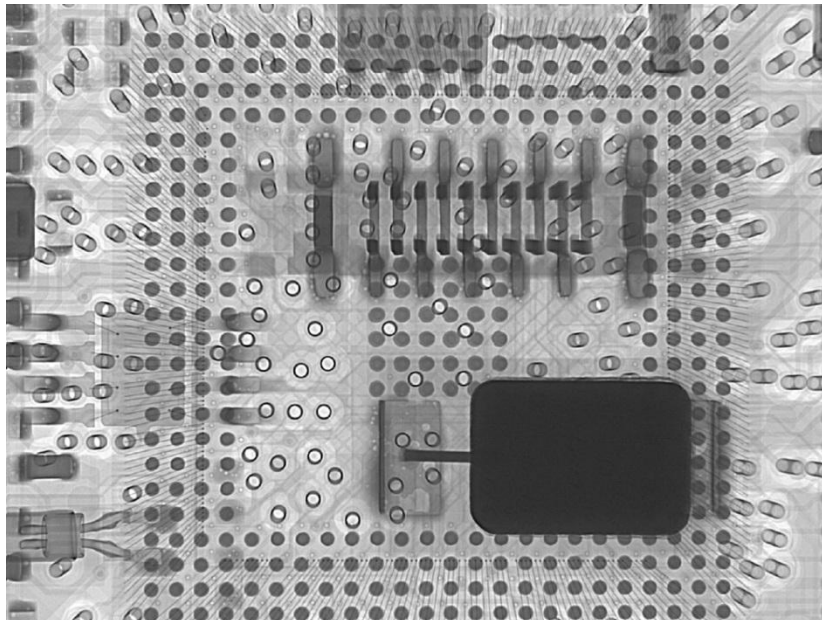
**Obr. 17: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 1**

Obrázek 17 zachycuje přiblížení na místa s častějším výskytem voidů velkých objemů. Ty představují největší problémy při použití tohoto tavidla.

### 8.4.2 Vzorek 2

Vzorek 2 je dle normy IPC J-STD-004 rovněž klasifikován jako ROL0. Jedná se o gelové tavidlo pro olovnaté i bezolovnaté pájení, které není nutné čistit. Je speciálně navrženo pro opravy tak, aby se tavidlo dokonale roztékalo. Toto tavidlo je schopné vysychání i bez působení tepla. Výrobce rovněž striktně doporučuje, aby v procesu oprav bylo tavidlo aplikováno pouze na místa, kde bude osazena opravovaná součástka s co nejmenším přesahem.

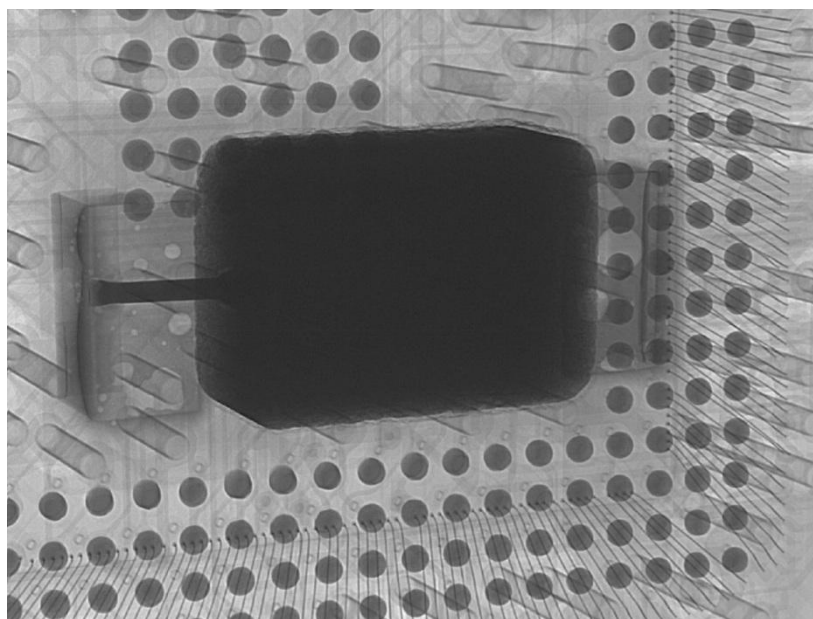
Výsledky testů tohoto tavidla ukázaly jeho vhodnost pro daný typ aplikace. Pokud došlo k chybě, jednalo se převážně o natažené spoje. Ty by mohly být v malé míře akceptovány, ovšem, podobně jako v případě voidů, byly takové desky vyhodnocené jako nevyhovující. Výsledná výtěžnost procesu při aplikaci tavidla, vzorku 2, byla vypočtena jako 80%.



Obr. 18: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 2

Na obrázku 18 je zachycen celkový pohled na součástku BGA. Lze vidět, že osazení je dobré, spoj vykazuje vyhovující tvar a rovněž nejsou patrné voidy. Toto je patrné i z obrázku

19, kdy je část spojů více přiblížena. Na této fotografii je dobře patrné smáčení plošek pájkou. Lze si všimnout, že kuličky pájky nemají zachován zcela svůj kulový tvar, ale jsou mírně protažené směrem k plošce. Toto značí kvalitní spoj a dobré smáčení, což potvrzuje vhodnost tohoto tavidla.

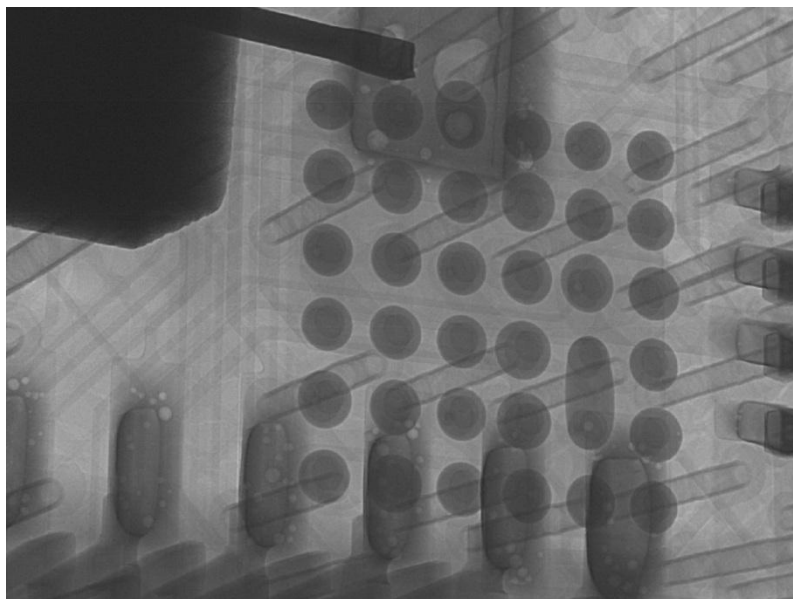


Obr. 19: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 2

### 8.4.3 Vzorek 3

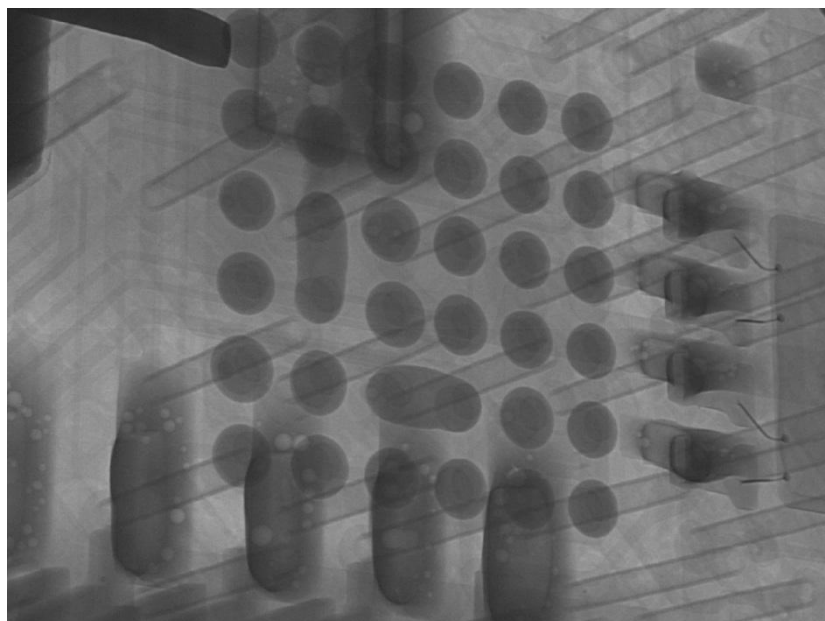
Vzorek 3 představuje tavidlo klasifikované jako REL0. V technických materiálech, které výrobce k tomuto tavidlu vytvořil, se uvádí následující informace. Tavidlo je vhodné pro aplikaci v rámci širokého procesního okna a není náchylné na změny vlhkosti. Tavidlo nevyžaduje čištění desek, nicméně pokud je desky přesto zapotřebí čistit, lze k tomu účelu použít buď vodu se saponifikátory, nebo běžně dostupné čisticí přípravky.

Při vyhodnocování výsledků kvality spojů pájených za použití tohoto tavidla bylo zjištěno, že toto tavidlo se pro testovaný typ aplikace nejeví jako ideální. Výtěžnost byla v tomto případě vyhodnocena jako 60 %. Pokud se vyskytly chyby, byly nejčastěji spjaté s tvorbou zkratů mezi kuličkami pájky, zejména pak v prostřední části pouzdra.



**Obr. 20: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 3**

Na obrázku 20 a 21 jsou zachyceny zkratky vytvořené ve střední části pouzdra součástky. Z důvodu vysoké frekvence tvorby zkratů mezi kuličkami pájky lze použití tohoto tavidla označit za nevhodné. Tomu napovídá i vzhled některých dalších pájených spojů, přestože u nich k tvorbě zkratu se spojem sousedním v daném případě nedošlo.

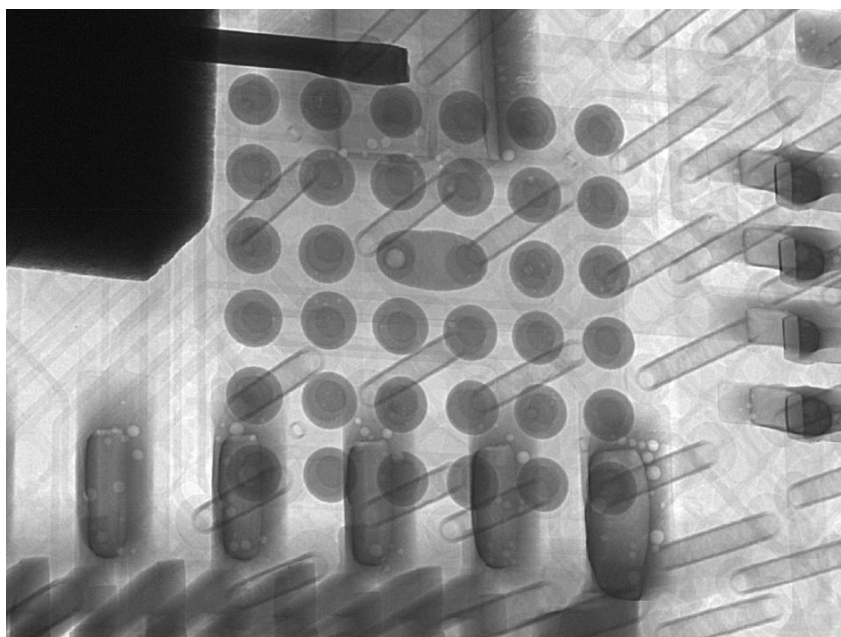


**Obr. 21: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 3**

#### 8.4.4 Vzorek 4

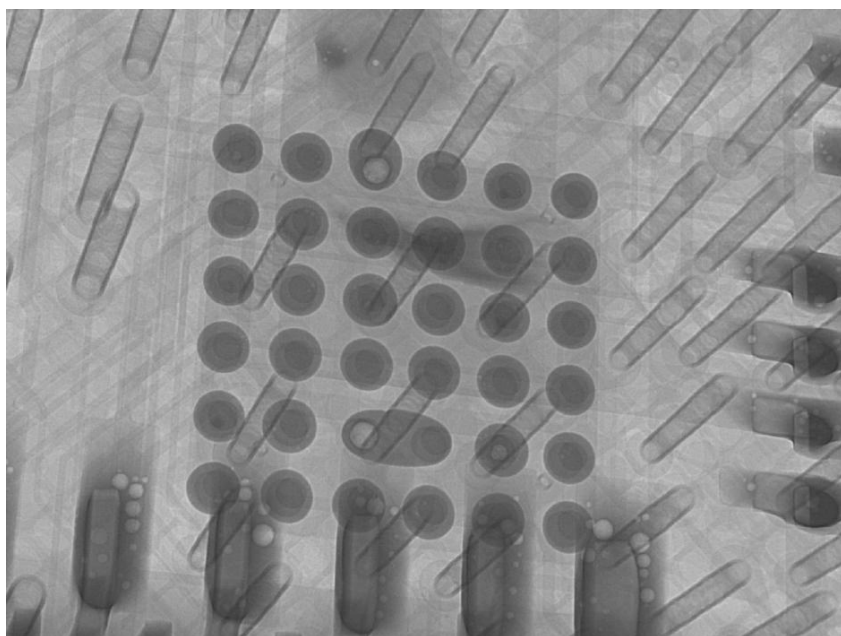
Vzorek 4, rovněž klasifikovaný jako ROL0 má následující parametry udávané výrobcem. Maximální teplota přetavení, do které je vhodné tavidlo používat je 260 °C. Tomu profil nastavený na opravárenském poloautomatu vyhovuje, neboť jeho teplota přetavení je okolo 240 °C. Dále výrobce uvádí, že tavidlo je vhodné jak pro přetavení v dusíkové atmosféře, tak na vzduchu. Tavidlo je navrženo jako bezoplachové s možností čištění pomocí běžně dostupných čisticích prostředků. Primárně je toto tavidlo navrženo pro použití v bezolovnatém procesu pájení, avšak je kompatibilní i pro aplikace využívající pro pájení olovnaté slitiny.

Při vyhodnocování vzorků, na které bylo aplikováno toto tavidlo, se ukázalo, že pro aplikaci v opravárenském procesu součástek BGA není vhodné. Ve všech případech se vyskytly chyby. Byla to zejména tvorba voidů. Přestože některé by byly dle normy akceptovatelné, platí znovu předpoklad a snaha o dosažení co nejdokonalejšího spoje, kvalitnějšího, než jaký norma povoluje. To je dáno předpokladem, že jen co nejkvalitnější spoje budou odolné proti drobnému „zakolísání“ procesu tak, aby se chyby tím způsobené vešly do technologického okna procesu a tudíž, aby nebyla negativně ovlivněna výtěžnost procesu. Druhou chybou, která se vyskytovala u spojů, pro jejichž zapájení bylo použito tavidlo 4, byla tvorba zkratů.



**Obr. 22: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 4**

Na obrázku 22 je zachycen zkrat na středových kuličkách součástky BGA. Na obrázku 23 je pak zachycen rovněž vytvořený zkrat, ovšem je zde patrný i void v kuličce pájky. Celkově lze z obou snímků usuzovat nevhodnost tavidla pro daný typ aplikace.

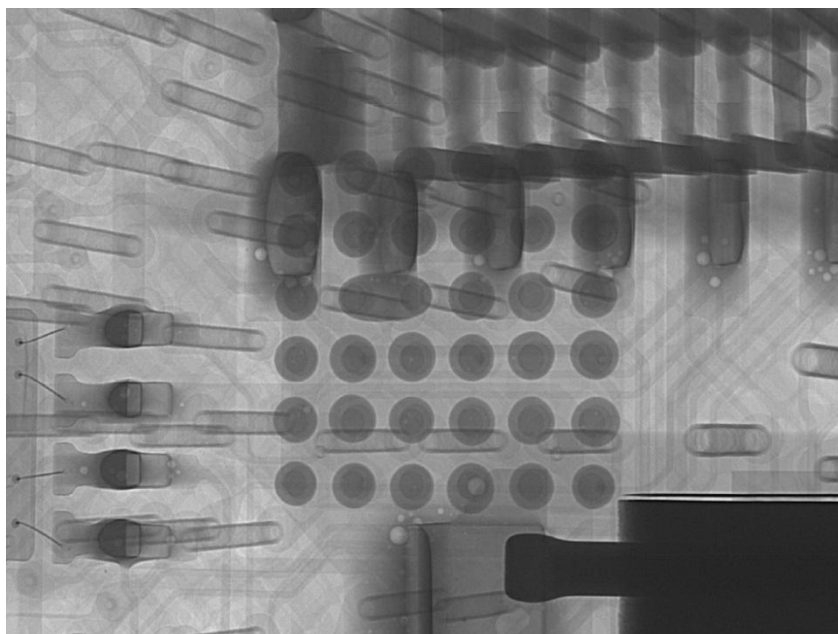


**Obr. 23: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 4**

### 8.4.5 Vzorek 5

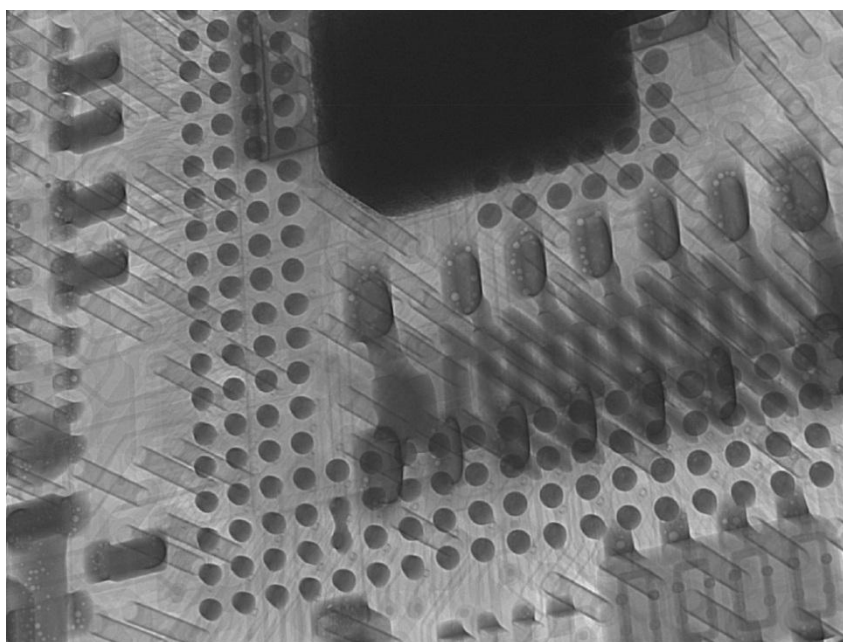
Vzorek 5 představuje tavidlo, které nevyžaduje po přetavení proces čištění. Klasifikováno je jako ROL0. Doporučováno je pro procesy oprav, zvláště pak pro součástky jako jsou Flip chipy nebo BGA. Výrobce také uvádí, že toto tavidlo vydrží na vzduchu po dobu několika hodin bez změny svých vlastností a proto nepředstavuje problém ani aplikace tavidla značnou dobu dopředu, než dojde k jeho faktickému přetavení. Je rovněž uvedeno, že toto tavidlo je vhodné pro bezolovnatý proces pájení.

Vzorky pájené s použitím tohoto typu tavidla vykazovaly poměrně častý výskyt chyb. Nejzastoupenější chybou byly zkraty mezi jednotlivými kuličkami pájky. Méně často se také objevovaly voidy. Vypočtená výtěžnost procesu činí 40%.



Obr. 24: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 5

Na obrázku 24 i 25 jsou patrné zkraty vytvořené mezi sousedními kuličkami. Ukázalo se, že při procesu přetavení mají zkraty největší tendenci k tvorbě na prostředních kuličkách součástky. Obrázek 25 však zachycuje o něco méně častou podobu zkratu mezi jednotlivými kuličkami ve „vnějších řadách“.

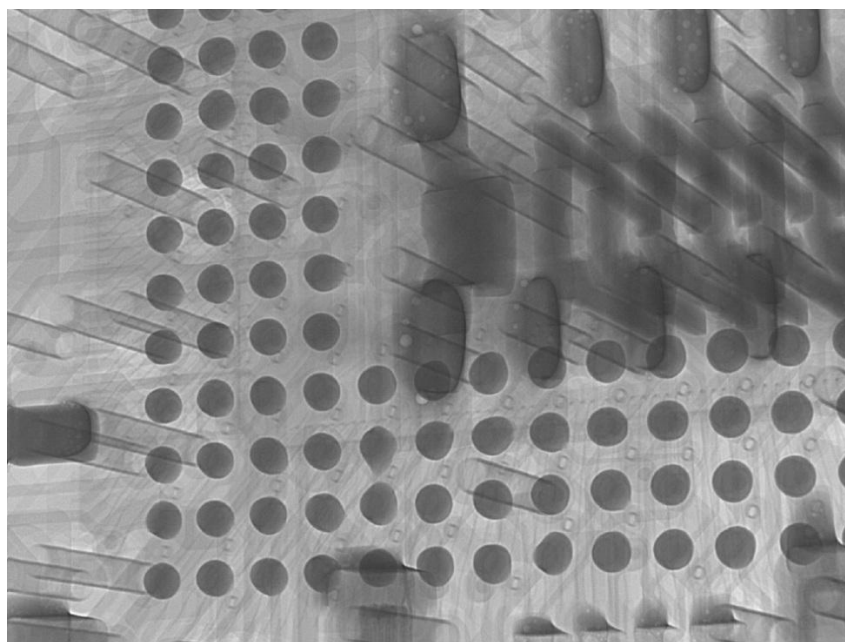


Obr. 25: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 5

#### 8.4.6 Vzorek 6

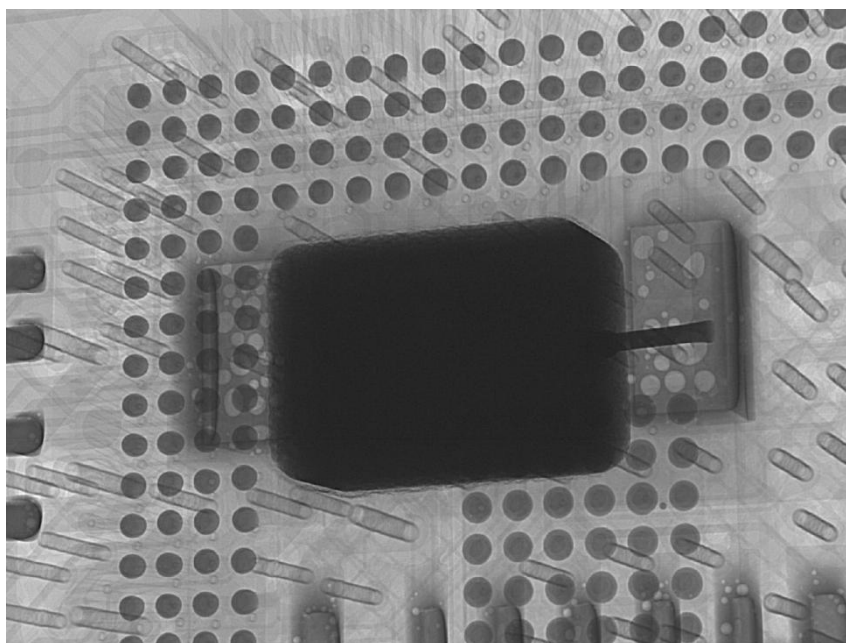
Vzorek 6, klasifikovaný jako ROL0, představuje tavidlo vhodné dle výrobce pro olovnatý i bezolovnatý způsob pájení. Vyhoví širokému procesnímu oknu a nevyžaduje čištění. Je určené k aplikacím pro pájení v dusíkové atmosféře, nebo na vzduchu. V případě nutnosti čištění je možno použít většinu běžně dostupných čisticích prostředků pro čištění tavidel.

Vzorky, na něž bylo aplikováno toto tavidlo, vykazovaly vlastnosti dobře zapájeného spoje. Pokud se objevila chyba, souvisela s mírnou deformací spojů. Ta by byla do určité míry akceptovatelná, nicméně desky, u nichž se tento typ chyby vyskytl, byly hodnoceny jako nevyhovující. Z toho důvodu byla výtěžnost procesu určena jako 60%.



**Obr. 26: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 6**

Na obrázku 26 je u některých kuliček patrné nežádoucí natažení či deformace spoje. Obrázek 27 dole pak zachycuje dobré zapájení součástky. Všechny spoje na tomto obrázku lze hodnotit jako vyhovující.

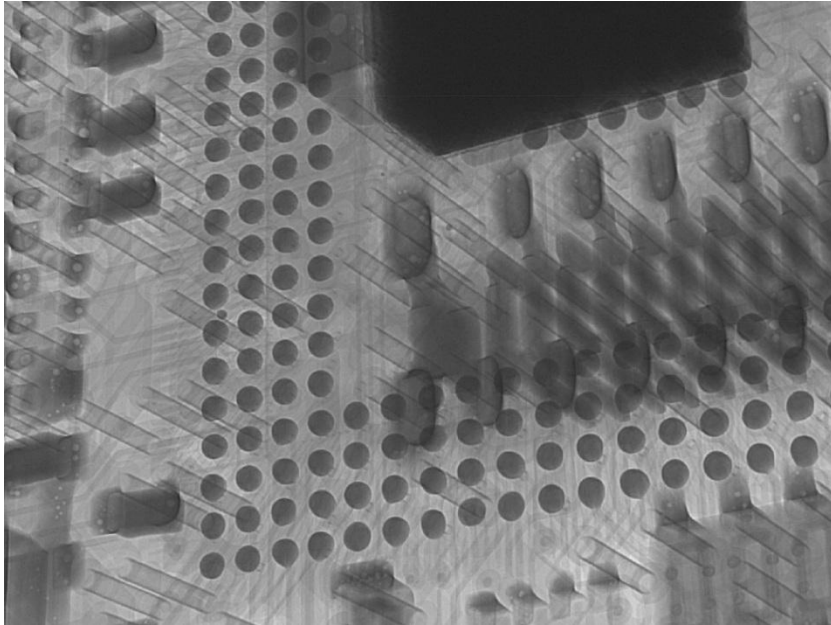


**Obr. 27: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 6**

### 8.4.7 Vzorek 7

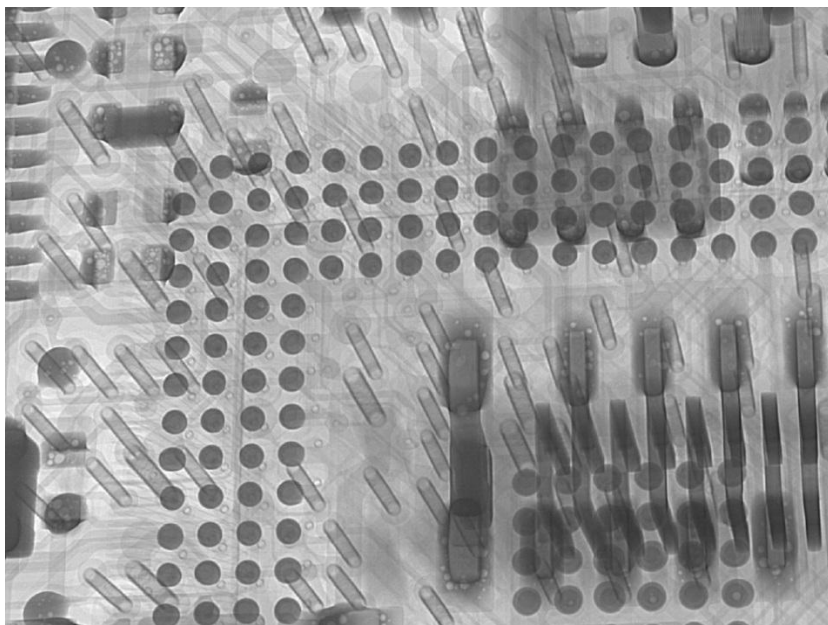
Vzorek 7 představuje tavidlo hodnocené dle IPC J-STD-004 jako ROL1. Výrobce o něm uvádí následující informace. Jedná se o tavidlo navržené pro montáž složitějších elektronických komponent. Vyradí teploty až do 300 °C a je vhodné jak pro olovnatý, tak bezolovnatý proces pájení. Je doporučeno, aby se relativní vlhkost v pracovních prostorách, ve kterých je tavidlo používáno, pohybovala mezi 30 -60%. Výrobce uvádí, že toto tavidlo je vhodné pro různé způsoby ohřevu při přetavení, jako je horkovzdušná metoda, infračervený ohřev nebo pájení v parách. Jako optimální teplotu přetavení pro profil dosažený pomocí infračerveného ohřevu uvádí výrobce teplotu 230 °C. Tento způsob ohřevu je použitý na zařízení XT5P a E3 firmy PDR a proto je tato informace z hlediska testů zajímavá. Teplota dosahovaná během testů při samotném přetavení se pohybovala okolo 240 °C. Pro toto tavidlo výrobce rovněž doporučuje čištění a uvádí jména konkrétních čisticích přípravků, jež je vhodné použít. Ty pocházejí pochopitelně od stejného výrobce jako tavidlo, avšak výrobce zmiňuje, že je možno rovněž použít i některé jiné komerčně dostupné čisticí prostředky pro tavidla.

Při použití tohoto tavidla v testech bylo dosaženo velmi dobrých výsledků. Jediný typ chyby, který se projevil u zhruba 10% desek, byl částečný výskyt voidů. Přesto byla výtěžnost stanovena na 90%. Tento výsledek představuje nejvyšší dosaženou hodnotu ze všech testovaných tavidel.



**Obr. 28: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 7**

Na obou obrázcích, 28 a 29, lze pozorovat vyhovující spoje součástky typu BGA. Byť se mohou při bližším zkoumání zdát některé spoje odlišné od jiných, lze všechny zde zachycené spoje považovat za dostatečně kvalitní a spolehlivé.

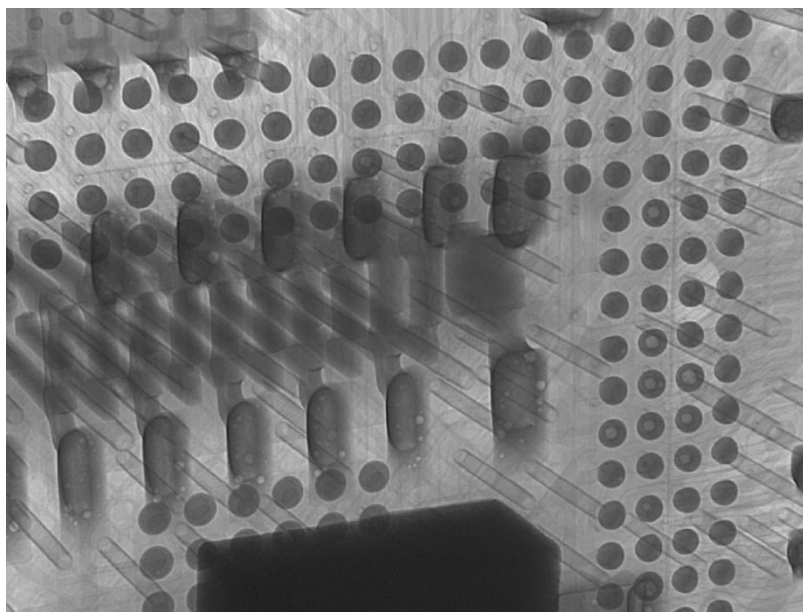


**Obr. 29: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 7**

### 8.4.8 Vzorek 8

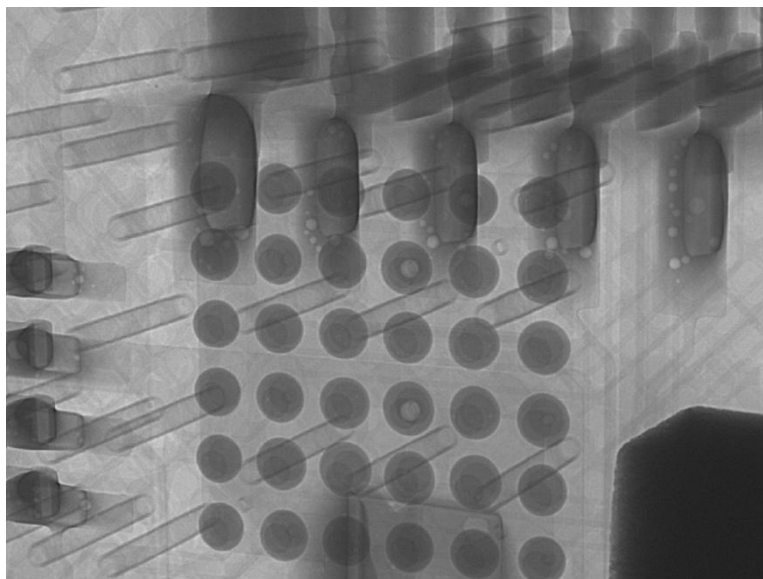
Vzorek 8 spadá do klasifikace tavidel dle IPC J-STD-004 normy jako ROL0. Jedná se o gelové tavidlo vytvořené pro osazování komponent jako je Flip chip, BGA a podobné a to jak pro fine pitch, tak pro standartní rozteče vývodů. Je zejména vhodné pro opravy desek plošných spojů. Výrobce uvádí jeho vhodnost zejména pro použití při pájení olovnatými pájkami, nicméně tavidlo může být využito i pro bezolovnaté procesy s tím, že by neměla být překročena teplota 260 °C. Jedná se tavidlo, které nevyžaduje čištění, přičemž případné zbytky jsou nekorozivní a nevodivé.

Vzorky desek, na něž bylo aplikováno tavidlo vzorku 8, vykazovaly ve velké míře tvorbu voidů. Vzhledem k tomu, že se jedná o tavidlo primárně určené pro olovnaté pájení, lze usuzovat, že problém se vznikajícími voidy není způsoben nedostatečnou teplotou během přetavení, při níž by tavidlo nebylo aktivováno. Jelikož výtěžnost procesu při aplikaci tohoto typu tavidla byla vypočtena jako 20%, nemá příliš smysl uvažovat o případném použití tohoto typu tavidla.



Obr. 30: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 8

Na obrázku 30 lze pozorovat z širšího záběru voidy vytvořené při přetavení spojů po aplikaci tavidla vzorku 8. Stejnou chybu lze pozorovat i na obrázku 31, který představuje střední kuličky s obsaženými voidy.

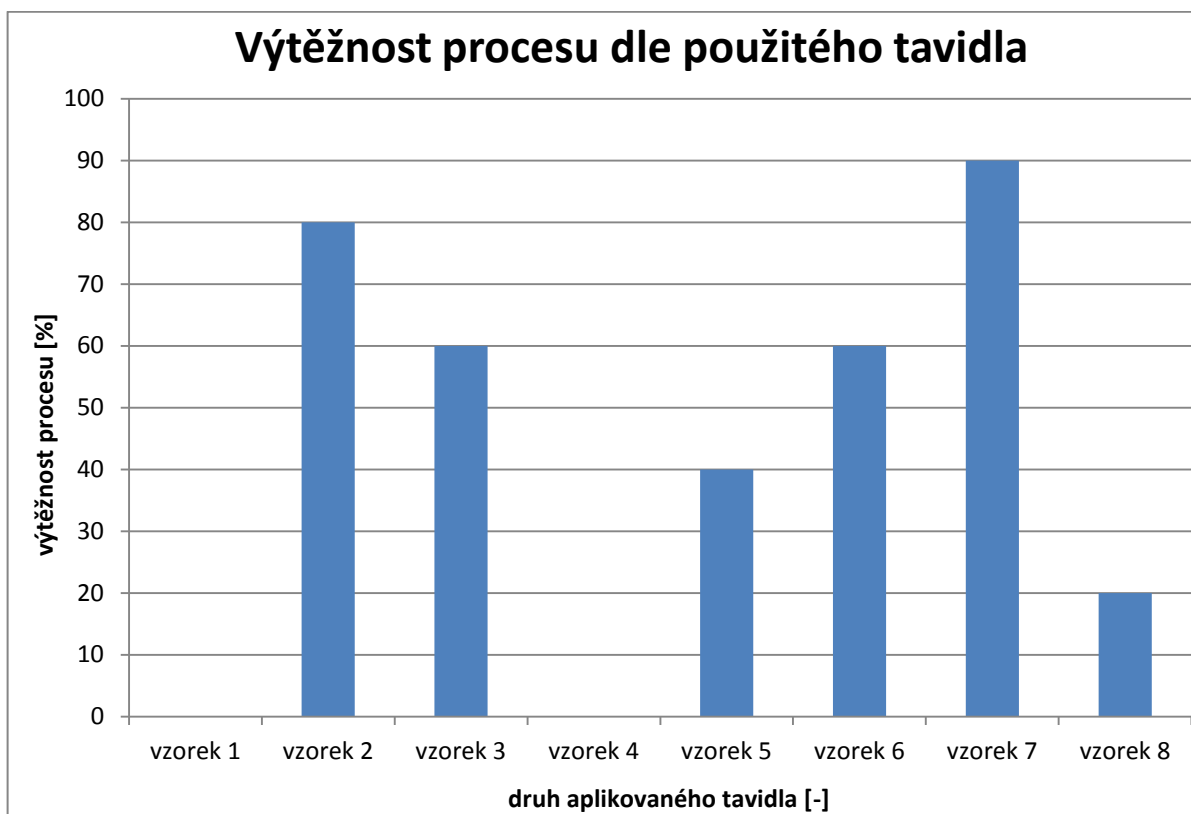


Obr. 31: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – tavidlo vzorek 8

## 8.5 Společné zhodnocení

V grafu 3 je zřejmý výsledek porovnání výsledků výtěžnosti procesů při použití různých druhů tavidel. Přestože výběr tavidel byl již v teoretické rovině veden tak, aby testovaná tavidla alespoň dle jejich specifikací udaných výrobcem byla vhodná pro požadovanou aplikaci, tedy proces opravy desky, na kterou je poté osazena a pájena součástka v pouzdrú typu BGA. Rovněž byla vybírána pouze taková tavidla, která lze jednoduše aplikovat v procesu opravy pomocí současných postupů. Proto se výběr omezil na gelová tavidla, někdy označovaná jako tacky flux.

Přesto, jak je z grafu na první pohled patrné, i tavidla, která prošla alespoň teoretickým předvýběrem, vykazují v reálném procesu velké rozdíly. Hodnoty výtěžnosti se pohybují v rozmezí 0 – 90%.



Graf 3: Vyhodnocení výtěžnosti procesu dle typu použitého tavidla

Některé chyby mohou připomínat fenomény spojené s objemem naneseného tavidla. Je tomu tak u vzorků, které vykazovaly zejména zkratky a voidy v kuličkách pájky. Takovéto chyby ovšem patrně nemají původ v přílišném množství naneseného tavidla, ale spíše v teplotách přetavení, kdy se při nastavené maximální teplotě a typu profilu nestihne tavidlo odpařit. Při procesu chlazení je pak ve spojích stále přítomno velké množství tavidla, které tvoří voidy. Stejně tak v případě studených spojů lze spíše než v nedostatečném objemu tavidla vidět problém jinde. Příčinou patrně bude příliš rychlé odpaření tavidla, které tak není schopné spolupůsobit na pájku v momentě jejího přetavení. Dále by tento jev šel vysvětlit i situací, kdy je dosažená teplota naopak příliš nízká, tedy nedojde k dostatečné aktivaci tavidla. Krom absolutní teploty dosažené v jednotlivých částech profilu rozhoduje také doba, po kterou je deska a součástka této teplotě vystavena. Je potřebné zmínit, že někteří výrobci doporučují teplotní profil, kterého je vhodné se držet, zatímco jiní nikoli. Často je alespoň uvedena maximální teplota profilu, pro který lze tavidlo použít. Přesto se ukazuje, že v konkrétním procesu je nutno doporučení výrobce ověřit. Konkrétně např. u vzorku 8 byla teplota použitého přetavovacího profilu na horní hranici teploty, pro kterou je tavidlo určeno.

Výrobce dokonce udává, že tavidlo je vhodné píše pro olovnatý proces pájení, tedy profil s nižší teplotou přetavení. Přesto se jako hlavní problém u tohoto vzorku ukázaly voidy, což příliš nesouhlasí s informacemi, které o tavidlu uvádí výrobce.

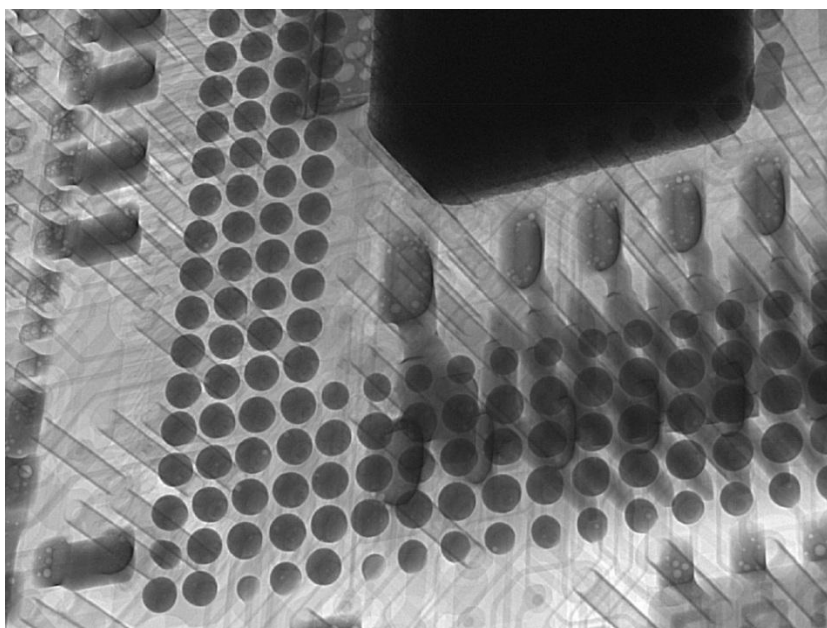
Při vyhodnocování vhodných tavidel je rovněž nutno přihlídnout k praktické straně věci. Vzhledem k faktu, že vytvoření a dokonalé odladění přetavovacího profilu je poměrně složitou a zdlouhavou záležitostí, je nutno považovat za vhodné takové tavidlo, kterým by mohlo být současně používané tavidlo nahrazeno tak, aby nemuselo dojít v ideálním případě k žádnému přenastavení profilu. Toto je výhodné i pro případ vadné dodávky či výpadku dodávky používaného tavidla, kdy by poté „druhé vyhovující“ tavidlo mohlo být použito jako náhrada se stejnou, pochopitelně co nejvyšší, výtěžností procesu. Je tedy možné, že v případě jednotlivých vzorků tavidel by se podařilo při měnění různých parametrů, zejména parametrů profilu, dosáhnout zlepšení výtěžnosti opravárenského procesu i s těmito tavidly. Přesto z testů jasně vyplývá, že existují tavidla, která se jeví jako velmi vhodná i pro současně nastavený typ profilu a není tedy nutné uvažovat např. dvě různé nastavení procesu pro různá tavidla. Vzhledem k množství faktorů, které do opravárenského procesu a procesu samotného zapájení součástky typu BGA vstupují, lze za dostatečné a pro další použití vhodné považovat ty vzorky, které dosahovaly výtěžnosti alespoň okolo 80%. Je možné, že při dalším bližším zkoumání právě takových vzorků se povede určit některé parametry, které by mohly výtěžnost procesu nadále zvýšit. Je ovšem velmi pravděpodobné, že se bude jednat o vliv celé řady faktorů, z nichž určení toho rozhodujícího nebude snadné. Přitom je možno uvažovat i případ, kdy pro každé z vyhovujících tavidel bude pro zvýšení výtěžnosti procesu, do kterého vstupuje, klíčový jiný působící faktor.

## **8.6 Další fenomény pozorované během testování**

Během testování kvality pájeného spoje u součástek BGA vlivem naneseného tavidla byly pozorovány také některé typické fenomény pro různé druhy chyb související s tímto procesem. Přestože se nejedná přímo o chybu související s tavidlem, mohly by být takovéto chyby někdy mylně interpretovány jako problémy, jejichž původ nějak souvisí s otázkami tavidel. Proto jsou zde tyto problémy uvedeny včetně jejich charakteristického projevu.

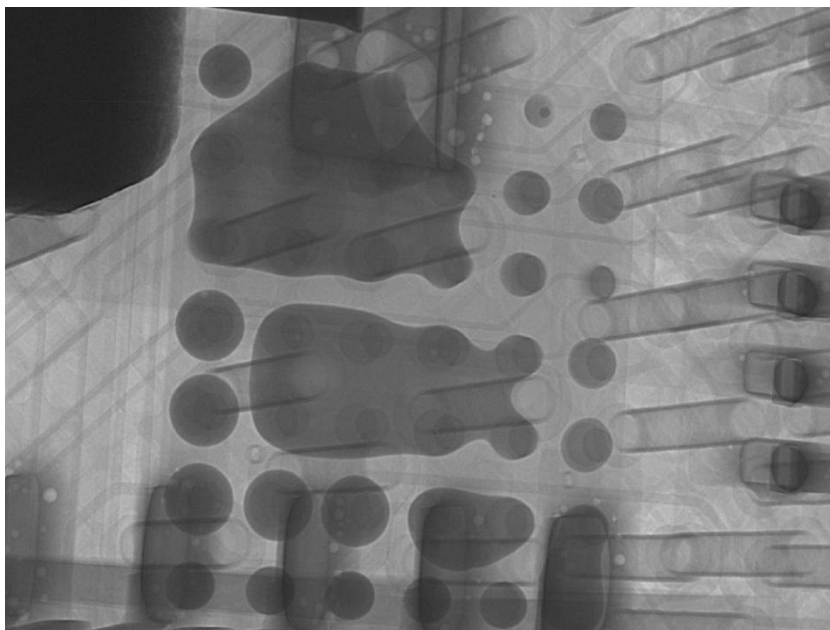
### 8.6.1 Poškození vodou

Prvním typem problému je deska, která byla poničena vodou. U takové desky dojde k zvlnění vrstev, přičemž zejména krajní vrstvy vykazují největší zvlnění povrchu. Toto zvlnění ovšem nemusí být bez důkladnější kontroly patrné na první pohled a mohlo by tedy dojít za určité situace k tomu, že na takovou desku je pájena součástka, např. typu BGA. Výsledek potom vykazuje viditelně nestejnou velikost kuliček v různých řadách BGA vedle sebe, dle toho, jak probíhají „vlny“ na desce. Typický příklad takového stavu je patrný na obrázku 32.



Obr. 32 X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – deska poškozená vodou

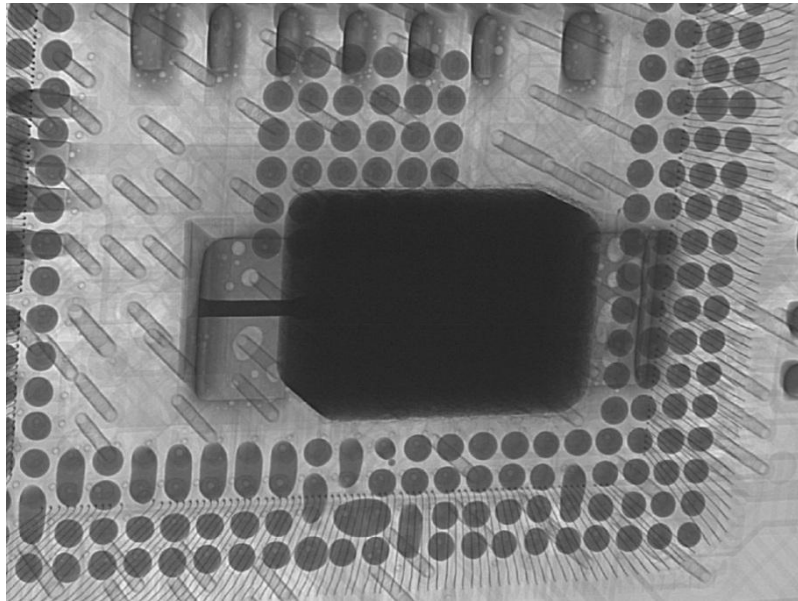
V některých částech pak může docházet k tvorbě zkratů. Ty jsou ovšem zpravidla mnohem větší, než jaké by byly způsobeny např. nevhodným typem aplikovaného tavidla, viz obr 33.



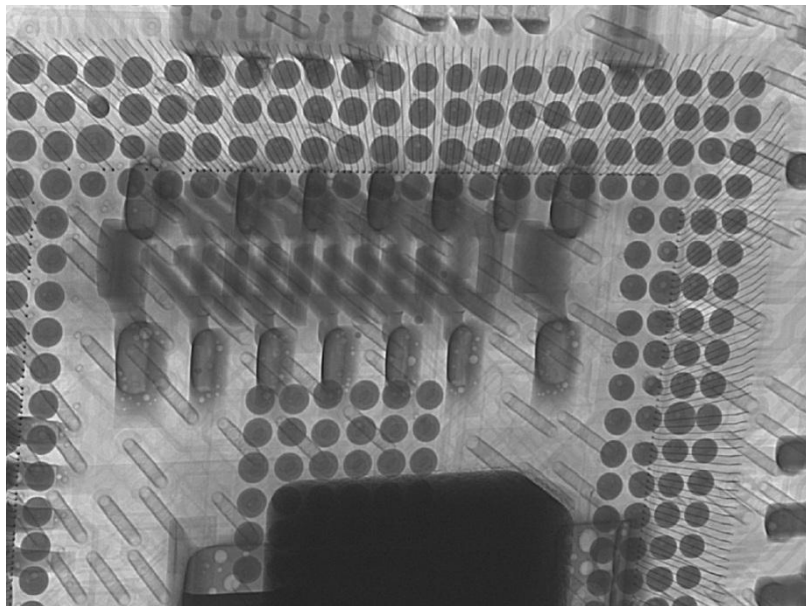
Obr. 33: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – deska poškozená vodou

### 8.6.2 Neočištěná deska

Dalším typem problému je neочиštěná, nebo spíše špatně očištěná deska. V takovém případě je při kontrole patrná různá velikost kuliček, ovšem již ne po řadách, jako v předchozím případě, ale zcela náhodně tam, kde zbylo větší množství původní neочиštěné pájky. V případě shluku více neочиštěných zbytků pájky ve stejném místě dochází k tvorbě zkratů. Takovýto stav je patrný z obrázku 34 a 35.



**Obr. 34: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – nečištěná deska po sundání BGA součástky**



**Obr. 35: X-Ray vyhodnocení kvality pájených spojů – nečištěná deska po sundání BGA součástky**

## Závěr

Obsahem této diplomové práce je zmapování vlivů působících na výslednou jakost procesu opravy součástky v pouzdře typu BGA, vytipování klíčových parametrů procesu a zhodnocení jejich vlivu. V úvodu práce je uveden základní nástin problematiky související s opravou BGA součástek. Uvedeny jsou parametry vstupující do procesu od technologických až po ty spíše logistické. Dále jsou rovněž uvedeny a objasněny základní statistické pojmy související s vyhodnocováním dat sebraných v následujících testech. Výstupem z oblasti statistiky je rovněž návrh analytického software pro vyhodnocování výtěžnosti. Ten ovšem bude začleněn do většího jednotného software pro vyhodnocování procesů v rámci celé firmy a v současné době je ve vývoji. K jeho implementaci by mělo dojít v horizontu několika měsíců, přičemž bližší informace o způsobu funkce tohoto řešení spadají pod ochranu „confidential“ údajů společnosti Sanmina.

Z řady důvodů, které vychází z technologického, ekonomického a technicky proveditelného hlediska v prostředí firmy, byla jako klíčový prvek pro zlepšení výtěžnosti procesu oprav součástek BGA zvolena problematika tavidel. Ta je pak dále uvedena v podrobném rozboru jednotlivých vlivů od způsobu nanášení až po konkrétně zvolené tavidlo.

Dále jsou uvedeny výsledky testů zaměřených nejprve na metodu nanášení tavidla, kde je diskutován i vliv objemu tavidla a poté na konkrétní typ použitého tavidla. Z důvodu ochrany firemních údajů společnosti Sanmina jsou jednotlivá tavidla uvedena pouze pod označením „vzorek xy“. V grafech je pak uvedeno statistické zpracování údajů a vynesena hodnota výtěžnosti, která byla pro každou z metod a vzorků vypočtena na základě vyhodnocení výsledků testovacích vzorků. V textu jsou popsány typické chyby, které se projevovaly u jednotlivých typů testů, přičemž tyto charakteristické defekty jsou rovněž zachyceny na snímcích z kontroly X-Ray. Ta byla prováděna na dostupném zařízení Nordson XD7600NT Ruby FP, které patří k velmi kvalitním, což se odráží i v možnosti velmi dobrého vyhodnocování jednotlivých vzorků.

V závěru práce jsou pak popsány a graficky zachyceny charakteristické chyby, na které je možno v souvislosti s demontáží, osazováním a pájením BGA součástek na desky

plošných spojů narazit. Jedná se o fenomény, které lze v některých případech chybně označit za defekty připisované některému z jiných vlivů, např. tavidlu. Z tohoto důvodu jsou jejich projevy v této práci rovněž zahrnuty.

Jako důležitý přínos práce lze označit identifikaci vhodného způsobu nanášení tavidla v konkrétním procesu opravy desek plošných spojů formou výměny součástek BGA ve firmě Sanmina. Dalším přínosem bylo doporučení několika tavidel, která se pro tento proces ukazují velmi vhodná.

V rámci následujícího kroku by tedy bylo velmi vhodné použít tuto vybraná vhodná tavidla na větším vzorku produkce, který by mohl verifikovat data z jednotlivých testů. Dalším doporučením je ověření výsledků rovněž na opravárenském zařízení ONYX 29, které má firma k dispozici. To pracuje na principu horkovzdušného ohřevu. Proto nelze jednoznačně tvrdit, že při použití tohoto typu přístroje se nemohou objevit určité rozdíly, jež by mohly volbu vhodného tavidla v rámci firmy do určité míry ovlivnit. Je ovšem potřeba zdůraznit, že alespoň pro typy, které představují ve firmě velkou část zakázek, by bylo vhodné mít zmapovanu kompatibilitu použití horkovzdušného ohřevu při procesu opravy s chemií i postupy tak, aby v případě potřeby mohly zařízení ONYX 29 ihned začít fungovat jako záložní řešení.

V neposlední řadě je nutno si povšimnout také problematiky objemu nanášeného tavidla. Testy ukázaly velkou závislost výsledku procesu pájení součástek v pouzdře BGA na objemu nanášeného tavidla. Přestože byl kladen co největší důraz na to, aby při nanášení tavidla aplikátorem bylo nanášeno vždy stejné množství tavidla, nelze se na tento předpoklad stoprocentně spolehnout. Zároveň nelze při tomto postupu jakkoli změřit, kolik tavidla bylo reálně nanášeno, neboť může dojít k „nasáknutí“ malého množství tavidla do aplikátoru. Z tohoto úhlu pohledu by bylo velkým krokem vpřed použití disperzeru pro nanášení tavidla. Ten by umožňoval zkvalitnění a zautomatizování procesu nanášení tavidla, ale zejména by přispěl k jeho maximální opakovatelnosti a rovněž k tomu, aby mohl být celý proces řízen a kontrolován pomocí přesného nastavení objemu nanášeného tavidla. Dalším způsobem, jak nanášet definovanější množství tavidla je i proces nanášení pomocí šablonotisku ve speciální úpravě. Při této metodě je na desku osazena šablona, přes kterou je možno tavidlo natisknout například pomocí ruční těrky. Tato metoda ovšem není v současné době zatím příliš rozšířena

a její doménu tvoří zejména tisk pájecí pasty. O vhodnosti použití této metody a jejím ekonomickém dopadu by bylo nutno rozhodnout provedením série pokusů.

Zde zmíněné návrhy vychází ze statistického vyhodnocení dat získaných v rámci této diplomové práce a z empirických zkušeností nabytých při praktické realizaci testů. Představují možnost, jakým způsobem navázat na závěry a poznatky, jež byly v této práci shrnuty a docílit dalších zvýšení výtěžnosti procesu, vedoucích k celkovému zlepšení jakosti procesu oprav desek osazených součástkami v pouzdře typu BGA.

## Zdroje použité literatury

- [1] Technicest. *Technicest* [online]. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: [http://www.technicest.com/popis\\_bga.php](http://www.technicest.com/popis_bga.php)
- [2] Introduction to the Plastic Ball Grid Array. In: *Introduction to the Plastic Ball Grid Array* [online]. 2008 [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: [http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/package\\_info/PBGAPRES.pdf](http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/package_info/PBGAPRES.pdf)
- [3] JEDEC. *DESIGN REGISTRATION 4.27: Fine Pitch Square Ball Grid Array Package (FBGA)* [online]. B. 2014 [cit. 2014-11-27]. ISBN 11.2-865R. Dostupné z: <http://www.jedec.org/category/technology-focus-area/registered-outlines-jep95>
- [4] SZENDIUCH, I. *Montáž pouzder BGA*. Brno, 2009. Podklady k přednášce. VUT v Brně.
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: Vysokoškolská učebnice fyziky*. 5. vyd. Brno: VUTIUM, 1997. 4. ISBN 80-214-1868-0.
- [6] ANGUIANO, C, M FÉLIX, A MEDEL, M BRAVO, D SALAZAR a H MÁRQUEZ. Study of heating capacity of focused IR light soldering systems. In: *Optics Info Base* [online]. 2013 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-21-20-23851>
- [7] *PDR XT6 IR REWORK STATION Operation Manual*. 2009, 34 s.
- [8] ANSI/ESD S20.20-1999. *ANSI/ESD S20.20-1999*. 1999. Dostupné z: [http://eed.gsfc.nasa.gov/562/ESD\\_Prevention.htm](http://eed.gsfc.nasa.gov/562/ESD_Prevention.htm)
- [9] STARÝ, J.. *Montážní a propojovací technologie*. Brno : SKRIPTUM VUT, 2008. 262 s.
- [10] Six Sigma Material. *Six Sigma Material* [online]. 2014 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://www.six-sigma-material.com/>

- [11] Nordson Dage: X-ray inspection systems. *Nordson Dage* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.nordson.com/en-us/divisions/dage/pages/default.aspx>
- [12] *Requirements for Soldering Fluxes*. Bannockburn: IPC, 2004.
- [13] *Design and Assembly Process Implementation for BGAs*. Bannockburn: IPC, 2013.
- [14] JANÍČEK, M. *Zvýšení výtěžnosti BGA opravárenského procesu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 36 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Bc. Pavel Řihák.

## Seznam zkratek

- ASIC - Application Specified Integrated Circuit – zákaznický obvod
- BGA - Ball Grid Array – pole kulových vývodů
- CBGA – Ceramic BGA - keramické BGA
- CSP – Chip Scale Package – Pouzdro velikosti čipu
- DIP – Dual Inline Package
- ESD – Electrostatic Discharge - elektrostatický výboj
- FBGA – Fine pitch Ball Grid Array
- FILSS – Focused Infra red Light Soldering Systém – systém pájení zostřeným IR svazkem
- FPGA – Field Programmable Gate Array – pole programovatelných hradel
- FR4 – Flame Retardant 4 – materiál zhašející hoření
- IR – Infra Red – infračervené
- J-TAG – Joint Test Action Group – typ testu (IEEE 1149.1 Standard)
- MBGA – Metallic BGA – kovové BGA
- MCM – Multi Chip Module – vícečipový modul
- MSDS- Moisture Sensitive Devices – součástky citlivé na vlhko
- PCB – Printed Circuit Board – deska plošných spojů
- PBGA – Plastic Ball Grid Array – plastové BGA
- PLCC – Plastic Leaded Chip Carrier
- PoP – Package on Package
- QFP – Quad Flat Pack
- RSS – Ramp Soak Spike – typ pájecího profilu s vyrovnáním teploty
- RTS – Ramp To Spike – typ pájecího profilu se stálým postupným nástupem teploty
- SIP – Single Inline Package
- SMT – Surface Mount Technology – povrchová montáž
- SOIC – Small Outline Integrated Circuit

TAB – Tape Automated Bonding

TAL – Time Above Liquid – čas nad teplotou přetavení

TBGA – Tape Ball Grid Array

μBGA - μ Ball Grid Array

UFBGA – Ultra Fine pitch BGA

SIR – Surface Insulation Resistance