ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody připojování elektronických komponent na flexibilní substráty

Tomáš Kopřiva **2015**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2014/2015**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Tomáš KOPŘIVA**
Osobní číslo:	**E11B0127P**
Studijní program:	**B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komerční elektrotechnika**
Název tématu:	**Metody připojování elektronických komponent na flexibilních substrátech**
Zadávající katedra:	**Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte přehled vodivých adheziv, výrobců a technických parametrů.
2. Vytvořte přehled standardů a metod v oblasti testování kvality kontaktování komponent na flexibilních substrátech
3. Vyberte vhodná adheziva a metody testování kvality využitelné v laboratořích KET.
4. Prakticky ověřte vlastnosti vybraných adheziv na vybraných komponentech a substrátech.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Printing Technology for Flexible Substrates. 2006. ISBN 978-1884730467.**
2. **LICARI, James J. a Dale W. SWANSON. Adhesives Technology for Electronic Applications, Second Edition: Materials, Processing, Reliability (Materials and Processes for Electronic Applications). 2011.**
3. **Internetové zdroje.**

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

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

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

L.S.

Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je uvést čtenáře do problematiky lepených spojů za pomoci elektricky vodivých lepidel. V práci jsou uvedeny přehledy výrobců a produktů komerčně dostupných lepidel, nejdůležitějších vlastností elektricky vodivých lepidel a metod testování lepených spojů na flexibilních substrátech. Praktická část obsahuje naměřené hodnoty a porovnání provedených zkoušek. Výsledky jsou diskutovány v závěru této práce.

Klíčová slova

Elektricky vodivá lepidla (ECA), adheziva, flexibilní substrát, lepené spoje

Abstract

The purpose of this bachelor thesis is to introduce the topic of glued joints by electrical conductive adhesives. This paper is focused on overview of adhesives´ distributors, available products on the market and the most important characteristics of electrically conductive adhesives. Methods of testing these products are also included in this thesis. The practical part of this paper is consists of measured values summarising and test methods comparison. The is conclusions presented in the final part of this thesis.

Key words

Electrical conductive adhesives (ECA), adhesives, flexible substrates, glued joints

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne Tomáš Kopřiva

Poděkování

Tímto by rád poděkoval Ing. Karlu Hromadkovi za jeho cenné rady a připomínky při zpracování této práce.

Velké poděkování patří také firmě OEM Automatic s.r.o. za poskytnutí dvou vzorků elektricky vodivých lepidel.

V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat svým nejbližším za morální podporu při psaní této práce i v průběhu studia.

Obsah

Obsah ... **6**

Seznam symbolů a zkratek ... **8**

Úvod ... **10**

1. Historie flexibilní elektroniky ... **11**

1.1 Flexibilní substráty a jejich vlastnosti ... 12
1.1.1 Flexibilita ... 13
1.1.2 Tepelné a termomechanické vlastnosti ... 13
1.1.3 Rozměrová stabilita ... 14
1.1.4 Propustnost plynů ... 14
1.1.5 Optické vlastnosti ... 15
1.1.6 Hladkost povrchu ... 15
1.1.7 Elektrické vlastnosti ... 15
1.1.8 Ostatní vlastnosti ... 15
1.2 Používané materiály pro flexibilní substráty ... 16
1.2.1 Polykarbonát (PC) ... 16
1.2.2 Polyethylentereftalát (PET) ... 16
1.2.3 Polyethylennaftalát (PEN) ... 17
1.2.4 Kapton ... 17
1.2.5 Polyimid (PI) ... 17
1.2.6 Polyarylát (PAR) ... 18
1.2.7 Papír ... 18
1.2.8 Skloepoxid ... 18

2. Adheziva ... **19**

2.1 Elektricky vodivá adheziva (ECA) ... 20
2.1.1 Izotropní vodivá adheziva (ICA) ... 22
2.1.2 Anizotropní vodivá adheziva/filmy (ACA/ACF) ... 24
2.2 Materiály pro ECA ... 26
2.2.1 Silikony ... 26
2.2.2 Epoxidy ... 26
2.2.3 Polyuretany ... 27
2.2.4 Polyimidy ... 28
2.3. Nevodivá adheziva (NCA) ... 28

3. Přehled elektricky vodivých lepidel ... **31**

3.1 Přehled výrobců elektricky vodivých lepidel ... 31
3.2 Přehled a rozdělení elektricky vodivých lepidel ... 32
3.3 Přehled vlastností elektricky vodivých lepidel ... 33

4. Rozdělení metod zkoušení lepených spojů ... **35**

4.1 Zkouška tepelného cyklování (Temperature cycling test) ... 36
4.2 Zkouška teplotním šokem (Thermal shock testing) ... 36
4.3 Zkouška kombinace teploty a vlhkosti (Humidity test) ... 37
4.4 Zkouška pevnosti v odlupování (Peel test) ... 37
4.5 Zkouška vibracemi (vibration test) ... 38
4.6 Zkouška pevnosti čipu ve smyku (die shear test) ... 38

5. Praktická část 40

5.1 Výběr vhodných adheziv 40
5.2 Výběr vhodné metody pro testování přilepených komponent 41
5.3 Informace o lepidlech, příprava a postup nanášení ECA 42
5.4 Komponenty a substrát pro testování 46
5.5 Postup testování 46

6. Výsledky měření 48

7. Závěr 54

Seznam literatury a informačních zdrojů 56

Seznam symbolů a zkratek

ACA……..... Anizotropní vodivá lepidla (Anisotropic Conductive Adhesives)

ACF……... Anizotropický vodivý film (Anisotropic Conductive Film)

Ag…….. Stříbro

Au…….. Zlato

COF……... Chip on Flex

COG…….. Chip on Glass

CPs……. Jednotka centipoise

Cu……... Měď

ČSN……... Česká soustava norem

ECA……... Elektricky vodivá lepidla (Electrically Conductive Adhesives)

ICA……..... Izotropní vodivá lepidla (Isotropic Conductive Adhesives)

KET……..... Katedra elektrotechniky

LCD……... Displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)

NCA……... Elektricky nevodivá lepidla (Non-Conductive adhesives)

NCF……..... Nevodivý film (Non-Conductive film)

Ni……..... Nikl

ODA/PMDA.. Oxydianilin/pyromellitický dianhydrid

OLED……..... Technologie organických elektroluminiscenčních (Organic light-emitting diode)

PAR……..... Polyarylát

PC…….. Polykarbonát

PEN……..... Polyethylennaftalát

PET……..... Polyethylentereftalát

PI……..... Polyimid

PU…….. Polyuretan

RFID……..... Radio-frekvenční systém identifikace (Radio Frequency Identification

SMT……..... Technologie povrchové montáže (Surface Mount Technology)

TFT……..... Tenkovrstvý tranzistor (Thin Film Tranzistor)

PCB…… Printed circuit board

RT……... Room temperature

RTV…… Room temperature vulcanizing

CTE……..... Koeficient teplotní roztažnosti [°C] (Coeficient of Thermall Expansion)

E……. Youngův modul pružnosti [MPa]

t……... Tloušťka substrátu [μm]

T_g……..... Teplota skelného přechodu [°C]

v…….. Poissonovo číslo

ppm…… 10^{-6} (Parts per milion)

Úvod

V současné době se začíná stále více využívat lepených spojů za pomoci adheziv (lepidel) namísto pájení. Lepidla představují možnost hlavně pro spojování technologií povrchové montáže součástek, anglicky Sourface mount technology (SMT), a další aplikace v mikroelektronice. Technologie za pomoci lepených spojů využívá menších procesních teplot, než je tomu u pájení, a zajišťují jednodušší technologii nanášení. Stále nelze pájení plně nahradit lepenými spoji za pomoci adheziv ve všech odvětvích elektroniky z důvodu např. menší odolnosti vůči klimatickým podmínkám, menší vodivosti a pevnosti spojů. Ovšem v odvětví flexibilní elektroniky mají lepidla oproti pájení velkou výhodu v jejich flexibilitě, která je způsobena jejich strukturou. Strukturu elektricky vodivých adheziv tvoří dvě složky a to složku s pojivem a plnivem. Pojivo je tvořeno polymerovou pryskyřicí (epoxidová, polyimidová, silikonová a další). Tato složka zajišťuje mechanické vlastnosti lepidla. Druhou složku tvoří plnivo (stříbro, zlato, nikl atd.), která zajišťuje elektrické vlastnosti lepidla.

Předkládaná bakalářská práce je rozdělena na část teoretickou a část praktickou. První část se zabývá úvodem do problematiky flexibilní elektroniky, u které jsou využity lepené spoje za pomoci ECA. Praktická část je zaměřena na testování lepených spojů.

Cílem této práce je vytvořit souhrnný přehled elektricky vodivých adheziv a jejich technických parametrů, vlastností a výrobců, kteří tyto produkty poskytují. Je zde zpracován přehled standardů a metod pro testování kvality kontaktování komponent za pomoci elektricky vodivých adheziv (ECA), připojované na flexibilní (ohebné) substráty. Z komerčně dostupných lepidel byla vybrána 4 ECA, která byla v praktické části testována zkouškou pevnosti ve smyku na ohebném substrátu Kapton. Zkouška měla dvě fáze. První fáze byla pouze mechanického původu, takže se jednalo jen o test pevnosti ve smyku. V druhé fázi došlo k vystavení lepených spojů zhoršeným klimatickým podmínkám a poté byl proveden test pevnosti ve smyku. První a druhá fáze testování byla následně vyhodnocena.

1. Historie flexibilní elektroniky

Vývoj flexibilní (ohebné) elektroniky sahá do šedesátých let dvacátého století. Základní myšlenka v těchto letech byla, že cokoliv tenké může být ohebné. Jako první se tato myšlenka začala využívat pro flexibilní solární článek z monokrystalického křemíku. Byl zkompletován na substrátu z tenkého plastu, zajišťující flexibilitu právě v šedesátých letech. Začátkem osmdesátých let se začal za pomoci technologie Roll-to-roll nanášet křemík na tenké železné a organické polymerní substráty. Dnes vyráběné solární články jsou vyráběny též metodou Roll-to-roll. [1]

První vyrobený flexibilní tenkovrstvý tranzistor anglicky Thin Film Transistor (TFT) se datuje na rok 1968. Byl vyroben z telluru. Tyto tranzistory jsou základem většiny displejů a zobrazovacích jednotek.
Okolo roku 1980 byl v Japonsku sestaven první displej na bázi tekutých krystalů. V roce 1994 demonstrovala Iowská univerzita spojených států TFT nanesený na flexibilní polyimidový substrát. V roce 1996 se začaly vyrábět ocelové nerezové fólie, na které byly TFT připevněny. [1]

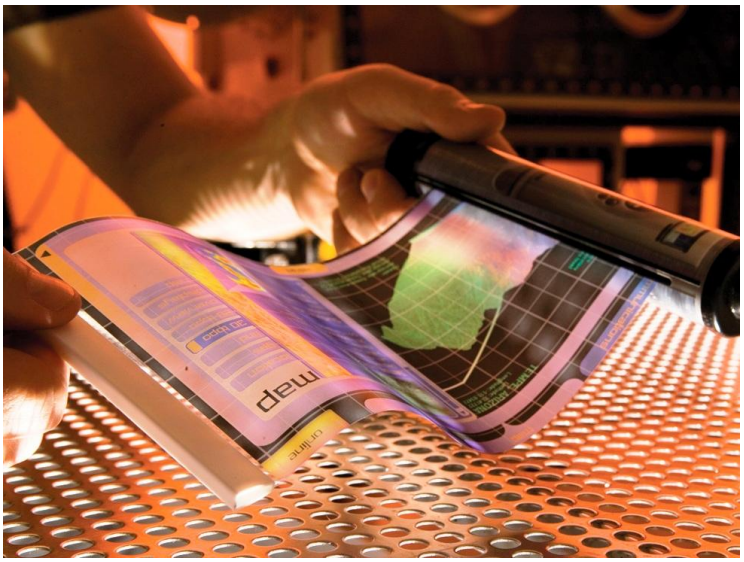
Stěžejním se stal objev v roce 1997, kdy se se začaly TFT nanášet na substrát pomocí laserového žíhání. Od tohoto objevu se flexibilní elektronika rapidně rozrostla, zejména v odvětví displejů. Mnoho firem, po tomto objevu, začalo představovat své ohebné displeje, se substráty z ocelových nebo plastových fólií. V roce 2007 Samsung přišel se sedmi palcovým displejem. [1]

V poslední době na sebe flexibilní elektronika upozornila hlavně nízkou cenou a širokým spektrem aplikací, ve kterých se dá využít. Flexibilní elektronika umožňuje aplikace, kde se obvody musí přizpůsobit složitým tvarům nebo být srolovány pro záznam, jako jsou například ohebné displeje, antény, tenko-vrstvé tranzistory, solární panely, flexibilní zařízení pro skladování energie, senzory nebo radio-frekvenční systém identifikace. [2,3]

Velkou výhodou flexibilní elektroniky je nízká cena výroby technologiemi „ink-jet printing“ a „roll-to-roll printing, které spočívají v tisku motivu na substrát. Dalšími možnými technologiemi pro propojení komponent jsou flip-chip nebo SMT. Největším úskalím

flexibilní elektroniky je, aby své vlastnosti jako je například mechanická odolnost, elektrické propojení, a výkon z hlediska přeneseného signálu uchovávala i po dobu deformace obvodu. [2,3]

Ukázka flexibilní elektroniky je vidět na obr. 1, kde je vidět ohebný displej složený z TFT.



Obr. 1: Flexibilní displej. převzato z [4]

1.1 Flexibilní substráty a jejich vlastnosti

Flexibilní substráty by měli mít v požadovaných aplikacích různé vlastnosti, dle požadavků uživatele a tyto vlastnosti se určují volbou vhodných materiálů pro danou aplikaci. Mezi nejvýznamnější vlastnosti patří,:

- flexibilita,
- tepelné a termomechanické vlastnosti,
- rozměrová stabilita,
- propustnost plynů,
- optické vlastnosti,
- hladkost povrchu,
- elektrické vlastnosti.

Neustále se vyvíjí nové sloučeniny materiálů, které zlepšují tyto vlastnosti obvodů, například: nižší váha, menší rozměry nebo menší energetická náročnost. [5]

1.1.1 Flexibilita

Flexibilita substrátu D je určena tuhostí ohybu, kterou popisuje následující vzorec,:

$$D = \frac{Et^3}{12 * (1 - v^2)} \tag{1.1}$$

kde E je Youngův modul pružnosti, t - Tloušťka substrátu a v - Poissonovo číslo. [6]

Flexibilní substráty jsou často vystavovány velkému rozpětí teplot. Při vyšších teplotách s pružností materiálu nebývá problém. Naopak při nízkých teplotách je velmi důležité, zajistit dobrou flexibilitu, neboť při velmi nízkých teplotách se materiál stává křehkým a je snadné ho zlomit. Mnoho materiálů může být pružných, pouze pokud jsou dostatečně tenké.

Požadavky na flexibilitu substrátů bývají závislé na typu aplikace a umístění. [5]

1.1.2 Tepelné a termomechanické vlastnosti

Nejvyšší dosažená teplota při výrobě musí být v mezích pracovní teploty substrátu, aby nedošlo k jeho poškození. Příliš velký rozdíl koeficientu teplotní roztažnosti mezi připojovanou součástkou a substrátem by mohl také zapříčinit poškození a tím degradovat celý systém. Tolerovaný rozdíl teplotní roztažnosti je znázorněn tímto vztahem: $|\Delta CTE * \Delta T| \leq 0.1$ % až 0.3 %, kde ΔCTE je rozdíl koeficientu teplotní roztažnosti mezi součástkou a substrátem a ΔT je teplotní odchylka během zpracování. [1,5]

I když je plast udržován pod teplotou jeho tepelné deformace, může rozdílem mezi koeficienty tepelné roztažnosti u materiálů vázaných k sobě, dojít k ohýbání. Nízký koeficient tepelné roztažnosti je proto velmi důležitým kritériem. Pro efektivní chlazení obvodu je důležitá dobrá tepelná vodivost. [1,5]

Mezi tepelné vlastnosti patří také pojem **tepelná odolnost**, která je také velmi důležitým požadavkem na flexibilní substráty a to zejména na levné plastové jako je PET. Výroba zařízení, které využívá flexibilních substrátů, zahrnuje mnoho kroků zpracování, které požadují, aby obvod v některých případech vydržel teplotu až kolem 300 ^{o}C (T_{max}). Například

desky plošných spojů vyžadující proces pokovování a substráty pro LCD displeje vyžadují technologii s tenkou fólií využívající nízkoteplotního polymorfního křemíku. Z tohoto důvodu je nutná tepelná odolnost, která vydrží vysoké teploty tohoto procesu. Pro běžné flexibilní plastové substráty, zejména ty průhledné používané v aplikacích pro displeje mohou vydržet pouze teploty do 200 ^{o}C. [1] Musí u nich být použity nízkoteplotní technologie pokovování, protože teplotám konvenčních procesů by neměli šanci odolat. U levných substrátů je tedy za potřebí použití adhezivních materiálů, které se vytvrzují pouze nízkou teplotou nebo jen pokojovou teplotou anglicky room temperature (RT). [1,5]

1.1.3 Rozměrová stabilita

Plastové substráty jsou náchylnější než skloepoxidové substráty na rozměrové změny, způsobené různými faktory, kde se výsledná deformace projeví jako ohýbání či zkreslení obrazu u zobrazovacích aplikací a to představuje velké problémy.
Faktory, které způsobují rozměrové změny, jsou:

- vlhkost,
- ohřívání a chlazení,
- vystavení chemikáliím a rozpouštědlům.

Jinými slovy, zajištění rozměrové stálosti, vyžaduje nízkou vlhkost, absorpční chemickou odolnost (zejména alkalických chemikálií) a nízký koeficient tepelné roztažnosti. [5]

1.1.4 Propustnost plynů

Flexibilní substrát by měl být chemicky neutrální a neměl by uvolňovat samovolně žádné nečistoty. Běžně požívané anorganické substráty, např. *skleněné substráty* jsou v podstatě pro plyny nepropustné.

Plastové substráty určitou propustnost plynů mají. Propustnost plynů se značně liší v závislosti na typu plastu a tloušťce. Například pro aplikace OLED, jsou použity kvalitní substráty, které brání proniknutí atmosférickým plynům. V těchto aplikacích by se hodnoty měly pohybovat pod zadanou hodnotou mezní, která je pro propustnost vodních par $\mathbf{10^{-6}\ g/m^2}$ za den a rychlost vnikání vzduchu $\mathbf{10^{-3} - 10^{-5}\ cm^3/m^2}$ za den. [1,5]

1.1.5 Optické vlastnosti

Optické vlastnosti neboli transparentnost substrátů, jsou velmi důležité pro užití v aplikacích zobrazovací techniky. Je vyžadována nejméně 90% průhlednost, při tloušťce 3 mm. [5]

1.1.6 Hladkost povrchu

V aplikacích zobrazovací techniky musí mít fóliové substráty stejnou úroveň povrchové rovnosti jako u sklo-epoxidových substrátů. Vysoká povrchová drsnost může způsobit zejména u LCD displejů zkreslení obrazu. [5]

1.1.7 Elektrické vlastnosti

Na elektrické vlastnosti jsou kladeny stále větší a větší požadavky rostoucí s přenosovou rychlostí analogových a digitálních signálů. Pro aplikace flexibilní elektroniky musí být tyto vlastnosti přizpůsobené výkonu daného výrobku. Se zvyšující se přenosovou rychlostí by měla být dielektrická konstanta a ztrátový činitel daného materiálu nízká. Další důležitou vlastností, která patří do elektrických vlastností, je izolační odpor, který je důležitý zejména pro vysoko napěťové aplikace. [6]

1.1.8 Ostatní vlastnosti

Dalšími důležitými vlastnostmi jsou v neposlední řadě i tvárnost, popřípadě i cena, která hraje velkou roli při výběru materiálu s vhodnými parametry. [1]

1.2 Používané materiály pro flexibilní substráty

Převážná část materiálů, které se používají pro flexibilní substráty, jsou polymery. Tyto materiály jsou v elektronice široce využívány jako konstrukční materiály. Široké využití těchto materiálů je ve snadnosti jejich tvarovému přizpůsobení a splnění tak i náročných požadovaných vlastností. Mohou být navrženy pro široký rozsah aplikací. Jedná se zejména o:

- polykarbonát (PC),
- polyethylentereftalát (PET),
- polyethylennaftalát (PEN),
- Kapton,
- polyimid (PI),
- polyarylát (PAR),
- papír,
- skloepoxid.

Výhodou těchto materiálů jsou nižší náklady na výrobu, ve srovnání například s kovy nebo keramikou. [7]

1.2.1 Polykarbonát (PC)

Polykarbonát je amorfní polymer vytvořený prostřednictvím polykondenzace s teplotou tání přibližně 225 ^{o}C a teplotou skelného přechodu (Tg) 150 ^{o}C.

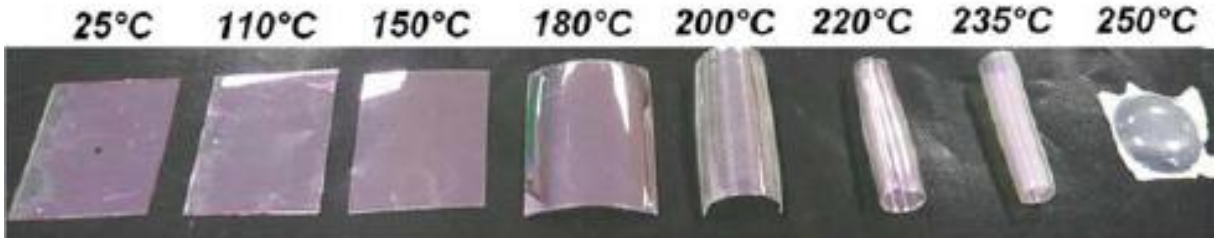
Zatímco PC je vynikající, pokud jde o tuhost, odolnost proti nárazu a jeho elektroizolačním vlastnostem, výraznou slabinu má v chemické odolnosti. Vzhledem k tomu, že PC je amorfní, jeho optické vlastnosti jsou lepší než vlastnosti krystalických polymerů (jako jsou například PET) a proto se často používá u LCD displejů. [5]

1.2.2 Polyethylentereftalát (PET)

PET je polyesterová pryskyřice získaná polykondenzací kyseliny tereftalové a etylenglykolu. PET má oproti polyimidu horší tepelné vlastnosti. Obr. 2 ukazuje jaký vliv má teplota na substráty z PET. Velké uplatnění nachází tento materiál díky jeho ceně, která se

pohybuje okolo 200 Kč/kg a používá se u některých desek plošných spojů, které nevyžadují pájení.

Kromě toho PET je průhledný, má vyvážené mechanicko-fyzikální vlastnosti, a proto je používán v širokém spektru aplikací včetně displejů a solárních článků. [5]



Obr. 2: Vliv teploty na změnu tvaru PET fólie. převzato z [4]

1.2.3 Polyethylennaftalát (PEN)

PEN je ve struktuře velice podobný PET. PET má ve struktuře benzen, zatímco PEN – naftalen. PEN je průhledný podobně jako PET, navíc ale má vetší tepelnou odolnost (118 ^{o}C). Tato odolnost substrátů stále nestačí pro výrobu TFT-LCD. [5]

1.2.4 Kapton

Kapton byl první polyimid, který byl uveden na trh v šedesátých letech firmou DuPond. Vyrábí se polykondenzací z aromatického dianhydridu a aromatického diaminu. Vzniklý před polymer se buď vytvrdí při vyšší teplotě, čímž vznikne folie nebo se rozpustí ve vhodném rozpouštědle a vznikne lak či lepidlo, které získá konečné vlastnosti vytvrzením při zvýšené teplotě. Hlavní vlastnosti Kaptonu jsou: velmi široký rozsah teplot (od -269° C do +400°C), vysoká chemická odolnost, odolnost proti rozpouštědlům, palivům a olejům. Dále disponují vysokou odolností proti kyselinám a alkáliím. Kromě flexibilních substrátů se Kapton používá v tlakových spínačích, senzorech, u izolačních podložek, fixací motorových vinutí, pro výroba kondenzátorů a tak dále. [8]

1.2.5 Polyimid (PI)

Polyimid je polymer získaný kondenzací diaminu a dianhydridu. Polyimid může mít různé vlastnosti, které se mění změnou poměru mezi diaminem a dianhyridem.

Nejdůležitější vlastnost PI je vysoká tepelná odolnost a odolnost proti rozpouštědlům. Nejzákladnější polyimid ODA/PMDA (oxydianiline/pyromellitic dyanhydride) má nejvyšší tepelnou odolnost ze všech polymerů s teplotou skelného přechodu od 400 ^{o}C do 500 ^{o}C. Má také výbornou tuhost, flexibilitu a elektrické vlastnosti. Vzhledem k tomu, že polyimid je sice průhledný ale tónovaný do hněda, nelze ho použít v aplikacích, které vyžadují transparentnost (např. displeje). U aplikací desek plošných spojů, které nevyžadují transparentnost, ale vyžadují vysokou úroveň tepelné odolnosti, je polyimid materiálem číslo jedna, již od roku 1970. [5]

1.2.6 Polyarylát (PAR)

PAR má teplotou skelného přechodu 193 ^{o}C a je více tepelně odolný než PC, který má stejnou strukturu. Stejně jako PC, PAR má vynikající vlastnosti (uvedeny výše u PC) a navíc odolnost proti hoření. Tento materiál je sice průhledný, ale vykazuje nažloutlou barvu, takže není vhodný pro zobrazovací displeje. [5]

1.2.7 Papír

Papír se využívá v nejlevnějších substrátech pro „low cost“ aplikace, kde není kladen velký důraz na spolehlivost a dlouhodobé využití. Jedná se tedy zejména o aplikace bez vysokých teplotních procesů.

1.2.8 Skloepoxid

Všechny materiály pro flexibilní substráty uvedeny v této kapitole, byly organického původu. Skloepoxid je kombinací materiálů původu anorganického a organického má v podstatě uspokojivé parametry téměř ve všech aspektech, jako například – rozměrová stabilita, optické vlastnosti a nepropustnost plynů, ale samotné sklo postrádá jednu z hlavních vlastností pro flexibilní substráty a tou je flexibilita.

Tento materiál je složen z extrémně tenké skleněné plochy, která je pokryta organickým filmem. Například Toshiba vyvinula technologii, která snižuje tloušťku skleněného substrátu až na cca 0,1 mm a spojuje ho s plastovou fólií. Tyto substráty jsou využity pro LCD. Sklo se tedy ve flexibilní elektronice používá, ale pouze v kombinaci s materiálem, který flexibilitu zajišťuje. [5]

2. Adheziva

Adheziva lze rozdělit z pohledu objemového podílu vodivého plniva do dvou hlavních skupin a to na **elektricky vodivá** (ECA) a **elektricky nevodivá** (NCA). Elektrický vodivá adheziva se dále mohou dělit na izotropicky vodivá (ICA) a anizotropicky vodivá (ACA). Znázornění struktury těchto materiálů ukazují obr. 3 a obr. 6.

Adheziva mohou být také rozdělena do dvou různých typů, pokud jde o strukturu, a to na termoplasty a reaktoplasty. Zatímco termoplasty se za působení teploty stávají tvárnými a to i při teplotách přesahujících Tg, reaktoplasty se za zvýšené teploty vytvrzují a mohou být tvarovány pouze během procesu vytvrzování. Hlavní složkou těchto typů lepidel je epoxidová pryskyřice. Jedná se o polymerní materiál ve formě pasty, do které se u vodivých adheziv přidávají částice vodivých kovů. [7]

Vytvrzení je chemická reakce, při které vznikají chemické vazby mezi jednotlivými molekulami. Takto sesíťovaný materiál je velmi tvrdý a chemicky i tepelně odolný, protože původní molekuly jsou prostorově vázány vzniklou sítí chemických vazeb. Z hlediska chemického je vytvrzení reakcí, kterou umožňují přítomné například epoxidové vazby polymerací epoxidových skupin. Substráty po vytvrzení mají skvělou adhezi, jsou korozivzdorné, odolné vůči rozpouštědlům a ohebné. [9]

Termoplastická lepidla se prodávají ve formě past nebo tenkých filmů a mohou být také naplněny vodivými částicemi. Mezi dva hlavní vodivé materiály pro tyto částice patří zlato nebo stříbro, které je obalené polymerovou vrstvou.

Stříbro je považováno za zdaleka nejpopulárnější vodivé plnivo. Další, méně používané materiály včetně zlata (Au), jsou například nikl (Ni) a měď (Cu). Všechny tyto prvky jsou mimo jiné používány v ECA. Stříbro má nejvyšší elektrickou a teplenou vodivost ze všech kovů. Je také jedinečné díky povaze jeho vodivého oxidu (Ag_2O) oproti většině běžných kovů, jejichž oxidy jsou dobré elektrické izolanty. Vodivá adheziva z niklu a mědi nemají dobrou stabilitu vodivosti kvůli jejich snadné oxidaci. Ani přidáním antioxidantů nelze u vodivých adheziv s příměsí mědi zamezit velkému nárůstu rezistivity, ke které dochází po dobu stárnutí a to především za zvýšené teploty a tlaku. Kompozitní materiály naplněné čistými částicemi stříbra často vykazují velmi dobrou elektrickou vodivost, i když jsou

vystaveny zvýšené teplotě, vlhkosti nebo tepelnému cyklování. Ovšem tyto vlastnosti nejsou tak dobré v případě postříbřených kovů. Lze předpokládat, že působení tepla a mechanické energie umožní částicím bližší kontakt, který například u *postříbřené mědi* vyvolá nátěrovou nespojitost ve spoji mědi a postříbření, což zapříčiní korozi či oxidaci. [7]

Většinou jsou plniva smíchána s tvrdými polymery s cílem poskytnout větší pevnost při rychle se zvyšujících teplotách. [7]

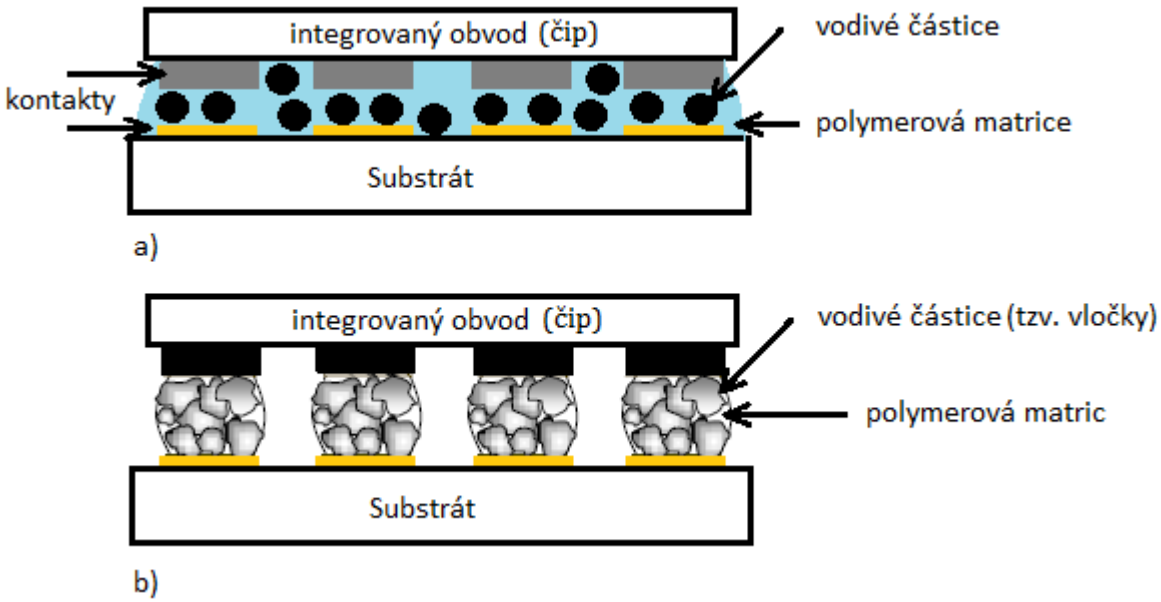
Pro vytvoření kontaktu mezi substrátem a lepeným čipem existují různé možnosti. Při použití adheziv se jedná většinou o povrchovou montáž. Jedná se tedy o technologiích chip on glass (COG) nebo chip on flex (COF) v rámci flexibilní elektroniky a technologii flip-chip. [10]

2.1 Elektricky vodivá adheziva (ECA)

Elektricky vodivá adheziva plní dvě základní funkce. Podobně jako jiné typy lepidel, tyto materiály poskytují fyzické spojení mezi dvěma povrchy a dále elektrické propojení mezi lepeným obvodem a substrátem. Tato funkce je dosažena kompozitním materiálem složeného z kovových částic, které jsou rozptýlené v matrici lepidla.[10] Strukturu vodivých lepidel znázorňuje obr. 3.

Izotropní vodivá lepidla zajišťují vedení elektřiny ve všech směrech stejně. Pro použití těchto lepidel v aplikacích s propojením Flip-chip musí být materiál aplikován přímo na místě spoje, aby došlo k dokonalému propojení, a zároveň nesmí dojít ke zkratu mezi vodivými cestami na substrátu.

Anizotropní vodivé adhezivní materiály se připravují rozprašováním elektricky vodivých částic na adhezivní matrici. Koncentrace příměsí musí být dostatečně vysoká, aby se dosáhlo spolehlivé vodivosti. [2,10]

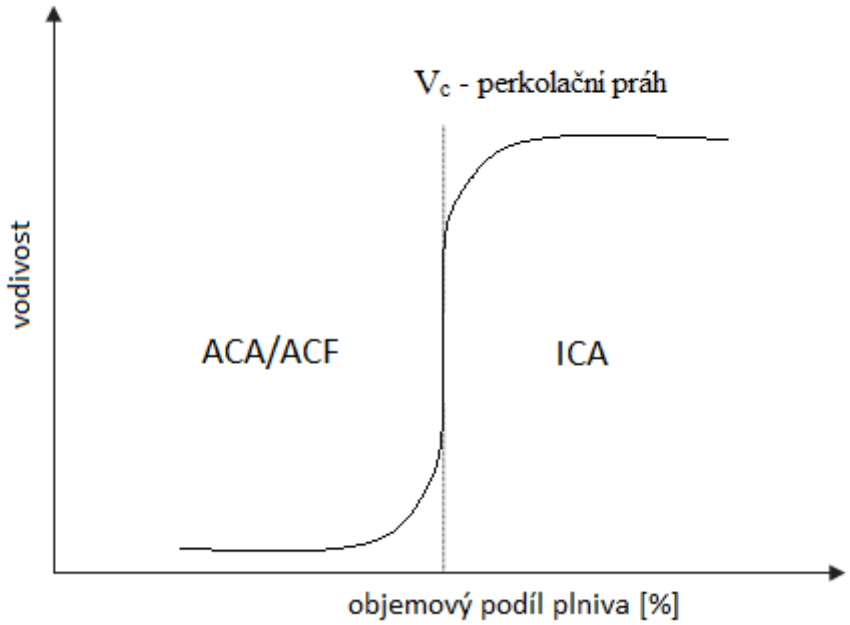


Obr. 3: Struktura vodivých adheziv a) ACA, b) ICA. [11]

Rozdělení elektricky vodivých adheziv vychází z perkolační teorie znázorněné na obr. 4. Perkolační práh závisí na tvaru a velikosti vodivých částic, ale typicky se pohybuje v rozmezí 15 % až 25 % objemového podílu plniva v lepidle.

U izotropních lepidel přesahuje objemový podíl částic perkolační práh, což zajišťuje vodivost ve všech směrech.

U anizotropních lepidel je objemový podíl výrazně pod perkolačním prahem, kde nízký podíl vodivé složky není dostatečný pro přímé propojení vodivých částic, blíže v kapitole 2.1.2 Anizotropní vodivá adheziva. [12]



Obr. 4: Znázornění Perkolační teorie. [2]

ICA a ACA obsahují určité množství vodivých částic. Pro tyto dva typy lepidel se liší i velikost použitých částic 2-5 µm pro ICA a 5-7 µm pro ACA jak uvádí Rongwei Zhang a spol. [11] Tyto hodnoty nemusí být za každou cenu směrodatné, například Yi Li a spol. uvádějí hodnoty velikosti částic 1-10 µm pro ICA a 3-5 µm pro ACA. [12]

2.1.1 Izotropní vodivá adheziva (ICA)

ICA často nazývána „*polymerními pájkami*“ se vyrábějí nejčastěji ve formě past z kompozitu polymerní pryskyřice a vodivého plniva, které umožňuje vodivost ve všech směrech, stejně jako u kovových pájek. Vodivé plnivo u izotropních adheziv může mít různé tvary a velikosti ale nejčastěji se vyžívá tvar takzvaných „*vloček*“ jak je vidět na obr. 3b), kvůli jejich vysoké vodivosti. Vodivé částice tohoto tvaru mají dobrou schopnost velmi snadno navázat vzájemný kontakt. Vodivost mezi částicemi je tedy zajištěna jejich vzájemným dotykem, proto také podíl vodivých částic musí být větší než podíl u ACA, jejichž plniva zajišťují vodivost pouze v jednom směru.

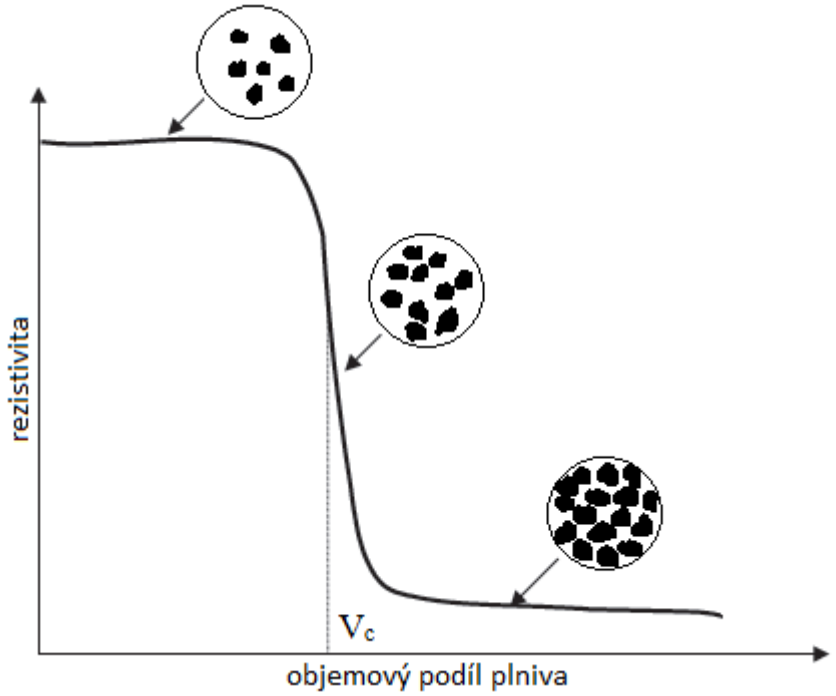
Adhezivní matrice slouží k vytvoření elektrického a mechanického kontaktu. Adhezivní polymerové matrice mohou být používány v ICA, jak z materiálů termoplastických, tak reaktoplastických.

Hlavními zástupci termoplastů jsou: **polyimid**, maleimid a fenolová pryskyřice. Pro reaktoplasty jsou hlavními zástupci **epoxid**, **silikon**, **polyuretan** a ester kyanátu. Velkou výhodou termoplastických lepidel je to, že jsou opakovatelně zpracovatelná a mohou být snadno opravena. Jejich hlavní nevýhodou je degradace adheze při vyšších teplotách. Další nevýhodou, pokud jde o izotropní lepidla, je jejich obsah rozpouštědel, kvůli kterým během zahřívání vznikají v kompozitu malé dutiny způsobené odpařováním rozpouštědla. Většina používaných izotropních vodivých adheziv obsahuje reaktoplastickou pryskyřici díky jejím vyváženým vlastnostem, kterými jsou např,:

- velká síla adheze,
- dobrá chemická odolnost,
- odolnost proti korozi,
- nízká cena.

Do této reaktoplastické pryskyřice ale také bývá často přidávána část termoplastické složky, která umožňuje změkčení lepidla pro jeho přepracování či opravu za zvýšené teploty. [10,12]

Koncentrací plniva lze ovlivnit elektrické vlastnosti ICA. Jak je vidět na obr. 5, při nízké koncentraci vodivých částic má systém velkou rezistivitu, která s postupným přidáváním vodivých částic klesá nejdříve velmi pomalu až do kritické koncentrace plniva, označenou jako V_c (perkolační práh). Předpokládá se, že všechny vodivé částice jsou navzájem v kontaktu a vytvořily trojrozměrnou síť. Další zvyšování koncentrace za tímto prahem V_c ovlivňuje rezistivitu pouze nepatrně, tudíž není nutná.
Obvyklý objemový podíl vodivého plniva pro ICA bývá v rozmezí 25 % až 30 %. Ve spoji zajištěném pomocí ICA polymerní pryskyřice poskytuje mechanickou stabilitu a vodivé plnivo umožní elektrické propojení. Hlavním cílem výroby ICA je, aby se dosáhlo vysoké elektrické vodivosti bez nepříznivého ovlivnění mechanických vlastností. Toto zajišťuje polymerní složka adheziva. [7,12]



Obr. 5: Závislost koncentrace plniva na rezistivitě. [7]

Celý proces lepení pomocí ICA lze shrnout v následujících krocích:

- aplikace izotropní vodivé pasty přesně na místa, která mají být elektricky spojena,
- vyrovnání hrbolů a nerovností po nanesení,
- vytvrzení při teplotě 175 ^{o}C po dobu dvou minut,
- aplikace ochranného materiálu (underfill) pro kompenzaci rozdílu teplotních koeficientů obou spojovaných ploch,
- vytvrzení ochranného materiálu. [10]

2.1.2 Anizotropní vodivá adheziva/filmy (ACA/ACF)

Anizotropní vodivá adheziva se vyrábí ve formě past nebo filmů a jsou obvykle složena z polymerové matrice s vodivým aditivem. Tuto příměs tvoří podobně jako u ICA vodivé částice, nebo pokovené polymerní kuličky. ACA/ACF poskytují pouze jednosměrnou elektrickou vodivost ve svislém směru osy Z. Tato směrová vodivost je dosažena za použití relativně nízkého obsahu vodivého plniva a to 5 % až 20 % objemu celkového kompozitu. Právě tento nízký obsah vodivého plniva je nedostatečný pro kontakt mezi částicemi a zabraňuje vodivosti ve vodorovném směru X-Y. Lepidla s vodivostí ve svislém směru ve formě pasty nebo tenkého filmu mohou být nanesena po celé délce spojovaných kontaktů,

které mají být propojeny. Toto je hlavní rozdíl oproti adhezivům ICA, které se nanáší pouze na konkrétní místa, která mají být spojena, jak znázorňuje obr. 3. V propojení ACF jsou vodivé částice zachyceny ve svislém směru, který umožňuje, aby se kovové vrstvy vodivých částic vodivě propojily a zároveň zabránily zkratu v osách X-Y. Vodivá cesta je vytvořena mechanickým kontaktem mezi vodivými částicemi a substrátem. Tyto kontakty jsou zachovány silou adheze vytvrzeného lepidla.

ACF jsou používány pro vysokou hustotu propojení v displejích z tekutých krystalů (LCD). [7]

Anizotropní adheziva se obecně vyrábí buď na bázi reaktoplastů nebo termoplastů. Termoplastické materiály jsou tvrdé pod teplotou skelného přechodu (T_g) polymeru. Při teplotě přesahující T_g polymery vykazují vodivé charakteristiky. V případě aplikace tohoto typu materiálu je nutné zajistit, aby teplota při montáži převýšila hodnotu T_g, což je nutné k dosažení dobré adheze.

Reaktoplastická adheziva jako epoxidy a silikony tvoří troj-rozměrně propojenou strukturu, pokud jsou vytvrzovaná za určitých podmínek. Proces vytvrzení využívá zvýšené teploty, UV záření a přidaného katalyzátoru (není vždy nutný), který urychluje chemickou reakci. Jakmile je zesíťování dokončeno, další tváření již není možné. Vytvrzení reaktoplastických materiálů je nevratné, což brání demontáži či opravě. Na druhou stranu tyto adheziva disponují **velkou silou adheze**, kterou si udržují i při vysokých teplotách a deformaci. [7]

Proces lepení pomocí ACA lze opět shrnout do několika kroků:

- nanesení ACA/ACF na celou plochu substrátu
- vyhlazení nerovností
- vytvrzení probíhá při teplotě 175 ^{o}C na 10 sekund pro tenký film a 2 minuty pro pastu pod tlakem 20 kg/cm^2 [10]

2.2 Materiály pro ECA

Jedny z nejvíce využívaných materiálů pro elektricky vodivá adheziva jsou:

- silikony,
- epoxidy,
- polyuretany,
- poyimidy.

2.2.1 Silikony

Silikony (polysiloxany) jsou anorganicko-organické polymery, kde základ je tvořen řetězcem, ve kterém se střídají atomy křemíku a kyslíku. V elektronice se tento materiál uznává již dlouhou dobu, a to především díky jeho vlastnostem, snadnému zpracování a iontové čistotě. Nejdůležitějšími vlastnostmi je pružnost, teplotní stabilita a to, že na sebe váží vlhkost ve velmi malé míře. Tyto vlastnosti se skvěle hodí pro aplikace v odvětví právě mikroelektroniky a flexibilní elektroniky, do níž spadá práce s adhezivy. Elastická povaha silikonů ve spojení se stálostí vlastností v širokém rozsahu teplot poskytuje velmi dobrou ochranu proti termomechanickým šokům, způsobených rozdílnou teplotní roztažností a smršťováním lepených materiálů. Pokud jde o tepelné stárnutí materiálu, silikon má prakticky neomezenou stabilitu při teplotách v intervalu od −60 °C do + 180 °C (speciální typy -100 až +260 °C, krátkodobě až +320 °C).

Silikony mají, stejně jako většina polymerních materiálů, velmi dobré dielektrické vlastnosti. Jsou to velmi špatné vodiče, takže je nutné při použití silikonu ve vodivých adhezivech použít vodivé částice jako plnivo do silikonové matrice. Tím se spojí vlastnosti flexibility a elektrické vodivosti.

Vnitřní odpor silikové adhezivní směsi se mění v závislosti na míře přidané směsi vodivého plniva. [7,13]

2.2.2 Epoxidy

Epoxidy představují jedny z nejvyužívanějších polymerních materiálů v elektronice. Tato třída materiálů je známa již od roku 1930. Mezi jejich jedinečné chemické a fyzikální vlastnosti patří vynikající chemická odolnost a odolnost vůči korozi, skvělá přilnavost a adheze, tepelná izolace, malé smršťování při vytvrzení a přiměřené náklady na materiál. Právě

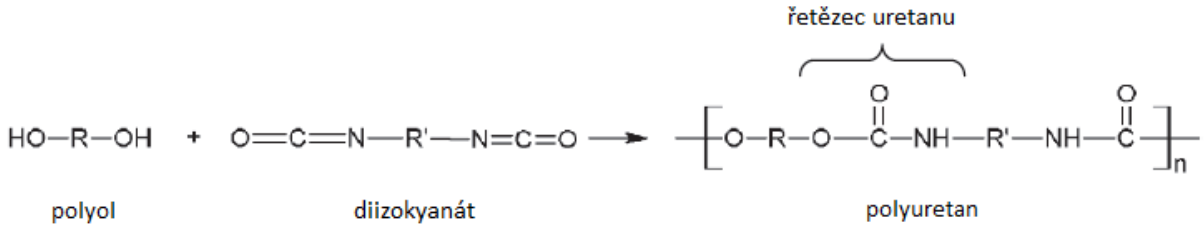
tyto vlastnosti učinily z epoxidových pryskyřic v elektronických aplikacích velký trend. Jejich nevýhodou je menší tuhost oproti jiným materiálům.

Doba vytvrzení záleží na viskozitě daného adheziva, která se dá ovlivnit v chemickém řetězci tohoto lepidla. Občas je doba vytvrzení příliš dlouhá, a tak se používá urychlovač neboli katalyzátor. K vytvrzení dochází nejčastěji přidáním tzv. tvrdidla a to buď za pokojové, nebo zvýšené (až 200 °C) teploty. Jako tvrdidla se nejčastěji používají polyaminy, anhydridy polykarboxilových kyselin, polythioly nebo tzv. formaldehydové pryskyřice. [2,7]

V poslední době se začaly používat plniva epoxidových pryskyřic ve formě nanočástic SiO_2/Al_2O_3, které mají proti plnivům z větších částic výhody jak v mechanických, tak v dielektrických vlastnostech kompozitu. [14]

2.2.3 Polyuretany

Polyuretany zkráceně PU, jsou jakékoliv polymery, skládající se z řetězce organických jednotek, spojených uretanovými vazbami. PU polymery jsou vytvořeny reakcí monomeru, který obsahuje alespoň dvě izokyanátové funkční skupiny s jiným monomerem skládajícím se alespoň ze dvou alkoholových skupin v přítomnosti katalyzátoru. PU byl poprvé vyvinut Otto Bayerem v roce 1920. Rané studie byly založeny na použití diizokyanátu, dilelu a polyolu (části chemického řetězce PU), jak je vidět na obr. 6. Struktura PU může být navržená změnou bloků a rozšířením chemického řetězce. Z tohoto hlediska je výhodou to, že mohou být navrženy a syntetizovány za účelem zadaných požadavků. [8] Ať už chování měkké, tvrdé nebo flexibilní má na starosti právě tato část řetězce zvaná diizokyanáty. Ty mají obrovský význam pro řadu průmyslových aplikací jako je výroba flexibilní pěny, tuhých pěn, různých typů elastomerů atd. PU má velmi vysokou pevnost, tvrdost a prodloužení. Je to jeden z nejtěžších elastomerů, které se dnes v elektronice používají. [2]



Obr. 6: Chemický řetězec polyuretanu. převzato z [7]

Elektricky vodivá adheziva na bázi PU byla vyvinuta pro splnění všech požadavků flexibilních propojení, včetně velmi nízké rezistivity $=\cdot 10^{-5}\ \Omega\cdot$cm, který je udržován i při ohýbání, vlnění a kompresi. Mezi další požadavky patří dobrá přilnavost k různým flexibilním substrátům. PU-ECA umožňují různé propojovací techniky ve flexibilní a tištěné elektronice. [7]

Na rozdíl od silikonů a epoxidů mohou elektricky vodivá adheziva na bázi polyuretanu splnit lépe některé požadavky. Silikony jsou limitovány jejich objemovým odporem větším než $2\cdot 10^{-4}\ \Omega\cdot$cm a epoxidy jejich nižší tuhostí. [2]

2.2.4 Polyimidy

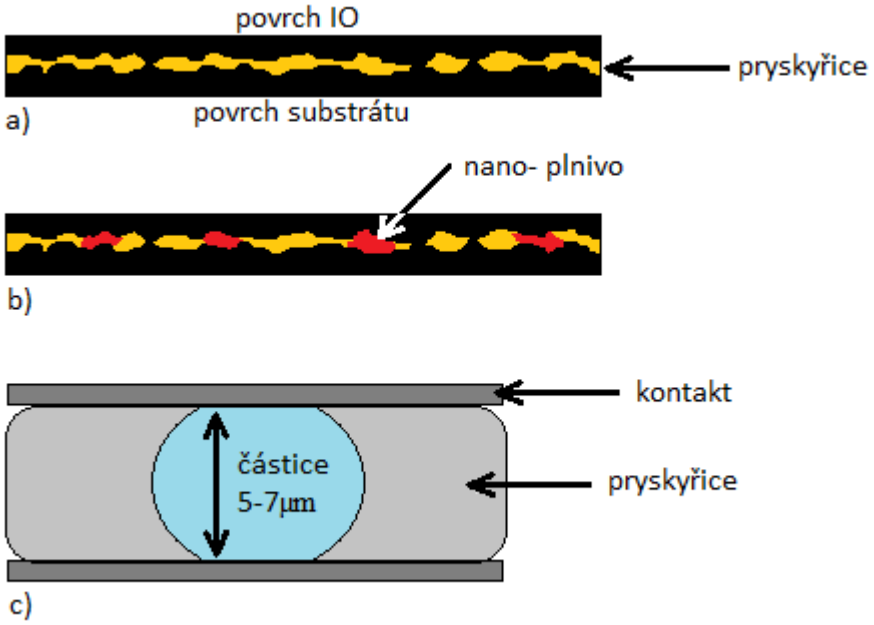
Polyimidy byly poprvé vyvinuty v roce 1950. Během několika posledních desetiletí začal být pro aplikace v elektronice o tento materiál obrovský zájem. Skvělá teplotní stabilita (až do 600 °C) a další vlastnosti uvedené již v kapitole **1.2.5**., charakterizují tuto skupinu materiálů. Používají se od leteckého průmyslu až po mikroelektroniku a flexibilní elektroniku. Tvoří vynikající mezivrstvu dielektrických izolátorů. Další důležitá ještě nezmíněná vlastnost je vynikající stupeň krytí, což představuje velmi významnou složku výroby vícevrstvých struktur integrovaných obvodů. [7]
Dále používané materiály mohou být kombinací výše zmíněných materiálů v této kapitole.

2.3. Nevodivá adheziva (NCA)

Jako alternativa k ICA a ACA, byla nedávno představena technologie vodivého spojování pomocí nevodivých adheziv (non-conductive adhesives), které nemají žádný podíl vodivé složky. Místo vodivé složky využívají relativně velkého tlaku v kombinaci s teplem, což umožňuje přímé propojení čipu integrovaného obvodu a substrátu jak je znázorněno na obr. 7 a), b) společně s porovnáním velikosti ACA a NCA c). Nerovnost černých povrchů, mezi kterými je pryskyřice nebo film znázorňuje nerovnost připojovaných kontaktů. Tyto kontakty je nutné pro vodivé spojení stlačit k sobě již zmíněným velkým tlakem okolo 30 MPa. K vyplnění mezer se mohou použít nano-plniva zobrazené na obrázku 7 b), které se používají ve velmi malém množství oproti ACA tj. cca 0,1 % objemového množství nano-částic. Tyto částice mohou zlepšit elektrickou vodivost a napomáhají snížit tlak

v porovnání s normálním procesem bez nano-částic. Velikost nano-částic se pohybuje okolo 5-20 nm.

Po dobu aplikace tepla a tlaku trvajícího 5-20 sekund, vznikne přímý fyzický kontakt mezi spojovanými povrchy a vytvoří se trvalé spojení vytvrzením pryskyřice nevodivého lepidla. [12]



Obr. 7: Struktura nevodivých adheziv a) NCA b) NCA s nano-plnivem, c) detail plniva ACA. [7]

Nevodivá adheziva se také vyrábí jako tenké filmy (NCF) z termoplastů nebo tzv.‘‘B-stage“ epoxidů, které nejsou vyplněny žádnými částicemi, jako tomu bylo u vodivých adheziv. [7]

B-stage epoxid, který je mimochodem používán i u ACA, je systém, kde reakce mezi pryskyřicí a tvrdidlem není kompletní. Vytvrzení je tedy pouze částečné. Je-li tento systém následně znovu ohřátý na určitou teplotu, reakce vytvrzení se dokončí. Existuje mnoho výhod pro tento systém např. zvýšení výkonu adheziva, snížení nákladů, praktičtější aplikace. [15]

V poslední době jsou NCA/NCF považovány za nízkonákladovou cestu pro technologie flip-chip. Vodivé spoje s nevodivými adhezivy poskytují celou řadu výhod, v porovnání s ostatními lepícími technikami. Spoj NCA se snadno vyvaruje zkratu, není omezen velikostí částic. Další vlastnosti jsou nákladová nenáročnost, jednoduchost zpracování, kompatibilita s širokou škálou materiálů a nízkou teplotou vytvrzení. [7]

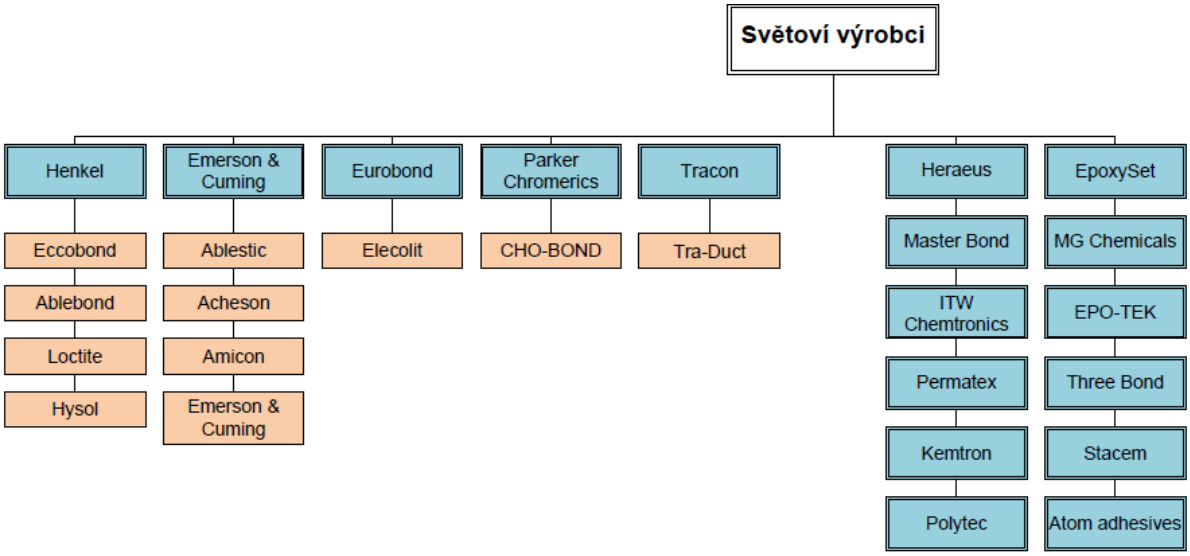
Elektrické připojení nevodivého lepidla/filmu, je dosaženo nanesením lepidla mezi dva kontakty, které jsou následně stlačeny k sobě za zvýšeného tlaku a teploty. Tvorba kvalitního kontaktu závisí na drsnosti povrchu obou kontaktů. Pokud se přiblíží dva povrchy k sobě bez tlaku a zvýšené teploty, je k dispozici velmi malé množství přímých kontaktních míst, které umožňují vést proud. Pokud jsou ale díly k sobě stlačeny v průběhu procesu lepení, tedy za zvýšené teploty a tlaku, počet kontaktních míst se zvýší. Děje se tak vlivem elasticity nebo flexibility příslušných povrchů. [7]

3. Přehled elektricky vodivých lepidel

V této kapitole je zpracován vizuální přehled o rozdělení ECA podle typu vytvrzení, výrobců a jejich komerčně dostupných produktech. Komerčně dostupné produkty jsou zpracovány do přehledné tabulky s veškerými informacemi, které bylo možné zjistit.

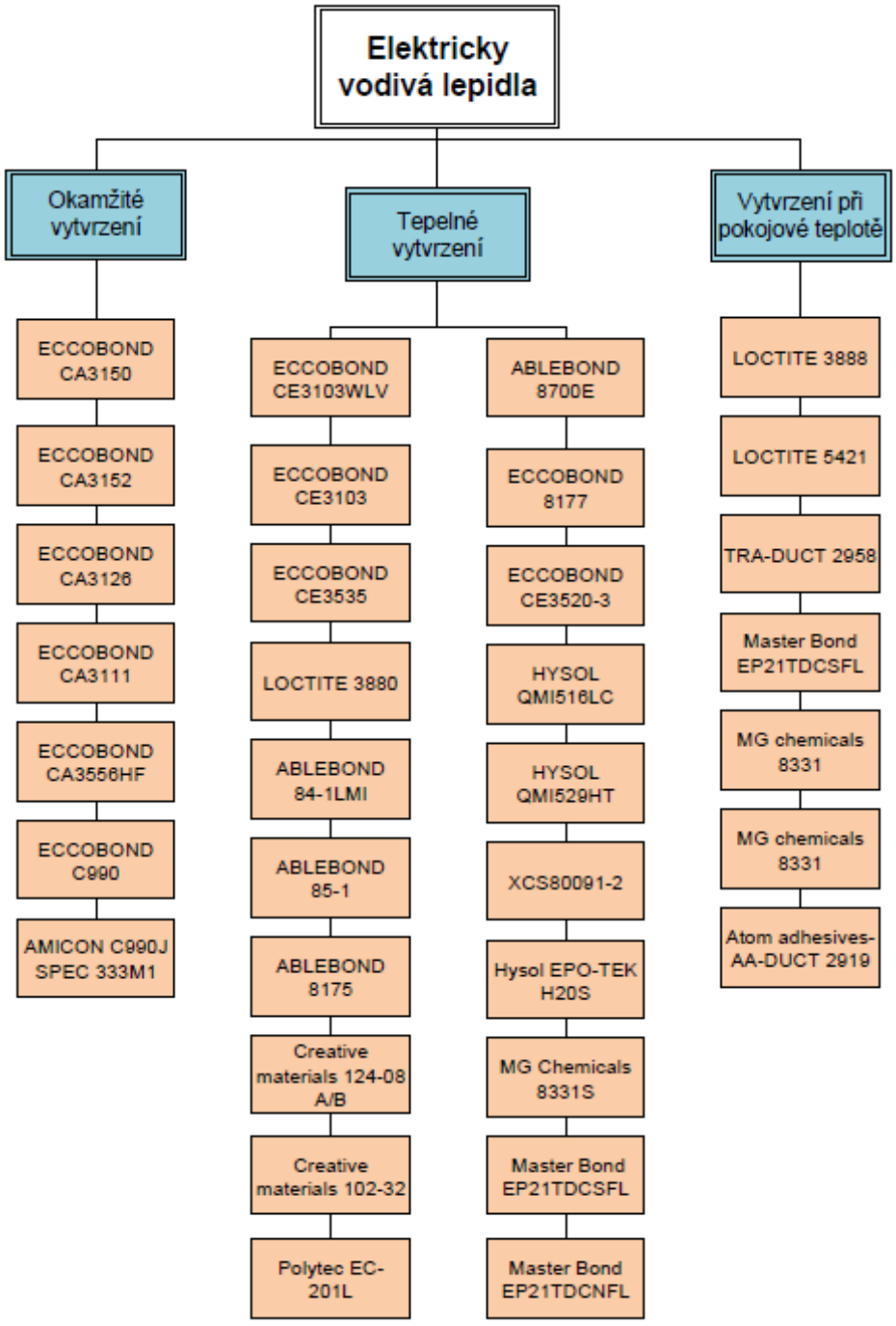
3.1 Přehled výrobců elektricky vodivých lepidel

Na tomto schématu znázorněném na obr. 8 je vidět rozdělení světových výrobců, kteří jsou znázorněni v kolonkách s modrou barvou. Kolonky s barvou oranžovou znázorňují názvy jednotlivých značek, které spadají po určitého výrobce.



Obr. 8: schéma výrobců ECA

3.2 Přehled a rozdělení elektricky vodivých lepidel



Obr. 9: schéma rozdělení ECA podle typu vytvrzení

Schéma, které je na obr. 9 znázorňuje rozdělení ECA podle typu vytvrzení. Typy vytvrzení jsou znázorněny modře, jedná se tedy o tři typy vytvrzení, okamžité, tepelné a vytvrzení při pokojové teplotě. Oranžově jsou znázorněny jednotlivé komerčně dostupné produkty lepidel.

3.3 Přehled vlastností elektricky vodivých lepidel

Celkový přehled znázorněn v tab. 1, obsahuje nejdůležitější vlastnosti jednotlivých komerčně dostupných produktů. Informace obsažené v tabulce jsou nejčastěji zjištěné z katalogových listů, které někdy neposkytují veškeré informace o produktech. V případě nedostatku informací o produktech by se měly tyto informace dát zjistit od výrobců nebo dodavatelů ECA, ale žádostem o informace ohledně produktů zejména zahraniční firmy nevěnují příliš velkou pozornost. V tabulce jsou modře zvýrazněny produkty, které byly testovány v praktické části.

V prvním sloupci v tab. 1 se nachází přesný název produktu. Druhý sloupec stručně popisuje charakteristiku lepidel. Třetí sloupec podává informaci a typu vytvrzení daného lepidla, které již bylo naznačeno ve schématu na obr. 9. Následuje čtvrtý sloupec, kde jsou zobrazena pravidla vytvrzení. Další sloupec informuje o viskozitě lepidla, což je *„fyzikální veličina, udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny“* [16]. Viskozita je v tabulce uvedena v jednotce cPs (tzv. centipoise), ale běžněji se uvádí v jednotce newton sekunda na metr čtverečný - $N \cdot s \cdot m^{-2}$, která je tisíckrát menší než jednotka cPs, z čehož vyplývá, že 1 cPs = 0,001 $N \cdot s \cdot m^{-2}$ [17]. Pátý sloupec popisuje měrný odpor neboli rezistivitu lepidla. Čím je tato hodnota menší, tím lepší je vodivost lepidla. Šestý sloupec s názvem teplotní odolnost udává teplotní rozsah, který jsou lepidla schopna vydržet bez poškození. V dalším sloupci jsou popsány hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti, jejíž jednotka je ppm/°C a je rovna jednotka/jednotka/°C × 10^{-6} [18]. Osmý sloupec podává informaci o hodnotách tepelné vodivosti. Další sloupec vypovídá o různých pevnostech lepidel v různých směrech, kde platí následující vztah jednotek N/mm^2 = MPa [17]. Teplota skelného přechodu uvedená ve sloupci 10, udává mez přechodové oblasti mezi skelným a kaučukovým stavem, ve které dochází k prudké změně některých vlastností (např. pevnost, optické vlastnosti) [19]. Následuje sloupec s hodnotami prodloužení v procentech jednotlivých lepidel. Sloupce 12 a 13 podávají bližší informace o skladovatelnosti a životnosti po otevření lepidla. V posledním sloupci jsou uvedeny zjištěné ceny jednotlivých lepidel. Informace o cenách byly nalezeny na internetu nebo byly zjištěny od jednotlivých výrobců.

Tab. 1 Přehled vlastností vodivých adheziv

Název Produktu	Obecný popis	Typ vytvrzení	Doba/teplota vytvrzení	Viskozita (cPs)	Měrný odpor [Ω/cm]	Teplotní odolnost [C°]	CTE [ppm/°C]	Tepelná vodivost [W/m-K]	Pevnost (specifikace pevnosti) [MPa]	Teplota skelného přechodu (tg) [C°]	Prodloužení [%]	Doba životnosti (teplota skladování)	Doba zpracovatelnosti	Cena
ECCOBOND CE3103WLV	Epoxidové, plnivo-stříbro, alternativa za Pb pájky	tepelné	3 min. při 150 C°	15 000-25 000	<0,0008	150 operační teplota	45 pod tg, 225 nad tg	-	13 (lap shear strenght)	114	-	6 měsíců při -40 C°	3 dny	-
ECCOBOND CE3103	Jenosložkové, plnivo-stříbro, alternativa za Pb pájky, vhodné pro SMT připojení,	tepelné	5 min. při 125 C°	40 000-60 000	<0,0007	-	45 pod tg, 225 nad tg	-	13 (lap shear strenght)	109	-	6 měsíců při -40 C°	3 dny	-
ECCOBOND CE3535	Jednosložkové, plnivo-stříbro, epoxidové, pro připojování SMT	tepelné	1 hod. při 150 C°	50 000	<0,0003	-	25 pod tg, 253 nad tg	4,9	-	65	-	4 měsíců při -40 C°	6 hodin	-
LOCTITE 3880	Jednosložkové, plnivo-stříbro, epoxidové, Vhodné pro spojování pomocí SMT, flexibilní	tepelné	15 min. při 130 C°	100 000	0,008	-	45 pod tg, 220 nad tg	-	25 (tensile strenght)	40-64	1,3 až 3,4	6 měsíců při 0 C°	-	2633 Kč za 10,6 g
ABLEBOND 84-1LMI	Plnivo-stříbro, epoxidové, ideální pro aplikace s automatickým dispenzerem pro mikroelektroniku	tepelné	4 min. při 130 C°	28 000	0,00002	-	55 pod tg, 150 nad tg	2,4	12 (lap shear strenghtAl na Al)	103	-	12 měsíců při -40 C°	24 hodin	1748 Kč (£45.92) za 10,8 g
ABLEBOND 85-1	Epoxidové, plnivo-zlato	tepelné	1hod. při 150 C°, 2hod. při 125 C°	-	0,0008	-	52 pod tg, 20 nad tg	3,2	-	90	-	12 měsíců při -40 C°	2 dny	-
ABLEBOND 8175	Epoxidové, tepelně vodivé, absorbuje namáhání, plnivo-stříbro, alternativa za Pb pájky	tepelné	30 min. při 150 C°	55 000	0,0005	-	55 pod tg, 200 nad tg	-	-	-	-	6 měsíců při -10 C°	2 týdny	-
ABLEBOND 8700E	Epoxidové, tepelně vodivé, plnivo-stříbro, výborné vlastnosti pro dispensing a tisk	tepelné	1 hod. při 175 C°	19 000	0,0002	-	45 pod tg, 120 nad tg	1,6	4,4 (tensile modulus)	160	-	12 měsíců při -20 C°	1 týden	-
ECCOBOND 8177	Epoxidové, plnivo-stříbro, vysoce tepelně vodivé	tepelné	4 min. při 130 C°	12 000	0,00001	-	-	4,5	-	-	-	12 měsíců při -40 C°	24 hodin	-
ECCOBOND CE3520-3	Epoxidové, plnivo-nikl, jednosložkové, flexibilní	tepelné	1hod. při 120 C°, 30 min. při 150 C°	73 000	0,2	od -45 do +125	-	-	9 (lap shear strenght)	-	-	6 měsíců při -18 C°	3 dny	$371.64 za 6 OZ = 9291 Kč za 170 g
XCS80091-2	Silikonové, plnivo-stříbro, jednosložkové, vysoce flexibilní	tepelné	35 min. při 140 C°	30 000-50 000	0,00004	od -45 do +200	-	-	-	-	-	5 měsíců při -40 C°	1 den	-
Hysol QMI516LC	(BMI hybrid), plnivo-stříbro, hydrofóbní, stabilní při vysokých teplotách	tepelné	90 min. při 80 C°	pasta	<0,01	-	69 pod tg, 129 nad tg	-	1,1 (tensile modulus)	17	-	12 měsíců při -40 C°	4 hodiny	-
Hysol QMI529HT	plněné vysokým množstvím stříbra, vysoká tepelná vodivost, vysoká míra adheze	tepelné	30 min. při 200 C°	18 500	0,00004	-	53 pod tg, 159 nad tg	6.7	-	3,3	-	12 měsíců při -40 C°	24 hodin	-
ECCOBOND C990	Jednosložkové, epoxidové, plnivo-stříbro	okamžité i tepelné	1 hod. při 150 C°, 20 sek. při 275 C°	21 000-60 000	0,001	od -40 do +125	-	-	-	-	-	6 měsíců při 0 C°	3 týdny	-
AMICON C990J SPEC 333M1	Jednosložkové,epoxidové, plnivo-stříbro, dlouhá životnost v pokojové teplotě, vysoká pevnost spoje, tepelná odolnost po vytvrzení	okamžité i tepelné	1 hod. při 150 C°, 20 sek. při 150 C°	33 000	0,0003	-	13 pod tg,60 nad tg	-	5 (lap shear strenghtAl na Al)	120	-	6 měsíců při 0 až +8 C°, 3 týdny při 18 až 25 C°	-	-
Hysol EPO-TEK H20S	Plnivo-stříbro, epoxidové, dvousložkové , vysoká elektrická vodivost	tepelné	45 sek.při 175 C°, 5 min. při 150 C°, 45 min. při 100 C°	1 800-2 800	≤0,0005	od -55 do +200	31 pod tg, 120 nad tg	3,25	-	≥ 80	-	12 měsíců při pokojové teplotě	3 dny	-
MG Chemicals 8331S	Plnivo-stříbro, epoxidové, jednosložkové, pomalé vytvrzení, vysoká el. vodivost	tepelné	50 min. při 100 C°, 96 hod. při 25 C°	tekuté	0,006	od -40 do +150	78 pod tg, 158 nad tg	0,95	13,5 (tensile strenght)	34	5,3	22-25 C°	4-5 hodin	-
Heraeus PC3001	Jednosložkové,epoxidové, plnivo-stříbro, vhodné pro spojování SMT, tepelně vodivé	-	20 min. při 120 C°, 10 min. při 150 C°	10 000	0,0003	do +180	18 pod tg,60 nad tg	5	-	41	1	6 měsícú při -40 C°	16 hodin	7828 Kč (£206.36) za 20 g
Creative materials 124-08 A/B	Dvousložkové, epoxidové, plnivo-stříbro, flexibilní , dlouhá doba zpracovatelnosti, tepelně vodivé	tepelné	90 min. při 80 C°, 15 min. při 120 C°,45 sek. při 175 C°	pasta	0.0002 až 0,0004	od -55 do +200 (teplotní stabilita do 300)	33 pod tg, 84 nad tg	6,5	-	120	-	12 měsíců při +25 C° (platí pro nesmíchané části)	<4 dny (platí pro část B)	-
Creative materials 102-32	Silikonové, flexibilní, teplotně odolné, možnost přepracování, plnivo-stříbro, tepelně vodivé	tepelné	-	pasta	0,0001	od -70 do +260 (teplotní stabilita do 325)	-	12,07	-	-	-	6 měsíců při +25 C°, 9 měsíců při +5 C°, 12 měsíců při -10 C°	-	-
LOCTITE 3888	Dvousložkové, plnivo-stříbro, epoxidové, tepelně vodivé	pokojovou teplotou	2 hod. při 65 C°	pasta	<0,001	do +80	0,02	1,5	-	50	-	12 měsíců	6 měsíců	1179,75 Kč za 2,5 g
LOCTITE 5421	Jednosložkové, plnivo-stříbro	pokojovou teplotou (RTV)	72 hod. při 25 C°	pasta	≤0,01	-	-	-	-	-	-	3 měsíce	30 min. od otevření	10 475 Kč ($419.88) za 50 ml (již se nevyrábí)
TRA-DUCT 2958	Dvousložkové, plnivo-stříbro, epoxidové, tepelně vodivé	pokojovou teplotou	15 min. při 100 C°, 2 min. při 150 C°	40 000	1000	od -60 do +175	0,2	1,5	-	92	-	6 měsíců při 25 C°	4 hodiny	-
LOCTITE® 5421™	-	pokojovou teplotou	72 hod. při 25 C°	pasta	<0,01	-	-	-	≥0,4 (lap shear strenghtAl na Al)	-	-	-20 C°	-	-
Master Bond EP21TDCSFL	Dvousložkové, epoxido-polyuretanové, plnivo-stříbro, vysoce flexibilní, tepelně vodivé	pokojovou teplotou	60-120 min. při 93 C°, 24-36 hod. při 23 C°	pasta	<0,01	od -269 do +121	0,01666	1,58	5,52 (lap shear strenghtAl na Al)	-	60	3 měsíce	60-70 minut	-
Master Bond EP21TDCNFL	Dvousložkové, epoxido-polyuretanové, plnivo-stříbro, vysoce flexibilní,tepelně vodivé	pokojovou teplotou	-	-	5 až 10	od -269 do +121	0,01666	1,44	-	-	50	-	-	-
MG chemicals 8331	Epoxidové, plnivo-stříbro, tepelně vodivé, velká odolnost proti vlhkosti a chemikáliím	tepelné i při RT	5 hod. při 25 C°, 15 min. při 65 C°,5 min. při 150 C°	pasta	0,017	od -55 do 150	54 pod tg, 169 nad tg	0.90	6,28 (tensile strenght)	50	0.30	16 až 27 °C	-	1250 Kč ($49.99) za 14 g
Polytec EC- 201L	Dvousložkové, epoxidové, plnivo-stříbro, vysoce flexibilní , dlouhá doba zpracovatelnosti, tepelně vodivé, krátkodobě odolá až 280 C°	tepelné	30 min. při 150 C°	12 000	0,0002	od -55 do 150	4,4 pod tg , 45,5 nad tg]	-	50 (die shear strength)	<23	-	12 měsíců při pokojové teplotě	5-6 hodin	1925 Kč (70 euro) za 10 g
Atom adhesives- AA-DUCT 2919	Epoxidové, plnivo-stříbro, nestékající, vysoce flexibilní	tepelné i při RT	4 hod. při 65 C°, 24 hod. při 25 C°	995 000	0,0016 - 0,00011	od -60 do +110	0,028571	1.60093	-	4	-	12 měsíců při pokojové teplotě	30 minut	343 Kč (14 $) za 2,5 g

4. Rozdělení metod zkoušení lepených spojů

Metody pro zkoušení lepených spojů se dají rozdělit do různých kategorií a skupin a to podle:

a) Rozdělení dle poškození resp. nepoškození lepeného spoje:

- destruktivní,
- nedestruktivní.

Destruktivní zkoušení je využíváno nejčastěji v testování vlastností lepidel a lepených spojů. Toto zkoušení spočívá v namáhání spoje například v tahu, smyku, odlupování, rázu atd. Doplňkové zkoušky pro testování pevnosti bývají při konstantním zatížení za zvolených podmínek (zvýšení teploty, vlhkosti popřípadě ponoření do kapaliny). Výsledky testování potom slouží jako kontrola vlastností lepidel a lepených spojů. [20]

b) Rozdělení dle metody testování:

- mechanické
- tepelné cyklování
- vlhkostní
- kombinace teplotní a vlhkostní

Mezi **mechanická** testování patří zkouška v odlupování (peel test), odtržení součástky (pull test), cyklické ohýbání, vibrace atd.

Klimatické ovlivňování slouží k nasimulování urychlené životnosti, kde k urychlování slouží klimatické podmínky (zvýšená vlhkost, zvýšená vlhkost + teplota), tepelné cyklování, tepelný šok.

c) Rozdělení dle doby trvání daného testování podle P. Matkowski:

- dlouhodobé,
- středně dlouhé,
- krátkodobé.

Dlouhodobé testování se provádí za pokojové teploty. Obvyklá doba trvání těchto testů je v řádu několika let. [21]

Testování středně dlouhé trvá do několika měsíců a například teplota se zde zvyšuje velmi pomalu. Mezi středně dlouhá testování patří zkouška teplotním šokem a teplotním cyklováním, ale také test vibrací. [21]

Mezi krátkodobé testování patří zkoušky mechanického šoku [21], tedy zkoušky odtržení, odlupování, ohýbání atd.

4.1 Zkouška tepelného cyklování (Temperature cycling test)

Pro testování teplotního cyklování dochází k přechodu z jedné extrémní teploty do druhé. Mezi nejpoužívanější rozsah tepelného cyklování je od -40 °C do +125 °C jak uvádí ve svém testování například Kirsi Saarinen v [22] a Laura Frisk v [23]. Průběh změn teplot probíhá ve velmi pomalém časovém intervalu (až stovky minut). Celý cyklus může trvat až několik hodin. Počet cyklů u tohoto testování je od jednotek stovek do jednotek tisíců a je většinou nižší než pro zkoušení tepelným šokem. [23]

4.2 Zkouška teplotním šokem (Thermal shock testing)

Teplotní šok je pro lepené spoje velmi agresivní metoda testování. V průběhu tohoto testu dochází k rychlým změnám teplot z jedné extrémní teploty do druhé mnohem rychleji, než je tomu u tepelného cyklování. Jak uvádí Laura Frisk v [23], toto testování lze provádět podle normy JEDEC JESD22-A104-B. Přechod mezi extrémními teplotami může trvat například 1 minutu a teplota se na 14 minut ustálí v jedné krajní teplotě a poté jedno-minutový přechod do druhé krajní hodnoty na 14 minut. Celková doba jednoho cyklu tedy trvá 30 minut například s počtem cyklů až 10 000. [23]

4.3 Zkouška kombinace teploty a vlhkosti (Humidity test)

Elektricky vodivá lepidla jsou na prostředí se zvýšenou vlhkostí velmi citlivá [24]. Proto se tato metoda testování provádí poměrně často. Polymerní materiály absorbují vlhkost a v důsledku toho může dojít k delaminaci materiálů. Dále při tomto testu hrozí, že dojde k deformaci matrice lepidla, což může zapříčinit zhoršení kontaktu mezi jednotlivými vodivými částicemi lepidla a dojde tedy k nárůstu měrného odporu.
V této testovací metodě se nejběžněji používají tyto podmínky:

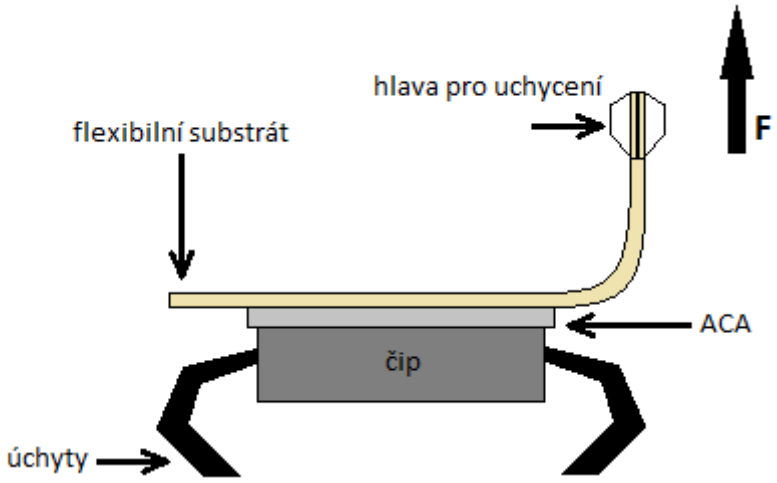
- teplota 85 °C při 85% relativní vlhkosti
- teplota 65 °C při 90% relativní vlhkosti

Toto je případ, kdy budou tyto podmínky konstantní po celou dobu testování.
Další možností je, že se tyto podmínky v průběhu testování budou měnit například v rozsahu teplot od 10 °C do 65 °C v rozmezí 85-90 % relativní vlhkosti. [25, 26]

Jak již bylo řečeno, elektricky vodivá lepidla jsou velmi lehce narušena působením vlhkosti, a proto se začalo zabývat ochranou spojů. Jednou z možných metod ochrany je použití krycího materiálu, který chrání lepený spoj proti nepříznivým vlivům prostředí a to hlavně proti vlhkosti a korozi. Jako jeden z ochranných materiálů se používá epoxidová pryskyřice, ta ale časem také propouští vlhkost a nemůže tedy v tomto směru poskytnout plnohodnotnou ochranu. [26]

4.4 Zkouška pevnosti v odlupování (Peel test)

Tato metoda testování je možná, pokud je jeden ze spojovaných materiálů ohebný. Úhel odlupování se určuje podle tuhosti spojovaných materiálů [20]. Dle norem **ČSN EN 28510-1** a **ČSN EN 28510-2** se využívá testování v odlupování pod úhlem 90° a 180°. Pro materiály s menší ohebností je možné použít úhel menší než 90°. Na obr. 10 je příklad znázornění pro testování pevnosti lepeného spoje v odlupování. V tomto případě se jedná o odlupování pod úhlem 90°, kde čip je k flexibilnímu substrátu přilepen pomocí ACA a **F** znázorňuje sílu, kterou je tažena hlava uchycená k mechanismu ve svislém směru.



Obr. 10: Znázornění testovací metody v odlupování [27]

4.5 Zkouška vibracemi (vibration test)

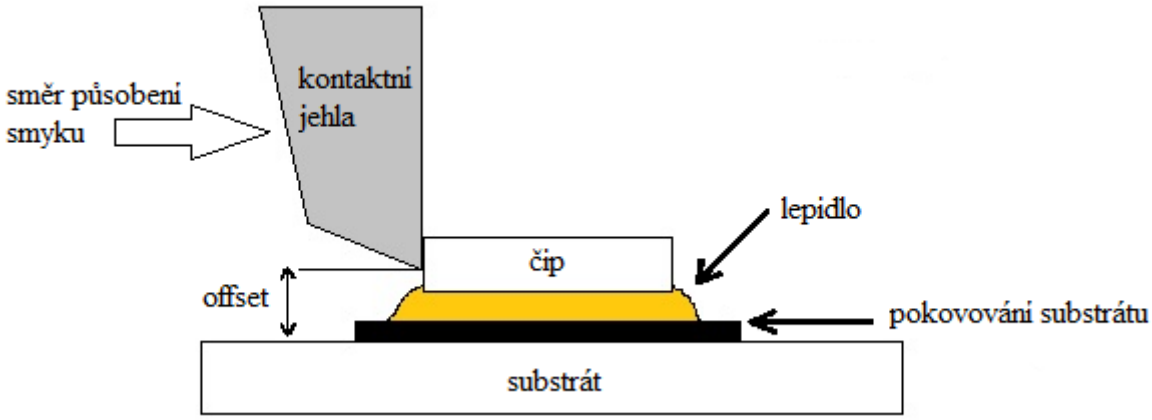
Tato zkouška slouží ke zjištění doby únavy lepeného spoje. Testování odhaluje potencionální risk poruchy, která by mohla být zapříčiněna malými prasklinami nebo trhlinami v lepeném spoji a právě z toho určit dobu životnosti spoje. Doba testování vibracemi zabírá řádově týdny až měsíce, místo několika let testování v provozu. Toto zrychlené testování slouží hlavně ke snížení časového horizontu a finanční nákladnosti. Frekvenční rozsah pro tyto zkoušky bývá od několika hertzů do několika kilo-hertzů při nízkých amplitudách vibrací, je možné využít jednotky giga-hertzů.

Celý vibrační systém se skládá ze zařízení, které simuluje otřesy, svorek pro uchycení testovaného vzorku, generátoru vstupního signálu a příslušný software pro zachycení měření. V dnešní době je řada různých zařízení pro simulaci vibrací s různými rozsahy frekvencí a rychlostními změnami. [21]

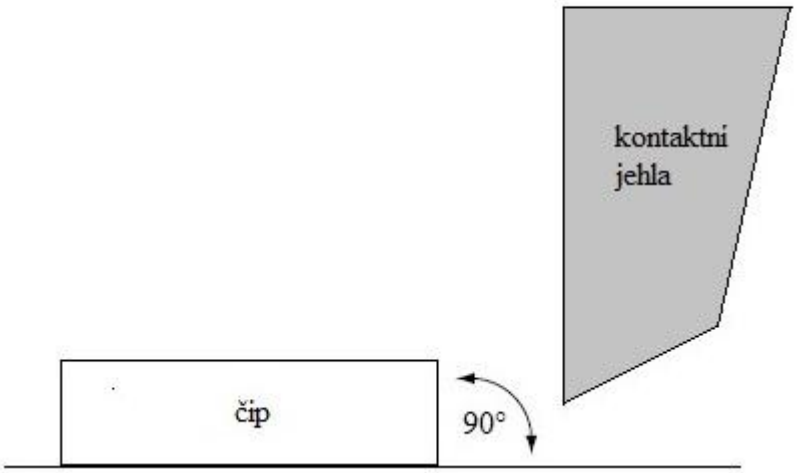
4.6 Zkouška pevnosti čipu ve smyku (die shear test)

Účel tohoto testování spočívá v určení soudržnosti materiálů použitých ke spojení čipu nebo pasivní součástky SMD k substrátu. Určení zmíněné soudržnosti je založeno na měření síly působící na čip (součástku), až do odtržení čipu, z montovaného spoje umístěného na substrátu. Síla působí na čip prostřednictvím příslušné části daného zkušebního zařízení, většinou se jedná o tzv. jehlu. Jehla by měla působit pouze na danou součástku [28]. Tato podmínka se zajistí nastavením patřičné vzdálenosti jehly od lepeného spoje (tzv. offset) jak

je tomu naznačeno na obr 11. Podmínka druhá je splněna mimo jiné podle norem IPC-TM 650 – Die shear strenght nebo MIL-STD-883 – Test methods standards micrcocircuits, aby kontaktní jehla působila na hranu čipu, který svírá úhel 90°, jak je vidět na obr 12.



Obr. 11: Znázornění testovací metody ve smyku [28]



Obr. 12: Znázornění správného nastavení kontaktní jehly [29]

5. Praktická část

Cílem praktické části bylo vybrat vhodná adheziva pro testování na flexibilních substrátech, dále vybrat vhodné metody pro testování kvality využitelné v laboratořích katedry elektrotechniky (dále KET) a prakticky ověřit resp. zjistit vlastnosti na vybraných komponentech a substrátech.

Výběr použitelné testovací metody se odvíjí od dostupných českých norem, které určují a zpřesňují postup pro jednotlivá testování. V současné době čelíme nedostatku použitelných norem pro testování připojovaných komponent na flexibilní substráty. Vybrané testovací metody byly na těchto normách založeny, namísto plnění jejich přesného postupu.

Zvolenými metodami byla kombinace zkoušky pevnosti ve smyku před zatížením lepeného spoje zhoršenými klimatickými vlivy a po zatížení. Tímto testováním jsme zjišťovali a porovnávali vliv vlhkosti a zvýšené teploty na pevnost lepeného spoje ve smyku.

5.1 Výběr vhodných adheziv

Výběr vhodných adheziv byl proveden na základě rešerše produktů v tab. 1 a také podle komerční dostupnosti produktů. Flexibilita byla jedna z hlavních vlastností, podle které byla lepidla vybírána a to kvůli připojování a následnému testování komponent pomocí daného lepidla na flexibilní substrát. Jelikož se nejedná o levnou technologii, cena byla dalším velmi důležitým faktorem pro výběr testovaných lepidel.

V tab. 1 jsou testované vzorky lepidel vyznačeny v kolonce názvu modrou barvou. Jedná se tedy o produkty LOCTITE 3880, LOCTITE 3888, Polytec EC- 201L a Atom Adhesives- AA-DUCT 2919. První dva vzorky poskytla firma OEM Automatic, třetí vzorek dodala společnost INTERCONTI Ing. Tomáš Bravený s.r.o., které vybraný produkt poskytl německý výrobce Polytec. Poslední vzorek byl objednán z internetového portálu Amazon.com od výrobce Atom Adhesives.

5.2 Výběr vhodné metody pro testování přilepených komponent

Výběr vhodných testovacích metod pro testování komponent na flexibilní substráty vycházel z prostudování norem ČSN ze stránek Úřadu pro technickou normalizaci (http://www.unmz.cz/). Normy jsou přesným návodem pro zkoušení a je zde nutné splnit určité podmínky. V úvahu pro výběr metod testování připadaly tyto normy:

České normy:

ČSN EN 62137-1-1 Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje - Část 1-1: Zkouška odolnosti proti odtržení,

ČSN EN 62137-1-2 Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje - Část 1-2: Zkouška pevnosti ve smyku,

ČSN EN 62137-1-3 Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti pro povrchově montované pájené spoje - Část 1-3: Zkouška cyklickým padáním,

ČSN EN 62137-1-4 Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti pro povrchově montované pájené spoje - Část 1-4: Zkouška cyklickým ohybem,

ČSN EN 62137-1-5 Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti pro povrchově montované pájené spoje - Část 1-5: Mechanická únavová zkouška smykem,

ČSN EN 28510-1 Lepidla - Zkouška v odlupování zkušebního tělesa z ohebného a tuhého adherendu - Část 1: Odlupování pod úhlem 90 stupňů,

ČSN EN 28510-2 Lepidla - Zkouška v odlupování zkušebního tělesa z ohebného a tuhého adherendu - Část 2: Odlupování pod úhlem 180 stupňů.

ČSN EN 60068-2-78 Zkoušení vlivů prostředí, část 2-78; Zkoušky - Zkouška Cab: Vlhké teplo cyklické.

Mezinárodní normy:

ISO 16525 Adhesives - Test methods for isotropic electrically conductive adhesives (ICA),

IPC-TM 650 – Die shear strenght

MIL-STD-883 – Test methods standards micrcocircuits

Pro testování v laboratořích KET byla vybrána metoda testování pevnosti přilepeného komponentu ve smyku, která je blíže popsaná v kapitole 4.6. Zkouška pevnosti ve smyku byla vybrána na základě proveditelnosti v laboratořích KET. Dalším aspektem pro výběr právě této metody byla dostupnost dvou mezinárodních norem IPC-TM 650 a MIL-STD-883. Pro toto testování by mohla být nápomocná také norma ČSN EN 62137-1-2. Další vybraná norma pro testování byla ČSN EN 60068-2-78, která popisuje zkoušení za zhoršených klimatických podmínek nastavených na 40 °C při 85% relativní vlhkosti. Tato metoda byla vybrána z důvodu velkého vlivu vlhkosti na pevnost lepeného spoje podle [30]. Pro testování zhoršenými vlivy se používají mnohem drastičtější podmínky než při této metodě, např. teplota 85 °C při 85% relativní vlhkosti, kdy by lepené vzorky nemuseli vůbec vydržet. Proto byla zvolena šetrnější metoda zkoušení za zhoršených klimatických podmínek nastavených na 40 °C při 85% relativní vlhkosti, jak již bylo výše uvedeno.

V oblasti testování kvality kontaktování komponent za pomoci lepidel na flexibilní substráty je na stránkách Úřadu pro technickou normalizaci v současné době velmi málo norem k disposici. Proto jsou v této kapitole uvedeny i normy pro pájené spoje, kde je možné testování na těchto normách pouze založit resp. je modifikovat, namísto přesného postupu podle nich.

5.3 Informace o lepidlech, příprava a postup nanášení ECA

Testovány byly čtyři vzorky lepidel od různých výrobců. Všechny čtyři vzorky jsou na bázi epoxidu a využívají jako plnivo částice stříbra. Současně jsou také všechna testovaná lepidla, kromě produktu LOCTITE 3880, dvousložková. Tato lepidla se musí smíchat v určitém poměru, který bývá uveden v katalogovém listu daného výrobku. Výhodou

dvousložkových lepidel je to, že oddělené složky pojmenované zpravidla část A a část B vydrží delší dobu než ve smíchaném poměru.

Jednosložkové lepidlo LOCTITE 3880 se prodává v tubě, jak je vidět na obr. 10. Pro použití stačí pouze odšroubovat zajišťovací hrot a lepidlo se nanáší pomocí jehly.

Dvousložková lepidla LOCTITE 3888 a AA-DUCT 2919 byla umístěna ve speciálním obalu, který ilustruje obr. 11. V případě těchto dvou produktů byly jednotlivé složky od sebe odděleny membránou (obr. 11 případ vpravo), která se dá protlačit. Po protlačení membrány (obr. 11 případ vlevo) je nutné obě složky lepidla pečlivě promíchat, aby došlo k propojení materiálů (pojiva a plniva). Postup promíchání byl uveden v balení ECA - AA-DUCT 2919 a jednalo se o opakované posouvání za použití hrany např. stolu. Stejný postup byl tedy proveden i u ECA – LOCTITE 3888.

Obr. 10: Elektricky vodivé lepidlo LOCTITE 3880 převzato z [31]

Obr. 10: Elektricky vodivá lepidla LOCTITE 3888 (vlevo), AA-DUCT 2919 (veprostřed) a Polytec EC-201L (vpravo)

Poslední produkt Polytec EC-201L byl smíchán v poměru 1:1, jak uvádí katalogový list tohoto lepidla.

Všechna lepidla byla nanášena přes šablonu, která je vidět na obr. 11, za pomoci těrky. Přesný postup nanesení shrnují následující body:

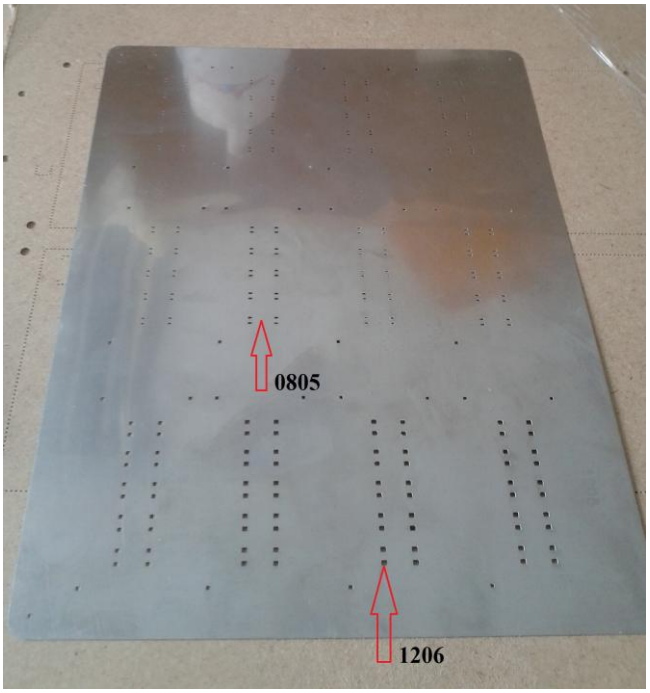
1) umístit a zajistit šablonu přesně nad motiv substrátu podle velikostí pouzder připojovaných komponent,

2) nanést ECA na šablonu před motiv, na který se lepidlo aplikuje,

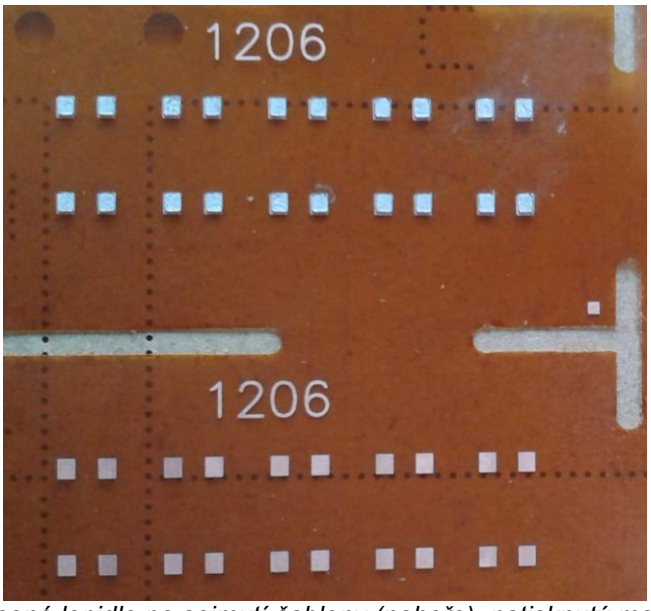
3) s pomocí těrky lepidlem zaplnit potřebný motiv (pokud možno jedním tahem),

4) odjistit šablonu a sejmout ji ze substrátu, po kterém zůstane vrstva ECA pouze na měděných ploškách, jak je tomu vidět na obr. 12,

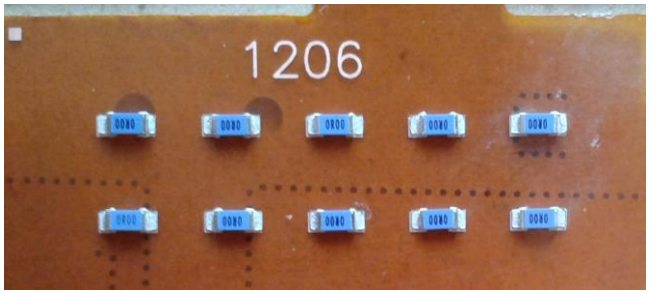
5) vsadit SMD součástku pomocí pinzety na místo s naneseným lepidlem. Tento krok znázorňuje obr. 13.



Obr. 11: Šablona pro nanášení pro rozměrové kódy pouzder 1206 a 0805 uvedené v tab. 2



Obr. 12: Nanesené lepidlo po sejmutí šablony (nahoře), natisknutý motiv mědi (dole)



Obr. 13: Nalepené součástky na nanesené plošce s ECA

5.4 Komponenty a substrát pro testování

Testování bylo zaměřeno na ECA, která jsou vhodná pro připojování SMD součástek (komponent) na desku plošných spojů anglicky Printed circuit board (PCB). Jako dostupné komponenty pro toto testování byly nulové odpory, které jsou nejlevnější možnou variantou (cca 40 haléřů/ks). Komponenty byly nanášeny na ohebný substrát Kapton, který byl potištěn ploškami mědi na tři velikosti rozměrových kódů pouzder a to na 0603, 0805 a 1206. Pro testování byly použity pouze velikosti pouzder 0805 a 1206, jak je znázorněno u šablony na obr. 11. Přesné rozměry pouzder popisuje tab. 2.

Tab. 2 – Popis rozměrů použitých pouzder [32]

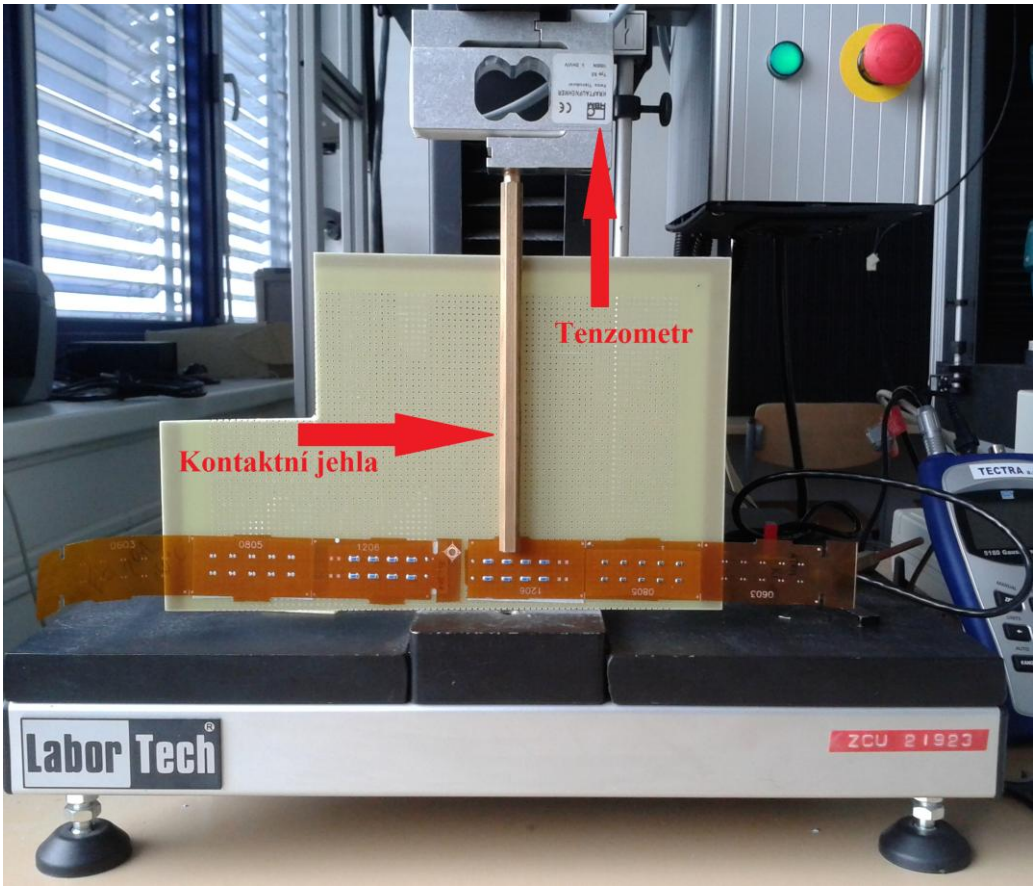
Rozměrový kód pouzder:	palcový	metrický	rozměry v palcích	rozměry v mm
	805	3216	0,08 x 0,05	2 x 1,2
	1206	2012	0,12 x 0,06	3,2 x 1,6
			Velikost rozměrů (XY)	

Substrát Kapton, který je blíže popsán v kapitole 1.2.4., byl poskytnut katedrou KET. Cena použitého substrátu se pohybuje okolo 300 Kč a jeho podoba je vidět na obr. 12 a obr. 13.

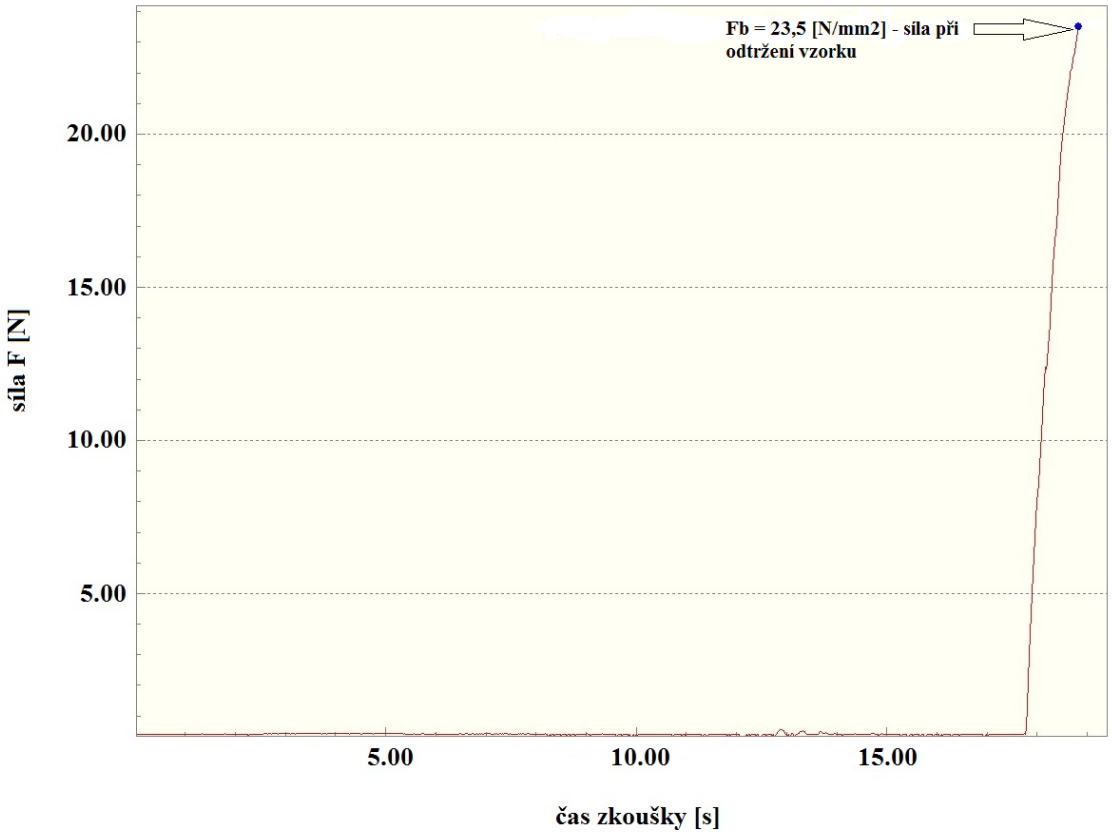
5.5 Postup testování

Testování probíhalo ve dvou fázích, které budou následně porovnány. V **první fázi**, která byla pouze mechanického původu, se testovala pevnost připojených nulových odporů ve smyku ihned po vytvrzení jednotlivých vzorků pomocí trhací soustavy Labor Tech v laboratořích KET a připojeného softwaru. Trhání probíhalo pomocí jehly, jak je vidět na obr. 14. Trhané vzorky byly připevněny na pevnou podložku pomocí oboustranné lepicí pásky. Souběžně s trháním byl vidět na obrazovce v programu Lab Test průběh závislosti trhací síly v čase, jak znázorňuje obr. 15., kde je ve směru osy X znázorněn časový průběh a ve směru osy Y velikost síly potřebné pro utržení odporu ze substrátu.

Druhá fáze testování se lišila v tom, že po vytvrzení nalepených odporů byly vzorky připevněny na pevnou desku a vloženy do komory, která simuluje nastavené klimatické podmínky. V případě tohoto testování byla v komoře nastavena teplota na 40 °C a 85 % relativní vlhkosti po dobu 4 dní. Další postup je již stejný jako v první fázi testování.



Obr. 14: Trhací stroj Labor Tech



Obr. 15: Výstupní charakteristika pevnosti trhaného vzorku

6. Výsledky měření

Výsledky měření jsou shrnuty do tabulek, které znázorňují sílu Fb potřebnou k odtržení přilepených komponent ve smyku. Dále po levé straně tabulek je vidět název použitého lepidla, které bylo použito pro přilepení nulového odporu k substrátu Kapton. Další informace poskytuje kód velikosti pouzdra, jehož rozměry jsou podrobněji popsány v tab. 2 a v neposlední řadě tabulka obsahuje podrobnosti o vytvrzení daného vzorku s lepidlem. Hlavní informací v tabulkách je mezní naměřená síla Fb, při které došlo k odtržení odporu z přilepené plochy substrátu, za působení kontaktní jehly.

První fáze měření:

Následující tabulky (tab. 3 až tab. 10) informují o naměřených hodnotách sil z první fáze testování.

Tab. 3 – Naměřené hodnoty popisující pevnost komponent ve smyku vzorku LOCTITE 3880

Název lepidla:	LOCTITE 3880									
Velikost pouzdra:	0805									
Vytvrzení:	6 min. při 150 °C									
Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fb [N/mm^2]	21,65	14,2	16,67	24,05	10,77	16,38	12,72	19,28	12,09	17,3

Tab. 4 – Naměřené hodnoty popisující pevnost komponent ve smyku vzorku LOCTITE 3880

Název lepidla:	LOCTITE 3880									
Velikost pouzdra:	1206									
Vytvrzení:	6 min. při 150 °C									
Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fb [N/mm^2]	22,22	22,71	19,85	11,15	23,5	19,24	19,21	14,53	11,07	17,59

Tab. 5 – Naměřené hodnoty popisující pevnost komponent ve smyku vzorku Polytec EC 201L

Název lepidla:	Polytec EC 201L									
Velikost pouzdra:	0805									
Vytvrzení:	30 min. při 150 °C									
Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fb [N/mm^2]	8,39	9,81	10,77	7,46	10,86	9,58	6,45	9,64	10,93	11,72

Tab. 6 – Naměřené hodnoty popisující pevnost komponent ve smyku vzorku Polytec EC 201L

Název lepidla:	Polytec EC 201L									
Velikost pouzdra:	1206									
Vytvrzení:	30 min. při 150 °C									
	Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Fb [N/mm^2]	5,26	8,19	6,05	7	5,04	7,13	8,96	8,22	6,84	7,5

Tab. 7 – Naměřené hodnoty popisující pevnost komponent ve smyku vzorku AA DUCT 2919

Název lepidla:	AA DUCT 2919									
Velikost pouzdra:	0805									
Vytvrzení:	24 hod. při RT									
	Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Fb [N/mm^2]	4,94	5,8	7,12	7,91	6,23	4,15	6,06	5,33	6,33	5,7

Tab. 8 – Naměřené hodnoty popisující komponent pevnost ve smyku vzorku AA DUCT 2919

Název lepidla:	AA DUCT 2919									
Velikost pouzdra:	1206									
Vytvrzení:	24 hod. při RT									
	Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Fb [N/mm^2]	10,21	8,87	8,64	6,17	5,97	4,43	4,18	7,52	6,48	5,31

Tab. 9 – Naměřené hodnoty popisující pevnost komponent ve smyku vzorku LOCTITE 3888

Název lepidla:	LOCTITE 3888									
Velikost pouzdra:	0805									
Vytvrzení:	24 hod. při RT									
	Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Fb [N/mm^2]	1,65	3,26	3,26	3,05	3,1	4,1	4	4,45	5,7	5

Tab. 10 – Naměřené hodnoty popisující pevnost komponent ve smyku vzorku LOCTITE 3888

Název lepidla:	LOCTITE 3888									
Velikost pouzdra:	1206									
Vytvrzení:	24 hod. při RT									
	Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Fb [N/mm^2]	8,6	7,1	5,8	12,19	8,24	7,22	7,71	16,9	13,28	9,14

V této fázi měření byla zkouška pevnosti ve smyku provedena pro 10 odtržených vzorků s velikostí pouzdra 0805 a 10 odtržených vzorků s rozměrovým kódem 1206.

V tomto měření lze s hodnotou uvedenou v tab. 1 porovnat pouze hodnoty naměřené u vzorku Polytec EC 201L. V tabulce je uvedena pevnost připojeného čipu 50 MPa, tedy 50 N/mm^2. Pro menší lepená pouzdra (0805) byly naměřeny vyšší hodnoty pevností než pro pouzdra 1206, ale hodnoty pevnosti ve smyku se ani u jedné velikosti pouzdra tabulkové hodnotě ani zdaleka nepřibližují. Lepidlo od výrobce Polytec by se podle katalogového listu

mělo nanášet sítotiskem nebo za pomoci dispenzeru. Je tedy možné, že hodnoty jsou menší kvůli množství lepidla naneseného přes šablonu. Průměrná hodnota tohoto lepidla je 9,561 pro velikost pouzdra 0805 a 7,019 pro velikost pouzdra 1206.

Druhá fáze měření:

V druhé fázi bylo zkoušení pevnosti ve smyku testováno pouze na pouzdrech s velikostí 1206. Pro každý typ lepidla bylo odtrženo 10 nulových odporů. V této fázi vzorky prošly zátěžovými podmínkami zvýšené vlhkosti a teploty již zmíněných v kapitole 5.5 o postupu testování. Hodnoty pro druhou fázi měření znázorňují tab. 11 až tab. 14.

Tab. 11 – Naměřené hodnoty popisující pevnost komponent ve smyku vzorku LOCTITE 3880

Název lepidla:	LOCTITE 3880									
Velikost pouzdra:	1206									
Vytvrzení:	6 min. při 150 °C									
	Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Fb [N/mm2]	16,34	16,21	10,84	16,11	8,14	15,42	16,84	12,65	18,45	16,48

Tab. 12 – Naměřené hodnoty popisující pevnost komponent ve smyku vzorku Polytec EC 201L

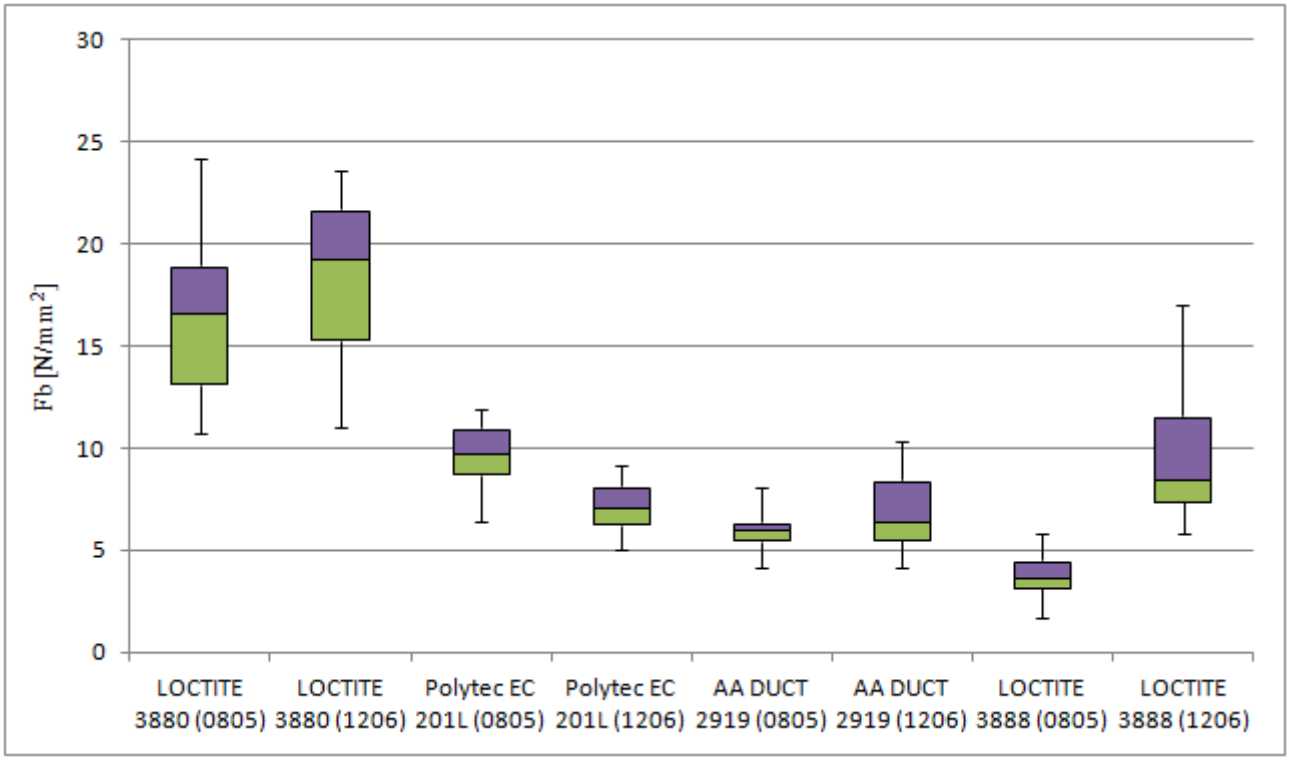
Název lepidla:	Polytec EC 201L									
Velikost pouzdra:	1206									
Vytvrzení:	30 min. při 150 °C									
	Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Fb [N/mm2]	19,86	17,53	12,95	26,25	17,37	24,25	27,28	20,89	20,18	18,42

Tab. 13 – Naměřené hodnoty popisující pevnost komponent ve smyku vzorku AA DUCT 2919

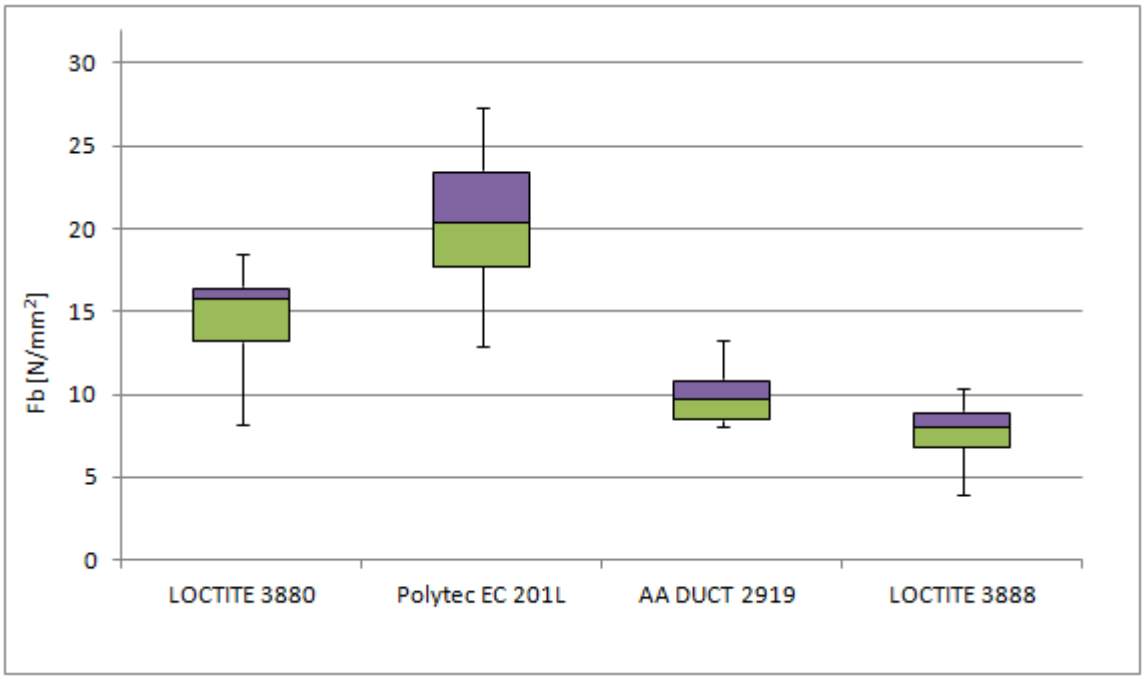
Název lepidla:	AA DUCT 2919									
Velikost pouzdra:	1206									
Vytvrzení:	48 hod. při RT									
	Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Fb [N/mm2]	14,99	9,16	8,11	8,24	8,11	12,78	10,91	9,33	13,08	10,18

Tab. 14 – Naměřené hodnoty popisující pevnost komponent ve smyku vzorku LOCTITE 3880

Název lepidla:	LOCTITE 3888									
Velikost pouzdra:	1206									
Vytvrzení:	48 hod. při RT									
	Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Fb [N/mm2]	3,89	6,6	8,77	7,74	6,68	7,22	9,16	8,9	8,22	10,21

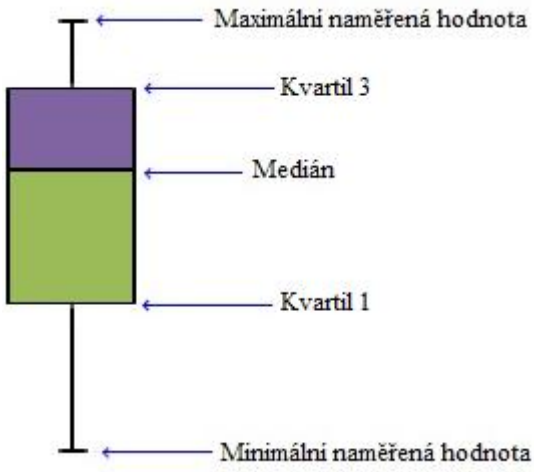


Obr. 16 – Krabicový graf rozptylu naměřených hodnot pro fázi 1



Obr. 17 – Krabicový graf rozptylu naměřených hodnot pro fázi 2

Krabicové grafy ukázané na obr. 16 a obr. 17 jsou provedeny z tabulek naměřených hodnot první a druhé fáze měření. Popis krabice grafu je znázorněna na obr 18. Tyto grafy mají podat rychlou vizuální informaci o naměřených hodnotách.



Obr. 18 – Popis krabicového grafu

Mezi maximální a minimální hodnotou je znázorněn celkový rozsah naměřených hodnot. Krabicová část grafu je shora ohraničena 3. kvartilem a zespodu 1. kvartilem. Mezi kvartily je hranice nazývající se medián, který rozděluje graf na 50 % hodnot menších (směr dolů) a 50 % hodnot větších. Diagram obsahuje také tzv. vousy, vycházející z kvartilů, které vyjadřují variabilitu dat. [33]

Například na obr 17. pro první testované lepidlo LOCTITE 3880 ukazuje, že medián je blízko u 3. kvartilu. To znamená, že je velká koncentrace naměřených hodnot ve fialové oblasti. Zelená část grafu je poměrně široká, což znamená, že koncentrace hodnot v této části není tak velká. Celkový rozptyl hodnot je určen horní a dolní hranicí tzv. vousů.

V případě kdy by medián rozděloval fialovou a zelenou část přesně napůl, byl by počet naměřených hodnot pod ním a nad ním stejný.

Dále byly pro přehlednost zpracovány dvě tabulky (pro první a druhou fázi testování) průměrných hodnot sil Fb. Předpoklad pro první porovnání hodnot v tab. 15 je, čím vetší byla lepená plocha, tím větší by měla být potřebná síla pro utržení komponent ze substrátu. Při porovnání průměrných sil spojů lepeného stejným lepidlem pro odlišné velikosti pouzder můžeme z tab. 15 vypozorovat, že u prvního vzorku lepidla LOCTITE 3880 je tento předpoklad splněn. Průměrná hodnota pouzdra 1206 je o 0,596 N/mm^2 větší než u pouzdra 0805. Předpoklad ale neplatí v případě druhého vzorku lepidla Polytec EC 201L, kde průměrná hodnota síly potřebná pro utržení odporů převažuje u menších pouzder (0805) o 2,542 N/mm^2 nad pouzdry 1206. Následující dva vzorky lepidel opět potvrzují předpoklad zmíněný výše. Lepidlo AA DUCT 2919, na které byly naneseny odpory s velikostí pouzder 1206 potřebovaly sílu pro utržení průměrně o 0,821 N/mm^2 vyšší než pro velikosti pouzder

0805. U posledního lepidla LOCTITE 3888 byla také potřebná vyšší síla pro utržení pouzder 1206 o průměrně 5,466 N/mm^2.

Tab. 15 – Dopočtené průměrné hodnoty pro pevnost ve smyku (fáze 1)

Název lepidla	rozměrový kód velikosti pouzdra	průměrná hodnota síly pevnosti ve smyku Fb [N/mm2]
LOCTITE 3880	0805	16,511
LOCTITE 3880	1206	17,107
Polytec EC 201L	0805	9,561
Polytec EC 201L	1206	7,019
AA DUCT 2919	0805	5,957
AA DUCT 2919	1206	6,778
LOCTITE 3888	0805	3,757
LOCTITE 3888	1206	9,223

Tab. 16 – Dopočtené průměrné hodnoty pro pevnost ve smyku (fáze 2)

Název lepidla	rozměrový kód velikosti pouzdra	průměrná hodnota síly pevnosti ve smyku Fb [N/mm2]
LOCTITE 3880	1206	14,748
Polytec EC 201L	1206	20,298
AA DUCT 2919	1206	10,489
LOCTITE 3888	1206	7,739

Dalším postupem bylo porovnání hodnot průměrných sil tab. 15, které byly naměřeny před zatížením zvýšenou vlhkostí a teplotou s tab. 16, kde byly hodnoty naměřeny za zhoršených klimatických podmínek. Toto srovnání bylo provedeno pouze pro pouzdra velikosti 1206. Předpokladem tohoto porovnání je, že vlhkost a zvýšená teplota by měla mít na lepidla negativní vliv a snížit tak sílu potřebnou pro odtržení vzorků. Při porovnání prvního lepidla LOCTITE 3880 mělo působení zvýšené vlhkosti a teploty negativní dopad na pevnost spoje. Průměrná hodnota pro sílu odtržení se snížila o 2,359 N/mm^2. U lepidla Polytec EC 201L je však průměrná hodnota síly po působení zhoršených klimatických podmínek více jak dvojnásobně vyšší, přesně o 13,279 N/mm^2 v průměrném součtu. Negativní klimatické vlivy nesnížily pevnost spoje ani v případě třetího lepidla AA DUCT 2919, kde průměrná síla potřebná pro odtržení odporu byla naopak vyšší a to o 3,711 N/mm^2. Pro poslední lepidlo LOCTITE 3888 byl předpoklad splněn a po klimatické zátěži se průměrná hodnota sil snížila o 1,484 N/mm^2.

7. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo otestovat kontaktování lepených spojů za pomoci ECA. Vzorky ECA byly vybrány na základě vypracovaného přehledu, který představuje tab. 1. Ve fázi objednávání produktů byl velký problém vůbec najít dostupné produkty k objednání. V ČR není moc velké zastoupení firem, které poskytují tyto produkty. Zahraniční firmy mají na svých webových stránkách většinou dotazníky pro vyplnění žádosti např. o informacích týkajících se produktů nebo jejich ceny, doby doručení a jiné požadavky. Vyplněny byly 3 žádosti o informace na webových stránkách výrobců ECA (masterbond.com, www.epoxysetinc.com, www.creativematerials.com) a odpověď na žádost nepřišla zpět ani v jednom případě. Z tohoto se dá usoudit, že zahraniční firmy přikládají těmto žádostem malou váhu. Proto 3 ze 4 vzorků byly objednány prostřednictvím českých firem. Dvě lepidla dodala firma OEM Automatic s.r.o., pro kterou bylo přínosem otestovat vlastností lepidel LOCTITE 3888, které mělo po expirační době a lepidla LOCTITE 3880. Fáze objednání vzorků lepidel byla časově nejnáročnější částí práce. Prodleva odpovídání zahraničních firem na emailové zprávy je v rozsahu 5 dnů až 10 dnů. Objednání produktů ze zahraničí trvá za standardních podmínek okolo 4 týdnů až 6 týdnů. České firmy odpovídají na informace o produktech téměř okamžitě, jako například již zmíněná firma OEM Automatic s.r.o. a také firma INTERCONTI s.r.o., která zprostředkovala vzorek Polytec EC 201L.

Pro testování komponent připojených za pomoci doručených ECA na flexibilní substráty měly být vybrány vhodné metody. Metody testování byly zjišťovány ze stránek Úřadu pro technickou normalizaci, kde v rámci norem ČSN není v současné době k dispozici jejich dostatečné množství. Proto byly v přehledu uvedeny i normy pro pájené spoje, kde mohlo být využito modifikace dané normy. Testování pevnosti nemohlo být z nedostatku informací založeno na konkrétní české normě, pouze se opíralo o pravidla testování dvou mezinárodních norem. Konkrétní normy bylo využito u testování vlivů klimatických podmínek přesněji ČSN EN 60068-2-78, podle které byla provedena druhá fáze testování v praktické části.

Vyhodnocení výsledků testování bylo shrnuto v této části. Při porovnání pevnosti lepených pouzder velikosti (1206 a 0805), v první fázi testování by měl být splněn logický předpoklad, že čím je lepená plocha větší, tím by měla být větší i pevnost spoje a tudíž by měla být potřeba i vyšší síla pro utržení vzorku ze substrátu. Lepená pouzdra za pomoci

lepidla LOCTITE 3880 tento předpoklad splňují. Pro větší pouzdra (1206) byla potřebná síla pro utržení vzorků průměrně o 0,596 N/mm^2. Pro spoje lepené vzorkem Polytec EC 201L, ale byla větší síla potřeba pro utržení menších součástek s velikostí pouzdra 0805. Průměrná hodnota potřebné síly odtržení převyšuje komponenty s velikostí pouzder 1206 o 2,542 N/mm^2. Tato nepřesnost mohla být způsobena nanesením menšího množství lepidla na kontaktní měděné pokovování flexibilního substrátu u pouzder velikosti 1206. U třetího vzorku lepidla AA DUCT 2919 byla potřebná větší síla pro utržení komponent s velikostí pouzder 1206 o průměrně 0,821 N/mm^2. Lepidlo LOCTITE 3888 předpoklad splnilo s největší odchylkou, kde potřebná síla pro utržení byla pro velikost pouzder 1206 průměrně o 5,466 N/mm^2 než u pouzder 0805. Nejhorší výsledky v pevnosti spojů tedy měli lepidla LOCTITE 3888, které mohlo mít horší výsledky, kvůli vypršení jeho expirační doby a lepidlo AA DUCT 2919, které bylo mezi zkoušenými produkty několikanásobně levnější.

Hlavní částí testování je porovnání vlivu zvýšené vlhkosti a teploty na pevnost lepených spojů, tedy porovnání první a druhé fáze praktické části. Zde by mělo platit, že zvýšená vlhkost a teplota by měla působit negativně na pevnost spojů lepidel. Porovnání bylo provedeno pouze součástek s velikostí pouzdra 1206. U kontaktování odporů pomocí lepidla LOCTITE 3880 byla potřebná síla snížena po vystavení vzorků klimatickým vlivům průměrně o 2,359 N/mm^2. Zatímco u druhého vzorku Polytec EC 201L potřebná síla po vystavení testovaných vzorků zvýšené vlhkosti a teplotě, průměrně o 13,279 N/mm^2. Tato hodnota se může lišit vlivem časového odstupu jednotlivých fází testování, kdy delší doba pro vytvrzení před druhou fází mohlo zapříčinit vyšší pevnost spoje. V případě tohoto testování byl časový posun první a druhé fáze 2 dny. Nejvyšší dosažená hodnota potřebné síly pro utržení byla 27,28 N/mm^2. U lepidla AA DUCT 2919 bylo také potřeba vyšší síly pro utržení vzorku v případě po působení klimatických podmínek průměrně o 3,711 N/mm^2. Vytvrzení tohoto lepidla probíhalo u první fáze 24 hodin a po té byly přilepené komponenty odtrhnuty. Před vložením do komory bylo lepidlo v pokojové teplotě o dva dny navíc a mohlo dojít ke kvalitnějšímu vytvrzení, vzhledem k tomu že v katalogovém listu bývá uvedena sice tabulková hodnota pro vytvrzení 24 hodin, ale v informacích o vytvrzení bývá uvedeno 24 hodin až 48 hodin. Na poslední vzorek s názvem LOCTITE 3888 měli nastavené klimatické podmínky negativní vliv, který se podepsal na snížení síly pro odtržení komponent o hodnotu průměrně 1,484 N/mm^2.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] WONG, William S a Alberto SALLEO. *Flexible electronics: materials and applications* [online]. New York: Springer, 2009, xviii, 462 p. [cit. 2015-02-18]. ISBN 978-038-7743-639. Dostupné z: https://erdinckuruoglu.files.wordpress.com/2011/03/flexible-electronics.pdf

[2] LI, Zhuo, Rongwei ZHANG, Kyoung-Sik MOON, Yan LIU, Kristen HANSEN, Taoran LE a C. P. WONG. Highly Conductive, Flexible, Polyurethane-Based Adhesives for Flexible and Printed Electronics. *Advanced Functional Materials*. 2013-03-20, vol. 23, issue 11, s. 1459-1465. DOI: 10.1002/adfm.201202249. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/adfm.201202249

[3] HUANG, Tsun-Ching. What is flexible electronic. [online]. 2009, vol.39 No.4 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: http://delivery.acm.org

[4] Flexible Electronics. [online]. ©2015 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: http://electronicsnewsline.com/970/flexible-electronics-an-impressive-revolutionary-technology.html

[5] INTERLINGUA PUBLICATIONS. *Printing Technology for Flexible Substrates* [online]. 2006 [cit. 2015-02-17]. ISBN 1-884730-46-9

[6] FJELSTAD, Joseph. Flexible circuit technology. [3nd ed.]. Sunnyvale, CA: Silicon Valley Publishers Group, c2006, v, 217 p. ISBN 0966707508.

[7] LI, Yi, Daniel LU a C WONG. Electrical conductive adhesives with nanotechnologies. London: Springer, c2010, xii, 437 p. ISBN 0387887822.

[8] KAPTON polyimid. *Www.elchemco.cz* [online]. 11. 5. 2010 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: http://www.elchemco.cz/kapton-polyimid-pi-specialni-lepici-pasky-elektroizolacni-folie-vysoke-teploty/kapton-polyimid/

[9] PROKOPOVÁ, Irena. Makromolekulární chemie. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007, 207 s. ISBN 978-80-7080-662-3.

[10] ASCHENBRENNER, R., R. MIESSNER a H. REICHL. *Adhesive flip chip bonding on flexible substrates* [online]. 1997 [cit. 2015-02-16]. ISBN 10.1109/pep.1997.656478. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=656478

[11] ZHANG, Rongwei, Wei WANG, Kyoung-sik MOON, Hongjing JIANG, Wei LIN a C. P. WONG. Development of transparent and flexible electrically conductive adhesives for microelectronics applications. In: PORTABLE-POLYTRONIC 2008 - 2nd IEEE International Interdisciplinary Conference on Portable Information Devices and the 2008 7th IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics [online]. 2008 [cit. 2015-03-02]. DOI: 10.1109/portable-polytronic.2008.4681304.

[12] LI, Yi a C.P. WONG. Recent advances of conductive adhesives as a lead-free alternative in electronic packaging: Materials, processing, reliability and applications. Materials Science and Engineering: R: Reports [online]. 2006, vol. 51, 1-3, s. 1-35 [cit. 2015-03-07]. DOI: 10.1016/j.mser.2006.01.001.

[13] Silikony. Gate2biotech [online]. © 2006 - 2015 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: http://www.gate2biotech.cz/dictionary.php?word=459

[14] WANG, Qi, George CHEN a Abdulsalam S. ALGHAMDI. Influence of nanofillers on electrical characteristics of epoxy resins insulation. In: 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics [online]. 2010 [cit. 2015-02-25]. DOI: 10.1109/icsd.2010.5568061.

[15] Masterbond: B-Stage Epoxy Systems. *Http://www.masterbond.com/* [online]. ©2015 [cit. 2015-02-27]. Dostupné z: http://www.masterbond.com/techtips/b-stage-epoxy-systems

[16] Viskozita. Http://cs.wikipedia.org/ [online]. poslední aktualizace 13. 3. 2015 v 16:27 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Viskozita

[17] BUREŠ, Jiří. Dynamicka-viskozita. Http://www.converter.cz/ [online]. 2002 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: http://www.converter.cz/prevody/dynamicka-viskozita.htm

[18] Converter Parts Per Million (ppm). Http://www.lenntech.com/ [online]. 1998 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: http://www.lenntech.com/calculators/ppm/converter-parts-per-million.htm

[19] Skelný přechod. Http://fyzweb.cz/ [online]. 2006 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: http://fyzweb.cz/odpovedna/index.php?hledat=&limit_od=667

[20] OSTEN, Miloš. Práce s lepidly a tmely. 3. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literytury, 1986, 285 s.

[21] MATKOWSKI, P. a Qi HAIYU. Vibration tests utilization in the study of reliability of connections in microelectronics. In: Proceedings of 2005 International Students and Young Scientists Workshop Photonics and Microsystems, 2005 [online]. 2005 [cit. 2015-05-15]. DOI: 10.1109/stysw.2005.1617798.

[22] SAARINEN, Kirsi a Laura FRISK. Reliability Testing and Modeling of Anisotropic Conductive Adhesive Joints Under Temperature Cycling Test. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology [online]. 2013, vol. 3, issue 9, s. 1512-1523 [cit. 2015-05-21]. DOI: 10.1109/tcpmt.2012.2230399.

[23] FRISK, Laura, Sanna LAHOKALLIO, Milad MOSTOFIZADEH, Janne KIILUNEN a Kirsi SAARINEN. Reliability study of isotropic electrically conductive adhesives under thermal cycling testing. In: 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference [online]. 2013 [cit. 2015-05-15]. DOI: 10.1109/ectc.2013.6575819.

[24] MACH, Pavel. Modifikovaná elektricky vodivá lepidla. ELECTROSCOPE [online]. 2009, (2) [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/528/r3c2c7.pdf?sequence=1

[25] KIILUNEN, Janne a Laura FRISK. Hygrothermal Aging of an ACA Attached PET Flex-on-Board Assembly. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology [online]. 2014, vol. 4, issue 2, s. 181-189 [cit. 2015-05-21]. DOI: 10.1109/tcpmt.2013.2290838.

[26] FRISK, L., S. LAHOKALLIO, M. MOSTOFIZADEH, J. KIILUNEN a K. SAARINEN. Reliability of isotropic electrically conductive adhesives under condensing humidity testing. In: 2012 IEEE 14th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC) [online]. 2012 [cit. 2015-05-21]. DOI: 10.1109/eptc.2012.6507073.

[27] CAO, Liqiang, Zonghe LAI a J. LIU. Effect of curing condition of adhesion strength and ACA flip-chip contact resistance. In: Proceedings of the Sixth IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP '04) [online]. 2004 [cit. 2015-05-22]. DOI: 10.1109/hpd.2004.1346708.

[28] Process Controls. *Integrated Hybrid Assembly* [online]. 2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: http://www.integratedhybridassembly.com

[29] *IPC-TM 650 - Die shear strenght*. Nothbrook: The institute of connecting and packaging electronic circuits, 1998.

[30] LI, Li, J.E. MORRIS, Johan LIU, Zonghe LAI, L. LJUNGKRONA a Changhai LI. Reliability and failure mechanism of isotropically conductive adhesives joints. In: 1995 Proceedings. 45th Electronic Components and Technology Conference [online]. 1995 [cit. 2015-05-31]. DOI: 10.1109/ectc.1995.514370.

[31] Henkel Elektricky vodivá lepidla. *Http://www.oemautomatic.cz/* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://www.oemautomatic.cz/Products/Electronics/Materialy/Specialni_lepidla/Henkel_Elektricky_vodiva_lepidla/2156138-2159217.html

[32] Rozměry standardních SMD pouzder. *Pandatron* [online]. 2015 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?584&rozmery_standardnich_smd_pouzder

[33] Boxplot. Http://cs.wikipedia.org [online]. 2014 [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Boxplot