

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie

Podlepené součástky u povrchové montáže

Studium vlastností

Bc. Zbyněk Plachý

Školitel: doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Obor: Elektrotechnika, energetika a management

Zaměření: Technologické systémy

Květen 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Plachý** Jméno: **Zbyněk** Osobní číslo: **459144**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Podlepené součástky u povrchové montáže – studium vlastností

Název diplomové práce anglicky:

Underfilled components for surface mount technology - study of properties

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií povrchové montáže a s podlepením čipů, které se u této technologie používá.
- 2) Porovnejte vzorky podlepených čipů s ohledem na jejich mechanickou stabilitu.
- 3) Výsledky testů vyhodnoťte a vyhodnocení zdůvodněte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] Alena Pietriková, Juraj Ďurišin, and Pavel Mach, Diagnostika a optimalizácia pou žitia ekologických materiálův pre vodivé spájanie v elektronike, 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **09.02.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.05.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu docentu Karlu Duškovi za jeho odborné vedení, rady a pomoc při řešení mé závěrečné práce.

Dále bych rád poděkoval nejmenované firmě, která mi poskytla vzorky pro praktickou část této práce a celému týmu, jenž mi poskytoval rady, konzultace a hlavně pomáhal zajistit potřebné vzorky.

Největší dík patří mé rodině a mým rodičům, kteří mě po celou dobu studia podporovali a poskytli mi stabilní zázemí, čímž umožnili moje zdárné studium.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze, 5. května 2021

Zbyněk Plachý

Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje problematice podlepených komponent u povrchové montáže. Konkrétně se zabývá mechanickými vlastnostmi podlepených komponent.

V první části je teoreticky rozebrána problematika povrchové montáže, na kterou následně navazuje teoretický rozbor technologie podlepení. V této části je popsán vznik technologie podlepení a hlavní důvody, proč tato technologie je využívána u technologie povrchové montáže.

Praktická část se věnuje samotnému zkoumání mechanických vlastností podlepených komponent a jejich srovnání vůči komponentě nepodlepené. Také je zde zkoumáno chování mechanických vlastností podlepených komponent, které jsou vystaveny teplotnímu cyklování.

Na zkoumání mechanických vlastností navazuje optická kontrola podlepení samotných komponent a její vyhodnocení dle příslušné normy.

Závěry této práce nasvědčují o pozitivním vlivu podlepení na mechanické vlastnosti. Zároveň bylo zjištěno, že během teplotního cyklování dochází k dovytvrzování lepidla a s přibývajícím teplotními cykly k jeho degradaci. V rámci vyhodnocení podlepení bylo potvrzeno, že proces aplikace underfillu byl u zkoumaných vzorků dobře nastaven a všechny podlepené komponenty by vyhověly příslušné normě.

Klíčová slova: SMT, THT, DPS, SMD, Underfill, Přetavení, Pájecí pasta, BGA

Školitel: doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.
České vysoké učení technické
Fakulta elektrotechnologická
Technická 2
166 27 Praha 6 - Dejvice

Abstract

This Master's Thesis concentrates on the topic of underfilled components for surface mount technology, specifically to their mechanical properties.

In the first part, we will discuss the issue of surface mount technology, which is followed by a theoretical analysis of underfill technology. This section describes the origin on underfill technology and the main reason why this technology is used in surface mount technology.

The practical part is devoted to the study of the mechanical properties of underfilled components used in surface mount technology and their comparison with the non-underfilled components. This part is also focused to the behavior of the mechanical properties of underfilled components that are exposed to thermal cycling.

The examination of mechanical properties is followed by an optical inspection of underfilled components and evaluation of underfilling according to the relevant standard.

The conclusions of this work confirm the positive effect of underfilling on mechanical properties. It was found, that during thermal cycling the glue used for underfilling continue cure and with increasing thermal cycles start to degrade. As a part of optical evaluation of underfilling, it was confirmed that the underfill application process was set well and all examined samples would comply with the relevant standard.

Keywords: SMT, THT, PCB, SMD, Underfill, Reflow, Solder paste, BGA

Title translation: Underfilled components for surface mount technology — Study of properties

Obsah

Úvod	1	
1 Montáž v elektronice	3	
1.1 Historický vývoj	3	
1.2 Pouzdření v elektronice	7	
1.2.1 Montáž první úrovně	7	
1.2.2 Propojování čipů	8	
1.2.3 Montáž druhé úrovně	9	
1.2.4 Montáž třetí úrovně	9	
1.3 THT	11	
1.3.1 THD - Součástky s drátovými vývody	11	
1.3.2 Pájení vlnou	12	
2 Technologie povrchové montáže	15	
2.1 SMT	15	
2.1.1 SMD	15	
2.2 Výrobní proces	16	
2.2.1 Detailní popis výrobního procesu SMT	17	
2.3 Pájení přetavením	18	
2.3.1 Pájecí pasty	19	
2.3.2 Nanášení pájecí pasty	20	
2.3.3 Techniky přetavení pájecí pasty	21	
2.3.4 Teplotní profil	24	
2.3.5 Heating factor	25	
2.4 Intermetalické vrstvy	25	
3 Technologie Underfill	27	
3.1 Úvod do problematiky	27	
3.2 Co je to Underfill?	28	
3.2.1 Přejít z montáže 1. úrovně na montáž 2. úrovně	30	
3.3 Underfill	30	
3.3.1 Standardy hodnotící provedení underfillu	34	
4 Praktická část	35	
4.1 Příprava vzorků	35	
4.1.1 Underfill BGA součástek	35	
4.1.2 Příprava MCM	36	
4.1.3 Teplotní šoky	36	
4.1.4 Zkouška mechanické pevnosti	37	
4.1.5 Příprava testovacího vzorků	37	
4.1.6 Odtrhávání	39	
4.1.7 Optická kontrola	39	
4.2 Naměřené hodnoty	40	
4.2.1 0 teplotních cyklů bez underfillu	41	
4.2.2 0 teplotních cyklů s underfillem	43	
4.2.3 1000 teplotních cyklů s underfillem	45	
4.2.4 2000 teplotních cyklů s underfillem	48	
4.2.5 3000 teplotních cyklů s underfillem	50	
4.2.6 Vypočtené hodnoty	52	
4.3 Mikroskopie - optická kontrola	55	
4.4 Diskuze výsledků	67	
5 Závěr	71	
A Seznam symbolů a zkratk	73	
B Bibliografie	75	

Obrázky

1.1 Rozdíl montáže mezi (a) SMT a (b) THT [2]	4	3.6 Srovnání přijatelných a nepřijatelných voidů dle normy IPC J-STD-030A	34
1.2 Elektrický systém, jehož funkce jsou realizovány pomocí jednotlivých diskretních součástek.	5	4.1 Vyřezaný multičipový modul z DPS.	36
1.3 Srovnání SoC a MCM.	5	4.2 Použitá trhačka pro zkoušku mechanické pevnosti.	37
1.4 Reálný příklad MCM, u kterého je jako základna použita vícevrstvá deska plošného spoje.	6	4.3 Lepení destičky na komponent.	38
1.5 3D konfigurace SIP.	6	4.4 Připravený vzorek na mechanickou zkoušku.	38
1.6 Příklad hierarchie montáže v elektronice v rámci skládání PC.	10	4.5 Zobrazení uchycení testovaného vzorku v čelistech trhačky.	39
1.7 Schématické znázornění osazování součástek s drátovými vývody na DPS	12	4.6 Layout rozložení vývodů jednotlivých komponent.	40
1.8 Znázornění pájení dvojitou vlnou.[6]	13	4.7 Graf znázorňující způsob určení síly a času první deformace.	41
1.9 Znázornění pájení dutou vlnou.[8]	14	4.8 Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC1 při 0 TC, bez underfillu.	42
2.1 Schématické znázornění výrobního procesu v rámci SMT.	17	4.9 Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC2 při 0 TC, bez underfillu.	43
2.2 Znázornění nanášení pájecí pasty na DPS pomocí šablonového tisku.	21	4.10 Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC2 při 0 TC s underfillem.	44
2.3 Grafické znázornění pájecí pece využívající k ohřevu proudění horkého plynu.[2]	22	4.11 Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC2 při 0 TC s underfillem.	45
2.4 Znázornění typického sedlového teplotního profilu pro průběžné pájecí pece s ohřevem pomocí nuceného proudění horkého plynu.	25	4.12 Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC1 při 1000 TC s underfillem.	46
2.5 Znázornění růstu intermetalických vrstev v závislosti na čase při různých teplotách	26	4.13 Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC2 při 1000 TC s underfillem.	47
3.1 Srovnání montáže Flip-chipu a BGA	28	4.14 Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC1 při 2000 TC s underfillem.	48
3.2 Proces připojení flip-chipu na základnu pouzdra včetně aplikace underfillu.	29	4.15 Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC2 při 2000 TC s underfillem.	49
3.3 Ilustrace kapilárního toku underfillu pod komponentou.	31	4.16 Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC1 při 3000 TC s underfillem.	50
3.4 Znázornění procesu aplikace underfillu pod BGA/CSP komponentu.	33	4.17 Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC2 při 3000 TC s underfillem.	51
3.5 Příklad edge-bondingu.	33		

4.18 Graf průměrných hodnot maximální síly, síly první deformace, času nutného k odtržení a času první deformace pro komponent IC1.	54	4.34 3D snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).	61
4.19 Graf průměrných hodnot maximální síly, síly první deformace, času nutného k odtržení a času první deformace pro komponent IC2.	55	4.35 3D výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).	61
4.20 Příčný výbrus IC1	56	4.36 Optický snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).	61
4.21 Příčný výbrus IC2	56	4.37 3D snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).	62
4.22 Příčný výbrus IC3	56	4.38 3D výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).	62
4.23 Příčný výbrus IC2 - laserový snímek	57	4.39 Výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo) zobrazující výšky daných míst. Označená oblast značí výskyt voidu.	62
4.24 Příčný výbrus IC3 - laserový snímek.	57	4.40 3D výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (nalevo) a k ní příslušné základny (napravo) po 1000 TC.	63
4.25 Příčný výbrus IC2 - C-laser DIC snímek	57	4.41 Optický snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (nalevo) a k ní příslušné základny (napravo) po 1000 TC pro srovnání snímků pomocí horizontálního řezu.	63
4.26 Příčný výbrus IC3 - C-laser DIC snímek.	57	4.42 Komparativní profil průběhu výšek odtržené komponenty IC1 vůči příslušné základně v horizontálním řezu.	63
4.27 Laser-optický snímek odtrhnuté nepodlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).	58	4.43 Optický snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (nalevo) a k ní příslušné základny (napravo) po 1000 TC pro srovnání snímků pomocí vertikálních řezů.	64
4.28 Optický snímek odtrhnuté nepodlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).	58	4.44 Komparativní profil průběhu výšek odtržené komponenty IC1 vůči příslušné základně ve vertikálním řezu.	64
4.29 3D výškový snímek odtrhnuté nepodlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).	59		
4.30 Laser-optický snímek odtrhnuté nepodlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).	59		
4.31 3D výškový snímek odtrhnuté nepodlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).	59		
4.32 Optický snímek odtrhnuté nepodlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).	60		
4.33 Optický snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).	60		

4.45 3D výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo) po 1000 TC. Označené oblasti značí místo výskytu voidů.	65
4.46 3D výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo) po 2000 TC.	65
4.47 3D výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo) po 2000 TC. Označené oblasti značí místo výskytu voidů.	66
4.48 Komparativní profil průběhu výšek odtržené komponenty IC2 vůči příslušné základně v jednoduchém horizontálním řezu.	66
4.49 Komparativní profil průběhu výšek odtržené komponenty IC2 vůči příslušné základně ve 400 horizontálních řezech.	66

Tabulky

2.1 Dělení pájecích past dle velikostí částic a jejich rozložení dle ANSI/J-STD-006.[1]	19
3.1 Srovnání vlastností underfillu a edge bondignu.[15]	33
4.1 Popis zkoumaných komponent. .	40
4.2 Poměr plochy vývodů čipu vůči ploše pouzdra.	40
4.3 Tabulka naměřených hodnot pro IC1 při 0 TC, bez underfillu.	42
4.4 Tabulka naměřených hodnot pro IC2 při 0 TC, bez underfillu.	43
4.5 Tabulka naměřených hodnot pro IC1 při 0 TC s underfillem.	44
4.6 Tabulka naměřených hodnot pro IC1 při 0 TC s underfillem.	45
4.7 Tabulka naměřených hodnot pro IC1 při 1000 TC s underfillem. ...	46
4.8 Tabulka naměřených hodnot pro IC2 při 1000 TC s underfillem. ...	47
4.9 Tabulka naměřených hodnot pro IC1 při 2000 TC s underfillem. ...	48
4.10 Tabulka naměřených hodnot pro IC2 při 2000 TC s underfillem. ...	49
4.11 Tabulka naměřených hodnot pro IC1 při 3000 TC s underfillem. ...	50
4.12 Tabulka naměřených hodnot pro IC2 při 3000 TC s underfillem. ...	51
4.13 Tabulka vypočtených průměrů a směrodatných odchylek pro IC1 ..	52
4.14 Tabulka vypočtených průměrů a směrodatných odchylek pro IC2 ..	53



Úvod

Dnešní doba je spojena s každodenní interakcí lidí s elektronikou, kterou jsou neustále obklopeni. Tato neustálá interakce s elektronikou je dána díky zmenšujícím se rozměrům koncových zařízení a vzniku mnoha mobilních aplikací.

Mezi hlavní příčiny rozšiřování kapesní a mobilní elektroniky patří především zmenšení použitých součástek, jež se pro výrobu daných zařízení využívají. K tomuto zmenšení ovšem vedla dlouhá cesta vývoje jak v oblasti křemíkové technologie, litografie, tak i v oblasti pouzdření. Vývoj v těchto oblastech musel být doprovázen paralelním vývojem v oblasti výroby, kde dominantní postavení dnes zastává technologie povrchové montáže.

Menší rozměry součástek přináší kromě výhod v podobě úspory materiálů potřebných na jejich výrobu a menšího prostoru, který tyto komponenty zabírají na DPS řadu nevýhod a obtíží, které musí konstruktéři a designéři zařízení řešit. Mezi tyto problémy patří především generování tepla a jeho odvod, klimatická odolnost, pážitelnost a spolehlivost dané komponenty.[1]

Dnešní trend v rámci elektronické výroby udávají především sami spotřebitelé, kteří žádají rychlejší zařízení s více funkcemi a ideálně menšími rozměry. Zároveň je kladen požadavek, aby dané zařízení plnilo své funkce i v náročných provozních podmínkách. Jako příklad zde stačí uvážit chytré telefony, které jsou s každou další generací rychlejší, „chytřejší“ a plní normy krytí IP6X. Naproti tomu existují mobilní aplikace uplatňující se v kosmonautice, kdy je například u satelitů požadována kromě kompaktních rozměrů i jejich vysoká spolehlivost při extrémních klimatických podmínkách.

V souvislosti s požadavky na vzrůstající kvalitu a spolehlivost, jak celých elektronických zařízení, tak jednotlivých dílčích komponent, se ve výrobě elektroniky a elektrických zařízení rozšířily tzv. nástroje řízení kvality. Hlavním cílem těchto nástrojů je, jak zvyšování kvality výrobního procesu a sjednocení vlastností výrobků, tak i zvyšování kvality konečných produktů a její následné udržení v dosažených hodnotách.

.....

Nástroje řízení kvality sice dokáží v určitých mezích zvýšit spolehlivost a kvalitu daných výrobků v rámci výrobního procesu, ovšem nedokáží řešit designové a konstrukční problémy. Proto je nutno přistoupit k dalším technologiím a technikám, které dokážou zvýšit spolehlivost daných výrobků.

V rámci zvyšování spolehlivosti daného zařízení je nutné si uvědomit, že není obtížné navýšit spolehlivost při neomezených prostředcích. To, co je doopravdy složité, je navýšení spolehlivosti výrobku při minimálních nákladech a vynaložených prostředcích na toto navýšení spolehlivosti tak, aby zařízení spolehlivě fungovalo a jeho výsledná cena nebyla výrazně navýšena. Dále je nutné zohlednit i fakt samotných výrobních kapacit, kdy není žádoucí, aby procesy a techniky vedoucí k navýšení spolehlivosti výrazně snižovaly výsledné výrobní kapacity.

Požadavky na spolehlivost zařízení nepochází pouze od koncových zákazníků ale i od samotného výrobce daných zařízení. Z pohledu „businessu“ je nutné, aby zařízení byla dostatečně spolehlivá, aby i při případných reklamacích či vyřazení vadných výrobků ještě během samotné výroby byl byznys ziskový.

Spolehlivost výrobků má také velký vliv na reputaci výrobce u koncových spotřebitelů, případně zákazníků. V rámci velkých byznysů, kdy je výrobce dodavatelem například pro automobilový, nebo letecký průmysl, může být dobrá pověst a spokojenost rozhodujícím faktorem pro uzavření obchodního kontraktu před ostatními výrobci dodávající stejný produkt.

V této diplomové práci se budu věnovat technologii „Underfill“, který se již dekády využívá pro navýšení spolehlivosti při montáži čipů technologií Flip-Chip. V poslední době se ovšem tato technologie začíná využívat i u montáže vyšší úrovně, kdy se pomocí underfillu navyšuje spolehlivost součástek v BGA a CSP pouzdrech, jenž jsou připájeny na DPS.

Kapitola 1

Montáž v elektronice

1.1 Historický vývoj

Elektronika prodělala za svoji existenci velký vývoj, ve kterém pokračuje i v dnešní době. Technologie se neustále zdokonalují nebo nahrazují novými. V samotných počátcích elektroniky, byly součástky opatřeny drátovými, nebo páskovými vývody, za které se připojovaly na pájecí body, které byly nejčastěji realizovány jako pájecí očka přinýtované na izolovaný nosič. Vzájemné spojení mezi těmito pájecími body bylo realizováno pomocí izolovaných vodičů. U takto vyráběných stejných zařízení se výsledné vlastnosti jednotlivých výrobků mohly od sebe lišit, a to převážně kvůli tomu, že tvar, délka a cesta vývodů a propojovacích vodičů se kus od kusu lišily. Tento původní způsob výroby elektroniky byl těžko automatizovatelný a jednalo se tedy především o ruční výrobu.[1]

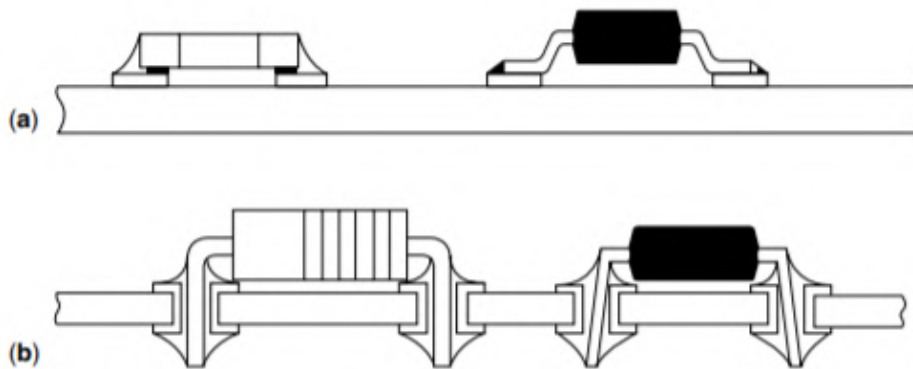
Následný vývoj v oblasti materiálů a technologický pokrok umožnil vývoj a výrobu nových typů součástek a zdokonalení stávajících součástek. Společně s tímto vývojem se musela vyvíjet i montáž v elektronice a technologie pouzdření. Moderní součástky mají integrováno podstatně více funkcí než starší typy součástek a zároveň pracují při podstatně vyšších kmitočtech. Z těchto důvodů narůstají nároky na připojování nových typů součástek, jejich pouzdření a propojování.[1]

Od šedesátých let nastává významná změna v montážní technologii. V daném období došlo k vývoji v technologii plošných spojů, respektive v technologii pokovení otvorů. Tento vývoj umožnil nástup technologie osazování plošných spojů součástkami s drátovými vývody tzv. THT (**T**hrough-**h**ole technology). Součástky byly na desku plošného spoje montovány tak, že vývody součástek byly vsazovány do vyvrtaných děr v desce plošného spoje a na druhé straně byly zapájeny. Hlavní výhodou této technologie spočívá v tom, že deska mohla být zapájena pájecí vlnou, aniž by došlo při pájení k poškození součástek z důvodu vystavení vysokým teplotám.[1]

Postupný vývoj v oblasti litografie a křemíkové technologie umožnil výrobu zprvu jednoduchých a později stále složitějších integrovaných obvodů. Zároveň

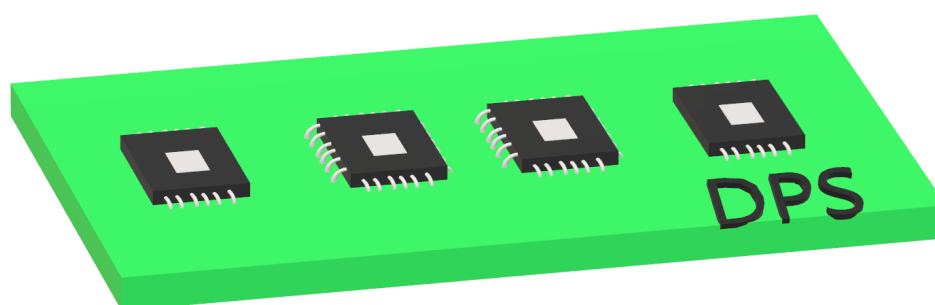
postupně narůstal i počet vývodů těchto integrovaných obvodů (**IO**). Pro montáž součástek s vývody vsazovanými do děr však platilo základní omezení, které bylo dáno průměrem nebo šířkou vývodu součástky, průměrem potřebné díry, velikostí pájecí plošky a potřebnou minimální izolační mezerou mezi sousedními pájecími ploškami na plošném spoji. Mezi další omezení patřilo i náročné vrtání děr o malém průměru. Z těchto důvodů docházelo k nárůstu velikosti pouzder součástek, což bylo v rozporu s požadavky na snižování délky propojů vzhledem k narůstající pracovní frekvenci IO.[1]

Dalším vývojem a kvalitativním skokem v elektronické montáži byl rozvoj technologie povrchové montáže tzv. SMT (**S**urface-**m**ount **T**echnology). Rozvoj této technologie je spojen především s počátkem užívání IO s vyšší úrovní integrace a s vývojem nového typu součástek. Jedná se o součástky pro povrchovou montáž, tzv. SMD (**S**urface-**m**ount **D**evelopes). Tyto součástky, ať už vývodové nebo bezvývodové jsou osazovány na desku plošného spoje DPS (PCB - **P**rinted **C**ircuit **B**oard) ze strany propojovací fólie. U této technologie tedy odpadá nutnost vrtání děr.[1]



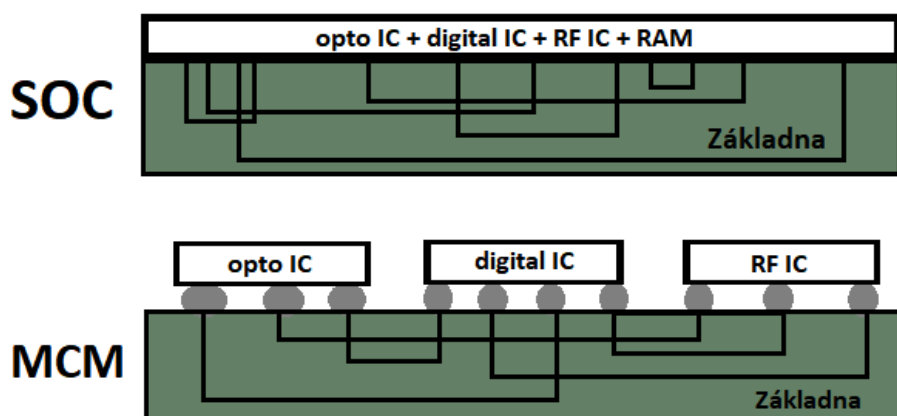
Obrázek 1.1: Rozdíl montáže mezi (a) SMT a (b) THT.[2]

Následujícím zlepšením v technologii SMT byla inovace v používaných SMD, kdy vznikaly nové typy pouzder, jako jsou QFP, BGA a nebo QFN pouzdra, která zpravidla obsahovala jeden polovodičový čip. Tato nová pouzdra přinesla určitá zlepšení, ale zároveň i zde docházelo k určitým omezením dosahovaných parametrů. I nadále se ovšem elektrické uspořádání systému skládalo z jednotlivých diskrétních součástek, kdy každá součástka prezentovala IO s polovodičovým čipem pro příslušnou funkci systému. Toto řešení je přehledné a relativně snadno realizovatelné. Ovšem vyznačuje se také celou řadou omezení a nevýhod. Jedná se především o nízkou pouzdřící účinnost, relativně dlouhé signálové cesty a vysokou spotřebou elektrické energie. Z těchto důvodů se neustále hledají nová konstrukční řešení s cílem dosáhnout zlepšení v oblasti zmenšování rozměrů pouzder, zlepšování elektrických parametrů zkracováním signálových cest, snižování spotřeby elektrické energie a zvyšování spolehlivosti snižováním počtu pájených spojů a propojení.[3]



Obrázek 1.2: Elektrický systém, jehož funkce jsou realizovány pomocí jednotlivých diskretních součástek. Inspirováno v [3].

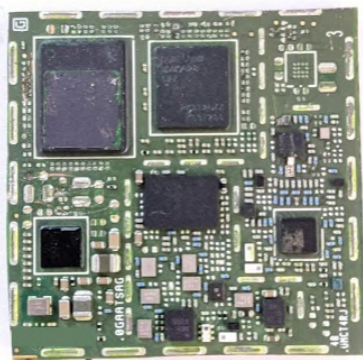
Následná snaha po co největší integraci vedla k umístění všech funkčních bloků na jeden polovodičový čip. Tato snaha vedla k vytvoření SoC (**S**ystem **o**n **C**hip), což je technologie, kdy v samotném čipu je IO, který obsahuje jak výpočetní část, tak i další součásti a periferie, které původně nebyly jeho součástí a dochází tak k vytvoření uceleného systému, který je realizován jednou součástkou v samostatném pouzdru [3]. Takto složité IO napomáhají k nízké pouzdřicí účinnosti, jelikož složitější čipy mívají vyšší počet vývodů, a protože šířka, ani rozteč vývodů nemohou být snižovány pod určitou mez, vyžadují tyto součástky rozměrná pouzdra [1]. Z těchto důvodů bylo nutné vyvinout technologii pouzdření s podstatně vyšší pouzdřicí účinností než mají pouzdra pro povrchovou montáž [1].



Obrázek 1.3: Srovnání SoC a MCM.

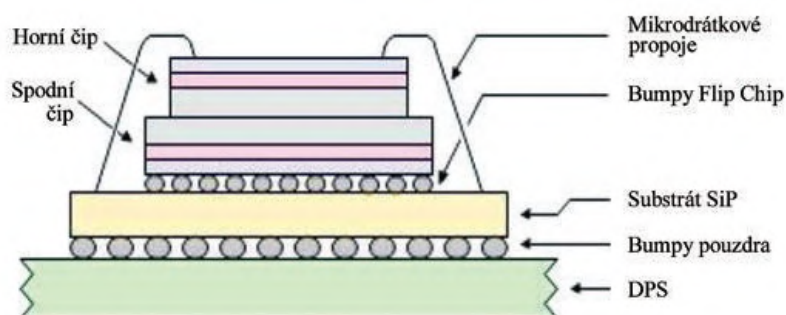
Řešení problému nízké pouzdřicí účinnosti přišlo v podobě multičipových modulů MCM (**M**ulti-**c**hip **M**odule). U těchto modulů je vysokého stupně integrace dosahováno tak, že základnu pouzdra multičipového modulu tvoří vícevrstvý plošný spoj, na který jsou montovány nezapouzdřené čipy IO, které mohou být kladeny velmi blízko sebe. To zaručuje vysokou pouzdřicí účinnost. Základna, na kterou jsou čipy osazovány, dále slouží k jejich vzájemnému propojení. Multičipový modul, obsahující až stovky čipů je v konečné fázi výroby

opatřen samostatným pouzdrům a následně se používá jako samostatná diskrétní součástka. Mezi další benefity spojené s MCM patří i vyšší spolehlivost a nižší hmotnost, než stejný obvod realizovaný ze samotně zapouzdrěných obvodů.[1]



Obrázek 1.4: Reálný příklad MCM, u kterého je jako základna použita vícevrstvá deska plošného spoje.

S dalším rozvojem technologií a vznikem technologie TSV (**T**hrough **S**ilicon **V**ia) neboli technologie prokovení otvorů skrz křemík, se začíná rozvíjet technologie SiP (**S**ystem **i**n **P**ackage), neboli technologie, kdy je systém obecně realizovaný na společné základně propojením více IC. Díky TSV technologii je možné umísťovat holé čipy na sebe, tedy dochází zde k nárůstu v ose Z. Tato technologie někdy může být nazvána i jako 3D IC. Výsledkem je opět jedna součástka, kterou je možno připojit na DPS pomocí SMT. Oproti SoC poskytuje SiP řadu výhod v podobě možnosti výběru optimálního funkčního bloku pro jednotlivé části systému a větší flexibilitu v modifikaci a doplňování nových funkcí. Další výhodou SiP v konfiguraci 2,5D a 3D je vyšší úroveň integrace a zvýšení výkonu, ovšem dochází zde k omezení spojeného se vznikem tepla, které je třeba odvádět.[3]



Obrázek 1.5: 3D konfigurace SiP.[3]

1.2 Pouzdření v elektronice

Obecně lze „pouzďření“ chápat jako opatření diskrétní součástky ochranným krytem - pouzďrem. Ovšem při detailnějším pohledu zjistíme, že pouzďření je velice složitá a komplexní disciplína vyžadující znalosti z mnoha oborů. [1]

V dané problematice pouzďření je nutné zvolit vhodný materiál, optimálně ho zpracovat a vybrat vhodnou technologii. Další otázky, které musí konstruktér řešit jsou přenos elektrických signálů, generování a odvod tepla, spolehlivost, klimatická odolnost, pájitelnost, jakost a mnoho dalších problémů. Spolehlivé připojení a chlazení stále rychlejších a složitějších IO umožňuje pouze paralelní pokrok v litografii a křemíkové technologii.[1]

Pouzďro se obecně skládá ze dvou prvků a to základny, plnicí nosnou funkci a zároveň umožňující elektrické propojení prvků elektrického obvodu a ochranného krytu. Cílem ochranného krytu je chránit součástky před vnějšími vlivy. Mezi běžně používané kryty patří kryty keramické, plastové nebo kovové. Je nutné podotknout, že ochranný kryt nemusí být vždy použit. Pouzďření, kromě opatření součástky, modulu nebo funkčního celku pouzďrem, znamená také připojování čipů k vývodům pouzďra, připojování součástek na propojovací desku a jejich spojování ve vyšší funkční celky. Proto je pouzďření děleno do více úrovní, kdy každá úroveň je charakterizována specifickou technologií a provedením pouzďer. Mezi další důležité funkce pouzďra patří zajistit odvod tepla a zajištění mechanické pevnosti součástky. [1]

1.2.1 Montáž první úrovně

Montáž první úrovně je proces na úrovni samotných čipů. Součástka první úrovně (čip) je montovaná na základnu pouzďra první úrovně (nosič čipu), propojena s vývody základny a opatřena nějakým typem ochranného krytu. Mezi nejběžnější kryty patří kryty plastové. Cílem této montáže je vytvořit samostatnou diskrétní součástku, která ovšem nemusí obsahovat pouze jeden čip, ale může se jednat i o multičipový obvod. Výstupem montáže první úrovně je součástka druhé úrovně.[1]

Jako pouzďra první úrovně se používají tři základní druhy pouzďer.

1. **Pouzďra hermetická** jsou vyráběna nejčastěji z kovů nebo keramiky. Z pohledu ochrany proti vnějším klimatickým vlivům se jedná o nejvyšší typ pouzďer. Mezi hlavní nevýhodu patří jejich vysoká cena, která zapříčiňuje jejich převážné použití pouze v těch nejnáročnějších aplikacích.[1]
2. **Pouzďra nehermetická**, která jsou nejčastěji vyráběna z plastu. Tato plastová pouzďra jsou nejlevnějším typem vyráběných a používaných pouzďer. Problém u těchto pouzďer spočívá ve spojení polymer-kov,

kterým může docházet k průnikům vlhkosti dovnitř pouzdra. Různé kovy užité při výrobě součástek mohou různě reagovat s vlhkostí, čímž mohou vzniknout elektrochemické články, které podporují vznik elektrochemické koroze.[1]

- 3. Pouzdra částečně hermetická** jsou pouzdra, které užívají pokovenou keramiku v kombinaci s plasty. I v tomto provedení dochází k nepatrným průnikům vlhkosti dovnitř pouzdra, která může stejně jako v případě nehermetických pouzder vyvolat elektrochemickou korozi.[1]

1.2.2 Propojování čipů

Pouzdrění čipů je nejnáročnější pouzdríací technologie. Vzhledem k vysoké citlivosti křemíkových čipů na chemické, fyzikální, mechanické a elektrické vlivy, jsou pro pouzdrění čipů vyžadovány speciální techniky. V rámci pouzdrění čipů je nutno zajistit, že nedojde k poškození čipů během jejich připojení na základnu pouzdra a také že nedojde k poškození čipu i během připojení takto vzniklých součástek druhé úrovně na základnu druhé úrovně.[1]

Existuje několik technik připojování čipů na základnu pouzdra. Čip může být montován tak, že nejprve je uchycen na základnu pouzdra a následně dojde k vodivému propojení vývodů čipu a základny pouzdra. Další možností je, že během vsazení čipu na základnu pouzdra dojde i k vodivému propojení jeho vývodů s vývody základny pouzdra. Připojení čipu k vývodům pouzdra bývá nejčastěji realizováno některou z následujících technik.[1]

Wire bonding

Nejstarší technika připojování čipů k vývodům pouzdra je technika připojování pomocí mikrodrátků (wire bonding). Princip této technologie spočívá ve vytvoření sváru mezi mikrodrátkem a připojovací ploškou čipu a následném vytvoření dalšího sváru mezi mikrodrátkem a vývodem základny pouzdra. K připojování mikrodrátků dochází při teplotách 150-200 °C . [1]

Mikrodrátky bývají připojovány pomocí termokomprese, ultrazvukovým svářením nebo termosonickým svářením. Materiály, ze kterých jsou mikrodrátky tvořené, musí umožnit tažení drátků o průměru menším než 50 μm . Mezi nejběžnější materiály tak patří AlSi 1 (1% Si), AlMg, Au, případně čistý Al nebo Cu.[1]

Flip-chip (C4)

Z důvodů vyšších provozních frekvencí v 60. letech firma IBM přišla s technikou připojování čipů, kdy čip opatřený poduškovými vývody byl převrácen (Flip) a v této převrácené poloze připojen přímo na základnu pouzdra. Připojovací plošky na základně byly opatřeny pájkou, díky čemuž po následném

zahřátí v peci došlo k vytvoření pevného pájeného spoje mezi všemi vývody najednou a tím k připojení čipu k základně pouzdra. Technika, kdy jsou vývody z pájky se nazývá C4 (Controlled Collapse Chip Connection).[4]

Výhoda této montáže čipů spočívá především v samotném odstranění mikrodrátků a nahrazení spojů pájkou, což mimo jiné vede ke snížení délky propojů, zmenšení čipů a koncových součástek. Mezi další výhody patří především vyšší pracovní frekvence a lepší pouzdřicí účinnost. Zároveň je tato technika montáže čipů v automatizovaném provozu levnější než technologie wire-bonding.[4]

Takto vytvořené součástky ovšem z počátku neoplývaly přílišnou spolehlivostí z pohledu mechanické pevnosti během teplotního namáhání. Z toho důvodu se hledalo technické řešení, které by umožnilo zvýšit spolehlivost součástek, respektive zamezilo praskání pájených spojů způsobené rozdílnými teplotními koeficienty křemíkového čipu a materiálu základny. Řešení přišlo v podobě modifikace technologie Flip-Chip, kdy po vytvoření pájeného spoje mezi čipem a základnou pouzdra byl přidán jeden technologický krok, kdy došlo k nanesení lepidla, které pomocí kapilárních sil zateklo pod čip a zapouzdřilo prostor mezi čipem a základnou pouzdra. Tato technologie se nazývá underfill.[4]

■ 1.2.3 Montáž druhé úrovně

Montáží druhé úrovně se rozumí proces, kdy dochází k osazování součástek druhé úrovně na základnu pouzdra druhé úrovně, například na DPS. Cílem této montáže je vytvořit samostatnou funkční kartu, například grafickou kartu. Tato karta občas bývá nazývána jako dceřiná deska. Tyto karty se většinou neopatřují ochrannými kryty. Výsledkem montáže druhé úrovně je součástka třetí úrovně.[1]

■ 1.2.4 Montáž třetí úrovně

V rámci montáže třetí úrovně dochází k montáži součástek třetí úrovně na základnu pouzdra třetí úrovně. Touto základnou je stejně jako u montáže druhé úrovně myšlena deska plošných spojů. Tato deska zajišťuje propojení s ostatními součástkami a deskami do vyšších celků. Například pro počítač se tato deska nazývá jako „motherboard“. K základně pouzdra třetí úrovně jsou součástky třetí úrovně nejčastěji připojovány přímými konektory. Celá sestava následně bývá opatřena ochranným krytem (case). Takto vzniklý funkční celek se nazývá součástkou čtvrté úrovně. Tento celek již může být užíván jako samostatné zařízení, nebo může být dále montován do vyšších funkčních celků.[1]

Z výše zmíněných informací je jasné patrné, že složitější elektronické systémy se staví hierarchicky, kdy na spodní straně jsou samostatné pasivní součástky a jednoduché aktivní zapouzdřené součástky. Na konci této hierarchie je výsledný funkční celek. Úroveň součástky je podstatně neomezená, jelikož všechny celky lze vždy skládat do vyšších funkčních celků.

V rámci narůstající integrace existuje v rámci montáže snaha snižovat počet propojení za účelem zvýšení spolehlivosti daných součástek, potažmo zařízení. Dále se zde projevuje i snaha na zmenšení délky propojů vzhledem k narůstajícím pracovním frekvencím.[1]



Obrázek 1.6: Příklad hierarchie montáže v elektronice v rámci skládání PC.

1.3 THT

S nástupem desek plošných spojů se začala rozšiřovat technologie osazování plošných spojů součástkami s drátovými vývody. Tato technologie je ve světě známá jako THT (**T**hrough-**h**ole **T**echnology). Výhoda THT spočívala především v možnosti hromadného zapájení osazených komponentů pájecí vlnou a sjednocení vlastností stejných výrobků.[1]

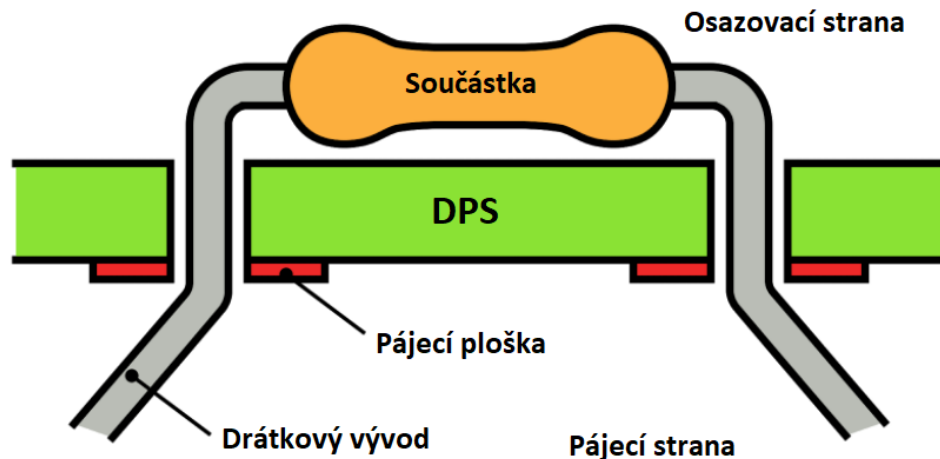
Princip této metody spočívá v tom, že do desky plošného spoje jsou vrtány díry, do kterých se následně osazují drátové nebo páskové vývody jednotlivých součástek, kdy následně na druhé straně desky dojde k jejich připájení k pájecí plošce. Takto vytvořený spoj mezi deskou a komponentou je velice pevný. Mezi hlavní nevýhodu patří nutnost vrtat dané díry do desek, což je velice nákladný a obtížný proces a také větší velikost pouzder THD součástek v porovnání s SMD součástkami.[1]

THT je již relativně zastaralá technologie, která byla z velké části nahrazená technologií povrchové montáže a to především u velkosériové výroby, kde je SMT ekonomicky výhodnější než THT. Ovšem při malosériové či prototypové výrobě se stále uplatňuje THT a to zejména kvůli snadnosti manipulování se součástkami a případným snadnějším opravám chyb montáže a také daleko ekonomičtějším provozem.

1.3.1 THD - Součástky s drátovými vývody

Součástky pro THT neboli THD (**T**hrough **h**ole **D**evelopes) dělíme na dva typy a to součástky s axiálním vedením a součástky s radiálním vedením. Součástky s axiálním vedením jsou charakteristické svými vývody z obou konců komponenty, kdežto u součástek s radiálním vedením jsou vývody pouze na jedné straně součástky, což umožňuje její snadnější osazování pomocí osazovacího automatu a zároveň snižuje prostor na desce, který součástka zabírá.

Mezi výhody THD patří především lepší odvod tepla a teplotní tolerance, snadnější manipulace v rámci prototypové výroby a mechanicky pevné připojení k DPS. S těmito výhodami jsou ovšem vzájemně provázané i nevýhody jako např. nutnost vrtání děr do DPS, horší pouzdřící účinnost a nebo pomalejší přenos signálu.[5]

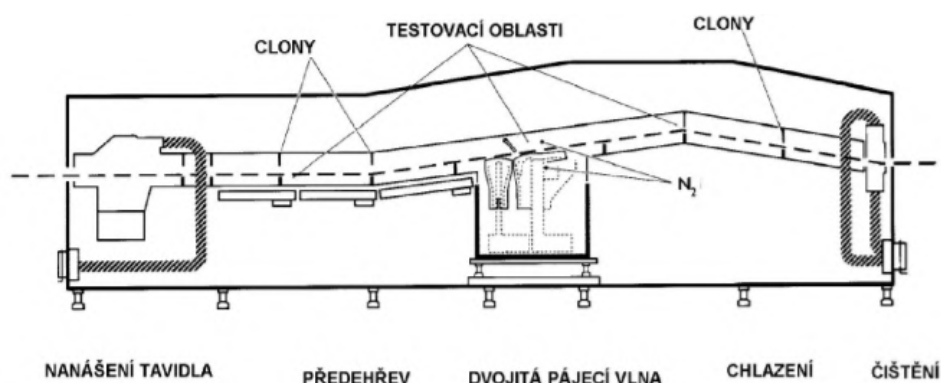


Obrázek 1.7: Schématické znázornění osazování součástek s drátovými vývody na DPS. Převzato a upraveno z [5].

■ 1.3.2 Pájení vlnou

K připojování vývodových součástek na DPS nedílně patří strojní pájení vlnou. Stejně jako THT tak i technologie pájení vlnou je relativně stará. K jejímu rozšíření došlo spolu s rozmachem THT. Tento druh pájení umožňuje zapájet velké množství osazených komponentů na DPS zároveň. Tento fakt přispěl k navýšení kvality pájených spojů, sjednocení vlastností pájených spojů a zvýšil i produktivitu samotné výroby. V rámci strojního pájení vlnou rozlišujeme pájení vlnou jednoduchou, dvojitou, dutou a selektivní pájení.

Proces pájení vlnou se obecně skládá z několika na sebe navazujících technologických kroků. Nejprve dochází k nanášení tavidla, jehož funkcí je odstranění povrchových oxidů na pájecích ploškách, bránění jejich oxidaci při pájení a podpoření roztékavosti a smáčivosti pájky. Dalším krokem je předeřhřev, jehož úkolem je eliminace teplotního šoku, aktivace tavidla. Následuje samotné pájení, jehož cílem je vytvořit pájený spoj. Po samotném pájení běžně následuje chlazení pájeného spoje, které může být dále následováno čištěním DPS od zbytků tavidla. Toto není nutné v případě, kdy dojde k použití „no-clean“ tavidla.[6]



Obrázek 1.8: Znáznornění pájení dvojitou vlnou.[6]

■ Jednoduchá vlna

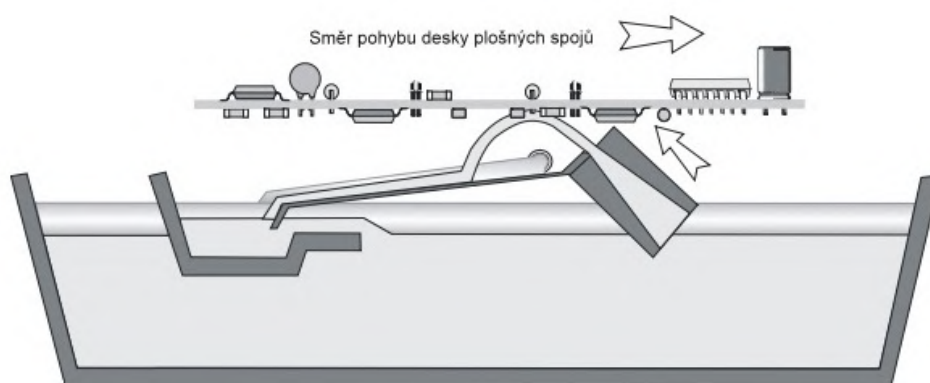
Nejjednodušší typ pájení vlnou vhodný pro pájení vývodových součástek pro THT. Kvůli zajištění lepší teplotní stability pájky bývá u tohoto typu vln používáno větších nádrží, které umožní použít větší objem pájky. Při dlouhých vývodech pájených součástek hrozí nebezpečí vzniku tzv. praporků, čemuž se dá vyvarovat správným nastavením sklonu dopravníku, případně vlny.[6]

■ Dvojitá vlna

Při pájení vlnou je využito dvou po sobě jdoucích vln, kdy první vlna je vlnou turbulentní a druhá vlna je laminární. Na pájecí vlně se nachází roztavené tavidlo, které zajišťuje odstranění oxidů z povrchu pájecích plošek. Funkcí první vlny je podpoření funkce tavidla, očištění pájecích ploch a podpora smáčivosti povrchů. Druhá, laminární vlna následně zajistí dokonalé zapájení pájených spojů. V konečné fázi pájení dvojitou vlnou zapájená deska prochází nad úzkým proudem horkého vzduchu o teplotě cca 380 °C tzv. „horkým nožem“, jehož cílem je odstranit přebytečnou pájku. Technikou pájení dvojitou vlnou lze pájet i součástky SMD, je ovšem nutné zohlednit, že tyto pájené součástky na spodní straně budou po určitý čas ponořeny v roztavené pájce a zároveň je zapotřebí je před zapájením k desce přilepit. Vysoká teplota pájky nesmí způsobit poškození daných součástek. Tuto podmínku není možné splnit např. pro polovodičové součástky, nebo součástky v plastových pouzdrech.[7]

■ Dutá vlna

Dutá vlna umožňuje pájet součástky jak pro THT tak i SMT, z toho důvodu je vhodná pro pájení kombinovaně osazené DPS jak pomocí THT tak i SMT. Dutá vlna má tzv. „sací efekt“, díky kterému se vlna „zavěsí“ na spodní stranu pájené DPS a tu společně s vývodovými součástkami táhne směrem dolů, čímž odpadá nutnost použití přitlačných rámečků. Výhodou duté vlny je vysoký přenos tepla a zároveň relativně malé tepelné zatěžování součástek pro technologii povrchové montáže.[8]



Obrázek 1.9: Znáornění pájení dutou vlnou.[8]

■ Selektivní pájení

Zvláštním typem strojního pájení vlnou je selektivní pájení. Tuto technologii můžeme dále rozdělit na selektivní pájení vlnou a pájení pomocí selektivní trysky.

1. **Selektivní pájení vlnou** je metoda pájení vlnou, která využívá speciálních masek upnutých do pájecího rámu. Účel masky je krýt místa na DPS, kde není žádoucí kontakt s roztavenou pájkou pájecí vlny. Maskují se např. hrany DPS určené pro zasunutí do konektorů nebo SMD součástky, které by mohly být poškozeny vysokou teplotou pájky.[9]
2. **Pájení pomocí selektivní trysky** je v principu shodné jako pájení vlnou ovšem dochází pouze k lokálnímu ohřevu přesně zvoleného místa na DPS a zapájení konkrétních komponentů pomocí vytékající roztavené slitiny z trysky. Pájení pomocí selektivní trysky našlo využití v situacích, kdy není možné využít pájení vlnou, nebo kdy jsou na DPS osazeny tepelně citlivé součástky. Velkou výhodou je vysoká flexibilita procesu, která je vykoupena delším časem nutným k zapájení požadovaných komponentů.[9]

Kapitola 2

Technologie povrchové montáže

2.1 SMT

Technologie povrchové montáže, známá pod zkratkou SMT (**S**urface-**M**ount **T**echnology) se začíná rozšiřovat počátkem osmdesátých let dvacátého století a jedná se o revoluční změnu v elektrotechnickém průmyslu. Tato změna s sebou přináší nástup součástek s novými tvary a provedením vývodů oproti THD součástkám a změnu v technologii pájení daných součástek na DPS.[1]

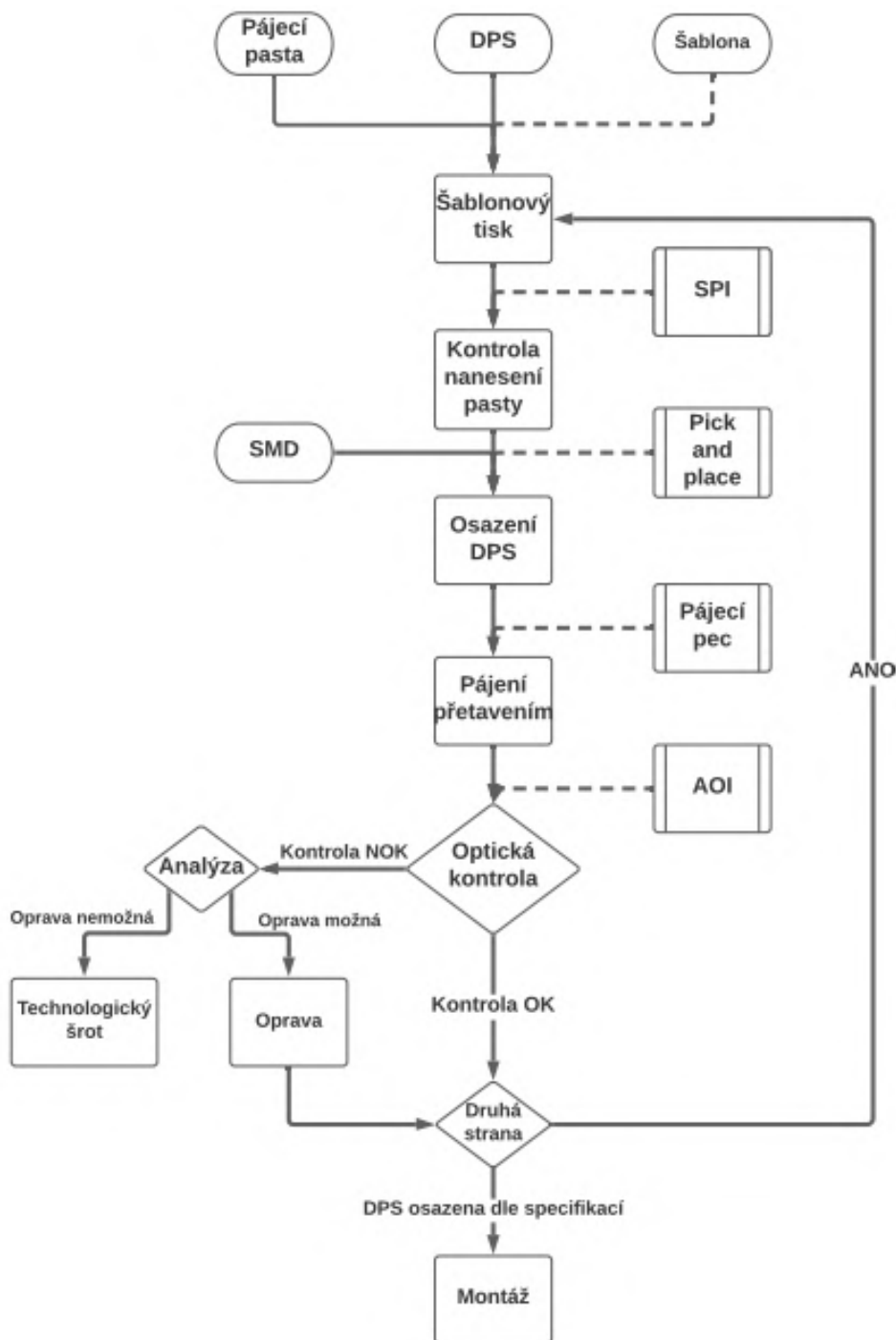
Uzpůsobení součástek pro povrchovou montáž do relativně malých a hranatých tvarů je velice vhodné pro strojní manipulaci v rámci osazování daných součástek. Kvůli malým rozměrům je ruční manipulace s komponenty velice obtížná a náročnost na správné usazení je oproti THT také mnohem větší. Z těchto důvodů je SMT velice závislá na automatizaci výroby, čímž ovšem dochází k navýšení produktivity výroby, přesnosti osazení a kvality. Další výhody SMT vůči THT spočívá v tom, že samotné součástky pro povrchovou montáž jsou menší a zároveň lehčí než stejné součástky pro THT, což vede jak ke zmenšení rozměrů tak i snížení hmotnosti koncového výrobku. SMT je vhodná pro osazení DPS z obou stran. Z výše jmenovaných důvodů SMT vytlačila THT z velkosériové produkce.[1]

2.1.1 SMD

Součástky pro povrchovou montáž SMD (**S**urface-**M**ount **D**evelopments) se vyznačují svými malými rozměry a hranatými tvary vhodnými pro strojní osazování pomocí osazovacího automatu. Snaha o zmenšování pouzder jednotlivých komponent přináší výhody v podobě úspor materiálů, vyšší pouzdríci účinnost, možnost zmenšování rozměrů koncových výrobků ale i problémy spojené například se zhoršeným odvodem tepla nebo vyšší citlivostí na vlhkost.

MSD

Zmenšující se rozměry pouzder a rozměry stěn u SMD se projevují mimo jiné tak, že dochází ke zvýšení rychlosti, s jakou mohou součástky pohlcovat vlhkost a zároveň se snižuje množství vlhkosti, které jsou schopny pojmout.



Obrázek 2.1: Schématické znázornění výrobního procesu v rámci SMT.

■ 2.2.1 Detailní popis výrobního procesu SMT

Princip této technologie je relativně jednoduchý. Prvním krokem je nanesení pájky ve formě pájecí pasty na pájecí plošky tzv. pady, které mají být pájeny. Nanášení pájecí pasty se provádí jako nanesení tlustých vrstev. V minulosti

se pro nanášení využíval sítotisk, ovšem v posledních letech převládá v rámci nanášení pájecí pasty tisk šablonový. V rámci kusové výroby je možné použít i dispenser, u kterého dochází k vytlačování příslušného objemu pájecí pasty pomocí dutého hrotu.

Dalším krokem v rámci sériové výroby bývá kontrola správného nanesení pasty. Jedná se o kontrolu nanesení pasty na správná místa a ve správném objemu. Tato kontrola bývá prováděna a vyhodnocena pomocí automatické optické kontroly SPI (**S**older **P**aste **I**nspection). Tento technologický krok ve výrobním procesu se dá chápat jako volitelný, ovšem v rámci sériové výroby a snížení nákladů při pozdním odhalení vad se tento krok ve výrobě a výrobním procesu běžně vyskytuje.

Po nanesení pájecí pasty na pájecí pady DPS následuje osazení desky SMD součástkami. Komponenty se osazují do nanesené pasty, která kromě funkce pájky plní i funkci lepidla, kdy před přetavením pájecí pasty v peci svými lepidlivými vlastnostmi přidržuje komponenty na správných pozicích. K osazování se běžně používají osazovací automaty *Pick and Place*.^[1]

Následující krok spočívá v samotném přetavení pájecí pasty a ve vytvoření pevného elektrického spoje mezi komponentem a pájecími ploškami na desce plošného spoje. Přetavení probíhá během průchodu osazené desky pecí při určitém teplotním profilu.

Po projetí osazené desky pájecí pecí a jejím zapájením již následuje pouze vizuální kontrola správného osazení a zapájení komponentů na desce. Tato kontrola v rámci sériové produkce probíhá jako celá montáž automaticky a to za pomoci AOI (**A**utomated **O**ptical **I**nspection). Po vyhodnocení kontroly se dá považovat proces pájení přetavením za ukončený a takto vyrobená a zkontrolovaná deska pokračuje k dalším testům a montáži.

Mezi další testy, respektive kontroly, se řadí například rentgenová kontrola (AXI) správného zapájení komponent, jejíž cílem je odhalit nezapájená místa, voidy, můstky a případně další vady. Dalším testem je ICT test (**I**n-**C**ircuit **T**ests), pomocí kterého jsou proměřeny jednotlivé komponenty, čímž dojde k odhalení špatného zapájení komponentů, či jejich poruch.

2.3 Pájení přetavením

Nejvýznamnější technologií pro vytvoření pájeného spoje u technologie povrchové montáže je dnes bezesporu technologie pájení přetavením (Reflow soldering). Na rozdíl od pájení vlnou omezuje tato technologie tvorbu můstků mezi sousedními spoji, čímž umožňuje velmi husté osazení DPS součástkami a použití takových součástek, které se nemohou použít při pájení vlnou.^[7]

Specifikum technologie pájení přetavením spočívá v časově a prostorově odděleném nanesení pájky a následném ohřevu spoje na teplotu vyšší než je teplota tání, slitiny obsažené v pájecí pastě, čímž vzniká výsledný pájený spoj. Během procesu přetavení může dojít ke srovnání osazených součástek na pájecí plošky. Toto srovnání je způsobeno vlivem povrchového napětí a závisí na hmotnosti součástek a množství nanesené pájecí pasty.[1]

2.3.1 Pájecí pasty

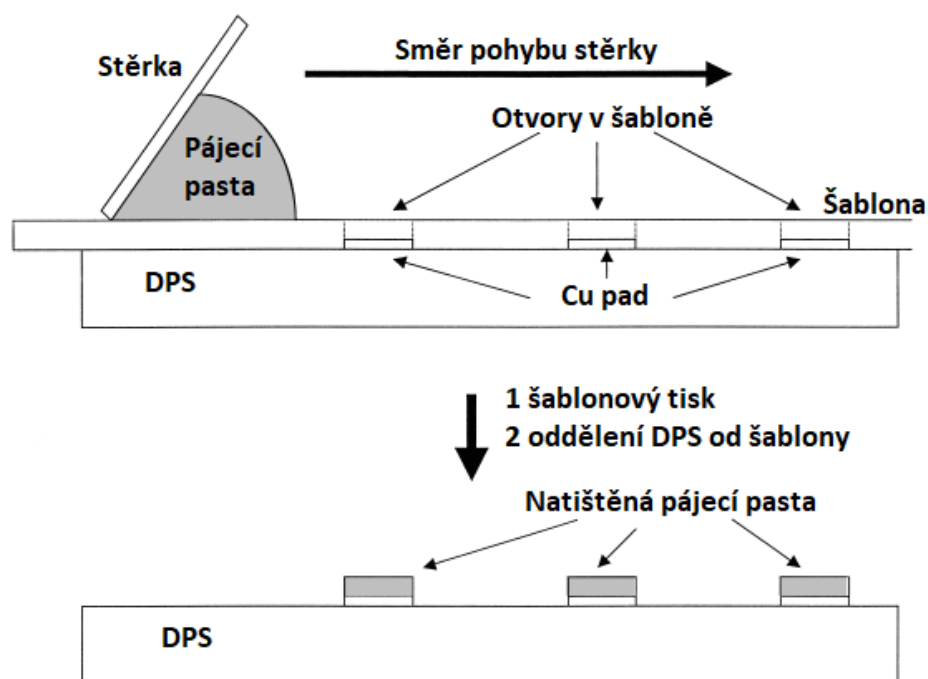
Pájecí pasta je homogenní směs složená ze směsi pájky (pájecí slitiny), tavidla a dalších příměsí upravující roztékavost, lepivost a viskozitu výsledné směsi. Hmotnostní podíl vodivých částic v pájecí pastě dosahuje hodnot 85-90 %. Pájka je složena z částic kulového tvaru o určitém rozložení velikostí kuliček s průměrem v rozmezí 5 μm až 160 μm . Pájky se vyrábějí v šesti velikostních třídách určených normou ANSI/J-STD-006. Tato norma dělí pájky do daných tříd dle středního hodnoty průměru částic a rozložení četnosti průměrů. Volba, jakou třídu pastovité pájky zvolit souvisí s velikostí a hustotou pájecích plošek.[1]

Složení pájecí slitiny má rozhodující vliv na výsledné vlastnosti pájeného spoje. Pájecí slitinu hodnotíme podle teploty tavení, elektrické a tepelné vodivosti, či mechanické pevnosti. Původní pájecí slitiny byly na bázi olova, které je ovšem toxické. Po přidání olova na seznam RoHS dochází k uplatňování nových bezolovnatých pájek.[11]

Tabulka 2.1: Dělení pájecích past dle velikostí částic a jejich rozložení dle ANSI/J-STD-006.[1]

Třída	Průměr největších částic [μm]	Průměr částic větších než, nejvýše 1% obsahu [μm]	Průměr částic větších než, alespoň 80% obsahu [μm]	Průměr částic větších než, alespoň 90% obsahu [μm]	Průměr částic menších než, nejvýše 10% obsahu [μm]
1	160	150	150 - 75	150 - 20	20
2	80	75	75 - 45	75 - 20	20
3	50	45	45 - 25	45 - 20	20
4	40	38	-	38 - 20	20
5	28	25	-	25 - 15	15
6	18	15	-	15 - 5	5

Kromě vytvoření pevného pájeného spoje po přetavení pájecí pasty má pájecí pasta i další důležité vlastnosti. Lepivost je další důležitá vlastnost pájecích past, kdy lepicí účinky pasty musí být dostatečně silné, aby udržely osazenou komponentu do pájecí pasty až do doby, než dojde k přetavení pájky a vytvoření pevného pájeného spoje.



Obrázek 2.2: Znázornění nanášení pájecí pasty na DPS pomocí šablonového tisku. Převzato a upraveno z [2].

Běžnými materiály, ze kterých se šablony vyrábí, jsou mosaz a nerezová ocel, případně se používá molybden jako alternativa pro mosaz a nerezovou ocel a to díky svým vlastnostem, které usnadňují uvolnění pájecí pasty od šablony. Vytváření příslušných otvorů v šabloně se dělá několika způsoby. Mezi nejběžnější technologii patří chemické leptání a laserové řezání. Důležité je, že pro každou DPS, respektive pro každé její rozložení je vytvořena zvláštní šablona.[2]

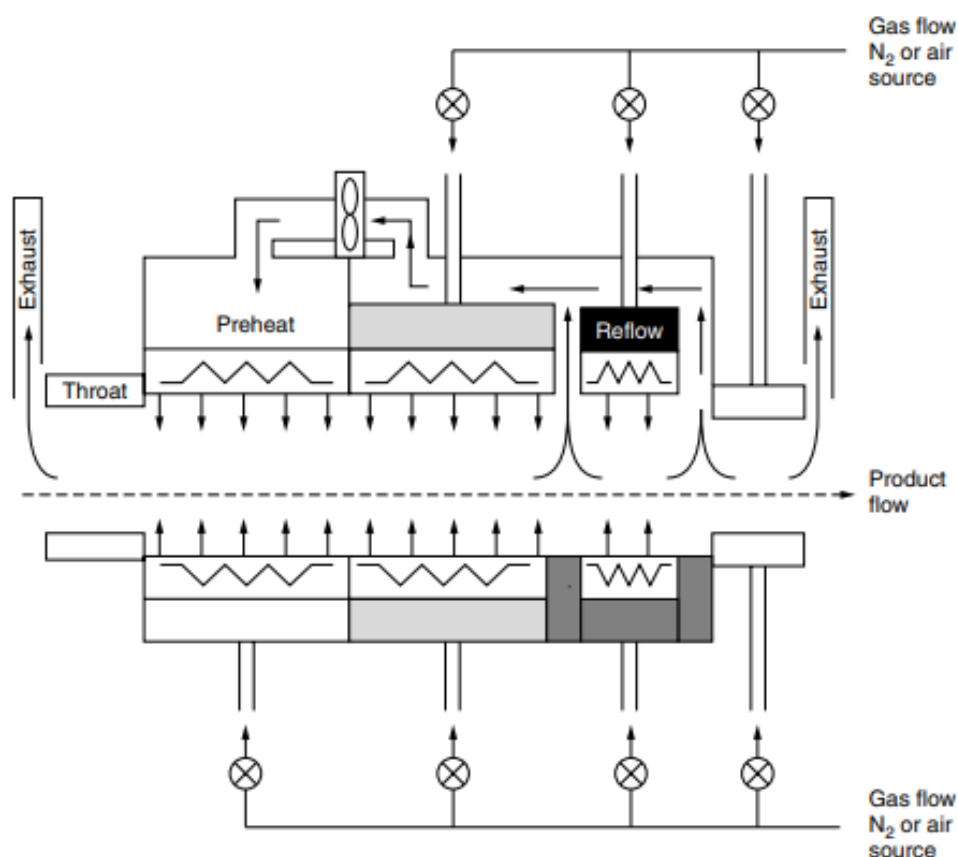
Výslednou kvalitu a stabilitu šablonového tisku ovlivňuje do značné míry i sama stěrka, která mimo jiné ovlivňuje i životnost samotné šablony. V rámci elektronické výroby se můžeme setkat s kovovými nebo polyuretanovými stěrkami, kdy kovové stěrky jsou preferované pro šablony určené pro komponenty s velmi malou roztečí vývodů (fine-pitch).

■ 2.3.3 Techniky přetavení pájecí pasty

V rámci pájení přetavením je nutno zajistit ohřev pájecí pasty nad bod tání pájecí slitiny obsažené v dané pastě. Ohřevem pájecí slitiny nad její bod tání následně dojde k roztavení pájky a vytvoření pevného pájeného spoje mezi pájecí ploškou desky a součástkou, čímž je zajištěno jak její mechanické uchycení na desku, tak i elektrické propojení. Existuje několik technik, kterými lze příslušného ohřevu pájecí pasty a následného přetavení docílit.

■ Pájení nuceným prouděním horkého plynu - konvekční pájení.

Pájení nuceným prouděním horkého plynu (forced convection reflow) je metoda pájení přetavením, kdy se k přetavení pájky využívá průchodu tlakového plynu ohřívacím zařízením. Mezi běžně používaný plyn patří vzduch, případně hrozí-li při pájení horkým vzduchem nežádoucí oxidace, pak se používají některé inertní plyny, kdy mezi nejběžnější patří dusík. Množství dodávaného tepla je možno regulovat teplotou a rychlostí proudění plynu, z toho důvodu se jedná většinou o vícezónové systémy, kdy jednotlivé zóny můžeme nastavovat dle potřeby.[1]



Obrázek 2.3: Grafické znázornění pájecí pece využívající k ohřevu proudění horkého plynu.[2]

U této metody přetavení pájky je zaručena maximální teplota, na kterou jsou pájené předměty ohřáty. Maximální teplota, které mohou pájené předměty dosáhnout nemůže být vyšší než je maximální teplota plynu.[1]

■ Pájení IR zářením

Osazené DPS určené k pájení jsou vystavené infračervenému **IR** záření. Část IR záření se od DPS odrazí, část záření DPS absorbuje a část záření DPS projde. Tato metoda využívá k ohřevu pájky a jejímu přetavení absorpci záření různých vlnových délek pájených součástek a pájecí pasty. V rámci správného nastavení ohřevu pomocí IR záření je nutno zohlednit absorpci záření v okolním plynném prostředí, v materiálu DPS, pastě, kovových površích a různou emisivitu součástek osazených na DPS a samotné DPS. Ohřev závisí na stavu povrchu a na okolní atmosféře. Negativní vliv na rovnoměrnost ohřevů mají stíny tvořené samotnými součástkami. Tato metoda se běžně používá v kombinaci s metodou ohřevu nuceným plynem, která zajišťuje rovnoměrnější ohřátí všech pájených míst.[1]

■ Pájení horkou deskou

Princip této metody spočívá ve vedení tepla pomocí horké desky, případně vyhřívaným dopravním pásem. Předměty určené k zapájení jsou umístěny na vyhřívanou desku, případně pás. Tyto vyhřívané desky případně pásy mají nastavenou teplotu o několik desítek stupňů vyšší, než je teplota bodu tání pájky. Tato metoda je závislá na tepelné vodivosti desek plošných spojů a není možné ji užít pro pájení oboustranně osazené DPS. Kvůli nízké tepelné vodivosti kompozitních materiálů DPS by bylo nutné DPS dlouze ohřívat. Z tohoto důvodu se tato metoda nehodí pro přetavení DPS vyrobených z kompozitních materiálů.[1]

■ Pájení v parách

Tato metoda je založena na předávání tepelné energie při kondenzaci nasycených par, pracovní vroucí kapaliny na chladnějším tuhém povrchu. Přenos tepla je u této metody vysoce účinný a dovoluje zahřát povrch pájené DPS až na teplotu nasycených par kapaliny. V pájecím zařízení se využívají kapaliny s vysokou stabilitou v širokém rozsahu teplot, které neobsahují volný kyslík a nejsou chemicky agresivní. Princip metody spočívá v tom, že osazená DPS je umístěna do prostoru, kde se nachází nasycená pára pracovní kapaliny, která následně zkondenzuje na povrchu DPS a předané kondenzační teplo spolu s konvekčním ohřevem pomocí par zapříčiní přetavení pájeného spoje. Používané pracovní kapaliny mají bod varu nad teplotou tání pájecí slitiny. Tato metoda se vyznačuje rovnoměrností ohřevu DPS a eliminací vzájemného stínění rozměrnějších součástek.[1]

■ Odporové impulsní pájení

Přetavení pájecí pasty je u této metody zajištěno ohřevem pájených spojů pomocí odporového tzv. Jouleova tepla. Toto teplo vzniká na elektrickém odporu nástroje určeného k pájení a pájenými díly. Pájecí nástroj má tvar plně elektrody nebo ohnutého pásu. Nejprve dojde k přitlačení pájecího nástroje

na vývody položené na padu, kdy následnými proudovými impulsy dochází k ohřátí pájecí slitiny a vzniku pájeného spoje. [1]

■ Pájení laserem

Pro ohřátí pájených spojů a přetavení pájecí slitiny se využívá pulsních laserů se zářením v IR oblasti. Jako lasery se využívají buď lasery pevnolátkové nebo plynové. Pájení laserem je vhodné pro pájení teplotně citlivých součástek, jelikož laserový svazek dopadá pod mírným sklonem pouze na místo určené k zapájení, tedy pouze na vývody pájených součástek. Jedná se o přesnou metodu, která ovšem není vhodná pro masovou výrobu z důvodu nízké produktivity a zároveň vysokým nákladům. Jelikož je nutné, aby laser mohl dopadat na pájené místo, není možné tuto metodu použít pro pájení součástek, které mají vývody pod pouzdem.[1]

■ 2.3.4 Teplotní profil

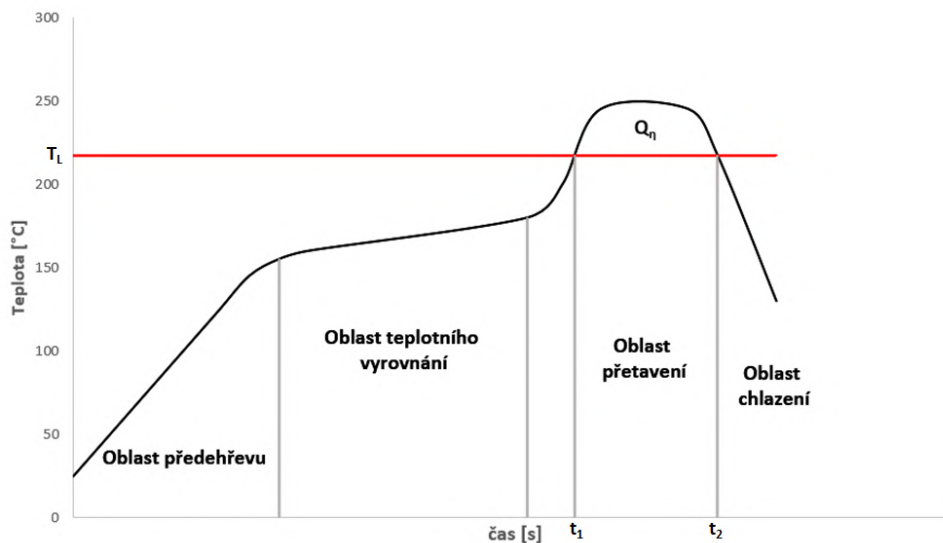
Hlavní výhoda SMT spočívá v její vysoké produktivitě při hromadné výrobě, proto je nutně spojená i s hromadným pájením. Teplotní profil pájecího procesu zobrazuje závislost teploty na čase pro daný pájecí proces. V rámci eliminace rizika poškození součástek na osazené DPS určené k zapájení je nutné nastavit vhodně teplotní profil, který musí respektovat maximální přípustné teploty všech součástek, které jsou na DPS osazeny.

Teplotní profil použitý pro pájení musí respektovat veškeré povolené teploty, které snesou pájené součástky, teplotu tavení pájecí slitiny obsažené v pájecí pastě a teplotní profil tavidla, tak aby došlo k jeho aktivaci a správnému zapájení pájených součástek bez jejich poškození. Teplotní profil se obecně skládá z několika zón.

1. **Zóna předehřevu (Pre-heat):** v této fázi ohřevu dochází k nárůstu teploty, dochází k odpařování rozpouštědel v pájecí pastě. Teplotní nárůst by neměl přesáhnout $3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, aby nedošlo ke změknutí tavidla ještě před dostatečným odpařením rozpouštědla. Jako důsledek příliš rychlého ohřevu může být zvodnatění pájecí pasty a následná tvorba můstků.[12]
2. **Oblast teplotního vyrovnání:** v této oblasti dochází k rovnoměrnému rozložení tepla po celé ploše DPS. Tavidlo přechází do tekutého stavu a rozprostírá se přes celou plochu pájecí plošky, čímž zajišťuje její ochranu před oxidací. Následným zvyšováním teploty dochází k aktivaci tavidla a odstranění nečistot z pájené plošky DPS.[12]
3. **Oblast přetavení:** v této zóně dochází k nárůstu teploty nad teplotu tání pájecí slitiny a vzniku tekutého pájeného spoje. Nutností v této fázi je zajistit dostatečně dlouhou dobu smáčení, aby došlo ke kompletnímu roztavení pájky a k dobrému zapájení všech pájených součástek. Zároveň

je nutné zajistit, aby DPS byla vystavena vysoké teplotě pouze po nezbytně nutnou dobu, aby nedošlo ke vzniku křehkých pájených spojů nebo případnému poškození některých pájených součástí, převážně těch, které jsou více citlivé na teplo. V případě, kdy dojde k nedostatečnému prohřátí pájeného spoje a pájky, může dojít k nesprávnému přetavení pájecí pasty.[12]

4. **Oblast chlazení:** v této zóně dochází k ochlazení DPS a zatuhnutí pájeného spoje, čímž vznikne pevný pájený spoj.[12]



Obrázek 2.4: Znázornění typického sedlového teplotního profilu pro průběžné pájecí pece s ohřevem pomocí nuceného proudění horkého plynu.

2.3.5 Heating factor

Pojem heating factor můžeme chápat jako integrál měřené teploty $T(t)$ nad teplotou tavení pájky T_L a dobou, po kterou pájka setrvává v kapalném stavu $t_2 - t_1$. Heating factor značíme Q_η . Dle zobrazení na obrázku 2.4 můžeme tento integrál matematicky definovat jako:

$$Q_\eta = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_L) \quad [s \cdot K] \quad (2.1)$$

Velikost heating factoru ovlivňuje tloušťku vznikajících intermetalických vrstev během pájení a tím ovlivňuje i výslednou spolehlivost a kvalitu pájeného spoje. [13]

2.4 Intermetalické vrstvy

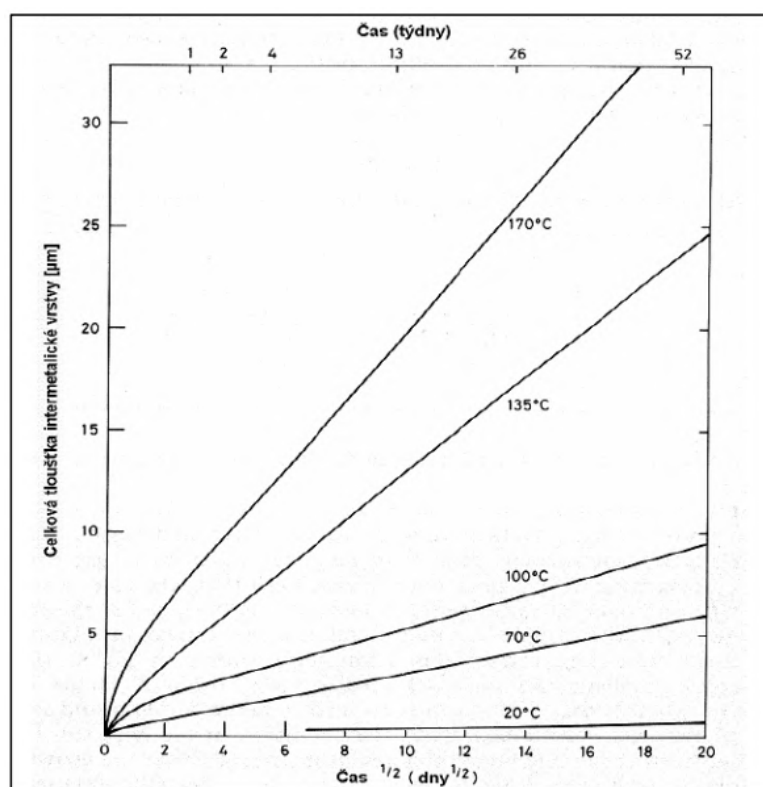
Během pájecího procesu dochází k chemickým reakcím, které vedou ke tvorbě intermetalických sloučenin (IMC) na rozhraní pájecí plošky DPS a pájky

díky rozdílnosti krystalické mřížky cínu a ostatních kovů. K těmto procesům dochází hlavně v okamžiku kdy se pájka nachází v kapalně fázi. V důsledku vzájemného působení zde dochází k difuzi mezi pájeným materiálem a pájecí slitinou, což vede ke vzniku intermetalické sloučeniny, potažmo intermetalické vrstvy na daném rozhraní.[11]

Vznik intermetalické vrstvy je nezbytný pro vytvoření pevného pájeného spoje. Problém s IMC vrstvou spočívá především v její tloušťce, jelikož IMC vrstva narůstá na úkor cínu, a tím oslabuje elektrické a mechanické vlastnosti daného spoje.[14]

Intermetalická vrstva se vyznačuje odlišnými vlastnostmi než pájecí slitina a materiál pájecí plošky DPS, díky čemuž značně ovlivňují životnost a spolehlivost pájených spojů. IMC se vůči pájecí slitině vyznačují vyšší pevností, větší křehkostí, větší rezistivitou a horší teplotní vodivostí. Z těchto důvodů se v rámci pájeného spoje jedná o nejslabší článek z pohledu mechanického namáhání.[11]

Nárůst intermetalické vrstvy je časově závislý na teplotě. Tento nárůst je pozorovatelný i při pokojové teplotě po zapájení. V určitých případech, kdy je pájený spoj velmi tenký může dojít k nahrazení celého pájeného spoje intermetalickou vrstvou.[11]



Obrázek 2.5: Znázornění růstu intermetalických vrstev v závislosti na čase při různých teplotách.[11]

Kapitola 3

Technologie Underfill

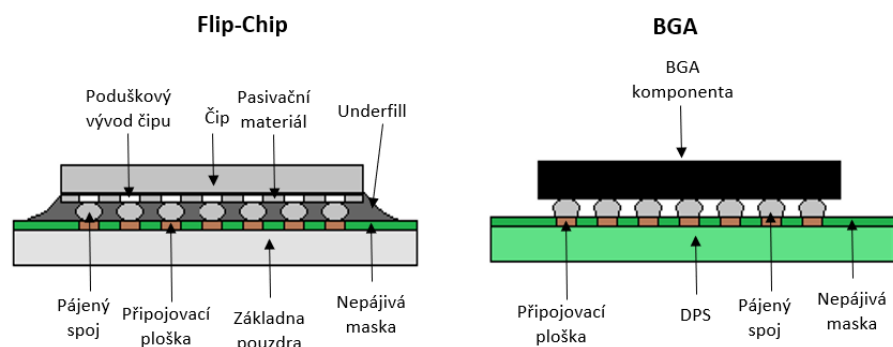
3.1 Úvod do problematiky

Dnešní elektronika je založena na principu osazení DPS procesory, IO, paměťmi a dalšími aktivními i pasivními součástkami. Veškeré tyto součástky a díly jsou ovšem vyrobeny z rozličných materiálů od křemíkových čipů, tantalových kondenzátorů, měděných vodivých cest na DPS, sklolaminátu syceného epoxidovou pryskyčicí (FR4) až po samotné pájené spoje mezi jednotlivými součástkami a pájecí ploškou DPS tvořené různými slitinami na bázi cínu např. SAC nebo SnBi.

Aktuální trendy v elektronice jsou v celku jasně dané. Každá nová generace elektroniky musí být rychlejší, umět více funkcí a ideálně být i menší. Aby bylo možné, že daný výrobek bude umět více funkcí, musí obsahovat více čipů, na to je ale potřeba větší plocha, proto je nutno použít menší součástky, tyto menší součástky mají logicky díky menší ploše horší odvod tepla, zároveň v ideálním případě by měly být i výkonnější, což opět může vést k větší produkci odpadního tepla. K tomu ještě musíme připočítat i fakt, že v případě dvou čipů, jejichž funkce budou identické, ale budou se lišit ve velikosti pouzdra, bude mít menší čip mezi vývody menší rozteče, bude muset být použito méně pájky a výsledný pájený spoj mezi součástkou a pájecí ploškou desky bude menší.

Z výše zmíněného jasně vyplývá, že při současném trendu v rámci elektroniky je nutno stále častěji uvažovat o vlastnostech materiálů jednotlivých komponent, pájecí slitiny, ale i samotné DPS. Hlavní problém spočívá v použití materiálů s rozdílnými koeficienty teplotní roztažnosti, díky čemuž během změn teploty se jednotlivé materiály různě rozpínají a smršťují, což v konečném výsledku může vyvolat prasknutí (crack) v nejslabším místě, což bývá právě pájený spoj. Tento problém se obecně vyskytuje ve všech aplikacích, kde dochází k vytvoření spoje dvou a více různých materiálů, ale v rámci elektronické montáže je tento problém spojován především v rámci montáže první úrovně (na úrovni čipů) s technologií Flip-Chip a v rámci montáže druhé úrovně s pájením BGA (**B**all **G**rid **A**rray) a CSP (**C**hip **S**cale **P**ackage) součástek na DPS.

Ačkoliv se jedná o montáže různé úrovně, topologie a princip montáže jsou v podstatě stejné. Na základnu pouzdra, nebo DPS připojujeme čip, nebo součástku v BGA pouzdru pomocí kuličkových vývodů na spodní straně (horní převrácené). Tato vcelku podobná topografie je pozorovatelná na obrázku 3.1



Obrázek 3.1: Srovnání připojení Flip-chipu na základnu pouzdra a připojení BGA komponenty na DPS.

3.2 Co je to Underfill?

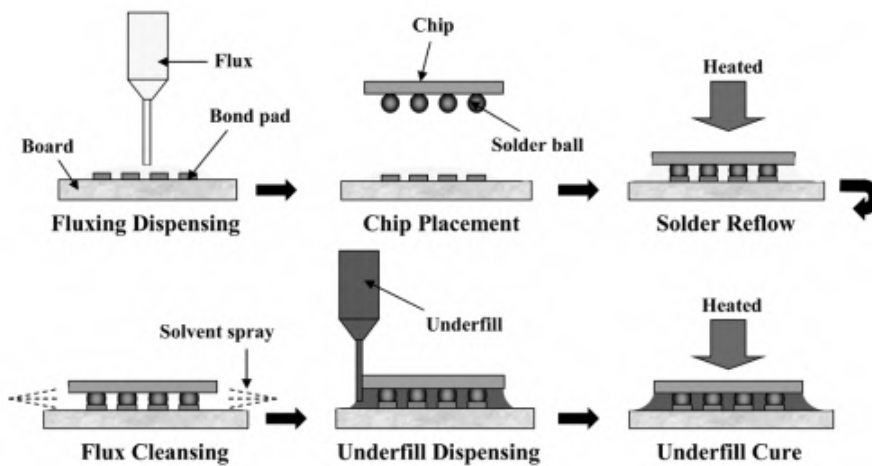
Jak u připojení čipu technikou flip-chip na základnu pouzdra, tak i u připojení komponenty v BGA pouzdrě na DPS můžeme pozorovat na obrázku 3.1, že připojujeme komponenty pomocí jejich vývodů na spodní straně k nějaké základně, kdy tento spoj následně zapájíme. Tento způsob propojení součástek se základnou je vhodný zejména kvůli krátké délce propojů a snížení nároků na potřebný prostor k připojení součástky. Zároveň zde ale dochází k problémům, které jsou způsobené rozdílnými koeficienty teplotní roztažnosti použitých materiálů.

Rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti měly zásadní vliv na životnost pájených spojů během jejich teplotně-mechanickém namáhání. Ačkoliv se může jevit, že rozdíl mezi koeficienty teplotní roztažnosti křemíkového čipu ($\sim 2,5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) a základnou z keramiky ($\sim 4-10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) je relativně malý, tak i tento rozdíl je zodpovědný za vznik mechanického napětí na pájeném spoji a za jeho mechanické namáhání.[4]

Mechanické namáhání pájeného spoje se naplno projevilo se zvětšením křemíkových čipů, zmenšením pájených spojů a nahrazením keramické základny základnou z FR4, jejíž koeficient teplotní roztažnosti je v rozmezí $\sim 5-50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Kvůli tomuto relativně velkému rozdílu mezi koeficienty teplotní roztažnosti křemíkového čipu a FR4 byl pájený spoj během teplotních

cyklů velmi mechanicky namáhán. Z toho důvodu se začalo hledat řešení, jenž by u technologie flip-chip umožnilo použití levné základny z FR4 bez zásadního vlivu na spolehlivost namísto dražší keramické základny.[4],[15]

Řešení bylo nalezeno v podobě technologie „Underfill“, což by se do češtiny dalo přeložit jako podlepení. Princip této technologie spočívá v nanesení tekutého materiálu, většinou na bázi epoxidové pryskyřice, mezi čip a základnu pouzdra, které již byly připájeny k sobě. Materiál underfillu zateče pod komponentu mezi pájené spoje, čímž dojde k „zapouzdření“ pájených spojů mezi čipem a základnou pouzdra. Po vytvrzení vykazuje materiál underfillu následující vlastnosti: má relativně nízký koeficient teplotní roztažnosti podobný s koeficientem teplotní roztažnosti pájeného spoje, dále se vyznačuje nízkou absorpcí vlhkosti a dobrou přilnavostí jak vůči čipu, tak i vůči základně. [4]



Obrázek 3.2: Proces připojení flip-chipu na základnu pouzdra včetně aplikace underfillu.[4]

U podlepeného čipu následně dochází k přerozdělení tepelně-mechanického namáhání pájeného spoje během teplotních cyklů mezi underfill, základnu, čip a všechny pájené spoje namísto soustředění se pouze na krajní pájené spoje pod čipem. Bylo prokázáno, že podlepením součástek dojde ke snížení mechanického namáhání pájených spojů na úroveň 10 - 25 % namáhání pájených spojů nepodlepených součástek.[4]

Správně aplikovaný underfill, kromě snížení mechanického namáhání pájených spojů, poskytuje pájeným spojům také ochranu před působením vnějších vlivů, například vzdušné vlhkosti. Životnost mechanicky namáhaných pájených spojů může být díky aplikaci underfillu prodloužena 10-100x. Z těchto důvodů se underfill prosadil jako praktické řešení problémů spojených s nízkou životností pájených spojů u technologie flip-chip připojených na základnu z FR4. Toto přispělo ke snížení ceny flip-chipů díky nahrazení drahé keramické základny levnou základnou z FR4.[4]

■ 3.2.1 Přečhod underfillu z montáže 1. úrovně na montáž 2. úrovně

Dnešní trend elektroniky ve výrobě menších, spolehlivějších komponentů, jenž mají zároveň více funkcí a vydrží je plnit i při drsných podmínkách, udávají dva zcela odlišné sektory. První z nich, sektor spotřební elektroniky, vyžaduje menší komponenty o vyšší úrovni integrace pro mobilní, přenosné aplikace, díky čemuž je možno vyrábět chytré telefony s více funkcemi, tablety a různé další mobilní systémy. Druhý sektor, jenž udává tyto trendy je vojenský a letecký sektor, jenž kromě malých rozměrů komponent o vyšší integraci vyžaduje kvůli jejich aplikaci v letectví, bezosádkových vozidlech a letadlech ale i kosmonautice, vysokou spolehlivost komponent i během extrémního působení vnějších vlivů na tyto komponenty např. v podobě vysokých výkyvů teplot u satelitů na oběžné dráze.[16]

Obecně se dá tvrdit, že s rozšířením ruční elektroniky se začal rozšiřovat underfill na montáž druhé úrovně u připojení součástek IO v BGA a CSP pouzdech na DPS. Underfill je zde využíván nejen kvůli navýšení spolehlivosti během teplotních cyklů, ale i z důvodu zvýšení mechanické pevnosti a ochrany před vnějšími klimatickými vlivy. U CSP se underfill používá k zvýšení mechanické pevnosti pájených spojů tak, aby spoje vydržely mechanický šok nebo náraz způsobený například pádem telefonu na zem. CSP jsou pouzdra čipů, jejichž velikost je maximálně 1,2x větší než velikost samotného čipu. Tyto čipy většinou splní podmínky pro teplotní namáhání, ale již neprojdou testy mechanického namáhání. Mechanické namáhání čipů může způsobit prasknutí čipu, ať už na rozhraní pájeného spoje, nebo přímo v rámci připojení čipu na základnu čipu. [15]

Typické řešení pro redukci velikosti IO přichází v podobě použití BGA a CSP součástek. Využití těchto komponent ale přináší výzvy, jak v oblasti montáže a designu, ať už v podobně velmi krátkých pájených spojů, malých roztečí mezi vývody, tak požadavky na vysokou spolehlivost během teplotního namáhání. Se zmenšujícími se roztečemi mezi vývody se zmenšují i pájené spoje, čímž se snižuje i výška mezi DPS a pouzdem, což vede ke snížení spolehlivosti.[16]

■ 3.3 Underfill

Underfill je polymer nebo kapalina, která je aplikovaná na zapájenou DPS po jejím průjezdu přetavovací pecí. Jak již bylo zmíněno výše, underfill zapouzdří pájené spoje a prostor mezi DPS, či základnou a spodní stranou komponenty, případně čipu. Jak již bylo poznamenáno v kapitole 1.2, zapouzdření v elektronice je obecně chápáno jako opatření zařízení nějakým krytem, jenž má chránit součástku a její propojení, která jsou obecně největší slabinou. V technologii underfillování, je slovo zapouzdření chápáno tak, že dojde k vytvoření krytu a k propojení součástky se základnou, čímž je opět chráněna největší slabina v podobě pájeného spoje.[16]

Teorie

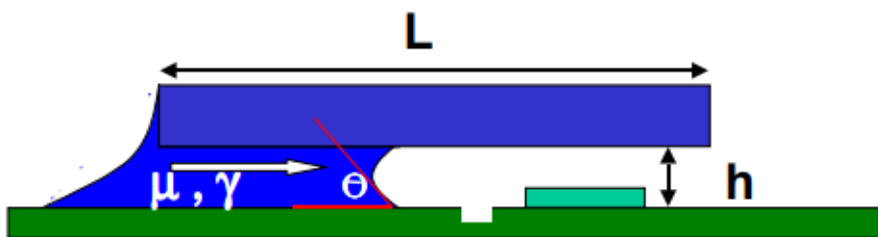
Underfill je materiál, jehož složení je většinou na bázi epoxidové pryskyřice plněné částicemi SiO_2 . Tyto částice oxidu křemičitého mají zlepšit vlastnosti samotného underfillu. Přispívají ke snížení koeficientu teplotní roztažnosti, zlepšení modulu elasticity a celkovému vyztužení výsledného produktu.[17]

Obsah částic SiO_2 má velký vliv na výsledné vlastnosti underfillu. Obecně existují dva typy underfillu, jeden jenž umožňuje opravy a druhý, který opravy neumožňuje. Underfill, jenž umožňuje opravy, neobsahuje žádné nebo jen velmi malé množství částic SiO_2 . Možnost oprav je v tomto případě vykoupena horšími vlastnostmi underfillu například v podobě horšího modulu elasticity a vyššímu koeficientu teplotní roztažnosti.[17]

Z počátku se hledaly optimální způsoby, jak nanést underfill tak, aby zatekl pod celý komponent v daném časovém intervalu, který by výrazně nezpomaloval výrobní proces a nesnižoval tak výrobní kapacity.

Čas t , za který dojde pomocí kapilárních sil k zatečení underfillu pod celou komponentu, závisí na několika parametrech. Konkrétně na viskozitě underfillu μ [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$], délce, kterou musí underfill „protéct“ L [m], výšce mezery h [m], smáčecím úhlem Θ [-] a povrchovém napětí na rozhraní kapalné a plynné fáze γ [N/m]. Čas t [s], za který dojde zatečení underfillu pomocí kapilárních sil určíme dle následující rovnice: [18]

$$t = \frac{3 \cdot \mu \cdot L^2}{h \cdot \gamma \cdot \cos \Theta} \quad [s] \quad (3.1)$$



Obrázek 3.3: Ilustrace kapilárního toku underfillu pod komponentou.[18]

Během experimentů s nanášením underfillu, respektive s paterny, podle kterých byl underfill nanášen byl odvozen vzorec pro čas, za jaký dojde k zatečení pod komponentu je-li použit **I** pattern namísto **L** patternu.[18]

$$t_{I\text{-pattern}} = \sqrt{2} \cdot t_{L\text{-pattern}} \quad [s] \quad (3.2)$$

Dle daného vzorce je patrné, že použití **I** patternu vyžaduje více času pro úplné podlepení součástky než **L** patter. Existují i další patterny, jenž dokážou snížit čas nutný k zatečení underfillu pod součástku, ovšem složitější pattern může přinést horší stabilitu a více chyb během aplikace.

■ Nanášení underfillu

V rámci této práce se budu věnovat kapilárně nanášenému underfillu. Jedná se o kapaliny s nízkou viskozitou, které smáčením zatečou pod podlepovaný komponent a plně obklopí pájené spoje pod součástíku.

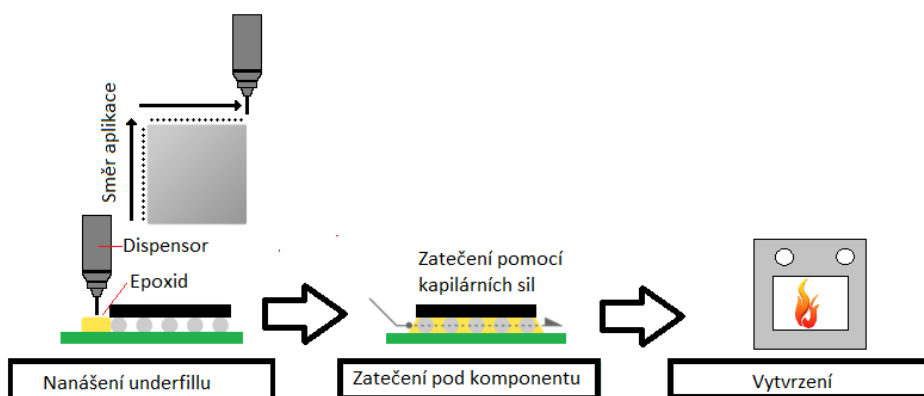
Výrobní proces, při kterém je aplikován underfill je běžně definován výrobcem underfillu tak, aby bylo dosaženo nejlepších vlastností. Celý proces se obecně skládá z několika po sobě jdoucích technologických kroků.

Jako první krok se doporučuje předehřev materiálu, resp. DPS, na kterou bude underfill aplikován na určitou teplotu. Tato teplota se pohybuje okolo 90 - 120 °C, ovšem může být různě modifikována dle testů a zkušeností tak, aby došlo k optimálnímu zatečení a podlepení komponenty. Tento předehřev se provádí proto, aby došlo k lepšímu zatečení underfillu pod samotnou komponentu.

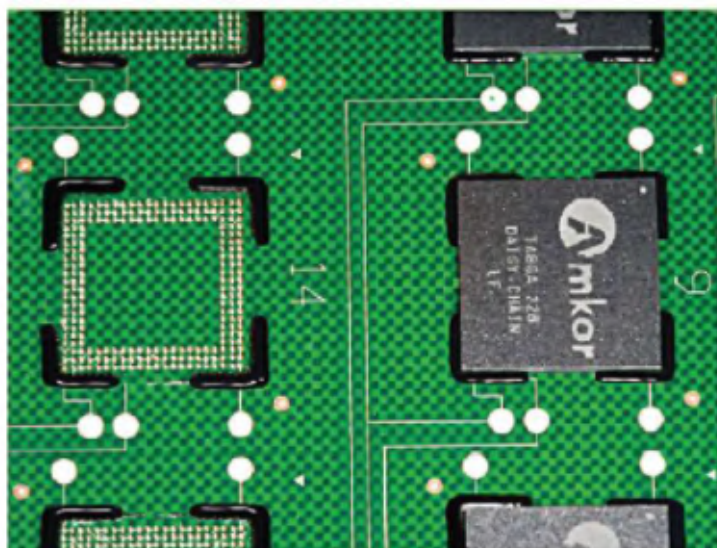
Po fázi předehřevu se aplikuje samotný underfill. Underfill se aplikuje blízko hrany podlepované součástky tak, aby pomocí kapilárních sil došlo k zatečení underfillu pod samotnou komponentu. Tento proces je velice náročný na přesnou a precizní aplikaci, proto je ve velkosériové výrobě nutné využít specializované stroje, na které jsou kromě přesnosti aplikace kladeny i vysoké požadavky na aplikaci přesného množství, respektive hmotnosti underfillu k hranám komponentů. Samotná aplikace underfillu neprobíhá kontinuálně, ale probíhá formou aplikace malých kapiček dle zvoleného patternu např. u L patternu podél dvou hran komponenty do tvaru L, případně se u větších komponent může nanést vrstva i podél třetí hrany. V praxi může být užito i nanesení pouze podél jedné hrany, což je označováno jako I pattern. [16]

Po aplikaci a kontrole underfillu je nutné jej vytvrdit. Toto vytvrzení probíhá průjezdem pecí při zvýšené teplotě, která se běžně pohybuje v rozmezí 125 °C až 165 °C a je opět určena výrobcem, stejně jako čas, po který má docházet k vytvrzení underfillu. [16]

Kromě celoplošné techniky podlepení součástky, která je ovšem relativně složitá, ale poskytuje největší zlepšení v rámci mechanické pevnosti, existuje i technika zvaná „Edge-bonding“. Tato technika jak již vyplývá z názvu spočívá v nanesení lepidla pouze podél rohů součástky, což je snadnější, než provést celoplošné podlepení, ovšem nepřinese to takové zlepšení z pohledu mechanických vlastností. [16]



Obrázek 3.4: Znázornění procesu aplikace underfillu pod BGA/CSP komponentu.



Obrázek 3.5: Příklad edge-bondingu.[16]

Tabulka 3.1: Srovnání vlastností underfillu a edge bondignu.[15]

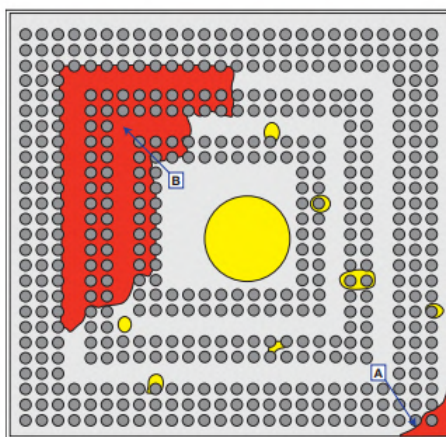
Zvýšení spolehlivosti	Underfill	Edge bonding
Teplotní cyklus	Ano	Ne, pouze lokální
Mechanický šok (pád)	Ano	Ano
Ohyb, kroucení	Ano	Ano
Vibrace	Ano	Ano
Ochrana proti tekutinám	Ano	Ne

Jak je patrné z tabulky 3.1, tak celoplošný underfill na rozdíl od edge bondingu navyšuje spolehlivost i v rámci teplotních cyklů a ochraně proti tekutinám, tedy kapalinám a plynům. V závislosti na tom, v jakých vlastnostech potřebujeme u výrobku navýšit spolehlivost, volíme mezi edge bondingem a underfillem.

Přestože jsme do teď mluvili jen o underfillu typu flow, existují i no-flow varianty, jež se nazývají například PLACE-N BOND. Princip této technologie je v principu podobný jako u flow underfillu, jen s rozdílem nanášení. U flow underfillu je vyžadováno relativně přesné zařízení, které dokáže provést přesné nanášení požadovaného množství underfillu k patřičným komponentám. K tomu je dále potřeba pec, která zajistí přehřev a pec, ve které dojde k vytvrzení. U technologie PLACE-N BOND je underfill v průběhu aplikace v pevném skupenství. Materiál je předem vyroben v požadované velikosti, dle komponent, jež mají být podlepeny. Materiál má takové tvary, aby jej bylo možné osadit pomocí Pick and Place osazovacích automatů v rámci běžné SMT linky během procesu osazování DPS. Osazení probíhá tak, že po nanášení pasty na pájecí plošky se materiál osadí tak, aby následně hrany komponenty, která má být podlepena, ležely na tomto materiálu. Následným přetavením v pájecí peci dojde k rozpuštění underfillu, jeho zatečení pod komponentu a vytvrzení společně s přetavením pájky a vznikem pájeného spoje. Výhody tohoto řešení spočívají především v ušetření prostoru, který by zabrala nová underfill linka a ušetření nákladů nutných na její pořízení.

3.3.1 Standardy hodnotící provedení underfillu

Správně aplikovaný celoplošný underfill by měl být celistvý a kompletní pod celou komponentou v podélném řezu. Dále by měl dosahovat zhruba 50% výšky komponenty podél jejích hran. Problematikou vizuální kontroly, kritérií a jejich vyhodnocení u underfillu se zabývá norma IPC J-STD-030A. Tato norma udává cíl pro správné podlepení, třídy přijatelnosti daného podlepení a dále třídy, kdy již underfill není přijatelný a kdy nevyhoví této normě.



Obrázek 3.6: Srovnání přijatelných a nepřijatelných voidů dle normy IPC-J-STD-030A

Žlutá - přijatelné voidy, Červená - nepřijatelný chybějící underfill

A. Underfill neobklopil všechny vnější pájené spoje.

B. Celková oblast voidů je větší než 10 % plochy komponentu.[15]

Kapitola 4

Praktická část

V rámci praktické části mé diplomové práce jsem se zabýval mechanickými vlastnostmi podlepených BGA součástek. Konkrétně jsem se zabýval mechanickými vlastnostmi pájených spojů u BGA na DPS a to z pohledu mechanické pevnosti daných spojů a tedy i spolehlivosti. V rámci této práce jsem zkoumal dvě konkrétní součástky, které byly z důvodu zvýšení jejich spolehlivosti a snahy zamezit prasklinám na úrovni pájených spojů podlepeny underfillem.

Experiment se skládal z několika částí, kdy nejprve bylo nutné připravit vzorky, následně byly některé vzorky umístěny v teplotní komoře a vystaveny teplotním šokům a poté následovalo odtrhnutí BGA čipů na měřícím systému síly (trhačka), díky čemuž bylo možno zkoumat mechanickou pevnost daných spojů a celkově průběh mechanického namáhání. Na závěr byly čipy podrobeny optické kontrole na konfokálním mikroskopu.

4.1 Příprava vzorků

V rámci podpory u studia mi byly nejmenovanou společností poskytnuty osazené DPS s vícevrstevným multičipovým modulem, na kterém se nacházely celkem 4 součástky z čehož byly tři typu BGA a jedna typu CSP, které byly podlepeny. Dvě větší podlepené komponenty byly vhodné pro zkoušky mechanických vlastností.

4.1.1 Underfill BGA součástek

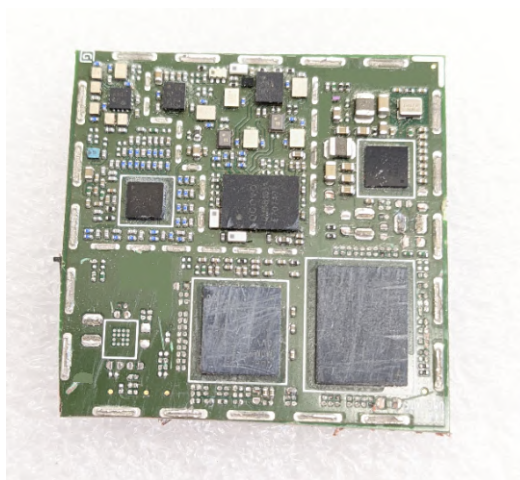
Proces podlepení součástek proběhl na automatické lince dle doporučení výrobce z datasheetu použitého materiálu pro underfill (lepidla). V první etapě výrobního procesu byla osazená DPS po pásovém dopravníku dopravena do konvekční pájecí pece (tuto etapu nazýváme předeheřev), jejíž účel je zajistit předeheřev DPS tak, aby během aplikace underfillu došlo k lepší roztékavosti použitého lepidla a lépe zateklo pomocí kapilárních sil pod celou komponentu. Rychlost dopravníku a teplota předeheřevu byly nastaveny tak, aby DPS byla vystavena teplotě 120 °C po dobu 5 minut.

Následně po přehřevu DPS vjela do underfillovacího zařízení, kde proběhlo nanesení underfillu podél hran patřičných komponent dle přednastaveného paternu. Nanášení lepidla není kontinuální, ale nanáší se vždy miniaturní kapičky podél příslušné hrany. Po nanesení lepidla následuje přejezd do zařízení automatické optické kontroly (AOI), kde je provedena optická kontrola nanesení lepidla.

Po AOI DPS s již podlepenými komponenty vjíždí do další konvekční přetavovací pece (nazvěme tuto operaci jako vytvrzení), kde opět byl nastaven teplotní profil pro optimální vytvrzení dle doporučení výrobce lepidla z datasheetu. Vytvrzení probíhá při teplotě 160 °C po dobu 7 minut. Po vytvrzení je proces aplikace underfillu u konce.

■ 4.1.2 Příprava MCM

Kvůli nutnosti upnutí vzorků do čelistí trhačky a také pro lepší manipulaci se vzorky bylo nutno redukovat rozměry vzorků. Z toho důvodu jsem vyřezal MCM z osazené DPS. Pro vyřezání byla použita pásová pila s diamantovým pilovým pásem.



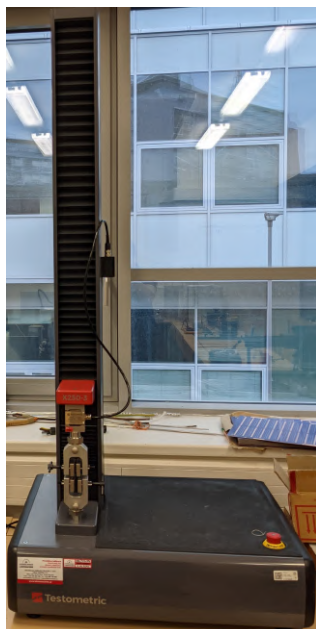
Obrázek 4.1: Vyřezaný multičipový modul z DPS.

■ 4.1.3 Teplotní šoky

Další krok v rámci přípravy spočíval ve vystavení vzorků teplotnímu namáhání v šokové klimatické komoře TSS 70-66. Vzorky byly rozděleny do tří skupin, které se postupně odebíraly po 1000, 2000 a 3000 teplotních cyklech (TC). Teplotní profil šokové komory byl nastaven následovně. Horní teplota byla nastavena na 100 °C po dobu 10 minut a spodní teplota byla nastavena na -40 °C po dobu 10 minut. Vzorky tedy byly vystaveny relativně krátkým teplotním cyklům ovšem s velkým rozdílem teplot.

■ 4.1.4 Zkouška mechanické pevnosti

Na samotnou zkoušku mechanické pevnosti bylo nutné vzorky připravit tak, aby je bylo možné uchytit do čelistí trhačky. Z toho důvodu bylo nutné vymyslet způsob uchycení a metodiku testování.



Obrázek 4.2: Použitá trhačka pro zkoušku mechanické pevnosti.

■ Metodika testování

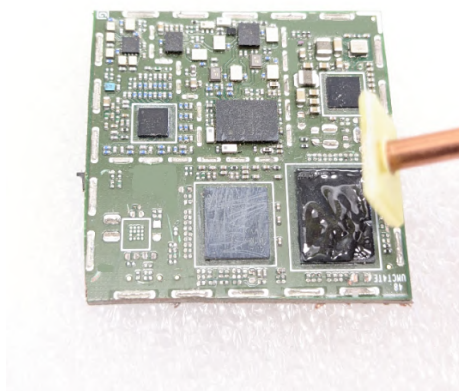
Po několika experimentech se způsoby uchycení, se jako nejvhodnější jevil způsob, kdy se na horní stranu odtrhávaného komponentů přilepila laminátová destička, jež ve svém středu měla otvor pro nýt, jehož hlavička byla zapuštěná v laminátové destičce. Za tento nýt se následně upnula horní čelist trhačky. Pro uchycení do spodní čelisti nakonec bylo využito dvou šroubů, jež se přitlačily na hrany MCM tak, že odtrhávaný čip byl zhruba uprostřed mezi těmito šrouby. Tento způsob umožnil přesné měření vyvíjené mechanické síly na komponent a umožnil tak následně provést vyhodnocení mechanických vlastností pájeného spoje underfillované součástky.

■ 4.1.5 Příprava testovacího vzorků

V rámci přípravy vzorků tak, aby je bylo možné uchytit do čelistí trhačky bylo nejprve nutné navrhnout laminátovou destičku s rozměry o 0,1 mm menší na každou stranu, než byly rozměry odtrhávaného komponentu. V rozích destičky byly vyvrtané díry o průměru 0,5 mm, do kterých částečně zateklo přebytečné lepidlo. Do vyvrtané díry uprostřed destičky o průměru 3 mm byl následně zapuštěn nýt. Celá tato sestava se jemně obrousila pilníkem, aby se zdrsnil povrch destičky a podpořila se adheze lepidla.

Zároveň bylo nutno připravit i samotné vzorky. Vyřezané MCM jsem v okolí zkoumaných komponent důkladně očistil pomocí papírové utěrky navlhčené isopropylalkoholem. Následně jsem horní stranu pouzder komponent jemně obrousil pilníkem, aby i zde došlo ke zdrsnění povrchu a byla podpořena adheze lepidla.

Po přípravě destiček i komponent bylo nutné na oba prvky nanést lepidlo. Použité lepidlo bylo na bázi epoxidové pryskyřice a bylo nutné jej vytvrdit v peci po dobu 5 minut při teplotě 200 °C, aby dosahovalo požadované únosnosti. Nanášení lepidla probíhalo pomocí vatové tyčinky v tenké vrstvě jak na povrch laminátové destičky, tak i na povrch požadované komponenty. Následně jsem k sobě obě části přiložil a přitlačil k sobě. Přebytké lepidlo se vytlačilo do vyvrtaných děr po krajích destičky. Případně jsem jej očistil suchou vatovou tyčinkou. Po slepení obou částí jsem vzorky vložil do pece, kde došlo k vytvrzení lepidla.



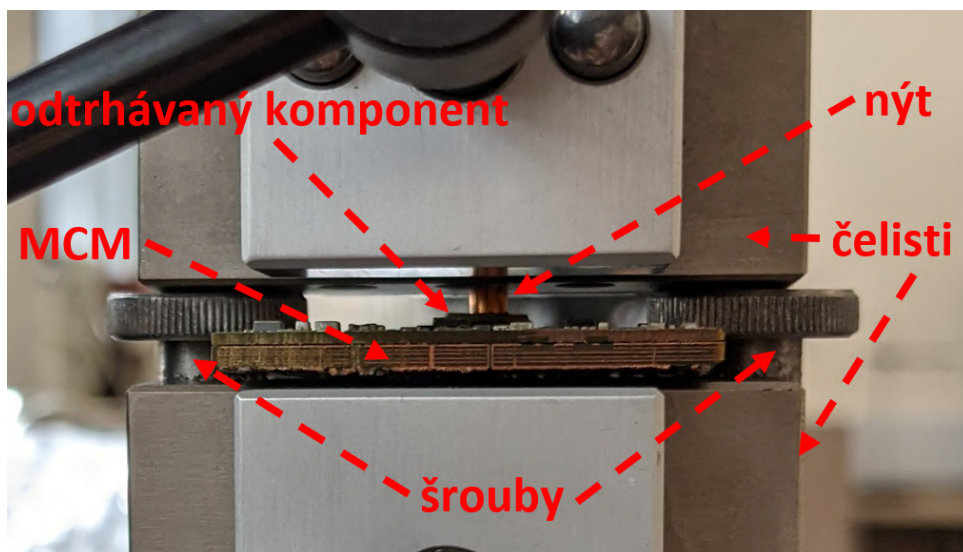
Obrázek 4.3: Lepení destičky na komponent.



Obrázek 4.4: Připravený vzorek na mechanickou zkoušku.

4.1.6 Odtrhávání

Po vytvrzení lepidla a vychladnutí vzorků jsem přistoupil k samotné mechanické zkoušce. Vzorek byl upevněn za nýt do horní čelisti trhačky a přichycen po krajích dvěma šrouby, které byly uchyceny do spodní čelisti trhačky. Následně byla spuštěna předdefinovaná zkouška, u které se měřily mechanické vlastnosti daného spoje. Konkrétně se měřil průběh mechanické síly vyvolané trhačkou na daný spoj v závislosti na čase.



Obrázek 4.5: Zobrazení uchycení testovaného vzorku v čelistech trhačky.

4.1.7 Optická kontrola

Po odtrhnutí komponenty od základny (DPS) MCM byly komponenty podrobeny zkoumání pod konfokálním mikroskopem. Kvůli nutnosti představit si celý obrázek pájeného spoje underfillované součástky byly zkoumány, vždy k sobě patřící části základny a odtržené komponenty. Pomocí snímání vzorků na konfokálním mikroskopu byly následně vytvořeny 3D snímky.

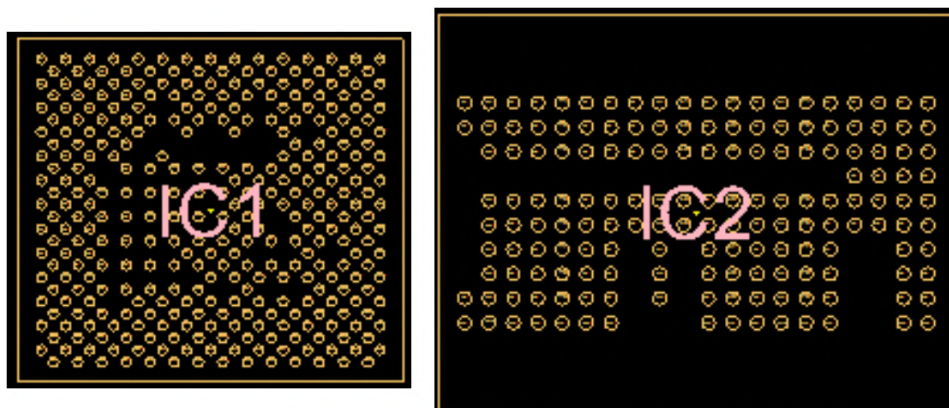
Některé takto vytvořené snímky byly následně podrobeny další analýze, kdy pomocí SW byly k sobě přiloženy snímky odtržené komponenty a k ní patřící snímek základny. Zde bylo nutné ručně přiložit části k sobě. Přesnost přiložení měla zásadní vliv na výslednou přesnost analýzy. Přesnost ovlivňoval jak sklon v ose z, tak i sklon a posuv v osách x a y a bylo tedy nutné přiložit snímky k sobě co nejpřesněji. Následně bylo možné snímat pohybem kurzoru po obrazci výšky jednotlivých 3D snímku v daném řezu ve výsledném spojení. Součet výšek obou snímků, by měl u podlepených součástek být konstantní. Díky tomuto faktu bylo možné kontrolovat, zda během aplikace underfillu došlo ke správnému zatečení lepidla pod komponentu.

4.2 Naměřené hodnoty

Pro budoucí srovnání naměřených hodnot a srovnání získaných výsledků je nutné nejprve si představit zkoumané komponenty. Jak již bylo zmíněno dříve, byly zkoumány dva komponenty. První komponent byl zapouzdřen v CSP pouzdře a budeme ho značit IC1. Druhý komponent byl zapouzdřen v BGA pouzdře a budeme ho značit IC2.

Tabulka 4.1: Popis zkoumaných komponent.

Název	Typ	Počet kuliček [ks]	Průměr kuliček [mm]	Rozměry [mm x mm]
IC 1	CSP	328	0,35	7,9x7
IC 2	BGA	162	0,5	10,6x8



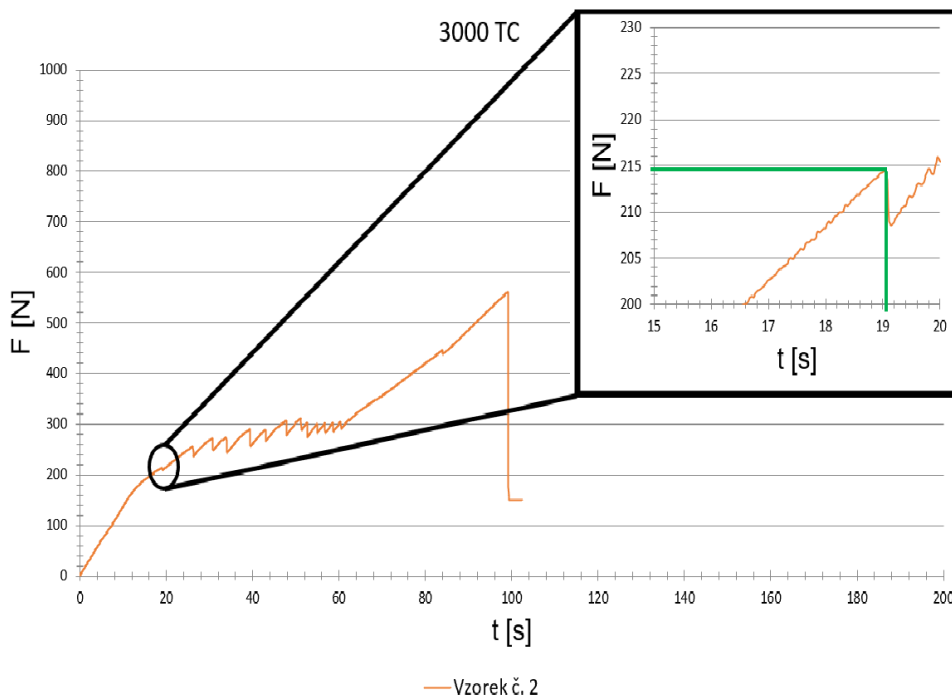
Obrázek 4.6: Layout rozložení vývodů jednotlivých komponent.

Dále byla vypočtena plocha S základny pouzdra obou komponentů ze známých rozměrů z tabulky 4.1. Pomocí známého průměru kuličkových vývodů byla dopočítána celková plocha, kterou zabírají kuličky pod pouzdrům S_k . Následně byl určen podíl plochy vývodů vůči ploše základny pouzdra.

Tabulka 4.2: Poměr plochy vývodů čipu vůči ploše pouzdra.

	IC1	IC2
S [mm ²]	55,3	84,8
S_k [mm ²]	31,6	31,8
poměr[%]	57,1%	37,5%

V rámci měření mechanických vlastností podlepených komponent byly sledovány čtyři parametry. Nejvyšší síla působící na komponent, která byla nutná na jeho kompletní odtrhnutí, dále síla první deformace a k ní příslušná doba 1. deformace a nakonec čas odtrhnutí. Ve většině případů čas odtrhnutí odpovídal bodu, kdy docházelo k maximální síle, avšak u některých vzorků došlo k dílčímu prasknutí spoje a po dalším působení síly k celkovému odtrhnutí.



Obrázek 4.7: Graf znázorňující způsob určení síly a času první deformace.

Pro přesné určení síly a času první deformace bylo nutné detailně analyzovat průběh od jeho počátku, kde byla hledána oblast první skokové změny. Na vzorovém příkladu na obrázku 4.7 je zobrazen detail na oblast první deformace pro IC2 vzorek č. 2 při 3000 teplotních cyklech.

Na daném obrázku 4.7 je patrná oblast pilového průběhu v časovém rozmezí 20 s až 65 s, ve které dochází k četným deformacím. Tyto deformace se na průběhu projevují jako zuby. Z těchto důvodů byla provedena analýza jednotlivých průběhů, kdy bylo hledáno místo výskytu prvního zubu, pomocí kterého byla následně určena síla a čas první deformace.

■ 4.2.1 0 teplotních cyklů bez underfillu

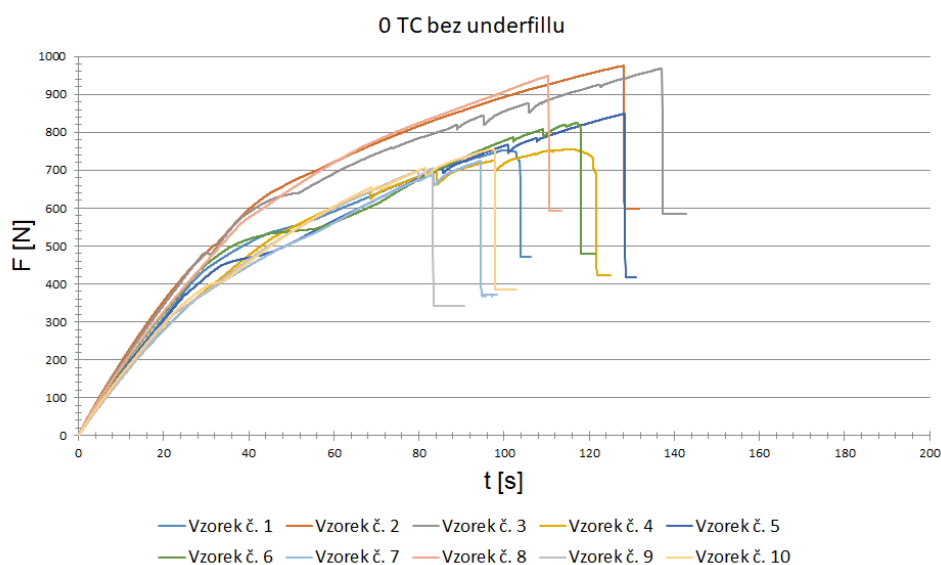
Pro budoucí možnosti srovnání výsledků bylo nejprve nutné určit referenční vzorky, za které jsou v tomto případě považovány vzorky bez aplikovaného underfillu a bez prodělání teplotních cyklů.

■ IC1

Pozorováním průběhu síly F na čase t pro nepodlepený komponent IC1 v grafu 4.8 vidíme, že samotné průběhy jsou si navzájem pro jednotlivé vzorky podobné, ovšem liší se v době kdy dojde ke kompletnímu odtrhnutí komponenty.

Tabulka 4.3: Tabulka naměřených hodnot pro IC1 při 0 TC, bez underfillu.

Vzorek	Nejvyšší síla [N]	Síla 1. deformace [N]	Čas odtrhnutí [s]	Doba 1. deformace [s]
1	751,73	658,29	103	74
2	975,36	503,37	128	32
3	968,67	483,50	137	30
4	754,27	641,86	121	67
5	849,27	706,88	128	85
6	825,41	784,99	117	102
7	724,25	619,53	94	69
8	948,60	570,73	110	39
9	705,37	698,08	83	79
10	754,55	654,41	97	68
Průměr	825,75	632,16	111,80	64,50
Směrodatná odchylka	104,83	92,60	17,38	23,72

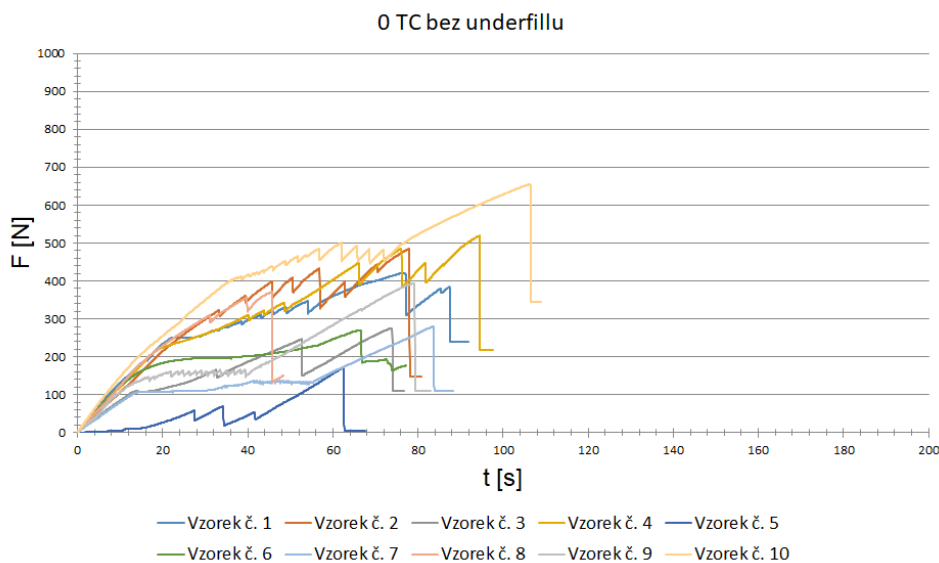
**Obrázek 4.8:** Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC1 při 0 TC, bez underfillu.

■ IC2

Pro vzorky komponenty IC2 můžeme průběhy síly F na čase t pozorovat v grafu 4.9. Na rozdíl od IC1 zde dochází k většímu rozptylu jednotlivých průběhů. Zároveň jsou zde patrnější „zuby“ na jednotlivých průbězích. Tyto zuby jsou oblasti, kdy docházelo k postupnému praskání zkoumaného spoje doprovázené slyšitelným prasknutím.

Tabulka 4.4: Tabulka naměřených hodnot pro IC2 při 0 TC, bez underfillu.

Vzorek	Nejvyšší síla [N]	Síla 1. deformace [N]	Čas odtrhnutí [s]	Doba 1. deformace [s]
1	420,67	192,29	87	16
2	484,39	323,78	78	33
3	274,99	108,71	74	13
4	518,80	285,06	94	35
5	170,68	57,89	62	27
6	270,33	270,33	66	66
7	279,64	123,94	73	35
8	370,96	308,76	45	30
9	393,33	124,16	79	12
10	654,32	403,45	106	36
Průměr	383,81	219,84	76,40	30,30
Směrodatná odchylka	143,03	113,98	17,08	15,66

**Obrázek 4.9:** Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC2 při 0 TC, bez underfillu.

4.2.2 0 teplotních cyklů s underfillem

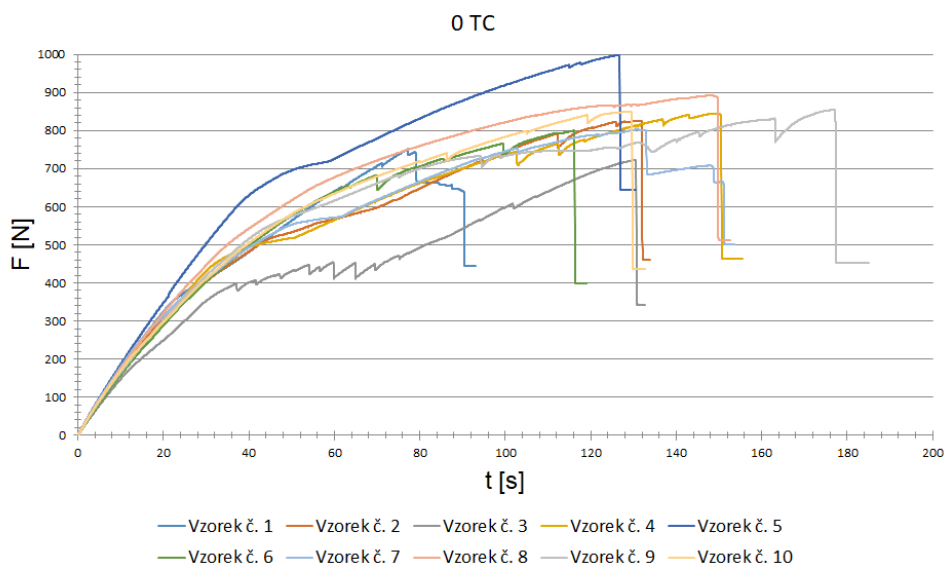
Další proměřené vzorky byly opět při 0 teplotních cyklech, ale s aplikovaným underfillem. Tyto vzorky následně poslouží pro dílčí srovnání mezi podlepenými a nepodlepenými komponenty.

■ IC1

U podlepených vzorků IC1 můžeme pozorovat v grafu 4.10 mírné zlepšení mechanických vlastností oproti nepodlepeným vzorkům IC1.

Tabulka 4.5: Tabulka naměřených hodnot pro IC1 při 0 TC s underfillem.

Vzorek	Nejvyšší síla [N]	Síla 1. deformace [N]	Čas odtrhnutí [s]	Doba 1. deformace [s]
1	750,85	651,64	90	61
2	825,55	525,43	132	47
3	723,01	397,43	130	37
4	845,05	371,29	150	98
5	996,86	971,67	126	114
6	799,88	653,52	116	63
7	803,14	727,82	151	94
8	891,84	839,74	149	107
9	855,24	682,41	177	75
10	849,97	616,94	129	56
Průměr	834,14	643,79	135,00	75,20
Směrodatná odchylka	76,10	183,87	23,52	26,59



Obrázek 4.10: Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC2 při 0 TC s underfillem.

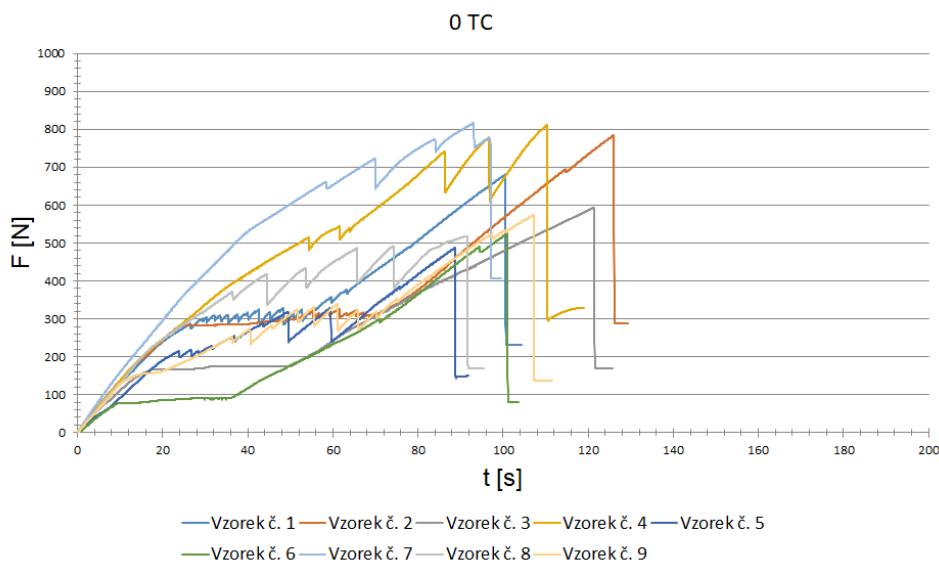
■ IC2

U podlepených vzorků IC2 je z grafu 4.11 patrné zlepšení mechanických vlastností oproti nepodlepeným vzorkům. Ovšem i tyto podlepené vzorky se vyznačují velkým rozptylem svých vlastností.

V rámci tohoto měření byl následně vyřazen jeden vzorek, který svým průběhem a hodnotami odpovídal nepodlepeným komponentám. Následně bližším zkoumáním jsem zjistil, že daný komponent nebyl podlepen a proto jsem ho z tohoto měření vyřadil.

Tabulka 4.6: Tabulka naměřených hodnot pro IC1 při 0 TC s underfillem.

Vzorek	Nejvyšší síla [N]	Síla 1. deformace [N]	Čas odtrhnutí [s]	Doba 1. deformace [s]
1	681,10	286,11	100	26
2	784,60	283,38	126	25
3	594,11	165,54	121	17
4	811,63	232,32	110	18
5	486,72	215,26	88	24
6	525,65	67,71	101	8
7	816,74	301,69	97	20
8	518,60	262,04	91	21
9	574,10	250,28	107	36
Průměr	643,69	229,37	104,56	21,67
Směrodatná odchylka	132,72	73,56	12,82	7,63



Obrázek 4.11: Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC2 při 0 TC s underfillem.

4.2.3 1000 teplotních cyklů s underfillem

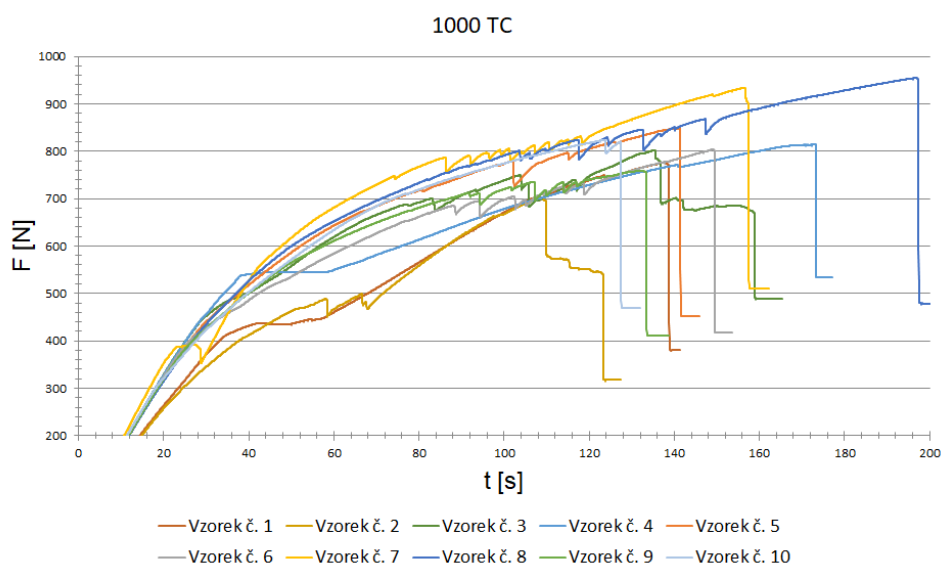
Další vzorky, na kterých bylo provedeno měření byly vystaveny teplotním šokům. Po absolvování 1000 teplotních cyklů byly tyto vzorky proměřeny.

IC1

U podlepené komponenty IC1 po absolvování 1000 teplotních cyklů byly naměřeny následující průběhy vyobrazené v grafu 4.12. V rámci jednotlivých průběhů zde dochází k vytvoření oblasti, ve které nastávají četné deformace a praskání. Tato oblast se vyskytuje v časovém rozmezí 80-120 s a je zde patrný pilovitý průběh u jednotlivých měření.

Tabulka 4.7: Tabulka naměřených hodnot pro IC1 při 1000 TC s underfillem.

Vzorek	Nejvyšší síla [N]	Síla 1. deformace [N]	Čas odtrhnutí [s]	Doba 1. deformace [s]
1	775,42	436,29	138	42
2	701,24	487,75	123	58
3	802,66	688,15	158	77
4	813,88	544,20	173	38
5	848,71	720,41	141	80
6	804,60	684,25	149	88
7	934,33	390,42	157	26
8	954,94	740,33	197	81
9	759,08	710,79	133	91
10	823,46	711,18	127	76
Průměr	821,83	611,38	149,60	65,70
Směrodatná odchylka	76,35	132,85	22,66	23,03



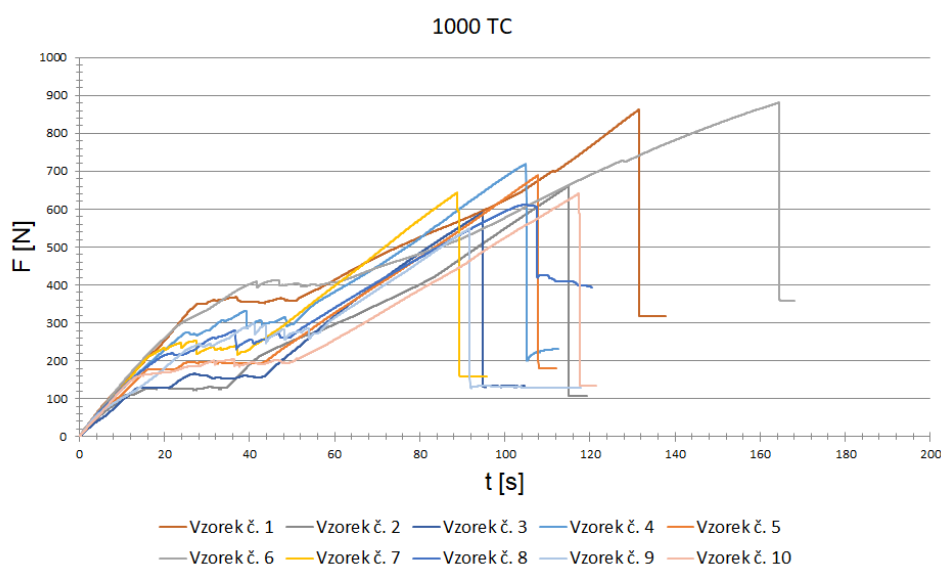
Obrázek 4.12: Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC1 při 1000 TC s underfillem.

IC2

U komponenty IC2 po absolvování 1000 teplotních cyklů v klimatické komoře dochází ke sjednocení průběhů měření jednotlivých vzorků. Zároveň na grafu 4.13 opět můžeme pozorovat v časovém úseku 10-50 s oblast, ve které dochází k četným deformacím. Počátek této oblasti je ohraničen kolenem v naměřeném průběhu.

Tabulka 4.8: Tabulka naměřených hodnot pro IC2 při 1000 TC s underfillem.

Vzorek	Nejvyšší síla [N]	Síla 1. deformace [N]	Čas odtrhnutí [s]	Doba 1. deformace [s]
1	862,34	347,94	131	28
2	660,74	108,84	114	10
3	590,16	127,34	94	13
4	719,06	275,64	105	25
5	689,65	176,38	107	15
6	880,59	408,56	164	41
7	643,00	234,07	89	20
8	611,42	219,47	107	22
9	548,96	243,88	91	28
10	640,95	199,74	117	31
Průměr	684,69	234,19	111,90	23,30
Směrodatná odchylka	109,59	92,51	22,33	9,33



Obrázek 4.13: Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC2 při 1000 TC s underfillem.

4.2.4 2000 teplotních cyklů s underfillem

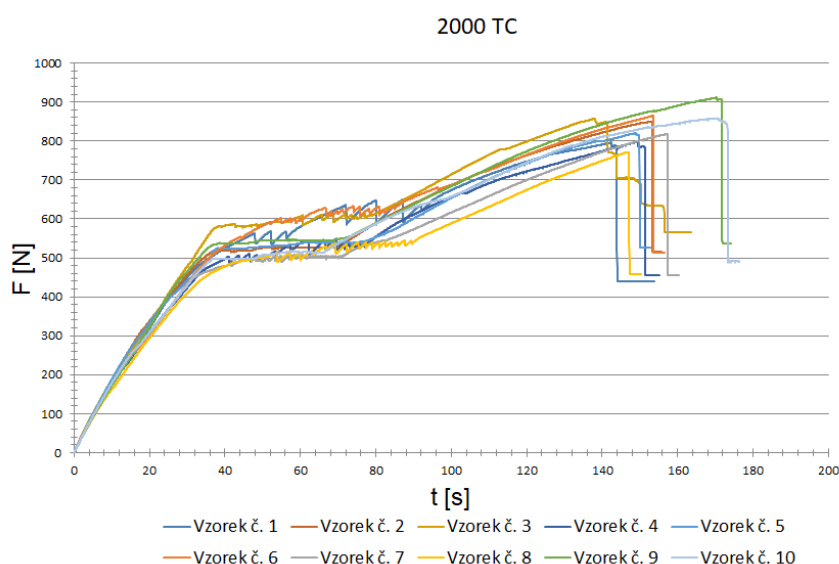
Po dalších 1000 teplotních cyklech byly z klimatické komory odebrány další vzorky, které tedy absolvovaly celkem 2000 teplotních cyklů.

IC1

U podlepených komponent IC1, které byly vystaveny 2000 teplotním cyklům je na grafu 4.14 pozorovatelná oblast, v níž dochází k čteným deformacím. Tato oblast se rozprostírá v čase 30-80 s a její počátek je ohraničen kolenem v rámci jednotlivých průběhů.

Tabulka 4.9: Tabulka naměřených hodnot pro IC1 při 2000 TC s underfillem.

Vzorek	Nejvyšší síla [N]	Síla 1. deformace [N]	Čas odtrhnutí [s]	Doba 1. deformace [s]
1	795,65	563,14	143	47
2	850,39	519,35	153	37
3	857,87	582,05	156	38
4	798,68	503,91	151	41
5	819,55	491,16	149	38
6	864,89	554,06	153	44
7	817,37	470,78	157	41
8	771,37	513,34	147	53
9	911,60	538,78	171	38
10	857,63	498,25	173	36
Průměr	834,50	523,48	155,30	41,30
Směrodatná odchylka	41,49	35,17	9,73	5,33



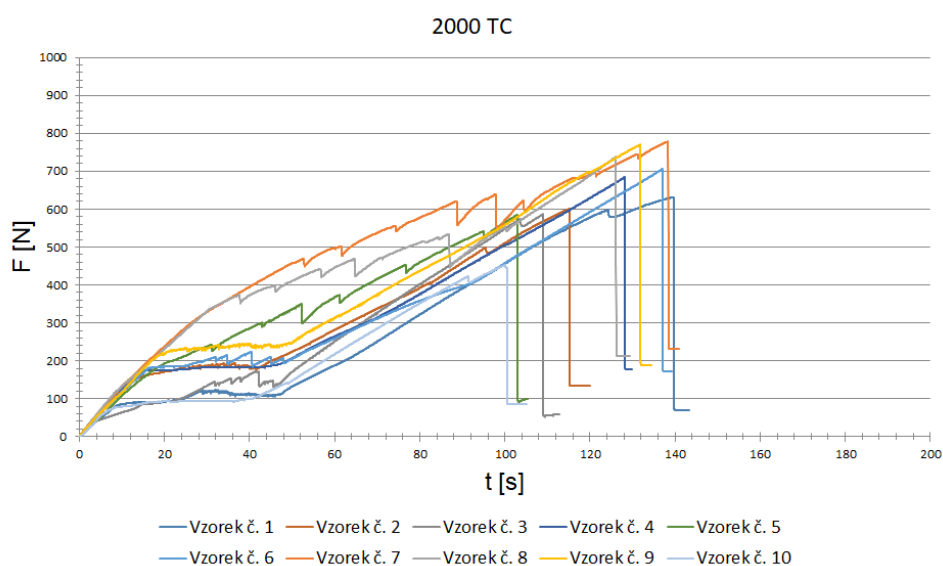
Obrázek 4.14: Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC1 při 2000 TC s underfillem.

IC2

U podlepené komponenty IC2 po 2000 teplotních cyklech dochází k poklesu mechanické pevnosti a zároveň i zde je patrná oblast, ve které dochází k četným deformacím ohraničené kolenem v rámci průběhu, což je pozorovatelné v grafu 4.15. Zároveň zde dochází k větším deformacím, které způsobují zuby v naměřených průbězích.

Tabulka 4.10: Tabulka naměřených hodnot pro IC2 při 2000 TC s underfillem.

Vzorek	Nejvyšší síla [N]	Síla 1. deformace [N]	Čas odtrhnutí [s]	Doba 1. deformace [s]
1	631,79	70,33	139	7
2	600,52	161,41	115	15
3	586,80	86,89	109	15
4	683,92	173,78	128	15
5	585,42	241,61	103	31
6	705,22	181,76	137	16
7	778,82	469,54	138	52
8	737,56	374,20	126	37
9	769,80	214,15	131	18
10	452,03	80,13	100	11
Průměr	653,19	205,38	122,60	21,70
Směrodatná odchylka	101,57	129,58	14,77	13,94



Obrázek 4.15: Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC2 při 2000 TC s underfillem.

4.2.5 3000 teplotních cyklů s underfillem

Na posledních vzorcích bylo provedeno měření po prodělání 3000 teplotních cyklů v klimatické komoře.

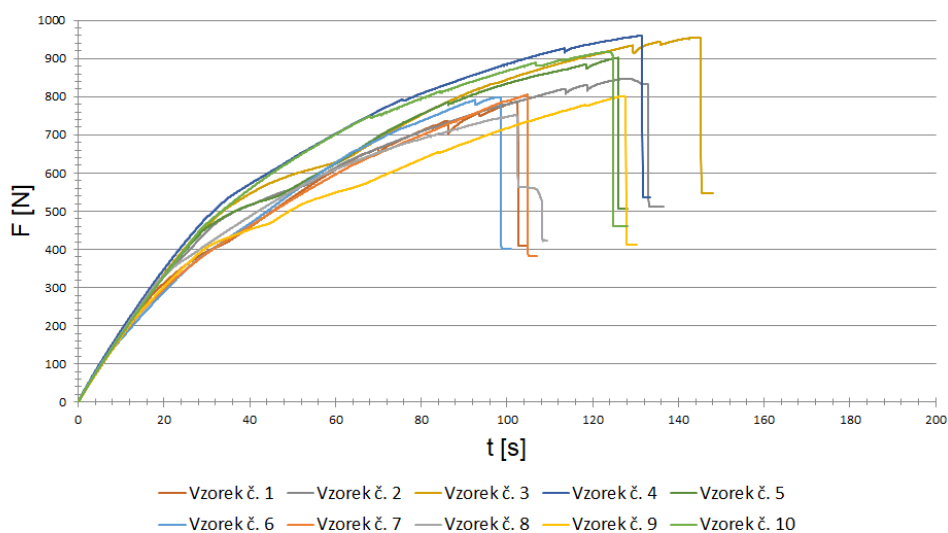
IC1

U podlepené komponenty IC1 je po vystavení 3000 teplotních cyklů pozorovatelný nárůst mechanické pevnosti, respektive síly nutné k odtrhnutí komponenty a sjednocení průběhů viz. graf 4.16. Oproti IC2 při 2000 teplotních cyklech zde již není patrná žádná oblast s četným výskytem deformací ani koleno v rámci daných průběhů.

Tabulka 4.11: Tabulka naměřených hodnot pro IC1 při 3000 TC s underfillem.

Vzorek	Nejvyšší síla [N]	Síla 1. deformace [N]	Čas odtrhnutí [s]	Doba 1. deformace [s]
1	786,61	650,13	102	67
2	847,44	719,31	133	82
3	955,42	821,23	104	93
4	960,67	793,46	131	75
5	901,83	785,84	125	86
6	798,01	658,87	98	64
7	805,15	624,12	145	64
8	752,13	684,63	108	78
9	801,43	653,41	127	84
10	917,78	749,16	124	68
Průměr	852,65	714,02	119,70	76,10
Směrodatná odchylka	75,46	69,90	15,68	10,15

3000 TC



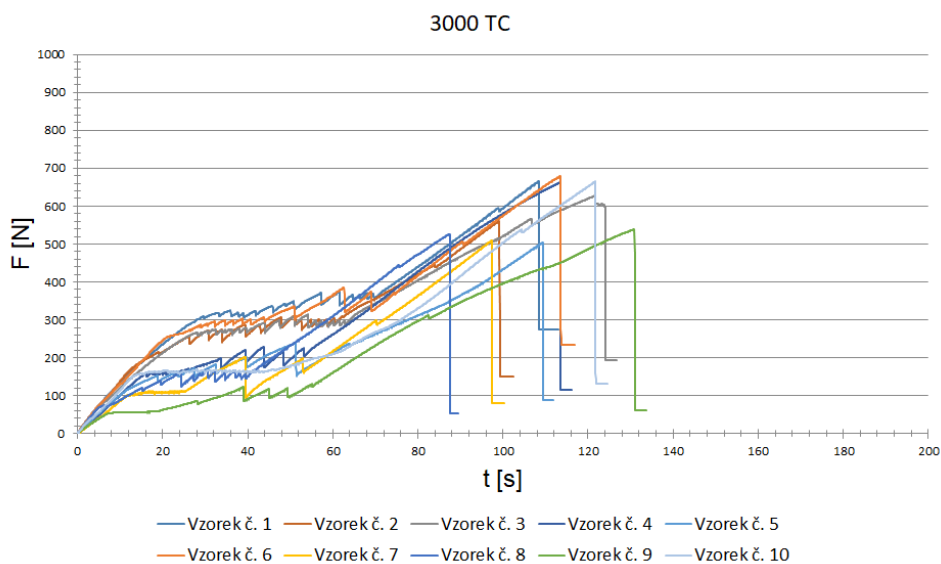
Obrázek 4.16: Závislost síly F na čase t odtrhávání komponenty IC1 při 3000 TC s underfillem.

IC2

U IC2 po 3000 teplotních cyklech je patrný pokles síly nutné k odtržení dané komponenty. Zároveň je i zde pozorovatelná oblast s četným výskytem deformací ohrazené kolenem v rámci daných průběhů.

Tabulka 4.12: Tabulka naměřených hodnot pro IC2 při 3000 TC s underfillem.

Vzorek	Nejvyšší síla [N]	Síla 1. deformace [N]	Čas odtrhnutí [s]	Doba 1. deformace [s]
1	665,65	287,90	108	26
2	560,37	213,54	99	19
3	626,78	267,67	124	28
4	663,01	158,00	113	16
5	504,11	153,33	109	18
6	680,23	286,19	113	28
7	509,77	102,56	97	12
8	526,59	73,91	87	7
9	539,11	86,13	130	28
10	664,52	159,83	121	13
Průměr	594,01	178,91	110,10	19,50
Směrodatná odchylka	72,45	81,23	13,16	7,66



Obrázek 4.17: Závislost síly F na čase t odtrhávané komponenty IC2 při 3000 TC s underfillem.

4.2.6 Vypočtené hodnoty

Z naměřených hodnot bylo určeno maximum a minimum sledovaných parametrů a doplněno o vypočtený průměr a směrodatnou odchylku. Tyto hodnoty můžeme pozorovat v následujících tabulkách 4.13 a 4.14. Pro každý zkoumaný komponent byla vytvořena jedna tabulka pro všechny sady vzorků, tak aby bylo možné pozorovat příslušné rozdíly mezi jednotlivými sadami.

Tabulka 4.13: Tabulka vypočtených průměrů a směrodatných odchylek maximální síly nutné pro odtrhnutí, síly první deformace, času odtrhnutí a doby první deformace pro IC1.

	Nejvyšší síla [N]	Síla 1. deformace [N]	Čas odtrhnutí [s]	Doba do 1. deformace [s]
0 TC bez underfillu				
Max	975,36	784,99	137,0	102,0
Min	705,37	483,50	83,0	30,0
Průměr	825,75	632,16	111,8	64,5
Odchylka	104,83	92,60	17,4	23,7
0 TC s underfillem				
Max	996,86	971,67	177,0	114,0
Min	723,01	371,29	90,0	37,0
Průměr	834,14	643,79	135,0	75,2
Odchylka	76,10	183,87	23,5	26,6
1000 TC s underfillem				
Max	954,94	740,33	197,0	91,0
Min	701,24	390,42	123,0	26,0
Průměr	821,83	611,38	149,6	65,7
Odchylka	76,35	132,85	22,7	23,0
2000 TC s underfillem				
Max	911,60	582,05	173,0	53,0
Min	771,37	470,78	143,0	36,0
Průměr	834,50	523,48	155,3	41,3
Odchylka	41,49	35,17	9,7	5,3
3000 TC s underfillem				
Max	960,67	821,23	145,0	93,0
Min	752,13	624,12	98,0	64,0
Průměr	852,65	714,02	119,7	76,1
Odchylka	75,46	69,90	15,7	10,1

Jako nejdůležitější parametr vyhodnocení byla zvolena síla 1. deformace, kde reálně hrozí poškození pájeného spoje a nefunkčnost dané komponenty. Srovnáním hodnot pro IC1 je patrné, že průměrná síla 1. deformace je mírně vyšší než u nepodlepené komponenty ovšem s dvojnásobnou směrodatnou odchylkou. Toto může být zapříčiněno samotným procesem aplikace underfillu, kdy jsou součástky a jejich pájené spoje vystaveny tepelnému namáhání

v rámci předehřevu a následnému vytvrzení underfillu. Následně s přibývajícími teplotními cykly je pozorovatelný trend poklesu síly 1. deformace doprovázené zmenšením rozptylu. Sada vzorků při 3000 teplotních vykazovala nejvyšší pevnost jak v rámci síly nutné pro odtrhnutí tak i síly 1. deformace ovšem s daleko kratším časem nutným pro kompletní odtrhnutí. Z toho se dá usuzovat, že v rámci teplotních cyklů docházelo k dovytvrzení materiálu underfillu a jeho následné degradaci.

Tabulka 4.14: Tabulka vypočtených průměrů a směrodatných odchylek maximální síly nutné pro odtrhnutí, síly první deformace, času odtrhnutí a doby první deformace pro IC2.

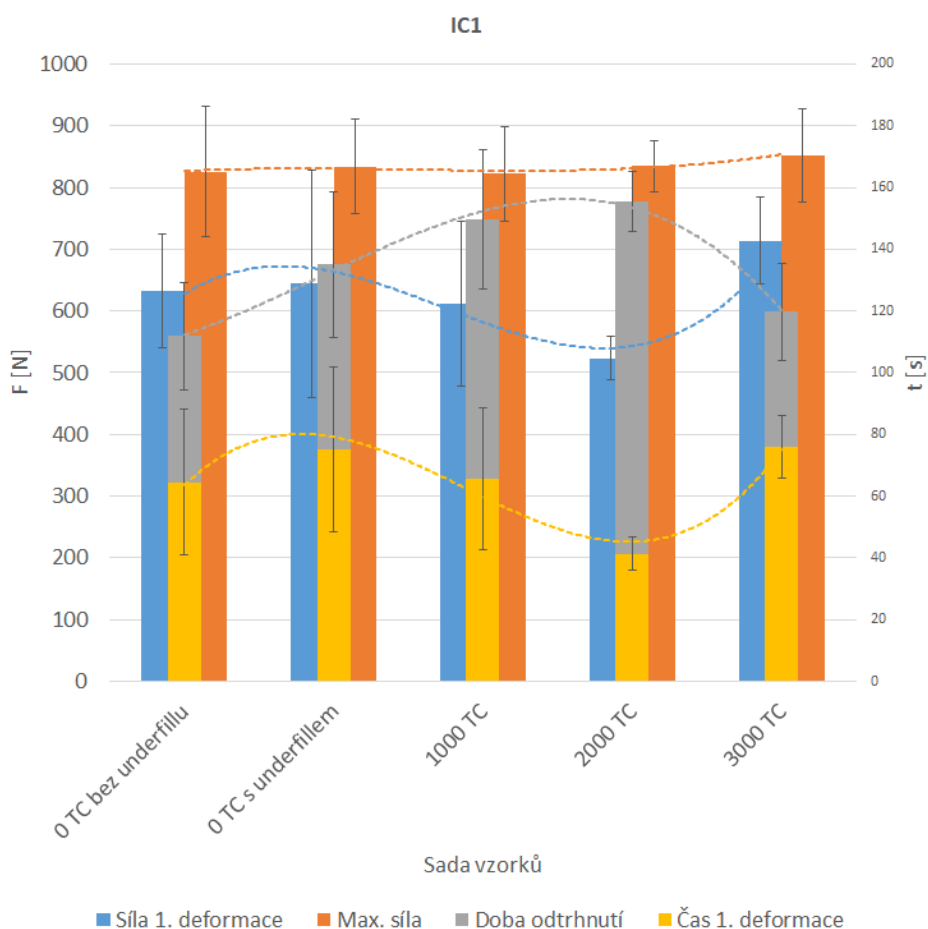
	Nejvyšší síla [N]	Síla 1. deformace [N]	Čas odtrhnutí [s]	Doba do 1. deformace [s]
0 TC bez underfillu				
Max	654,32	403,45	106,0	66,0
Min	170,68	57,89	45,0	12,0
Průměr	383,81	219,84	76,4	30,3
Odchylka	143,03	113,98	17,1	15,7
0 TC s underfillem				
Max	816,74	301,69	126,0	36,0
Min	486,72	67,71	88,0	8,0
Průměr	643,69	229,37	104,6	21,7
Odchylka	132,72	73,56	12,8	7,6
1000 TC s underfillem				
Max	880,59	408,56	164,0	41,0
Min	548,96	108,84	89,0	10,0
Průměr	684,69	234,19	111,9	23,3
Odchylka	109,59	92,51	22,3	9,3
2000 TC s underfillem				
Max	778,82	469,54	139,0	52,0
Min	452,03	70,33	100,0	7,0
Průměr	653,19	205,38	122,6	21,7
Odchylka	101,57	129,58	14,8	13,9
3000 TC s underfillem				
Max	680,23	287,90	130,0	28,0
Min	504,11	73,91	87,0	7,0
Průměr	594,01	178,91	110,1	19,5
Odchylka	72,45	81,23	13,2	7,7

U komponenty IC2 je pozorovatelný markantní nárůst maximální síly nutné pro odtrhnutí. Co se týče síly 1. deformace, zde dochází pouze k malému nárůstu síly prvotní deformace ovšem je zde pozorovatelné sjednocení těchto sil v podobě téměř poloviční směrodatné odchylky oproti nepodlepeným vzorkům. I zde je v rámci teplotního cyklování pozorovatelný jakýsi trend dovytvrzení materiálu underfillu, ovšem s daleko dřívějším nástupem, kdy

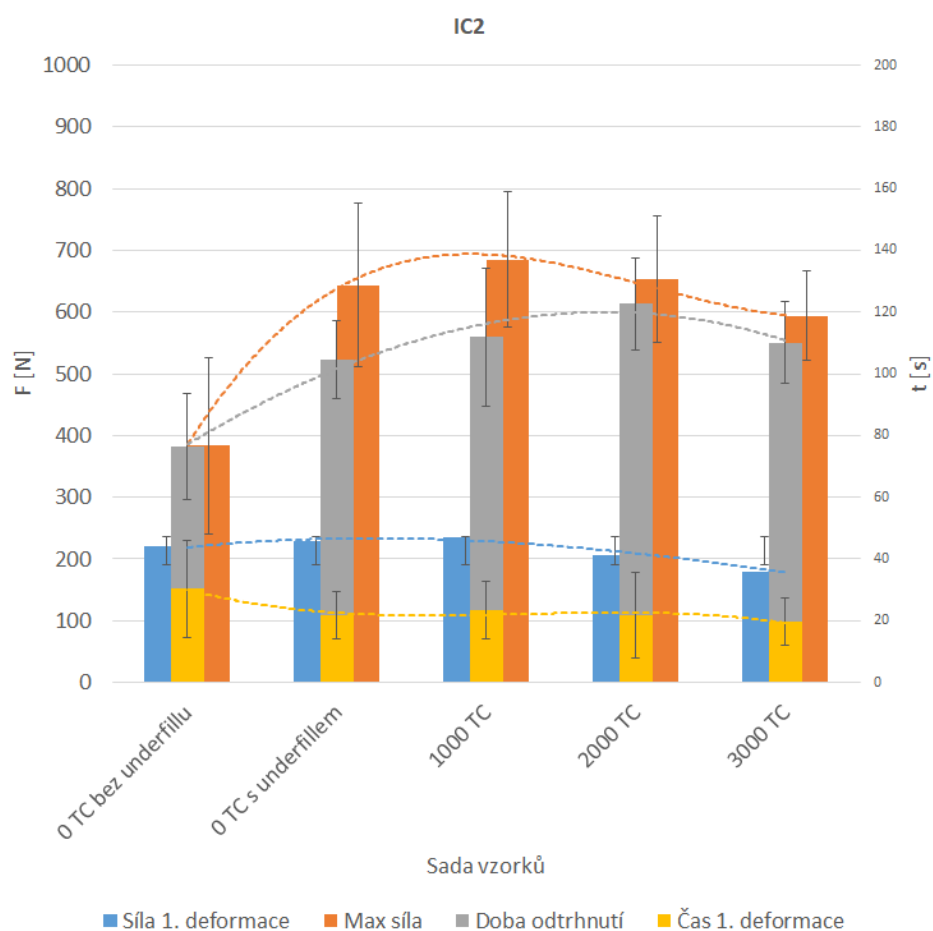
maximální hodnoty připadají na sadu vzorků po 1000 teplotních cyklech oproti komponentě IC1, kde maximální hodnoty připadaly na sadu vzorků po 3000 teplotních cyklech.

Pro lepší přehlednost daných trendů byly vytvořeny sloupcové grafy pro všechny sady vzorků pro oba zkoumané komponenty, dále byly sledované hodnoty doplněny o příslušné směrodatné odchylky a proveden proklad pro lepší možnost sledování trendů zkoumaných parametrů.

Z daných grafů 4.18 a 4.19 je možno srovnat i samotné komponenty mezi sebou. Zde je zřejmé, že IC1 dosahuje celkově lepších mechanických vlastností než IC2. Dále u obou komponent dochází v rámci teplotního cyklování k nárůstu doby, kdy dojde ke kompletnímu odtrhnutí komponenty, kdy po 2000 teplotních cyklech nastává zlom a tato doba klesá. Z daných průběhů se dá usuzovat, že u obou vzorků underfill přispívá ke zlepšení mechanických vlastností a během vystavení komponent teplotním cyklům dochází k dovytvrzení lepida a následně jeho degradaci a křehnutí.



Obrázek 4.18: Graf průměrných hodnot maximální síly, síly první deformace, času nutného k odtržení a času první deformace pro komponent IC1.



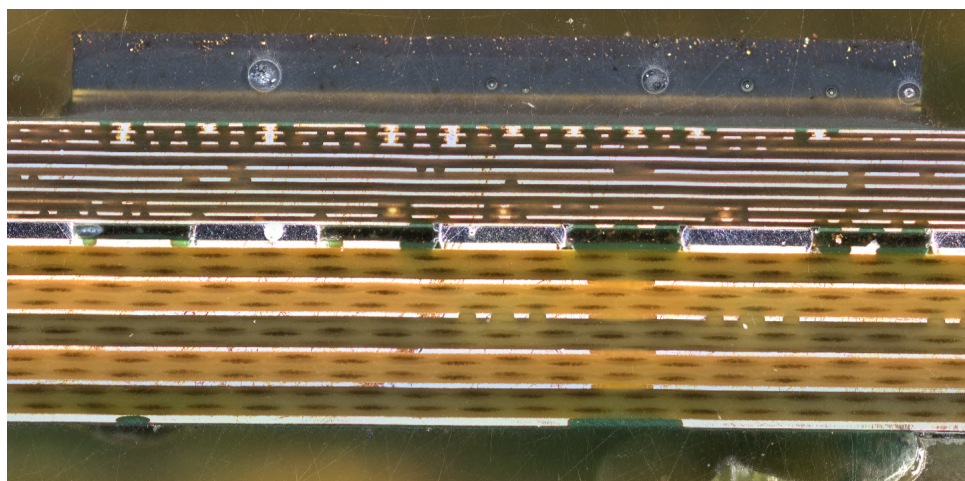
Obrázek 4.19: Graf průměrných hodnot maximální síly, síly první deformace, času nutného k odtržení a času první deformace pro komponent IC2.

4.3 Mikroskopie - optická kontrola

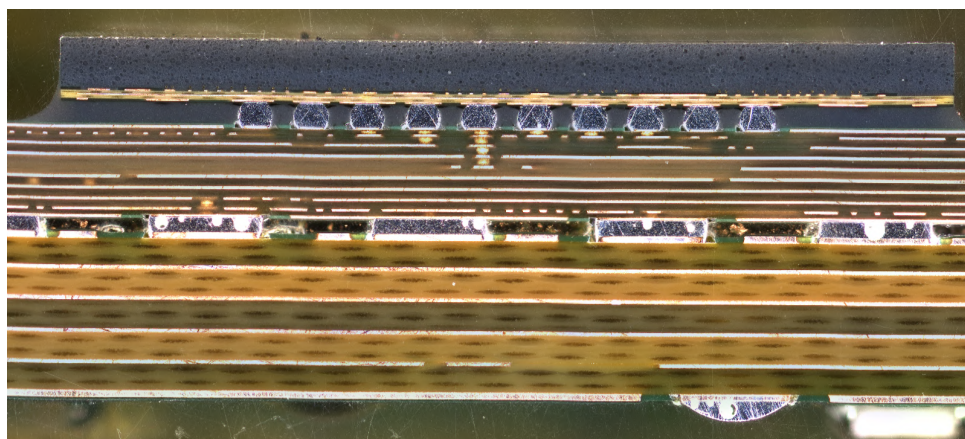
Některé vzorky byly po odtrhnutí na trhačce zkoumány na laserovém skenovací mikroskopu Keyence VK-X1000, díky čemuž bylo možné vytvořit 3D snímky odtržených míst. Pro ucelený obrázek o odtrhnutí bylo nutné zkoumat vždy k sobě patřící odtržený komponent a k němu příslušnou základnu multičipového modulu. Dále byl vytvořen příčný výbrus zkoumaných komponent IC1 a IC2 a nezkoumané komponenty, kterou budeme nazývat IC3.

Výbrusy

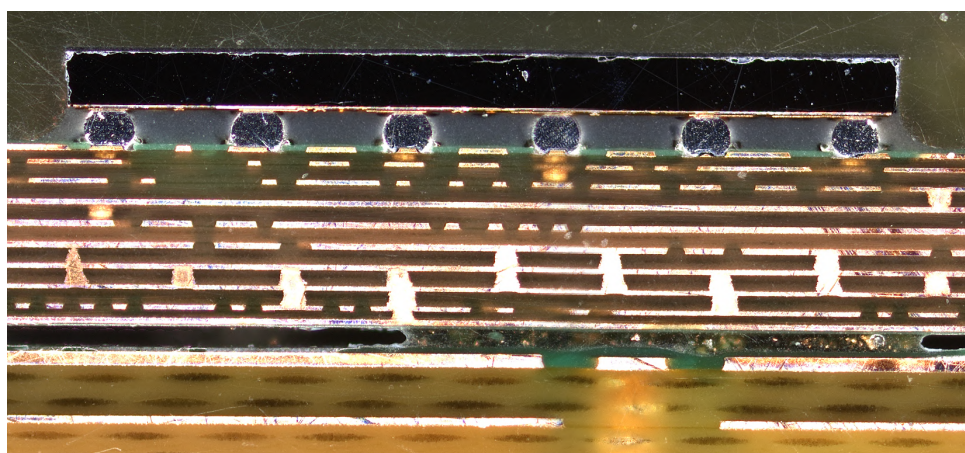
Běžnou metodou zkoumání kvality podlepení komponenty underfillem je provedení podélného výbrusu přes underfillovaný pájený spoj. V rámci této práce byl proveden výbrus příčný, který umožní zkoumání celé struktury dané sestavy v příčném řezu. Pro tento typ řezu bylo rozhodnuto z důvodu, že zkoumání kvality podlepení komponenty bude provedeno pomocí konfokálního mikroskopu.



Obrázek 4.20: Příčný výbrus IC1



Obrázek 4.21: Příčný výbrus IC2



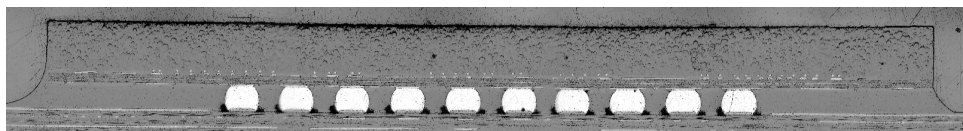
Obrázek 4.22: Příčný výbrus IC3

Na těchto výbrusech je možno pozorovat celkovou strukturu sestavy, kdy je patrné, že nosný systém DPS je vícevrstvý, kde mezi jednotlivými nosnými listy z epoxidovaného sklolaminátu FR4 jsou vytvořeny měděné vodivé cesty,

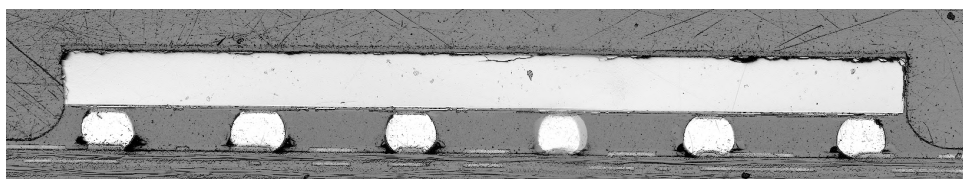
kteří jsou vzájemně propojeny pomocí pokovených vias. Základna multičipového modulu je stejně jako základna DPS tvořena vícevrstvou skladbou, což je patrné hlavně na obrázku 4.22, kde můžeme pozorovat i pokovené vias mezi jednotlivými vodivými vrstvami.

Nejdůležitější pro tuto práci je ovšem struktura připojených komponent na základnu MCM. U IC2 na obrázku 4.21 je patrné rozložení vývodů komponenty, kde vývody jsou soustředěné ve středu součástky. Bohužel u IC1 na obrázku 4.20 nejsou vývody pozorovatelné, ovšem měly by být rozloženy rovnoměrně po celé ploše. Tento rozdíl je patrný i z layoutu na obrázku 4.6.

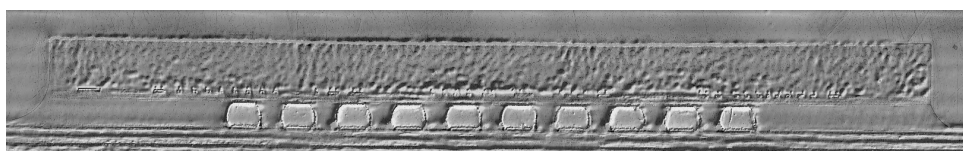
Underfill, který má na výbrusu šedou barvu, je pozorovatelný u všech tří komponent v oblasti mezi komponentou a základnou MCM. Na optickém snímku se zdá, že jak u komponenty IC2 a IC3 došlo ke kompletnímu vyplnění míst mezi pájenými spoji underfillem. Nyní se podíváme na laserové snímky komponent IC2 a IC3.



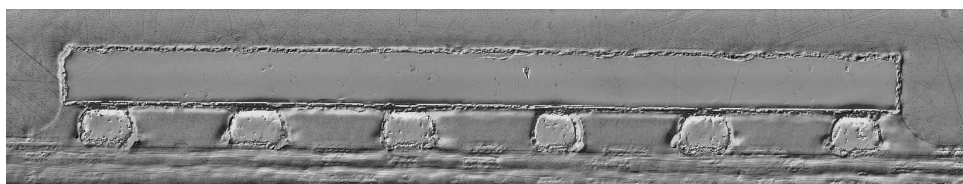
Obrázek 4.23: Příčný výbrus IC2 - laserový snímek



Obrázek 4.24: Příčný výbrus IC3 - laserový snímek.



Obrázek 4.25: Příčný výbrus IC2 - C-laser DIC snímek



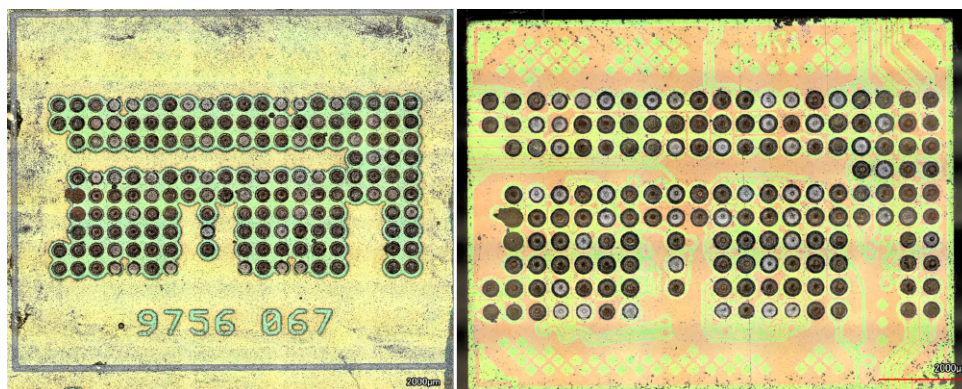
Obrázek 4.26: Příčný výbrus IC3 - C-laser DIC snímek.

Podíváme-li se detailněji na laserové snímky komponent IC2 na obrázku 4.23 a IC3 na obrázku 4.24, všimneme si černých míst u pájených spojů. U snímků vytvořených pomocí C-laser DIC mikroskopie (**D**ifferential **I**nterference **C**ontrast)

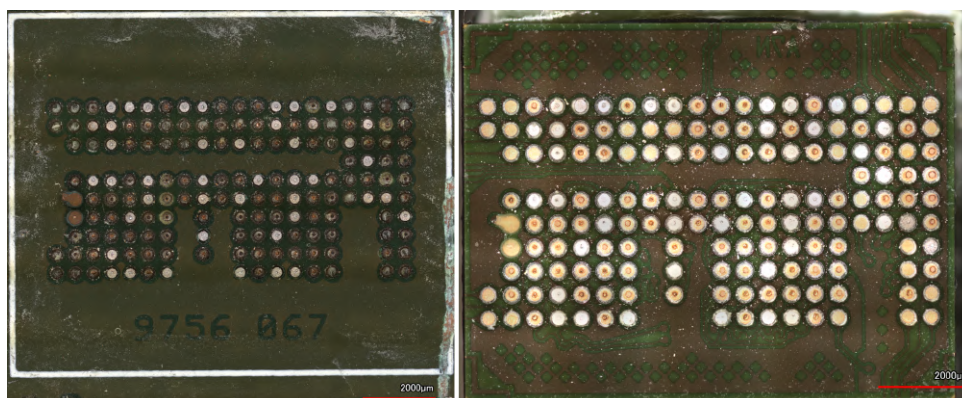
na obrázcích 4.25 a 4.26 jsou tyto oblasti také pozorovatelné, ovšem v podobě výdutí. Z těchto snímků se dá usuzovat, že underfill zcela nepřilne k pájeným spojům, nýbrž na rozhraní pájeného spoje a underfillu se tvoří vzduchové bubliny. Zde je nutno zmínit, že tyto výbrusy byly vytvořeny u komponent, které prodělaly 1000 teplotních cyklů.

■ Optická kontrola nepodlepených komponent

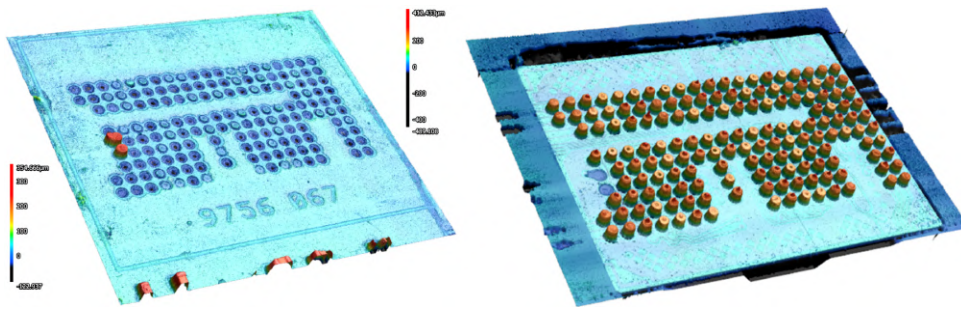
V této části se budeme věnovat mikroskopickému pozorování zkoumaných součástek. Nejprve se podíváme na nepodlepený komponent IC2 (vzorek č. 8), který byl odtržen u základny MCM, což je patrné i z optického obrázku 4.28. Na místech vývodů odtržené komponenty jsou patrné známky mědi pájecích plošek. Podíváme-li se na 3D snímek základny a komponenty na obrázku 4.29, tak vidíme, že skutečně k odtržení došlo v rámci pájecích plošek, které byly doslova vyrvány z DPS. Z toho se dá usuzovat, že nejslabší místo v příčném směru mechanického namáhání této komponenty nejsou samy spoje ani vývody, nýbrž pájecí plošky, na které jsou vývody komponenty připájeny.



Obrázek 4.27: Laser-optický snímek odtržené nepodlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).

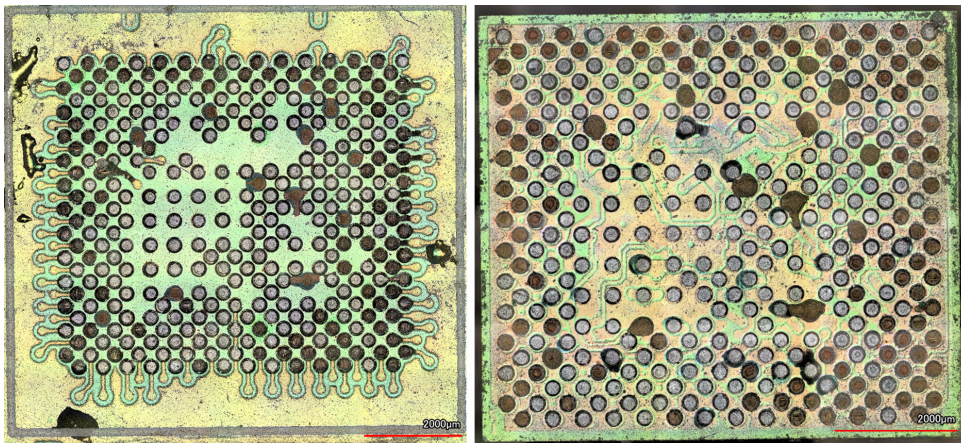


Obrázek 4.28: Optický snímek odtržené nepodlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).

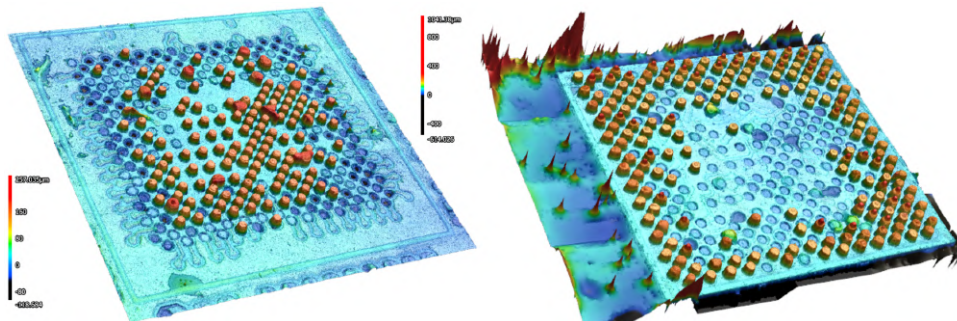


Obrázek 4.29: 3D výškový snímek odtrhnuté nepodlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).

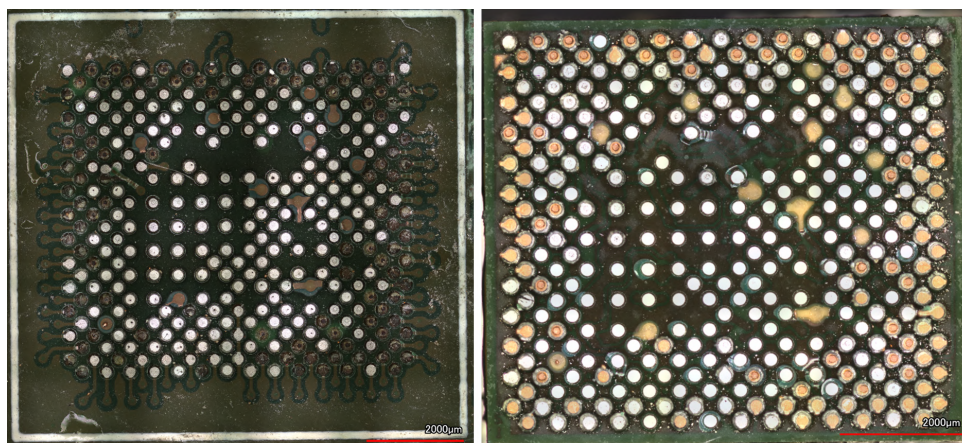
Podíváme-li se na nepodlepenou komponentu IC1 (vzorek č. 8), tak na obrázcích 4.30 a 4.32 jsou opět patrné známky mědi na obvodových vývodech. Zároveň vývody situované ve středu komponenty byly odtrženy ze základny komponenty, kde je na 3D snímku na obrázku 4.31 patrné, že zde došlo k vytrhnutí vodivých cest ze samotné základny pouzdra komponenty. Z toho opět vyplývá, že nejslabší místo není pájený spoj, nýbrž samotné pájecí plošky a místa připojení vývodů k základně pouzdra.



Obrázek 4.30: Laser-optický snímek odtrhnuté nepodlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).



Obrázek 4.31: 3D výškový snímek odtrhnuté nepodlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).

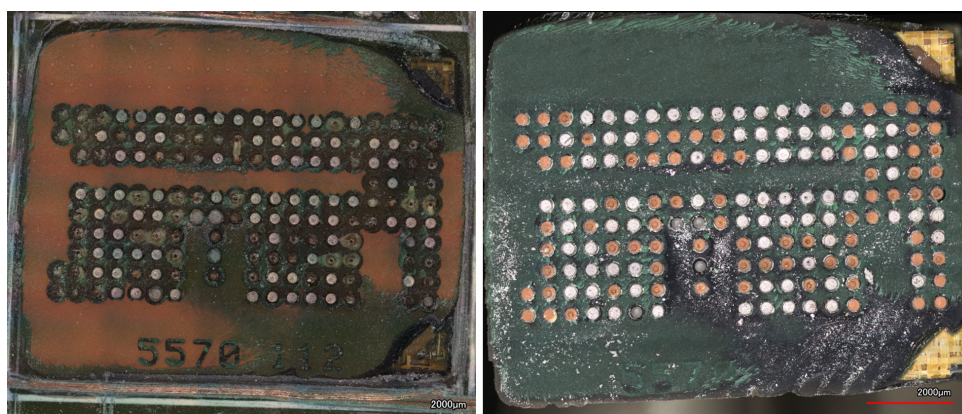


Obrázek 4.32: Optický snímek odtrhnuté nepodlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).

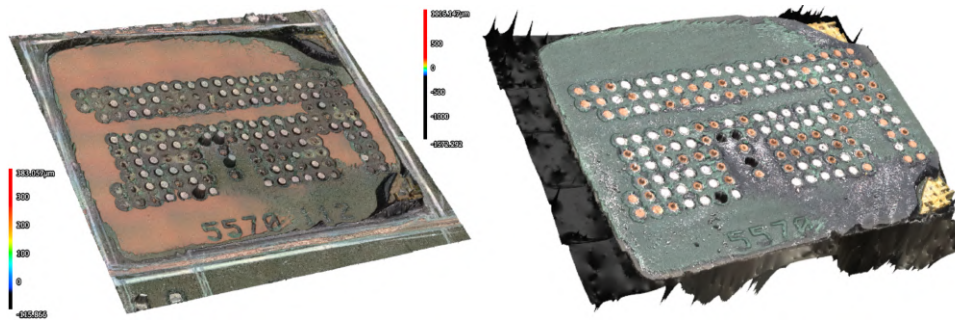
■ Optická kontrola podlepených komponent při 0 TC

U podlepené komponenty IC2 (vzorek č. 6) je dle příslušných obrázků 4.33, 4.34 a 4.35 patrné, že zde dochází k silné adhezi materiálu underfillu k samotné DPS. Při odtrhnutí podlepených komponent IC2 dochází opět k vyrvání měděných pájecích plošek na DPS, což je opět patrné pomocí stop mědi na samotných vývodech. Zároveň zde vyšlo najevo, že adheze underfillu k nepájivé masce DPS je tak silná, že při odtrhnutí dochází k vytrhnutí nepájivé masky ze samotné DPS.

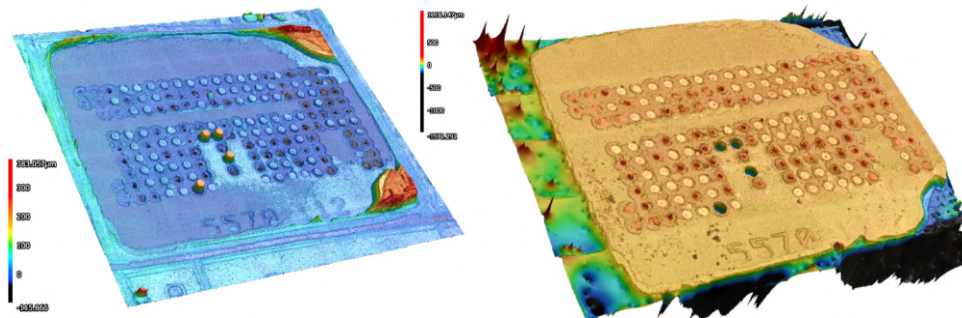
Z přiložených 3D snímků je patrné, že podlepení komponenty je celistvé po celé ploše a obklopuje veškeré pájené spoje, což implikuje správně nastavený proces aplikace underfillu, jelikož takto podlepená komponenta splňuje požadavky dané normou IPC J-STD-030A.



Obrázek 4.33: Optický snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).

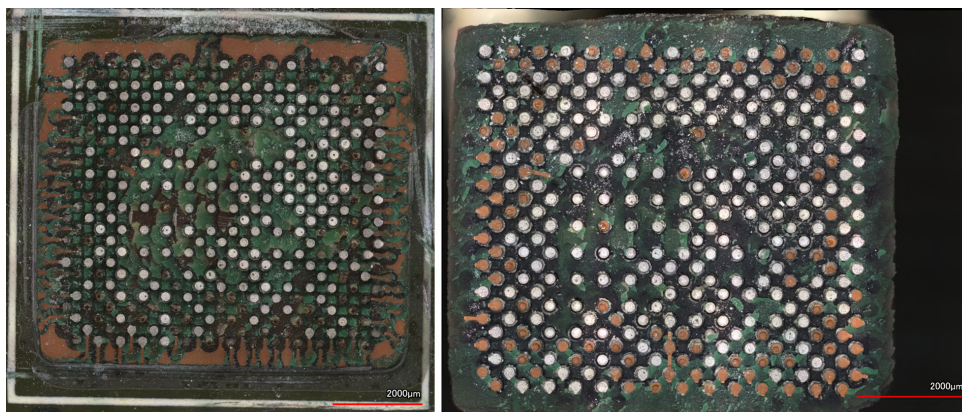


Obrázek 4.34: 3D snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).

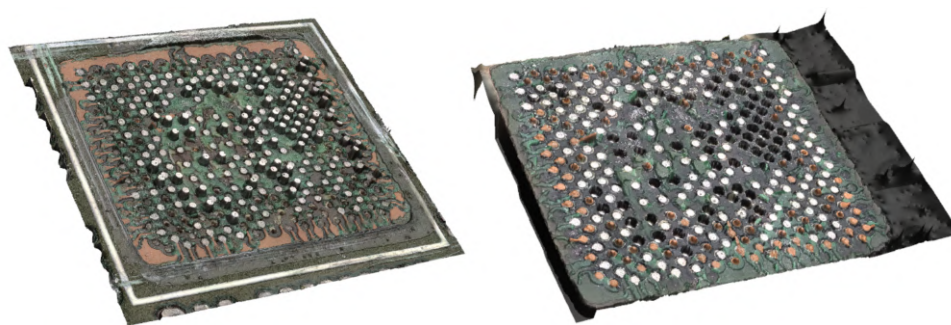


Obrázek 4.35: 3D výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC2 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).

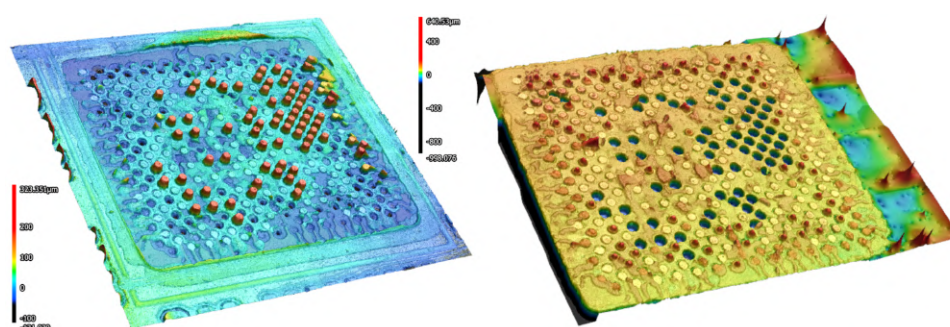
Ze snímků podlepené komponenty IC1 (vzorek č. 6) na obrázcích 4.36 a 4.37 je opět patrné, že i zde dochází k silné adhezi underfillu k nepájivé masce po obvodu komponenty a při odtrhnutí k jejímu vytrhnutí z DPS. Ve středové části nepájivá maska zůstává uchycena k DPS, což je s největší pravděpodobností zapříčiněno samotným rozložením vývodů a jejich rovnoměrnému rozprostření po celé ploše. I zde v rámci odtrhnutí dochází k vytržení pájecích plošek, kdy téměř veškerý underfill a velká část vývodů je odtržena na úrovni DPS.



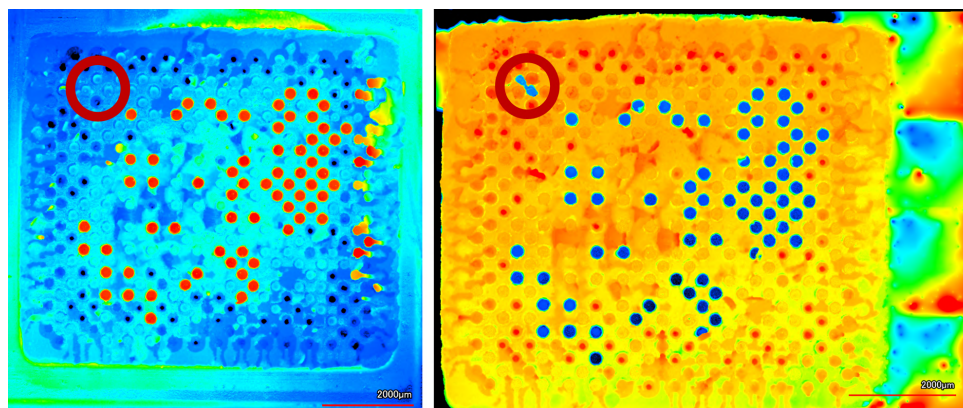
Obrázek 4.36: Optický snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).



Obrázek 4.37: 3D snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).



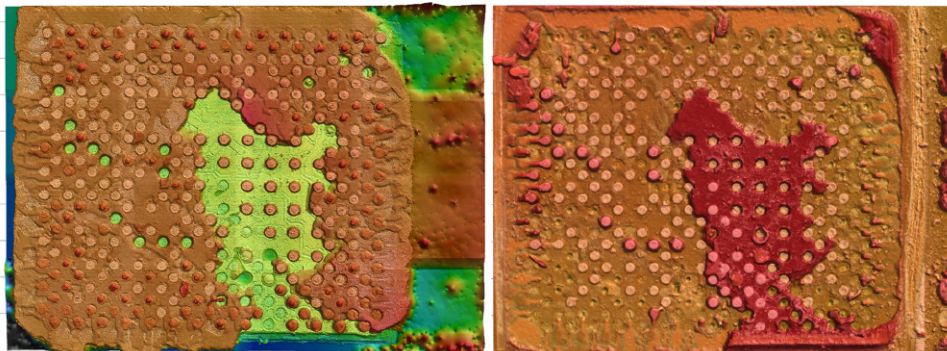
Obrázek 4.38: 3D výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo).



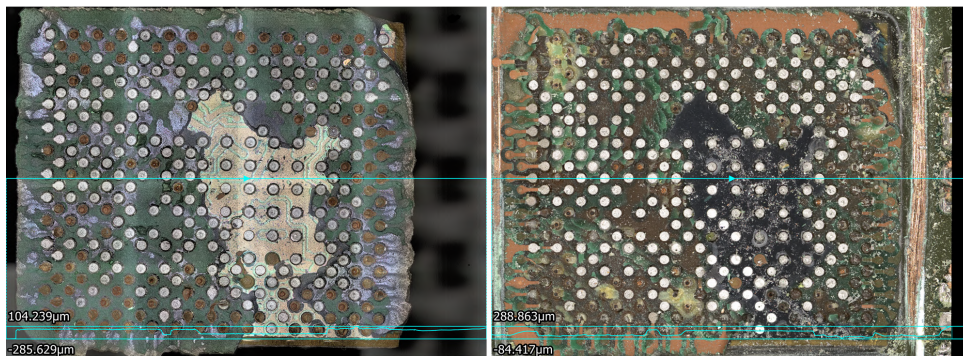
Obrázek 4.39: Výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (napravo) a k ní příslušné základny (nalevo) zobrazující výšky daných míst. Označená oblast značí výskyt voidu.

Na obrázcích 4.38 a 4.39 jsou vyobrazené výškové snímky. Z těchto snímků je opět patrné dobré zatečení lepidla pod komponentu, ovšem srovnáme-li důkladně oba snímky, objevíme v levé horní části označené na obrázku 4.39 malý void mezi šesti vývody. Plocha tohoto voidu je vůči celkové ploše zanedbatelná a menší než 10 % plochy čipu a i v tomto případě dojde k vyhovění požadavků normy IPC J-STD-030A pro správně podlepený komponent viz. obrázek 3.6.

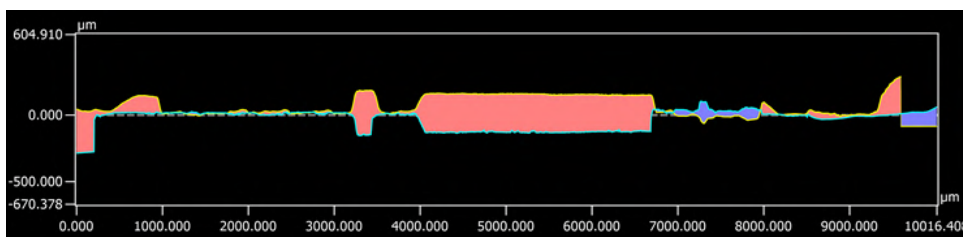
■ Optická kontrola podlepených komponent při 1000 TC



Obrázek 4.40: 3D výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (nalevo) a k ní příslušné základny (napravo) po 1000 TC.



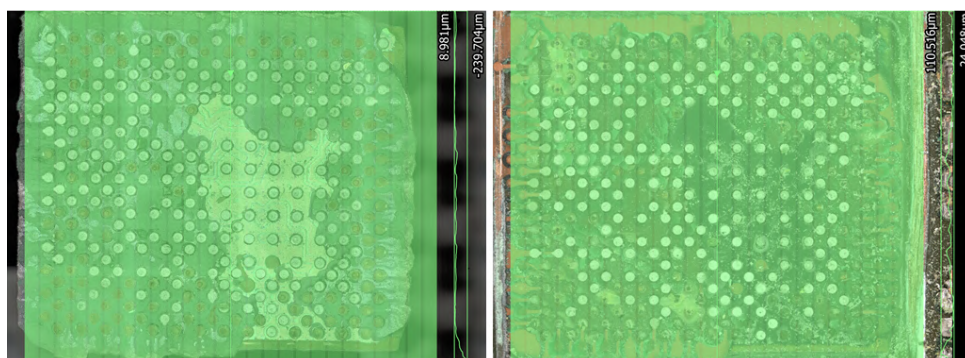
Obrázek 4.41: Optický snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (nalevo) a k ní příslušné základny (napravo) po 1000 TC pro srovnání snímků pomocí horizontálního řezu.



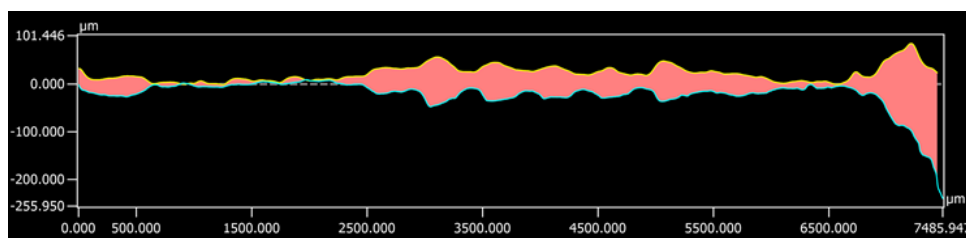
Obrázek 4.42: Komparativní profil průběhu výšek odtržené komponenty IC1 vůči příslušné základně v horizontálním řezu.

Po 1000 TC byly opět vytvořeny snímky odtržených komponent na konfokálním mikroskopu. Na obrázku 4.40 je pozorován výškový profil IC1 (vzorek č. 9), ze kterého je patrné, že odtržené části do sebe zapadají a nevyskytují se zde žádné voidy.

Pomocí SW bylo provedeno srovnání odtržené komponenty IC1 a k ní příslušné základny. Toto srovnání bylo provedeno na jednoduchém horizontálním řezu zhruba ve středu snímku viz obrázek 4.41. Následně jsem dostal komparativní profil výšek obou snímků, který je možno vidět na obrázku 4.42. Jelikož jako referenční vzorek byl vybrán odtržený komponent, rozdíl výšek by se měl pohybovat v okolí 0 pro správně podlepený komponent, což dle komparativního profilu je splněno od cca 1000 μm do cca 8000 μm . Tato vzdálenost odpovídá zhruba rozměrům komponenty. Červeně vyplněná oblast na komparativním profilu značí místo, ve kterém se odtržený materiál nachází na základně DPS a na stejném místě na komponentě je výduť.



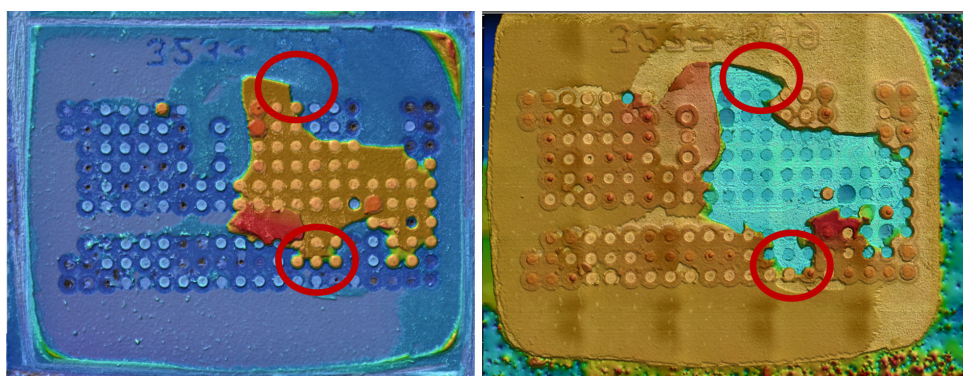
Obrázek 4.43: Optický snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (nalevo) a k ní příslušné základny (napravo) po 1000 TC pro srovnání snímků pomocí vertikálních řezů.



Obrázek 4.44: Komparativní profil průběhu výšek odtržené komponenty IC1 vůči příslušné základně ve vertikálním řezu.

Na dané komponentě bylo provedeno i srovnání pomocí vertikálního řezu, respektive komponentou bylo vedeno 400 vertikálních řezů viz. obrázek 4.43, ze kterých byl následně softwarově vypočten jejich průměr a vytvořen komparativní profil vyobrazený na obrázku 4.44. Řez je veden shora dolů. Na komparativním profilu je patrná výduť na IC na spodní straně a přichycení materiálu underfillu na DPS, což odpovídá snímku 4.40.

Je nezbytné zmínit, že v rámci komparativního profilu je nutno zanedbat krajní hodnoty a to z toho důvodu, že při snímání základny byla snímána i okolní plocha v rámci celistvého snímku, ovšem u snímání odtrženého komponentu byl snímán pouze čip.

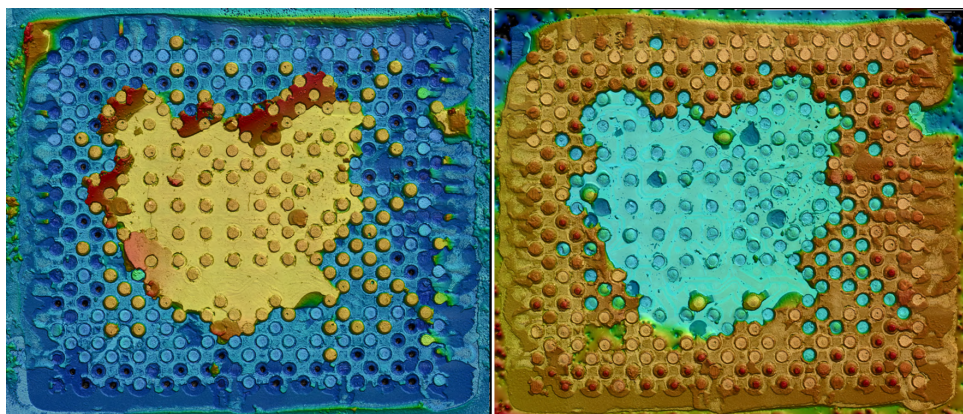


Obrázek 4.45: 3D výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC2 (na-pravo) a k ní příslušné základny (nalevo) po 1000 TC. Označené oblasti značí místo výskytu voidů.

V rámci kontroly odtržených komponent po 1000 TC uvedu příklad i IC2 (vzorek č. 9) pozorovatelné na obrázku 4.45. U tohoto komponentu byly objeveny dva malé voidy. Oblasti jsou označeny červeným kruhem na příslušných snímcích. I v tomto případě se jedná o přípustné podlepení v rámci normy IPC J-STD-030A.

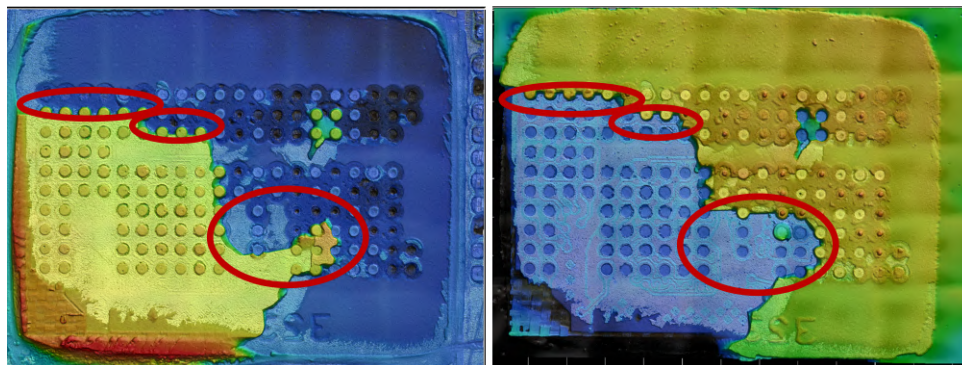
Srovnáme-li snímky komponent po 1000 TC se snímky podlepených komponent při 0 TC, tak je zjevné, že u komponent vystavených teplotnímu cyklování dochází k odtržení underfillu tak, že část zůstane přichycena k základně a část ke komponentě, kdežto u komponent, které nebyly vystaveny cyklování došlo k odtržení underfillu tak, že zůstal téměř celý přichycen ke komponentě.

■ Optická kontrola podlepených komponent při 2000 TC



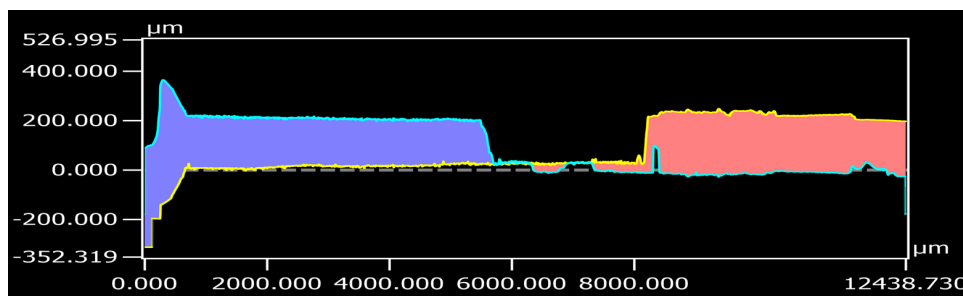
Obrázek 4.46: 3D výškový snímek odtrhnuté podlepené komponenty IC1 (na-pravo) a k ní příslušné základny (nalevo) po 2000 TC.

Pro srovnání uvedu i snímky komponent po 2000 TC. Na obrázku 4.46 je zobrazen čip IC1 (vzorek č. 1). I v tomto případě je obdobně jako u 1000 teplotních cyklů část underfillu odtržena od čipu a přichycena k DPS. Tento fakt opět přispívá k hypotéze, že s přibývajícím teplotními cykly dochází k dotvrzování underfillu a následně k jeho degradování.

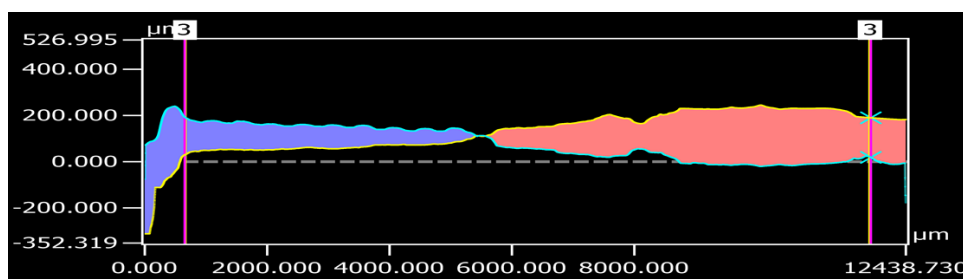


Obrázek 4.47: 3D výškový snímek odtržené podlepené komponenty IC2 (na-pravo) a k ní příslušné základny (nalevo) po 2000 TC. Označené oblasti značí místo výskytu voidů.

U této komponenty IC2 (vzorek č. 4) byly objeveny celkem tři oblasti voidů, které jsou zobrazeny na snímcích na obrázku 4.47. Tento komponent byl opět srovnán pomocí sw a vytvořen komparativní profil výšek obou k sobě patřících snímků. V tomto případě byl jako referenční obraz zvolen snímek základny, proto součet výšek referenčního a porovnávaného snímku by se měl pohybovat v okolí 230 μm .



Obrázek 4.48: Komparativní profil průběhu výšek odtržené komponenty IC2 vůči příslušné základně v jednoduchém horizontálním řezu.



Obrázek 4.49: Komparativní profil průběhu výšek odtržené komponenty IC2 vůči příslušné základně ve 400 horizontálních řezech.

Komparativní profil na obrázku 4.48 byl vytvořen pomocí jednoduchého horizontálního řezu, který vedl přes výduť označenou na obrázku 4.47 vpravo dole. Na tomto profilu je patrná výduť v délce cca 5500 μm až 8500 μm . Na obrázku 4.49 je zobrazen komparativní profil tvořený průměrem z 400 horizontálních řezů. Kvůli průměrování zde není oblast voidů natolik patrná, ovšem složíme-li výšky průběhů od 0 k sobě, v rozmezí cca 5500 až 8500 μm se nedostaneme na hodnoty výšky jako u kompletně podlepených míst. Zároveň je i na tomto komparativním profilu patrné, že v levé polovině je underfill přichycen na základně a v pravé polovině je přichycen ke komponentě.

4.4 Diskuze výsledků

V rámci části měření mechanických vlastností podlepených komponent jsem naměřil hodnoty v tabulkách 4.3, 4.5, 4.7, 4.9 a 4.11 pro IC1 a hodnoty pro IC2 v tabulkách 4.4, 4.6, 4.8, 4.10 a 4.12. Dle naměřených hodnot je patrné, že v obou případech s podlepením dochází ke zlepšení mechanických vlastností.

V rámci naměřených výsledků bylo zjištěno, že pro celkové zkoumání mechanických vlastností je nutno uvažovat samotné rozložení vývodů čipu a jejich počet. V tabulce 4.2 jsou vypočtené hodnoty plochy samotných komponent a plochy jejich vývodů a na obrázku 4.6 je zobrazeno rozložení vývodů zkoumaných komponent.

Pomocí sloupcových grafů srovnávající naměřené průměrné hodnoty jednotlivých sad vzorků na obrázku 4.18 pro IC1 a na obrázku 4.19 pro IC2 jsou pozorovatelné jisté trendy, ať už při srovnání nepodlepené vůči podlepené komponenty, tak i při srovnání komponent v rámci různého počtu prodělaných teplotních cyklů.

Nejprve se podíváme na IC2. Tato komponenta má cca 37,5 % plochy pokryto vývody a zbylých 62,5 % plochy je tak možno vyplnit underfillem, který přispívá k danému nárůstu maximální síly nutné pro odtrhnutí a doby odtrhnutí. Zároveň přispívá k mírnému navýšení síly nutné pro první deformaci. Z pořízených snímků odtržené komponenty následně vyšlo najevo, že k odtrhnutí nejčastěji dochází na rozhraní pájecí plošky a pájky, kdy v některých případech dochází k vytrhnutí celé pájecí plošky z DPS. U podlepených komponent dochází k odtrhnutí celé nepájivé masky, což svědčí o dobré adhezi lepidla k nepájivé masce a zároveň její nepřilíživé adhezi vůči měděné fólii. Zde je nutné připomenout layout vývodů této komponenty, kdy vývody jsou soustředěny na střed komponenty viz. obrázek 4.6.

V rámci teplotního cyklování u této komponenty dochází při prodělení 1000 teplotních cyklů k nárůstu síly prvotní deformace a maximální síly nutné k odtrhnutí. Z tohoto trendu se dá usuzovat, že během prodělení cca prvních 1000 teplotních cyklů dochází k dotvrzení underfillu a zlepšení jeho vlastností. S dalšími prodělanými teplotními cykly dochází k postupnému poklesu síly

prvotní deformace i maximální síly, s výjimkou doby odtrhnutí, která je maximální při 2000 prodělaných cyklech. Což by opět mohlo být zapříčiněno mírným dotvrzením a značit i počátek degradace materiálu lepidla, jelikož u 3000 teplotních cyklů dochází k poklesu všech zkoumaných veličin.

Jisté změny lze pozorovat i na průbězích na obrázcích 4.9, 4.11, 4.13, 4.15 a 4.17. Sada vzorků podlepené komponenty při 0 TC se vyznačuje velkým rozptylem jednotlivých průběhů, což svědčí o faktu, že ačkoliv všechny vzorky byly vyrobeny na stejné lince, výsledné vlastnosti nejsou stejné. S přibývajícím prodělanými teplotními cykly dochází ke zmenšení variability průběhů, což může být zapříčiněno dotvrzením underfillu a sjednocením jeho vlastností u zkoumaných vzorků.

Průběhy pro sadu vzorků po 1000 TC obr.4.13 a 3000 TC obr.4.17 se vyznačují kolenem v jednotlivých průbězích, označující oblast, ve které dochází k četným deformacím. Z daných grafů je patrné, že tato oblast je si velice podobná. K jejímu vzniku dochází u obou sad vzorků cca po 20 sekundách působení síly na daný komponent a liší se pouze délkou této oblasti a silou, při které k ní dochází. Při 2000 TC tato oblast není na první pohled tak patrná, ovšem při detailnějším zkoumání je možno ji analyzovat na daném průběhu síly na čase na obrázku 4.15. Tyto průběhy se zdají být zhruba mezi průběhy u komponenty po 1000 TC a po 3000 TC, což potvrzuje domněnku, že u této komponenty během prvních 1000 TC dochází k dotvrzení lepidla, sjednocení jeho vlastností a s dalšími prodělanými teplotními cykly k jeho následné degradaci.

Nyní se podíváme na IC1, která má oproti IC2 menší rozměry, větší počet vývodů, jenž jsou zároveň menší a pokrývají plochu 57,1 % celkové plochy spodní strany komponenty a tedy underfill zde pokrývá procentuálně menší plochu než u IC2. Zároveň i samo rozložení vývodů je značně odlišné od IC2, kde v tomto případě jsou vývody rovnoměrně rozloženy po celé spodní ploše komponenty viz. obrázek 4.6.

Z naměřených hodnot i v tomto případě je pozorovatelné zlepšení mechanických vlastností podlepené komponenty vůči nepodlepené, ovšem již ne v tak velkém rozsahu jako u komponenty IC1, což je dáno hlavně rozdílným layoutem vývodů, kdy tento komponent má dvojnásobný počet vývodů, které jsou zároveň lépe rozloženy po celé ploše než u IC2. Zároveň i zde dochází k odtrhnutí na úrovni pájecích plošek DPS, kdy v krajních oblastech je opět odtrhávána nepájivá maska, což opět potvrzuje dobrou adhezi lepidla k nepájivé masce.

Během prvních 1000 TC u IC1 dochází na rozdíl od IC2 k poklesu síly nutné pro odtrhnutí, stejně tak i síly první deformace, ovšem obdobně jako u IC2 zde dochází k nárůstu doby odtrhnutí komponenty. Tento rozdíl je s nejvyšší pravděpodobností zapříčiněn rozdílem mezi komponenty v podobě rozložení

jejich vývodů, jejich počtu a velikosti, jelikož počáteční hodnoty síly nutné pro odtrhnutí i síly první deformace jsou vyšší než u IC2 i při aplikaci menšího procentuálního množství underfillu. Z toho vyplývá, že v rámci hodnocení mechanických vlastností podlepených komponent je nutno uvažovat ucelený systém komponenta-lepidlo-pájený spoj-DPS se všemi vstupními parametry.

Při 2000 TC zde opět dochází k poklesu síly prvotní deformace, ovšem začíná zde narůstat síla nutná pro odtrhnutí, zároveň zde dochází k poklesu času prvotní deformace a době nutné pro odtrhnutí. Změna nastává u 3000 TC, kdy dostáváme nejvyšší hodnoty síly první deformace a maximální síly nutné pro odtrhnutí, stejně maximální hodnotu doby první deformace, ovšem dochází zde k poklesu doby nutné pro odtrhnutí. Tyto výsledky opět svědčí o změnách v samotném materiálu lepidla, kde se dá opět předpokládat, že dochází k dotvrzování lepidla, zvětšení jeho pevnosti a následně jeho degradaci a zvětšení křehkosti obdobně jako u IC2, ovšem v tomto případě do měření zasahuje větší měrou mechanická pevnost samotných pájených spojů.

Srovnáním průběhů IC1 na obrázcích 4.8, 4.10, 4.12, 4.14 a 4.16 je opět patrné, že po aplikaci underfillu a vystavení komponenty teplotnímu cyklování dochází ke zmenšení variability jednotlivých průběhů. Po provedení 2000 TC se měřené vzorky vyznačují kolenem v průběhu označující místo četné deformace obdobně jako u IC2, jen s tím rozdílem, že zde je tato oblast patrná až po 2000 TC. Z toho se dá předpokládat, že underfill a celá soustava IC1-lepidlo-pájený spoj-DPS se bude chovat obdobně jako u sestavy IC2, jen s časovým rozdílem, resp. posunuta o určitý počet teplotních cyklů a to s největší pravděpodobností kvůli rozdílnému layoutu vývodů a hlavně jejich většímu počtu, kdy větší část energie pohlcené během teplotního cyklování je pohlceno samotnými pájenými spoji, což může vést k pomalejšímu dotvrzení a následné degradaci materiálu underfillu. Zároveň jsou u této komponenty menší vývody než u IC2, díky čemuž je v rámci teplotního cyklování teplotní spoj více namáhán a rychleji degraduje.

V rámci výbrusů je možno pozorovat strukturu celé zkoumané sestavy včetně vícevrstvého multičipového modulu, na kterém je možno pozorovat jednotlivé vrstvy. Na příčných výbrusech na obrázcích 4.23, 4.24, 4.25 a 4.26 jsou kolem připájených vývodů pozorovatelné malé oblasti bez underfillu. Pomocí DIC laserových snímků jsou tyto oblasti patrné a jeví se jako vzduchové bubliny. Ačkoliv tyto bubliny zabraňují underfillu k dokonalému přilnutí k vývodu, nemusí být na škodu. Teoreticky by tyto mikroskopické výdutě mohly pokrýt rozpínání pájených spojů a lepidla během teplotního cyklování. Nutno dodat, že tyto výbrusy byly provedeny při 1000 teplotních cyklech, tedy tyto bubliny mohly vzniknout během rozpínání a smršťování materiálu pájky, lepidla a pájecí plošky během cyklování, jelikož se tyto bubliny nachází převážně na rozhraní pájeného spoje a DPS.

V rámci pozorování odtrhnutých komponent pod konfokálním mikroskopem bylo možné složením, vždy příslušných odtrhnutých komponent a k nim příslušné části základny DPS k sobě, vytvořit si ucelený obrázek podlepení komponent. U některých komponent byly objeveny oblasti voidů, se kterými by tyto komponenty vyhověly normě IPC J-STD-030A, věnující se aplikaci underfillu.

U komponent při 0 TC došlo k odtržení na rozhraní pájecích plošek DPS, kdy často docházelo k jejich vytržení z DPS. Zároveň u podlepených komponent byla odtrhávána nepájitá maska DPS, což svědčí o dobré adhezi lepidla k nepájitvé masce, a zároveň o její nepřilíživé adhezi vůči měděné fólii pod ní. Tyto výsledky ukazují na nejslabší článek celé soustavy v podobě nepájitvé masky, pájecích plošek a rozhraní pájecí ploška-pájený spoj. Rozhraní pájecí plošky a pájeného spoje by jako nejslabší článek dalo očekávat kvůli intermetalické vrstvě vznikající na tomto rozhraní.

Zajímavé je, že při 0 TC byl veškerý materiál underfillu a většina vývodů odtrhnuta z DPS, kdežto s přibývajícím TC se část materiálu začala odtrhávat od čipu, což je pozorovatelné například na obrázcích 4.40 a 4.46. Z čehož se dá opět usuzovat, že během teplotního cyklování dochází ke změně vlastností lepidla, případně různému namáhání různých míst na komponentě, což následně vede k odtržení underfillu na daném místě.

V rámci vyhodnocení snímků odtrhnutých komponent, bylo ve všech případech zjištěno odtržení na rozhraní pájecí ploška-pájený spoj, nebo vývod-čip. Zároveň i samotný underfill byl odtržen vždy na rozhraní lepidla s DPS nebo se základnou pouzdra komponenty. Toto pouze potvrzuje fakt, že z pohledu mechanických vlastností jsou největší slabinou místa spojů.

U některých snímků byly vytvořeny komparativní profily výšek odtržených komponent a k nim příslušným základnám. Tyto profily byly vytvořeny pomocí SW, kdy k sobě příslušnými snímky byl veden jeden či více řezů (vertikální nebo horizontální). Tyto výšky byly k sobě následně srovnány, díky čemuž se takto daly objevit oblasti voidů u podlepené komponenty pozorovatelné například na obrázku komparativního profilu 4.48 a příslušného výškového snímku 4.47.

Tato metoda zkoumání podlepení pomocí komparativního profilu je relativně složitá, jelikož je nutné k sobě velice přesně přiložit dané snímky a vhodně nastavit úroveň nulové výšky. Ovšem při správném provedení je tato metoda velice přesná a dokáže objevit veškeré místa, kde chybí lepidlo. Zároveň je tato metoda názorná. Nevýhodou ovšem je, že v rámci vytvoření komparativního profilu přes celou plochu je nutno provést více řezů a následně dané výšky průměrovat, což je výpočetně velice náročný proces.

Kapitola 5

Závěr

Z dosažených výsledků v rámci této diplomové práce a zkoumání mechanických vlastností podlepených komponent jsem dospěl k následujícím zjištěním.

Jako první a nejdůležitější fakt je nutno zmínit, že v rámci hodnocení mechanických vlastností je nutno vždy brát v potaz celou sestavu součástka-lepidlo-pájený spoj-DPS. Pouze pak je možné vytvořit si ucelený obrázek dané problematiky a případně sledovat trendy v rámci testování.

Co se týče samotných mechanických vlastností podlepených komponent, tak bylo potvrzeno, že s aplikací underfillu dochází ke zlepšení mechanických vlastností. Zároveň v rámci vystavení komponentě teplotnímu cyklování dochází během několika set prvních cyklů k dovytržování materiálu underfillu (lepidla), což vede ke zlepšení jeho vlastností. Z výsledků práce se jeví, že počet cyklů nutných k dovytržení závisí na layoutu vývodů samotné komponenty a jejich počtu.

S dalšími teplotními cykly začíná docházet k degradaci lepidla a zhoršení jeho vlastností. Zároveň s větším počtem teplotních cyklů začíná křehnout i samotný pájený spoj, což je dáno rychlejším růstem intermetalických vrstev při vystavení komponentě vyšším teplotám.

Tento výsledek je potvrzen i samotnou optickou kontrolou odtržených komponent na konfokálním mikroskopu. K odtržení vývodů docházelo v největší míře na rozhraní pájená ploška-pájený spoj, což je přesně místo výskytu intermetalické vrstvy. V rámci optické kontroly byla potvrzena také dobrá adheze lepidla vůči nepájivé masce, kdy při odtrhnutí docházelo k vyrvání nepájivé masky z DPS. Odtrhnutí underfillu probíhalo vždy na rozhraní s DPS nebo s pouzdem komponenty, nikdy v rámci samotného underfillu. Tyto výsledky poukazují na nejslabší místa celé soustavy z pohledu příčného mechanického namáhání, za které se dají obecně označit místa spojů různých materiálů.

V rámci optické kontroly bylo také zjištěno, že s přibývajícimi teplotními cykly se mění odtrhávání underfillu. Při 0 TC je veškeré lepidlo přichyceno

k čipu a odtrženo od DPS, ovšem s přibývajícím teplotními cykly začíná docházet k odtrhávání lepidla i na rozhraní s pouzdem součástky. Tento aspekt nasvědčuje na rozdílné tepelně-mechanické namáhání daných míst, což by se dalo v rámci testování využít jako diagnostická metoda pro stanovení namáhání jednotlivých míst na komponentě.

Optickou kontrolou bylo dále potvrzeno dobré nastavení procesu aplikace underfillu, kdy u všech zkoumaných vzorků došlo k dobrému zatečení lepidla pod komponentu s minimálními oblastmi voidů a všechny zkoumané komponenty by vyhověly normě IPC J-STD-030A.

Příloha A

Seznam symbolů a zkratk

Symbol	Význam
SMT	Surface mount technology - technologie povrchové montáže
SMD	Surface mount device - součástka pro povrchovou montáž
DPS	Deska plošného spoje
THT	Through-hole technology - technologie vsazování součástek do děr
MCM	Multi-chip module - multičipový modul
THD	Through-hole device - součástka s vývody pro THT
SoC	System on Chip - Systém na čipu - IO obsahující výpočetní část a další součásti a periferie tvořící ucelený systém realizovaný jednou součástkou
MSD	Moisture sensitive device - součástka citlivá na vlhkost
ESD	Electrostatic discharge - elektrostatický výboj
EPA	Electrostatic protected area - Oblast s ochranou proti ESD
ESDS	Electrostatic discharge sensitive device - součástka citlivá na elektrostatický výboj
AOI	Automated optical inspection - automatická optická kontrola
AXI	Automated X-ray inspection - automatická rentgenová kontrola
SPI	Solder paste inspection - kontrola pájecí pasty
BGA	Ball grid array - Typ pouzdra IO s pravúhlým uspořádáním kuličkových vývodů na spodní straně.
CSP	Chip scale package - Typ pouzdra IO jehož plocha je maximálně 1,2x větší než plocha čipu, mohou mít vývody typu BGA.
RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment - Omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních.
DIC	Differential interference contrast -diferenciální interferenční kontrastní mikroskopie.
TC	Teplotní cyklus

Příloha B

Bibliografie

- [1] MACH Pavel, URBÁNEK Jan a SKOČIL Vlastimil. *Montáž v elektronice. pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. 2001. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN: 80-010-2392-3.
- [2] LEE Ning-Cheng. *Reflow soldering processes and troubleshooting. SMT, BGA, CSP and flip chip technologies*. 2002. vyd. Boston: Newnes, 2002. ISBN: 978-0-7506-7218-4.
- [3] SZENDIUCH Ivan. „Inovace v elektronice. Pouzdření 2D vs. 2,5D vs. 3D“. In: *DPS elektronika od A do Z 2020.1* (2020). ISSN: 1805-5044. URL: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:67095/z-aktualniho-vydani-inovace-v-elektronice-pouzdeni-2d-vs-2-5d-vs-3d> (cit. 18.04.2021).
- [4] ZHANG Z. a WONG C.P. „Recent Advances in Flip-Chip Underfill. Materials, Process, and Reliability“. In: *IEEE Transactions on Advanced Packaging* 27.3 (2004), s. 515–524. ISSN: 1521-3323. DOI: 10.1109/TADVP.2004.831870. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1339451/> (cit. 26.04.2021).
- [5] TAMARI Alexander. *Why Use Plated Through Hole Technology in PCB Design?* 2017. URL: <https://resources.altium.com/p/why-use-through-hole-technology-in-pcb-design> (cit. 01.12.2020).
- [6] PROCHÁZKA Martin. „Optimalizace procesu strojního pájení vlnou“. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2009. URL: <http://hdl.handle.net/11012/2846> (cit. 24.04.2021).
- [7] MACH Pavel. *Pájení*. URL: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76879/mod_resource/content/1/P%C3%A1jen%C3%AD.pdf (cit. 10.12.2020).
- [8] ABEL Martin. „Pájecí vlna třetího tisíciletí“. In: *ABETEC 2008* (), s. 3. URL: <https://www.antistatika.cz/data/File/abetec/clanky/abetec.pdf> (cit. 02.12.2020).

- [9] STOKLÁSEK Lukáš. „Selektivní pájení“. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2019. URL: <http://hdl.handle.net/11012/177808> (cit. 24. 04. 2021).
- [10] ABE.TEC. *Jak vyhovět požadavkům norem pro součástky citlivé na vlhkost v prostředí elektronické výroby*. ABE.TEC. URL: <https://www.abetec.cz/eshop/product/e-book-ke-stazeni-zdarma-jak-vyhovet-pozadavkum-norem-pro-soucastky-citlive-na-vlhkost/> (cit. 24. 11. 2020).
- [11] HINTERMÜLLER Jan. „Vliv teplotního profilu u pájení přetavením na tvorbu intermetalických vrstev“. Bakalářská práce. Praha: ČVUT v Praze, 2018. URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/87740> (cit. 24. 04. 2021).
- [12] REMZA Ondřej. „Teplotní profil, růst intermetalických vrstev“. Bakalářská práce. Praha: ČVUT v Praze, 2018. URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73815> (cit. 10. 12. 2020).
- [13] JEŽEK Vladimír. „Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje“. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2015. URL: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/41619?show=full> (cit. 24. 04. 2021).
- [14] VESELÝ Petr. „Příprava a návrh experimentu pro analýzu rozstříkovaní tavidla z pájecí pasty“. Diplomová práce. Praha: ČVUT v Praze, 2017.
- [15] IPC J-STD-030A. „Selection and Application of Board Level Underfill Materials“. Bannockburn: IPC, 2014.
- [16] Embedded Staff. „Underfill revisited: How a decades-old technique enables smaller, more durable PCBs“. Embedded, 2011. URL: <https://www.embedded.com/underfill-revisited-how-a-decades-old-technique-enables-smaller-more-durable-pcbs/> (cit. 29. 04. 2021).
- [17] DfR Solutions. *Underfill Applications, Materials & Methods*. Beltsville, 2019. URL: <https://www.dfrsolutions.com/blog/underfill-applications-materials-methods> (cit. 30. 03. 2021).
- [18] BABIAR Alec J. a QUINONES Horatio. „Advances in Fast Underfill of Flip Chips“. Carlsbad: Asymtek, 2001. URL: <http://www.satech8.com/wp-content/uploads/2017/09/Advances-in-Fast-Underfill-of-Flip-Chips.pdf> (cit. 29. 04. 2021).