

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Elektricky vodivá adheziva pro flexibilní substráty

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej KRČMÁŘ**
Osobní číslo: **E13N0014P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Elektricky vodivá adheziva pro flexibilní substráty**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

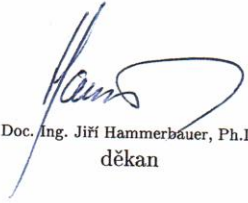
1. Zpracujte přehled elektricky vodivých adheziv, výrobců a jejich technických parametrů.
2. Vytvořte přehled standardů a metod v oblasti testování kvality kontaktování komponent na flexibilních substrátech.
3. Vyberte vhodná adheziva, jejich metodu depozice a testování kvality využitelné v laboratořích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

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Fjelstad, J., "Flexible Circuit Technology," BR Publishing, Fourth edition, Seaside 2011.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Radek Soukup, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá elektricky vodivými adhezivy vhodnými pro flexibilní substráty. Cílem práce je definovat vhodný postup pro testování reálné mechanické výdrže elektricky vodivého adheziva na flexibilním substrátu při ohýbání. Hlavní důraz je kladen jak na provedení rešerši komerčně dostupných elektricky vodivých adheziv, tak i na praktické otestování vybraného adheziva deponovaného na flexibilní substrát. V praktické části je detailně popsán provedený experiment testování výdrže vybraného elektricky vodivého adheziva, kterým jsou nakontaktovány součástky na flexibilní substrát, při cyklickém ohýbání. V závěru práce je provedeno vyhodnocení získaných dat a poznatků z provedeného experimentu.

Klíčová slova

Elektricky vodivé adhezivum, flexibilní substrát, komerčně dostupná elektricky vodivá adheziva, mechanická odolnost adheziva na flexibilním substrátu v ohybu.

Abstract

This master thesis deals with the electrically conductive adhesives suitable for flexible substrates. The main goal of this thesis is to define proper process of testing real mechanical endurance of electrical conductive adhesive on flexible substrate in bend test. The focus was concentrated on finding commercially available electrically conductive adhesives and on practical test of selected adhesive on flexible substrate. Conducted endurance test of selected electrical conductive adhesive is described in the practical part of thesis. The test consisted of cyclic bend test of electrical components connected to flexible substrate with selected adhesive. The obtained data from conducted experiment are evaluated in the summary.

Keywords

Electrical conductive adhesive, flexible substrate, commercially available electrically conductive adhesives, mechanical resistance of the adhesive on the flexible substrate during bending.

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 10.5.2015

Ondřej Krčmář

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování Ing. Radkovi Soukupovi Ph.D. za vedení diplomové práce, dále pak Ing. Silvanovi Pretlovi za ochotu a cenné rady při měření.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 ELEKTRICKY VODIVÁ ADHEZIVA	10
1.1 HISTORIE ADHEZIV UŽÍVANÝCH V ELEKTRONICKÝCH APLIKACÍCH	10
1.2 VLASTNOSTI A STRUKTURA ELEKTRICKY VODIVÝCH ADHEZIV	11
1.2.1 Vazební složka	12
1.2.2 Vodivá složka	13
1.2.3 Izotropní a anizotropní vodivost	14
1.3 MOŽNOSTI NANÁŠENÍ ADHEZIV	15
1.3.1 Sítotisk	15
1.3.2 Šablonový tisk	16
1.3.3 Nanášení plnou jehlou	17
1.3.4 Nanášení razítkem	18
1.3.5 Dispenzing	18
1.3.6 Jet dispenzing (Jetting)	19
2 PŘEHLED KOMERČNĚ DOSTUPNÝCH ELEKTRICKY VODIVÝCH ADHEZIV	21
2.1 HENKEL	21
2.2 PANACOL	22
2.3 MASTER BOND	23
2.4 MG CHEMICALS	24
2.5 CHOMERICS	24
2.6 CREATIVE MATERIALS	25
2.7 AREMCO	26
2.8 RESINLAB	26
2.9 POLYTEC PT	27
2.10 PROTAVIC AMERICA	28
2.11 MEREKO	29
3 PŘEHLED STANDARDŮ A METOD V OBLASTI TESTOVÁNÍ KVALITY KONTAKTOVÁNÍ KOMPONENT NA FLEXIBILNÍ SUBSTRÁTY	30
3.1 ASTM D790-10, ISO 178:2010	30
3.2 OSTATNÍ STANDARDY PRO MECHANICKOU PEVNOST	31
4 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	33
4.1 STANDARD IPC-TM-650	33
4.2 MODIFIKACE IPC-TM-650	33
4.3 VÝBĚR METODY DEPOZICE	35
4.4 VYBRANÉ ADHEZIVUM XCA 3556 HF	36
4.5 VOLBA SUBSTRÁTU	37
5 TEST ODOLNOSTI ADHEZIVA V OHYBU	38
5.1 PŘÍPRAVA VZORKU	38
5.2 VYTVRZENÍ	39
5.3 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	41
5.4 PRŮBĚH TESTOVÁNÍ	43
5.5 SHRnutí VÝSLEDKŮ	48
5.6 DOPORUČENÍ	50
ZÁVĚR	51
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	53

Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Význam	Význam v češtině
ACA	Anisotropically conductive adhesive	Anizotropní vodivé adhezivum
ASTM	American Society for Testing and Materials	Americká společnost pro testování a materiály
DMM	Digital Multimeter	Digitální multimetr
DSC	Differential scanning calorimetry	Diferenciální kompenzační kalorimetrie
ECA	Electrically conductive adhesive	Elektricky vodivé adhezivum
FR	Flame retardant	Samozhášecí
ICA	Isotropically conductive adhesive	Izotropní vodivé adhezivum
IPC	Association Connecting Electronics Industries	Asociace sdružující elektronický průmysl
ISO	International Organization for Standardization	Mezinárodní organizace pro standardizaci
LED	Light-emitting diode	Dioda emitující světlo
LED	Light emitting diode	Světlo emitující dioda
MCOT	Modified Cyclo-olefin Thermosets	Upravené cyclo-olefinové reaktoplasty
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System	Mikro-elektrické-mechanické systémy
MIL-STD	United States defense standard	Obranný standard Spojených států amerických
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
OLED	Organic light-emitting diode	Organická dioda emitující světlo
SMT	Surface-mount technology	Povrchová montáž
SMU	Source Measure Unit	Jednotka sdružující zdroj a měřicí přístroj
USB	Universal Serial Bus	Univerzální sériová sběrnice
UV	Ultraviolet	Ultrafialové záření
ZČU		Západočeská univerzita v Plzni

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá elektricky vodivými adhezivy a jejich použitím na flexibilních substrátech. Adheziva jsou současnou alternativou bezolovnatých pájek a svoje uplatnění našla v oblasti flexibilní elektroniky, která v dnešní době zaznamenává rozmach a věnuje se jí poměrně velká pozornost.

Teoretická část práce se zabývá obecnou teorií adheziv jako takových, popisem historického vývoje adheziv, základním popisem jejich struktur a druhů vodivosti. V další části jsou uvedeny možnosti nanášení adheziv na substráty. Následně jsou v práci vypracovány seznamy firem, nabízející elektricky vodivá adheziva, a seznam jejich konkrétních produktů na trhu. V těchto seznamech je uvedeno několik základních vlastností produktů, aby bylo možné jednotlivá adheziva porovnat. Jelikož je velmi důležité testovat jednotlivé vlastnosti adheziv, jsou v poslední části teoretické části zmíněny standardy pro testování mechanických vlastností elektricky vodivých adheziv. Dále jsou zde vyzdvihnuty ty metody, které se přímo týkají praktické části.

Praktická část práce je zaměřena na testování spolehlivosti adheziv při kontaktování součástek na flexibilní substráty. V části příprava experimentu je popsán standard, který byl po potřebné modifikaci použit pro testování. V této části je vysvětlena volba způsobu depozice, volba použitého substrátu a také adheziva. Následuje část popisující samotné testování. Je zde popsána příprava vzorku, podoba testovacího zařízení a průběh experimentu. V poslední části je doporučení, vyplývající ze zkušeností získaných z testování ohybu adheziva na flexibilním substrátu.

Získaná data z experimentu byla zpracována do tabulek a grafů, které jsou uvedeny v praktické části práce. V závěru práce je zhodnocení docílených výsledků a shrnutí přínosů celé práce.

1 Elektricky vodivá adheziva

Jak je známo v současnosti, většina montáží desek plošných spojů je realizována bezolovnatými pájkami. Nejvhodnějšími pájkami s ohledem na cenu, mechanické a elektrické vlastnosti byly pájky SnPb. Olovo je však ekologicky závadné a dnešním trendem je jeho kompletní náhrada jinými méně toxickými kovy. Bohužel s touto náhradou olova jinými kovy výrazně roste cena takovýchto pájek. Proto se hledají jiné spojovací materiály jako například elektricky vodivá adheziva (ECA).

1.1 Historie adheziv užívaných v elektronických aplikacích

Polymerní pryskyřice používané jako pojivo v adhezivech nejsou vůbec ničím novým. V dnešní době se nejvíce využívá epoxidových pryskyřic, které byly poprvé představeny koncem třicátých let dvacátého století. Postupně v dalších dekádách byly představeny, polyuretanové, polyamidové a silikonové pryskyřice. [1]

První zmínka o použití elektricky vodivých adheziv pochází z doby po roce 1960. V této době se však tato adheziva potýkala s mnohými problémy jako například s nečistotami v podobě iontů chlóru, které způsobovali změny rezistivity. Společnostmi, které poprvé představily předem připravená vodivá adheziva, byly Ablestik Laboratories, Epoxy Technology a Amicon. Většinou se jednalo o plnivo ze stříbra a epoxidové pojivo. V roce 1982 NASA připravila a vydala, první specifikace pro výběr a použití organických adheziv v hybridních mikroobvodech MSFC-SPEC-592. Vypracování bylo podníceno dvěma otázkami. První zda nedochází k porušení integrity spojů během střídání teplot a druhé, jaké množství plynů se uvolňuje z adheziv a jaké mají účinky na obvod. Tato specifikace byla částečně přepracována, revidována pány Weigandem a Carusem[3] a položila základy pro Metodu 5011 z MIL-STD-883. [1, 2]

Po roce 1980 byla představena adheziva stříbro-sklo a také termoplastický film. Velmi zajímavý byl v té době vývoj „snap-cure“ adheziv, která se vyznačují rychlým vytvrzením (pod 1 minutu při 150 °C), proto byla a jsou vhodná pro produkci ve velkém měřítku. Následně byla představena anizotropní adheziva určená pro „fine-pitch“ (rozteč vývodů menší než 0,5 mm) montáž a první adheziva pro „flip-chip“ (montáž lící stranou dolů) zařízení. [1]

V následujících letech po roce 1990 byla vyvinuta adheziva tvrditelná viditelným a UV zářením a také adheziva ve formě filmu určená pro „lead-on-chip“ pouzdření. V této době byla vyvinuta první generace „low-stress“ adheziv, pasta a film. Ty jsou určeny pro součástky, které jsou citlivé v ohybu např. piezoelektrické senzory, CCD senzory a integrovaná optoelektronická zařízení. Tato adheziva mají absorbovat ohybové napětí. Poměrně důležité, bylo představení adheziv s nízkou absorpcí vlhkosti. Byla jimi adheziva z esteru kyanátu a MCOT (upravený cyklický olefinový termoset). [1]

Od roku 2000 byla vyvíjena adheziva pro specifické aplikace. Například použití speciálních adheziv v 3D pouzdrech nebo v pouzdření na úrovni waferu. Další specifická adheziva se uplatňují v LED a OLED osvětlení a také např. v MEMS technologiích. V neposlední řadě také v montáži na flexibilní substráty. [1]

1.2 Vlastnosti a struktura elektricky vodivých adheziv

ECA oproti pájkám mají jisté výhody, ale také jsou s nimi samozřejmě spojeny i nevýhody. V Tab. 1.1 je porovnání vlastností spojů realizovaných ECA a SnPb pájkou.

Tab. 1.1: Porovnání ECA a SnPb spojů. [4]

Vlastnosti spoje	SnPb pájka	Elektricky vodivé adhezivum
Vodivost	izotropní	izotropní
		anizotropní
odpor	srovnatelný	srovnatelný
šum	nižší	vyšší
nelinearita	nižší	vyšší
stabilita	vyšší	nižší
odolnost proti navlhání	vyšší	nižší
vliv materiálu spojovaných částí	srovnatelný	srovnatelný
vliv kvality spojovaných povrchů	nižší	vyšší
adheze	vyšší	nižší
iontová migrace	ne	je možná
spolehlivost	vyšší	nižší
doba života	vyšší	nižší
negativní vliv na prostředí	ano	ne
cena	nižší	vyšší

Pokud shrneme závažné vlastnosti pájených a lepených spojů, tak dojdeme k závěru, že ECA mají horší vlastnosti než SnPb pájky. Povrch pro jejich aplikaci musí být kvalitně

očištěn, a pokud se jedná o chemicky inertní povrchy, tak je třeba jejich povrch upravit abrazivem pro lepší adhezi. Elektrický odpor a mechanické vlastnosti jsou velmi podobné, ale na druhé straně vykazují vyšší šum, nelinearitu a jsou mnohem méně odolné vůči vlhkosti. ECA mají vyšší cenu, ale jejich velkou výhodou je, že splňují požadavky předpisů na ekologickou výrobu a na to se v dnešní době klade velký důraz.

ECA se skládají ze dvou složek, každá z těchto složek má svou určitou funkci. První složkou je složka vazební, která se chová jako nosič a je izolantem. Je tvořena pryskyřicemi různého typu, s výjimkou stříbrného skla, ve kterém je použito polymerní pojivo pouze kvůli snadnějšímu nanášení. Druhou složkou je vodivá složka, která je vodičem a je tvořena různými vodivými částicemi. V následujících kapitolách budou popsány konkrétně jednotlivé složky ECA.

1.2.1 Vazební složka

Jak již bylo uvedeno, vazební složka je izolant. Nejpoužívanějšími pryskyřicemi jsou epoxidové pryskyřice. Samozřejmě existují i jiné druhy jako silikonové, polyuretanové, polyimidové, na bázi stříbrného skla, na bázi esteru kyanátu a MCOT. Porovnání těchto pryskyřic s jejich výhodami a nevýhodami je shrnuto v *Tab. 1.2*.

Tab. 1.2: Obecné porovnání vazebních složek ECA. [1]

Materiál	Výhody	Nevýhody
Epoxid	Použití při vysokých teplotách. Dobrá odolnost proti vlhkosti a chemickým vlivům. Čistota na vysoké úrovni. Nízké odpařování plynů.	Dlouhé vytvrzovací cykly s anhydridovými tvrdidly. Pro dvousložkové systémy je vyžadováno odplynění.
Silikon	Největší čistota. Pohlcuje namáhání. Vysoká a nízká teplotní stabilita.	Nízká povrchová energie. Nabobtnání při kontaktu s nepolárními rozpouštědly.
Polyuretan	Dobrá flexibilita při nízkých teplotách. Pohlcuje namáhání. Chemicky velmi univerzální.	Nižší tepelná stabilita a provozní teplota než u epoxidů (150 °C - 163 °C). Průměrná vazební síla.
Polyimid	Vyšší teplotní stabilita v porovnání s epoxidy. Vysoká iontová čistota. Snížené (tzv. "bleedout") prosakování.	Zachycené rozpouštědlo může pod velkými integrovanými obvody produkovat dutiny. Nutno několikrát vytvrdit kvůli odpaření rozpouštědla. Může pohlcovat vlhkost ve vytvrzeném stavu.

Materiál	Výhody	Nevýhody
Stříbrné sklo	Stabilita při vysokých teplotách. Nízké odpařování plynů. Součinitel teplotní roztažnosti velmi podobný jako silikon.	Působí velké pnutí. Vysoké teploty zpracování. Tvorba dutinek.
Kyanátester	Vysoká přilnavost. Vysoká teplotní stabilita. Vysoká teplota skelného přechodu, nízký součinitel tepelné roztažnosti.	Vysoká absorpce vlhkosti. Náchylnost na "popcorn" efekt.
MCOT	Nízká absorpce vlhkosti. Snížení efektu "popcorn". Výborná přilnavost.	U některých substrátů může nastat okrajová přilnavost.

1.2.2 Vodivá složka

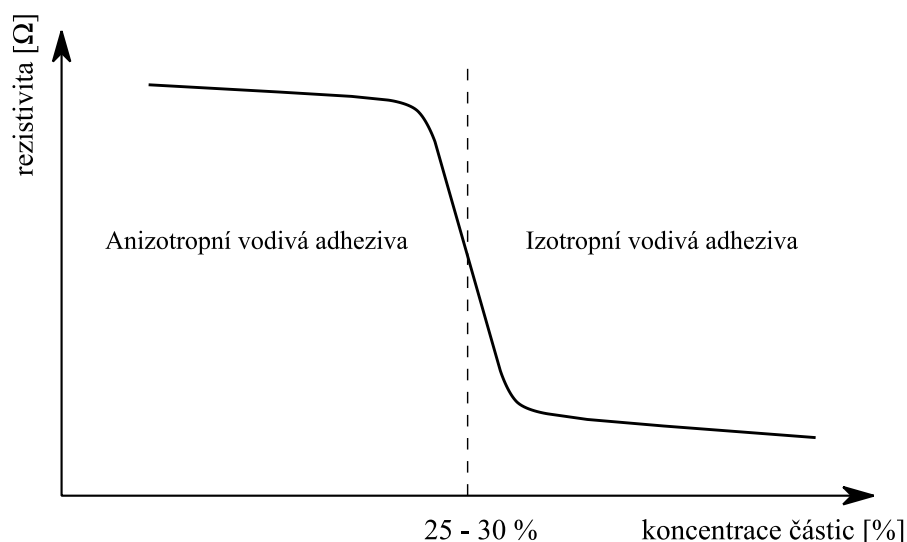
Elektrickou vodivost adheziv a také tepelnou vodivost zajišťují kovové částice obsažené v polymerních pryskyřicích. Nejběžněji je použito stříbro, hlavně kvůli jeho výborné elektrické vodivosti a díky jeho schopnosti zachovat vodivost i při působení vzduchu, různé teploty a vlhkosti. I když se na povrchu stříbra vytvoří oxid stříbrný, tak stále zachovává svoji elektrickou vodivost. Například měď, která má také velmi dobrou elektrickou vodivost, vytváří oxid, který je elektricky nevodivý. Takže v případě použití mědi je nutno ji pokovit stříbrem nebo zlatem. Zlato, nikl a uhlík, jsou používány v mnohem menší míře a to hlavně z důvodu ceny u zlata a kvůli horší vodivosti u uhlíku a niklu. Některé pokovené částice jako například nikl pokovený zlatem jsou široce využívány jako plnivo pro anizotropní adheziva. V Tab. 1.3 jsou uvedeny materiály používané jako plniva a některé jejich vlastnosti. [1]

Tab. 1.3: Elektrické a tepelné vlastnosti materiálů použitých jako vodivá složka adheziv. [1]

Materiál	Objemová hustota [g/cm³]	Měrný elektrický odpor [Ω·m]	Tepelná vodivost [W/m·K]
Stříbro	10,5	$1,6 \cdot 10^{-6}$	429
Měď	8,9	$1,8 \cdot 10^{-6}$	401
Zlato	19,3	$2,3 \cdot 10^{-6}$	318
Hliník	2,7	$2,9 \cdot 10^{-6}$	237
Nikl	8,9	$10 \cdot 10^{-6}$	91
Platina	21,5	$10,5 \cdot 10^{-6}$	72
Uhlík	-	$3 \cdot 10^{-3}$	-

1.2.3 Izotropní a anizotropní vodivost

Nejčastějším tvarem kovových částic v adhezivu bývají lupínky nebo kuličky o malém průměru. Jednou z výhod adheziv je, že umožňují izotropní i anizotropní vodivost. Rozdíl mezi izotropním a anizotropním adhezivem je založen na perkolační teorii viz *Obr. 1.1*. Hlavním faktorem určujícím vodivost daného kompozitního materiálu je tzv. perkolační práh, jedná se o kritický obsah částic plniva, při kterém se začne daný materiál chovat jako vodič. Znamená to, že se vytvoří řetězec, ve kterém jsou částice plniva v přímém kontaktu. Zvyšováním obsahu částic v polymeru při koncentraci, kdy se částice začnou dotýkat a vytváří makroskopickou síť vodivých řetězců (oblast perkolace), vodivost vzroste o několik řádů skokem a postupně se pak blíží vodivosti plniva. Z toho vyplývá rozdíl ve struktuře ICA a ACA, který je zobrazen na *Obr. 1.2*. Perkolační práh, tedy záleží na koncentraci vodivých částic v adhezivu, typicky 25 – 30 %, ale tato hodnota se v různých literaturách může lišit. [5, 6, 12]

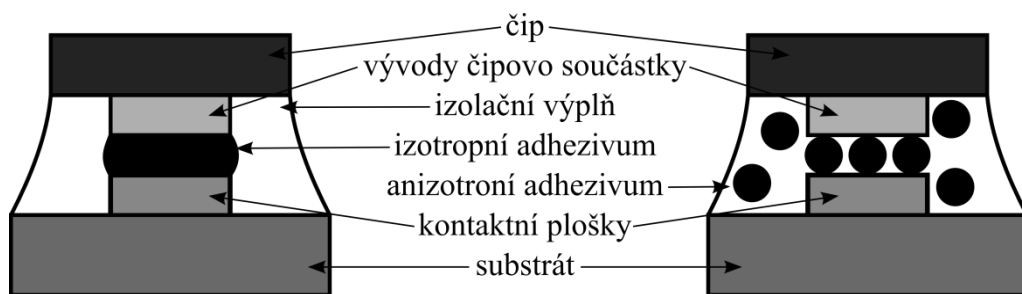


Obr. 1.1: Perkolační křivka, ukazuje pokles rezistivity s růstem koncentrace částic. (převzato z [5])

Izotropní elektricky vodivá adheziva (ICA) mají koncentraci částic nad perkolačním prahem, což jim poskytuje vodivost ve všech směrech, tedy ve směrech x, y i z. Vodivou složkou bývají částice kulového tvaru, případně směs částic kulového tvaru a lupínek. Velikost těchto částic se z pravidla pohybuje od 1 do 10 μm . Jako vazební složka mohou být použity jak termoplasty, tak reaktoplasty. Hlavní výhodou termoplastických ICA je opravitelnosti spojů. Nevýhodou je degradace přilnavosti adheziva při vysokých teplotách a tvorba dutinek během odpařování rozpouštědla. Nejvíce komerčně dostupných ICA je reaktoplastických. Nejběžnější je epoxid, má výbornou přilnavost, dobrou odolnost proti

chemikáliím i proti korozi a je levný. Termoplastické ICA se většinou jen přidávají, aby bylo případně možné spoj opravit. [5, 6]

Anizotropní elektricky vodivá adheziva (ACA) vykazují elektrickou vodivost pouze v jednom směru. Je to docíleno poměrně malým procentuálním obsahem vodivých částic v adhezivu, méně než 25 – 30 %. Jako částice se používají primárně lupínky, ale mohou se použít i částice kulového tvaru o velikosti kolem 10 μm , které jsou z polymeru pokrytým tenkou vrstvou kovu a tenkou nevodivou vrstvou. Jelikož je obsah vodivých částic v adhezivu malý, tak adhezivum nevykazuje vodivost v osách x a y, částice v těchto osách netvoří vodivou síť. Vodivosti v ose z se docílí stlačením adheziva mezi kontakty při osazování součástek, kdy dojde k mechanickému kontaktu lupínků či k deformaci a kontaktu kulových částic. U ACA je důležitá i síla přítlaku při montáži. Jako vazební složka u ACA se primárně používají termoplastické pryskyřice, ale je důležité podotknout, že se ACA často realizuje jako film. [5, 6, 7]



Obr. 1.2: Struktura izotropního a anizotropního adheziva. (převzato z [5])

1.3 Možnosti nanášení adheziv

Existuje několik základních technik umožňujících nanesení adheziva na substrát. V této části budou tyto metody popsány. Konkrétně se bude jednat o sítotisk, šablonový tisk, nanášení hrotem, razítkem a automatický dispenzing, který se dále dělí na kontaktní a bezkontaktní pomocí trysky. Pro přehlednost bude kontaktní nanášení dávkovačem nazýváno dispenzing a bezkontaktní nanášení jetting.

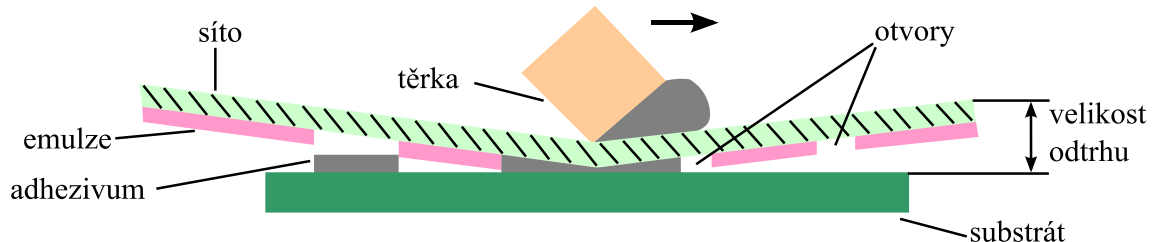
1.3.1 Sítotisk

Sítotisk je velmi jednoduchá metoda, je relativně levná jak pro malé, tak i pro velké provozy. Síto je z vláken polyesteru nebo z nerezové oceli připevněné na vhodný rám, který je většinou vyroben z hliníkových slitin. Základními komponenty pro sítotisk jsou:

- Síťovina se šablonou s vytvořeným motivem pro řízení tvaru a množství nanášené látky, která je upnutá do rámu.

- Materiál ve formě pasty, který chceme nanášet.
- Sítotiskový stroj skládající se z konstrukce pro uchycení sítotiskového rámu se sítom, přípravku pro uchycení substrátu a pohyblivé části pro ovládání těrky.

Motiv na sítu se dá vytvořit dvěma způsoby. Buď přímo pomocí masky nebo nepřímo pomocí kovové nebo plastové fólie. Přímý motiv je vytvořen nanesením fotocitlivé emulze do ok síta, která se následně osvítlí UV zářením přes masku s motivem, čímž dojde k vytvrzení emulze důsledkem její polymerizace. Následně se nevytvrzená emulze smyje a tím se vytvoří požadovaný vzor. Nepřímý motiv se vytvoří přímým spojením síta a šablony. Šablona se většinou vyrábí jako kovová fólie, která se lepí na síto. Tento typ je sice náročnější na výrobu, ale rovněž umožňuje vysoké rozlišení, řádově až desítky μm . Rám se sítom je umístěn v definované poloze, dle umístění substrátu. Adhezivum je nanášeno na síto a je protlačeno těrkou na substrát. Síto není se substrátem v kontaktu do doby, než je adhezivum aplikované pomocí těrky pohybující se definovanou rychlostí. Na těrku tedy působí definovaná síla, která síto přitlačí na substrát, poté dojde k odskoku síta a na substrátu je vytvořen požadovaný motiv. Důležitá je také orientace osnovy tkaniny se směrem pohybu těrky. Většinou se jedná o úhel 45° . [1, 4, 5]

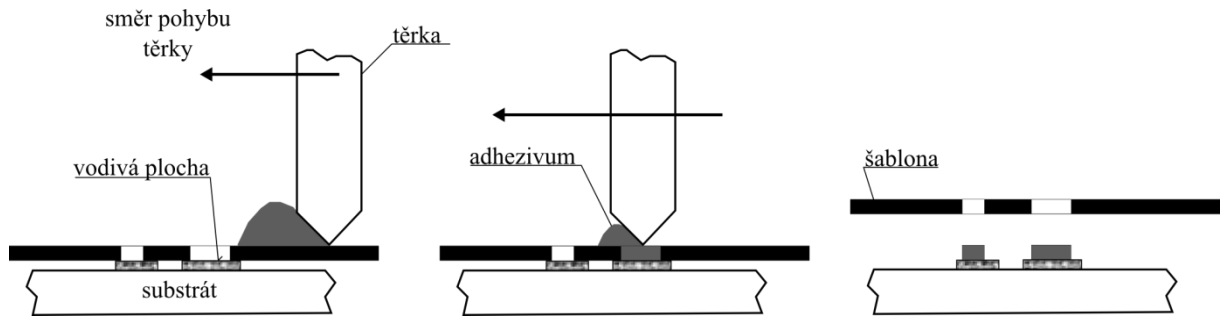


Obr. 1.3: Schematické znázornění sítotisku.

1.3.2 Šablonový tisk

V podstatě se jedná o obdobu sítotisku. Rozdíl spočívá v provedení šablony. U šablonového tisku je vzor vytvořen v pevném materiálu z mosazi, nerezové oceli, mědi, molybdenu nebo z plastu. Vzor na šabloně se vytváří chemicky leptáním, elektrogalvanickým nanášením nebo řezáním laserem. Výhodou šablonového tisku oproti sítotisku je značně delší životnost šablony a vyšší přesnost tloušťky nanášené vrstvy, která je daná vzdáleností mezi substrátem a šablonou, což je další rozdíl oproti sítotisku. Šablona leží přímo na substrátu a tím přímo ovlivňuje výšku nanášené vrstvy. Substrát je uchycen v přístroji na šablonový tisk mechanicky nebo vakuově. Po uchycení substrátu a šablony následuje nanášení adheziva. K protlačení adheziva otvory šablony na substrát se používá těrka. Hodně používané jsou těrky

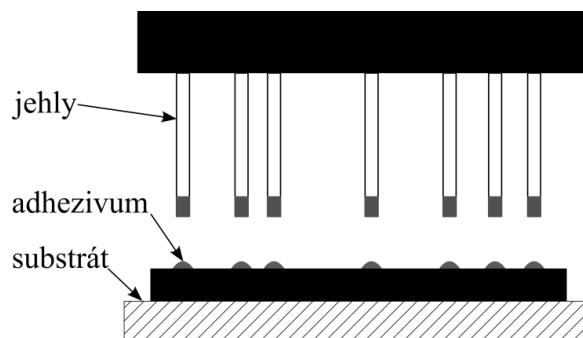
polyuretanové, které se používají výhradně pro nanášení tlustých vrstev. Nejpoužívanější jsou ale těrky kovové, zpravidla z nerezové oceli, které jsou opatřeny úpravou povrchu pro snížení adheze nanášeného adheziva, aby neulpívalo na těrce. Nakonec následuje oddělení šablony od nanášeného adheziva. Oddělení šablony od adheziva musí mít dostatečnou rychlost, aby byl zachován tvar nanášeného obrazce. Důležitými parametry pro šablonový tisk jsou tedy tloušťka šablony, úhel těrky, který je většinou 60° , rychlost a tlak těrky. Na *Obr. 1.4* je jednoduše naznačen postup nanášení adheziva při šablonovém tisku. [5, 8]



Obr. 1.4: Postup při šablonovém tisku. (převzato z [5])

1.3.3 Nanášení plnou jehlou

Tato metoda je použitelná i v sériové výrobě, ale aktuální použití ve výrobcích, kde se nanáší adheziva, je menší než 10 %. Je však nejjednodušší metodou pro velkou produkci. Hlavní součástí tohoto typu nanášení je pole hrotů *Obr. 1.5*, které odpovídá požadovanému umístění součástek na substrátu. Pole hrotů se namočí do nádoby, v níž je nevytvrzené adhezivum. Na hrotech jehel se zachytí kapky adheziva. Poté se celé pole přesune do požadované polohy dle substrátu a adhezivum se po styku substrátu a pole hrotů přeneseme na požadovaná místa. Průměr jehly, tvar hrotu a viskozita nanášeného adheziva ovlivňuje množství přeneseného adheziva. Nevýhodou této metody je, že se nehodí pro malé výroby, kde často vyžadují jiné typy konfigurace pole hrotů. Mezi další nevýhody se řadí možnost kontaminace adheziva v otevřené nádobě, možné pohlcování vlhkosti z prostředí, potřeba nanášet na ploché substráty a náročné definování potřebného množství a tvaru nanášeného bodu. [1, 4]



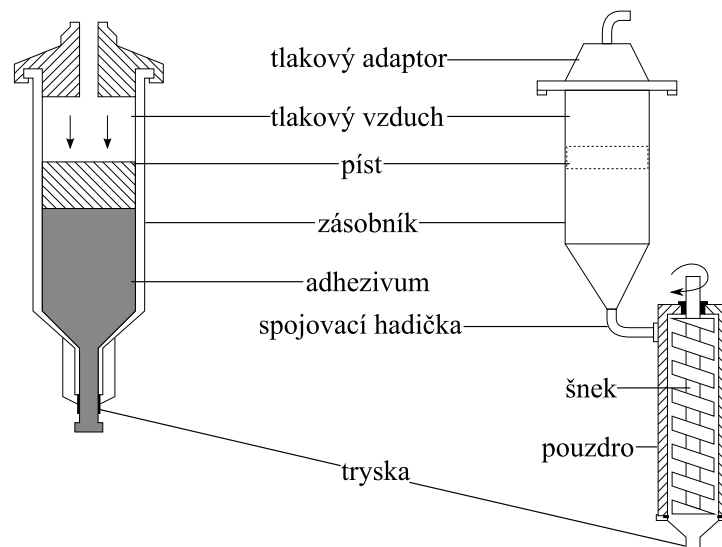
Obr. 1.5: Nanášení plnou jehlou. (převzato z [4])

1.3.4 Nanášení razítkem

Postup je téměř stejný jako u nanášení plnou jehlou v kapitole 1.3.3. Razítko je namočeno v rezervoáru s nevytvrzeným adhezivem a poté je přeneseno nad substrát. Po kontaktu zůstane na substrátu vzor daný razítkem. Množství materiálu přeneseného razítkem ovlivňuje tvar a velikost razítka, viskozita adheziva a hloubka ponoření razítka do rezervoáru s adhezivem. Výhodou razítka je možnost nanášet na větší plochy až $1,27 \text{ mm}^2$. Naopak limitací je nemožnost vytvářet tečky a tisknout na malé plochy. [1]

1.3.5 Dispenzing

Pro přesnější nanášení adheziv, jsou používána automatická nebo poloautomatická zařízení, využívající duté jehly různých velikostí pro vytlačování adheziva. Jedná se o kontaktní nanášení. Takováto zařízení, jsou schopna nanášet definovaná množství adheziva. Nejběžněji se používá zásobník ve tvaru injekční stříkačky, který se přesouvá manuálně nebo programově řízeným zařízením, schopným pohybovat se v osách x, y, z. Nejpoužívanějšími způsoby, jak vytlačovat adhezivum ze zásobníku viz *Obr. 1.6*, jsou metody využívající vzduchovou pumpu a šroubový systém. [4, 5]



Obr. 1.6: Nanášení adheziva dispenzerem. (převzato z [5])

Prvním způsobem je tlakové nanášení vzduchovou pumpou, kde je k vytlačování adheziva využíváno definovaných vzduchových pulzů, běžně $0,3 \text{ MPa}$ po dobu 50 až 200 ms. Nevýhodou tohoto způsobu vytlačování je možné zpoždění mezi samotným impulsem a vytlačení pasty. Dále je přenosovým médiem vzduch, který je měkký a po zahřátí značně mění svoje vlastnosti. Tyto nevýhody způsobují nepřesnosti v množství nanášeného adheziva na substrát. [4, 5]

Druhým způsobem je nanášení s využitím šroubového systému. Zásobník je pod stálým tlakem (např. 0,5 bar) a tím je zajištěno plnění hlavice, v níž je umístěno vřetenem se šnekem pohánějící adhezivum směrem k trysce. Parametry ovlivňující množství naneseného adheziva na substrát tímto způsobem jsou rychlost otáčení šroubového systému, doba jeho otáčení a kapacita hlavice. [4, 5]

U obou způsobů se používají stejné trysky, kterými většinou rozumíme duté mikrodávkovací jehly. Základními druhy jehel jsou celokovové a s plastovou objímkou. Velikost jehly musí být správně vybrána podle rozměrů tečky naneseného adheziva. Platí pravidlo, že by vnitřní průměr měl být alespoň 50% požadované tečky. V tabulce *Tab. 1.4* jsou uvedeny velikosti běžně používaných dávkovacích jehel. Pro velmi běžné součástky typu 0603 a 0805, se například hodí jehly o velikostech 25 a 23. [9]

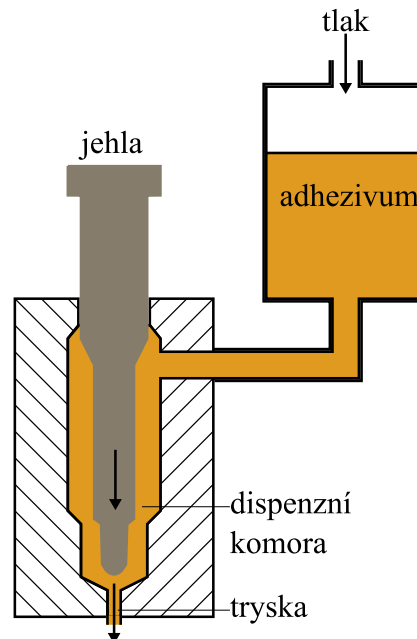
Tab. 1.4: Velikosti jehel. [9]

Velikost	Vnitřní průměr [mm]	Vnější průměr [mm]
18	0,84	1,24
19	0,68	1,06
20	0,58	0,88
21	0,51	0,81
22	0,41	0,71
23	0,33	0,63
25	0,25	0,55
27	0,20	0,40
30	0,25	0,30
32	0,10	0,225

1.3.6 Jet dispensing (Jetting)

Jedná se o bezkontaktní automatický dispensing. Automatizovaný přístroj na jetting se pohybuje pouze v osách x a y, díky bezkontaktnímu nanášení odpadá pohyb v ose z. Aktuální technologie na jetting využívá mechanické, elektrické nebo pneumatické aktuátory zakončené jehlou s kulovým hrotem. Rychlost pohybu aktuátoru řídí program, stejně jako tlak vyvinutý na adhezivum v nádobě. Jednoduché schéma na *Obr 1.7* znázorňuje jehlu s kulatým hrotem, trysku a nádobu s adhezivem. Tryska se díky tlaku naplní adhezivem a pohybem jehly směrem k trysce trysku vyprázdní a dojde k nanesení kapky adheziva na požadované místo na substrátu. V dispenzní komoře dochází většinou k předehřívání materiálu, aby byl zaručen

stejný objem naneseného adheziva a také aby byla dodržena požadovaná viskozita pro jetting. Množství naneseného adheziva je ovlivněno rozměry trysky, tlakem a frekvencí jehly. [10]



Obr. 1.7: Schéma přístroje na jetting. (převzato z [11])

V dnešní době je jetting ve velkých provozech využíván častěji, než dispenzing kontaktní, využívající duté jehly. Jetting má totiž několik velmi významných výhod:

- Nanášení adheziva do menších prostorů, než je možné kontaktním dispenzingem.
- Možnost nanášet širokou škálu tekutin o různých viskozitách.
- Nejrychlejší metoda nanášení, proto se hodí pro produkci ve velkých objemech.
- Schopnost měnit velikost a tvar nanášených obrazců.

Jetting nachází využití v montáži a pouzdření mobilních telefonů, procesorů, MEMS zařízení, hybridních obvodů a v neposlední řadě flexibilních obvodů. [10]

2 Přehled komerčně dostupných elektricky vodivých adheziv

Obsahem této kapitoly je vypracovaný seznam elektricky vodivých adheziv dostupných na trhu. Tento seznam není omezen pouze na evropský trh, značnou část také pokrývají americké společnosti. Velkým problémem je dostupnost informací o jednotlivých produktech. Každá společnost udává často jiné vlastnosti. Pro přehlednost byly vybrány základní vlastnosti, které se objevují u většiny společností, aby bylo docíleno přehlednosti seznamu. Vybranými vlastnostmi jsou:

- Počet složek.
- Typ vytvrzení. (Pokud jsou všechny uvedené adheziva tvrzená teplem, tak není uvedeno.)
- Teplota vytvrzení. (Jsou uvedeny základní doporučené teploty, většinou jsou udávány mnohé alternativy.)
- Doba vytvrzení. (V ohledu na alternativy teploty vytvrzení, doby vytvrzení s nimi souvisí.)
- Viskozita. (Pokud je zde uvedeno v tabulce „pasta“, tak výrobce neudává přesnou viskozitu, pouze charakter materiálu.)
- Rezistivita.
- Teplotní odolnost.
- Skladovatelnost.
- Doba zpracovatelnosti.

Tato diplomová práce cílí na adheziva vhodná pro flexibilní substráty, ale seznamy jsou vypracovány pro všechna vodivá adheziva. Adheziva, kde byla výrobcem uvedena informace o vhodnosti pro flexibilní aplikace, jsou v seznamech vyznačena šedým podbarvením. Každá dostupná společnost má vlastní podkapitulu a tabulku adheziv.

2.1 Henkel

Henkel je největší celosvětový dodavatel adheziv. Hlavní značkou pro veškerá elektricky vodivá adheziva je Loctite. Tato značka shrnuje několik značek, které jsou specifické svým konkrétním použitím. Jedná se o Ablestik, Hysol, Eccobond, Stycast a E&C, která nahrazuje značku Acheson. [13]

Tab. 2.1: Henkel vodivá adheziva. [13]

Název	Počet složek	Teplota vytvrzení [°C]	Doba vytvrzení	Viskozita [cPS (mPa·s)]	Rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Skladovatelnost [25 °C]	Doba zpracovatelnosti [25 °C]
Acheson® Electrodag 5915	1	177	10 min.	120000	0.0005	12 měsíců při - 20 °C	
Hysol® Eccobond C850-6	1	150	30 min.	100000	0.00094	6 měsíců při 0 °C	12 hod.
Hysol® Eccobond C990	1	270	20 sek.	21000 - 60000	0.001	5 měsíců při 0 °C	21 dnů
Hysol® Eccobond CA3152	1	130	10 sek.	17000	< 0.01	6 měsíců při - 20 °C	2 dny
Hysol® Eccobond CE3103	1	125	5 min.	50000	0.0007	6 měsíců při - 40 °C	3 dny
Hysol® Eccobond CE3520-3	1	150	30 min.	73000	0.02	6 měsíců při -18 °C	3 dny
Hysol® Eccobond CE3535	1	150	60 min.	40000 - 60000	0.0003	4 měsíců při - 40 °C	6 hod.
Hysol® QMI516IE		90	60 min.	15000	0.0015	12 měsíců při - 20 °C	6 hod.
Hysol® QMI529HT		185	60 sek.	18500	0.00004	12 měsíců při - 40 °C	24 hod.
Loctite 5421	1	25	72 hod.		< 0.01	3 měsíců při -20 °C	
Loctite Ablestik™ 2958	2	150	2 min.	40000	1000	6 měsíců	4 hod.
Loctite Ablestik™ 3888	2	65	2 hod.		< 0.001	6 měsíců	90 min.
Loctite Ablestik™ 56C-CAT 11 KIT	2	120	60 min.	pasta	0.0002	6 měsíců	4 hod.
Loctite Ablestik™ 84-1LMISR4		175	60 min.	8000	0.0001	12 měsíců při - 40 °C	18 hod.
Loctite Ablestik™ C850-6L	1	120	60 min.	80000	0.00094	6 měsíců při - 20 °C	12 hod.
Loctite Ablestik™ CA 3150	1	130	10 sek.	13000	< 0.01	6 měsíců při - 20 °C	2 dny
Loctite Ablestik™ CA3556HF	1	110	60 sek.	30000	0.0025	6 měsíců při -18 °C	2 dny
Loctite Ablestik™ CE 3103WLV		150	3 min.	15000 - 25000	0.0008	12 měsíců při - 40 °C	3 dny
Loctite Ablestik™ CE 3104WXL		150	3 min.	65000	0.0007	12 měsíců při - 40 °C	3 dny
Loctite Ablestik™ CE 3126		170	8 sek.	16300	anizotropní	6 měsíců při - 40 °C	2 dny
Loctite Ablestik™ CE3920	1	150	5 min.	26100	0.00033	6 měsíců při - 40 °C	

2.2 Panacol

Společnost Panacol je mezinárodním dodavatelem na rostoucím trhu průmyslových adheziv, s rozsáhlou nabídkou produktů. Značkou používanou Panacolem pro elektricky vodivá adheziva je Elecolit. [14]

Tab. 2.2: Panacol vodivá adheziva. [14]

Název	Počet složek	Typ vytvrzení	Teplota vytvrzení [°C]	Doba vytvrzení	Viskozita [cPS (mPa·s)]	Rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Teplotní odolnost [°C]	Skladovatelnost [25 °C]	Doba zpracovatelnosti [25 °C]
Elecolit® 3012	1	teplem	150	10 min.		0.013	od -40 do 200	6 měsíců při 5 °C	
Elecolit® 3043	1	teplem	150	10 min.	4000 - 5000	0.015	od -40 do 180	6 měsíců při 5 °C	
Elecolit® 3653	1	teplem	150	5 min.	8000 - 10000	0.005	od -40 do 180	6 měsíců při 5 °C	
Elecolit® 3655	1	teplem	150	30 min.	15000 - 45000	0.0003	od -40 do 180	6 měsíců při 5 °C	
			120	60 min.					
Elecolit® 3025	2	teplem	120	15 min.		0.05	od -40 do 150	6 měsíců při 5 °C	120 min.
			25	24 hod.					
Elecolit® 3036	2	teplem	120	15 min.		0.1	od -40 do 150	6 měsíců při 5 °C	120 min.
			25	24 hod.					
Elecolit® 323	2	teplem	150	4 min.	45000	0.0002	od -60 do 175	9 měsíců	96 hod.
Elecolit® 325	2	teplem	150	5 min.		0.0003	od -40 do 150	9 měsíců	120 min.
Elecolit® 336	2	teplem	150	5 min.		0.001	od -40 do 150	9 měsíců	120 min.
Elecolit® 327	1	teplem	150	1 hod.	8500	0.0001	od -40 do 275	9 měsíců	
Elecolit® 342	1	teplem	120	10 min.	1000 - 2000	0.001	od -40 do 150	6 měsíců	
Elecolit® 414	1	teplem	150	5 min.	20000 - 25000	0.0005	od -55 do 200	6 měsíců	
Elecolit® 3063	1	UV		15 sek.	tixotropní	anizotropní	od -40 do 150	6 měsíců při 5 °C	
Elecolit® 3064	1	UV		15 sek.	tixotropní	anizotropní	od -40 do 150	6 měsíců při 5 °C	
Elecolit® 3065	1	UV		15 sek.	tixotropní	anizotropní	od -40 do 150	6 měsíců při 5 °C	
Elecolit® 3661	1	teplem	150	10 min.	220 - 250	0.005	od -40 do 180	3 měsíců při 5 °C	14 dnů

2.3 Master Bond

Master Bond je americká společnost zaměřující se od založení na vývoj epoxidů, silikonů, polyuretanů, polysulfidů a speciálními adhezivy např. UV vytvrditelnými. [34]

Tab. 2.3: Master Bond vodivá adheziva. [15]

Název	Počet složek	Teplota vytvrzení [°C]	Doba vytvrzení	Viskozita [cPS (mPa·s)]	Rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Teplotní odolnost [°C]	Skladovatelnost [25 °C]	Doba zpracovatelnosti [25 °C]
Supreme 10HTS	1	135 - 150	45 min.	pasta	0.0001	od -269 do 204	3 měsíce	
EP21TD CS	2	100	1 - 2 hod.	pasta	0.001	od -269 do 135	6 měsíců	30 - 40 min.
		25	24 - 36 hod.					
EP79	2	100	2 hod.	pasta	0.01	od -269 do 121	6 měsíců	45 - 60 min.
		25	24 - 48 hod.					
MasterSil 705C	1	25	3 - 7 min.	pasta	50 - 100	od -51 do 204	6 měsíců	
MasterSil 705S	1	25	15 - 20 min.	pasta	0.01	od -51 do 204	3 měsíce	

2.4 MG Chemicals

MG Chemicals je americká společnost vyrábějící a prodávající chemické produkty pro elektronický průmysl. Mezi její produkty patří odmašťovadla, čisticí prostředky, ochranné nátěry, pájky, epoxidy, silikony a v neposlední řadě adheziva. [16]

Tab. 2.4: MG Chemicals vodivá adheziva. [16]

Název	Počet složek	Teplota vytvrzení [°C]	Doba vytvrzení	Viskozita [cPS (mPa·s)]	Rezistivita [$\Omega\cdot\text{cm}$]	Teplotní odolnost [°C]	Skladovatelnost [25 °C]	Doba zpracovatelnosti [25 °C]
8330	2	25	20 hod.	pasta	0.001	od -50 do 145	3 roky	10 min.
		65	20 min.					
8330S	2	25	96 hod.	pasta	0.0007	od -40 do 150	3 roky	4 - 5 hod.
		65	2 hod.					
		100	1 hod.					
8331	2	25	5 hod.	pasta	0.0174	od -55 do 150	3 roky	10 min.
		65	15 min.					
		90	12 min.					
		125	7 min.					
8331S	2	25	96 hod.	pasta	0.006	od -40 do 150	3 roky	4 - 5 hod.
		65	2 hod.					
		80	1 hod.					
		100	50 min.					

2.5 Chomerics

Společnost Chomerics je globální dodavatel stínění proti elektromagnetickému rušení, tepelně vodivých materiálů, adheziv a optických výrobků. Chomerics je divizí společnosti Parker Hannifin Corporation. [21]

Tab. 2.5: Chomerics vodivá adheziva. [21]

Název	Počet složek	Teplota vytvrzení [°C]	Doba vytvrzení	Rezistivita [$\Omega\cdot\text{cm}$]	Teplotní odolnost [°C]	Skladovatelnost [25 °C]	Doba zpracovatelnosti [25 °C]
Cho-Bond 584-29	2	113	15 min.	0.002	od -55 do 125	12 měsíců	30 min.
		25	24 hod.				
Cho-Bond 584-208	2	100	45 min.	0.002	od -62 do 100	9 měsíců	1 hod.
		25	24 hod.				
Cho-Bond 580-208	2	100	45 min.	0.005	od -62 do 99	9 měsíců	1 hod.
		25	24 hod.				
Tecknit 8116	2	100	30 min.	0.002	od -62 do 100	15 měsíců	45 min.
		25	24 hod.				
Cho-Bond 360-20	2	115	15 min.	0.005	od -62 do 100	9 měsíců	1 hod.
		25	24 hod.				
Cho-Bond 1030	1	25	1 týden	0.05	od -55 do 200	6 měsíců	30 min.
Cho-Bond 1029	2	121	30 min.	0.06	od -55 do 125	6 měsíců	2 hod.
		25	1 týden				

2.6 Creative Materials

Creative Materials je společnost se sídlem v Americe, která vyvíjí a distribuuje chemické produkty zákazníkům po celém světě. Hlavní objekt zájmu je zaměřen na elektricky vodivá adheziva, inkousty a nátěry. Mimo jiné nabízí tepelně vodivé výrobky a hlavními zákazníky jsou společnosti zaměřené na výpočetní techniku. [17]

Tab. 2.6: Creative Materials vodivá adheziva. [17]

Název	Počet složek	Teplota vytvrzení [°C]	Doba vytvrzení	Viskozita [cPS (mPa·s)]	Rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Teplotní odolnost [°C]	Skladovatelnost [25 °C]	Doba zpracovatelnosti [25 °C]
118-15A/B	2	80	90 min.	pasta	0.0001 - 0.0004	od -55 do 200	1 rok	5 dnů
		120	15 min.					
		150	5 min.					
		175	45 sek.					
GPC 251	2	25	24 hod.	pasta	0.005		1 rok	60 min.
		120	5 min.		0.0002			
124-08 A/B	2	80	90 min.	pasta	0.0002 - 0.0004	od -55 do 200	1 rok	4 dny
		120	15 min.					
		150	5min					
		175	45 sek.					
GPC 251A/B 2612	2	25	24 hod.	pasta	0.005		1 rok	60 min.
		120	5 min.		0.0002			
124-08LVC	1	80	90 min.	pasta	0.0002 - 0.0004	od -55 do 200	4 dny	
		120	15 min.				2 měsíce při -10 °C	
		150	5 min.				6 měsíců při -40 °C	
		175	45 sek.					
102-32	1	160	5 - 10 min.	pasta	0.0001	od -70 do 260	6 měsíců	
							9 měsíců při 5 °C	
							12 měsíců při -10 °C	
118-06	1	150	60 min.	11 000	0.0008	od -55 do 230	2 měsíce	
		175	30 min.				6 měsíců při -10 °C	
		200	15 min.					
125-22	1	160	60 min.	25 000	0.001	od -55 do 230	2 měsíce	
		175	30 min.				6 měsíců při -10 °C	
		200	15 min.					
122-38(SD)	1	150	10 min.	85 000	0.0002	od -55 do 230	48 hod.	
		125	15 min.				6 měsíců při -10 °C	

2.7 Aremco

Aremco je americká společnost, která se zaměřuje na dvě oblasti. První z oblastí jsou materiály, mezi které patří keramika, adheziva, nátěry a tmely. Druhou oblastí zaměření jsou zařízení pro elektroniku, zpracování keramiky a hutní průmysl. [18]

Tab. 2.7: Aremco vodivá adheziva. [18]

Název	Počet složek	Teplota vytvrzení [°C]	Doba vytvrzení	Viskozita [cPS (mPa·s)]	Rezistivita [$\Omega\cdot\text{cm}$]	Teplotní odolnost (od -55 °C do) [°C]	Skladovatelnost [25 °C]	Doba zpracovatelnosti [25 °C]
Aremco-Bond™ 525	1	150	2 hod.	pasta	0.01	170	6 měsíců	
		120	6 hod.					
Aremco-Bond™ 556	2	90	2 hod.	37000	0.0009	170	6 měsíců	1 hod.
		25	24 hod.					
Aremco-Bond™ 556-LV	2	90	2 hod.	5000	0.0008	170	6 měsíců	1 hod.
		25	24 hod.					
Aremco-Bond™ 556-HT-HC	2	90	2 hod.	42000	<0.0001	200	6 měsíců	48 hod.
		120	1 hod.					
Aremco-Bond™ 556-HT-SP	2	180	1 hod.	40000	<0.0004	230	6 měsíců	> 48 hod.
		150	2 hod.					
Aremco-Bond™ 614	2	40	2 hod.	105000	0.025	180	6 měsíců	3/4 hod.
		90	1 hod.					
		25	8 hod.					
Aremco-Bond™ 616	2	40	2 hod.	55000	0.005	180	6 měsíců	3/4 hod.
		90	1 hod.					
		25	8 hod.					
Pyro-Duct™ 597-A	1	25 °C 2 hod. + 90 °C 2 hod.		pasta	0.0002	927	6 měsíců	
Pyro-Duct™ 597-C	1	25 °C 1 hod. + 250 °C 0.5 hod.		400 - 800	0.0002	927	6 měsíců	

2.8 Resinlab

Resinlab je americká společnost specializující se na zakázkovou výrobu pryskyřic. Resinlab poskytuje výrobky na zakázku do téměř všech průmyslových odvětví.

Tab. 2.8: Resinlab vodivá adheziva. [19]

Název	Počet složek	Teplota vytvrzení [°C]	Doba vytvrzení	Viskozita [cPS (mPa·s)]	Rezistivita [$\Omega\cdot\text{cm}$]	Teplotní odolnost [°C]	Skladovatelnost [25 °C]	Doba zpracovatelnosti [25 °C]
SEC 1222	2	25	8 hod.	318500	0.003	od -40 do 150	6 měsíců	45 min.
		25	24 hod.		0.0014			
		60	1 hod.		0.00089			
SEC 1233	2	25	24 hod.	172000	0.0016	od -40 do 150		60 min.
		25	96 hod.		0.0009			
		60	1 hod.		0.0003			
SEC 1244	2	100	1 hod.	234000	0.0006	od -40 do 150		> 24 hod.
		150	5 min.					

2.9 Polytec PT

Polytec PT je společnost se sídlem v Německu, která vyvíjí, vyrábí a distribuuje speciální adheziva pro aplikace v elektronice, elektrotechnice a automobilovém průmyslu. Tato firma se také zaměřuje na solární průmysl a výrobu čipových karet. [20]

Tab. 2.9: Polytec PT vodivá adheziva. [20]

Název	Počet složek	Teplota vytvrzení [°C]	Doba vytvrzení	Viskozita [cPS (mPa·s)]	Rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Teplotní odolnost [°C]	Skladovatelnost [25 °C]	Doba zpracovatelnosti [25 °C]
EC 101	2	95	60 min.	12000	0.0003	od -55 do 200	1 rok	2 dny
		120	15 min.					
		150	10 min.					
		180	40 sek.					
EC 101-L-ATC	2	95	60 min.	7500	0.0002	od -55 do 200	1 rok	2 dny
		150	10 min.					
		180	40 sek.					
EC 112-L	2	95	60 min.	7500	0.0002	od -55 do 200	1 rok	2 dny
		150	10 min.					
		180	40 sek.					
EC 151-L	2	95	60 min.	4800	0.0003	od -55 do 200	1 rok	2 dny
		150	10 min.					
		180	40 sek.					
EC 201	2	150	30 min.	12000	0.0002	od -55 do 150	1 rok	45 min.
EC 235	2	60	60 min.	13200	100	od -55 do 175	1 rok	45 min.
EC 262-2	2	120	4 hod.	25000	< 4	od -55 do 180	1 rok	6 - 8 hod.
		150	30 min.					
EC 275	2	95	60 min.	15500	0.0009	od -55 do 200	1 rok	2 dny
		120	30 min.					
		150	10 min.					
		180	40 sek.					
PU 1000	1	25	10 min.	6000	0.003	od -55 do 140	6 měsíců při 5 °C	10 min. - 4 hod.

2.10 Protavic America

Protavic America je vlastněna francouzskou společností Protex International se sídlem v Paříži. Protavic America je celosvětový výrobce vodivých, nevodivých adheziv, pryskyřic k zalévání a zapouzdření, povlaků, impregnací a bez silikonových tepelně vodivých past. [22]

Tab. 2.10: Protavic America vodivá adheziva. [22]

Název	Počet složek	Teplota vytvrzení [°C]	Doba vytvrzení	Viskozita [cPS (mPa·s)]	Rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Skladovatelnost [25 °C]	Doba zpracovatelnosti [25 °C]
ACE - 10131	1	200	15 - 30 sek.	2000	<0.0003	6 měsíců při -20 °C	48 hod.
		150	3 - 6 min.				
		75	60 - 90 min.				
ACE - 60705	1	150	50 - 60 sek.	50 x 10 ⁵	<0.0003	1 měsíc při -25 °C	8 hod.
		100	10 - 20 min.				
		60	90 - 120 min.				
ACE - 34560	1	25	8 hod.	30 x 10 ⁶	0.015	12 měsíců při -40 °C	1 týden
		65	30 min.				
ACE-56153	2	22	24 hod.		<0.01	12 měsíců	1 - 2 hod.
		80	1 hod.				
		125	15 min.				
ACE-56155	2	25	24 - 72 hod.	30000	50 - 150	12 měsíců	40 - 50 min.
		30 min. na 100 °C následně 60 min. na 75 °C					
		125	5 min.				
ACE 30510	1	200	60 sek.	20000 (± 10000)	<0.5	6 měsíců při -40 °C	2 dny
		180	5 - 10 min.				
		150	60 - 120 min				
ACH 20120	1	175	30 min.	9000 (± 1500)	0.00003	12 měsíců při -20 °C	> dny
		230	2 min.				
ACE - 34034-X2	1	175	45 min.	11000	0.0001	12 měsíců při -40 °C	24 hod.
ACH - 30200	1	175	30 min.	9000 (± 1500)	0.00001	6 měsíců při -20 °C	1 týden

2.11 Merco

Merco je americká společnost specializující se na výrobu epoxidů, uretanů, silikonů a solárních buněk. [23]

Tab. 2.11: Merco vodivá adheziva. [23]

Název	Počet složek	Teplota vytvrzení [°C]	Doba vytvrzení	Viskozita [cPS (mPa·s)]	Rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Teplotní odolnost [°C]	Skladovatelnost [25 °C]	Doba zpracovatelnosti [25 °C]
Metaduct 1201	2	25	24 hod.	tixotropní	<0.1	od -60 do 180		90 - 120 min.
		100	85 min.					
		150	15 min.					
Metaduct 1202	2	25	24 hod.	50 x 10 ⁵	0.001	od -55 do 170	6 měsíců	1 hod.
		100	75 min.					
		150	15 min.					
Metaduct 1225 SN-736	2	25	8 hod.	30 x 10 ⁶	0.015		6 měsíců	1 hod.
		65	30 min.					
Metaduct 1225 SN-742	2	25	8 hod.	50000	0.018	od -50 do 150	6 měsíců	120 min.
		65	30 min.					
Metaduct 1206	1	150	60 min.	tixotropní	0.05	od -65 do 185	4 měsíce	
		165	45 min.					
Metaduct 1216	1	12 min. na 165 °C následně 2 - 3 min. na 260 °C		tixotropní	0.08	od -60 do 175	4 měsíce	
Metaduct 1216-1	1	6 min. na 165 °C následně 2 - 3 min. na 260 °C		tixotropní	0.0013	od -70 do 250	3 měsíce	
Metaduct 1216-2	1	4 min. na 165 °C následně 2 - 3 min. na 260 °C		tixotropní	0.00018	od -65 do 225	3 měsíce	
Metaduct 1240	1	150	15 - 30 min.	450 x 10 ³	0.0001	od -55 do 175	3 měsíce	
		125	40 - 70 min.					

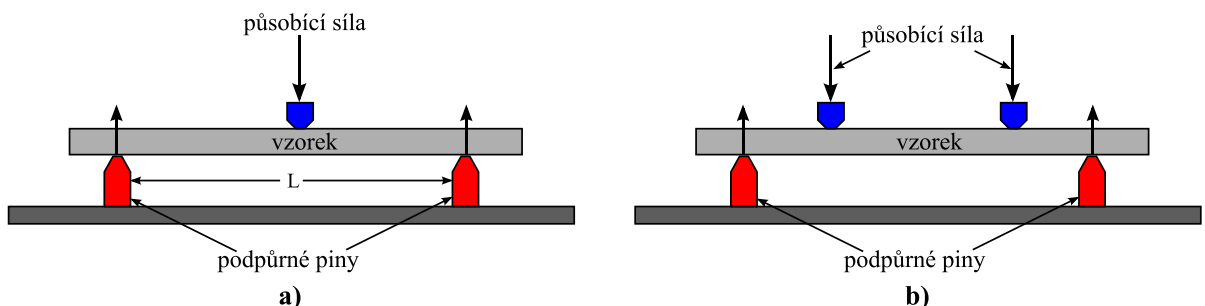
3 Přehled standardů a metod v oblasti testování kvality kontaktování komponent na flexibilní substráty

Velkým problémem v oblasti testování kvality kontaktování na flexibilní substráty, je absence standardů. Proto bude v této části uvedeno několik metod a standardů, které jsou potenciálně vhodné pro testování kvality kontaktování na flexibilní substráty. Ideálně by měl existovat standard či testovací metoda, která by popisovala test, při kterém by docházelo k definovanému ohybu substrátu. Metody popisující testování flexibilních či částečně flexibilních substrátů, jsou obsaženy v ASTM D790, ISO 178:2010 a IPC-TM-650. Avšak tyto standardy neuvádějí konkrétní vzor pro osazení součástek nebo způsob osazení. Pokud by bylo možné tyto konkrétní standardy modifikovat pro ohybovou zkoušku adheziva na substrátu s osazenými součástkami, potom by se dala snadno porovnat jednotlivá adheziva v ohledu vhodnosti použití pro flexibilní substráty.

Dalšími uvedenými standardy v této kapitole budou metody používané pro adheziva na rigidních substrátech. Vhodnost jejich použití pro testování adheziv na flexibilních substrátech je přijatelná.

3.1 ASTM D790-10, ISO 178:2010

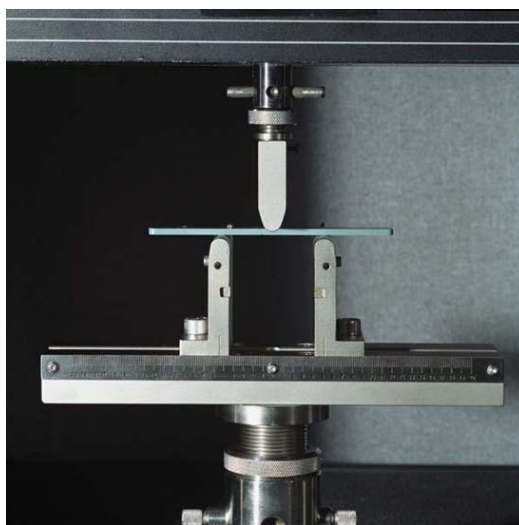
Standard pro ohybové vlastnosti tvrzených, netvrzených plastů a elektrických izolačních materiálů je také uveden jako ISO 178:2010. Obsahem standardu jsou dva testovací postupy pro třibodovou metodu na *Obr. 3.1 a)*. Čtyřbodová metoda zobrazená na *Obr. 3.1b)* je obsažena ve standardu ASTM 6272 a ve velké míře koresponduje s ASTM 790-10 a je doporučeno jí použít pro materiály, které neselžou při testování třibodovou metodou. [1, 24]



Obr. 3.1: a) Třibodová, b) Čtyřbodová metoda. (převzato z [25])

Testovací postupy v ASTM 790-10 se liší pouze mírou namáhání. Třibodová metoda obsahuje dva podpůrné piny, ohyb vzorku je vyvolán jedním bodem. Tyto zkušební metody

jsou obecně platné pro pevné a částečně pevné materiály. Základním rozdílem mezi těmito metodami je místo maximálního ohybového momentu. Maximální moment ohybu se u třibodové metody nachází přesně v místě působící síly. U čtyřbodové metody je maximálním momentem zatížen celý prostor mezi působícími silami. Parametry pro tuto metodu jsou rozpětí L mezi podpůrnými piny znázorněné na *Obr. 3.1*, rychlost zatěžování a maximální průhyb. Tyto parametry jsou založeny na tloušťce testovaného vzorku a jsou definovány jinak standardy ASTM D790-10 a ISO 178:2010. U ASTM se test zastaví, když dojde k 5 % poměrnému prodloužení tloušťky vzorku nebo pokud se vzorek zničí ještě před předepsaným 5% poměrným prodloužením. U ISO je předepsané maximální poměrné prodloužení tloušťky o 3,5 %, ale tato hodnota se pouze zaznamená. Test pokračuje, dokud se vzorek nezničí. Přípravek pro testování obou metod, jak ISO, tak ASTM je na *Obr. 3.2*. Z naměřených dat lze určit ohybové napětí v kluzu, ohybové poměrné prodloužení v kluzu, ohybové napětí při zničení, ohybové poměrné prodloužení při zničení, ohybové napětí při 3,5% (ISO) nebo 5% (ASTM) vychýlení tloušťky a modul pružnosti. Samozřejmě lze z dat sestrojít křivky mechanického napětí a poměrného prodloužení neboli křivku deformace. [24, 26]



Obr. 3.2: Zařízení pro testování ASTM D790-10 a ISO 178:2010. (převzato z [26])

3.2 Ostatní standardy pro mechanickou pevnost

V této kapitole jsou uvedeny ostatní vhodné standardy, které jsou potenciálně vhodné pro testování adheziv na flexibilních substrátech. Samozřejmě by bylo třeba některé z nich náležitě pozměnit. Mezi tyto standardy patří:

- ASTM D638, ČSN EN ISO 527. Standardní zkušební metoda pro tahové vlastnosti plastů.
- ASTM D1002. Standard pro určení pevnosti adheziva ve smyku (kov-adhezivum-

kov).

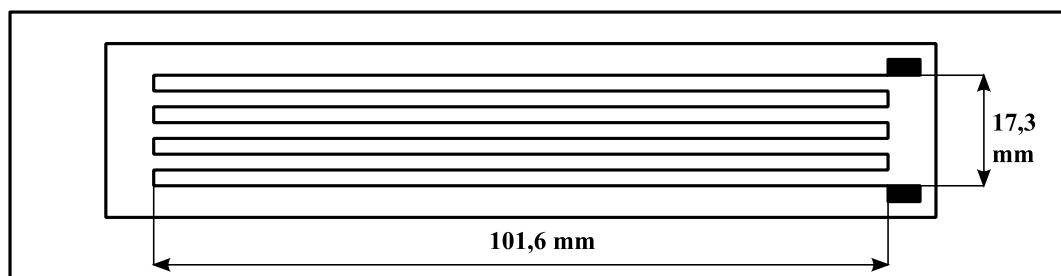
- MIL-STD-883, Method 2019. Pevnost ve smyku nakontaktované součástky na substrátu.
- MIL-STD-883, Method 2031. Odtrh nakontaktované součástky na substrátu.

4 Příprava experimentu

Jelikož neexistuje, žádný standard, který by definoval testování kontaktovaných součástek adhezivem na flexibilní substrát ve smyslu reálného mechanického namáhání, čili test ohybem, byla jediná možnost a to vybrat stávající standard pro testování ohybu substrátů a tento standard náležitě upravit pro zamýšlený experiment. Na výběr byly dva standardy, ASTM D790, který je též reprezentován ISO 178 a IPC-TM-650. Jelikož ZČU vlastní zařízení pro testování metodou popsanou IPC-TM-650, tak byl zvolen tento standard pro testování kvality kontaktování součástek na flexibilní substráty pomocí vodivého adheziva.

4.1 Standard IPC-TM-650

Tento standard popisuje metodu, která má za cíl určit, kolik ohybů vydrží flexibilní substrát, na kterém jsou vyleptané vodivé cesty. Testovací vzorek by měl tedy obsahovat vyleptané cesty v požadovaném vzoru, který je na *Obr. 4.1*. [27]



Obr. 4.1: Testovací vzorek pro odolnost v ohybu podle IPC-TM-650. (Převzato z [27])

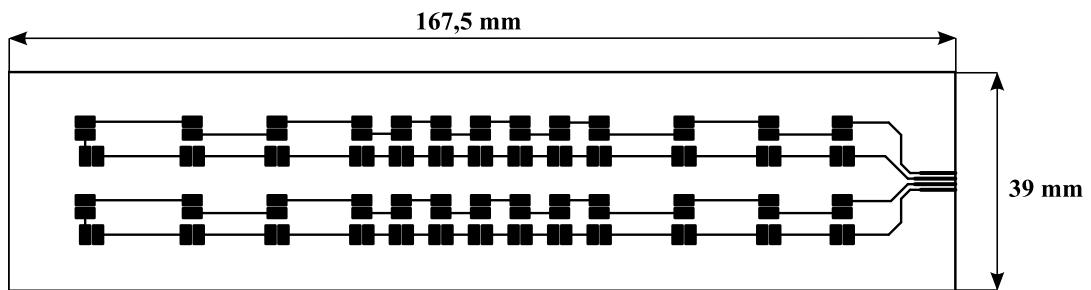
Vyrobené vzorky by měly před samotným testováním projít vizuální kontrolou, aby se objevily vady, které mohly vzniknout během výroby (jako například díry v motivu nebo škrábance). Tyto vady by ovlivnily samotné testování. Vzorek by při upnutí do testovacího zařízení měl mít v místě největšího ohybu, čili uprostřed vzorku, prohnutí $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Na plošky by měly být nakontaktovány dráty pro měření odporu. Při samotném měření by rychlost ohýbání vzorku neměla překročit 10 cyklů za minutu. V místě maximálního ohybu by se měl vzorek dostat do úrovně $25 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ od počáteční polohy. Test pokračuje do doby, než dojde k přerušení cesty na vzorku. [27]

4.2 Modifikace IPC-TM-650

Pro kontaktování součástek na flexibilní substrát pomocí adheziva muselo dojít k jistým modifikacím stávajícího standardu IPC-TM-650 a též k modifikaci testovacího vzorku. Byla

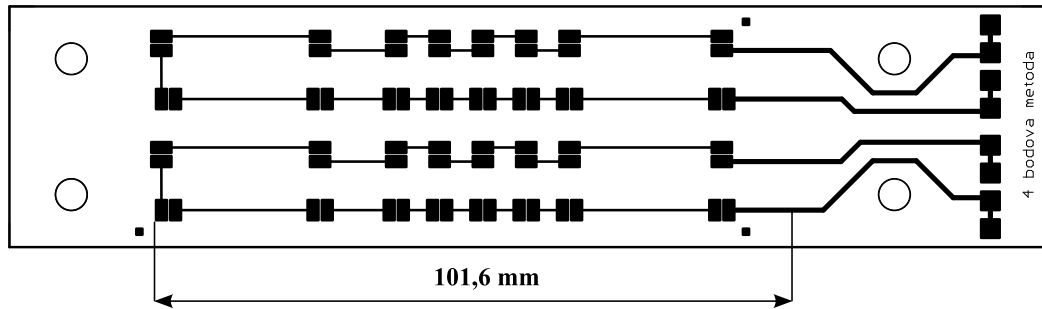
zachována rychlost ohýbání vzorku, tedy 6 s na jeden ohyb. Velikost prohnutí byla též zachována, $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ v počáteční poloze a $25 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ v poloze maximálního ohybu. Vzor vodivých cest byl kompletně změněn kvůli kontaktování součástek.

Pro kontaktování bylo vybráno adhezivum od společnosti Henkel, konkrétně typ XCA 3556 HF, podrobnější popis adheziva je v kapitole 4.3. Jako součástky pro osazování byly vybrány nulové rezistory v pouzdře 0805. Původní návrh testovacího vzorku, který byl pro účely této práce vytvořen v prostředí návrhového systému Eagle, je zobrazen na *Obr. 4.2*. Tento návrh obsahoval 52 součástek a byl připravený pro konektor Molex 52207-0460Socket ZIF, 1 mm, 4cesty. Na jednom vzorku byly vytvořeny dva totožné sériové obvody, na kterých jsou připravené plošky pro kontaktování SMT součástek ve dvou směrech. Nebyla zachována délka vzoru na substrátu podle standardu IPC-TM-650.



Obr. 4.2: Původní návrh testovacího vzorku.

Od vzorku na *Obr. 4.2* bylo z části opuštěno, hlavním důvodem bylo velké množství součástek. Jelikož bylo zamýšleno ruční osazování, tak by takovýto vzor trvalo velmi dlouho osadit. Z tohoto důvodu byl navržen nový motiv určený pro nižší počet součástek. U vzorku bylo zachováno stejného rozložení součástek jako u předchozího motivu, aby tato změna neměla žádný vliv na výsledky testování. Počet součástek byl zredukován z 52 na 32. Další změna proběhla v záměně konektoru Molex za kontaktní plošky, na které se kontaktovaly měděné dráty. Pro každou vodivou cestu byly vytvořeny čtyři plošky pro kontaktování z důvodu online měření odporu čtyřbodovou metodou. Vodivý vzor byl též rozšířen kvůli rovnoměrnějšímu rozložení součástek v šířce vzorku a hlavně byla jeho délka předimenzována podle standardu IPC-TM-650 na 101,6 mm. Ve vzorku byly vytvořeny díry pro upnutí do přípravku na ohýbání, byly doplněny tři čtvercové body kvůli šabloně pro šablonový tisk a také zvýraznění rohů pro lepší orientaci při stříhání jednotlivých vzorků při výrobě. Druhý návrh vzorku je na *Obr. 4.3*. Tyto vzorky byly vyrobeny a použity pro testování.



Obr. 4.3: Konečný vzorek.

Pro tento vzorek byla vyhotovena šablona určená k nanesení adheziva šablonovým tiskem. Podrobnější informace o výběru metody a parametrů šablony jsou popsány v následující kapitole.

4.3 Výběr metody depozice

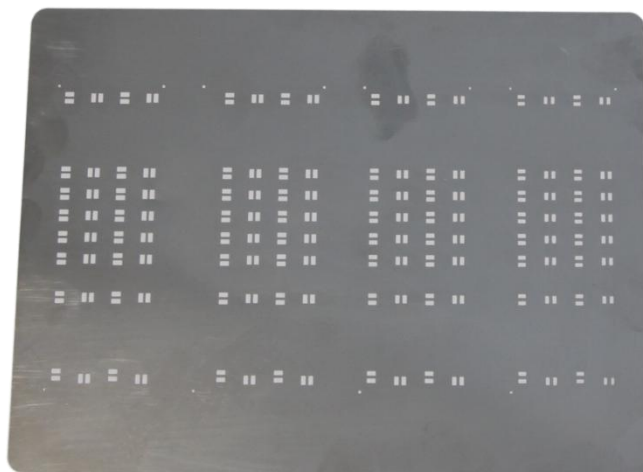
Jako metoda depozice byl zvolen šablonový tisk. Jelikož bylo třeba vybrat metodu dostupnou na ZČU, tak se výběr zúžil na dvě metody deponování adheziva. Jednou z možností bylo nanést adhezivum pomocí disperzeru zobrazeného na Obr. 4.4. Tato metoda je ovšem nevýhodná z důvodu ne zcela přesného dávkování na jednotlivé plošky. Tím by nebylo možné zajistit požadovanou opakovatelnost, jelikož testovací vzorek obsahuje kontaktovací plošky pro osazení 32 součástek, tzn. 64 plošek pro nanesení adheziva. Z tohoto důvodu byla zvolena velice dostupná metoda šablonový tisk. Dalším důvodem této volby byla relativně vysoká viskozita adheziva. Disperzerem by bylo obtížné nanášet adhezivum s tak vysokou viskozitou. Vybrané adhezivum bude popsáno v následující kapitole.



Obr. 4.4: Disperzer. (převzato z [28])

Vyhotovená šablona na Obr. 4.5 má následující parametry:

- Tloušťka 80 μm .
- Rozměry 20 x 15 cm.
- 4 vzory na šabloně, redukce plošek o 5, 10, 15, 20 % dle délky a šířky plošek na testovacím vzorku.



Obr. 4.5: Šablona.

4.4 Vybrané adhezivum XCA 3556 HF

Toto ECA je původně od společnosti Emerson&Cuming. Tuto společnost však v roce 2008 zakoupila společnost Henkel. Toto adhezivum bylo vybráno na základě doporučení od společnosti Henkel. V katalogovém listu je uvedeno, že se jedná o adhezivum s vysokou flexibilitou, je elektricky vodivé a rychle vytvrditelné při nízkých teplotách, čili vhodné pro substráty citlivé na vysoké teploty. Jedná se o jednosložkové adhezivum. Vodivost adheziva obstarává stříbrné plnivo. Důležité vlastnosti obsažené v datovém listu jsou uvedeny v Tab 4.1. [29]

Tab. 4.1: Vlastnosti XCA 3556 HF [29]

Vlastnost	Jednotky	Hodnota
Viskozita při 25 °C	[Pa · s]	30 - 40
Rezistivita (tvrzeno 10 min na 120 °C v peci)	[Ω · cm]	$4 \cdot 10^{-4}$
Provozní teplota	[°C]	od -45 do +125
Skladovací teplota	[°C]	od -18 do +25

Dalším velmi důležitým parametrem, který musí být uveden u každého adheziva, je teplota a doba vytvrzení. V datovém listu je uvedeno, že doporučená teplota a doba vytvrzení, uvedené v Tab 4.2, byly určeny podle provedené DSC analýzy. V Tab 4.2 jsou uvedené hodnoty teploty a času, potřebné pro kompletní vytvrzení v konvenční peci. Při použití jiné metody tvrzení dojde ke snížení potřebného času tvrzení. [29]

Tab. 4.2: Doporučená doba a teplota vytvrzení. [29]

Teplota [°C]	Doba vytvrzení [s]
80	90
90	60
100	45
110	< 30

4.5 Volba substrátu

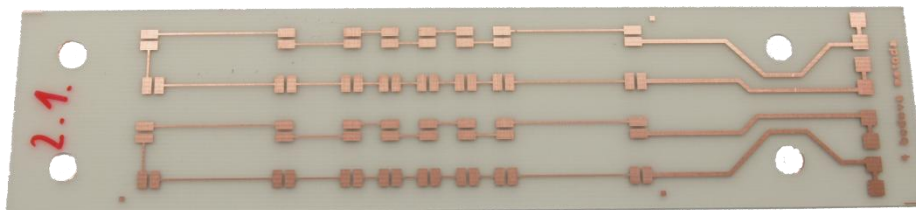
Substrát, na který byl vyhotovený konečný vzor zmiňovaný v kapitole 4.2, byl zvolen hlavně kvůli dostupnosti. Výroba vzorků probíhala přímo na ZČU, a proto se jednalo i o nejlevnější variantu. Jedná se o substrát FR4 o tloušťce 180 μm s 18 μm měděnou fólií. Tento substrát je vyrobený z upravené nealkalické tkaniny, ta slouží jako nosič a jako pojivo je použita epoxidová pryskyřice. Označení FR neboli flame retardant znamená, že tento substrát je samozhášecí.

5 Test odolnosti adheziva v ohybu

Postup experimentu bude popsán postupně od depozice, po vyhodnocení dat. Bude se jednat o ohybový test vzorku osazeným nulovými rezistory v pouzdře 0805, nakontaktovaných vybraným ECA, které je popsáno v kapitole 4.4. Zvolený experiment odpovídá modifikaci standardu IPC-TM-650 popsaným v kapitole 4.2. Předpokladem bylo, že po jistém počtu opakování dojde k porušení adheziva, které bude zaznamenáno pomocí online měření čtyřbodovou metodou. Online měření mělo odhalit jakékoli vady či změny struktury spoje. Jedná se tedy o test, který simuluje praktické využití flexibilního substrátu, na kterém jsou nakontaktovány SMT součástky.

5.1 Příprava vzorku

Nejprve byl stanoven počet vzorků pro testování. Jelikož předem nebyla známa žádná data o výdrži adheziva v takovémto testu, tak byl zvolen počet 9 vzorků. Každý vzorek byl měkkou pryží zbaven oxidu na jednotlivých ploškách, který by mohl ovlivnit přilnavost adheziva na měděné plošky. Očištěný vzorek bez osazených součástek je zobrazen na *Obr. 5.1*.



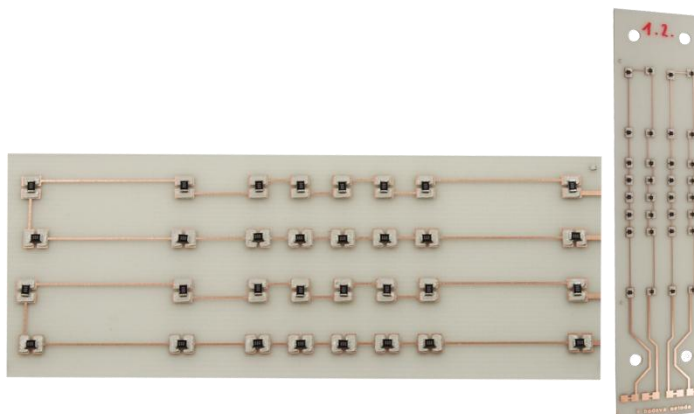
Obr. 5.1: Vzorek bez součástek.

Adhezivum bylo připraveno na depozici podle datového listu. Bylo vyndáno z mrazáku, kde musí být skladováno, 1 hodinu před samotným deponováním. Před i po nanesení adheziva na substrát byly všechny vzorky zváženy, aby bylo možné určit, kolik adheziva je na jedné plošce a hodnoty byly zaznamenány to tabulky *Tab. 5.1*. Použity byly váhy Kern ALJ 120-4 s rozlišením 0,1 mg. Pro depozici všech vzorků byla vybrána šablona s 20 % zmenšením plošek.

Tab. 5.1: Hmotnosti vzorků před a po depozici adheziva.

Číslo vzorku	Váha před nanesením [g]	Váha po nanesení [g]	Váha adheziva na jednu plošku [mg]
1.1	4,5372	4,6631	2,0
1.2	4,5627	4,685	1,9
1.3	4,5113	4,6424	2,0
2.1	4,5409	4,6647	1,9
2.2	4,5639	4,7044	2,2
2.3	4,5529	4,721	2,6
3.1	4,5453	4,7022	2,5
3.2	4,5773	4,7221	2,3
3.3	4,4851	4,6338	2,3

Pouze u vzorků 2.3 a 3.1 nastala větší odchylka množství adheziva na jednu plošku. S největší pravděpodobností tato odchylka vznikla při nedostatečném přitlaku šablony na vzorek, jelikož celá depozice probíhala ručně. Po nanesení adheziva na jednotlivé vzorky byly vzorky osazeny již zmiňovanými nulovými rezistory, osazený vzorek je na Obr. 5.2. Při osazování musí být každý rezistor přitlačen do adheziva, protože na rozdíl od pájky není smáčivé.



Obr. 5.2: Osazený vzorek.

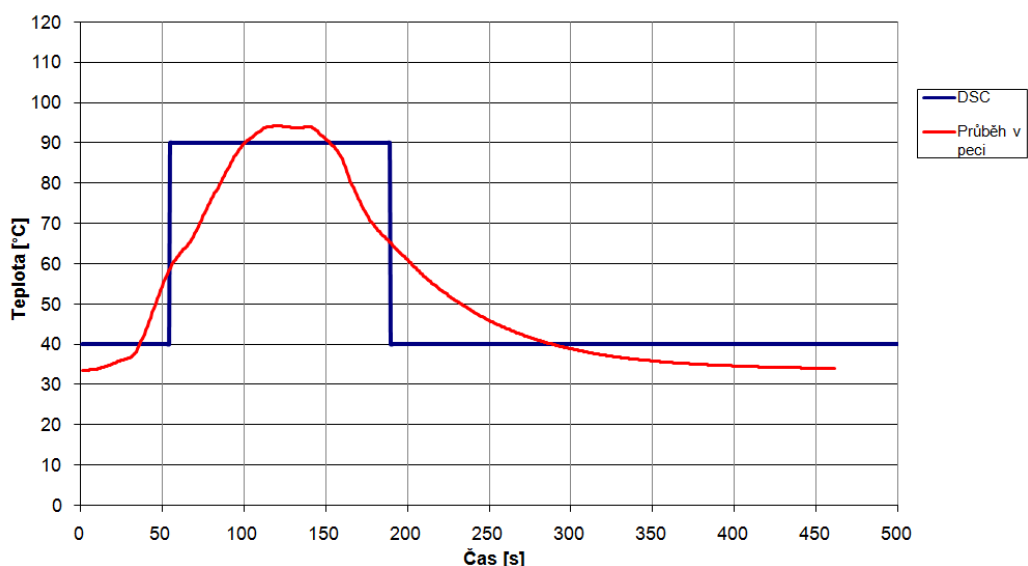
5.2 Vytvrzení

Po osazení je třeba vzorky vytvrdit. Výrobce udávána tabulka teplot a časů tvrzení je v kapitole 4.4, konkrétně Tab. 4.2. K tvrzení vzorků byla použita pec Mistral 260 na Obr. 5.3, jedná se o průběžnou konvekční pec se třemi zónami ohřevu. [30]



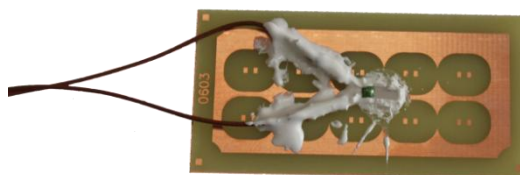
Obr. 5.3: Pec Mistral 260.

Teplotní profily vybrané pro tvrzení adheziva byly určeny na základě výsledku provedené analýzy DSC (Diferenční kompenzační kalorimetrie), která byla vykonána na ZČU. V grafu zobrazeném v *Obr. 5.4*, který je pro teplotu 90 °C a vytvrzení adheziva na 70 %, je vidět modrý průběh, který odpovídá výsledkům z DSC analýzy a červený průběh je naměřený teplotní profil.



Obr. 5.4: Teplotní profil pro vytvrzení při 90 °C na 70 %.

Všechny použité teplotní profily byly zjištěny online měřením v programu LabView od společnosti National Instruments prostřednictvím multimetru Metrahit od společnosti Gossen Metrawatt. Použitý senzor na snímání teploty na *Obr. 5.5* je platinové teplotní čidlo PT1000.



Obr. 5.5: Teplotní senzor PT1000 na PCB.

Vzorky s uvedenými teplotami vytvrzení, časem stráveným v peci a stupněm vytvrzení jsou v *Tab. 5.2*. Záměrně byla vybrána pouze jedna teplota, aby bylo možné případné porovnání jednotlivých vzorků s ohledem na vytvrzení.

Tab. 5.2: Teplotní profily.

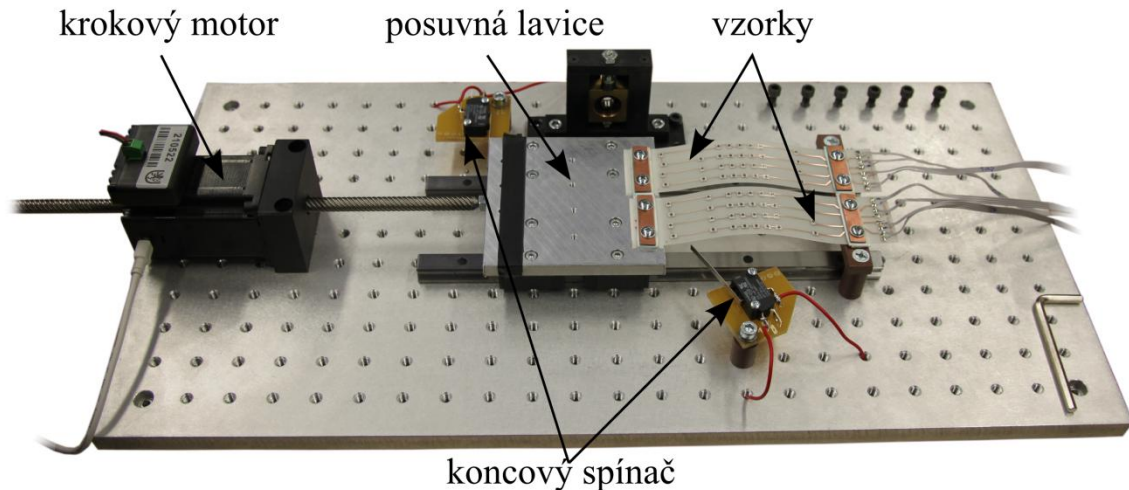
Číslo vzorku	Vytvrzení [%]	Teplota [°C]	Čas [s]	Q_N [s°C] dle DSC	Q_N [s°C]
1.1	50	90	77	3850	4841,26
1.2					
1.3					
2.1	70	90	134	6700	6836,75
2.2					
2.3					
3.1	90	90	252	12600	12597,85
3.2					
3.3					

V *Tab. 5.2* je také uvedena hodnota tepelného faktoru Q_N , která byla vypočítána dle vzorce (1) pro každý teplotní profil. Tyto hodnoty by měly být podobné jako hodnoty získané z průběhů navrhnutým dle DSC analýzy. [32]

$$Q_N = \int_{t_1}^{t_2} [T(t) - T_m] dt \quad (1)$$

5.3 Příprava experimentu

Celý experiment byl koncipován podle modifikovaného standardu IPC-TM-650. Zařízení použité pro testování je zobrazeno na *Obr. 5.5*. Toto zařízení je vybaveno krokovým motorem od společnosti Haydon velikosti 23, který se ovládá přes rozhraní USB. Krokový motor, který se napájí 26 V, hýbe posuvnou lavicí. Koncové spínače, které případně rozeznou napájecí obvod motoru, jsou zde umístěny kvůli možnému vyjetí krokového motoru z nastavené dráhy, což by mohlo způsobit porušení testovacího vzorku. Vzorky jsou zde upevněné šrouby, na jedné straně v posuvné lavici a na druhé na nepohyblivém místě, stejné výšky jako lavice. Vše je osazeno na hliníkové desce.



Obr. 5.5: Zařízení pro testování s popisky.

Kvůli nedostatečným zkušenostem s takovýmto testováním bylo nejprve nutné stanovit, jakým způsobem bude experiment probíhat. Předem nebylo jasné, jak se bude adhezivum při ohýbání chovat. Substrát byl již předem otestovaný přesně podle IPC-TM-650 a výdrž tohoto substrátu dosahovala v průměru 20 000 cyklů, nutno podotknout, že bez jakéhokoli proudového zatížení. Při každém měření byly vzorky připojeny k online měření odporu, konkrétně se jednalo o čtyřbodovou metodu, která pro větší přesnost zanedbává odpor měřicích vodičů. Použitým přístrojem pro toto měření byl DMM Keithley 2700 a nebo SMU Keithley 2612B od společnosti Keithley Instruments, oba tyto přístroje jsou zobrazeny na *Obr. 5.6*. SMU je pouze dvoukanalové, DMM může mít až 20 kanálů přepínatelnými pomocí relé.



Obr. 5.6: a) SMU Keithley 2612B, b) DMM Keithley 2700. (převzato z [31])

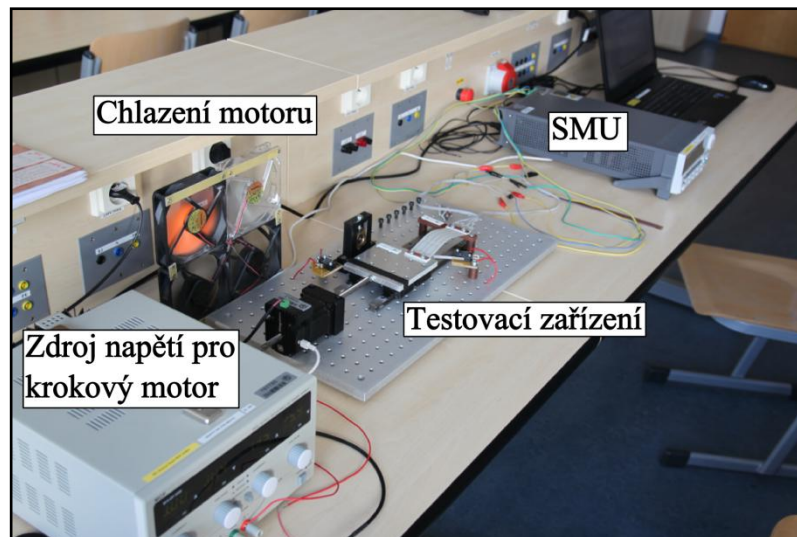
Pro krokový motor byl použit program Haydon Kerk IDEA drive Interface Program, ukázka z programu na *Obr. 5.7*, tímto programem se řídil krokový motor, byly zde nastaveny počáteční a koncové souřadnice a počet opakování.



Obr. 5.7: HaydonKerk IDEA drive Interface Program.

5.4 Průběh testování

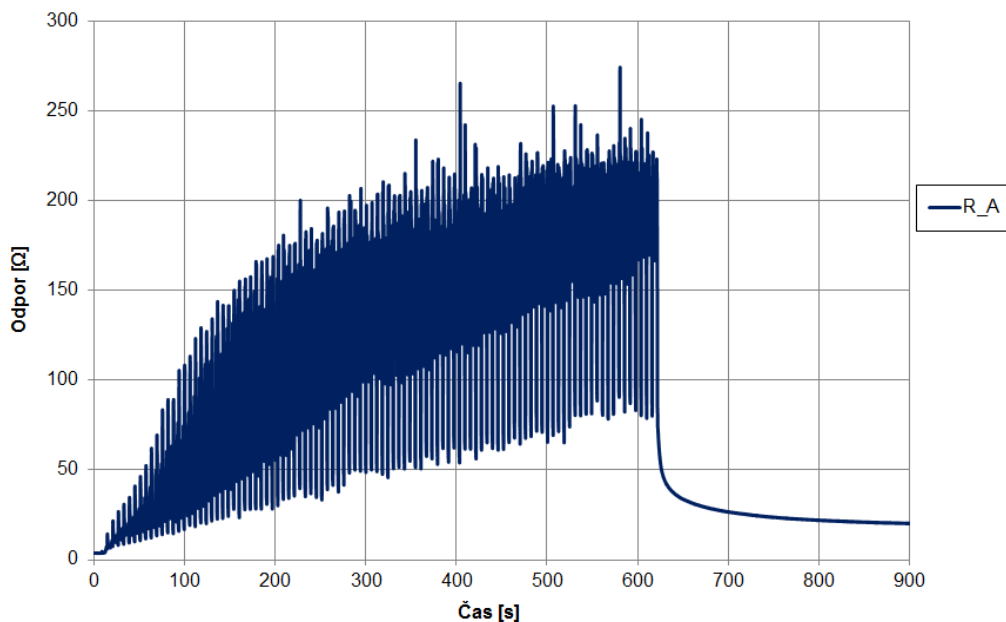
Nejprve byl vybrán vzorek pro první testy, který měl ukázat, jak se bude adhezivum chovat a tím určit průběh dalších testů. Vybrán byl vzorek 1.2, který byl připojen k SMU. SMU pracovalo se softwarovým nástrojem ACS basic, který umožňoval přesné nastavení vstupního proudu konkrétně 20 mA a po dokončení měření zobrazil i průběh odporu v grafu. V programu se nastavoval čas mezi odečítáním hodnot (delay) a počet odečtených hodnot (samples). Kompletní zapojení při provádění experimentu je na Obr. 5.8.



Obr. 5.8: Kompletní zapojení experimentu.

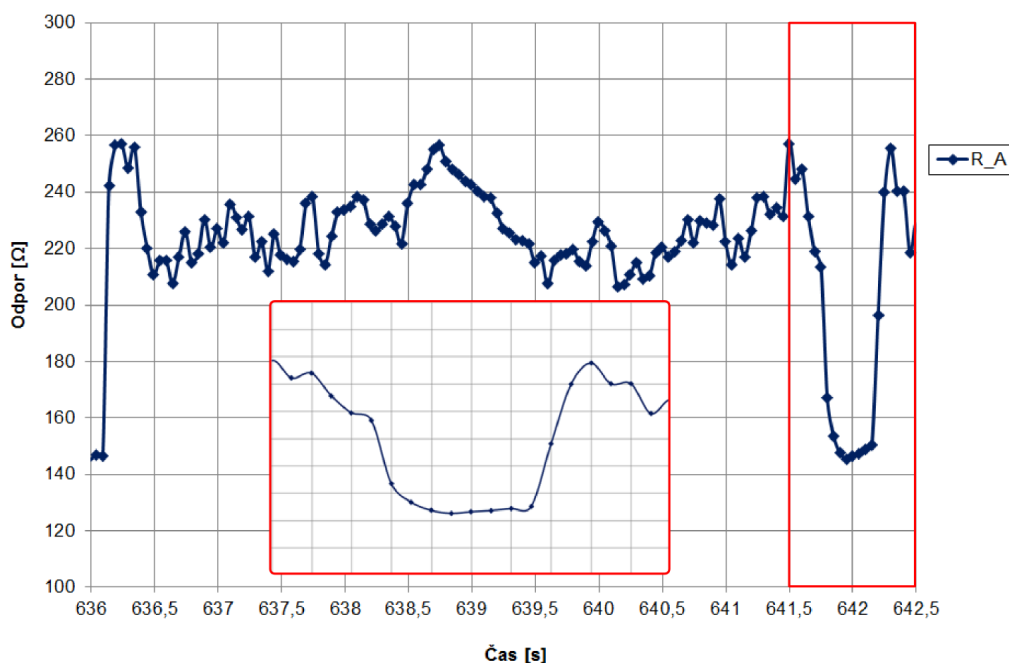
Vzorek 1.2 byl podroben 100 cyklům, delay 0,05 s a 18 000 vzorkům, což odpovídá 15 minutám cyklování, za původního předpokladu, že jeden cyklus trvá 6 s. Počáteční odpor cest byl $R_A=3,73 \Omega$ a $R_B=4,9 \Omega$. Z grafu na Obr. 5.9 lze vyzorovat zřetelnou změnu odporu při cyklování, odpor postupně rostl. Při ukončení cyklování nastává ustalování odporu, ale odpor

po ustalování nikdy nedosáhne tak nízké hodnoty jako měl na začátku. Průběh odporu R_B byl téměř identický. Po 100 cyklech zůstalo adhezivum neporušené.



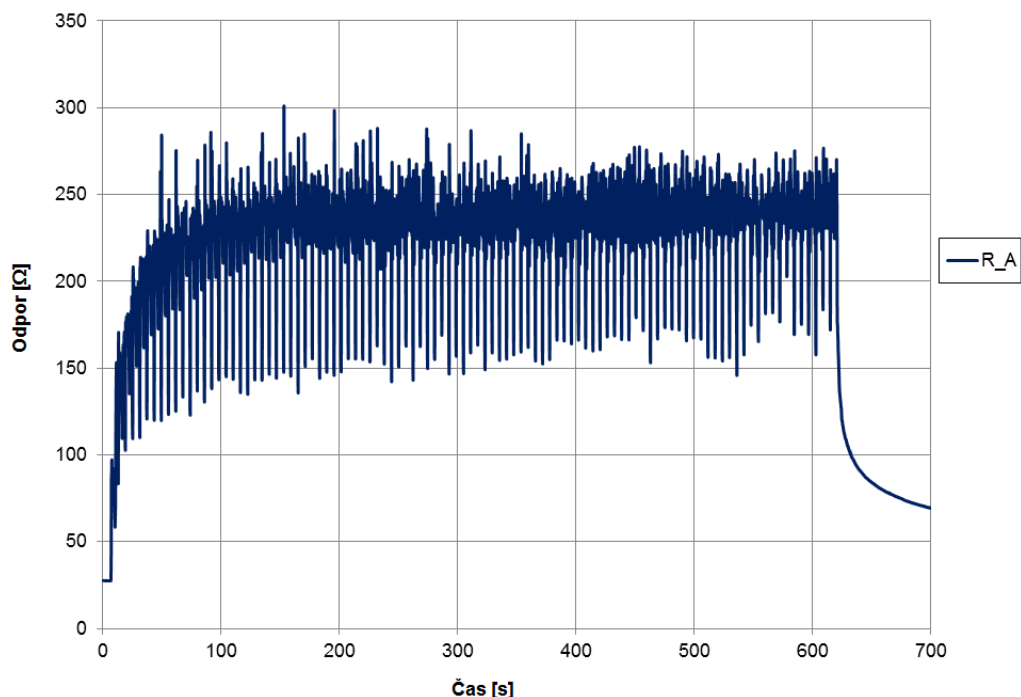
Obr. 5.9: Vzorek 1.2, 100 cyklů, delay 0.02 s, cesta A.

Pro přesnější zobrazení zjištěného cyklování odporu byl proveden další test, kde bylo nastaveno 200 cyklů, delay 0,02 s a 26400 vzorků. Výřez pouze několika cyklů z tohoto testu je zobrazen v *Obr. 5.10*. Průběh odpovídal prvnímu testu. Stále byla tendence stoupajícího odporu, až při delším ohýbání docházelo k jeho postupnému ustalování. Tento trend bude lépe demonstrován níže u více použitých cyklů.



Obr. 5.10: Výřez z grafu na Obr. 5.9.

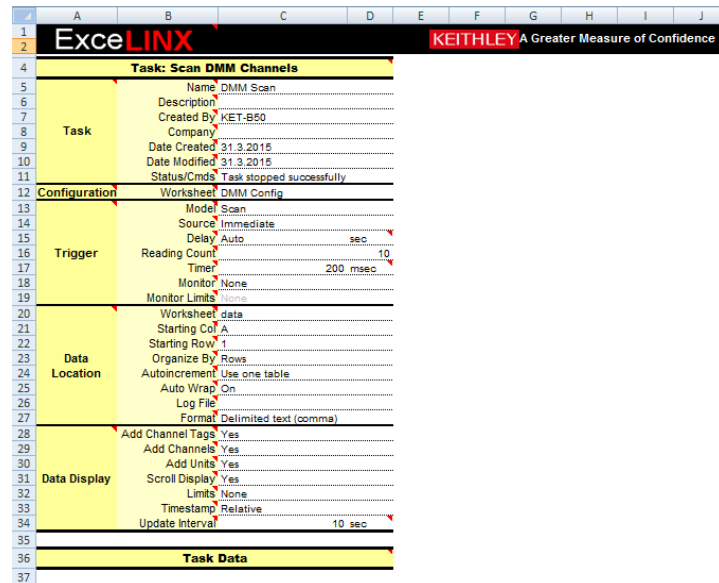
Z grafu v *Obr. 5.10* v červeném výřezu, lze jasně vidět průběh, kdy se vzorek vrátil do výchozí pozice, a nastala krátká prodleva mezi dalším cyklem. Tento opakující se pokles odporu bylo třeba zachovat, aby bylo možné určit, při kolika cyklech se vzorek porušil či poškodil. Kvůli velkým počtům vzorků bylo tedy třeba určit delší delay, ale na druhou stranu při něm musel být znatelný již zmiňovaný pokles odporu. Jako nejpříjemnější se jevila hodnota 0,2 s. Proto byl vzorek 1.2 podroben dalšímu testu, 100 cyklů, delay 0,2 s a počet vzorků 3600. Výsledek ve formě grafu je na *Obr. 5.11*.



Obr. 5.11: Vzorek 1.2, 100 cyklů, delay 0.2 s, cesta A.

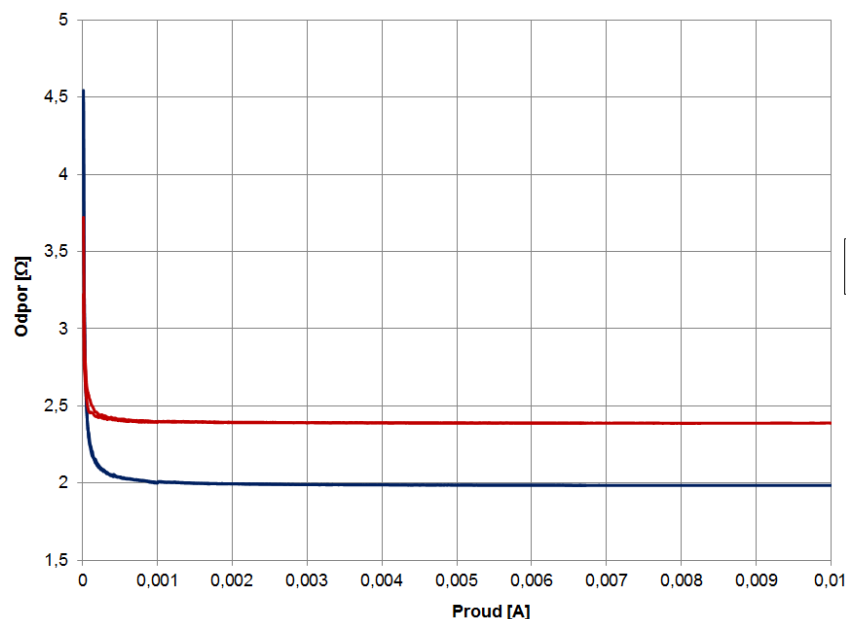
Vzorek 1.2 byl dále podroben 500 cyklům, které vydržel. Následně byl zvolen test na 1000 cyklů. Při tomto testu došlo po 520 cyklech k porušení cesty B. Testování vzorku bylo ukončeno, cesta A vydržela celkem 1900 cyklů, zůstala nepoškozená, ale v testování se nepokračovalo.

Jelikož má SMU pouze dva kanály a v testovacím zařízení mohou být uchyceny dva vzorky najednou, což vyžaduje čtyř kanálový měřicí přístroj, tak bylo výhodnější použít DMM. DMM může mít až 20 kanálů díky přepínání multiplexů pomocí relé. DMM pracuje s jiným softwarem, jedná se o doplněk do MS Excel zvaný ExceLINX, který vyvinula společnost Keithley. Malá ukázka z programu je na *Obr. 5.12*.



Obr. 5.12: Program ExceLINX.

Na další test byly tedy vzorky 1.1 a 1.3 připojeny k DMM. Po 10 cyklech začal DMM zaznamenávat nesmyslně velké hodnoty odporu, které po několika desítkách cyklů vyrostly až na řádově $M\Omega$. Kvůli možnosti, že se jedná o poškozené vzorky, byly vzorky nahrazeny dalšími vzorky 2.1 a 2.2. Opakoval se ten samý scénář jako u vzorků 1.1, 1.3. Opět byly naměřeny nereálné hodnoty. Pro jistotu byly vzorky 2.1 a 2.2 proměřeny v SMU. Oba vzorky prošly 100 cykly na SMU a průběh odporu vypadal obdobně jako na Obr. 5.11. Problém nastal v tom, že SMU má nastavitelný vstupní proud, který je po celou dobu měření konstantní. Při všech provedených měřeních byl nastaven na hodnotu 20 mA. Na druhé straně DMM neumí dodávat konstantní proud. Proto byla změřena IR charakteristika vzorku 2.1 pomocí SMU, výsledek je na Obr. 5.13.

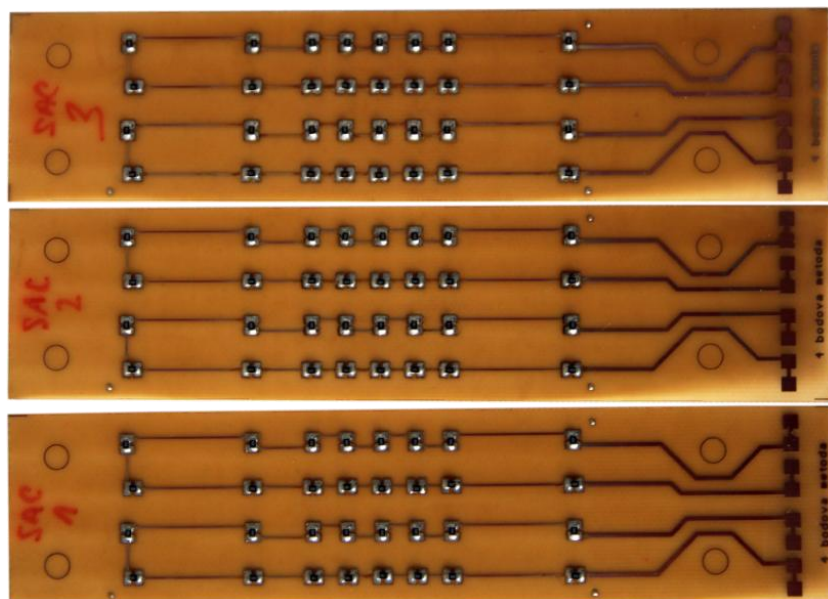


Obr. 5.13: IR charakteristika vzorku 2.1.

Průběh odporu je pro velmi nízké proudy značně nelineární a v případě, že DMM přepne automaticky rozsah na vyšší hodnoty, začne do obvodu téct proud, který zasahuje do velmi nelineární části charakteristiky, tím se opět zvýší rozsah a DMM pošle ještě menší proud. Proto vycházely nesmyslně velké hodnoty, které nedávaly smysl. Ideální rozsah proudu je tedy mezi 10 – 20 mA. Dle manuálu pro DMM Keithley 2700 dodává 1 mA při rozsahu 100 – 1000 Ω . Dalším rozsahem je 10 k Ω , při kterém je proud 100 μ A, pokud dojde k naznačovanému scénáři a DMM začne zvyšovat rozsahy až na maximální, tak nakonec bude do obvodu dodávat proud 0,7 μ A. Proto měření s DMM nepřipadalo v úvahu. [32]

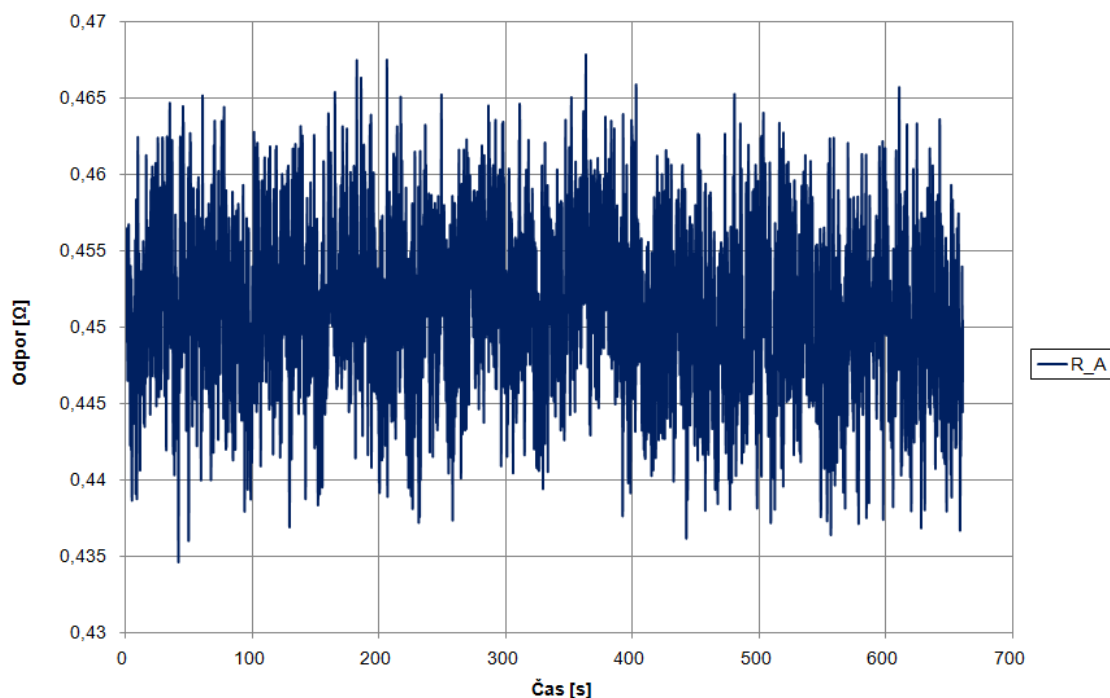
Ostatní vzorky byly tedy změřeny prostřednictvím SMU. Nastavení měření delay 0.2 s, počet cyklů 1000, počet vzorků 30300. Bohužel poznatek, že použitý substrát vydrží 20000 cyklů, nebyl pravdivý. Vzorky byly vždy zatíženy konstantním proudem 20 mA a tím se značně snížila životnost všech cest. V žádném měření nedošlo k poškození adheziva, ale naopak cesty na substrátu většinou nevydržely více než 2000 cyklů. V následující kapitole budou shrnuty veškeré výsledky z testování.

Po zničení všech vzorků s adhezivem byly připraveny ještě 3 vzorky s pájkou, pro porovnání cyklování odporu. Byla použita pájecí pasta SAC305 od společnosti The Shenmao Technology, rozložení váhy 96,5 % Sn, 3 % Ag a 0,5 % Cu. Teplota tavení 217 – 219 $^{\circ}$ C. Vzorky byly přetaveny ve stejné peci jako vzorky s adhezivem *Obr. 5.3*. Vzorky po přetavení značně změnilly barvu, jak je vidět na *Obr. 5.14*.



Obr. 5.14 Přetavené vzorky s pájkou.

Ukázka průběhu odporu při testování je na *Obr. 5.15*. Nastavení při testování bylo jako u vzorků s adhezivem. Na *Obr. 5.15* je průběh po 100 cyklech, delay 0.2 s, 3300 vzorků. Vzorky nevydržely více než 700 cyklů. Podrobnější informace jsou v následující kapitole.



Obr. 5.15: Průběh odporu při 100 cyklech vzorku SAC 1.

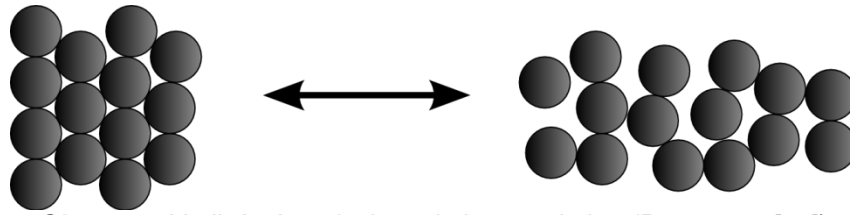
5.5 Shrnutí výsledků

Než byly vzorky podrobeny testování, tak byl změřen jejich odpor *Tab. 5.3*.

Tab. 5.3: Počáteční odpory jednotlivých vzorků.

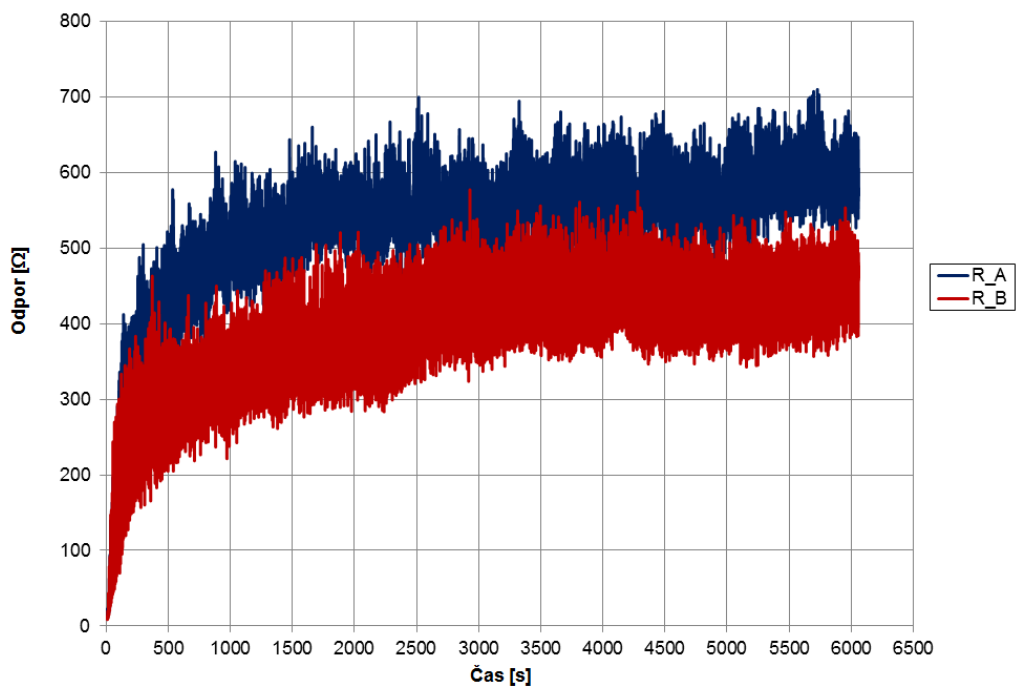
Vzorek	Cesta	Odpor [Ω]	Vzorek	Cesta	Odpor [Ω]	Vzorek	Cesta	Odpor [Ω]
1.1	A	5,79	2.1	A	11,25	3.1	A	7,17
	B	7,47		B	13,66		B	7,30
1.2	A	3,73	2.2	A	10,92	3.2	A	8,73
	B	4,90		B	10,46		B	11,84
1.3	A	23,77	2.3	A	18,06	3.3	A	14,56
	B	30,62		B	10,46		B	9,13

Při cyklování se u vzorků značně měnil odpor. Tyto změny byly způsobeny rozložením vodivých částecek v adhezivu. Stejný problém se změnou odporu při prohnutí substrátu byl řešen v článku [33]. Rozložení vodivých kulových částecek bez ohybu a v ohybu je zobrazen na *Obr. 5.16*.



Obr. 5.16: Vodivé částičky bez ohybu a v ohybu. (Převzato z [33])

Z Obr. 5.16 zobrazující ohýbání při cyklování, je zřejmé, že docházelo k oddalování vodivých částic, a tím pádem ke změně odporu. Pro porovnání, odpor u SAC305 také cykloval, ale jeho hodnota nerostla, na Obr. 5.15 lze vidět, že hodnoty se měnily o zhruba 20 %. U adheziva však docházelo ke značnému růstu odporu. Například u vzorku 2.3 u cesty A byla počáteční hodnota odporu $18,06 \Omega$ a při cyklování se hodnota odporu v průměru pohybovala kolem 550Ω . Cesta B měla počáteční hodnotu odporu $10,46 \Omega$ a přibližná průměrná hodnota při cyklování byla 400Ω . Na Obr. 5.17 jsou tyto průběhy zobrazeny v grafu.



Obr. 5.17: Vzorek 2.3, 1000 cyklů.

Po ukončení cyklování se odpor začne pomalu ustalovat, jak je znatelné z Obr. 5.9. Takovýto průběh ustalování by měly mít všechny vzorky, ale ne u všech byl zaznamenán, neboť u většiny vzorků do 2000 cyklů došlo k přerušení obvodu. Konkrétní hodnoty cyklů, kdy u vzorků došlo k porušení vodivé cesty, jsou v Tab. 5.4.

Tab. 5.4: Počty cyklů do porušení vzorků.

Vzorek	Počet cyklů		Vzorek	Počet cyklů	
	R_A	R_B		R_A	R_B
1.1	1555	1077	3.1	1358	1583
1.2	1900	1420	3.2	1410	1262
1.3	1203	1075	3.3	744	2777
2.1	949	691	SAC 1	679	696
2.2	1745	1822	SAC 2	594	683
2.3	2248	1676	SAC 3	231	518

5.6 Doporučení

Pro další výzkum v této oblasti bych doporučil následující změny, vyplývající ze zkušeností získaných při testování.

Vzorek pro testování dle modifikovaného standardu IPC-TM-650 by měl mít jiný vzor vodivého obvodu na substrátu. Nejvhodnější by bylo udělat paralelní obvod a osadit ho LED diodami, kterými by se dalo velmi jednoduše identifikovat porušený spoj. Test by měl proběhnout pro jedno adhezivum na několika substrátech, s rozdílnými vlastnostmi a tvrdostí. Poté by bylo vhodné vybrat i jiné adhezivum pro testování, aby byla možnost porovnat jednotlivá získaná data. Pro online měření odporu, které se ukázalo jako vhodné, bych rovnou doporučil použít měřicí přístroj, umožňující nastavení konstantního proudu. Daný proud by se měl získat z předem změřené IR charakteristiky na vzorku, který nebude použit pro další měření, protože proudové namáhání značně sníží životnost substrátu, jak je vidět na vzorku 2.1, v Tab. 5.4.

Závěr

Diplomová práce se zabývá elektricky vodivými adhezivy, která jsou vhodná pro kontaktování součástek na flexibilní substráty. Jedním z přínosů této práce je vypracovaný přehled komerčně dostupných elektricky vodivých adheziv. Počet výrobců uvedených v této práci je 11. Každému výrobcí je věnována jedna podkapitola, kde se nachází tabulka s konkrétními adhezivy včetně jejich základních parametrů, aby bylo možné jednotlivá adheziva porovnat. V tabulkách jsou rovněž vyznačena adheziva, která jsou podle výrobců vhodná pro flexibilní substráty.

Přehled standardů a metod v oblasti testování kvality kontaktování komponent na flexibilní substráty je uveden v třetí části práce. Jelikož žádný takovýto standard či metoda není popsána, proto jsou v této části uvedeny standardy, které jsou potenciálně vhodné pro takovéto testování. Podrobněji jsou popsány standardy ASTM D790-10, ISO 178:2010 a dále jsou pouze uvedeny ostatní vhodné standardy, které připadají pro tento účel v úvahu. Mezi nimi je zmíněn i standard IPC-TM-650, který byl po modifikaci použit k experimentu provedenému v praktické části, kde je rovněž tento standard podrobně popsán.

Na základě standardu IPC-TM-650 byly vytvořeny testovací vzorky. Zvolenou metodou depozice se stal šablonový tisk. Vzorky byly vytvořeny na vybraném substrátu FR4 o tloušťce 180 μm s 18 μm měděnou fólií, který měl podle poznatků z předešlých měření vydržet kolem 20000 ohybů. Šablona byla zhotovena podle testovacích vzorků. Dále bylo vybráno adhezivum od společnosti Henkel, na jejich doporučení XCA 3556 HF, které je podle katalogového listu velmi vhodné pro aplikace vyžadující flexibilitu a je vytvrditelné i při teplotách pod 100 °C. Devět vzorků bylo osazeno nulovými odpory v běžném SMT pouzdru 0805 a byly vytvrzené dle profilů, které byly vytvořeny dle DSC analýzy. Vybrané osazené vzorky byly vytvrzeny při teplotě 90 °C, ale na různé stupně vytvrzení, 50 %, 70 % a 90 %.

Praktické ověření vlastností v ohybu vybraného adheziva probíhalo v dostupném zařízení pro testování dle standardu IPC-TM-650. Kvůli online měření odporu, musely být vzorky zatíženy proudem 20 mA. Tento proud vyplynul ze změřených IR charakteristik zobrazených na *Obr. 5.13*, které jsou pro menší proudy značně nelineární. Toto proudové zatížení značně snížilo životnost měděných cest na substrátu. Při ohýbání většina vybraných vzorků

nevydržela více než 2000 cyklů. Nejvíce cyklů vydržel vzorek 3.3, cesta B 2777 cyklů, ale na druhé straně cesta A pouze 744 cyklů. Podle změřených dat nelze přesně určit, jaký vliv měl stupeň vytvrzení adheziva na jeho výdrž při cyklickém namáhání. Rovněž nelze přesně stanovit, po kolika cyklech se adhezivum poruší, jelikož u žádného ze vzorků nedošlo k poškození samotného adheziva během prováděných experimentů. Pro porovnání byly vytvořeny tři vzorky osazené pomocí pájky SAC. Tyto vzorky nevydržely více než 700 cyklů. Na to mohla mít vliv tvrdost pájky, ale je třeba brát v potaz, že tyto vzorky byly přetaveny při 280 °C, což samo o sobě jistě životnost substrátu snížilo.

Zajímavým poznatkem z experimentu byl značně proměnlivý odpor u vzorků s adhezivem. Počáteční odpor například u vzorku 2.3 byl pro cestu A 18,06 Ω , pro cestu B 10,46 Ω . Po několika desítkách cyklů se odpor pohyboval kolem 550 Ω u cesty A, 400 Ω u cesty B. Takovýto průběh byl zaznamenán u všech testovaných vzorků. Po ukončení cyklování tento odpor začal pomalu klesat, ale nikdy se neustálil na původní hodnotě, vždy zůstal vyšší. Při cyklování se odpor u adheziva měnil v rozmezí ± 100 až 200 Ω . Tento trend cyklování odporu se pro porovnání dal pozorovat i u pájky, ale u ní nedocházelo k růstu odporu. Navíc hodnoty odporu u pájky se pohybovaly kolem 0,45 Ω a cyklování měnilo odpor pouze v rozmezí ± 20 %. V poslední části práce je vypracováno doporučení pro pokračování výzkumu v této oblasti.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] LICARI, James J a Dale W SWANSON. *Adhesives technology for electronic applications: materials, processing, reliability*. 2nd ed. Boston: William Andrew Pub., 2011, viii, 403 p. ISBN 978-143-7778-892.
- [2] RABILLOUD, Guy a Dale W SWANSON. *High-performance polymers: chemistry and applications*. 2nd ed. Paris: Editions Technip, 1997-2000, 3 v. ISBN 27108072033.
- [3] WEIGAND, D.W. a S.V. CARUSO. INTL. J. HYBRID MICROELECTRON. *Development of qualification standard for adhesives used in hybrid microcircuits*. Proc. ISHM, 1983.
- [4] MACH, P. *Montáž v elektrotechnice*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2001, 440 s. ISBN 80-010-2392-3.
- [5] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2006, 379 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [6] 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. 2014-12-13]. DOI: 10.1016/j.mser.2006.01.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927796X06000131>
- [7] IPC-3406. *Guidelines for Electrically Conductive Surface Mount Adhesives*. 3000 Lakeside Drive, Suite 309 S, Bannockburn, Illinois, 1996.
- [8] KHANDPUR, R. S. *Printed Circuit Boards: Design, Fabrication, Assembly and Testing*. Tata McGraw-Hill Education, 2005. ISBN 0-07-058814-7.
- [9] LEWIS, Alan; BABIARZ, Alec. Conductive adhesive dispensing process considerations. In: *NEPCON WEST*. CAHNERS EXPOSITION GROUP, 1999. p. 335-349.
- [10] LEWIS, Al. Jetting: Dispense Technology of Choice for Adhesives. *SMT-TULSA*-, 2006.
- [11] NGUYEN, Q. H.; CHOI, S. B. Performance evaluation of a high-speed jetting dispenser actuated by a ring-type piezostack. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2009, 223.6: 1401-1413.

- [12] WINKLER, Martin. 2008. *Elektrický perkolační práh a dielektrické vlastnosti elastomerních nanokompozitů*. Zlín. Dostupné také z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/6992/winkler_2008_dp.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [13] Product search - Henkel. © 2015 HENKEL AG & CO. *Electronics - Henkel* [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.henkel-adhesives.com/product-search-1554.htm>
- [14] Elecolit®. PANACOL-ELOSOL GMBH 2009 -2015. *Panacol* [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.panacol.com/products/adhesives/elecolit/>
- [15] MATWEB, LLC. *Online Materials Information Resource - MatWeb* [online]. © 1996-2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.matweb.com>
- [16] Electrically Conductive Adhesives | MG Chemicals. *MG Chemicals* [online]. © 2000 - 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.mgchemicals.com/products/adhesives/electrically-conductive/>
- [17] Electrically Conductive Adhesives. *Creative Materials Conductive Adhesives, Coatings, and Inks* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.creativematerials.com/products/conductive-adhesives/>
- [18] Aremco | Electrically and Thermally Conductive Materials. *High Temp Epoxies, Coatings, Potting Compounds | Machinable Ceramics | Aremco* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.aremco.com/conductive-compounds/>
- [19] Electrically Conductive Adhesives. *Resinlab Adhesives, Potting Systems, Encapsulants, Custom Formulating* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.resinlab.com/adhesives/adhesives-electrically-conductive>
- [20] Polytec PT: Electrically Conductive Adhesives. *Polytec PT: Polymer Technologies* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.polytec-pt.com/int/products/epoxy-adhesives/electrically-conductive-adhesives/>
- [21] Parker Chomerics | Conductive Adhesives - Conductive Sealants - Gap Fillers and Conductive Coatings. *Chomerics, Division of Parker Hannifin Corporation* [online]. © 2014 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.chomerics.com/products/emi/adhesives/index.html>
- [22] Electrically Conductive Adhesives - Protavic America. *Protavic America | Electronic Assembly Materials* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.protavicamerica.com/products/electrically-conductive/high-thermal-chip-die-attach/>

- [23] Electrically Conductive Adhesive: An Adhesive Product of Mereco Technologies Group. *Mereco Technologies, Inc.* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.mereco.com/products/adhesives/electrically-conductive-adhesives>
- [24] *ASTM D790-10. Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.* 2010. Dostupné také z: <http://www.astm.org/Standards/D790.htm>
- [25] KOPELIOVICH, Dmitri. Flexural strength tests of ceramics. *SubsTech* [online]. 6. 1. 2012 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=flexural_strength_tests_of_ceramics
- [26] Flexural Test ASTM D790 ISO 178. *Intertek Plastics Technology Laboratories - Plastic Testing Leader - Elastomers, Composites & Polymer Testing* [online]. ©1996-2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.ptli.com/testlopedia/tests/flex-d790.asp>
- [27] IPC-TM-650. *Method 2.4.3: Flexural Endurance, Flexible Printed Board Materials.* 2011. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2.4.3e.pdf>
- [28] Benchtop Dispensers. *Adhesive Dispensing Ltd.* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: http://www.adhesivedispensing.net/category_s/25.htm
- [29] *XCA 3556 HF: Highly Flexible, Electrically Conductive, Low Temperature Snap Cure Adhesive* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.hitek-ltd.co.uk/media/downloads/2959/XCA%203556%20HF%20%28Electrically%20Conductive%20Adhesive%29%20%282007%29.pdf>
- [30] Mistral 260: Forced Air Convection Reflow Oven. In: [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: http://www.memtech.co.il/files/attach/Mistral_260.pdf
- [31] *Precision Measurement Tools - Keithley Instruments Inc.* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.keithley.com>
- [32] M. Hirman, K. Rendl, F. Steiner, and V. Wirth, "Influence of reflow soldering profiles on creation of IMC at the interface of SnBi/Cu," ve sborníku z 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2014, pp. 147–151.
- [33] ZhuoLi; Hansen, K.; Kyoung-sik Moon; Wong, C.P., "Shape engineering of the fillers in stretchable, electrically conductive adhesives: Its effect on percolation and conductivity change during stretching," *Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2013 IEEE 63rd*, vol., no., pp.2196,2200, 28-31 May 2013 doi: 10.1109/ECTC.2013.6575886
- [34] *MasterBond | Adhesives, Sealants & Coatings* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.masterbond.com>