ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Propojování flexibilních substrátů

Tomáš Konvička **2016**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2015/2016**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Tomáš KONVIČKA**
Osobní číslo:	**E14N0015P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komerční elektrotechnika**
Název tématu:	**Propojování flexibilních substrátů**
Zadávající katedra:	**Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou propojování flexibilních substrátů a proveďte rešerši použitelných propojovacích materiálů a v praxi využívaných způsobů propojování.
2. Zpracujte přehled způsobů propojování a použitelných materiálů.
3. Navrhněte experiment pomocí něhož ověříte vhodnost vybraných materiálů a způsobů propojení pro flexibilní substráty. V rámci experimentu ověřte také vliv materiálových a procesních parametrů.
4. Navržený experiment realizujte a vyhodnoťte jeho výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. **Klein Wassink, R. J. Soldering in Electronics**
2. **Hwang, J. Environment-Friendly Electronics: Lead-free Technology**
3. **Internet**
4. **Technické normy**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

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

L.S.

Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou propojování flexibilních substrátů, zejména s využitím vodivých lepidel. První část je zaměřena na typy flexibilních substrátů. Ve druhé části jsou popsány technologie, které se využívají k propojení substrátu se součástkami. Třetí část je věnována tvorbě vodivých motivů na flexibilních substrátech. Jsou zde popsány různé techniky vytváření vodivých motivů. V praktické části je popsán experiment, který je v první části zaměřen na hledání vlivu různých tvarů otvorů na množství naneseného lepidla. Ve druhé části jsou testovány otvory v šabloně, které bychom mohli využít v praxi, při aplikaci vodivého lepidla, naneseného na flexibilní substrát. U testovaných vzorků byla měřena mechanická pevnost ve smyku, velikost izolační mezery a elektrický odpor.

Klíčová slova

Flexibilní substrát, vodivá lepidla, propojení, elektrický odpor, mechanická pevnost, izolační mezera

Abstract

This thesis deals with the issue of interconnecting flexible substrates, in particular with using conductive adhesives. The first part is focused on the types of flexible substrates. The second part describes the technologies that are used to interconnect the substrate and the components. Creating conductive motifs on flexible substrates is explained in the third part. There are described different application techniques. The practical part deals with an experiment, which in the first part is focused on searching effect of various types of holes on the amount of adhesive applied. The second part involves testing of the holes in the template, which could be used in practice when applying the conductive adhesive applied on a flexible substrate. The mechanical shear strength, insulating gaps and electrical resistance were examined by the testing samples.

Key words

Flexible substrate, conductive adhesives, interconnection, electrical resistance, mechanical strenght, insulating gap

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 16.5.2016 Bc. Tomáš Konvička

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Františku Steinerovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH **8**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **9**

ÚVOD **10**

1 SUBSTRÁTY V ELEKTROTECHNICE **11**

2 PROPOJOVÁNÍ SOUČÁSTEK A SUBSTRÁTŮ **15**

2.1 MĚKKÉ PÁJENÍ 15
2.1.1 Olovnaté pájecí slitiny *16*
2.1.2 Bezolovnaté pájecí slitiny *16*
2.2 VODIVÉ LEPENÍ 17
2.2.1 Struktura *18*
2.2.2 Izotropní vodivá lepidla *19*
2.2.3 Anizotropní vodivá lepidla *19*
2.3 NEVODIVÁ LEPIDLA 20

3 VYTVÁŘENÍ VODIVÝCH MOTIVŮ **21**

3.1 ROLL TO ROLL 21
3.2 HLUBOTISK 21
3.3 FLEXOTISK 23
3.4 SÍTOTISK 23
3.5 FOTOLITOGRAFIE 24

4 MATERIÁLY A ZPŮSOBY PROPOJOVÁNÍ POUŽÍVANÉ V PRAXI **25**

4.1 FLEXIBILNÍ SUBSTRÁTY 25
4.2 PROPOJOVÁNÍ 27
4.3 LEPIDLA 28

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST **32**

5.1 OTVORY V ŠABLONĚ 32
5.2 POUŽITÁ LEPIDLA 33
5.3 TEPLOTNÍ PROFIL VYTVRZENÍ 34
5.4 ODTRH SOUČÁSTEK 35
5.5 MĚŘENÍ IZOLAČNÍ VZDÁLENOSTI 36
5.6 VÝSLEDKY PRO PRVNÍ ČÁST EXPERIMENTU 36
5.7 FLEXIBILNÍ SUBSTRÁT 40
5.8 ZNAČENÍ OTVORŮ 40
5.9 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU 41
5.10 VÝSLEDKY PRO DRUHOU ČÁST EXPERIMENTU 42
5.11 FAKTOROVÁ ANALÝZA 46

ZÁVĚR **48**

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ **49**

PŘÍLOHY **52**

Seznam symbolů a zkratek

ACAs Anisotropic Conductive Adhesives - Anizotropní vodivá lepidla

CMP Chemical Mechanical Planarization - Chemicko mechanické leštění

DPS Deska plošných spojů

ECA Electrically Conductive Adhesives - Elektricky vodivá lepidla

FR4 Flame Retardant Class 4 - kompozitní materiál ze skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice

ICAs Isotropic Conductive Adhesives - Izotropní vodivá lepidla

PEN Polyethylene naphthalate - Polyethylen naftalát

PET Polyethylene terephthalate - Polyethylen tereftalát

RoHS Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipmet - směrnice o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních

R2R Roll to roll - Válec na válec

UV Ultraviolet - Ultrafialové záření

WEEE Waste Electrical and Electronic Equipment - Směrnice o odpadních elektrických a elektronických zařízení

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou propojování flexibilních substrátů. Dříve byly používány výhradně pevné substráty, založené především na bázi epoxidové pryskyřice. Tento druh substrátů je vyztužen tkanými skleněnými vlákny. Nejčastějším způsobem propojení substrátu a součástky bylo pájení, při kterém se využívaly převážně olovnaté pájecí slitiny. Olovo je však dnes zařazeno mezi toxické látky a jeho použití je až na výjimky zakázáno, což je stanoveno ve směrnicích, které vydala Evropská unie. Proto jsou v dnešní době využívány především bezolovnaté pájecí slitiny, kde se nejčastěji uplatňuje cín (Sn) ve spojení s jinými kovy např. stříbro (Ag), měď (Cu), zinek (Zn) a další. Technologie pájení není jediná, která se dá použít k propojení substrátu se součástkou. Vhodnou alternativou je využití technologie vodivého lepení.

V současné době dochází v některých aplikacích k přechodu z pevných substrátů na flexibilní. Mezi výhody flexibilních substrátů patří především ohebnost, nízká hmotnost a rozměrová stálost. Při propojování flexibilních substrátů je třeba postupovat velmi opatrně. Jelikož základ substrátu tvoří zpravidla tenký polyimid, je potřeba pohlídat škodlivé faktory, které mohou poškodit funkčnost spoje. Jedním z faktorů, na které si musíme dávat pozor, je teplota, kterou flexibilní substrát dokáže snést. Protože teplota tavení bezolovnatých pájek je zpravidla vyšší než teploty vytvrzení vodivých lepidel, je možné využít technologie lepení jako vhodnou alternativu. Vodivá lepidla jsou navíc velmi šetrná k životnímu prostředí.

Kvalita lepeného spoje je však ovlivněna spoustou faktorů. Jedním z těchto faktorů je volba lepidla. Na trhu existuje celá řada vodivých lepidel dodávaných od špičkových výrobců. Dále je potřeba použít vhodný vytvrzovací profil. Některá lepidla se dají vytvrzovat i při pokojové teplotě, abychom zbytečně nezatěžovali flexibilní substrát. Dalšími faktory, které ovlivňují kvalitu lepeného spoje jsou - použité množství lepidla, způsob jeho nanášení, čistota lepeného povrchu, teplota, vlhkost a typ použitého flexibilního materiálu. Vliv uvedených faktorů na kvalitu lepeného spoje je testován v experimentální části této práce.

1 Substráty v elektrotechnice

V elektrotechnice se používají materiálové substráty pevné i flexibilní, na které je pak možno připojit různými způsoby elektronické součástky a čipy. Tato kapitola je věnována flexibilním substrátům. Jako základní podkladový materiál mohou být použity různé organické materiály např: sklo-epoxidové, textilní, polyimid či polyester. Materiál je vybírán na základě vlastností a pro jakou aplikaci a v jakých podmínkách bude použit. [1,2]

- **Sklo-epoxidové substráty**

Sklo-epoxidové substráty patří k nejběžnějším substrátům, které jsou využívány v zobrazovací technice. Abychom mohli považovat sklo-epoxidový substrát za flexibilní, musí být jeho tloušťka menší než 100 μm. Mezi výhody skelných substrátů patří:

- provozní teplota do 600^{o}C
- optická propustnost ve viditelné oblasti > 90%
- vysoká rozměrová stabilita
- nízký koeficient tepelné roztažnosti 4×10^{-6}/ ^{o}C
- odolnost vůči většině chemických látek
- odolnost proti poškrábání
- nepropustnost vůči vodě a kyslíku.

Sklo-epoxidové substráty jsou velmi křehké, a proto je manipulace s nimi velmi obtížná. Aby se předešlo výskytu trhlin, využívají se během zpracování tři technologie:

- laminace s plastovou fólií
- nanesení tenkého tvrdého povlaku
- použití silné vrstvy polymeru [3].

- **Pružné kovové substráty**

Abychom mohli mluvit o kovových flexibilních substrátech, musí být tloušťka kovové fólie menší než 125 μm. Tyto substráty jsou použity v emisních a reflexních displejích, které nepotřebují transparentní substráty. Nejčastěji používaným materiálem ve výzkumu je nerezová ocel, protože vykazuje vysokou odolnost proti korozi a procesním chemikáliím. Nerezové substráty mohou tolerovat vysokou procesní teplotu až 1000^{o}C, jsou rozměrově stálé a představují dokonalý prostup bariérou proti vlhkosti a kyslíku, a proto mohou sloužit jako chladič a poskytnout elektromagnetické stínění. Obecně platí, že podklady z nerezové oceli jsou odolnější než plast a sklo-epoxidové fólie. [3]

Typické fólie z nerezové oceli jsou dodávány s ostrými valivými značkami a mikrometr velikosti inkluze může způsobit to, že dojde k selhání zařízení. Nejpečlivěji válcovaná ocel má drsnost povrchu cca 100nm, na rozdíl od skla, kde je drsnost menší než 1nm. Substráty musí být buď dobře leštěny, nebo se zde využívá metody CMP, kde dochází ke kombinaci chemického a mechanického leštění. Jde o spojení, které kombinuje chemické odstranění účinku kyselého nebo bazického roztoku a leštění s brusným materiálem. CPM systém má obvykle leštící hlavu, která tlačí proti rotující flexibilní podložce. CPM může účinně odstranit zbytky mědi, která byla testována. [3,4].

Kovové substráty jsou elektricky vodivé. V některých aplikacích mohou sloužit jako záložní kontakt např. v solárních článcích. Pro jiné aplikace musí být kov potažen izolační vrstvou, aby došlo ke galvanickému oddělení obvodu. SiN_x nebo SiO_2 vrstvy jsou běžně použity pro tento účel. Pro elektrickou izolaci postačuje izolační vrstva o šířce 0,2- 0,4μm, neboť snižuje unikající proud při rozdílu potenciálu 50V až 1nA/cm^2. [3]

- **Textilní substráty**

V dnešní době představují chemická vlákna soubor mnoha materiálů, které se využívají jak v průmyslu oděvním, tak i v elektrotechnickém. V elektrotechnickém průmyslu se využívá substrátů SMART. Jak už z názvu vyplývá, jedná se o chytré textilie, které mají schopnost vytvořit rozhodnutí, jež závisí na vnějších podnětech. Díky této vlastnosti dochází u těchto textilií k dočasné změně barvy či tvaru. U těchto materiálů je

důraz kladen na vysokou pevnost, pružnost, citlivost a mnoho dalších vlastností, které jsou potřebné pro funkčnost aplikací. SMART textilie se dělí na 3 skupiny:

- pasivní
- aktivní
- velmi inteligentní [4],[5].

U všech skupin textilií dochází vyvoláním vnějších podnětů (magnetické či elektrické pole, klimatické podmínky, různé druhy záření apod.) k určitým změnám. Pasivní textilie se vyznačují tím, že jejich reakce je nevratná. U aktivních je při změně vnějších podnětů reakce vratná, avšak reagují vždy stejným způsobem. Poslední skupinou jsou velmi inteligentní textilie, které jsou velmi citlivé na vnější podněty a jejich reakce je vratná a mezi tyto textilie řadíme produkty zvané jako oblékací elektronika. [5]

Výhody těchto substrátů spočívají v jejich inteligentních reakcích a co se týče jejich hmotnosti, tak jsou velmi lehké, snadno se vyrábějí a jejich údržba je také snadná. Jsou velice pevné, pružné a hlavně cenově dostupné. [5]

Na *Obr.1.1* je zobrazen inteligentní hasičský oblek vytvořený od autora Tomáš Blecha a spol. (2014), který využívá antény, jež jsou velmi důležitou součástí komunikačních modulů. Tento oblek obsahuje různé senzory, centrální jednotku pro sběr dat, napájecí modul a modul pro přenos dat do jiného těla centrální jednotce nebo veliteli centrální procesorové jednotce. [6]

Obr.1.1 Inteligentní hasičský oblek. převzato z [6]

- **Plastové substráty**

Jedním z prvních použitých plastových substrátů se stal polyimid tzv. Kapton, který byl poprvé použit v aplikacích v oblasti leteckého a kosmického průmyslu. Největší výhodou tohoto materiálu je ta, že si dokáže udržet stejné vlastnosti v širokém rozsahu teplot (-269 ^{o}C až 400 ^{o}C). [7]

Při jejich výrobě se využívá polykondenzace z aromatického dianhydridu a aromatického diamantu. Po tomto procesu vznikne predpolymer, který se ihned vytvrdí při vyšší teplotě a vznikne fólie nebo se roztaví ve vhodném rozpouštědle a získá lepidlo nebo lak, který konečné vlastnosti získá až po následném vytvrzení při vyšší teplotě. Kapton je velice odolný vůči chemickým kyselinám, netaví se, odolává velké řadě rozpouštědel, olejů a paliv. Nespornou výhodou je i jejich odolnost proti různým druhům záření např. ultrafialové, alfa, beta a gama. Tento materiál se využívá i jako lepicí páska, která se může používat trvale do 18 ^{o}C a krátkodobě do 370 ^{o}C. [7]

2 Propojování součástek a substrátů

Tato kapitola se zabývá problematikou pájení a vodivého lepení. Je zde popsáno měkké pájení a využití olovnatých a bezolovnatých slitin. Dále je zde popsána struktura lepidla a jeho dělení. Jsou zde zachycena izotropní i anizotropní lepidla. [8]

2.1 Měkké pájení

Pájení je technika, kde dochází ke spojování kovů jiným kovem za pomoci pájky, přičemž kovy se netaví, ale taví se pájka. Z toho vyplývá, že pájka musí mít nižší teplotu tavení než spojované kovy. Abychom mohli hovořit o měkkém pájení, můžeme použít jen pájecí slitiny s teplotou tavení do 450 ^{o}C. [9,10]

Měkké pájky jsou slitiny cínu, olova a antimonu. Využití naleznou při pokovování, utěsňování otvorů či vyplňování dutin. Můžeme je využívat v několika formách: [9]

- v tyčích litých a tvářených
- jako drát
- v pásech a foliích
- v pájecích práškách
- v pájecích pastách.

Při měkkém pájení musíme do spoje dodat pájecí slitinu, abychom zabránil tvorbě nečistot. Z tohoto důvodu se využívá tavidlo, které zlepšuje smáčivost a zabraňuje korozi. Tavidlové zbytky po procesu pájení mohou však způsobit problémy. Vlivem prostředí a dalších činitelů mohou zkorodovat. Aby k tomuto problému nedocházelo, je třeba tavidlové zbytky odstranit. Mezi metody odstranění tavidlových zbytků patří metoda postřikem, kde mycí emulze je vháněna do trysek pod velkým tlakem. Metoda probublávání spočívá v tom, že vana je naplněna mycím roztokem a ze spodu proudí vzduch z trysek vzhůru a vniklé bubliny odplavují nečistoty. Nejefektivnější způsobem čistění je čištění za pomoci ultrazvukové lázně, kde dochází k procesu zvaný kavitace. Jedná se o proces, kde se v čistícím médiu vytváří miliony mikroskopických bublinek, které pak vlivem tlaku implodují a následně uvolněná energie odstraňuje nečistoty z povrchu čištěné desky. Ultrazvukové čistění výrazně zkracuje dobu čištění. [10,11]

2.1.1 Olovnaté pájecí slitiny

Jelikož bylo olovo označeno jako toxický prvek, došlo k omezení jeho používání. Vyloučená elektrická zařízení se odvážejí na skládky s komunálním odpadem bez možnosti recyklace. Ve spojení s kyselým deštěm dochází k rozpouštění olova a kontaminaci podzemních vod. I pro lidský organismus je olovo velice škodlivé. Způsobuje řadu onemocnění, které postihují mozek či vnitřní orgány např. játra. [12]

Od roku 2003 jsou Evropským Parlamentem vydané dvě směrnice , které jsou závazné pro všechny členské státy Evropské unie. První z nich je WEEE, která je zaměřena na recyklaci a ekologickou likvidaci elektrických zařízení. Druhá směrnice RoHS popisuje omezení využití nebezpečných materiálů a zlepšení recyklačních procesů. Mezi škodlivé materiály a sloučeniny patří benzen, chloroform, kyanidy, rtuť, chrom a další. [12,13]

Cílem výrobců je vytvořit takovou bezolovnatou pájecí slitinu, která by byla podobná slitině Sn-Pb a dosahovala by požadovaných mechanických, chemických a elektrických vlastností. [12]

- **Slitiny Sn - Pb**

Tyto slitiny byly dříve nejvíce využívané, avšak jak už je zmíněno výše, přechází výrobci na jiné pájecí slitiny, které nebudou obsahovat olovo, ale budou dosahovat podobných vlastností. Obsah olova v těchto slitinách se pohyboval v rozmezí 35% až 40%. Nejvíce se využívala tzv. eutektická pájka, která obsahovala 62 % Sn a 38% Pb. Hlavní výhodou tohoto poměru je, že při tuhnutí dojde k okamžitému přechodu do pevného skupenství. Odpadá plastická fáze, která zhoršuje mechanické a elektrické vlastnosti. [12]

2.1.2 Bezolovnaté pájecí slitiny

Tyto slitiny ve většině případů obsahují minimálně 60% Sn a zbylá část je doplněna kovy jako je měď či stříbro. Jelikož měď a stříbro patří mezi drahé kovy, jsou tyto slitiny dražší než Sn-Pb pájka. Tyto pájky mají vyšší bod tavení, který se pohybuje v rozmezí 195 ^{o}C - 227 ^{o}C. U pájek Sn-Pb dochází k procesu tavení již při 183 ^{o}C. Záleží však na typu konkrétní slitiny, které můžete vidět v *Tab.2.I.* [14]

Tab.2.I Bezolovnaté pájecí slitiny [14]

Oblast tavení (°C)	Pájka	Využití v průmyslu	Společnost
Slitiny s vysokým bodem tavení (>210°C)			
227	Sn/Cu	Spotřebitelský	Panasonic
		Telekomunikace	Nortel
221	Sn/Ag		
217	Sn/Ag/Cu	Automobilový	Panasonic
		Telekomunikace	Nokia, Nortel, Panasonic, Toshiba
217	Sn/Ag/CuSb		
	Sn/In/Ag		
	Sn/Ag/Cu/Zn		
	Sn/Ag/Bi/Cu	Vojenský/Letecký	Panasonic
	Sn/Ag/Bi/Cu/Ge	Spotřebitelský	Sony
Slitiny s bodem tavení v rozsahu 180°C-210°C			
206-213	Sn/Ag/Bi/X	Spotřebitelský	Panasonic
206-213	Sn/Ag/Bi	Vojenský/Letecký	Panasonic
		Spotřebitelský	Hitachi
199	Sn/Zn	Spotřebitelský	NEC, Panasonic, Toshiba
Slitiny s nízkým bodem tavení (<180°C)			
	Sn/Bi/Zn		
138	Sn/Bi		Panasonic

2.2 Vodivé lepení

Elektricky vodivá lepidla (ECAs) mají výrazně větší elasticitu než pájky. Pokud chceme hovořit o vodivých lepidlech musíme do nich přidávat plniva, abychom dosáhli elektrické vodivosti. Jako standardní plnivo se využívají stříbrné částice. Další plniva, která můžeme použít, jsou měď, zlato či nikl. Elektrický odpor se pak většinou měří za pomoci čtyřbodových sond, které pak vyhodnocují velikost odporu materiálu. [15]

U lepených spojů, které mají tloušťku menší než 100 µm, není elektrický odpor konstantní. Je závislý na tloušťce lepeného spoje. Z obecného pravidla je známo, že čím je tenčí spoj, tím je vyšší odpor, což je negativní vliv. Proto je velmi obtížné vypočítat elektrický odpor skutečného spoje, když vycházíme z plochy a tloušťky spoje. U skutečných spojů je vhodné zaznamenat si tloušťku lepeného spoje a následně stanovit elektrický objemový odpor ve zpětném výpočtu na základě elektrického odporu vazby. Nejčastěji je u lepidel stanovena specifická elektrická hodnota odporu, která nám však nepodává dostatečné informace o elektrickém odporu, jakého můžeme dosáhnout u

skutečného spoje. U klasického lepidla je rezistivita cca 10^{14} Ω*cm, ale u elektricky vodivého lepidla je rezistivita 10^{-4} Ω*cm. Mezi materiály, které vykazují nízkou hodnotu elektrického odporu patří: [15,16,17]

- zlato
- stříbro
- platina
- palladium.

Mezi hlavní výhody lepených spojů patří ekologická nezávadnost v porovnáni s pájkou. Dále jsou zde rozdílné teploty vytvrzení, kde u lepidel se pohybujeme v rozmezí teplot od 100 ^{o}C do 180 ^{o}C a bezolovnatá pájka má bod tavení v rozmezí 210 ^{o}C až 225 ^{o}C. Lepené spoje je vhodné používat pro tepelně citlivé součástky. Lepené spoje však vykazují horší mechanické vlastnosti ve srovnání s pájkou. Jsou méně odolné vůči vlhkosti, a tím klesá i jejich spolehlivost. [15,16]

2.2.1 Struktura

Elektricky vodivá lepidla jsou složena ze dvou základních složek. Jednou z těchto složek je složka vazební (binder). Jedná se o izolant, který je tvořen pryskyřicí různého typu. V největší míře má zastoupení epoxidová pryskyřice pro teploty až do 200^{o}C. Existují však i elektricky vodivá lepidla na bázi polyimidových či silikonových pryskyřic. Mohou být jednosložková či dvousložková (pryskyřice + tvrdidlo). Dvousložková lepidla nepotřebují k vytvrzení tak vysokou teplotu a je možné je vytvrdit i při pokojové teplotě, avšak tím prodloužíme dobu vytvrzení. Nevýhodou je jejich vysoká cena oproti jednosložkovým a před použitím musí být pryskyřice s tvrdidlem smíchána ve správném poměru. [17]

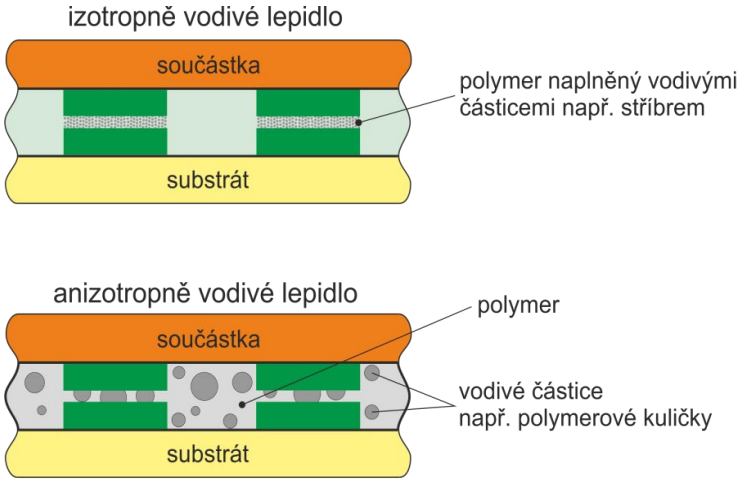
Druhou složkou je plnivo (filler). Zde mluvíme o vodivé složce. Je tvořena rovnoměrně rozptýlenými vodivými částicemi, které mohou být ve formě kuliček (balls) o průměru 1-20 μm nebo šupinek (flakes). Tyto vodivé částice tvoří z 60% až 80% z objemu lepidla. [17]

2.2.2 Izotropní vodivá lepidla

Izotropní vodivá lepidla (ICAs) jsou kompozity z polymerové pryskyřice a vodivých plniv. Jsou obdobná jako pájky, protože jsou vodivá ve všech směrech. Vodivé částice mají převážně kulový tvar. Koncentrace vodivých částic se pohybuje v rozmezí 50% - 80%. Velká hustota částic pak zajistí potřebnou vodivost. Využívají se zde termoplastické materiály např. epoxidy, silikony, polyuretany a další. Výhodou těchto termoplastů je, že jsou snadno opravitelné a díky tomu s nimi můžeme opakovaně pracovat. [18,19]

2.2.3 Anizotropní vodivá lepidla

Anizotropní vodivá lepidla (ACAs) se vyznačují tím, že jsou vodivá jen v kolmém směru k rovině DPS. Tyto lepidla jsou nevodivá v rovnoběžném směru k DPS. Tento směrový typ vodivosti používá relativně nízká procenta vodivého plniva (5% až 20%). Působením tepla a tlaku dojde k vodivému propojení obou povrchů. Po tomto spojení dojde k vytvrzení polymeru tepelně iniciovanou chemickou reakcí (pro reaktoplasty) nebo k zchlazení (pro termoplasty). Dielektrická polymerová matrice udržuje obě části pohromadě díky tlaku kontaktů a vodivým částicím. V důsledku anizotropie se mohou tyto lepidla nanášet na celou oblast plochy, což podstatně usnadňuje jeho aplikaci. Také lze za pomoci anizotropních lepidel dosáhnout ultra jemných roztečí (< 0.04 mm). Schopnost lepidla je omezena velikostí částic vodivého plniva, které mohou mít v průměru několik mikrometrů či nanometrů. [18,19]



Obr.2.1 Princip izotropního a anizotropního lepidla [19]

2.3 Nevodivá lepidla

Nevodivá lepidla můžeme rozdělit do třech základních skupin: [20]

- termoplastická lepidla
- elastomerická lepidla
- lepidla tvrditelná teplem.

Termoplastická lepidla mění vlivem tepla své fyzikální vlastnosti díky odpařením rozpouštědel. Vlivem tepla měknou, a proto nejsou vhodné k lepení součástek. To samé můžeme říci o elastomerických lepidlech. Tyto materiály vykazují vysokou elastičnost a ohebnost, ale také nejsou využívány pro lepení součástek. Lepidla tvrditelná teplem se vytvrzují za pomoci tepla, jenž způsobí chemickou reakci. Dochází k nevratné přeměně z plastického stavu do tuhého. [20]

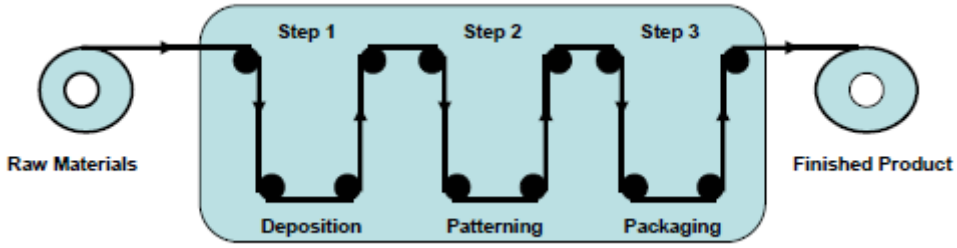
U nevodivých lepidel nedochází k vodivému spojení. Ke spojení dochází za pomoci velkého tlaku a vysoké teploty, a tím je vytvořeno permanentní spojení nevodivého lepidla. [20]

3 Vytváření vodivých motivů

V této kapitole je popsáno několik možností, jak vytvořit vodivý motiv na flexibilním substrátu.

3.1 Roll to roll

Roll to roll, zkráceně R2R, je výrobní technika zahrnující kontinuální zpracování flexibilního substrátu, protože se přenáší mezi dvěma pohyblivými válci. Je to proces, kde je na flexibilní substrát nanášen požadovaný materiál z jednoho válce a následně je navinut na válec druhý. Vysoká propustnost a nízké náklady jsou faktory, které odlišují R2R od konvenční výroby, která je pomalejší a dražší z důvodu většího počtu kroků např. dávkové zpracování. Počáteční náklady zřídit takový systém mohou být vysoké, nicméně tyto náklady mohou být často získávány prostřednictvím úspor z rozsahu. [21],[22]

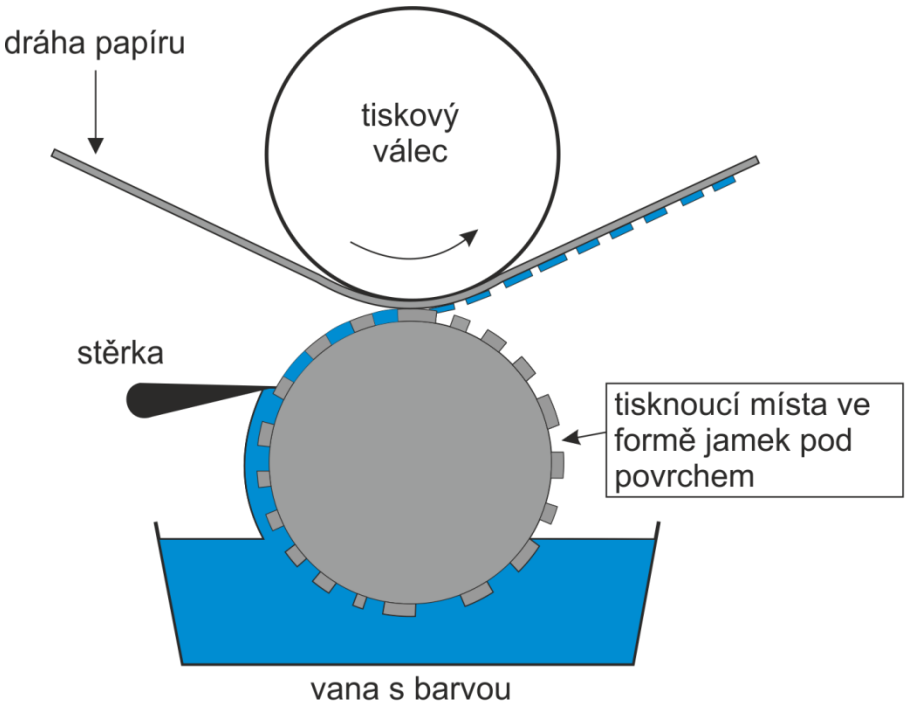


Obr.4.1 Proces nanášení materiálu metodou R2R.převzato[21]

3.2 Hlubotisk

Jedná se o metodu, která pracuje na principu tisku z hloubky, kde tiskové prvky jsou zahloubené pod úroveň netisknoucích prvků. Místa tisku jsou naplněna rychle zasychající barvou. Při tisku se barva přetiskne na požadovaný materiál, většinou papír. K upevnění barvy na papíru dochází odpařením těkavých rozpouštědel. [23,24]

Pomocí této metody vznikají produkty jako jsou obaly, zásilkové katalogy či velké ilustrované časopisy. [23,24]



Obr.4.2. Princip metody hlubotisku [23]

Válec se skládá z ocelové trubky, která je vyztužena vnitřními výztuhami. Tělo válce je pevné a hladké. Aby nedocházelo ke chvění a otřesům, je nutné ocelové jádro vyvážit. Maximální rychlost otáčení válce je 15 otáček za sekundu. Dále je válec chráněn vrstvou niklu, aby nedocházelo ke vzniku koroze. Na tento válec je pak nanesena základní vrstva mědi, která je tvrdší než gravírovací vrstva. [23]

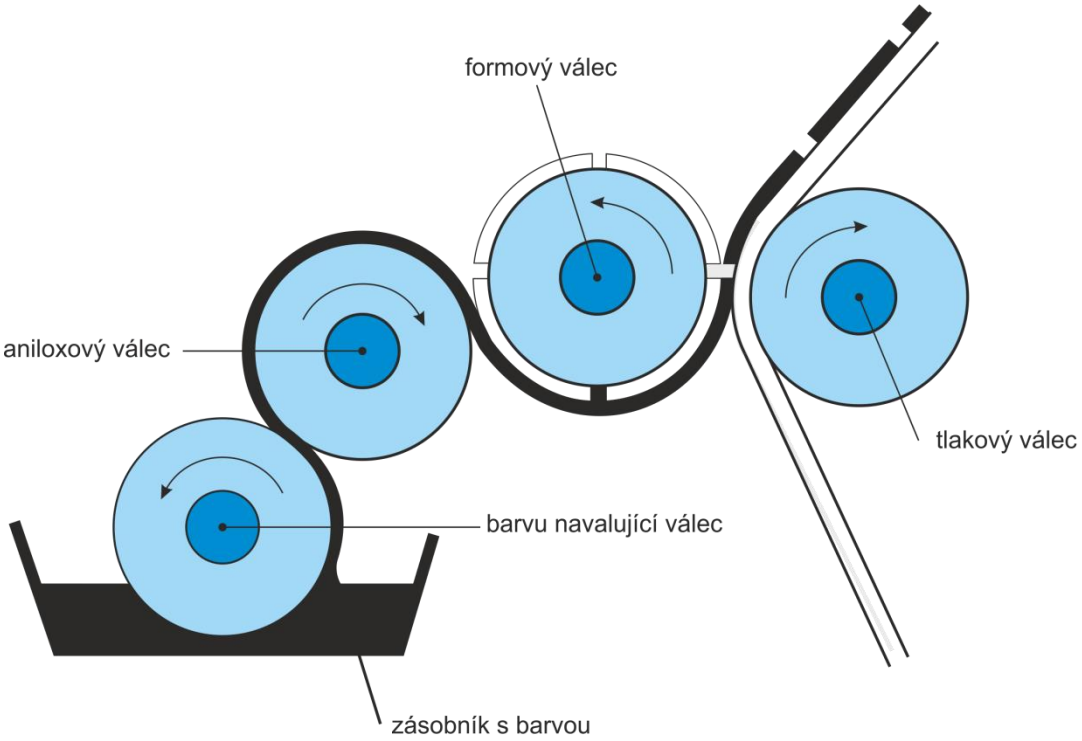
K nanesení gravírovací vrstvy se využívá proces zvaný galvanizace. Po nanesení gravírovací vrstvy se snižuje náročnost mechanického opracování válce. Aby byla životnost válce co nejdelší, je pokryt tenkou chromovou vrstvou. [23]

Máme zde tři způsoby, jak vytvořit tiskový obraz na tiskovém válci: [23]

- Leptání
- Elektromechanické gravírování
- Laserové gravírování

3.3 Flexotisk

Jedná se o tzv. tisk z výšky. Předností flexotisku je schopnost potisknout celou řadu materiálů jako je papír, různé fólie či samolepicí materiály. Oproti ostatním metodám tisku se vyznačuje vysokou produktivitou tisku a nízkými výrobními náklady. K tisku dochází za pomoci rotujících válců, které jsou opatřeny stočky ze speciálních polymerů. Tisková forma je vyrobena fotomechanickou cestou a to tak, že dochází k přiložení filmu s předlohou na stoček nebo je vypálena laserem a následně pomocí ultrafialového světla se plochy k tisku vytvrdí. [25]



Obr.4.3. Proces nanášení vodivé vrstvy za pomoci flexotisku [25]

3.4 Sítotisk

U této technologie dochází k tomu, že pájecí pasta či barva je protlačována skrz síto. Síto je síťka složená z vláken (nylon, polyester, popřípadě kov). Pasta je nanesena jen v místech, ve kterých požadujeme. Tuto technologii využíváme v celé řadě aplikací. Klasickým případem je deska plošných spojů, kde je deska pokryta pájecí pastou a poté

dojde k osazení součástek. Touto metodou lze nanášet vodivé cesty, aktivní či dielektrické vrstvy na pevný i na ohebný substrát. [26]

Jako materiál při samotném tiskovém procesu se nanáší nejčastěji stříbrná nebo uhlíková pasta. Zlaté pasty jsou méně používané z důvodu vyšší ceny.

Tloušťka vytvořených vrstev se pohybuje od 5µm do 125µm. Šířka motivu se odvíjí od vlastností a technického provedení síta (velikost, tvar a hustota otvorů apod.) a použití vybrané pasty. [26]

3.5 Fotolitografie

Fotolitografie patří mezi základní postup, který je využíván při výrobě integrovaných obvodů. Jelikož poptávka po menších a menších obvodech stále roste, je třeba neustále zkoumat a vyvíjet nové nástroje pro litografický tisk. Jedná se o proces, kdy je motiv přenášen na substrát za pomoci světla. Využívá se zde UV záření, které umožňuje vytvářet motivy až do několika desítek nanometrů. Využívá se zde světlo o vlnové délce 350 - 450 nm. [27]

Využívá se zde fotorezist, který je nanesen na substrát. Díky působení světelného záření mění fotorezist svoji chemickou strukturu. Světelné záření může působit buďto přímo, anebo nepřímo za pomoci optické masky. [28]

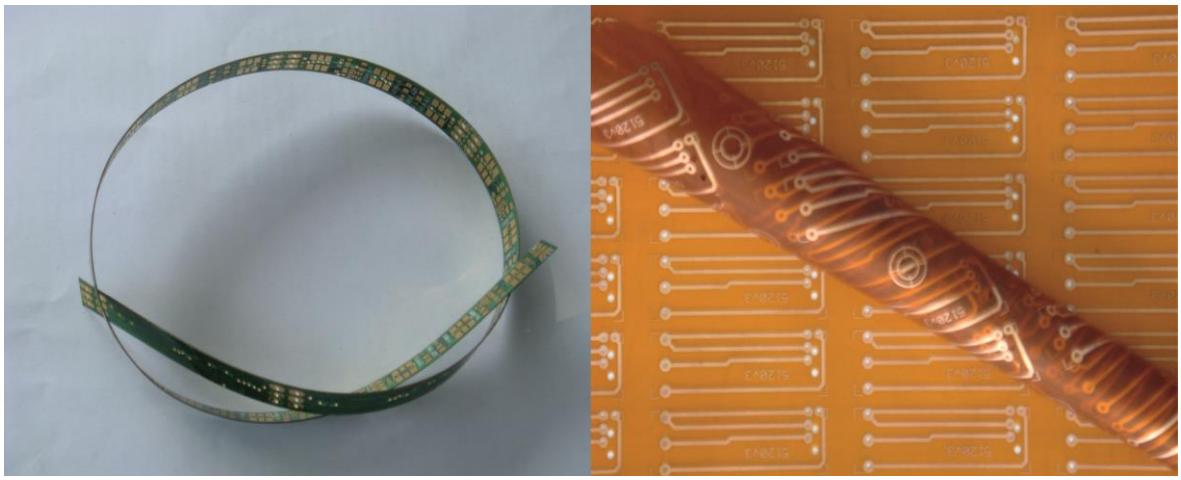
4 Materiály a způsoby propojování používané v praxi

V této kapitole nalezneme přehled flexibilních substrátů nabízených na českém trhu. Dále jsou zde popsané technologie propojování. V závěru kapitoly jsou zmíněni výrobci vodivých lepidel.

4.1 Flexibilní substráty

- **Printed s.r.o.**

Tato společnost nabízí 2 ohebné substráty. Využívá při výrobě materiál Pyralux o tloušťce 0,1mm. Vrstva mědi může být nanesena jednostranně či oboustranně. Tlouštka Cu může být 35µm nebo 18 µm. Tento substrát lze zkroutit do role o průměru 10 mm a snese opakovaný ohyb o 180^{o}. Při procesu pájení je nutné pracovat velmi obezřetně, protože může dojít k uvolnění vodičů od podložky. Druhým nabízeným materiálem je FR4, který je klasickým představitelem pro pevné substráty. Zde se využívá materiál o tloušťce 0,1mm. Tento typ materiálu má výrazně vyšší mechanickou pevnost oproti Pyraluxu. Snese opakovatelný ohyb do 90^{o} na poloměru 50 mm. [29]



Obr.3.1. Flexibilní materiály FR4 a Pyralux.převzato [29]

- **PragoBoard s.r.o.**

Tato firma nabízí hned 4 materiály, které jsou rozděleny do dvou základních skupin. Jedná se o lepidlové a bezlepidlové materiály. U obou těchto skupin se využívá polyimid

Kapton o různých tloušťkách. Mezi nabízené bezlepidlové materiály patří Dupont Pyralux a Thinflex. U lepidlových je to Epoflex a Adhesive materiál. [30]

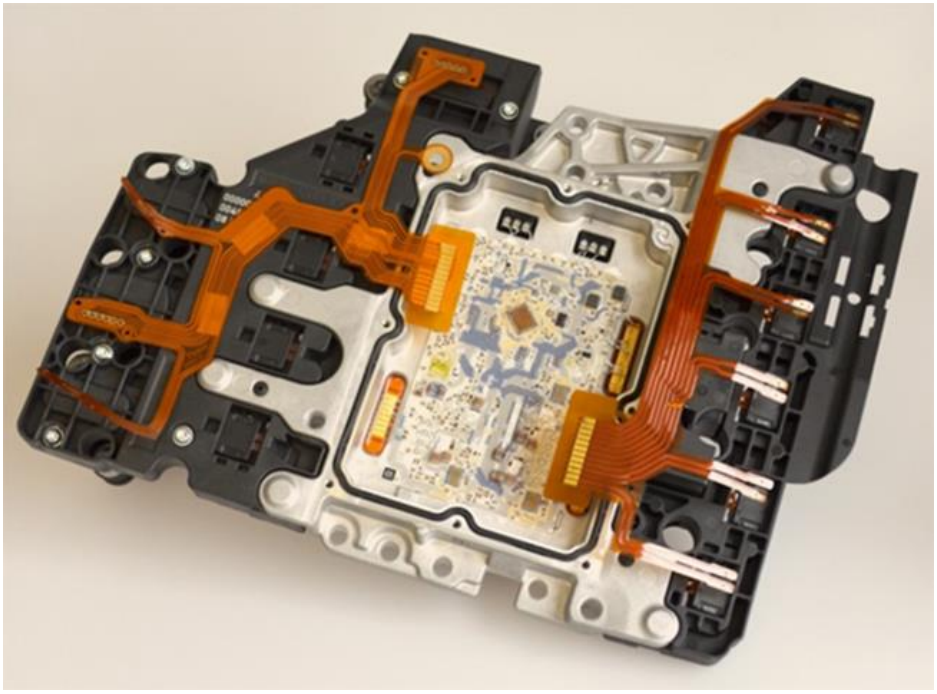
Jelikož jsme plánovali nechat si vyrobit testovací vzorky pro experimentální část u této firmy, zajímalo nás, jaký je rozdíl mezi lepidlovými a bezlepidlovými materiály. U lepidlových materiálů je měď přilepena na nosnou vrstvu lepidlem. U bezlepidlových materiálů je měď na nosný materiál nalisována. Nevýhodou lepidlových materiálů je ta, že jsou příliš silné pro vysokou hustotu obvodu. Jak už bylo zmíněno, měď se lepí a tento proces je poměrně zdlouhavý. Navíc lepidlové materiály jsou méně šetrné k životnímu prostředí a mají horší rozměrovou stabilitu. Proto je vhodnější využívat bezlepidlové materiály. [30]

- **Lamirel s.r.o.**

Tato firma využívá jako základní materiál polyimid. Měděná fólie je přilepena za pomoci lepidla. Deska se pak zpracovává jako běžný plošný spoj, ale místo nepájivé masky se využívá krycí vrstva tzv. coverlay, která je nalisována. Je třeba pečlivě navrhnout vodivé cesty a vyhnout se ostrým hranám u přechodů, kde při ohybu dochází ke zvýšenému mechanickému namáhání. [31]

- **Mektec CZ s.r.o.**

Firma Mektec má hlavní sídlo v Německu, ale jeden z osmnácti výrobních závodů je v Českých Budějovicích. Tato firma se specializuje na výrobu ohebných plošných spojů pro automobilový průmysl. Pro zpracování ohebných desek používá stroje Nippon Mektron, které splňují ty nejvyšší mechanické požadavky, jež jsou na desky kladeny. Tato firma se zabývá vlastním vývojem a výrobou desek. Jako materiál využívají měděné polyimidové filmy, které splňují ty nejvyšší standardy např. extrémní kolísání teplot a vysoké dynamické zatížení. Jsou odolné vůči agresivním médiím jako je olej či nafta. [32]



Obr.3.2. Využití motivů pro automatickou regulaci řídících jednotek

- **Gatema s.r.o.**

Společnost Gatema využívá jako základní materiál polyimidový film, tak jako většina firem. Využívá tento nosný materiál proto, že ve srovnání s PET a PEN materiály odolává vyšším teplotám. [33]

4.2 Propojování

Zde můžeme využít podobné technologie propojování jako u pevných substrátů. Můžeme pro propojení použít technologii pájení. Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, je třeba omezit použití olovnaté pájecí slitiny. Musíme se tedy zaměřit na bezolovnaté pájecí slitiny a upravit je tak, aby svými vlastnostmi vyhověly požadavkům na flexibilitu. Rozhodujícím faktorem je zde teplota, kterou flexibilní substrát dokáže snést při použití bezolovnaté pájecí slitiny. Proto je v některých případech nutné používat jen nízkoteplotní slitiny popřípadě použít jinou technologii. Je možné využít technologii lepení. Lepidla se většinou vytvrzují při nižších teplotách než je teplota tavení pájecí slitiny. Důležitým faktorem je zde však cena, protože lepidla jsou poměrně drahá. Jelikož je experiment zaměřen na technologii lepení, tak je kapitola 4.3 věnována lepidlům dostupným na trhu. [34]

4.3 Lepidla

Tato kapitola se zaměřuje na výrobce lepidel. Většina těchto lepidel je dovážena ze zahraničí.

- **Epoxy Technology**

Jedná se o firmu, která byla založena v roce 1966 a je průkopníkem ve vývoji a výrobě lepidel. Vyrábí velmi kvalitní výrobky, které se uplatňují po celém světě. Aby byla zajištěna kvalita a spolehlivost, jsou výrobky pečlivě testovány v laboratořích. Tato společnost se zabývá vývojem a výrobou vodivých i nevodivých lepidel. V tabulkách můžete vidět přehled nejprodávanějších jednosložkových i dvousložkových vodivých lepidel. [35]

Tab.3.I Jednosložková vodivá lepidla společnosti Epoxy Technology

Lepidlo	Doby a teploty vytvrzení	Rezistivita [Ω.cm]
EPO-TEK B9126-8	5min/150°C, 15min/120°C	0.0002
EPO-TEK E3001	45sec/170°C, 5min/160°C, 15min/150°C	0.0005
EPO-TEK E3001-HV	2min/180°C, 15min/150°C	0.0005
EPO-TEK E3035	1hod/180°C, 1,5hod/165°C	0.0005
EPO-TEK E3035T-2	1hod/180°C	0.0005
EPO-TEK E3037	1hod/150°C	0.0005
EPO-TEK E3037-LV	1hod/150°C	0.0005
EPO-TEK ED1020	1hod/150°C	0.0004
EPO-TEK ED1021	1hod/125°C, 30 min/150°C	0.0002
EPO-TEK EE149-6	1hod/180°C	0.0005
EPO-TEK EK1000	30min/200°C	0.00009
EPO-TEK EK1000-1MP	1hod/200°C	0.00007
EPO-TEK EM127	30min/160°C, 1hod/150°C	0.0009
EPO-TEK H20E-D	45sec/175°C, 5min/150°C,15min/120°C	0.0004
EPO-TEK H20S-D	45sec/175°C, 5min/150°C,15min/120°C	0,00014

Tab.3.II Dvousložková vodivá lepidla společnosti Epoxy Technology

Lepidlo	Doby a teploty vytvrzení	Rezistivita [Ω.cm]	Váhový poměr složek A:B
EPO-TEK 377H	1hod/150°C	–	1:1
EPO-TEK 430	30min/80°C, 1hod/60°C	0.005	100:2.5
EPO-TEK E2001	45sec/170°C, 5min/160°C, 15min/150°C	0.0005	100:3
EPO-TEK E2001-HV	2min/180°C, 15min/150°C	0.0005	100:3
EPO-TEK E2036	30min/150°C, 1hod/125°C	0.0003	3:1
EPO- TEK E4110	15min/150°C, 1hod/100°C, 3hod/80°C	0.0005	10:1
EPO-TEK E4110-LV	1hod/150°C	0.007	10:1
EPO-TEK E4110-PFC	1hod/120°C, 3hod/80°C, 6hod/45°C	0.005	3:1
EPO-TEK EE165-3	1hod/150°C, 2hod/125°C	0.0002	100:2.5
EPO-TEK EJ2189	15min/150°C, 1hod/100°C, 3hod/80°C	0.009	10:1
EPO-TEK EJ2189-LV	15min/150°C, 1hod/100°C, 3hod/80°C	0.009	10:1
EPO-TEK H20E	45sec/175°C, 50min/150°C, 15min/120°C	0.0004	1:1
EPO-TEK H20E-HC	30min/175°C	0.00008	1:1
EPO-TEK H20S	45sec/175°C, 5min/150°C,15min/120°C	0.0005	1:1
EPO-TEK H81A	1hod/150°C	0.0009	6:1

- **Henkel**

Společnost byla založena již v roce 1876. Henkel nabízí elektricky vodivá lepidla pro potřeby každého zákazníka. Henkel vytvořil komplexní řadu vysoce výkonných a kvalitních vodivých past a lepidel, která jsou využívána po celém světě. Tato společnost nabízí jak isotropní a anizotropní vodivá lepidla, tak i lepidla nevodivá. Všechna lepidla uvedená v tabulkách se vytvrzují za pomoci tepla. V experimentu jsme použili lepidlo od této firmy a to HYSOL ECCOBOND CA3150. [36,37]

Tab.3.III Isotropní vodivá lepidla společnosti Henkel

Lepidlo	Doby a teploty vytvrzení	Rezistivita [Ω.cm]
ALBESTIL ABLEBOND 2000	15min/175°C	0.0005
ABLESTIK ABLEBOND 84-1LMI	1hod/150°C, 2hod/125°C	0.0005
ABLESTIK ABLEBOND 84-1LMISR4	1hod/175°C	0.0001
ABLESTIK ICP-3535M1	1hod/150°C, 10min/175°C	0.004
ABLESTIK ICP-4001	35min/140°C	0.0004
ACHESON ELECTRODAG 5915	15min/130°C, 10min/175°C	0.0005
HYSOL ECCOBOND 56C Catalyst 9-Fst	2hod/50°C	0.0004

HYSOL ECCOBOND 56C Catalyst 11-Fst	1hod/120°C	0.0002
HYSOL ECCOBOND CA3150	10sek/130°C	< 0.01
HYSOL ECCOBOND Ce3103WLV	10min/120°C, 3min/150°C	0.0008
HYSOL ECCOBOND CE3520-3	60min/120°C, 3min/150°C	0,02
HYSOL ECCOBONDCE3804 A/B	90min/150°C	0.0004
HYSOL ECCOBOND CE3920	5min/150°C	0.00033
HYSOL ECCOBOND CE8500	90min/120°C, 40min/150°C, 15min/175°C	0,0002
HYSOL QMI5161E	60sec/90°C, 90min/60°C	0.0015
HYSOL QMI529HT	60sec/185°C, 30min/185°C	0.00004

Tab3.IV Anisotropní vodivá lepidla společnosti Henkel

Lepidlo	Doby a teploty vytvrzení	Rezistivita [Ω.cm]
HYSOL CE3126	8sec/170°C	Anizotropní

- **Permacol**

Holandská firma Permacol byla založena v roce 1974. Nabízí širokou škálu jednosložkových i dvousložkových lepidel. Seznam nabízených lepidel můžete vidět v tabulkách. [38]

Tabulka.3.V Jednosložková vodivá lepidla společnosti Permacol

Lepidlo	Doby a teploty vytvrzení	Rezistivita [Ω.cm]
Permacol 2369/02	10min/125°C	0.0003
Permacol 2369/10	10min/125°C	0.0003
Permacol 2505	6min/125°C	–

Tabulka.3.VI Dvousložková vodivá lepidla společnosti Permacol

Lepidlo	Doby a teploty vytvrzení	Rezistivita [Ω.cm]	Váhový poměr složek A:B
Permacol 1828 A/B	10min/125°C	0.0005	10:5
Permacol 2510 A/B	6min/125°C	–	1:1
Permacol 2520 A/B	6min/125°C	–	10:3
Permacol 2805 A/B	48hod/20°C	0.0003	10:4
Permacol 2810 A/B	48hod/20°C	0.0005	1:1
Permacol 2855 A/B ESD	48hod/20°C	0.1	1:1
Permacol 2860 A/B	48hod/20°C	0,0005	10:5

Je ještě mnoho dalších výrobců, kteří se zabývají výrobou a vývojem lepidel, používaných v elektrotechnickém či jiném průmyslu. Mezi další významné společnosti, které produkují lepidla patří Daiken Chemical Company [39], Panacol [40], Direct Industry [41], Alutronic [42] a další.

5 Experimentální část

První část experimentu byla zaměřena na testování vlivu tvaru otvorů v šabloně na aplikaci vodivého lepidla. Zde bylo zkoumáno množství naneseného lepidla a jeho zapasování do definovaných otvorů. Byly zde použity pevné substráty FR4 z důvodu nižších cenových nákladů. Nejprve však byly z použitých vzorků za pomoci gumy odstraněny povrchové oxidové nečistoty. Byla použita dvě lepidla. Lepidla byla nanášena metodou sítotisku za pomoci stěrky. Abychom byli schopni říci, že lepidla byla nanesena správně na kontaktní plošky, prováděli jsme po nanesení kontrolu pod mikroskopem. Následovalo vytvrzení v horkovzdušné peci. Abychom určili mechanickou pevnost ve smyku, byly součástky odtrhány na zařízení zvaném trhačka. Byla zkoumána izolační mezera mezi kontaktními ploškami a množstvím naneseného lepidla. Následně byly z naměřených dat vytvořeny grafy, ze kterých jsme provedli vyhodnocení.

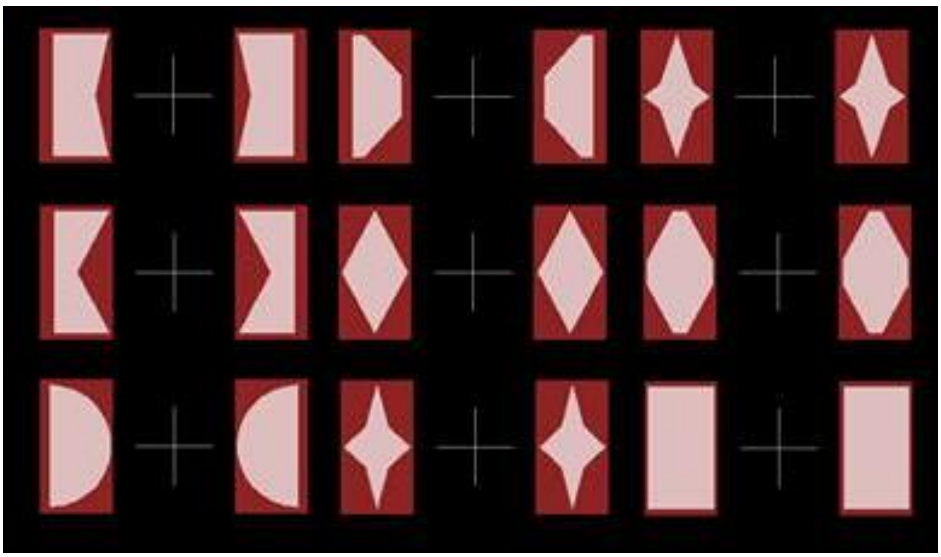
V druhé části experimentu jsme vycházeli z výsledků první části. Přes vybrané otvory byla nanášena dvě lepidla, ale tentokrát již na flexibilní substráty. U některých otvorů jsme provedli menší geometrickou korekci. Byla zde použita stejná lepidla jako v předchozí části a taktéž byla zkoumána mechanická pevnost a velikost izolační mezery. Abychom mohli sledovat i další parametr, byl na substrátu vytvořen vodivý motiv. Díky tomu jsme mohli změřit veličinu, která se nazývá elektrický odpor. Elektrický odpor jsme měřili na dvou typech vzorků. Jedny vzorky byly změřeny ihned po vytvrzení. Druhá část vzorků byla vložena do komory, kde na ně působila vlhkost a teplota. Vzorky byly v komoře po dobu 168 hodin. Pro větší přehlednost byly se shromážděných dat vytvořeny grafy ve formě box plotů. Na závěr experimentu byla provedena faktorová analýza.

5.1 Otvory v šabloně

V současné době jsou nejvíce používány šablony ve tvaru obdélníku. Avšak v normě jsou definovány i další tvary, které by se daly v praxi použít. Z logické úvahy a získaných zkušeností z předchozích výzkumů byly vytvořeny ještě další tvary otvorů, které jsme v experimentu využili. Celkem bylo vybráno 9 typů otvorů a jeden z nich byl i obdélník, který byl zvolen jako referenční. Tloušťka šablony byla 80μm. Značení jednotlivých otvorů je znázorněno v *Tab.5.I.*

Tab.5.I Značení otvorů

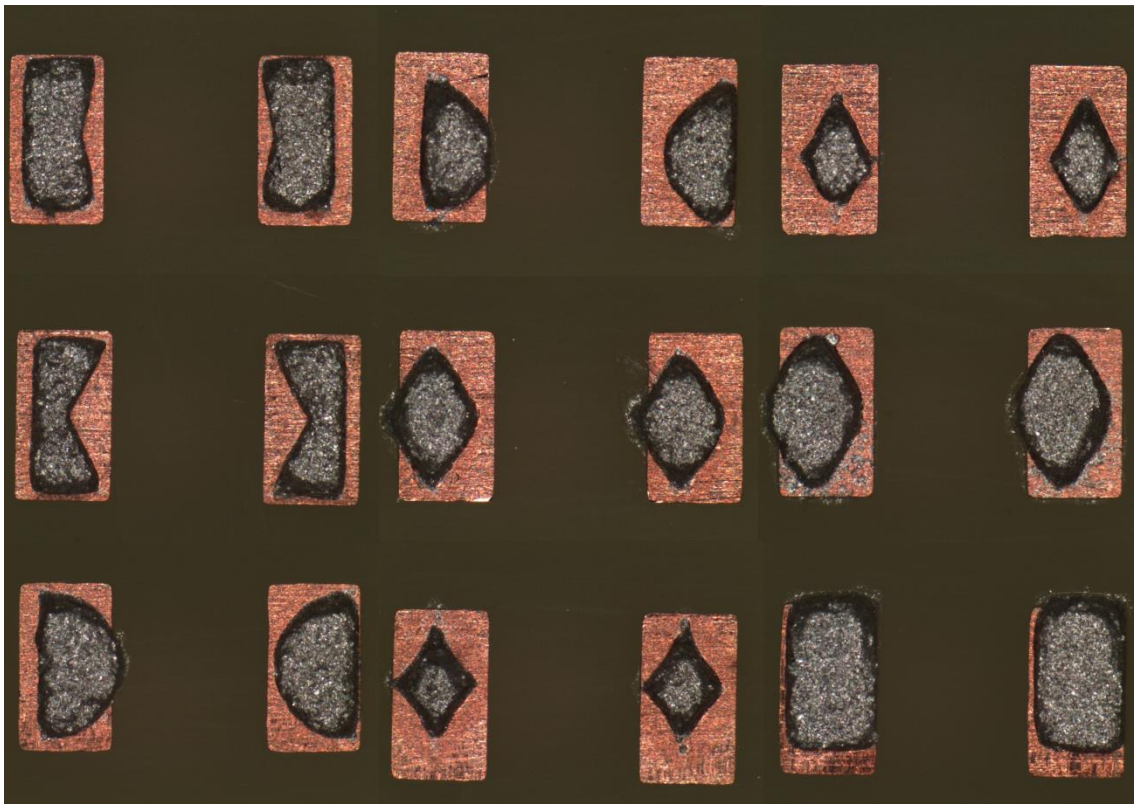
Značení otvorů	
1	zub dovnitř 1 (méně vykouslý)
2	lichoběžník
3	hvězda 1
4	zub dovnitř 2
5	kosočtverec 1
6	kosočtverec 2 (zarovnané rohy)
7	půlkruh
8	hvězda 2 (ostřejší rohy)
9	obdélník



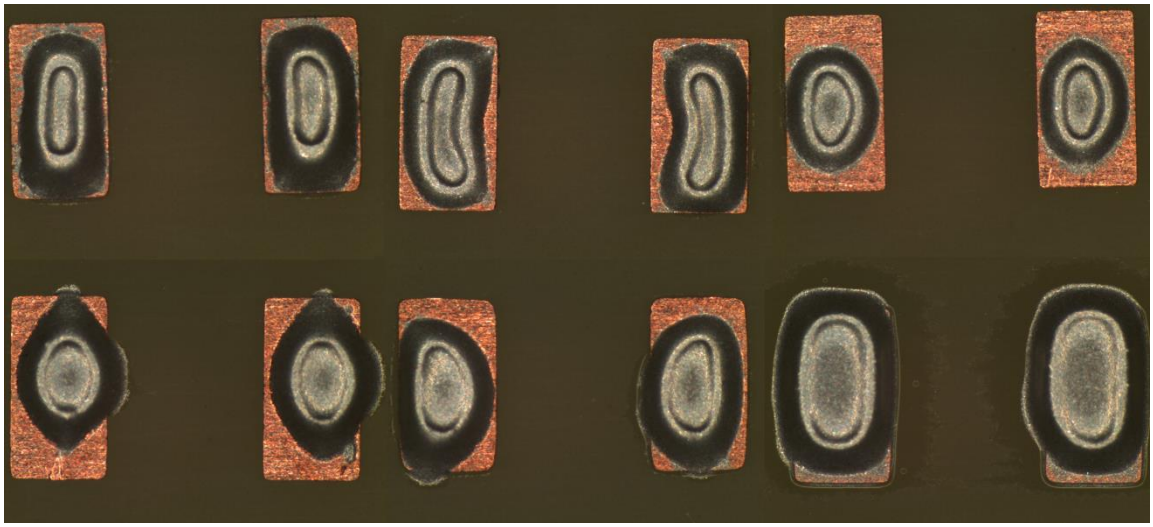
Obr.5.1 Přehled použitých otvorů

5.2 Použitá lepidla

K experimentu byla využita dvě lepidla. Hlavním důvodem, proč byla zvolena 2 lepidla byl ten, abychom porovnali lepidla s rozdílnou viskozitou. Lepidlo CA3150 bylo uchováváno v mrazícím boxu, protože bylo velmi tekuté. Dále bylo použito lepidlo MG8331S. Toto lepidlo je dvousložkové (A:B) a bylo ho třeba namíchat v poměru 1,17:1. Výrobce udává i jeho rezistivitu, která je 0,006 Ω.cm. Lepidla byla nanášena metodou sítotisku. Jak už bylo zmíněno dříve lepidlo CA3150 bylo velmi tekuté a nepřiléhalo dostatečně do ostrých rohů. Proto jsme lepidlo nenanesli přes otvory ve tvaru hvězd a lichoběžníku. Jak byla lepidla nanesena je zobrazeno na *Obr.5.2* a *Obr.5.3*.



Obr.5.2 Vzorky po nanesení lepidla MG8331S

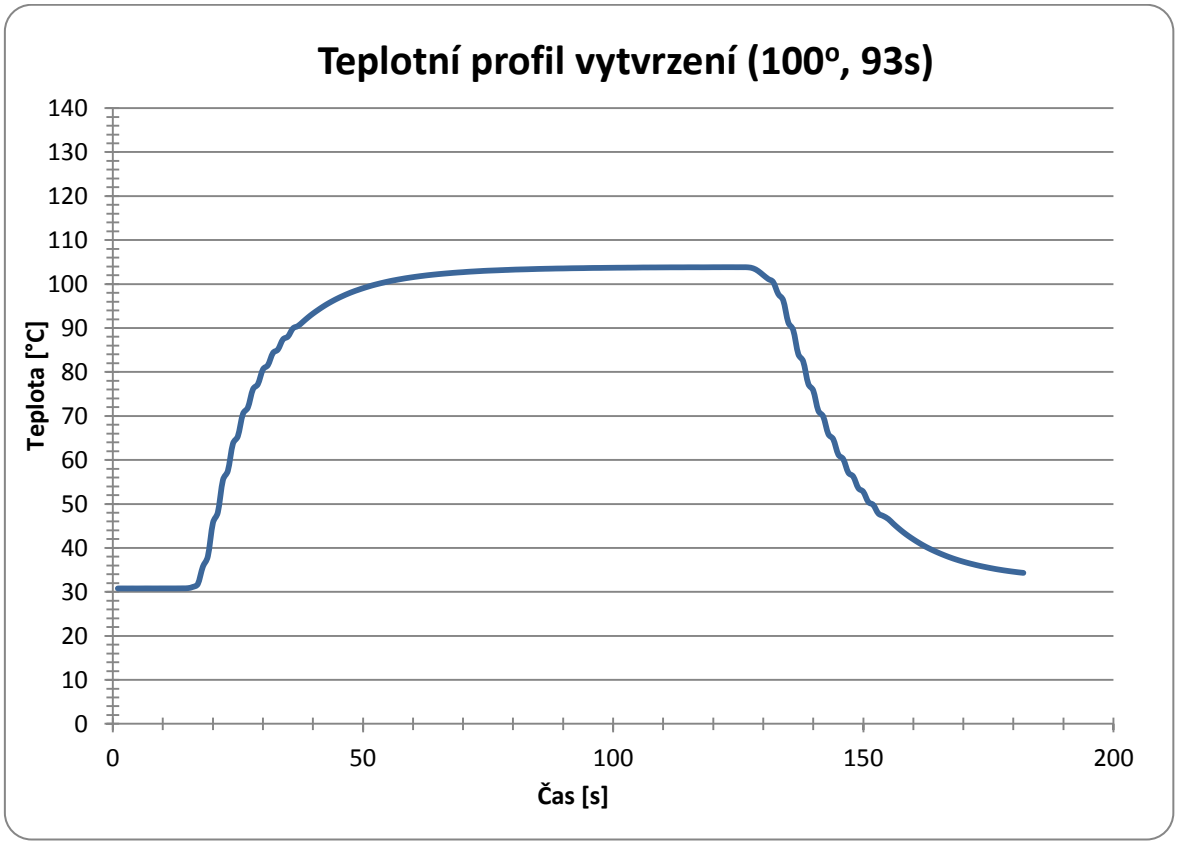


Obr.5.3 Vzorky po nanesení lepidla CA3150

5.3 Teplotní profil vytvrzení

Zde jsme použili pro každé lepidlo jiné časy vytvrzení. V praxi, ve strojové výrobě, je výhodné tyto časy zkracovat. Dle doporučení výrobce by mělo být lepidlo MG8331S vytvrzováno při teplotách uvedených v technickém listu produktu. My jsme využili zkušeností z předchozích experimentů a vytvrzení bylo provedeno při teplotě 130^{o}C po dobu třiceti minut. Toto lepidlo je možné vytvrzovat i při pokojové teplotě. U druhého

lepidla CA3150 byl použit vytvrzovací profil na základě DSC analýzy. Vytvrzení probíhalo při teplotě 100°C pouhých 93 sekund. Průběh je vyobrazen na *Obr.5.4.*



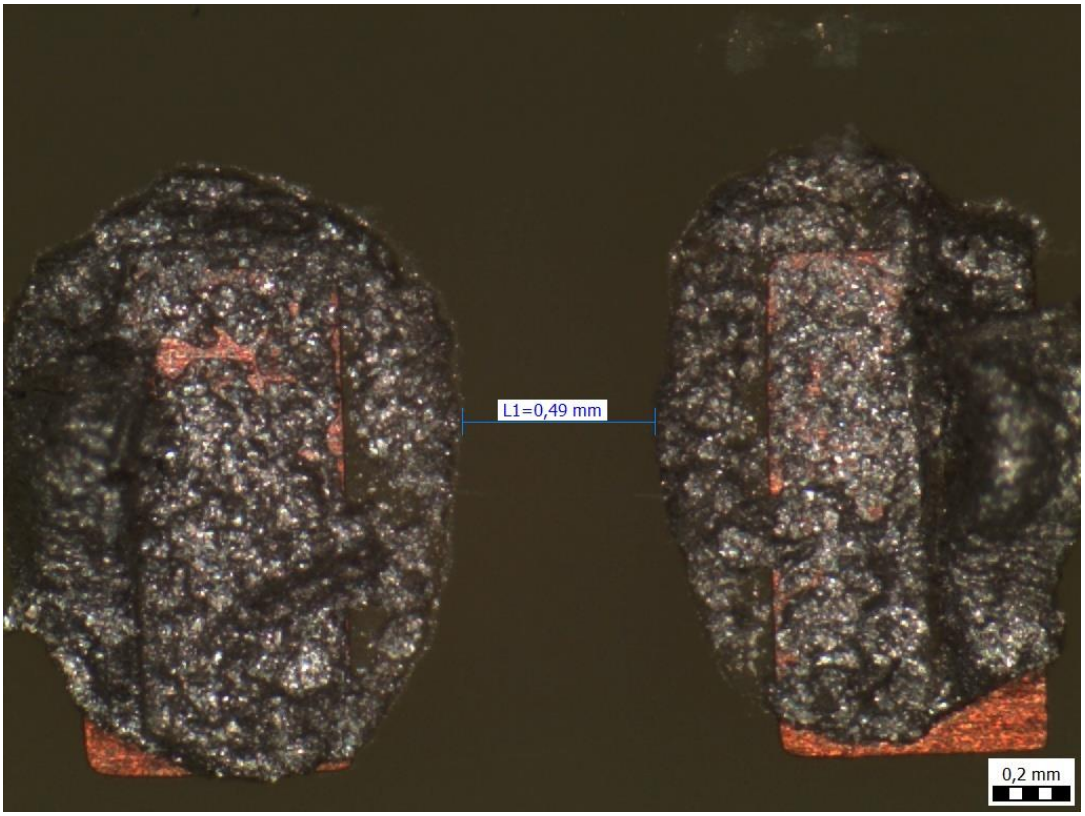
Obr.5.4 Teplotní profil vytvrzení pro lepidlo CA3150

5.4 Odtrh součástek

Abychom změřili mechanickou pevnost, bylo nutné součástky odtrhat na přístroji zvaném trhačka. Byla zde měřena mechanická pevnost ve smyku. Měření bylo provedeno na všech DPS. Na každé DPS bylo odtrháno všech 10 rezistorů. Cílem bylo ověřit si, jaké lepidlo má větší mechanickou pevnost a u jakých otvorů je tato pevnost největší. Měření probíhalo na trhačce tak, že DPS s odpory byly přidržovány na rovné podložce a kulový válec, který působil silou směrem dolů nám součástku odtrhnul. Zařízení bylo nastaveno tak, že kulový válec se pohyboval rychlostí 20mm/min a při dosažení 70% maximální síly došlo k ukončení testu. Síla, kterou byla součástka přichycena se nám zobrazovala a ukládala na vedlejším počítači. Ze získaných dat byly vytvořeny dva grafy, pro každé lepidlo jeden.

5.5 Měření izolační vzdálenosti

Po odtržení byly vzorky zkoumány pod mikroskopem, kde byly měřeny izolační vzdálenosti. K tomu nám posloužila měřítka mikroskopu, díky kterým jsme určili téměř přesnou izolační vzdálenost. Dále zde bylo vidět, jak bylo lepidlo rozprostřeno. Bylo třeba zjistit, zda lepidlo nebylo rozprostřeno až příliš, aby nedošlo ke zkratu.



Obr.5.5 Ukázka měření izolační vzdálenosti

5.6 Výsledky pro první část experimentu

Zde byly ze změřených dat vytvořeny grafy, které si v této části podrobněji popíšeme. Jak už bylo zmíněno na začátku, tak sledované parametry pro nás byly mechanická pevnost a izolační mezera. Nejprve si rozebereme oba parametry odděleně, abychom pak tyto informace mohli spojit a výsledky shrnout.

- **Výsledky pro lepidlo MG8331**

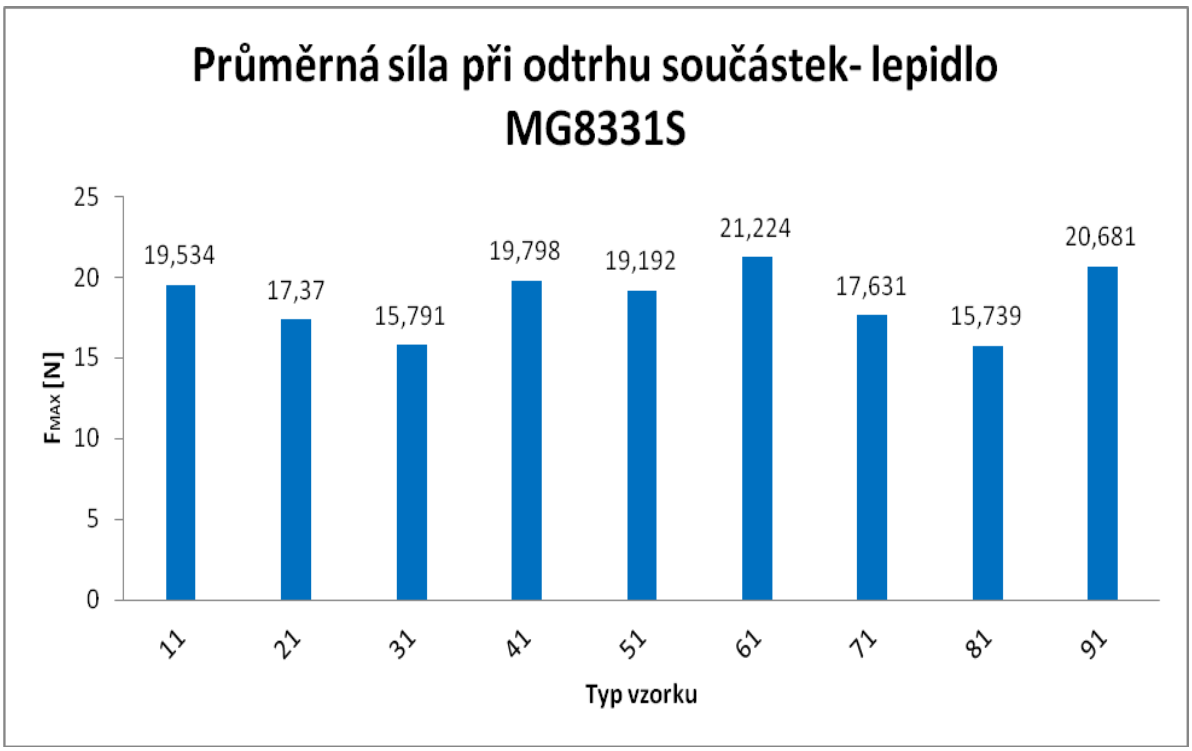
Z prvního grafu je patrné, že nejmenší pevnost vykazovaly vzorky 31 a 81. Podle označení se jedná o otvory ve tvaru hvězdy. Tento fakt je logický, protože jak už bylo zmíněno, tak lepidlo se špatně dostávalo do ostrých hran, což očividně můžeme vidět na

Obr.5.2 po nanesení lepidla. Průměrná síla u těchto otvorů se pohybovala okolo 15,7N. Nejvyšší pevnosti dosáhl vzorek 61, jedná se o kosočtverec, který měl zarovnané rohy. Průměrná síla byla 20,68N. Velmi vysoké mechanické pevnosti dosahovaly i oba otvory ve tvaru zubů, druhý kosočtverec a obdélník. Zde se hodnoty mechanické pevnosti přibližovaly ke 20N. Poslední dva tvary, kterými byly půlkruh a lichoběžník měly mechanickou pevnost přes 17N.

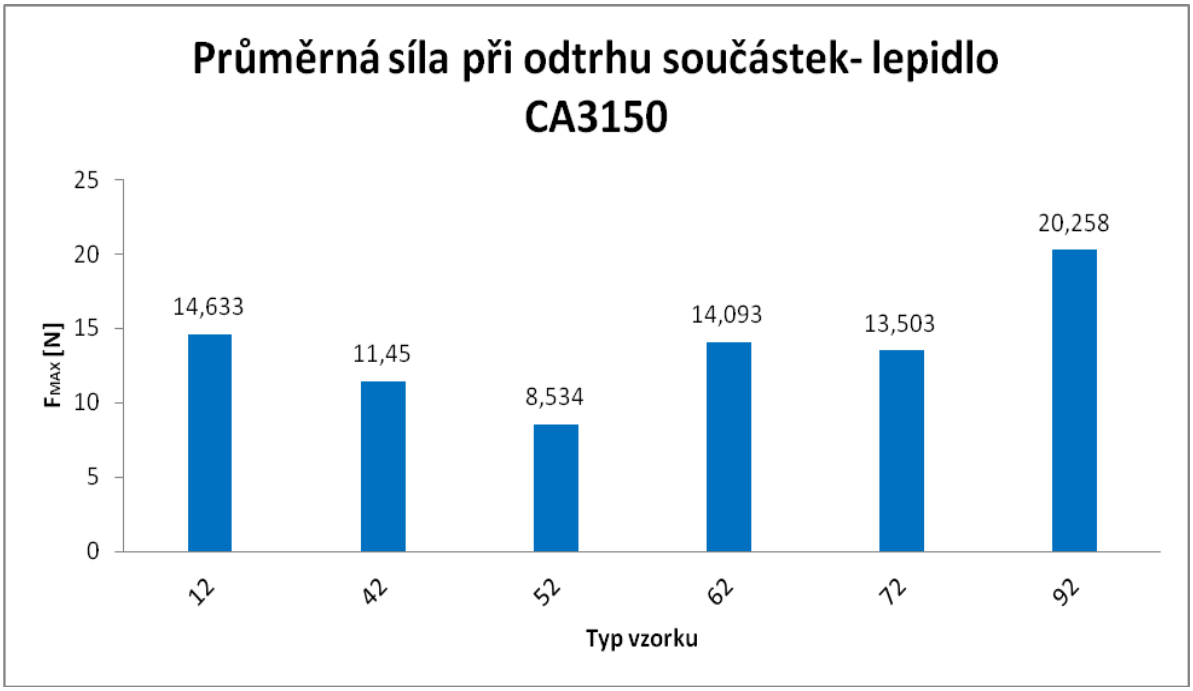
U druhého grafu jsme se zaměřili na izolační vzdálenost. Nejhorších výsledků zcela jednoznačně dosáhl tvar kosočtverce se zarovnanými rohy. Průměrná velikost izolační mezery byla 0,277. Dokonce i u některých součástek byla izolační mezera takřka nulová, což by způsobilo zkrat. Poměrně malou izolační vzdálenost vykazuje obdélník. Průměrná hodnota byla 0,469. Nejlepších výsledků dosahovaly otvory ve tvaru hvězdy z důvodu malého množství naneseného lepidla, což bylo možné zpozorovat i pod mikroskopem. Velice dobrých výsledků dosahují opět oba otvory ve tvaru zubů. Hodnoty izolačních vzdáleností byly 0,874 a 0,860.

- **Výsledky pro lepidlo CA3150**

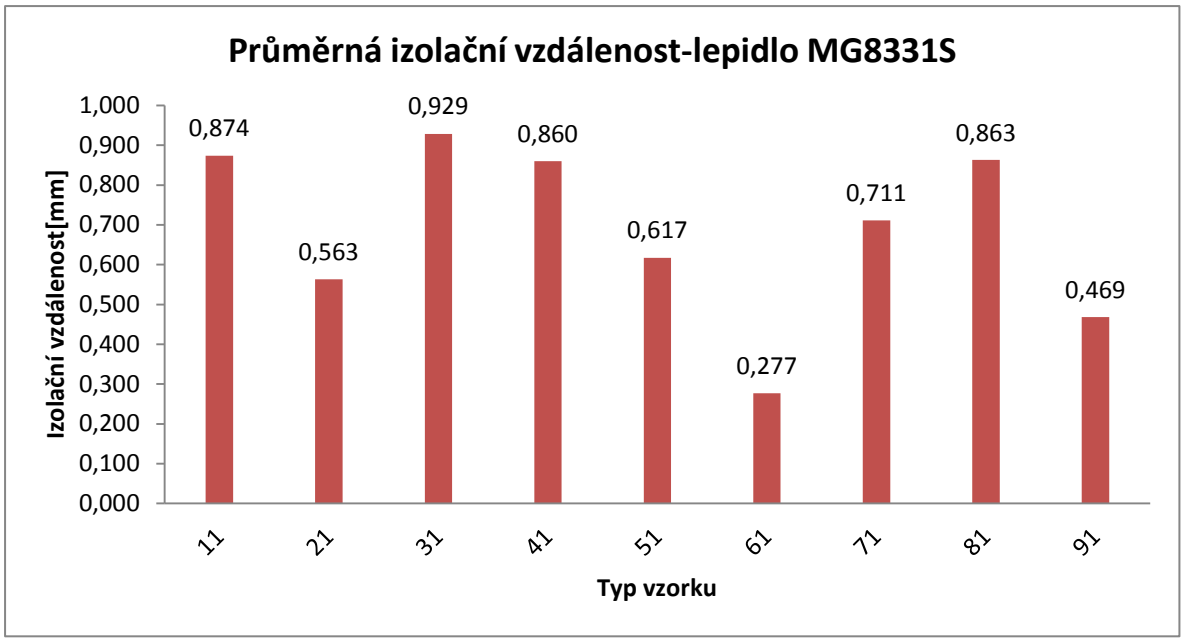
Nejhorší mechanické pevnosti dosáhl první kosočtverec (52). Velikost síly byla pouze 8,534 N. Oproti tomu nejlépe držely součástky, které byly lepené na tvar obdélníku. Průměrná síla byla 20,258N. K této hranici se už žádný z jiných vzorků nepřiblížil. Přes hranici 14N se dostaly otvory ve tvaru zubu (12) a kosočtverce se zarovnanými rohy. Dále následoval půlkruh s průměrnou hodnotou síly odtrhu 13,503N a druhý zub (42) , kde průměrná síla byla 11,45N. Jak je patrné z grafu, tak vzorky, které vykazovaly velkou mechanickou pevnost ve smyku, mají malé izolační mezery. Průměrná izolační vzdálenost u vzorků 12,62,72,92 se pohybovala v rozmezí od 0,2 do 0,4. Největší izolační vzdáleností se mohly pyšnit vzorky 42 a 52. Jednalo se o zub, který byl více vykouslý a o kosočtverec s ostrými rohy.



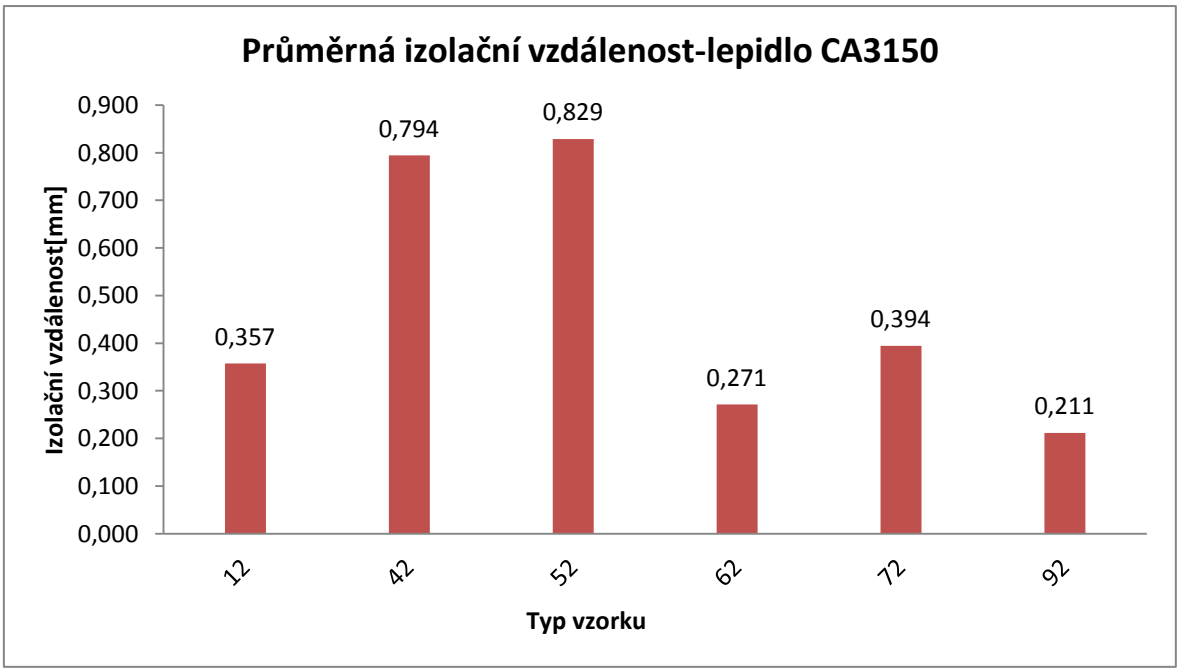
Obr.5.6 Graf mechanické pevnosti pro lepidlo MG8331S



Obr.5.7 Graf mechanické pevnosti pro lepidlo CA3150



Obr.5.8 Graf izolačních vzdáleností pro lepidlo MG8331S

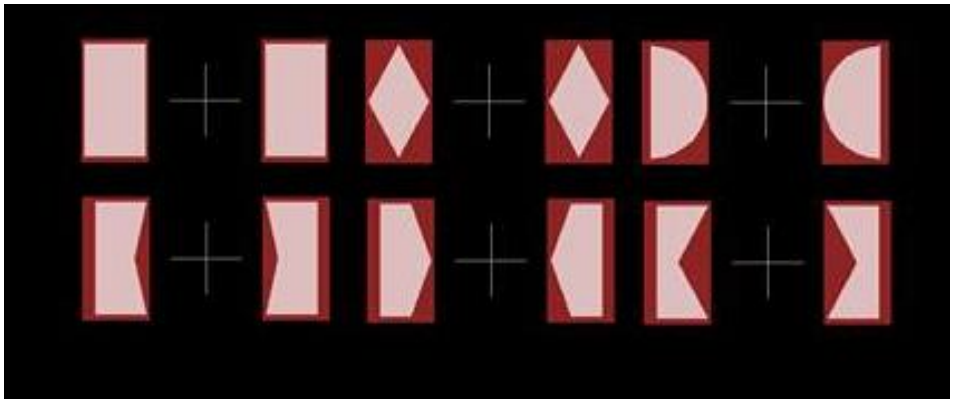


Obr.5.9 Graf izolačních vzdáleností pro lepidlo CA3150

- **Závěrečné shrnutí**

Abychom vytvořili smysluplný závěr, museli jsme brát v potaz oba parametry, jak izolační mezeru, tak mechanickou pevnost. Dále jsme využili fotografií, které byly pořizovány v průběhu experimentu. Ze všech těchto dat bylo vybráno 6 otvorů, které byly použity v druhé části experimentu. Ze získaných zkušeností z předchozí části byly provedeny korekce otvorů. Jelikož se lepidla špatně dostávala do velmi ostrých rohů, byl

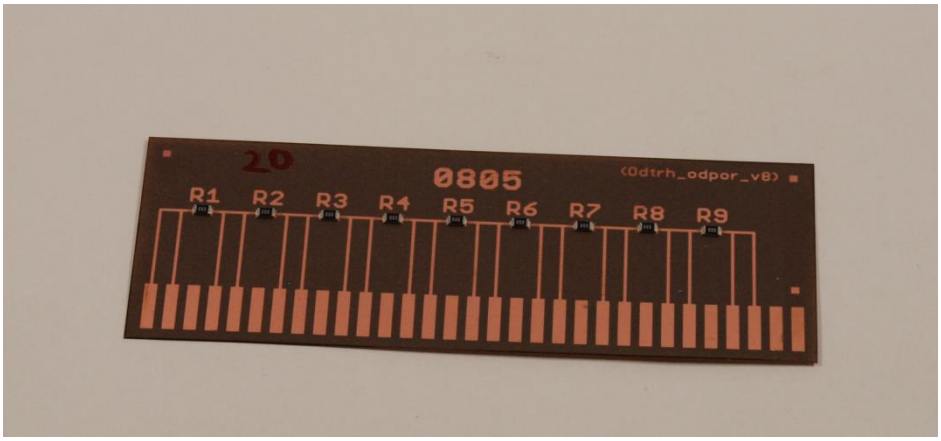
např. otvor ve tvaru zubu ve svých rozích zaoblen, aby lepidlo lépe přilnulo. Dále byl jeden kosočtverec upraven do tvaru pětiúhelníku. Na *Obr.5.10* můžete vidět otvory, přes které byla lepidla nanášena na flexibilní substráty.



Obr.5.10 Otvory použité na flexibilní substrát

5.7 Flexibilní substrát

Pro tento experiment byl zvolen flexibilní substrát od firmy PragoBoard s.r.o. Byl použit bezlepidlový materiál Dupont Pyralux. Tloušťka nosného materiálu, který byl tvořen kaptonovou fólií byla 100µm. Vrstva Cu byla 18 µm. Opět byla použita lepidla CA3150 a MG8331. Stejná byla i tloušťka šablony 80 µm. Na *Obr.5.11* již můžete vidět testovaný vzorek s přilepenými rezistory.



Obr.5.11 Flexibilní substrát s vodivým motivem a nalepenými rezisotry

5.8 Značení otvorů

V *Tab.5.II* jsou přehledně označeny jednotlivé vzorky. Každému otvoru je přiřazena jedna barva z důvodu přehlednosti ve finálních box plot grafech. Vzorky mají i číselné označení, aby bylo poznat, které vzorky byly vystaveny působení stárnutí a které nikoliv.

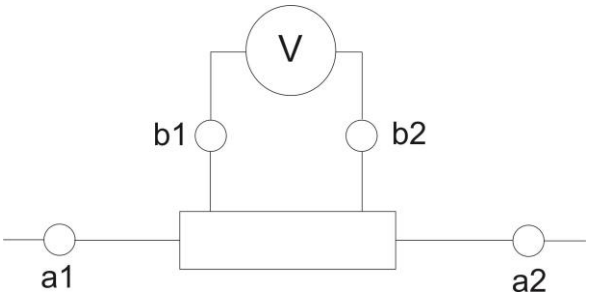
Vzorky, které byly vystaveny působení stárnutí, byly umístěny do komory, kde na ně po dobu 168 hodin působila teplota a vlhkost.

Tab.5.II Značení otvorů

Označení	Lepidlo	Tvary otvorů	Profil vytvrzení	Stárnutí
1	CA 3150	A = obdélník	130°C/30min	ANO
2		B = kosočtverec		
3		C = půlkruh		
4		D = méně vykouslý zub		
5		E = pětiúhelník		
6		F = více vykouslý zub		
7		A = obdélník		NE
8		B = kosočtverec		
9		C = půlkruh		
10		D = méně vykouslý zub		
11		E = pětiúhelník		
12		F = více vykouslý zub		
13	MG8331S	A = obdélník	100°C/92,2s	Ano
14		B = kosočtverec		
15		C = půlkruh		
16		D = méně vykouslý zub		
17		E = pětiúhelník		
18		F = více vykouslý zub		
19		A = obdélník		NE
20		B = kosočtverec		
21		C = půlkruh		
22		D = méně vykouslý zub		
23		E = pětiúhelník		
24		F = více vykouslý zub		

5.9 Měření elektrického odporu

Jak už bylo zmíněno dříve, tak průběh experimentu byl stejný jako v první části, avšak máme zde nový parametr, který byl měřen a to je elektrický odpor. Elektrický odpor jsme měřili za pomoci měřícího přístroje KEYTHLEY 2000. Měření probíhalo tzv. čtyřbodovou metodou. Schéma čtyřbodového zapojení je vyobrazeno na *Obr.5.12*. Vnější svorky a1, a2 jsou proudové a vnitřní b1, b2 jsou napěťové. Vzhledem k tomu, že odpor voltmetru je o mnoho řádu vyšší než odpor měřené součástky, tak proud protékající voltmetrem je zanedbatelný a tedy i chyba, která by vznikla samotnou povahou měření.



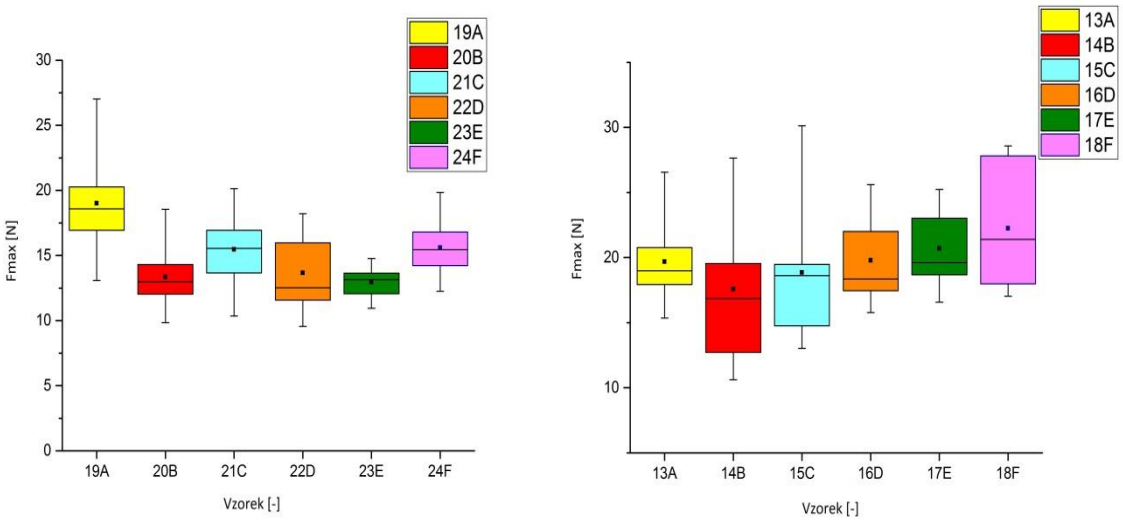
Obr.5.12 Schéma čtyřbodové metody

5.10 Výsledky pro druhou část experimentu

Zde jsou shrnuty výsledky z naměřených dat. Z výsledků byly vytvořeny box ploty z důvodu větší přehlednosti. Do těchto grafů nebyly zařazeny hodnoty, které se rapidně lišily od ostatních. V závěru vyhodnocení byla provedena faktorová analýza.

- **Výsledky mechanické pevnosti lepidla MG8331S**

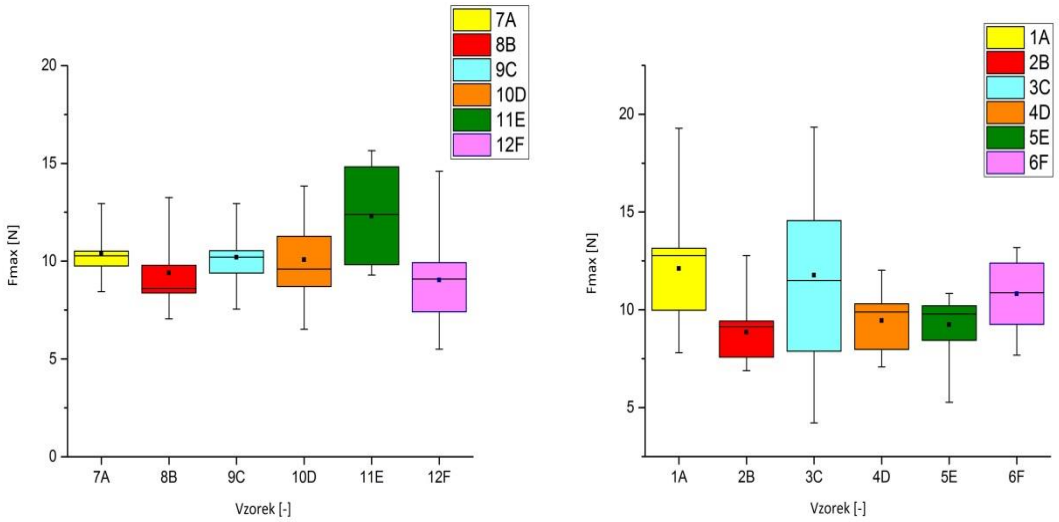
Na *Obr.5.13* můžete vidět grafy mechanické pevnosti pro nestárnuté (vlevo) a stárnuté (vpravo) vzorky. U nestárnutých vzorků dosahuje nejlepších výsledků obdélník. Průměrná síla se pohybovala okolo hodnoty 20N. U ostatních vzorků je průměrná síla dosti podobná a pohybuje se kolem 15N. U stárnutých vzorků dosahuje největší průměrné síly při odtrhu vzorek 18F. Obecně lze říci, že hodnoty sil u jednotlivých vzorků se pohybovaly poměrně v širokém rozsahu. Vzorky, které podléhaly stárnutí vykazovaly o něco větší hodnoty mechanické pevnosti.



Obr.5.13 Statisticky zpracované hodnoty mechanické pevnosti pro lepidlo MG8331S

- **Výsledky mechanické pevnosti lepidla CA3150**

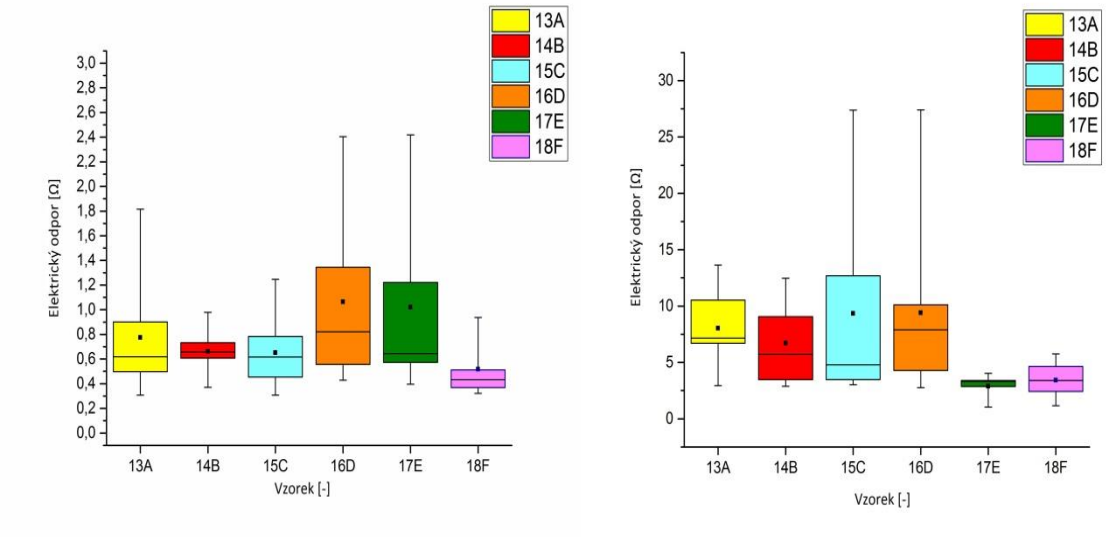
Jak je vidět z *Obr.5.14*, tak největší průměrné hodnoty síly vykazuje vzorek 11E. Nejširšího rozsahu hodnot si můžeme všimnout u vzorku 12F. Rozsah krajních hodnot je zhruba 5N a 15N. Zbylé vzorky mají téměř stejnou průměrnou hodnotu síly, a to 10N. U stárnutých vzorků vykazují největší průměrnou sílu vzorky 1A a 3C, avšak jejich hodnoty se pohybují v širokém rozmezí. U vzorku 3C je rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou síly téměř 15N. Vzorek 6F dosahuje průměrné hodnoty síly 10N, ale zbylé vzorky mají průměrnou sílu odtržení nižší. Pokud porovnáme *Obr.5.13* a *Obr.5.14*, tak můžeme říci, že lepidlo 8331S vykazuje větší mechanickou pevnost ve smyku než lepidlo CA3150.



Obr.5.14 Statisticky zpracované hodnoty mechanické pevnosti pro lepidlo MG8331S

- **Výsledky elektrického odporu lepidla MG8331S**

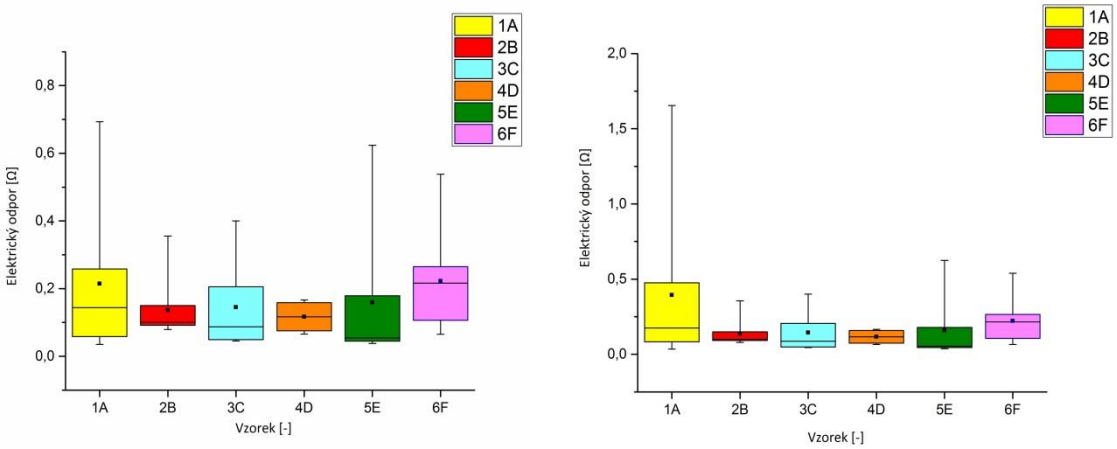
Opět můžeme vidět na *Obr.5.15* porovnání elektrického odporu u vzorků změřených před stárnutím (vlevo) a po procesu stárnutí (vpravo). Zde nejlepších výsledků dosahuje vzorek 18F, který vykazuje nejmenší hodnoty elektrického odporu v rozmezí od 0,2 Ω do 0,8 Ω. Velmi dobrých výsledků dosahuje i vzorek 14B. U vzorků 16D a 17E byl naměřen izolační odpor, který přesahoval hodnotu 2,2 Ω. U vzorků 13A až 18F je vidět, že stárnutí výrazně ovlivnilo hodnoty elektrického odporu. Hodnoty elektrického odporu stárnutých vzorků jsou výrazně vyšší. Průměrná hodnota síly se u vzorků 15C a 16D vyšplhala až k 10N. Nejnižší hodnoty elektrického odporu můžeme pozorovat u vzorků 17Ea 18F.



Obr.5.15 Statisticky zpracované hodnoty elektrického odporu pro lepidlo MG8331S

- **Výsledky elektrického odporu lepidla CA3150**

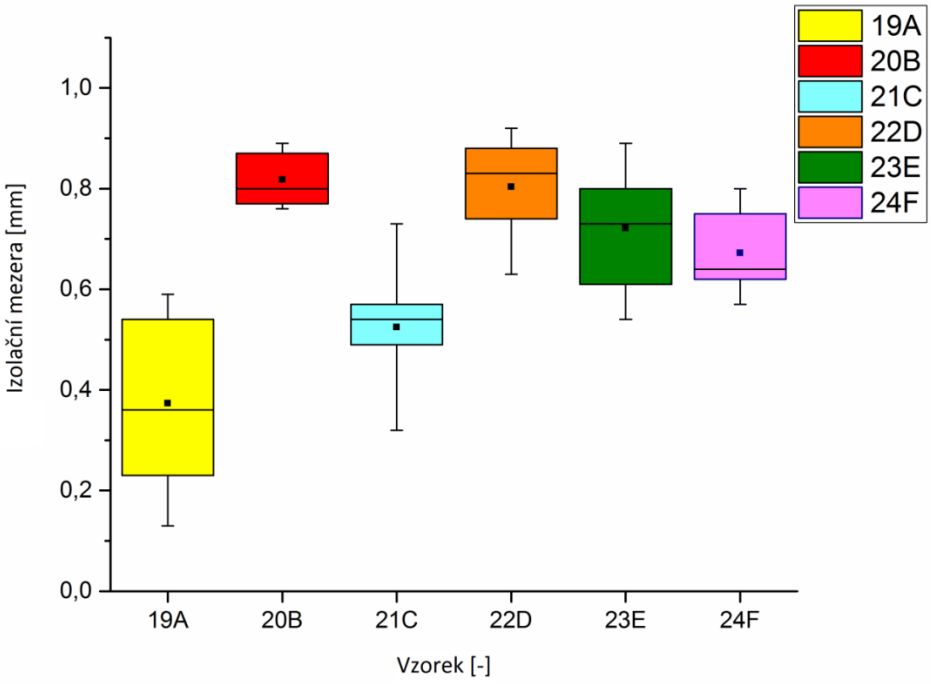
U tohoto lepidla neměl proces stárnutí takový vliv jako u lepidla MG8331S. U vzorků, které nepodléhaly stárnutí, dosáhl nejlepších výsledků vzorek 4D. Hodnoty elektrického odporu se u tohoto vzorku pohybovaly v úzkém rozsahu. Nejvyšší hodnota elektrického odporu byla naměřena u vzorku 1A, a to přibližně 0,7 Ω. U tohoto vzorku byla naměřena největší hodnota elektrického odporu i po procesu stárnutí. Průměrná hodnota odporu u ostatních vzorků je téměř stejná a pohybuje se kolem hodnoty 0,2 Ω.



Obr.5.16 Statisticky zpracované hodnoty elektrického odporu pro lepidlo CA3150

- **Výsledky izolační vzdálenosti lepidla MG8331S**

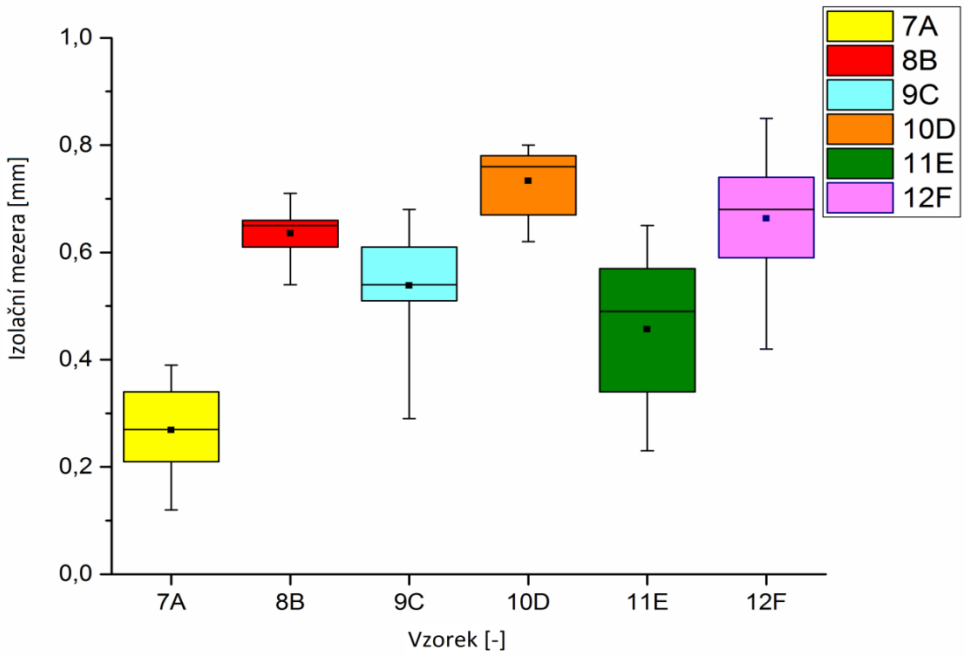
Z *Obr.5.17* je patrné, které vzorky dosahují největší a nejmenší izolační vzdálenosti. Největší izolační vzdálenosti byly naměřeny u vzorku 20B, a to v úzkém pásu hodnot. Vzorky 22D, 23E a 24F dosahují taktéž velmi vysokých hodnot izolačních mezer. Nejnižších hodnot dosahují vzorky 19A a 21C. U vzorku 19A byla naměřena hodnota menší než 0,2 mm. U této součástky by mohlo dojít ke zkratu, protože vzdálenost je nedostatečná.



Obr.5.17 Statisticky zpracované hodnoty izolační vzdálenosti pro lepidlo MG8331S

- **Výsledky izolační vzdálenosti lepidla CA3150**

U tohoto lepidla byly nejmenší hodnoty izolačních mezer naměřeny u vzorku 1A, tak jako u lepidla 8331S. Nejlepších výsledků dosahuje vzorek 10D, který měl průměrnou hodnotu izolační mezery 0,7mm. Taktéž vzorek 8B dosahuje velice dobré izolační vzdálenosti a to 0,65 mm.

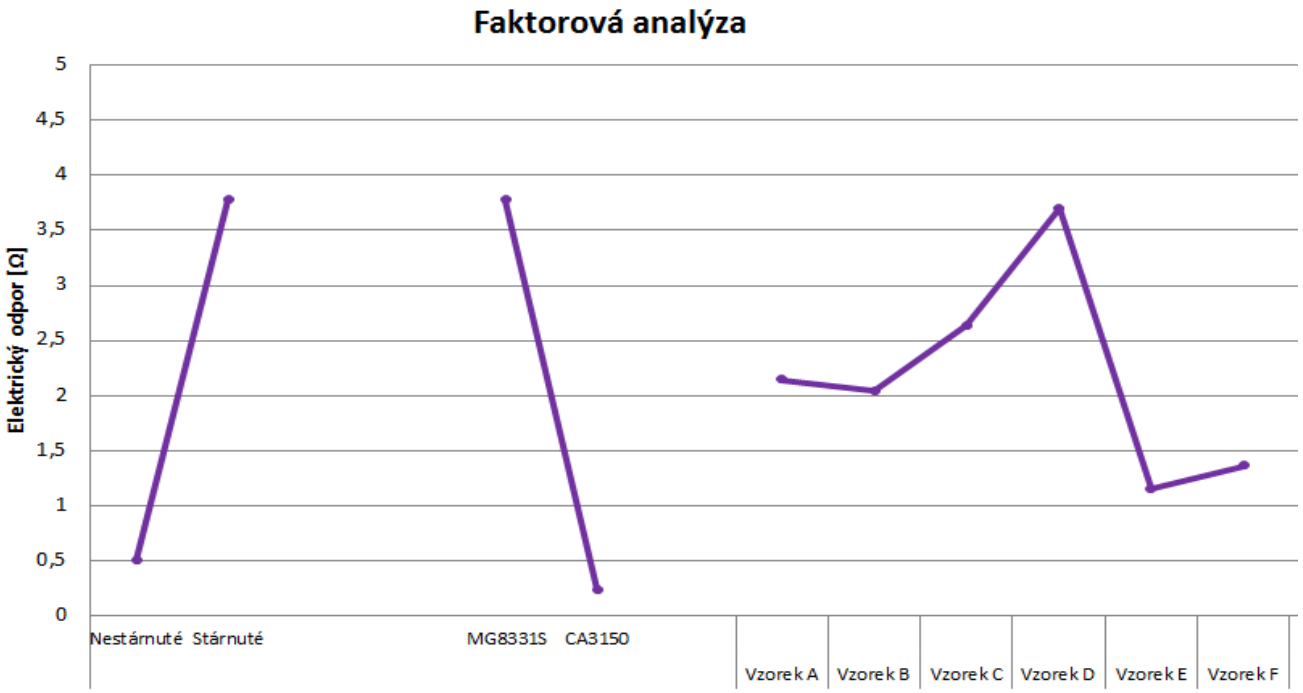


Obr.5.18 Statisticky zpracované hodnoty izolační vzdálenosti pro lepidlo CA3150

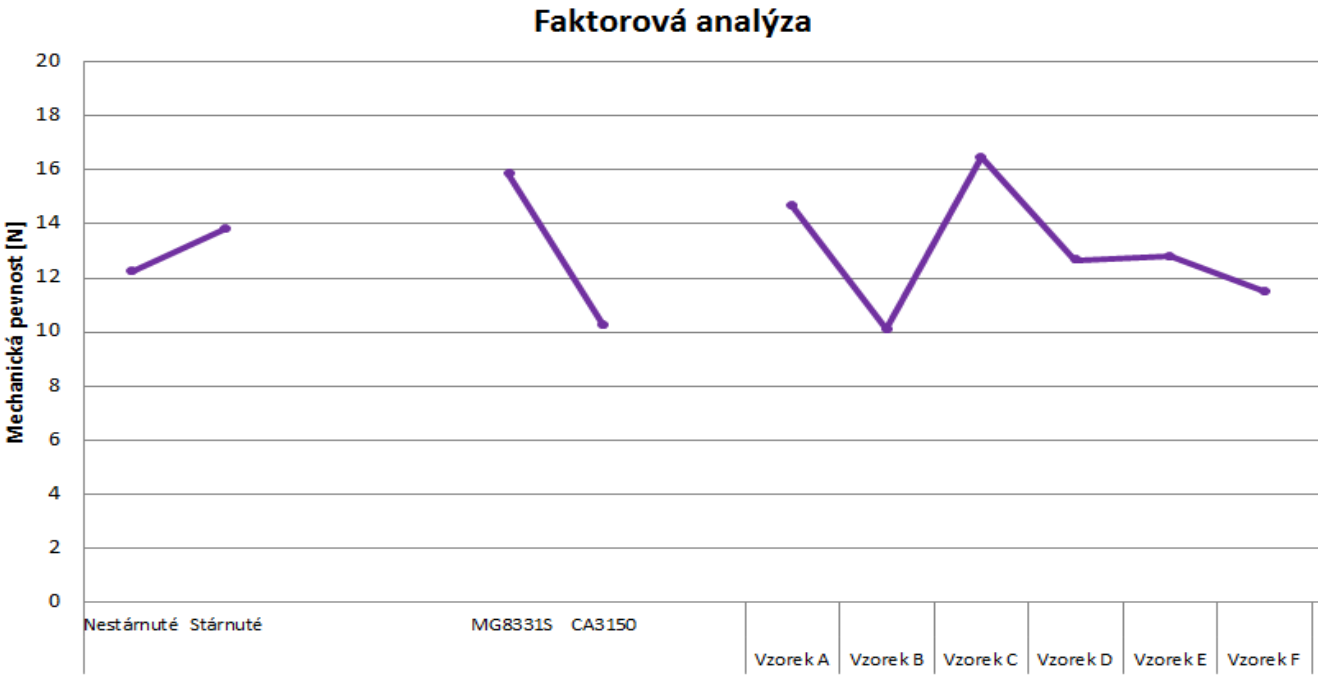
5.11 Faktorová analýza

Na *Obr.5.19* je zobrazena faktorová analýza, kde můžeme vidět, jak působí vliv jednotlivých faktorů na elektrický odpor. Z grafu je patrné, že proces stárnutí negativně ovlivňuje elektrický odpor. Dále je třeba věnovat pozornost i volbě vhodného lepidla. Co se týče použitých otvorů, tak vzorek A v porovnání se vzorkem B nemá téměř žádný vliv na hodnotu elektrického odporu. To však nemůžeme říct o srovnání vzorku D se vzorkem E, kde vidíme největší strmost křivky.

Z *Obr.5.20* můžeme vyčíst, že faktor stárnutí má jen nepatrný vliv na mechanickou pevnost. U faktoru použitého lepidla je tento vliv již o něco větší. Vzorky D, E a F mají jen nepatrný vliv na mechanickou pevnost. Největší strmost křivky vykazuje porovnání vzorku B se vzorkem C.



Obr.5.19 Statisticky zpracované hodnoty pomocí programu Develve (elektrický odpor)



Obr.5.20 Statisticky zpracované hodnoty pomocí programu Develve (mechanická pevnost)

Závěr

Tato diplomová práce obsahuje rešerši, která se zabývá problematikou propojování flexibilních substrátů. Jsou zde popsány technologie propojování substrátů se součástkami. Práce je zaměřena především na problematiku elektricky vodivých lepidel.

Experimentální část je rozdělena do dvou částí. V první části byl testován vliv tvaru otvorů v šabloně na množství naneseného lepidla. Byla zde použita dvě lepidla, která se lišila především svoji viskozitou a dobou vytvrzení. Lepidla byla nanášena nejprve na pevné substráty FR4. Byla zde měřena mechanická pevnost a velikost izolační mezery po odtrhnutí součástky. Na základě analýzy naměřených dat bylo vybráno 6 otvorů, které byly využity v druhé části experimentu. V této části experimentu byla lepidla nanášena na flexibilní substráty Dupont Pyralux. Byla zde opět měřena mechanická pevnost a velikost izolační mezery. Dále byl měřen další parametr a tím byl elektrický odpor. Nakonec byla provedena faktorová analýza, za účelem zjištění, který z faktorů má větší vliv na mechanickou pevnost a elektrický odpor.

Experiment ukázal, že jedním z nejdůležitějších faktorů je volba vhodného lepidla. Tento faktor má vliv jak na mechanickou pevnost, tak i na velikost elektrického odporu. Faktor stárnutí má vliv především na velikost elektrického odporu, jak vyplývá z faktorové analýzy. Zajímavostí u lepidla CA3150 bylo to, že u vzorků, které byly vystaveny působení stárnutí se elektrický odpor změnil jen nepatrně, kdežto u lepidla MG8331S tato změna byla výrazná v porovnání se vzorky, které působení stárnutí vystaveny nebyly. Jak je vidět z faktorové analýzy, tak faktory použití jednotlivých tvarů otvorů mají vliv na mechanickou pevnost i na velikost elektrického odporu. Otvory v šabloně je třeba porovnat u lepidel odděleně, protože jak již bylo zmíněno, tak lepidlo CA3150 bylo velmi viskozitní, což se odrazilo i v naměřených výsledcích. Mechanická pevnost byla u tohoto lepidla výrazně menší, než u lepidla MG8331S. Co se týče využití testovaných tvarů otvorů, které bychom mohli v praxi využít, tak u lepidla MG8331S připadá v úvahu vzorek F (více vykouslý zub), který dosahuje poměrně vysokých hodnot mechanické pevnosti a nízkých hodnot elektrického odporu. U lepidla CA3150 vypadá nejlépe vzorek D, avšak u měření mechanické pevnosti bylo zjištěno, že všechny vzorky vykazují velmi nízké hodnoty mechanické pevnosti. U tohoto lepidla by stálo za úvahu použít jiný profil vytvrzení a porovnat naměřené hodnoty.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1]Fjelstad, Joseph (2007). *Flexible Circuit Technology, Third Edition (3rd ed.)*. Seaside, OR: BR Publishing, Inc. ISBN 978-0-9796189-0-1.

[2]KLEIN WASSINK, R. J. *Soldering in Electronics: Comprehensive Treatise on Soldering Technology for Surface Mounting and Through-hole Techniques*. 2nd ed. Port Erin: Electrochemical Publications, 1994. 753 s. ISBN 0-901150-24-X.

[3]WONG, William S. a Alberto. SALLEO. *Flexible electronics: materials and applications* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. DOI: 978-0-387-74363-9.

[4]SISTEK, Martin. *Návrh a simulace vodivých motivů na flexibilních substrátech*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce.

[5]*Smart textilie* [online]. In: . BVV, 2008 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: http://www.enviweb.cz/clanek/obecne/68946/co-to-jsou-smart-textilie

[6]BLECHA, Tomas, Richard LINHART a Jan REBOUN. *Screen printed antennas on textile substrate* [online]. [cit. 2016-05-06]. DOI: 10.1109/ESTC.2014.6962761. ISBN 10.1109/ESTC.2014.6962761. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6962761

[7]*KAPTON, Kaptonové polyimidové lepící pásky*, [online]. In: . Praha [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: http://web.elchemco.cz/KAPTON.php

[8]Adhezivní technologie. In: *Abe.Tec* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: http://www.abetec.cz/procesy-v-mikromontazi/adhezivni-technologie/

[9]KONVIČNÁ, Iveta. *Pájení na měkko* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.sossoukyjov.cz/data/file/K_technologie/VY_32_INOVACE_3c/VY_32_INOVACE_3c04.pdf

[10]MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektrotechnice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: ČVUT, 2001.

[11]Ultrazvuk. In: *Ultrazvuk co má zvuk* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.ultrazvuk-sro.cz/

[12]ABEL, Martin. Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi. 1. vyd. Pardubice: ABE.TEC, 2005, 179 s. ISBN 80-903-5970-1.

[13]SZENDIUCH, Ivan. *Moderní elektronika, bezolovnaté pájení a EU* [online]. In: Brno [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/01a_uvod_trendy.pdf

[14]SZENDIUCH, Ivan. *Pájení a bezolovnaté pájky* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf

[15]BRAVENÝ, Tomáš a Manfred HOF. Lepidla a techniky lepení součástek. In: *DPS* [online]. 2013 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: http://www.dps-az.cz/vyroba/id:2612/lepidla-a-techniky-lepeni-soucastek

[16]MACH, P. a A. DURAJ. *Náhrada olova v pájkách: Výhody a nevýhody alternativních řešení* [online]. In: . Praha [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Nahrada%20olova%20v%20pajkach.pdf

[17]Kontrola pájených spojů. In: *Propojování v elektronice – elektrické spoje* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/08a_propojovani_v_elektronice.pdf

[18]LU, Daoqiang a C.P WONG. Effects of shrinkage on conductivity of isotropic conductive adhesives.*International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. 2000, 20(3), 189-193 [cit. 2016-05-06]. DOI: 10.1016/S0143-7496(99)00039-1. ISSN 01437496. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143749699000391

[19]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, 51(1-3), 1-35 [cit. 2016-05-06]. DOI: 10.1016/j.mser.2006.01.001. ISSN 0927796x. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927796X06000131

[20]SZENDIUCH, Ivan. *Propojování v elektronice: Elektrické spoje a jejich realizace* [online]. In: . Brno [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts

[21]Roll to Roll (R2R) Processing 2 Technology Assessment. In: *Energy.gov* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://energy.gov

[22]SCHWARTZ, Evan a Chris OBER. *Flexible Electronics: Roll to Roll Processing for Flexible Electronics*[online]. In: . 2006 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://people.ccmr.cornell.edu/~cober/mse542/page2/files/Schwartz%20R2R%20Processing.pdf

[23]*Hlubostisk: Tiskové techniky* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.spskkv.cz/pu_data/send_files/File/prezentace_zdroj.pdf

[24]*Hlubotisk: Klasický a autotypický* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.spskkv.cz/pu_data/send_files/File/hlubotisk.pdf

[25]KONEČNÝ, Gustav. *Svět tisku: Flexotisk* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=7227&buxus_svettisku=

[26]KONEČNÝ, Gustav. Sítotisk při výrobě desek plošných spojů. [online]. [cit. 2016-05-7]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=3806&buxus_svettisku=f3f3

[27]*Výroba mikrostruktur metodou UV fotolitografie: UV Fotolitografie* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/L2.pdf

[28]PAVLIS, Jakub. *Jak se vyrábí procesory II: Fotolitografie a výhledy* [online]. In: . 2014 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://notebook.cz/clanky/technologie/2014/jak-se-vyrabi-procesory-ii-fotolitografie-a-vyhledy

[29]*Printed* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.printed.cz/

[30]*PragoBoard* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.pragoboard.cz/

[31]*Lamirel* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.lamirel.cz/

[32]FPC for Transmission Control Unit. In: *Mektec* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.mektron.co.jp/product_e/automotive_fpc_eng/powertrain_eng/

[33]*Gatema* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.gatema.cz/

[34]LICARI, J. J, SWANSON, D. W.: Adhesives Technology for Electronic, Applications 2011 Elsevier, ISBN: 978-1-4377-7889-2

[35]*Epoxy Technology: Specialty Adhesives* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.epotek.com/site/

[36]HENKEL. *Česká Republika: úvodní stránka* [online]. 2016 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z:http://www.henkel.cz/

[37]*OEM AUTOMATIC: Henkel Tepelně vodivá lepidla* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.oemautomatic.cz/

[38]*Technologická zařízení a materiály pro elektrotechniku: Permacol* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.pbt.cz/produkty/dodavatel/permacol/27/

[39]*Daiken chemical company* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.daiken-chem.co.jp/english/

[40]*Panacol* [online]. In: . Německo [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.panacol.de/

[41]*Direct Industry* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.directindustry.com/

[42] *Alutronic* [online]. In: . [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.alutronic.de/

Přílohy

Příloha A: Naměřené hodnoty mechanické pevnosti ve smyku (FR4)

Tab. A-I Výsledky měření pro lepidlo MG8331S

Mechanická pevnost ve smyku [N] - lepidlo MG8331S									
vzorek	(11)	(21)	(31)	(41)	(51)	(61)	(71)	(81)	(91)
1	13,51	24,12	18,35	20,96	19,57	27,12	12,65	11,14	12,13
2	13,25	19,94	14,63	13,71	20,83	16,28	15,03	12,69	17,46
3	24,65	14,63	13,41	23,56	22,04	13,94	16,64	20,99	23,63
4	17,3	8,9	16,81	15,85	20,73	15,52	18,06	10,81	19,51
5	17,93	17,83	11,34	22,67	13,51	24,71	17,43	16,71	20,46
6	26,82	23,23	23,43	15,32	12,69	23,59	14,43	15,78	22,51
7	19,97	12,92	17,73	16,81	17,23	30,15	24,71	11,27	25,97
8	23,46	16,97	11,14	22,21	18,62	20,46	26,16	20,73	21,19
9	17,66	18,35	12,49	25,97	27,98	17,83	19,34	21,62	22,27
10	20,79	16,81	18,58	20,92	18,72	22,64	11,86	15,65	21,68

Tab. A-II Výsledky měření pro lepidlo CA3150

Mechanická pevnost ve smyku [N] - lepidlo CA3150						
vzorek	(12)	(42)	(52)	(62)	(72)	(92)
1	13,91	15,39	9,16	12,46	14,2	20,43
2	14,8	11,5	8,47	11,04	12,55	17,83
3	11,76	10,74	8,37	11,66	13,35	16,84
4	14,1	7,41	11,1	13,71	16,01	21,85
5	14,63	11,63	8,93	24,02	10,94	19,77
6	21,91	10,51	7,78	15,16	12,26	17,86
7	13,31	9,09	8,2	11,47	12,72	23,72
8	11,07	10,25	7,81	17,1	13,84	17
9	13,87	10,58	8,37	12,22	13,61	20,79
10	16,97	17,4	7,15	12,09	15,55	26,49

Příloha B: Naměřené hodnoty mechanické pevnosti ve smyku (Dupont Pyralux)

Tab. B-I Výsledky měření pro lepidlo MG8331S nestárnuté

Mechanická pevnost ve smyku [N] - lepidlo MG8331S nestárnuté						
vzorek	19A	20B	21C	22D	23E	24F
1	17,2	12,95	18,95	11,57	14,76	14,23
2	18,65	10,48	16,94	13,64	12,06	12,26
3	22,9	13,61	10,35	9,56	13,02	19,84
4	20,26	15,32	12,65	11,53	13,64	15,22
5	13,08	14,3	15,55	15,98	13,15	17,93
6	16,94	12,03	16,67	18,22	11,8	16,81
7	27,02	12,98	20,13	18,19	13,71	12,26
8	18,58	9,85	13,67	11,76	10,94	15,45
9	16,41	18,55	14,33	12,52	13,48	16,31

Tab. B-II Výsledky měření pro lepidlo CA3150 nestárnuté

Mechanická pevnost ve smyku [N] - lepidlo CA3150 nestárnuté						
vzorek	7A	8B	9C	10D	11E	12F
1	10,51	9,79	12,95	9,19	9,29	5,5
2	10,51	11,66	7,55	8,7	15,62	8,3
3	9,75	7,05	10,02	9,65	15,65	7,41
4	9,82	8,57	9,33	13,84	14,83	10,84
5	11,63	8,37	10,21	11,27	12,39	9,39
6	12,95	13,25	11,47	13,61	12,69	6,19
7	10,28	8,6	10,54	6,52	9,82	9,92
8	9,75	9,52	10,25	8,27	9,65	14,6
9	8,44	7,74	9,39	9,59	10,74	9,09

Tab. B-III Výsledky měření pro lepidlo MG8331S stárnuté

Mechanická pevnost ve smyku [N] - lepidlo MG8331S stárnuté						
vzorek	13A	14B	15C	16D	17E	18F
1	17,73	10,61	19,47	18,35	17,23	17,04
2	15,36	19,54	16,28	25,6	25,24	19,08
3	20,76	11,93	14,76	17,63	22,31	21,39
4	19,01	15,72	30,12	21,45	18,68	28,57
5	22,44	27,65	18,98	17,46	19,61	27,81
6	17,93	16,84	14,73	22,47	23,03	28,31
7	18,39	25,24	18,62	17,27	19,05	17,99
8	26,56	17,99	13,02	15,78	24,61	22,47
9	18,98	12,72	23,63	22,01	16,57	17,53

Tab. B-IV Výsledky měření pro lepidlo CA3150 stárnuté

Mechanická pevnost ve smyku [N] - lepidlo CA3150 stárnuté						
vzorek	1A	2B	3C	4D	5E	6F
1	13,15	7,08	14,56	11,53	9,95	9,26
2	12,78	9,72	14,5	10,28	8,44	12,72
3	19,28	9,13	19,34	7,97	5,27	10,64
4	10,74	12,78	15,78	10,31	10,54	11,7
5	9,09	9,42	7,88	7,78	9,79	10,87
6	9,98	7,58	4,22	7,08	10,21	8,86
7	12,98	9,29	6,79	12,03	10,84	12,39
8	13,15	6,89	11,37	9,89	9,69	7,68
9	7,81	7,71	11,5	8,2	8,44	13,18

Příloha C: Naměřené hodnoty elektrického odporu

Tab. C-I Výsledky měření pro lepidlo MG8331S před stárnutím

Elektrický odpor [Ω] - lepidlo MG8331S před stárnutím						
vzorek	13A	14B	15C	16D	17E	18F
1	0,306	0,979	0,506	1,943	2,418	0,881
2	0,479	0,608	1,247	1,344	1,063	0,368
3	1,815	0,664	0,664	0,899	0,458	0,512
4	0,497	0,535	0,929	0,556	0,634	0,461
5	0,530	0,778	0,347	0,428	0,644	0,322
6	0,618	0,370	0,308	0,822	0,395	0,432
7	0,724	0,628	0,454	0,431	0,574	0,937
8	1,089	0,734	0,616	0,746	1,774	0,350
9	0,901	0,656	0,783	2,404	1,222	0,394

Tab. C-II Výsledky měření pro lepidlo CA3150 před stárnutím

Elektrický odpor [Ω] - lepidlo CA3150 před stárnutím						
vzorek	1A	2B	3C	4D	5E	6F
1	0,693	0,099	0,065	0,075	0,038	0,137
2	0,108	0,106	0,049	0,066	0,624	0,208
3	0,058	0,100	0,045	0,158	477,200	0,224
4	0,035	0,167	0,179	576,500	0,045	2,605
5	0,205	0,080	0,087	24,350	0,047	0,243
6	0,258	0,356	0,205	0,143	0,054	0,539
7	2,473	0,079	0,049	1430,300	4,289	0,065
8	1,655	0,092	0,400	0,091	0,179	0,075
9	0,144	0,150	0,226	0,166	0,129	0,288

Tab. C-III Výsledky měření pro lepidlo MG8331S po stárnutí

Elektrický odpor [Ω] - lepidlo MG8331S po stárnutí						
vzorek	13A	14B	15C	16D	17E	18F
1	2,938	2,886	3,023	2,964	1,037	5,019
2	11,498	9,062	3,472	12,431	1,201	2,423
3	7,158	3,475	3,509	10,107	3,391	4,642
4	6,712	12,472	27,391	4,291	3,362	5,761
5	6,974	3,351	8,852	8,913	3,124	2,441
6	7,643	8,653	16,834	7,898	3,6	4,231
7	5,162	10,562	4,783	27,413	4,025	1,671
8	13,632	5,718	3,441	7,792	2,863	1,162
9	10,523	4,217	12,685	2,769	3,31	3,389

Tab. C-IV Výsledky měření pro lepidlo CA3150 po stárnutí

Elektrický odpor [Ω] - lepidlo CA3150 po stárnutí						
vzorek	1A	2B	3C	4D	5E	6F
1	0,693	0,099	0,065	0,075	0,038	0,137
2	0,108	0,106	0,049	0,066	0,624	0,208
3	0,058	0,1	0,045	0,158	477,2	0,224
4	0,035	0,167	0,179	576,5	0,045	2,605
5	0,205	0,08	0,087	24,35	0,047	0,243
6	0,258	0,356	0,205	0,143	0,054	0,539
7	2,473	0,079	0,049	1430,3	4,289	0,065
8	1,655	0,092	0,4	0,091	0,179	0,075
9	0,144	0,15	0,226	0,166	0,129	0,288