

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv mechanického namáhání na vlastnosti lepených
spojů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

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

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš NEUHÖFER**
Osobní číslo: **E17N0105P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Vliv mechanického namáhání na vlastnosti lepených spojů**
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. Proveďte rešerši způsobů testování flexibilních substrátů
2. Navrhněte vzorky pro statické a dynamické testy lepených spojů na flexibilních substrátech
3. Navrhněte experiment pro zjištění vlivu statického a dynamického namáhání lepených spojů na jejich elektrické a mechanické vlastnosti
4. Realizujte a vyhodnoťte navržený experiment

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Anglicky psané vědecké publikace (z konferencí, impaktovaných časopisů, ...)
2. D. Lu, C.P. Wong - Electrical Conductive Adhesives with Nanotechnologies
3. R. Gomatam, K.L. Mittal - Electrically Conductive Adhesives
4. S. Ebnesajjad, A.H. Landrock - Adhesives Technology Handbook
5. K.L. Mittal, A. Tanweer - Adhesion in Microelectronics

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Hirman, Ph.D.
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na testování mechanických vlastností elektricky vodivých lepených spojů. V první části jsou popsány flexibilní substráty a elektricky vodivá lepidla, jejich vlastnosti a druhy. Dále jsou popsány standardy a zařízení pro testování flexibilních substrátů. V praktické části diplomové práce byl navržen experiment, který má z úkol otestovat vlastnosti elektricky vodivých lepených spojů. Jsou zde popsány použité lepidla a substráty. Dále je popsán návrh a výroba vzorků pro experiment, průběh experimentu a výsledky.

Klíčová slova

Flexibilní substráty, elektricky vodivá lepidla, lepené spoje, test ohybem, test v tahu, test pevnosti ve smyku

Abstract

This diploma thesis is focused on testing of mechanical properties of electrically bonded joints. The first part describes flexible substrates and electrically conductive adhesives, their properties and types. Standards and devices for testing flexible substrates are described below. In the practical part of the thesis was designed an experiment that tests the properties of electrically conductive adhesive joints. The adhesives and substrates used are described herein. Furthermore, the design and production of samples for the experiment, the course of the experiment and the results are described.

Key words

Flexible substrate, electrically conductive adhesive, glued joint, bending test, tensile test, shear strength test.

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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 30.5.2019

Bc. Tomáš Neuhöfer

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKA	12
2 SUBSTRÁTY PRO FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKU	13
2.1 STUPEŇ FLEXIBILITY.....	13
2.2 VLASTNOSTI FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTŮ.....	14
2.3 DRUHY FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTŮ.....	15
2.3.1 Tenká skla.....	15
2.3.2 Plastové fólie.....	15
2.3.3 Kovové fólie.....	15
3 ELEKTRICKY VODIVÁ LEPIDLA	17
3.1 STRUKTURA ELEKTRICKY VODIVÝCH LEPIDEL.....	17
3.2 PERKOLAČNÍ TEORIE.....	19
3.3 DRUHY LEPIDEL.....	20
3.3.1 Izotropní vodivá lepidla.....	20
3.3.2 Anizotropní vodivá lepidla.....	21
3.3.3 Nevodivá lepidla.....	22
3.4 NANÁŠENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH LEPIDEL.....	22
3.4.1 Sítotisk.....	23
3.4.2 Šablonový tisk.....	23
3.4.3 Dispensing.....	23
4 TESTOVÁNÍ FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKY	25
4.1 TESTOVÁNÍ FLEXIBILNÍ SUBSTRÁTŮ PODLE IPC.....	25
4.2 VIZUÁLNÍ KONTROLA.....	26
4.3 TESTOVÁNÍ V OHYBU.....	26
4.3.1 Výdrž v ohybu.....	27
4.3.2 Testování tažnosti a ohebnosti.....	28
4.4 TESTOVÁNÍ V TAHU.....	28
4.5 PEVNOST V TAHU A PRODLOUŽENÍ KOVOVÝCH FOLIÍ.....	29
4.6 DALŠÍ ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTŮ.....	30
4.6.1 Testování pomocí posuvné plošiny.....	31
4.6.2 Testování pomocí navíjení.....	32
4.6.3 Testování pomocí vychylování trnů.....	32
4.6.4 Flex-E-Test.....	34
4.6.5 Univerzální testovací zařízení.....	35
5 PRAKTICKÁ ČÁST	37
5.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	37
5.1.1 Použité substráty.....	37
5.1.2 Použitá lepidla.....	38
5.1.3 Návrh vodivého motivu.....	39
5.2 POPIS EXPERIMENTU.....	42
5.2.1 Výroba vzorků.....	42
5.2.2 Měření elektrického odporu.....	43
5.2.3 Test ohybem.....	45
5.2.4 Test pevnosti ve smyku.....	46
5.3 VÝSLEDKY EXPERIMENTU.....	47

5.3.1	Výsledky měření vzorků s lepidlem 8331S	47
5.3.2	Výsledky měření vzorků s lepidlem E4110.....	48
5.3.3	Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku.....	49
5.4	DISKUZE VÝSLEDKŮ	49
ZÁVĚR.....		51
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....		53
PŘÍLOHY		1

Úvod

Elektricky vodivá lepidla se dostala do popředí v době, když se hledala náhrada za olovnaté pájky. Spoje vytvářené pomocí lepidel mají rozdílné vlastnosti než spoje pájené. Rozdíly se nachází především ve vodivosti spojů ale i ceny materiálu. Své uplatnění nachází především ve flexibilní elektronice. Nejčastěji zmiňovaná vlastnost je nižší teplota tvrzení než u pájek, dále pak schopnost dosáhnout flexibility bez narušení elektrických nebo mechanických vlastností.

Flexibilní substráty musí mít specifické vlastnosti, aby mohly plnit svoji funkci. Jejich vlastnosti proto musí být pečlivě prozkoušeny. V oblasti testování je ale nedostatek standardů. Kromě nich ale existuje i mnoho jiných metod pro testování flexibilních substrátů.

Obsah předkládané diplomové práce je zaměřen na elektricky vodivá lepidla, flexibilní substráty a jejich testování.

Cílem práce je prostudovat materiály ohledně testování flexibilních substrátů a provést rešerši těchto metod a standardů. Dále mají být navrženy vzorky a experiment pro ověření mechanických vlastností elektricky vodivých lepených spojů.

Seznam symbolů a zkratk

Seznam symbolů

CTE	Koeficient teplotní roztažnosti [K^{-1}]
D1	počáteční vzdálenost svorek [m]
D2	vzdálenost svorek při přetržení [m]
D_f	únavová tažnost [%]
dL	rychlost změny délky vzorku
E	modul pružnosti [Pa]
e	poloměr zakřivení trnu [m]
F	síla při přetržení [N]
h_f	Tloušťka vodivého motivu [m]
h_s	tloušťka vzorku [m]
L	počáteční délka vzorku [m]
N_f	cykly k selhání [-]
S	průřez plochy [m ²]
S_u	mez pevnosti v tahu [N]
T	Teplota [°C]
t	tloušťka vzorku [m]
t_M	tloušťka jádra [m]
ε	prodloužení [%]

Seznam zkratk

A	Délka zkrácené části vzorku
ACA	Anizotropní vodivá lepidla
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Délka upínací části
C	Šířka upínací části
DPS	Deska plošných spojů
ECA	Elektricky vodivá lepidla
G	Délka kalibru
ICA	Izotropní vodivá lepidla
IPC	International Electrotechnical Commission
L	Délka vzorku
NCA	Nevodivá lepidla
OLED	Organické světlo emitující dioda
PDMS	Polydimeysiloxan
PEN	Polyethynnaftalát
PET	Polyethylentereftalát
PI	Polyimid
R	Zakřivení vzorku
TFT	Tenký tranzistorový displej
W	Šířka

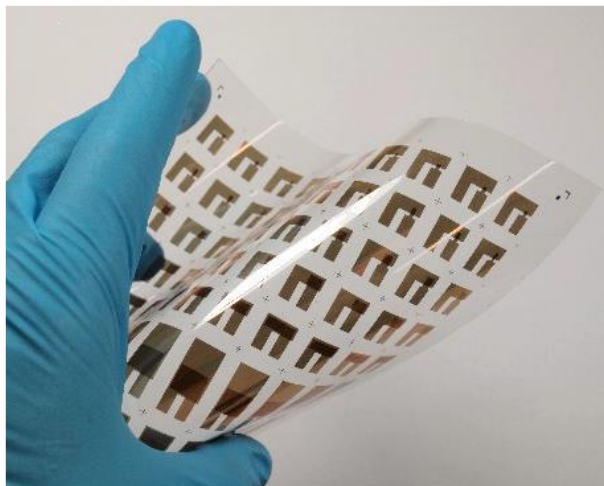
1 Flexibilní elektronika

Cokoliv, co je tenké může být i ohebné. Tato myšlenka stojí za vznikem flexibilní elektrotechniky, jejíž historie sahá až do šedesátých let minulého století. Právě tehdy byl z monokrystalového křemíku na plastovém substrátu vyroben první flexibilní solární článek. [1][2]

Flexibilní spoje postupně našli uplatnění v dalších odvětvích, například v roce 1968 byl poprvé vyroben křemíkový tranzistor (TFT), který je součástí většiny displejů. V polovině osmdesátých let se využití flexibilní elektroniky rozšířilo především v Japonsku v oblasti displejů na bázi tekutých krystalů. Postupem času se flexibilní elektronika rozšiřovala do dalších oblastí. Společnost Philips představila v roce 2005 prototyp válcového elektroforetického displeje. V roce 2006 pak byl představen prototyp flexibilního displeje s organickou světelnou diodou (OLED) a dnes najdeme flexibilní elektroniku v solárních panelech, senzorech, anténách a ohebných displejích. [1][2]

Mechanická flexibilita je klíčová, odlišuje flexibilní elektroniku od běžné pevné elektroniky. Flexibilní materiály mají mnoho předností, jsou ohýbatelné, lehké, elastické a odolné. [1][3]

Obecně můžeme flexibilní elektroniku rozdělit do dvou kategorií: odolná v tahu a odolná v ohybu. Elektronika odolná v tahu je obvykle vyrobena z elastomerních substrátů, jako pryž, polydimetylsiloxan (PDMS). Ohebná zase používá substráty jako tenké skleněné tabule, polyimid (PI), polyethylentereftalát (PET). [1][3]



Obrázek 1. Flexibilní elektronika (převzato z [4])

2 Substráty pro flexibilní elektroniku

Obecná velkoplošná elektronická struktura se skládá ze substrátu, elektroniky a zapouzdření. Aby se dosáhlo flexibility, musí všechny komponenty splňovat určité požadavky na ohýbání, tak aby nedošlo k poškození nebo nemožnosti splňovat svoji funkci. Existují dva různé přístupy, k tomu jak vyrábět flexibilní elektroniku. [1]

- Přenos a spojení hotových obvodů s pružným substrátem
- Výroba obvodů přímo na pružném substrátu

Přenosová metoda má výhodu v poskytnutí velmi výkonných zařízení na pružných podkladech. Nevýhodou je malé pokrytí povrchu a vysoké náklady. [1]

2.1 Stupeň flexibility

Pro výrobce a uživatele může flexibilita znamenat různé vlastnosti. Její mechanická charakteristika je rozdělena do tří následujících kategorií. [1]

- Ohýbatelná nebo válcovatelná
- Trvale tvarovaná
- Elasticky roztahitelná

Aby bylo možné substrát ohýbat a rolovat je zapotřebí hodně tenkého materiálu. Nejčastěji se využívá elektrotechnických papírů, ultra tenkých skel a polymerních a kovových folií o tloušťce 100 μm a méně. Tyto materiály se nejvíce používají v zobrazovací technice. [5][6]

Trvale tvarované substráty jsou tvarovány plastickou deformací. Musí se používat materiály, které plastickou deformaci vydrží, jinak dojde k prasknutí nebo zúžení substrátu. Méně tvárné komponenty lze umístit na pevné ostrůvky. [1][7]

Elasticky roztažitelná elektronika může projít velkou a reverzibilní deformací. Když je substrátem elastomer, jsou komponenty umístěny na tuhých ostrovech a jsou spojena elasticky roztažitelnými vodiči. [1]

2.2 Vlastnosti flexibilních substrátů

Substráty pro flexibilní elektroniku musí splňovat mnoho požadavků:

- Optické vlastnosti – Displeje s propustnými nebo vyzařujícími povrchy vyžadují opticky čisté substráty.
- Povrchová drsnost – Čím tenčí vodivý motiv, tím citlivější jsou elektrické vlastnosti na povrchovou drsnost.
- Tepelné a termodynamické vlastnosti – Pracovní teplota substrátu musí být kompatibilní s maximální výrobní teplotou. Nesoulad teplot mezi kontaktem součástky a substrátem během tepelného cyklu spojeného s výrobou, může způsobit poškození. Pravidlem pro přijatelný nesoulad je:

$$|\Delta CTE \cdot \Delta T| \leq 0,1 - 0,3 \quad (1)$$

Kde ΔCTE je rozdíl v koeficientech tepelné roztažnosti mezi substrátem a zařízením, a ΔT je teplotní výchylka během zpracování.

- Chemické vlastnosti – Substrát by neměl uvolňovat nečistoty a měl by být odolný vůči chemikáliím.
- Mechanické vlastnosti – Vysoký modul pružnosti činí substrát tuhým.
- Elektrické a magnetické vlastnosti – Vodivý motiv by měl mít dobrou elektrickou vodivost a nosná fólie by měla být dobré dielektrikum. Vodivé podklady mohou sloužit jako elektromagnetické stínění. [1]

2.3 Druhy flexibilních substrátů

Nejčastější materiály pro flexibilní substráty jsou: kovy, organické plasty a ohebné sklo. [1]

2.3.1 Tenká skla

Skleněné desky jsou standardním materiálem pro substráty používaných při výrobě plochých displejů. Sklo začne být flexibilní, pokud je jeho tloušťka snížena na několik stovek mikrometrů. V dnešní době je možné vyrobit sklo o nejmenší tloušťce 25 μm . Tenké sklo si zachovává veškeré vlastnosti skleněné desky, optickou propustnost až 90 %, hladký povrch s drsností 1 nm a méně, teplotní tolerance až 600 $^{\circ}\text{C}$, vysoká rozměrová stabilita, nízký koeficient teplotní roztažnosti, odolnost vůči většině chemických látek, nepropustnost kyslíku a vody a dobrá elektrická izolace. Bohužel je flexibilní sklo také velmi křehké a špatně se s ním manipuluje.[1][6]

2.3.2 Plastové fólie

Plastové fólie jsou velmi flexibilní, levné a je možno je zpracovávat pomocí metody roll to roll. Oproti skleněným fóliím jsou však rozměrově a tepelně méně stabilní a snadno jimi proniká kyslík a voda. Plastové fólie se navíc smršťují kvůli cyklům zahřívání a chlazení, toto smršťování lze omezit za použití žihání. Existují různé plastové fólie s různými vlastnostmi. Nejčastější je polyethylentereftalát (PET) a polyethylnaftalát (PEN). Mají dobrou optickou propustnost, větší než 85 %, absorbují málo vody a jejich teplotní odolnost je mezi 150 $^{\circ}\text{C}$ a 200 $^{\circ}\text{C}$. Žádný polymer však nespĺňuje náročné požadavky na nízkou propustnost v OLED aplikacích. [1]

2.3.3 Kovové fólie

Substráty z kovových fólií jsou atraktivní pro emisní nebo reflexní displeje které nepotřebují průhledné materiály. Pokud bude kovová folie tenčí než 125 μm začne být materiál flexibilní. Obecně platí že kovové substráty jsou odolnější než plastové a skleněné. Nerezová ocel se nejčastěji používá ve výzkumu díky své vysoké odolnosti proti korozi a chemickým látkám. Nerezové podklady mohou tolerovat procesní teplotu až 1000 $^{\circ}\text{C}$, jsou rozměrově stabilní, představují bariéru proti vlhkosti a kyslíku, mohou sloužit jako chladič nebo ochrana proti elektromagnetickému rušení. Nevýhodou je že ta nejlepší

válcovaná ocel má drsnost povrchu 100 nm, povrch se musí upravit pomocí leštění nebo tenkovrstvým povlakem, ten poskytne i elektrickou izolaci a chemickou odolnost. [1]

3 Elektricky vodivá lepidla

Elektricky vodivá lepidla (ECA) slouží k vytvoření elektrického spoje. Od pájek se lepidla liší jak strukturou, tak vlastnostmi. Díky tomu nám poskytují rozdílné výhody, například je lze prohlásit jako skoro ekologicky nezávadné. Tato lepidla mají typicky elektrický odpor $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, což je přibližně o dva řády vyšší než nejlepší kovové vodiče. Jejich vytvrzování pak probíhá v teplotách od 100 do 180 °C a trvá 30 až 120 minut. Existují i lepidla která se vytvrzují při běžné teplotě, ale jejich vytvrzení trvá třeba čtyři dny. Bezolovnaté pájky se taví až při teplotě nad 210°C. Díky nižší teplotě je možno lepidla využít u součástek citlivých na teplo. Další podstatnou výhodou je možnost připojování vývodů do rozteče 0,1 mm. [8][9][10]

Navzdory těmto výhodám trpí technologie lepení několika problémy. Těmi nejdůležitějšími je nižší vodivost než pájka, citlivost na typ a kvalitu vodivého motivu na substrátu a součástek a také citlivost na vlhkost. [10][11]

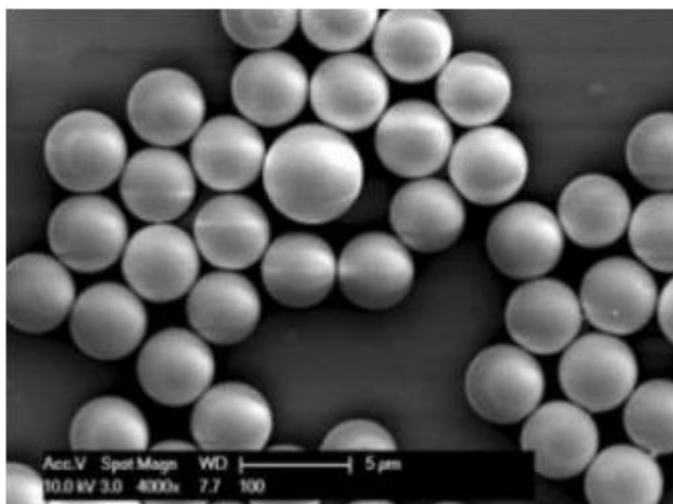
3.1 Struktura elektricky vodivých lepidel

Obecně lze říci že se ECA skládají ze dvou složek, vazební (binder) a plnivo (filler). [9]

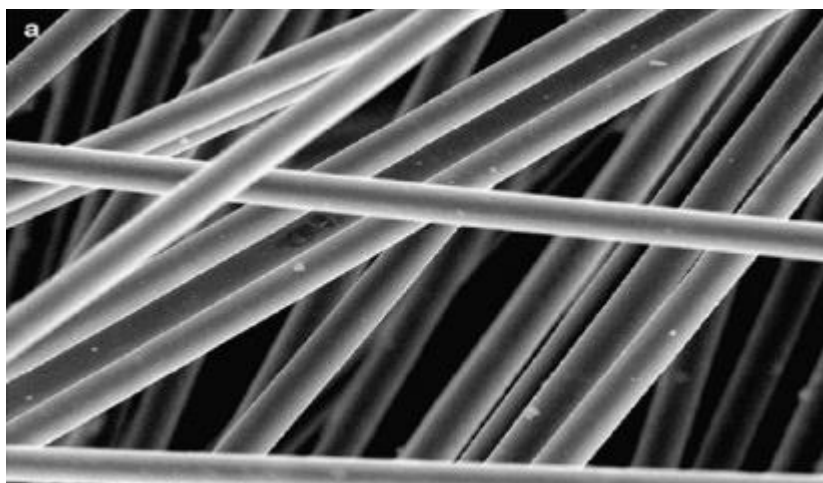
Vazební složka neboli pojivo je izolant a vytváří izolační matici která udržuje vodivé částice vodivé složky na svém místě, tak aby zamezila jejich pohybu. Pokud by se pohybu vodivých částic nezamezilo, došlo by k negativnímu ovlivnění vodivosti spoje. Dále zajišťuje mechanické vlastnosti spoje jako pevnost, houževnatost a přilnavost. Vazební složky jsou jednosložkové nebo dvousložkové, ty obsahují navíc ještě tvrdidlo. Nejčastěji používaná pojiva jsou epoxidové pryskyřice. Další méně používaná pojiva jsou pak silikonové nebo polyamidové pryskyřice. [8][9]

Vodivá složka neboli plnivo zajišťuje elektrické vlastnosti spoje jako je vodivost, ale ovlivňuje i jiné vlastnosti spoje jako třeba šum. Vodivá složka je tvořena vodivými částicemi kovů. Tyto částice se vyrábějí z různých kovů a mají různý tvar. Používá se například zlato, stříbro, nikl, paladium nebo měď, přičemž stříbro se vyskytuje nejčastěji. Lepidla, která mají zlaté nebo stříbrné částice mají nejlepší elektrické vlastnosti a tepelnou vodivost, jsou ale velmi drahá. Tyto kovové částice mají tvar kuliček o průměru 1 až 15

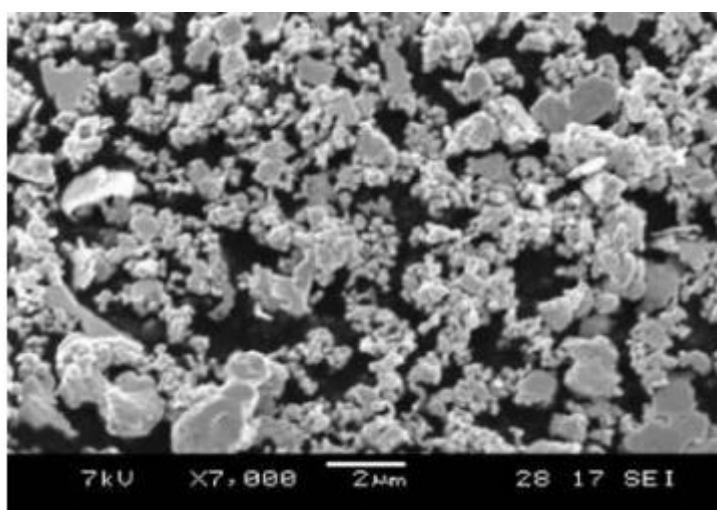
μm , ovšem v jednom lepidle jsou vždy kuličky stejné velikosti. Dalším vyskytujícím se tvarem jsou šupinky, které mají v jednom lepidle různé velikosti ale vždy v řádu mikrometrů. [8][9][10][11]



Obrázek 2. Stříbrné nanokuličky (převzato z [11])



Obrázek 3. Stříbrné nanovlákná (převzato z [11])



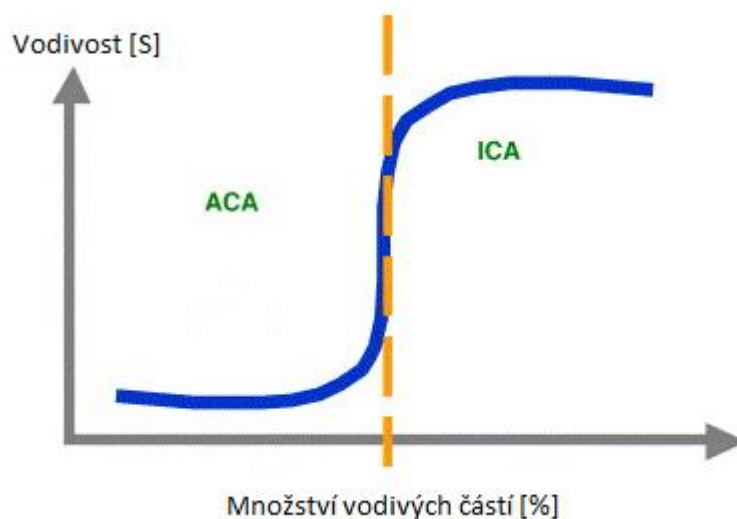
Obrázek 4. Stříbrné šupinky (převzato z [11])

3.2 Perkolační teorie

Elektricky vodivá lepidla se dělí na izotropní vodivá lepidla (ICA) a anizotropní vodivá lepidla (ACA), rozdíl mezi těmito lepidly nám určuje perkolační práh, který se určuje pomocí perkolační teorie. [12]

Ta nám říká že když je do polymerní matrice vloženo dostatečné množství elektricky vodivých částí, dojde k tomu že se vazební složka transformuje z izolátoru na vodič. Toho je dosaženo pomocí spojitých vazeb částic plniva. Probíhá-li náhodná disperze plniva do vazební složky, nedojde z počátku k žádné výrazné změně. Dokud se nedosáhne kritické koncentrace vodivých částic. Při kritické koncentraci dojde k tvorbě řetězců z vodivých částic, které překlenou kompozit a nastane značnému snižování elektrického odporu. Bod ve kterém k tomuto jevu dochází, se nazývá perkolační práh. [10]

Když objem plniva přesáhne perkolační práh jedná se pak o lepidlo s vodivostí ve všech směrech (ICA). Naopak pokud objem vodivých částic nepřesáhne perkolační práh bude se jednat o lepidlo vodivé pouze v jednom směru (ACA). [12]



Obrázek 5. Perkolační křivka (převzato z [12])

3.3 Druhy lepidel

Elektricky vodivá lepidla dělíme na dva druhy, speciálním druhem lepidla je lepidlo nevodivé.

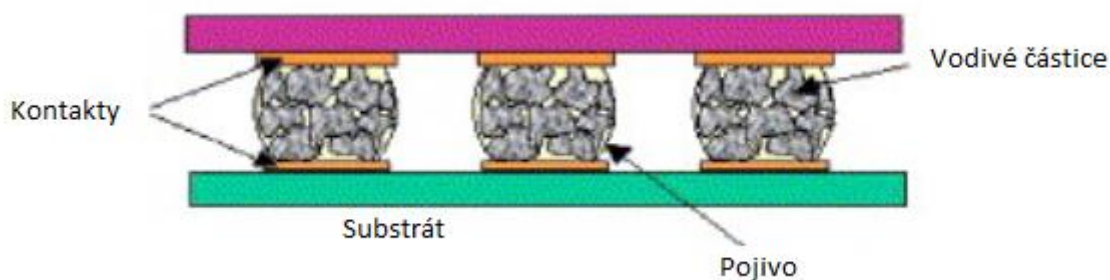
3.3.1 Izotropní vodivá lepidla

Izotropní vodivá lepidla lze považovat za obdobu pájky, stejně jako ony jsou vodivá ve všech směrech. Díky vysoké koncentraci plniva v polymerní matrici dojde k transformaci z izolantu na vodič. Plniva ovšem nesmí být použito zase příliš mnoho jinak by mohlo dojít ke zhoršení mechanických vlastností lepidla. Hustota plniva se pohybuje okolo 50 % až 80 %. Jako plnivo se obvykle používají šupinkové částice o velikosti 1 až 5 μm . [10][11][12][13][14]

Jako polymerní matrice se používají buď termosetové nebo termoplastické materiály. Termoplastické ICA se využívají především díky tomu, že jsou opětovně zpracovatelné. Bohužel při vysoké teplotě pak dochází k degradaci a taky obsahují rozpouštědla. Většina komerčně dostupných ICA je založena na termosetových pryskyřicích. Ty mají dobře vyvážené vlastnosti, jako přilnavost, chemickou odolnost a nízké náklady. [12][13]

Nejpoužívanějším plnivem jsou stříbrné částice. Stříbro je populární především pro vynikající vodivost, dobrou chemickou stabilitu a jeho oxidy jsou navíc velice vodivé. Zatímco oxidy většiny běžných kovů jsou dobré izolátory. [12][13]

ICA lze považovat za alternativu k pájkám v povrchových aplikacích, je třeba je pečlivě aplikovat pouze na místa která mají být vodivá. Jinému šíření lepidla by mělo být zabráněno. [12][13][14]



Obrázek 6. Princip ICA lepidla (převzato z [12])

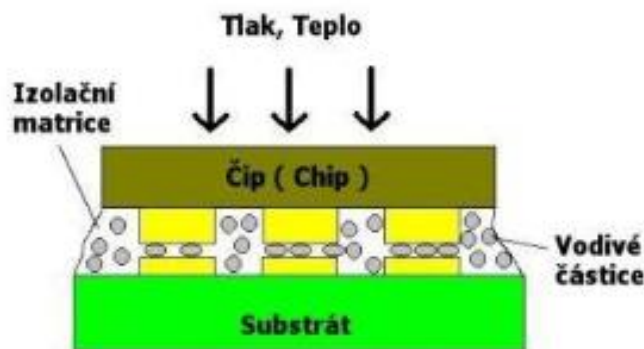
3.3.2 Anizotropní vodivá lepidla

Anizotropní lepidla poskytují elektrickou vodivost pouze v jednom směru, a to ve směru osy Z. Této jednosměrové vodivosti je dosaženo díky malé koncentraci vodivých částic v lepidle. Hustota částic je obvykle 10 % až 20 % a mívají kulovitý tvar o velikosti 5 až 20 μm . Částice jsou v lepidle náhodně rozptýleny ale existují i lepidla rovnoměrným rozložením plniva ve vazební složce. [12][13]

Během nanášení se lepidlo umístí mezi odpovídající kontakty a propojení ACA je vytvořeno za působení tlaku a tepla. Při zvýšené teplotě se adhezivní matrice přemění na kapalinu s nízkou viskozitou, přebytečné lepidlo tak může proudit ze spojů a vyplní prostor okolo kontaktů. Vodivé částice zůstanou zachyceny mezi kontakty a vytváří elektrické spojení. Díky tomu je elektrické vedení možné pouze ve směru osy Z. Zatímco ve směru osy X a Y se lepidlo chová jako izolant. Díky anizotropii lze tedy lepidlo nanést po celé kontaktní oblasti. [12][13]

Pro adhezivní matrice se využívají také termosetové nebo termoplastické materiály. Je ale důležité vybrat i vhodné materiály pro vodivé částice. Nejběžnějším typem je plastové jádro, které je následně potaženo dobrým vodičem. Nejpoužívanější je polymerová koule potažená niklem a následně čistým zlatem. Tyto částice dokáží poskytnout nejlepší kombinaci vlastností při mírných nákladech. [15]

Spoje ACA mají ve srovnání s pájením několik výhod. Proces je bez tavidla a nevyžaduje čištění. Teplota je nižší než u pájení a je možné použít materiály citlivé na teplo. Není třeba nanesení žádné ochranné vrstvy okolo kontaktů a nanesením lepidla na celou desku lze dosáhnout vysoké hustoty propojení. Bohužel ACA má oproti pájení větší kontaktní odpor a proudovou vodivost. [12]

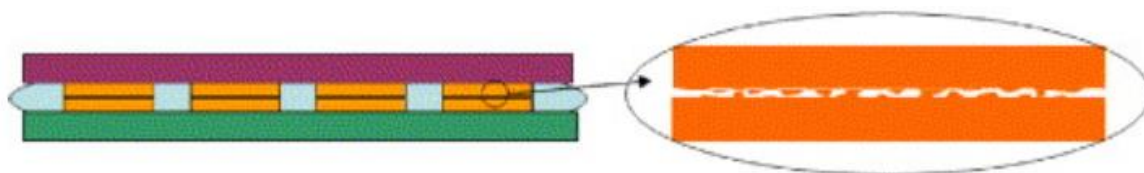


Obrázek 7. Princip ACA lepidla (převzato z [12])

3.3.3 Nevodivá lepidla

Vodivé lepené spoje lze vytvořit i pomocí lepidla bez vodivých částí. Elektrického spojení se v tomto případě dosáhne tak že kontakty jsou k sobě přitisknuty pod velkým tlakem a následně zality lepidlem a vytvrzeny. Kvalita spoje pak záleží na drsnosti povrchu kontaktů. [16]

Spoje vytvořené pomocí NCA mají mnoho výhod. Lepidlo nezpůsobí zkrat a je tak možno ho nanést na celou desku stejně jako u ACA, také není třeba řešit rozteče konektorů. Mezi další výhody patří hospodárnost, jednoduchost a vytvrzování při nízkých teplotách. [12]



Obrázek 8. Princip NCA (převzato z [12])

3.4 Nanášení elektricky vodivých lepidel

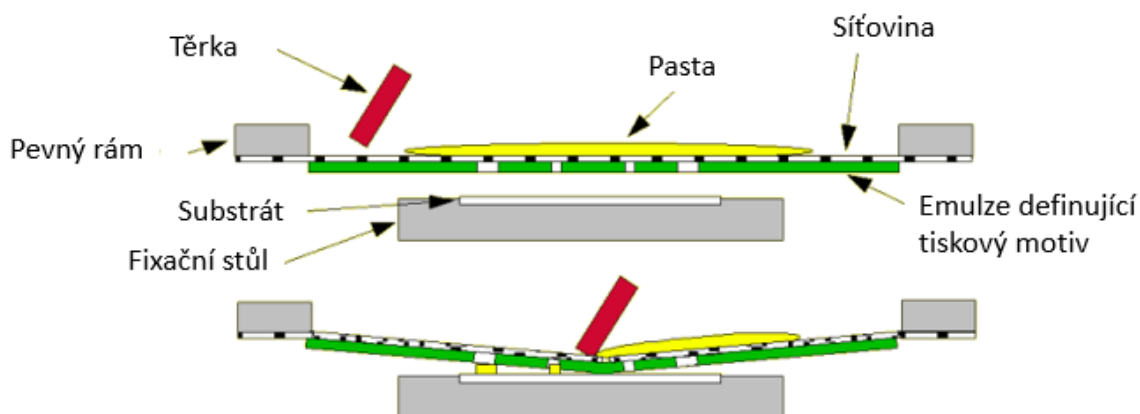
Elektricky vodivá lepidla můžeme na flexibilní substrát nanášet několika způsoby. Mezi základní způsoby nanášení lepidel patří tyto metody:

- Sítotisk
- Šablonový tisk

- Dispensing

3.4.1 Sítotisk

Základní tiskovou metodou v elektrotechnice je sítotisk. Principem technologie je nanášení lepidla na substrát skrze síto. Lepidlo se nanese na síto a třerka následně protlačí lepidlo skrze volná oka v sítu. Na nežádoucích místech jsou oka síta zaslepena maskou a lepidlo jimi neprojde. Celý proces probíhá v jednom kroku. Sítotisk se například také využívá k vytváření vodivých cest. [8]



Obrázek 9. Princip sítotisku (převzato z [17])

3.4.2 Šablonový tisk

Šablonový tisk je identický se sítotiskem, pouze síto je zde zaměněno za šablonu s otvory pro průchod lepidla. Šablona má lepší rozměrovou stabilitu, ale má nižší pružnost. Tloušťka tisku je tvořena tloušťkou šablony, která je během tisku položena přímo na substrátu. [8]

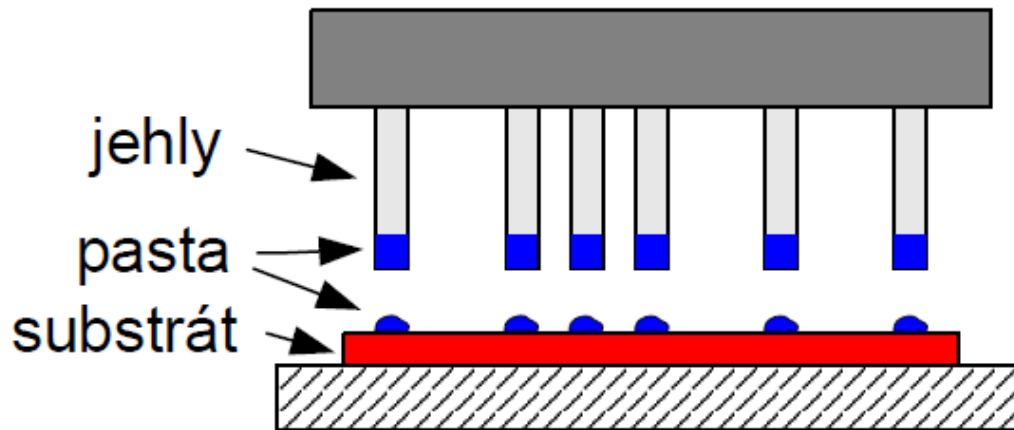


Obrázek 10. Princip šablonového tisku (převzato z [17])

3.4.3 Dispensing

Dispensing je proces kdy je lepidlo nanášeno dotykem nebo vytlačěním ze zásobníku. Existuje několik dispensingových technologií. Nejednodušší metodou pro nanášení lepidel je využití plných jehel. Jehla se ponoří do lepidla, přemístí nad substrát a dotykem se

přenesení lepidla. Další a přesnější možností je nanášení pomocí dutých jehel. Jehla se umístí nad substrát a následně je ze zásobníku vytlačeno požadované množství lepidla. Pro vytlačení pasty se používá buď píst se šroubovým posunem nebo vzduchové pumpy. U dutých i plných jehel lze zvýšit rychlost nanášení použitím více jehel naráz. Aby se dosáhlo ještě rychlejšího nanášení, byl vytvořen ještě bezkontaktní dispensing a jetting. [8]



Obrázek 11. Princip dispensingu (převzato z [17])

4 Testování flexibilní elektroniky

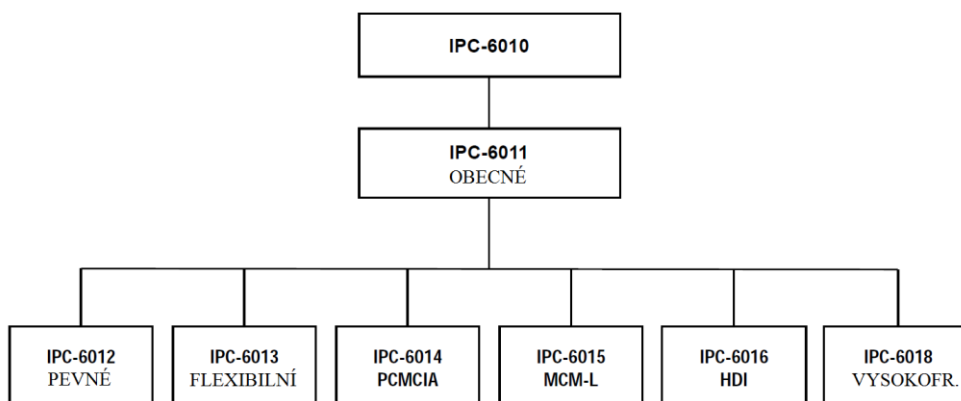
V oblasti flexibilní elektroniky je velký nedostatek standardů. Postupy pro testování odolnosti jsou vyvíjeny asociací výrobců tištěné elektroniky jako IPC nebo ASTM. Specifikace jsou vyvíjeny tak, aby poskytovaly společný základ pro pochopení toho, jak by měl výrobek vypadat a fungovat. Flexibilní elektronika je během své funkční doby velmi zatěžovaná, je proto potřeba testů, které prověří její vlastnosti. Testy provádí především výrobce. [18][19]

4.1 Testování flexibilní substrátů podle IPC

IPC standardy a publikace jsou navrženy tak, aby sloužily veřejnému zájmu prostřednictvím odstranění nedorozumění mezi výrobcem a zájemcem, zdokonalení produktů a podpory nákupu při výběru a dodání s minimálním zpožděním. [20]

Strategie dokumentace společnosti IPC spočívá v poskytování různých dokumentů, které se zaměřují na specifické aspekty problematiky. Vždy zde je obecná specifikace, která je doplněna o jeden nebo více dokumentů, z nichž každý poskytuje konkrétnější zaměření na problematiku. Je tedy nutné dodržovat hierarchickou strukturu norem a nedodržení všech informací které jsou obsaženy v nadřazené normě, může mít za následek konflikt z hlediska nepřijatelnosti. [20]

Testováním mechanických vlastností flexibilních substrátů se zabývá norma IPC-6013. Tato specifikace má poskytnout informace o podrobných výkonnostních kritériích pružných desek. Informace uvedené v této normě jsou také určeny k doplnění obecných požadavků identifikovaných v IPC-6011. [20]



Obrázek 12. Hierarchie norem IPC (převzato z [20])

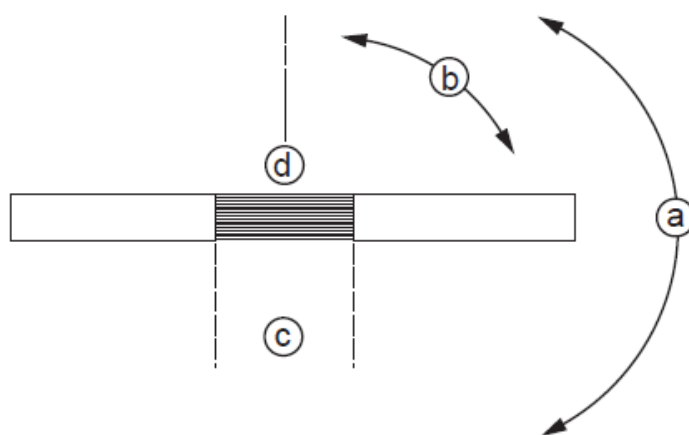
4.2 Vizuální kontrola

Podle normy IPC-6013 by měla být provedena vizuální kontrola při zvětšení 1,75 (přibližně tři dioptrie). Pokud je kontrola nejednoznačná a podezření na závadu přetrvává, měla by být kontrola opakována s postupně rostoucím zvětšením až do čtyřicetinasobku. [20]

4.3 Testování v ohybu

Testování ohybem je důležitým testem flexibilního substrátu, vzhledem jejich častému ohybovému namáhání. Pro zkoušku ohybem je třeba mít stanovené tyto základní parametry:

- a) Směr ohybu
- b) Úhel ohybu
- c) Počet cyklů ohybu
- d) Průměr trnu (válce)



Obrázek 13. Zkouška ohybem (převzato z [20])

Cyklus ohybu je definován jako ohýbání jednoho konce vzorku kolem trnu a následné ohnutí zpět do výchozí polohy. Dojde tedy k pohybu o 180° v jednom směru a k pohybu o 180° ve směru druhém. Druhou možností, jak definovat ohýbací cyklus je ohýbání obou konců vzorku okolo trnu směrem k sobě o 90° a následné navrácení do původní polohy. Stanovený počet cyklů ohybu musí být vykonán s trnem umístěným na jedné straně vzorku a s trnem umístěným na opačné straně. Po skončení ohybového testu v obou směrech, musí vzorek projít elektrickým měřením a vizuální kontrolou. [20]

Během testu v ohybu působí na vnější stranu vzorku napětí v tahu, zatímco na vnitřní stranu vzorku působí tlak. Vzorky, které mají vodivý motiv nanesený na vnější straně, jsou více náchylné k poruše. [19]

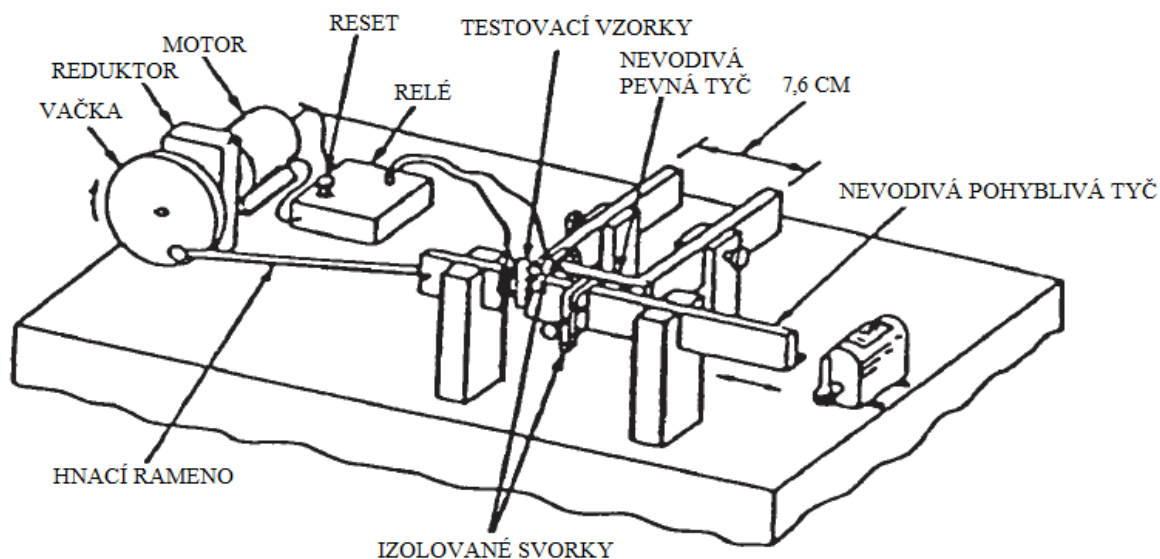
4.3.1 Výdrž v ohybu

Test pro testování výdrže v ohybu je popsán v IPC-TM-650, metoda 2.4.3. Účelem testu je zjistit kolikrát je možné substrát ohnout, než dojde k selhání. Za selhání považujeme přerušení vodivých cest na vzorku. Pro test by mělo být připraveno šest vzorků, jedná-li se o vzorky oboustranné tak šest vzorků pro každou stranu. Dle standardu by vzorky měli mít nanesený vodivý motiv s vodivými cestami v příčném směru substrátu, viz obrázek 14. [20]



Obrázek 14. Vzorek dle standardu IPC-TM-650, metoda 2.4.3 (převzato z [19])

Vzorky musí být před testem zkontrolovány, zda se na nich nevyskytují praskliny nebo jiné anomálie jako například škrábance. Vzorky, na kterých bude nějaké poškození je nutné vyřadit a nahradit jinými. Na konce vodivých cest každého vzorku se připevní krátký izolovaný drát, který bude během testu připojen k relé. Vzorek se upevní do testovacího zařízení podle obrázku 15, tak aby byl vodivý vzor na vnitřní straně smyčky. V počáteční poloze by měl být ohyb smyčky $6,4 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$. Maximální rychlost testování by neměla překročit 10 cyklů za minutu a minimální ohyb smyčky by měl být 25,4 mm. Testujeme, dokud nedojde k přerušení vodivých cest. Jakmile dojde k přerušení vodivých cest je vzorek vyřazen a lze testovat vzorek další. Výsledkem tohoto testu je průměrný počet cyklů, kterému byly vzorky vystaveny, než došlo k selhání. [19][20]



Obrázek 15. Zařízení pro testování (převzato z [20])

4.3.2 Testování tažnosti a ohebnosti

Při této zkušební metodě je stanovena schopnost vzorků zvládnout deformaci při namáhání v ohybu a pevnosti v tahu. Metodou se zabývá norma IPC-TM-650 metoda 2.4.2.1. Účelem testu je zjistit kolik cyklů vzorek vydrží, než dojde k jeho přetržení. Pro zkoušku je důležité, aby vzorky selhali mezi cykly 30 a 500. Výpočet tažnosti pro každý vzorek se řeší pomocí následující rovnice:

$$N_f^{-0.6} \cdot D_f^{0.75} + 0.9 \cdot \frac{S_u}{E} \cdot \left[\frac{\exp(D_f)}{0.36} \right] \cdot \left(0.1785 \log \frac{10^5}{N_f} \right) - \frac{2t_M}{2e+t} = 0 \quad (2)$$

D_f = únavová tažnost [%]

N_f = cykly k selhání [-]

S_u = mez pevnosti v tahu [N]

E = modul pružnosti [Pa]

t_M = tloušťka jádra [m]

t = tloušťka vzorku [m]

e = poloměr zakřivení trnu [m]

[20]

4.4 Testování v tahu

Další možností testování flexibilní elektroniky je testování v tahu. Tyto testy nejsou tak časté jako testy pro ohyb. Pevností v tahu a prodloužením se zabývá norma IPC-TM-650 metoda 2. 4. 19 a předmětem této zkoušky je stanovení pevnosti v tahu a prodloužení na vzorcích vystavených mechanickému zatížení. Zkušební vzorky se skládají z proužku pružného materiálu o délce 152,4 mm a šířce 12,7 mm. Používá se minimálně deset

vzorků, pět pro směr ze stroje a pět pro příčný směr. Vzorky by měli být nařezané za pomoci hladkého a přesného držáku, který vytváří hladké a nenarušené hrany. Eventuelně je možné vzorky brousit na okrajích 400 – 600 brusným papírem. Před testováním je třeba aby, vzorky kvůli stabilizaci byly uskladněny po dobu 24 hodin při teplotě $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a $50\% \pm 5\%$ relativní vlhkosti. Pokud jsou předloženy důkazy, že je možno stabilizace dosáhnout v kratším čase, je možno stabilizační dobu zkrátit. Vzorky musí být změřeny na několika místech jeho délky, aby se dala vypočítat minimální plocha průřezu. V případě že testovaný materiál je něčím potažený, ignorujeme tloušťku potahu. Předpokládá se, že nijak tahové vlastnosti materiálu neovlivňuje, a použijeme jmenovitou tloušťku materiálu pro výpočet. [21]

Vzorky jsou upnuty do svorek zařízení, které jsou nastaveny na vzdálenost 101,6 mm od sebe a rychlost oddalování svorek nastavena na 50,8 mm za minutu. Pevnost v tahu získáme ze vzorce:

$$\sigma_n = \frac{F}{S} \quad (3)$$

F = síla při přetržení [N]

S = průřez plochy [m²]

Prodloužení získáme ze vzorce:

$$\frac{D2-D1}{D1} \cdot 100 = \varepsilon \quad (4)$$

ε = prodloužení [%]

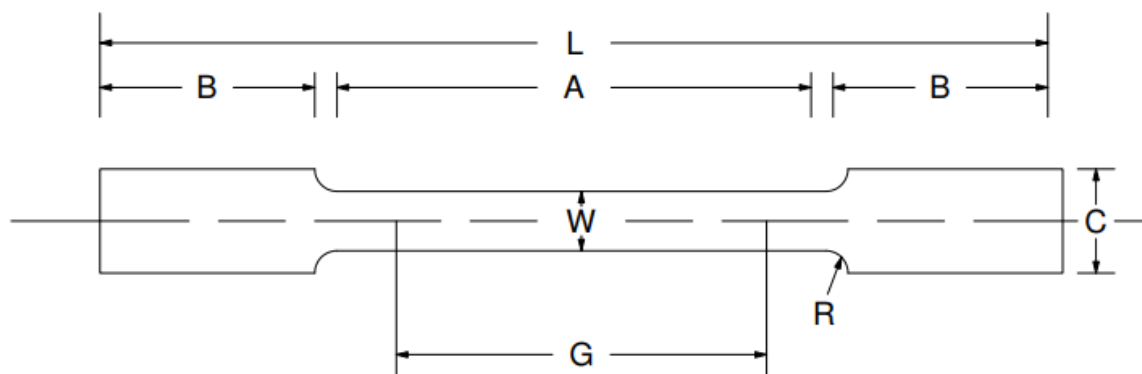
D1 = počáteční vzdálenost svorek [m]

D2 = vzdálenost svorek při přetržení [m]

Výsledné hodnoty pro pevnost v tahu a prodloužením získáme z průměrné hodnoty všech testů v daném směru. [21]

4.5 Pevnost v tahu a prodloužení kovových folií

Testování flexibilních vlastností kovových folií o tloušťce menší než 0,15 mm při pokojové teplotě se věnuje norma ASTM E-345. Tato zkouška poskytuje informace o pevnosti a vodivosti materiálu při jednoosých tahových napětích. Tato metoda využívá dva typy vzorků, typ A a typ B. Vzorky se liší tvarem, velikostí a přípravou. [22][23]



Obrázek 16. Schéma vzorku typu A pro zkoušku v tahu [22]

G = Délka kalibru

W = Šířka

R = Zakřivení vzorku

L = Délka vzorku

A = Délka zkrácené části vzorku

B = Délka upínací části

C = Šířka upínací části

Tabulka 1. Rozměry vzorků [22]

	Typ A [mm]	Typ B [mm]
G	50 ± 0.1	125
W	12.50 ± 0.25	12.5
R	19	-
L	200	230
A	60	-
B	50	-
C	20	12.5

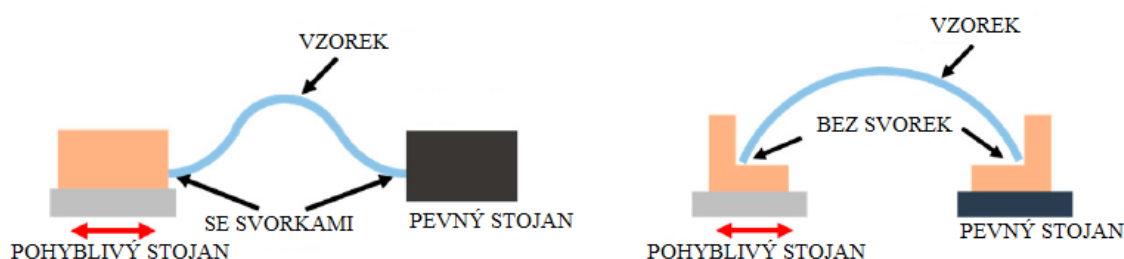
Vzorky by měli projít vizuální kontrolou při 20x zvětšení, aby došlo k odhalení defektů jako rýhy a škrábance, takovéto vzorky musí být vyřazeny a nahrazeny. V případě že vzorek je tenčí než 0,05 mm a nelze jej změřit s přesností 2 %, se vzorky váží dle normy ASTM E-252. Způsob výpočtů flexibilních vlastností je stejný jako u výše popsanych metod. Norma IPC-TM-650 metoda 2. 4. 18 se zabývá testováním měděných folií při zvýšené teplotě. [22]

4.6 Další způsoby testování flexibilních substrátů

Existuje mnoho metod pro testování flexibilních substrátů, které nejsou standardizovány. Tyto metody jsou popsány v následujících kapitolách.

4.6.1 Testování pomocí posuvné plošiny

Jedním ze způsobů, jak testovat elektricky vodivé motivy na flexibilních substrátech, je speciální přístroj pro ohybovou zkoušku s posuvnou plošinou. Tento přístroj se skládá z motoru, dvou úchytů a kolejnice. Substrát se upne do fixního stojanu jedním koncem a druhým koncem je upnut na pohyblivý stojan umístěný na kolejnici. Motor následně lineárně pohybuje pohyblivým stojanem a mění vzdálenost mezi úchytnými body, díky tomu dochází k ohybu substrátu. Pokud je substrát připevněn svorkami dochází k deformaci nejen na jeho středu, ale pohybové napětí se soustředí také na jeho koncích v blízkosti svorek. Jsou-li oba konce substrátu volně, bez svorek, deformace v ohybu a napětí jsou pak relativně rovnoměrně rozloženy. [19][24]



Obrázek 17. Testování pomocí posuvné plošiny (převzato z [24])

Tato zkouška může být prováděna dvěma způsoby, pro vnější nebo vnitřní ohyb. Zkouška vnitřního ohybu ohýbá vzorek v konvexním tvaru (\cap), vyvíjí na vodivý motiv tahové napětí. Zatímco zkouška vnitřního ohybu v konkávním tvaru (\cup) vyvíjí napětí v tlaku. Poloměr ohybu na středu vzorku získáme z rovnice:

$$r = \frac{L}{2\pi \sqrt{\frac{dL}{L} - \frac{\pi^2 h_s^2}{12L^2}}} \quad (5)$$

L = počáteční délka vzorku [m]
 dL = rychlost změny délky vzorku
 h_s = tloušťka vzorku [m]

Ohybové napětí vodivého motivu pak můžeme vypočítat jako:

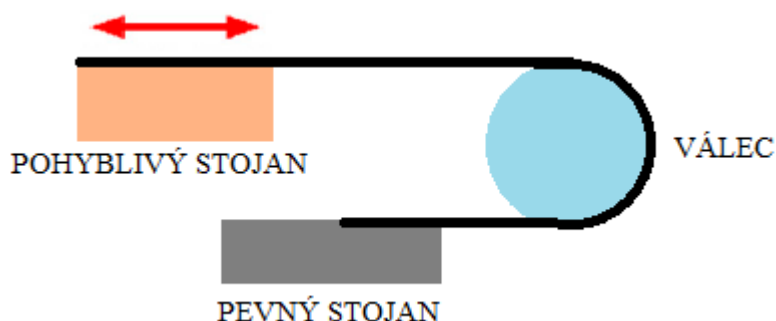
$$\varepsilon \cong \frac{h_f + h_s}{2r} \quad (6)$$

h_f = Tloušťka vodivého motivu [m]
 [25]

Test ohýbání pomocí posuvných destiček je jednoduchý a užitečný pro získání dat s vysokým počtem ohybů. Testovaný vzorek se ale ohýbá volně a poloměr ohybu nelze řídit, také je obtížné získat poloměr ohybu menší než 1.5 mm. [3]

4.6.2 Testování pomocí navíjení

Aby bylo dosaženo ohybu s malým a řízeným poloměrem byla navržena zařízení kde se vzorek ohýbá pomocí válce. Na tomto zařízení je vzorek připevněn k pevné a posuvné ploše a ovinut kolem tyče či válce požadovaného průměru. Válec je v tomto zařízení uložený v páru kolejnic a zatížený párem pružin s malou pružinovou konstantou. Díky tomu je testovaný vzorek vždy pod malým napětím a tlačí na povrch tyče. [3]



Obrázek 18. Princip testování pomocí válce

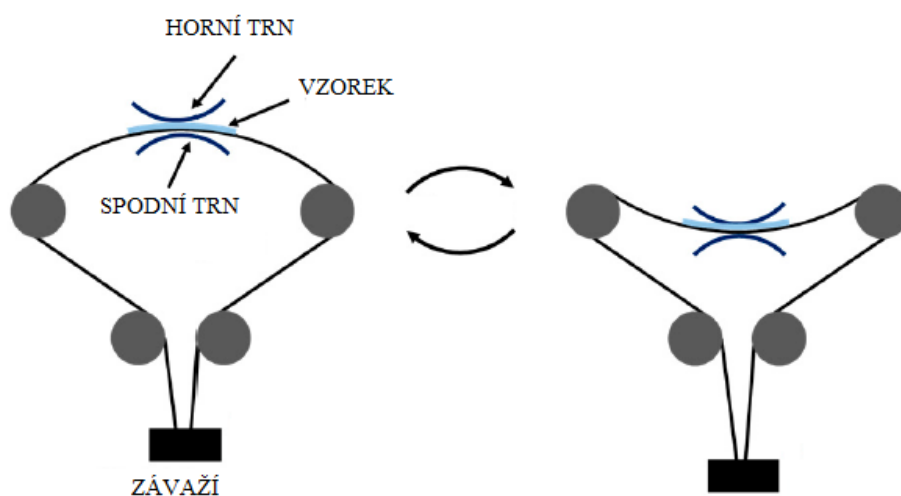
Ve srovnání s předchozí metodou poskytuje tato metoda výhody při řízení poloměru ohybu a při vystavení velké oblasti vzorku stejnému ohybu. Existují však také nevýhody této metody. Konkávní ohýbání bez ochranné vrstvy je problematické, protože pohyb na povrchu válce může snadno poškodit vodivý motiv, to může být problém i pro konvexní ohýbání. [3]

Aby se zabránilo této deformaci byla metoda modifikována na testování pružnosti na pásu. Namísto přímého ovinutí vzorku okolo válce je zde flexibilní substrát připevněn na flexibilní pás a ten je následně ovinut kolem válce. V tomto případě je pak většina napětí odebírána pásem a nikoliv vzorkem. [3]

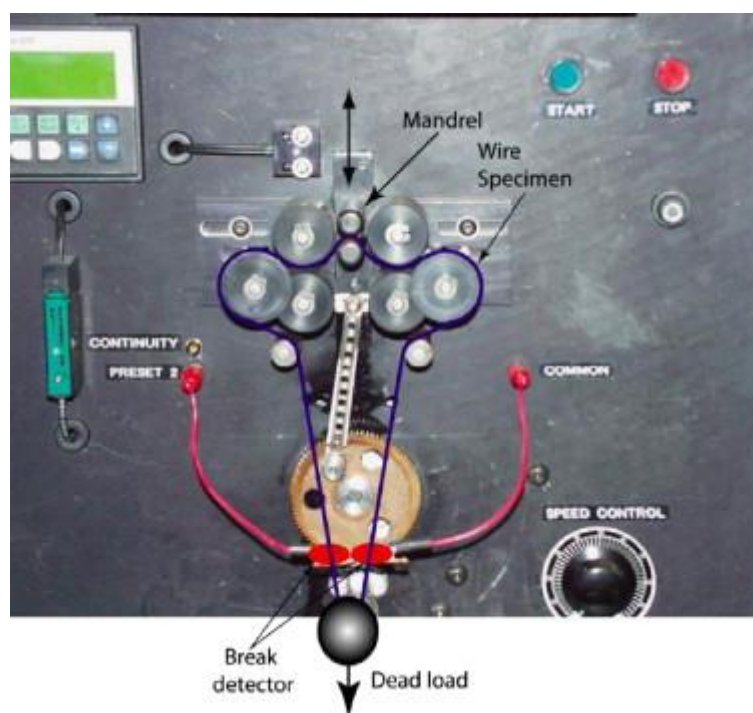
4.6.3 Testování pomocí vychylování trnů

Další metodou pro testování flexibilních substrátů je vychylování trnů. Vzorek se umístí mezi stejně velké trny vybraných rozměrů. Trny pak tlačí vzorek nahoru a dolů pro cyklické namáhání, tento pohyb na vzorku vytváří dobře definovaný poloměr zakřivení. Pohyb trnů je realizován pomocí ramene spojeného s otáčivou vačkou. Pro zajištění

stabilního ukotvení substrátu a zajištění jeho pohybu od trnů, je k němu pomocí drátů připojeno závaží. Během testování dochází k vertikálnímu pohybu tohoto závaží a vznikají vibrace, k jejich eliminaci slouží válce, skrz které prochází spojovací drát. Doporučuje se testovat s rychlostí 60 cyklů za minutu, aby se minimalizovalo jakékoliv zahřívání, které by mohlo během testování nastat. Vzorek je během testování připojen k měřicímu zařízení, které zastaví testování dojde-li k přerušení vodivých cest. Tato metoda umožňuje symetrické zatížení, cyklickou únavu, konstantní amplitudu deformace během zkoušky a schopnost nastavit amplitudy napětí pro rozsah od nízko cyklové únavy až po únavu vysokých cyklů. [26]



Obrázek 19. Princip testování pomocí vychylování trnů (převzato z [24])

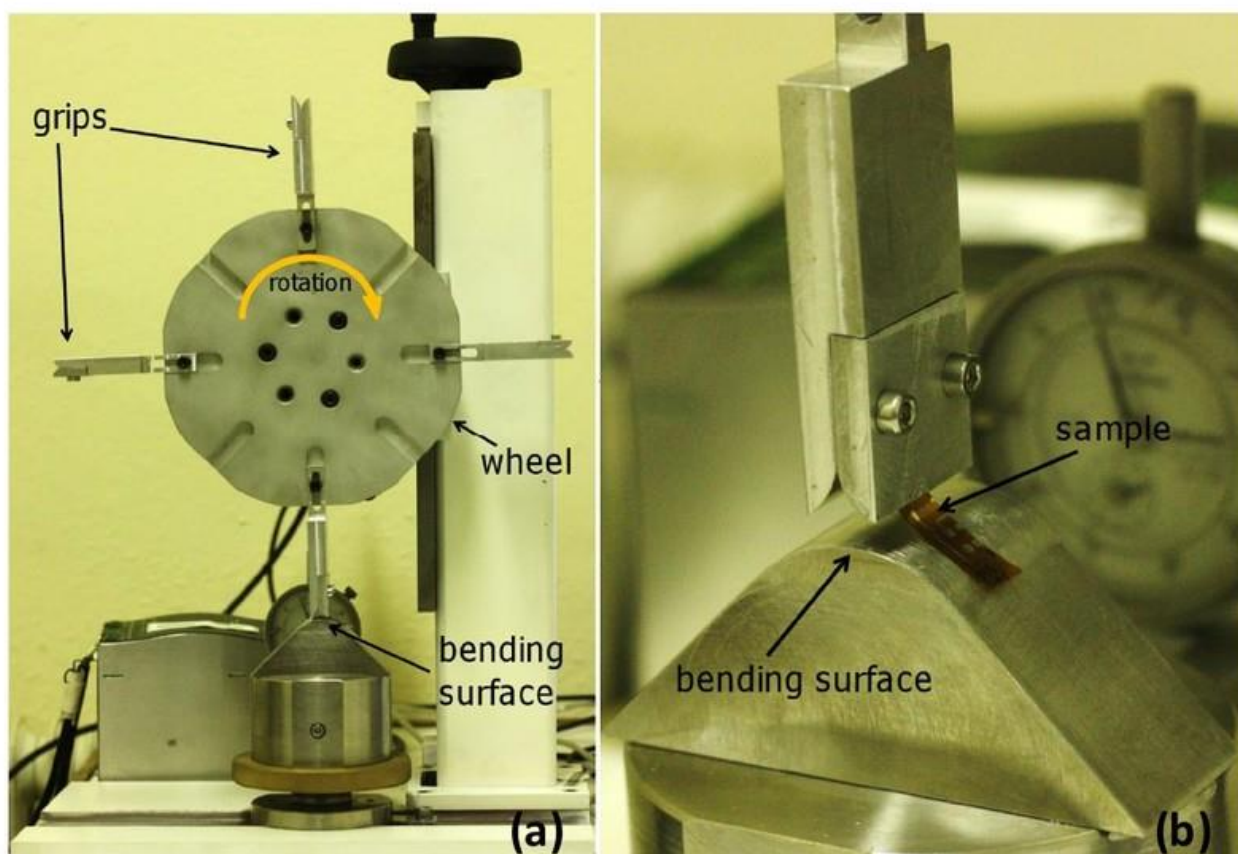


Obrázek 20. Zařízení pro testování pomocí vychylování trnů (převzato z [26])

4.6.4 Flex-E-Test

Technologie pro testování flexibilní elektrotechniky Flex-E-Test byla vyvinuta spoluprací firmy NanoTecCenter Weiz a Institutu Materiálových věd Ericha Schmida v Rakousku. [27]

Hlavní částí konstrukce je otáčivé kolo s osmi drážkami pro držáky vzorků. Vzorek se upevní do zakřivených úchytů, které definují poloměr zakřivení. Další částí zařízení jsou ohybové plochy, do kterých vzorky narážejí a ohýbají se o ně. Vzdálenost mezi úchyttem a ohybovým povrchem lze nastavit tak aby se se zajistilo úplné ohnutí vzorků. Pomocí softwaru lze nastavit směr, rychlost otáčení a počet cyklů. Díky schopnosti testovat až 8 vzorků najednou je metoda velmi rychlá. Umožňuje také testovat vzorky v obou směrech ohybu a poloměr zakřivení je zde přesně definovaný. Během testování ale nelze provádět elektrické měření. [27]



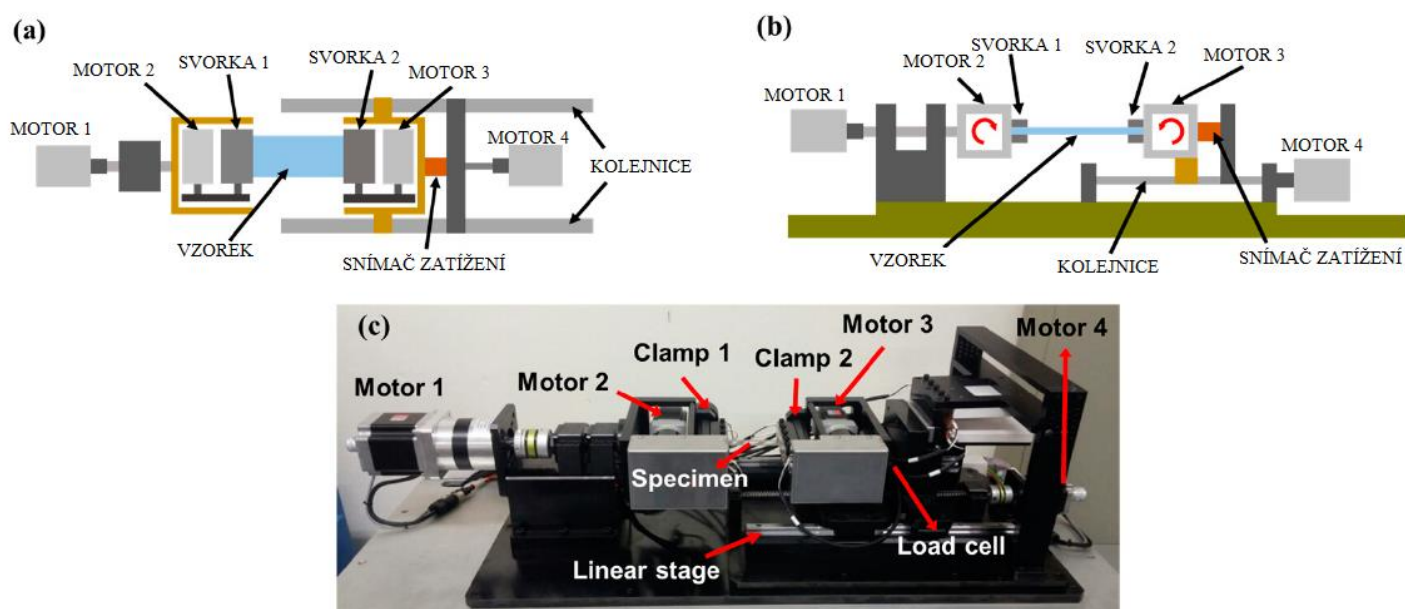
Obrázek 21. Zařízení Flex-E-Test (převzato z [27])

4.6.5 Univerzální testovací zařízení

V reakci na růst oblastí aplikace flexibilní elektroniky a její vystavení různým mechanickým deformacím je vyžadováno velké množství zkoušek a zařízení které je provedou. Obvyklé testovací zařízení může zvládnout jednu zkušební metodu, proto je pro testování různých deformací potřeba různých zařízení. Navíc tyto zařízení nemohou vyvolat složité deformace jako ohyb a krut najednou. [24]

Z těchto důvodů byl v Koreji vyvinut univerzální testovací přístroj pro flexibilní elektroniku, který může poskytnout různé zkušební metody jako ohýbání, kroucení, protahování nebo možnost provádět dvě operace najednou. [24]

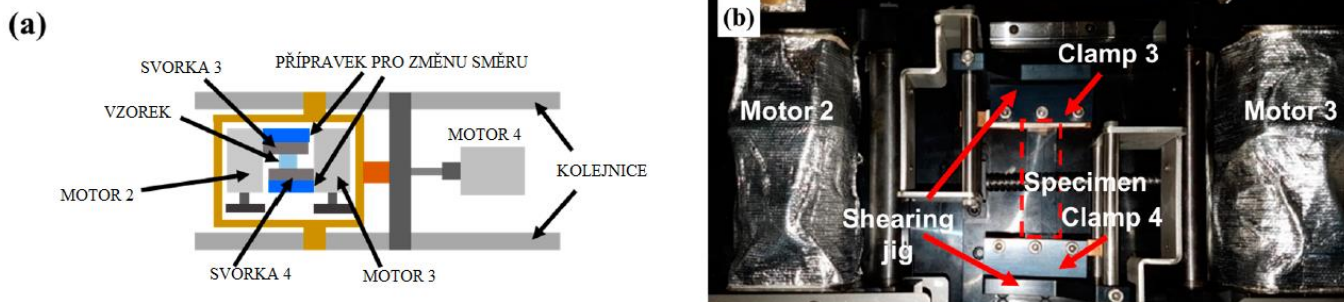
Zařízení je rozděleno do tří částí. Mechanická část, která provádí deformace se skládá ze čtyř krokových motorů, posuvné kolejnice a kuličkového šroubu. Měřicí část, tvoří zařízení pro měření odporu a snímače pro měření mechanického napětí na vzorku v reálném čase. Poslední částí je řídicí jednotka, ta je založena na systému TwinCAT3, který provádí zpracování signálů a řízení pohybu motorů, což umožňuje nastavení velikosti a frekvence cyklického zatížení. [24]



Obrázek 22. Univerzální testovací přístroj, a) Schématický pohled z hora, b) Schématický pohled z boku, c) skutečná fotografie zařízení (převzato z [24])

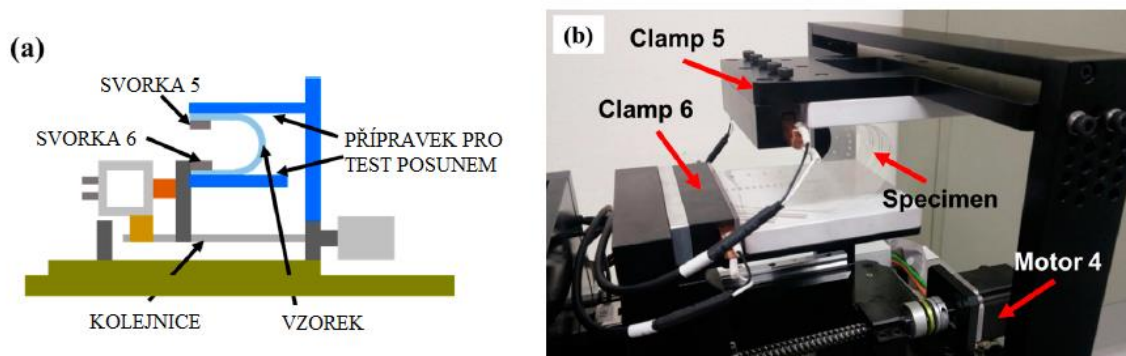
Svorky zařízení kromě upevnění vzorku také připojují elektrody pro měření odporu vzorku. Na obrázku 23. můžeme vidět základní konfiguraci zařízení pro zkoušku ohybu,

kroucení a protažení. Zkouška tahu může být prováděna pohybem svorky 2 po kolejnici za pomoci motoru 4, krut je realizován pohybem svorky 1 pomocí motoru 1. [24]



Obrázek 23. Konfigurace pro zkoušku smykem, a) schéma, b) fotografie (převzato z [24])

Na obrázku 24. je zobrazena konfigurace pro zkoušku smykem, do které je přidáno zařízení, pro změnu směru vzorku tak aby byl kolmý k lineárnímu pohybu vytvářeným motorem 4. Na obrázku 25. je znázorněna konfigurace pro test posunem, kdy motor 4 lineárně pohybuje svorkou 6 a aplikuje na vzorek posuvný pohyb. [24]



Obrázek 24. Konfigurace pro zkoušku posunem, a) schéma, b) fotografie (převzato z [24])

5 Praktická část

V této části se zaměřím na zkoušení ohybu elektricky vodivých lepených spojů mezi SMD odporem a vodivým vzorem na flexibilních substrátech. V experimentu jsou využity dva typy elektricky vodivých lepidel, EPO-TEK E4110 a MG 8331S a dva flexibilní substráty, kaptonová fólie s měděným vzorem a PET fólie se vzorem ze stříbra. Tyto substráty osazené součástkami jsem vystavil ohybové zkoušce a prozkoumal změnu vlastností lepeného spoje.

5.1 Příprava vzorků

Nejprve bylo potřeba navrhnout vzorky pro zvolený experiment. V této kapitole popíši použité substráty, lepidla, jejich vlastnosti a návrh vodivého motivu.

5.1.1 Použité substráty

Jako první (běžný) substrát byl zvolen flexibilní kaptonový substrát od společnosti PragoBoard s.r.o. Tento substrát se skládá ze 100 μm kaptonové fólie a 18 μm čistého měděného motivu, bez lepidla mezi těmito vrstvami. Tento materiál je ideální pro aplikace s vícevrstevným ohýbáním, pevnými ohyby, které vyžadují pokročilý materiálový výkon, odolnost vůči teplotě a vysokou spolehlivost.[28]

Druhým použitým materiálem je PET fólie MELINEX ST504. jedná se o polyesterovou fólii, která je opticky čistá, vysoce lesklá a tepelně stabilní. Lze ji potisknout velkou škálou inkoustů, laků, stříbrných vodivých či dielektrických inkoustů. Fólie se zpracovává pouze na jedné straně, aby se zvýšila přilnavost. [29]

Tabulka 2. Teplotní vlastnosti PET fólie MELINEX ST504 [29]

Hygroskopický koeficient roztažnosti při 40 % - 80 % RH	$6 \cdot 10^6$
Koeficient termální roztažnosti při teplotě 20°C – 50 °C	$10 \cdot 10^6$
Teplota tání	265 °C
Smršťování při teplotě 150 °C na 30 min	0.15%

Vodivý motiv na substrátu byl vytvořen pomocí sítotisku a jako inkoust byla použita stříbrná pasta DuPont PE873. Tato pasta se hodí pro nízkonapěťové obvody na flexibilních fóliích nebo textilních podkladech. Mezi důležité vlastnosti pasty patří vynikající roztažitelnost, vodivost a je kompatibilní s termoplastickými polyuretanovými fóliemi a

výběrem syntetických tkanin. Vytvrzování inkoustu probíhá při teplotě 100 °C – 160 °C po dobu 2 – 10 minut v dobře větrané troubě.[30]

5.1.2 Použitá lepidla

Pro realizaci lepených spojů byli vybrány dvě lepidla. Obě lepidla jsou izotropní, dvousložková, na bázi epoxidu se stříbrnými vločkami.

První použité lepidlo bylo MG 8331S od MG Chemicals. Jedná se o dvousložkové, stříbrné, pastovité lepidlo. Po vytvrzení je vysoce elektricky a tepelně vodivé. Dobře přilne ke kovům, sklu a většině platů používaných v elektrotechnice. Lepidlo je silně odolné proti vodě, solnému roztoku nebo kyselinám, skladuje se při pokojové teplotě a vydrží déle než tři roky. Lze jej tvrdit při různých teplotách. [31]

Tabulka 3. Parametry lepidla MG 8331S [31]

Doporučená pracovní teplota	-40 °C – 150 °C
Parametry tvrzení	100 °C / 40 min
	80 °C / 1 Hod
	65 °C / 2 hod
Tepelná vodivost	0.85 W / m*K
Rezistivita při 23 °C (150 °C / 1 hodina)	6 mΩ*cm
Zkouška ve smyku	4.8 N / mm ²
Skladovatelnost	≥ 3 rok / 22 °C – 27 °C
Zpracovatelnost	4 hod

Druhé použité lepidlo bylo EPO-TEK E4110 od firmy Epoxy Technology. Jedná se o elektricky vodivou, epoxidovou pastu se stříbrem. Lepidlo se dodává ve dvou složkách, které je před použitím důležité dobře promíchat. Poměr směsi je 10:1 a výsledná konzistence je tekoucí pasta. Doporučená doba vytvrzování je 150 °C na jednu hodinu. Lze ho ale vytvrdit i jiných podmínkách, minimálně při 23 °C po dobu tří dnů. Výsledné vlastnosti lepidla se pak mohou lišit. [32]

Tabulka 4. Parametry lepidla EPO-TEK E4110 [32]

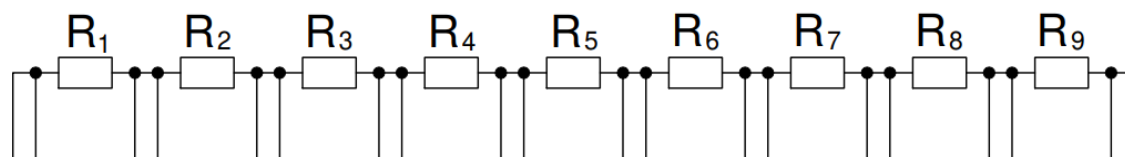
Doporučená pracovní teplota	< 250 °C
Parametry tvrzení	100 °C / 1 hod 80 °C / Hod 60 °C / 6 hod 23 °C / 3 dny
Tepelná vodivost	1.4 W / m·K
Rezistivita při 23 °C (150 °C / 1 hodina)	≤ 0.5 mΩ*cm
Rezistivita při 23 °C (25 °C / 3 dny)	≤ 9 mΩ*cm
Zkouška ve smyku	8,7 N / mm ²
Skladovatelnost	1 rok / 25 °C
Zpracovatelnost	4 hod

5.1.3 Návrh vodivého motivu

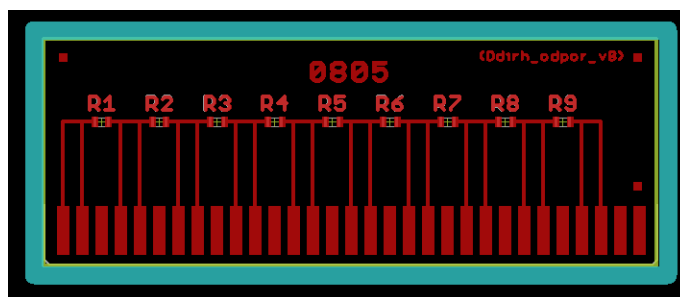
Bylo rozhodnuto že se vzorky budou měřit čtyřbodovou metodou napětí a proud pro zjištění odporu. Ten bude měřen na rezistorech SMD 0805 s nulovou hodnotou odporu. Na substrátu bylo umístěno celkem devět (osm) odporů. Měření bylo prováděno na zařízení Keithley 2701. Aby bylo možné vzorky k zařízení připojit bylo potřeba navrhnout vodivý motiv s konektorem kompatibilní s propojovacím přípravkem již zmíněného zařízení.

Vodivý motiv byl navržen v programu Eagle, který je volně ke stažení na oficiálních stránkách firmy Autodesk. Jedná se o software navržený pro tvorbu elektronického designu. Umožňuje projektantovi desky plošných spojů vytvořit, propojovat schéma a umístit komponenty na desku.

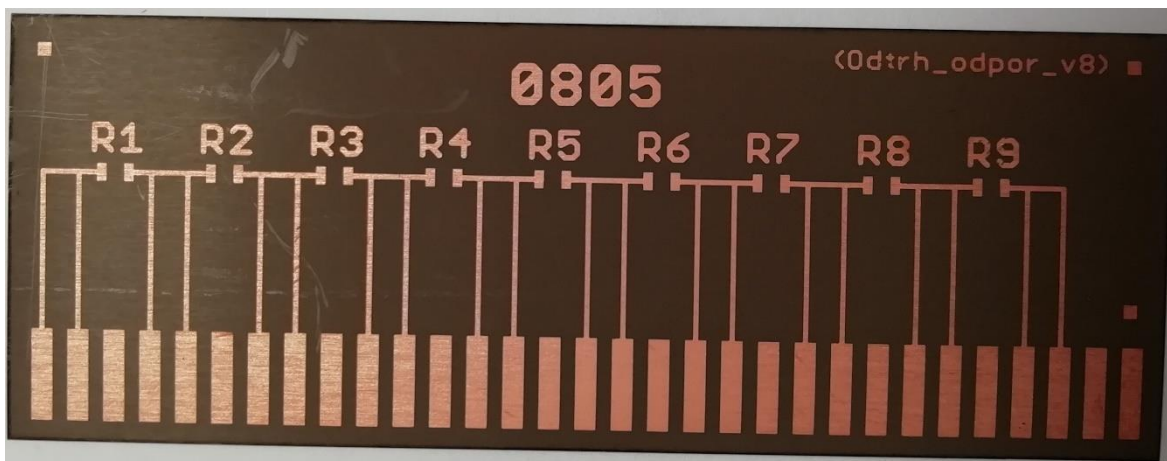
Na kaptonovém substrátu byla řada plošek pro rezistory umístěna na střed substrátu, horizontálně v délce substrátu a vyvedeny na spodní hranu substrátu na konektor. Konektor má 31 pinů, střídavě byly obsazeny vždy dva a následně jeden vynechán. Vodivé cesty mají tloušťku 18 μm.



Obrázek 25. Schéma zapojení odporů na kaptonové fólii

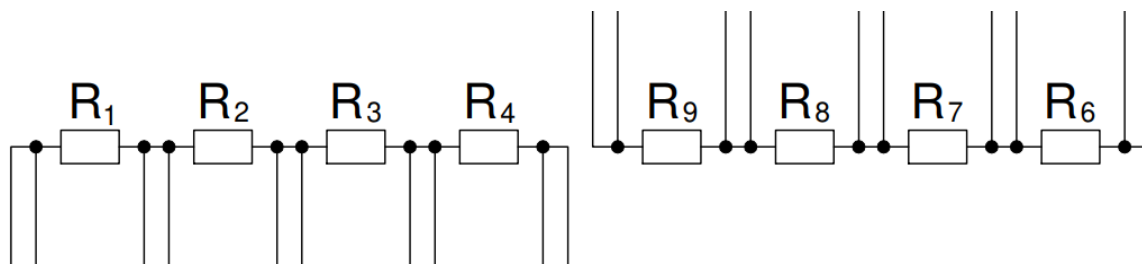


Obrázek 26. Návrh desky kaptonové fólie v programu Eagle

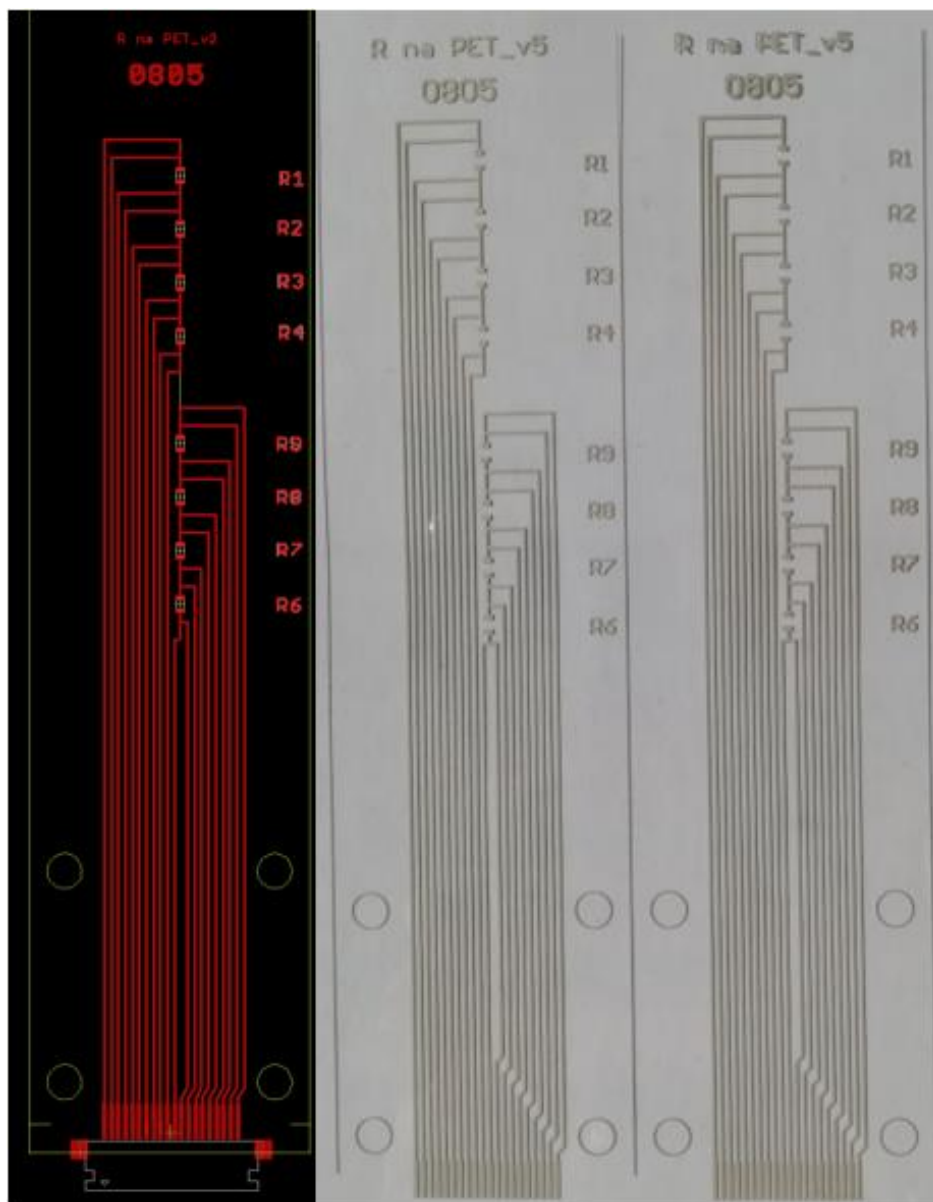


Obrázek 27. Fotografie hotového substrátu

Na PET substrátu byla řada plošek pro rezistory umístěna na střed ve vertikálním směru a následně vedeny na spodní hranu kde je umístěn konektor. Zde se ukázal problém s připojením všech rezistorů popořadě tak aby je bylo možno připojit. Zatímco odpory R_1 až R_4 byly vyvedeny na levou stranu a vedeny ke konektoru, odpor R_5 by už musel být vyveden napravo a následně by cesta musela vést pod ním což by znemožnilo umístění dalšího odporu. Tento problém byl vyřešen odstraněním R_5 a následným otočením pořadí rezistorů, tudíž po R_4 následuje R_9 až R_6 . Tyto spodní odpory jsou vyvedené do leva a připojeny ke konektoru tak že R_9 je poslední. Vodivé cesty jsou tlusté $16\ \mu\text{m}$, až na konektor, který má cestu $20\ \mu\text{m}$. Vzdálenost spojení vodičů od plošek pro rezistory jsou všude stejné kvůli porovnání.



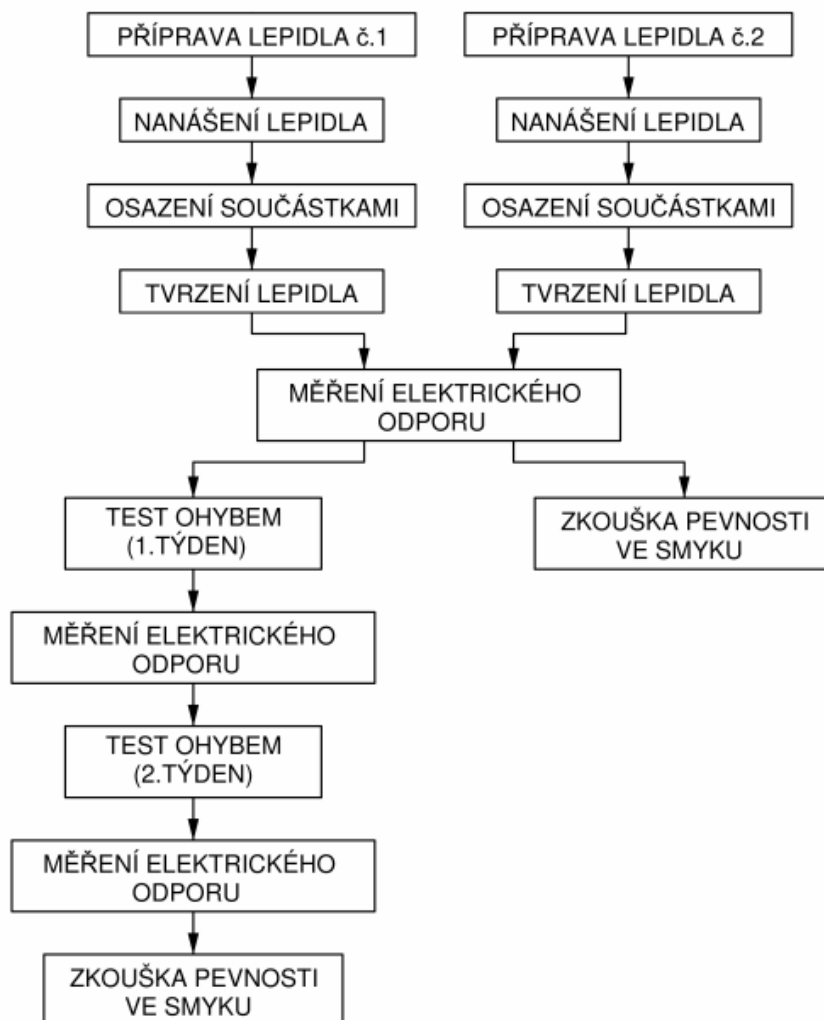
Obrázek 28. Schéma zapojení odporů na PET fólii



Obrázek 29. Návrh desky v programu Eagle a skutečná fotografie substrátu

5.2 Popis experimentu

V následující kapitole bude popsán provedený experiment, postup experimentem je graficky znázorněn na obrázku 31.



Obrázek 30. Postup realizovaného experimentu

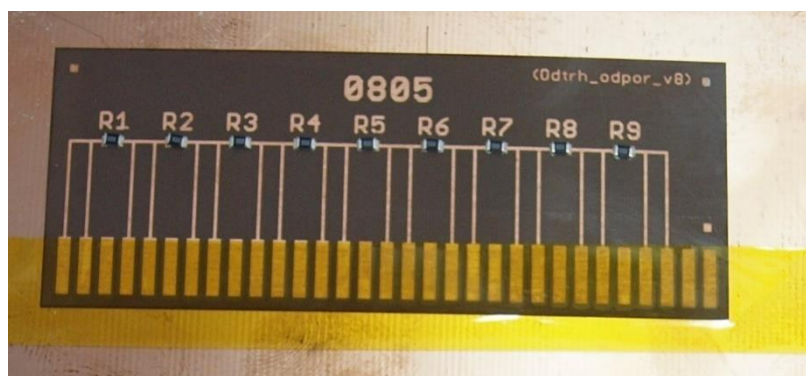
5.2.1 Výroba vzorků

Po navrhnutí, vyrobení a dodání flexibilních substrátů přišla na řadu výroba vzorků. Nejprve bylo nutné připravit si lepidlo. Začalo se lepidlem MG 8331S od MG Chemicals (dále jen lepidlo č. 1). Lepidlo bylo naváženo na váze v poměru 1:1. Před samotným nanášením byl substrát přilepen k pracovní desce, tak aby se zamezilo nežádoucímu pohybu. Nanášení lepidla bylo prováděno ručně pomocí šablony o tloušťce 80 μm . Šablona byla přiložena k substrátu a vycentrována tak aby otvory odpovídaly pozicím na odpory. Následně byla upevněna šablona, aby nedošlo k nežádoucímu pohybu a pomocí bylo třerky naneseno lepidlo. Kvůli nanášení lepidla na PET fólii, která měla jen osm odporů bylo

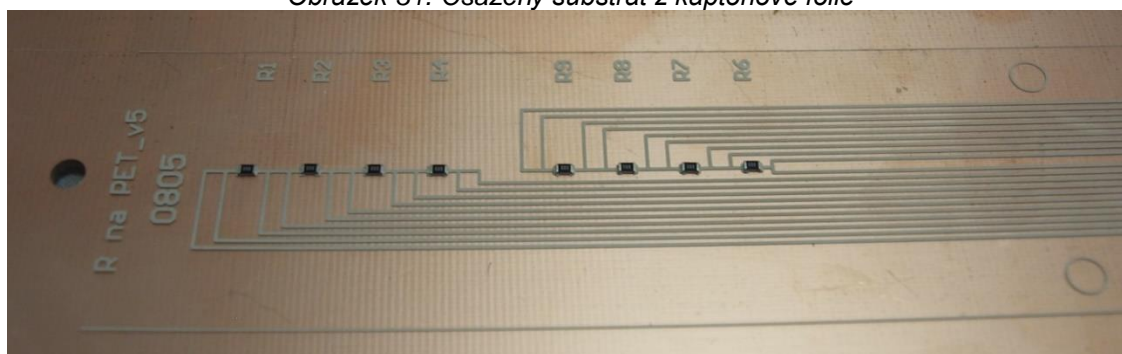
třeba vymaskovat otvory pro rezistor R5 lepicí páskou, aby se zabránilo nanesení lepidla na nežádoucí pozice. Po nanesení lepidla na všechny substráty přišlo na řadu osazení SMD odporů o nulové hodnotě s pouzdrem 0805. Osazování bylo provedeno ručně pomocí pinzety. Po osazení byly vzorky vytvrzeny. Vytvrzování lepidla č. 1 trvalo třicet minut při 130 °C. Tento vytvrzovací profil byl nalezen a ověřen v rámci předchozího výzkumu katedry.

Během vytvrzování se připravilo lepidlo EPO-TEK E4110 od firmy Epoxy Technology (dále jen lepidlo č.2). Lepidlo jsem bylo naváženo v poměru 10:1 jak uvádí výrobce a následně pečlivě promícháno. Následující postup byl stejný jako v případě lepidla č. 1. Tvrzení tohoto lepidla probíhalo při teplotě 130 °C na jednu hodinu.

Celkově byly od každého lepidla připraveny čtyři vzorky. Dva na PET fólii a dva na kaptonové fólii, osm vzorků celkem.



Obrázek 31. Osazený substrát z kaptonové fólie

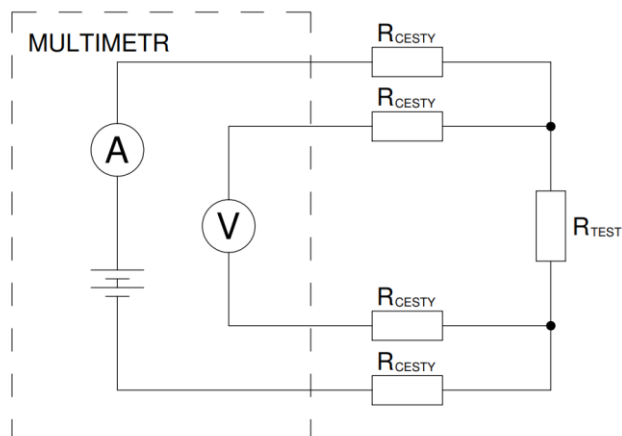


Obrázek 32. Osazený vzorek z PET fólie

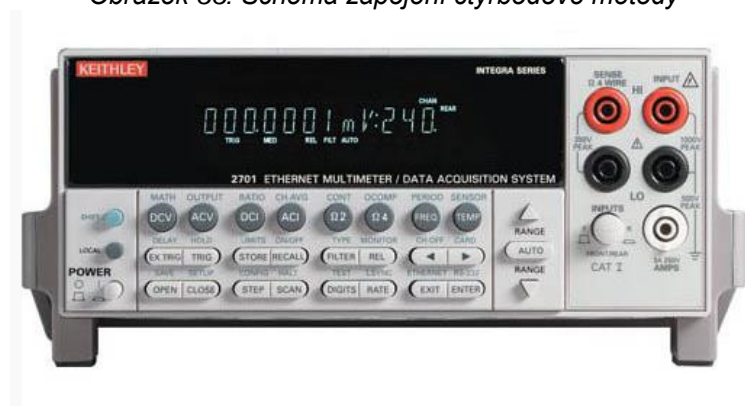
5.2.2 Měření elektrického odporu

Pro změření elektrického odporu bylo použito zařízení Keithley 2701, jedná se o digitální multimetr. Pro měření byla použita čtyřbodová měřící metoda. Principem této metody je měření napětí a proudu odděleně pomocí čtyř vodičů. Výhodou této metody je

že se přechodový odpor ani odpor vodičů se neuplatní. Je třeba aby byl vzorek připojen čtyřmi vývody, vnější (proudové) a vnitřní (napět'ové). Pokud je odpor voltmetru větší, než odpor vzorku poteče voltmetrem zanedbatelný proud vzhledem k proudu protékajícím vzorkem. Nevzniká tak téměř žádný úbytek napětí. Tato metoda je vhodná především pro měření malých odporů, řádově pro jednotky Ω .



Obrázek 33. Schéma zapojení čtyřbodové metody

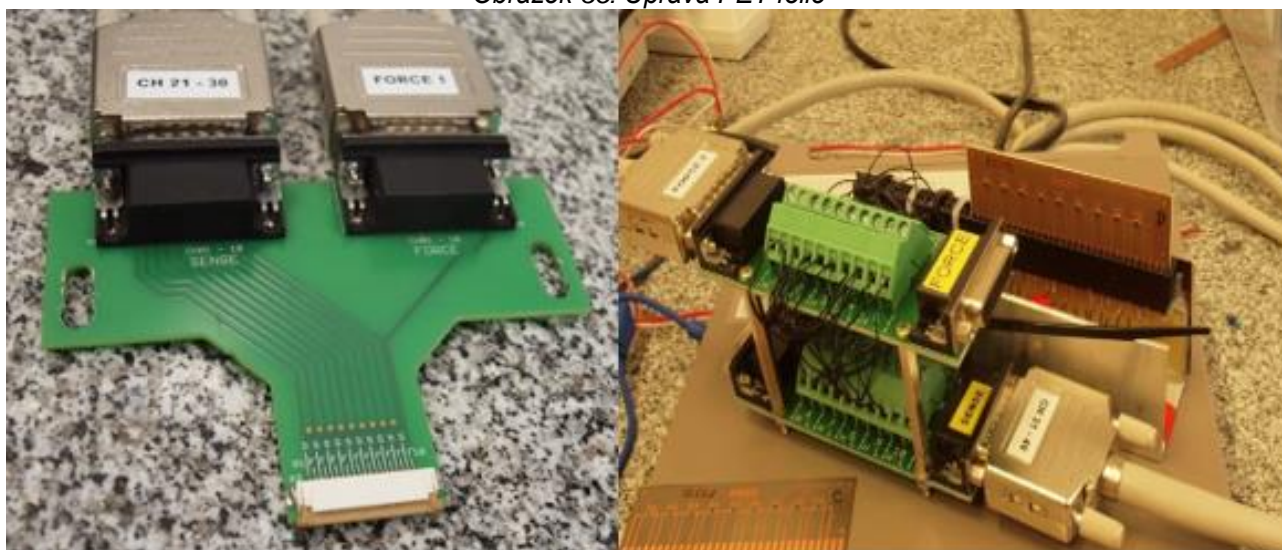


Obrázek 34. Zařízení Keithley 2701 (převzato z [33])

Elektrický odpor všech vzorků byl změřen hned po vytvrzení. PET fólii bylo potřeba ještě upravit, aby byla kompatibilní s přípojkou. Tato úprava byla provedena nůžkami, bylo nutné odstříhnout části fólie v okolí pinů, aby se zajistila kompatibilita s konektorem přípojky. Po změření všech vzorků, byly vzorky rozděleny na poloviny. Jedna polovina vzorků byla okamžitě vystavena zkoušce napětí ve smyku, zatímco druhá polovina vzorků byla vystavena zkoušce ohybem.



Obrázek 35. Úprava PET fólie



Obrázek 36. Přípravek pro měření PET a kaptonové fólie

5.2.3 Test ohybem

Pro test ohybem byla zvolena metoda, kdy byly vzorky vystaveny namáhání v ohybu po 336 hodin. Principem testu bylo upevnění substrátu na válci zvoleného průměru a ponechání tak po zvolenou dobu. Test zkoumal, jak jaký vliv bude mít zvolené namáhání ohybem na vlastnosti vzorků s lepenými spoji.

Vzorky byly během testu nejprve upevněny na válec o průměru 40 mm a ponechány v ohybu 168 hodin. Bylo třeba aby vzorky nikde neodstávali a byly pevně připevněny pro zajištění stejného namáhání v každém bodě vzorku. K upevnění vzorků byla použita lepicí páska. Po uplynutí 168 hodin byly vzorky sundány kvůli měření elektrického odporu a jeho změně. Následně byli vzorky na dalších 168 hodin vráceny na válec, tentokrát o průměru 32 mm aby se dosáhlo vyššího namáhání. Po tomto testu byly na vzorkách opět změřeny elektrické odpory a následně byly vystaveny zkoušce pevnosti ve smyku.

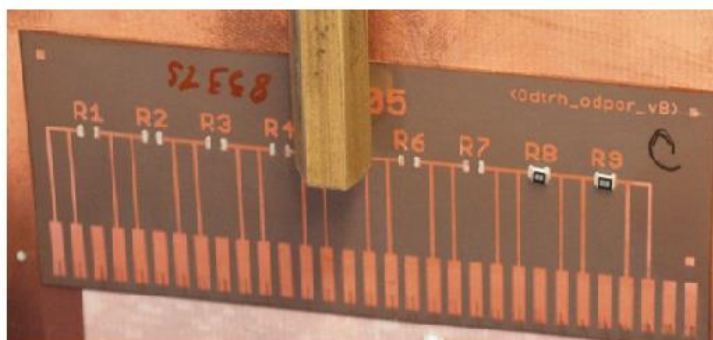
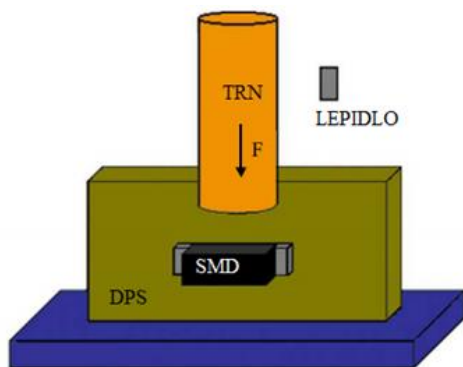


Obrázek 37. Test v ohybu

5.2.4 Test pevnosti ve smyku

Pro testování pevnosti ve smyku bylo použito zařízení LabTest 3.030. Trn (ve tvaru šestihranu) během testu tlačí silou na testovanou součástku, dokud nedojde k porušení kontaktu a trn neodtrhne součástku z desky. Jedná se tedy o destruktivní zkoušku, z tohoto důvodu bylo vyrobeno více vzorků, aby bylo možné zjistit rozdíly po vytvrzení a po zkoušce ohybem. Pevnost spoje ve smyku nebyla měřena přímo ale byla změřena maximální síla potřebná pro odtrhnutí součástky.

Vzhledem k tomu že se jednalo o testování flexibilních substrátů bylo nutné je pomocí oboustranné lepicí pásky pevně připevnit k pevné DPS. Tato deska se vzorkem byla následně umístěna pod trn.



PODLOŽKA

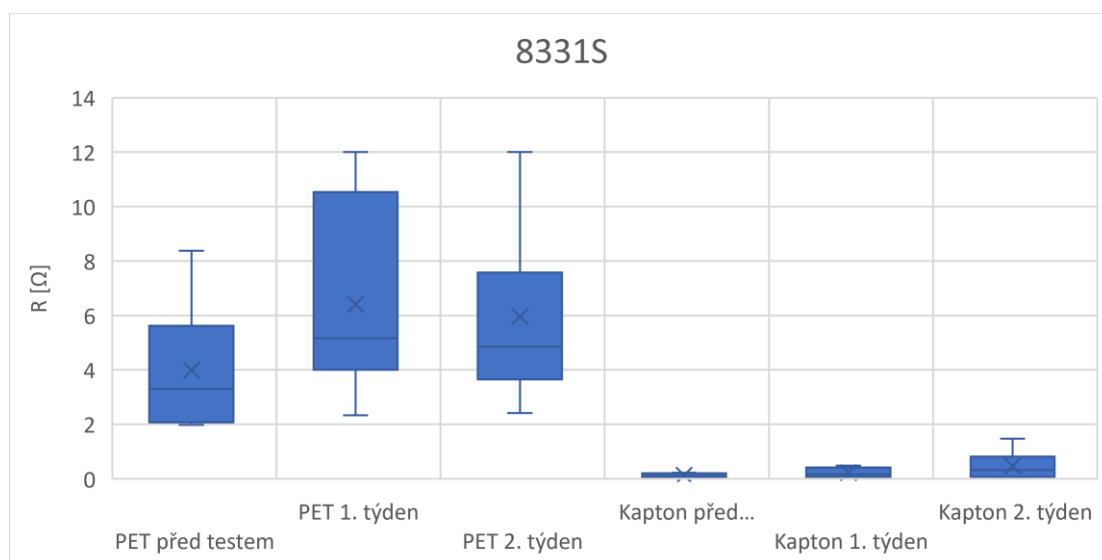
Obrázek 38. Princip zkoušky pevnosti ve smyku (převzato z [34]) a fotografie z experimentu

5.3 Výsledky experimentu

Elektrický odpor vzorků byl změřen před a po 168 hodinách zkoušky ohybu na válci s průměrem 40 mm a po dalších 168 hodinách zkoušky ohybu na válci o průměru 32 mm. Zkouška pevnosti ve smyku byla provedena před a po zkoušce ohybem. Výsledky byly vyneseny do boxových grafů. Z grafů jsou dobře vidět maximální i minimální hodnoty, průměrná hodnota a medián. V následujících kapitolách se budu zabývat popsáním výsledků.

5.3.1 Výsledky měření vzorků s lepidlem 8331S

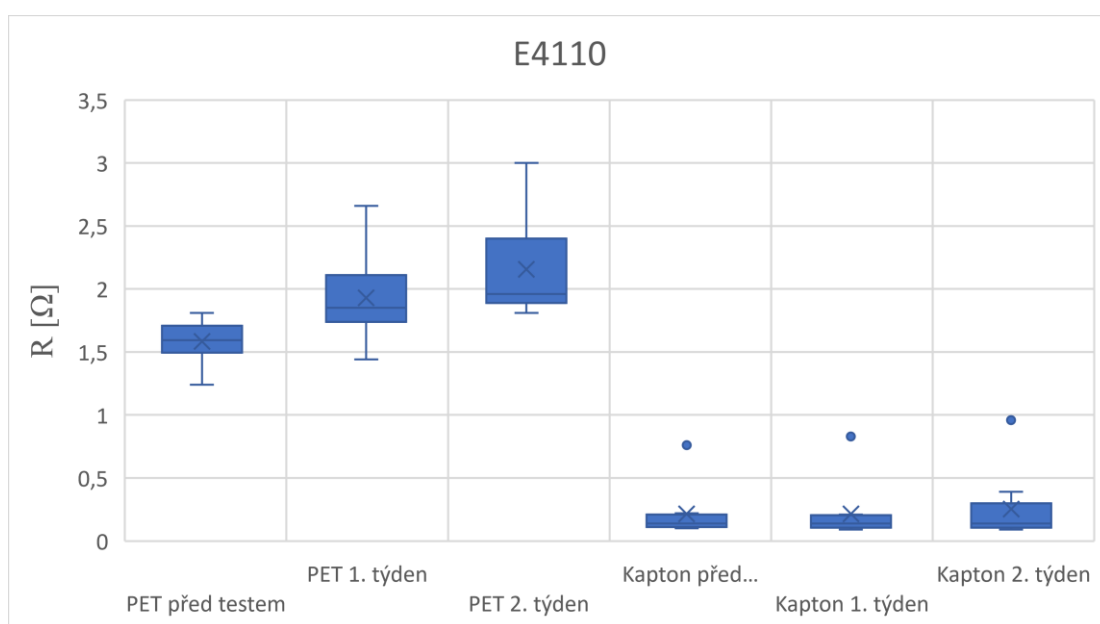
Na obrázku 40. můžeme vidět grafické znázornění změřeného odporu na vzorcích s lepidlem č. 1. Na grafu můžeme vidět že odpor se, jak na PET fólii, tak na kaptonové fólii, zhoršoval s tím, jak byl vzorek vystavován namáhání. Vzorek s PET fólií se mezi prvním a druhým týdnem už moc nezhoršil, respektive maximální naměřená hodnota se zvětšila jen minimálně. Na PET substrátu se u měření po druhém týdnu vyskytl problém s jedním z 8 odporů který ukazoval neustále se měnící hodnotu a byl tak vyřazen. Z toho důvodu tento odpor není zahrnut ve statistice a horní kvartil boxu po 2. týdnu je tak posunutý na nižší hodnotu. Za předpokladu že by se hodnota zmíněného odporu jen o trochu zvýšila byl by horní kvartil pravděpodobně na vyšší hodnotě než měření po prvním týdnu testování. Také můžeme vidět, že lepidlo je mnohem stabilnější na kaptonové fólii s mědí než na PET fólii se stříbrným vodivým motivem, kde jsou hodnoty dost rozptýlené. Na kaptonové fólii došlo k jen malému zhoršení odporů a menšímu rozptylu hodnot. Je zde však jedna hodnota, která vzrostla mnohem více než jiné, ale není od ostatních zas tolik vzdálená. Ale ani ta největší naměřená hodnota na kaptonové fólii nebyla větší než nejmenší hodnota na PET fólii. Tabulky s naměřenými hodnotami, ze kterým byl graf zkonstruován jsou vidění v Příloze č. 1.



Obrázek 39. Graf elektrického odporu lepidla č. 1

5.3.2 Výsledky měření vzorků s lepidlem E4110

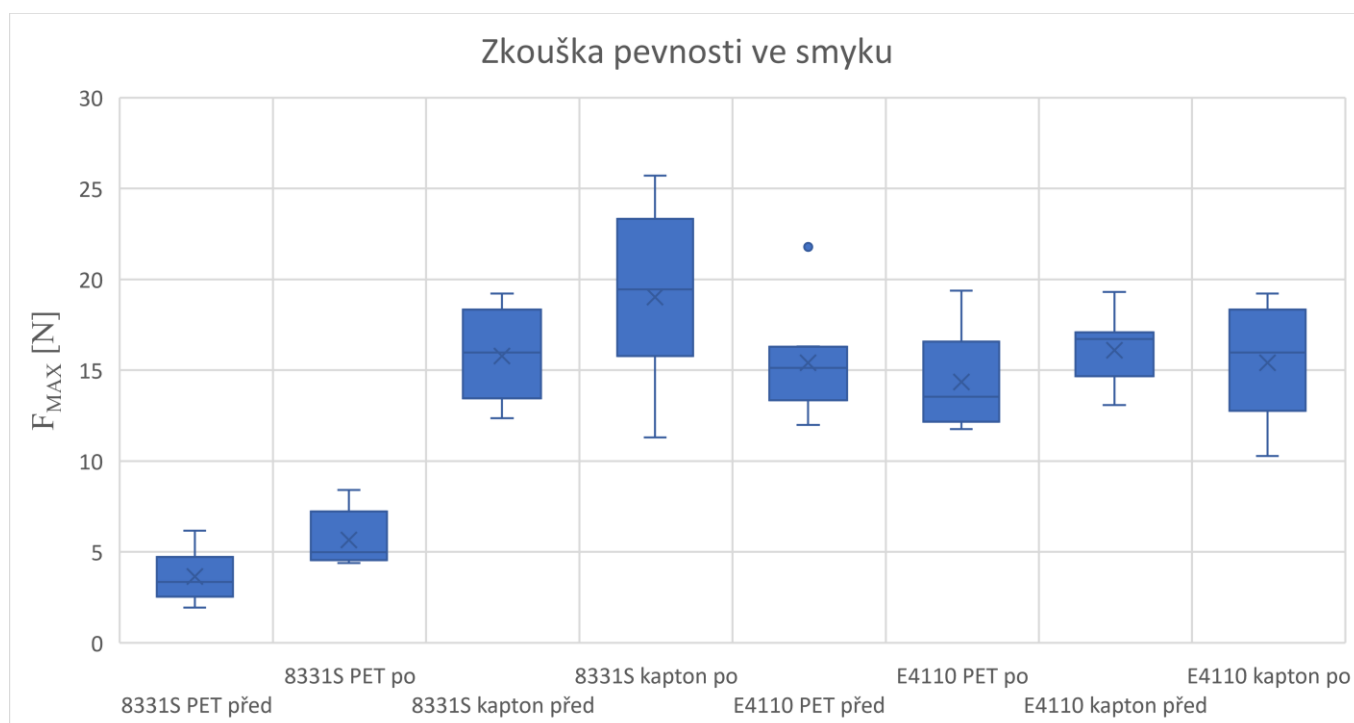
Na obrázku 41. můžeme vidět grafické znázornění změřeného odporu na vzorcích s lepidlem č. 2. Z grafu je jasně patrné že odpor roste s vystavováním vzorku namáhání. Hodnoty na vzorkách s PET fólií jsou více rozptýleny než na kaptonové fólii. Vzorky na kaptonové fólii mají mnohem menší odpor nepřesahující 1 Ω . Byl zde však odpor, který byl svojí hodnotou mnohem větší než ostatní hodnoty a nezahrnuje se tak do výpočtu zobrazených ukazatelů, je zobrazen jen jako bod. Tento odpor nadále během testování rostl a drží se samostatně i po experimentu. Je tedy možné se při jeho osazení došlo k nějaké chybě z mé strany nebo lepený spoj byl poškozen během testování. Tabulky s naměřenými hodnotami, ze kterým byl graf zkonstruován jsou viděny v Příloze č. 2.



Obrázek 40. Graf elektrického odporu lepidla č. 2

5.3.3 Výsledky zkoušky pevnosti ve smyku

Na obrázků 42. můžeme vidět grafické znázornění změřené síly potřebné k odtrhnutí součástek. Z grafu je vidět že nejlepší spoje byly vytvořené pomocí lepidla č. 1 na kaptonové fólii, ale po testu ohybem je zde velký rozptyl hodnot. Naopak na PET fólii se stříbrným motivem si lepidlo č. 1 vedlo nejhůře. Lepidlo č. 2 se zdá být mnohem více stabilní. I u tohoto lepidla se dosáhlo lepších výsledků na kaptonové než na PET fólii, a výsledky už nejsou tolik rozptýlené. V grafu je vidět hodnota která se nezapočítala do zobrazených ukazatelů. Můžeme také vidět, že síla potřebná k odtrhnutí odporů byla vždy větší po 336 hodinách namáhání než přímo po vytvrzení. Tabulky s naměřenými hodnotami, ze kterým byl graf zkonstruován jsou vidění v Příloze č. 3.



Obrázek 41. Graf zkoušky pevnosti ve smyku před a po experimentu

5.4 Diskuze výsledků

Z provedeného experimentu je vidět, že lepidlo E4110 dosáhlo menších odporů a kvalitnějších spojů než lepidlo 8331S, které vykazovalo rozptýlenější hodnoty. Na výše přiložených grafech si můžeme všimnout, že lépe si vede kaptonová fólie, která vykazuje menší odpor a lepší pevnost ve smyku. Lépe se na ní drželo lepidlo 8331S ačkoliv hodnoty jsou dost rozptýlené ve srovnání s lepidlem E4110. V měření elektrického odporu ale lépe dopadlo lepidlo E4110, které i když ukazuje jednu hodnotu větší než ostatní, nepřesáhlo hodnotu 1Ω .

Nejhůře pak dopadlo lepidlo 8331S na PET fólii které má výrazně horší pevnost ve smyku, to odpovídá i vysokým hodnotám naměřeného odporu. Vzhledem k tomu že lepidlo E4110 má podobné výsledky pevnosti ve smyku na obou substrátech lze usoudit, že za větší hodnoty odporů na PET fólii může materiál fólie nebo vodivého motivu. Díky tomu lze říci že ačkoliv je lepidlo důležitým faktorem pro kvalitu, tak vhodná volba substrátu je pro spoj důležitější.

Ačkoliv došlo během experimentu ke zhoršení vlastností elektrického odporu lze říci, že prováděné ohýbání flexibilní elektroniky je možné bez výrazného zhoršení nebo degradace. Na druhou stranu tento test nevystavuje flexibilní substráty zas tak velkému namáhání. Doporučil bych proto další testování, například pomocí zařízení s posuvnými plošinami.

Závěr

V předkládané diplomové práci je nejprve pro uvedení do problematiky popsána stručná historie flexibilní elektrotechniky následovaná popisem flexibilních substrátů a elektricky vodivých lepidel, jejich vlastností a druhy.

Nejprve jsou popsány požadované vlastnosti flexibilních substrátů a popsány tři nejčastější druhy kterými jsou tenká skla, kovové desky a ohebné plasty. Následující část je věnována lepidlům. Zde je probraná perkolační teorie, která nám elektricky vodivá lepidla rozděluje na izotropní a anizotropní. Tyto lepidla jsou zde také popsány spolu s nevodivým lepidlem a jeho způsobem použití. K lepidlům patří také jejich nanášení, v práci jsou popsány principy základních metod nanášení jako je sítotisk, šablonový tisk, který byl využit při výrobě vzorků pro experiment, a dispensing.

Dále je v práci vypracovaná rešerše na způsoby testování flexibilních substrátů. V této části jsou popsány normy a standardy IPC pro testování flexibilních substrátů. Testování jsem rozdělil na několik kapitol, je zde popsáno testování v ohybu a tahu. Dále se rešerše věnuje prakticky využívaným metodám a přístrojům používaným pro testování flexibilní elektrotechniky. V této kapitole je popsáno testování pomocí posuvných plošin nebo nové univerzální testovací zařízení vyvíjené v Koreji.

Praktická část se věnuje návrhu vzorků pro testování elektricky vodivých lepených spojů na flexibilních substrátech. Byly navrženy dva vzorky. Jeden na kaptonové fólii s měděným vodivým motivem a druhý na PET fólii se stříbrným vodivým motivem. Vodivé motivy byly navrženy v programu Eagle. Pro realizaci elektricky lepených spojů byla vybrána dvě lepidla, MG 8331S od MG Chemicals a EPO-TEK E4110 od firmy Epoxy Technology. Dále je zde popsána výroba vzorků a postup experimentu. Substráty byly za pomoci lepidel osazeny SMD rezistory typu 0805 s nulovou hodnotou a následně vytvrzeny v peci, lepidlo 8331S na 100 °C po dobu čtyřicet minut a lepidlo E4110 na 130 °C po dobu jedné hodiny. V experimentu byly vyrobené vzorky vystaveny testováním v ohybu a zkoušce pevnosti ve smyku. Testování ohybu probíhalo po dobu 168 hodin kdy byl vzorek vystaven zatížení pomocí upevnění na válec o průměru 40 mm. Pro zvýšení

namáhání byly pak vzorky vystavené namáhání ještě jednou na stejnou dobu ale tentokrát na válci o průměru 32 mm. Poslední část diplomové práce je věnována prezentaci výsledků experimentu a jejich diskuzi. Ze zmíněných výsledků je patrné že vzorky na kaptonovém substrátu s měděným vodivým motivem mají nejmenší elektrický odpor, nižší než 1Ω a to pro obě použítá lepidla. Po zkoušce pevnosti ve smyku bylo zjištěno že PET substráty mají horší mechanickou smykovou pevnost. Speciálně lepidlo 8331S dopadlo hodně špatně, což odpovídá jeho vysokým odporům na daném substrátu.

Výsledky experimentu ukázali že ačkoliv odpor s namáháním roste tak ohýbání flexibilních substrátů v testovaných poloměrech je možné bez většího poškození nebo degradace. Lze také říci že materiál flexibilních substrátů a materiál vodivého motivu mají velký vliv na kvalitu výsledného spoje.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] WONG, William S. a Alberto SALLES. *Flexible electronics: materials and applications* [online]. New York: Springer, c2009 [cit. 2019-01-05]. ISBN 978-0-387-74362-2. Dostupné z: <https://erdinckuruoglu.files.wordpress.com/2011/03/flexible-electronics.pdf>
- [2] Highly Conductive, Flexible, Polyurethane-Based Adhesives for Flexible and Printed Electronics. *Advanced Functional Materials* [online]. 2012 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adfm.201202249>
- [3] LI, Haoyu U. a Thomas N. JACKSON. Flexibility Testing Strategies and Apparatus for Flexible Electronics. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2016, 2012, **63**(5), 1934-1939 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1109/TED.2016.2545706. ISSN 0018-9383. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7450192/>
- [4] Tištěná a flexibilní elektronika a její možné aplikace. OTK GROUP - Obchodní tiskárny, a.s. [online]. Praha: Radek Soukup, 2015 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: http://www.otk.cz/download.php?group=stranky3_soubory&id=103
- [5] S. Bhattacharya and V. Marinov, "Simple, inexpensive, and reliable, high density interconnect technology for flexible electronics applications," *2009 Flexible Electronics & Displays Conference and Exhibition*, [online]. Phoenix, AZ, 2009, pp. 1-6. [cit. 2019-01-05] doi: 10.1109/FEDC.2009.5069277 Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5069277>
- [6] Ultra-Thin Glass. SCHOTT: Advanced Optics [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.us.schott.com/advanced_optics/english/products/wafers-and-thin-glass/glass-wafer-and-substrates/ultra-thin-glass/index.html
- [7] HSU, P. I., R. BHATTACHARYA, H. GLESKOVA, M. HUANG, Z. XI, Z. SUO, S. WAGNER a J. C. STURM. Thin-film transistor circuits on large-area spherical surfaces. *Applied Physics Letters* [online]. 2002, 81(9), 1723-1725 [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1063/1.1502199. ISSN 0003-6951. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1502199>
- [8] Mach, P.; Skočil, V.; Urbánek, J.; *Montáž v elektrotechnice*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001
- [9] MACH, P. a A. DURAJ. *Náhrada olova v pájkách* [online]. In: . Praha: České vysoké učení technické v Praze, s. 44 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12944059-Nahrada-olova-v-pajkp.html>
- [10] SANCAKTAR, Erol a Lan BAI. Electrically Conductive Epoxy Adhesives. *Polymers* [online]. 2011, **3**(1), 427-466 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.3390/polym3010427. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2073-4360/3/1/427>

- [11] MACH, Pavel. Modifikovaná elektricky vodivá lepidla. *Electroscope* [online]. 2009, 2009(2), 1-4 [cit. 2019-03-20]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/528/1/r3c2c7.pdf>
- [12] LI, Yi a C.P. WONG. Recent advances of conductive adhesives as a lead-free alternative in electronic packaging: Materials, processing, reliability and applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports* [online]. 2006, **51**(1-3), 1-35 [cit. 2019-03-08]. DOI: 10.1016/j.mser.2006.01.001. ISSN 0927796X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927796X06000131>
- [13] FRISK, Laura. Study of Structure and Failure Mechanisms in ACA Interconnections Using SEM. KAZMIRUK, Viacheslav, ed. *Scanning Electron Microscopy* [online]. InTech, 2012, 2012-03-09 [cit. 2019-04-20]. DOI: 10.5772/36965. ISBN 978-953-51-0092-8. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/scanning-electron-microscopy/study-of-structure-and-failure-mechanisms-in-aca-interconnections-using-sem>
- [14] 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. 2019-04-30]. DOI: 10.1016/S0143-7496(99)00039-1. ISSN 01437496. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143749699000391>
- [15] LIN, Y. C. a Jue ZHONG. A review of the influencing factors on anisotropic conductive adhesives joining technology in electrical applications. *Journal of Materials Science* [online]. 2008, **43**(9), 3072-3093 [cit. 2019-04-30]. DOI: 10.1007/s10853-007-2320-4. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-007-2320-4>
- [16] URBÁNEK, Jan a Edvard KLABAČA. *Technologie Elektrických Zařízení*. 1997. Praha: Vydavatelství ČVUT.
- [17] Skočil, V.: *Diferenciace, Z prezentace předmětu KET/Technologie elektroniky*, Plzeň: Západočeská univerzita
- [18] Flexible electronics. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_electronics#Flexible_circuit_industry_standard
- [19] J. Reboun, S. Pretl, J. Navratil and J. Hlina, "Bending endurance of printed conductive patterns on flexible substrates," *2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, [online]. Pilsen, 2016, pp. 184-188. [cit. 2019-05-21] doi: 10.1109/ISSE.2016.7563185. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7563185>
- [20] *IPC-6013: Qualification and Performance Specification for Flexible Printed Boards*. 1998, [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwjViYiBw47iAhXkxMQBHWRzDYkQFjACegQIAhAC&url=http%3A%2F>

- %2Flistserv.ipc.org%2Fscripts%2Fwa.exe%3FA3%3Dind0704%26L%3DTGASIA%26E%3Dbase64%26P%3D29400971%26B%3D-----
_%253D_NextPart_001_01C7870C.50D63720%26T%3Dapplication%252Foctet-stream%3B%2520name%3D%2522IPC-6013(L).pdf%2522%26N%3DIPC-6013(L).pdf%26attachment%3Dq&usg=AOvVaw0Vp9HSKAIJcemnloh7x5Ks
- [21] *IPC-TM-650, TEST METHODS MANUAL č. 2. 4. 19: Tensile Strength and Elongation, Flexible Printed Wiring Materials*. [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2-4-19C.pdf>
- [22] *E 345 – 93 (Reapproved 2002): Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Foil*. [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/366622556/E345>
- [23] *IPC-TM-650, č. 2. 4. 18: Tensile Strength and Elongation, Copper Foil*. [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2.4.18b.pdf>
- [24] Kim, Cheol & Kim, Chung-Hwan. (2018). Universal Testing Apparatus Implementing Various Repetitive Mechanical Deformations to Evaluate the Reliability of Flexible Electronic Devices. *Micromachines*. 9. 492. 10.3390/mi9100492. [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/327877756_Universal_Testing_Apparatus_Implementing_Various_Repetitive_Mechanical_Deformations_to_Evaluate_the_Reliability_of_Flexible_Electronic_Devices
- [25] EUN, Kyoungtae, Min-Woo CHON, Tae-Hee YOO, Yong-Won SONG a Sung-Hoon CHOA. *Electromechanical properties of printed copper ink film using a white flash light annealing process for flexible electronics* [online]. 2015, , 8 [cit. 2019-05-1]. DOI: 10.1016/j.microrel.2014.12.015. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002627141400537X?via%3Dihub#!>
- [26] LEWANDOWSKI. Flex bending fatigue testing of wires, foils, and ribbons. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 601 [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.1016/j.msea.2014.02.015. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509314001531>
- [27] OLEKSANDR, Glushko a Cordill MEGAN. FLEX-E-TEST: Bending test optimized for flexible electronics. *ÖSTERREICHSCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.oeaw.ac.at/esi/research/complex-materials/flex-e-test/>
- [28] *DuPont™ Pyralux® AP All-Polyimide Flexible Laminate* [online]. 2016, , 8 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: http://pragoboard.cz/download/pyralux_ap.pdf
- [29] *MELINEX® ST504* [online]. 2016, , 2 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <http://usa.dupontteijinfilms.com/wp-content/uploads/2017/01/ST504-Datasheet.pdf>
- [30] *DUPONT™ PE873 STRETCHABLE SILVER CONDUCTOR* [online]. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z:

<https://www.dupont.com/content/dam/Dupont2.0/Products/Electronics-and-imaging/Literature/PE873.pdf>

- [31] *8331S Technical Data Sheet* [online]. MG CHemicals, 2017 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <http://www.mgchemicals.com/downloads/tds/tds-8331s-2parts.pdf>
- [32] *EPO-TEK E4110* [online]. Epoxy Technology [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: http://www.epotek.com/site/administrator/components/com_products/assets/files/Style_Uploads/E4110.pdf
- [33] Keithley 2701. *Test Equipment Depot* [online]. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <http://www.testequipmentdepot.com/keithley/switching-control-daq-systems/multimeter-data-acquisition-switch-system-2701.htm>
- [34] HIRMAN, Martin a Frantisek STEINER. Shear Strength of Conductive Adhesive Joints on Rigid and Flexible Substrates Depending on Adhesive Quantity. *Journal of Electrical Engineering* [online]. 2016, **67**(3), 177-184 [cit. 2019-05-26]. DOI: 10.1515/jee-2016-0025. ISSN 1339-309X. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/304040042_Shear_Strength_of_Conductive_Adhesive_Joints_on_Rigid_and_Flexible_Substrates_Dependig_on_Adhesive_Quantity

Přílohy

Příloha č. 1. Tabulka naměřených hodnot elektrického odporu na vzorkách s lepidlem 8331S

8331S							
PET	Před testem	1. týden	2. týden	kapton	Před testem	1. týden	2. týden
R1 [Ω]	2,03	4,17	4,23	R1 [Ω]	0,1	0,12	0,13
R2 [Ω]	1,98	2,33	2,42	R2 [Ω]	0,04	0,04	0,04
R3 [Ω]	2,22	3,99	3,65	R3 [Ω]	0,05	0,05	0,05
R4 [Ω]	4,8	12		R4 [Ω]	0,06	0,09	0,09
R5 [Ω]	X	X	X	R5 [Ω]	0,17	0,28	0,32
R6 [Ω]	2,49	4,05	4,85	R6 [Ω]	0,1	0,17	0,54
R7 [Ω]	4,1	6,8	7,01	R7 [Ω]	0,23	0,48	1,47
R8 [Ω]	8,38	11,77	12	R8 [Ω]	0,23	0,39	0,85
R9 [Ω]	5,9	6,14	7,58	R9 [Ω]	0,15	0,44	0,77

Příloha č. 2. Tabulka naměřených hodnot elektrického odporu na vzorkách s lepidlem E4110

E4110							
PET	Před testem	1. týden	2. týden	kapton	Před testem	1. týden	2. týden
R1 [Ω]	1,62			R1 [Ω]	0,2	0,2	0,39
R2 [Ω]	1,54	1,74	1,89	R2 [Ω]	0,76	0,83	0,96
R3 [Ω]	1,71	1,97	2,11	R3 [Ω]	0,1	0,09	0,09
R4 [Ω]	1,57	1,85	1,96	R4 [Ω]	0,12	0,11	0,11
R5 [Ω]	X	X	X	R5 [Ω]	0,22	0,21	0,21
R6 [Ω]	1,7	2,66	3	R6 [Ω]	0,14	0,12	0,13
R7 [Ω]	1,48	1,74	1,93	R7 [Ω]	0,16	0,14	0,14
R8 [Ω]	1,24	1,44	1,81	R8 [Ω]	0,1	0,1	0,1
R9 [Ω]	1,81	2,11	2,4	R9 [Ω]	0,13	0,14	0,14

Příloha č. 3. Tabulka naměřených hodnot zkoušky pevnosti ve smyku

8331S PET		8331S kapton		E4110 PET		E4110 kapton	
Fmax [N]		Fmax [N]		Fmax [N]		Fmax [N]	
Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po
6,16	5,17	13,71	15,59	11,99	11,76	14,33	10,28
4,91	4,55	13,18	19,44	13,41	19,38	19,31	13,18
4,15	4,55	19,05	25,5	16,31	14,56	15,31	19,05
1,94	4,38	17,63	15,95	21,78	12,92	17,23	17,63
X	X	19,21	25,7	X	X	16,94	19,21
3,3	8,4	16,08	11,3	14,4	11,9	16,9	16,08
2,83	7,78	12,36	20	13,31	17,23	14,99	12,36
2,44	4,81	14,86	16,51	16,21	13,71	16,71	14,86
3,39	5,54	15,98	21,15	15,85	13,38	13,08	15,98