ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Výroba a testování flexibilních plošných spojů

Matyáš Strejc **2019**

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Matyáš STREJC**
Osobní číslo:	**E16B0117P**
Studijní program:	**B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komerční elektrotechnika**
Název tématu:	**Výroba a testování flexibilních plošných spojů**
Zadávající katedra:	**Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši v oblasti technologie výroby flexibilních plošných spojů.
2. Zpracujte přehled technických norem pro mechanické testy flexibilních plošných spojů.
3. Zpracujte přehled technického vybavení pro mechanické testy flexibilních plošných spojů.
4. Vyberte vhodnou metodu pro statické a dynamické mechanické testy vybraných vzorků flexibilních plošných spojů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. **COOMBS, Clyde F. a Happy T. HOLDEN, ed. Printed circuits handbook. Seventh edition. New York: McGraw-Hill Education, 2016. ISBN 978-0071833950**
2. **MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3**
3. **KHANDPUR, R.S. Printed circuit boards: design, fabrication, assembly and testing. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2005. ISBN 0070588147**
4. **electronické informační zdroje**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Kalaš**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**

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

L.S.

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

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na flexibilní plošné spoje, na přehled jejich složení a na technologii výroby. V textu je podrobně zpracován přehled technických norem týkající se nejen všeobecných požadavků ohebných tištěných spojů, ale i mechanických statických a dynamických testů. Nedílnou součástí je také přehled doposud používané testovací aparatury pro mechanické testy. Je podrobně popsán průběh konkrétního testu, za jakých podmínek zkouška probíhala a popřípadě jaké byly zjištěny výsledky. V poslední kapitole je na základě získaných znalostí proveden teoretický návrh statických a dynamických zkoušek pro testování flexibilního plošného spoje.

Klíčová slova

flexibilní plošné spoje, konstrukce, flex-rigid, technické normy, mechanické zkoušky, statické testy, dynamické testy, testovací aparatura

Abstract

This bachelor thesis is focused on flexible printed circuits, on their composition and on production technology. In the text there is a detailed overview of technical standards concerning not only the general requirements of flexible printed boards, but also static and dynamic mechanical tests. The main part is focused on an overview of the testing apparatus used for mechanical tests. The course of a specific test is described in detail, under which conditions the test was conducted and the results were found. In the last chapter is a theoretical proposal test method for static and dynamic tests for flexible printed circuits based on the knowledge gained in the previous chapters.

Key words

flexible PCBs, manufacturing, flex-rigid, technical standards, mechanical test, static tests, dynamic tests, test apparatus

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a elektronických informačních zdrojů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 12.6.2019 Matyáš Strejc

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Kalašovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH **8**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **10**

ÚVOD **11**

1 CO JSOU FLEXIBILNÍ PLOŠNÉ SPOJE **12**

2 KONSTRUKCE FLEXIBILNÍCH PLOŠNÝCH SPOJŮ **13**

2.1 DIELEKTRICKÉ MATERIÁLY 13
2.1.1 Polyimid(PI) *13*
2.1.2 Polyethylentereftalát (PET) *14*
2.1.3 Tenký sklo epoxidový laminát *14*
2.1.4 Fluorokarbon *15*
2.2 VODIVÉ MATERIÁLY 15
2.2.1 Válcovaná žíhaná fólie *16*
2.2.2 Elektrolyticky nanesená fólie *17*
2.3 POJIVÉ MATERIÁLY (LEPIDLA) 18
2.3.1 Akrylátová lepidla *18*
2.3.2 Polyimidová lepidla *18*
2.3.3 Polyesterová lepidla *18*
2.3.4 Epoxidová lepidla *19*
2.4 BEZLEPIDLOVÉ LAMINÁTY 19
2.4.1 Odlévání *19*
2.4.2 Naprašování *20*
2.4.3 Laminování *20*
2.5 KRYCÍ VRSTVY 20
2.5.1 Aplikace pomocí lepidla *20*
2.5.2 Bezlepidlová suchá metoda *21*
2.5.3 Bezlepidlová tekutá metoda *21*

3 FLEX-RIGID PLOŠNÉ SPOJE **22**

4 STANDARDIZACE FLEXIBILNÍCH PLOŠNÝCH SPOJŮ **23**

4.1 VŠEOBECNÉ MECHANICKÉ POŽADAVKY PODLE IPC-6013 23
4.2 TESTOVÁNÍ FLEXIBILNÍCH VZORKŮ PODLE TESTOVACÍ NORMY IPC-TM-650 25
4.2.1 Metoda 2.4.3: Zkoumání počtu ohnutí ohebného vzorku před selháním *25*
4.2.2 Metoda 2.4.5: Určení mechanického a elektrického chování flexibilního tištěného spoje *26*
4.2.3 Metoda 2.4.9 Pevnost vazby vodiče na pružném dielektrickém podkladu při pokojové teplotě a po prudkých změnách teploty *27*
4.2.4 Metoda 2.4.19: Definice pevnosti v tahu a prodloužení flexibilních plošných spojů *29*
4.2.5 Metoda 2.4.18: Metoda určení pevnosti v tahu a prodloužení flexibilních měděných fólií *30*

5 DRUHY TESTOVACÍCH ZAŘÍZENÍ A MECHANICKÝCH ZKOUŠEK FLEXIBILNÍCH PLOŠNÝCH SPOJŮ **33**

5.1 METODA LINEÁRNÍHO NEŘÍZENÉHO OHYBU PUSH-TO-FLEX 34
5.2 METODA ŘÍZENÉHO OHYBU FLEXIBILNÍHO VZORKU NA POŽADOVANÝ POLOMĚR 35
5.3 UNIVERZÁLNÍ TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ PRO MECHANICKÉ DEFORMACE OHEBNÉHO SPOJE 36
5.4 CYKLICKÝ TEST 38
5.5 FLEX-E-TEST 40

6 NÁVRH METODY TESTOVÁNÍ PŘEDLOŽENÉHO VZORKU **41**

6.1 TECHNICKÝ POPIS VZORKU 41
6.2 POROVNÁNÍ VZORKU DLE STANDARDŮ 42

6.3 NÁVRH STATICKÉ ZKOUŠKY 42
6.4 NÁVRH DYNAMICKÉ ZKOUŠKY 43
ZÁVĚR 45
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ 47

Seznam symbolů a zkratek

F ..... síla [N]

l, d ..... délka [m]

S ..... plocha [m2]

r ..... poloměr [m]

T ..... Teplota [°C]

σ ..... pevnost v tahu [Pa]

ENIG ..... Electroless nickel immersion gold (povrchová úprava pozlacením)

FR4 ..... Sklo epoxidový laminát

PET ..... Polyethylentereftalát

PI ..... Polyimid

SMD ..... Součástky pro povrchovou montáž

Úvod

Flexibilní plošné spoje se v současnosti stávají běžným stavebním prvkem pro jakoukoliv elektroniku. Oproti pevným plošným spojům je jejich hlavní výhodou ohebnost. Pomocí těchto obvodů lze dosahovat malých, lehkých a kompaktních rozměrů výrobku.

Tato bakalářská práce je v první části zaměřena na základní materiály a konstrukci flexibilních plošných spojů. Jsou zde popsány běžně používané materiály od dielektrik až po krycí vrstvy. Zajímavou variantou na pomezí pevného a flexibilního spoje může být flex-rigid spoj. Ten je rozdělen na segmenty, ve kterých vyniká tuhostí standardního rigidního plošného spoje nebo ohebností flexibilních plošných spojů.

Pro hromadnou výrobu, zaměnitelnost a kompatibilitu slouží obecné standardy a normalizace, které jsou navržené tak, aby odstranily nedorozumění mezi výrobci a odběrateli. Z hlediska mechanických zkoušek je potřeba správná metodika a postup zkoušení. Pomocí mechanických testů lze např. zjistit počet cyklů ohybu flexibilního vzorku před selháním, pevnost vazby mezi vrstvami a pevnost v tahu. V další části je čtenář seznámen s dostupnou aparaturou pro testování flexibilních plošných spojů.

V poslední části se bakalářská práce zabývá návrhem statické a dynamické zkoušky pro předložený flexibilní plošný spoj. Všechny flexibilní plošné spoje nejsou stejné, proto záleží na tom, z jakého materiálu je daný vzorek sestaven, jaká je celková tloušťka a jaké má mechanické vlastnosti. Další důležitou věcí je, zda se vzorek shoduje se vzorky použitými v testovacích normách a lze tedy vzorek zkoušet stejnou metodou.

1 Co jsou flexibilní plošné spoje

Flexibilní tištěné spoje jsou vodivé spoje na tenkém flexibilním substrátu. Jedná se o technologii, kde SMD součástky lze upevnit na ohebný podklad z plastu a propojit je vodivou cestou. Mohou tvořit samostatný elektrický obvod anebo mohou propojovat pevné plošné spoje, displeje, konektory a sloužit jako úspora klasických vodičů. Dají se ohýbat nebo tvarovat tak, aby propojily více rovin nebo se přizpůsobily konkrétním velikostem balení. Zlepšují spolehlivost připojení a jsou odolnější vůči otřesům a vibracím. Flexibilní plošné spoje jsou tenké, lehké a více odolné [1]. Na druhou stranu jejich tenká konstrukce je nestabilní a finální cena je relativně vyšší, než cena neohebného plošného spoje stejného rozměru [2].

Tab. 1: Srovnávací tabulka jednostranných ohebných a pevných plošných spojů

	Ohebné plošné spoje	Pevné plošné spoje
Tloušťka substrátu	Od 12,5 μm (standardně 25 μm)	Od 75 μm (standardně 1,5 mm)
Tloušťka mědi	Od 12,5 μm	Od 18 μm
Odolnost proti hořlavosti	Ano UL 94 V-0	Ano UL 94 V-0
Ohebnost	Ano	Malá
Kompaktnost	Velká	Nízká
Pořizovací cena za 1 dm^2	160 Kč	50 Kč

2 Konstrukce flexibilních plošných spojů

Flexibilní plošné spoje jsou vyrobeny z dielektrického substrátu nejčastěji polyimid (PI) nebo polyester konkrétně polyethylentereftalát (PET), který je speciálně upraven pro používání flexibilních plošných spojů. Nejčastěji na substrátu potaženém lepidlem je buď válcovaná žíhaná měděná fólie, nebo elektrolyticky nanesená vrstva mědi [3]. Měděná fólie je chráněná krycí vrstvou nebo speciálním povlakem před korozními látkami nejčastěji z aramidu, epoxidu a polyimidu [1], [2].

2.1 Dielektrické materiály

Základní dielektrickou látkou pro flexibilní plošný spoj je polyimid (PI) a polyester konkrétně polyethylentereftalát (PET) [1].

- **Polyimid** – se používá pro pájení a další procesy při vysoké teplotě. Speciální úpravou materiálu nazývanou Kapton lze dosáhnout odolnosti až 400 °C [2].

- **Polyester** – v základní formě se nepoužívá pro standardní pájení, ale je levnější variantou. Speciální úprava materiálu se nazývá Mylar, která nabízí o něco lepší vlastnosti, ale nedosahuje takové teplotní odolnosti jako polyimid [1].

2.1.1 Polyimid(PI)

Nejběžnější dielektrickou volbou bývá v ohebných obvodech polyimid. Jedná se o netavný plast [4]. Vyniká především příznivými elektrickými, chemickými a tepelnými vlastnostmi, proto se hodí na pájení a bondování [5]. V běžném životě se polyimid používá jako izolace kabelů. Speciálně upravený polyimid pro flexibilní plošné spoje je tzv. Kapton vyvinutý v USA firmou DuPont. To je modifikovaný polymer, který je velmi tepelně, chemicky a mechanicky odolný dokonce i proti ultrafialovému záření [1], [6]. Jeho teplotní rozsah je v rozmezí - 65 až 150 °C, jedná se o takové tepelné podmínky, v kterých by tento polymer měl být schopný vydržet bez jakékoliv změny [1]. Další speciálně upravený

materiál je Kapton-H, který má teplotní rozsah -269 až 400 °C. Dále se můžeme setkat s materiálem Apical-AV, Apical-NP vyvinutý firmou Kaneka a materiálem Upilex-S vyvinutý firmou Ube [1], [2], [7].

Polyimid také splňuje podmínky testu nehořlavosti nezávislé americké společnosti Underwriters Laboratories (UL) konkrétně pro třídu UL 94 V-0. To znamená, že vzorek vydrží po dobu 10 sekund přímý žár plamene a jakékoliv odkapávání ze vzorku nesmí způsobit vznícení bavlny umístěné pod vzorkem [8].

2.1.2 Polyethylentereftalát (PET)

Další používaný substrát mezi flexibilními plošnými spoji se nazývá polyethylentereftalát (PET) a patří do skupiny polyesterů. Má podobné mechanické a elektrické vlastnosti jako polyimid, absorbuje méně vlhkosti, má vyšší izolační odpor, ale jeho maximální teplotní zatížení je okolo 70 °C [1]. Proto jeho použití není vhodné pro pájení a jeho velká výhoda je, že je levnější než polyimid [2].

Jedním z nejvýznamnějších polyesterů v odvětví flexibilních plošných spojů je materiál Mylar vyvinutý firmou DuPont [2]. Jeho chemické složení je podobné polyethylentereftalátu (PET) a odolává teplotám od -60 °C do 150 °C [1], [9]. Mylar může být barven, potažen, laminován, děrován, zůstává pružný a nestárne s věkem [1], [2]. V porovnání s Kaptonem (polyimid) má Mylar (polyester) podobné vlastnosti s výjimkou maximálního teplotního zatížení. Také jakýkoliv polyester může dosáhnout certifikace nehořlavosti UL 94, ale je to velmi obtížné [2], [7].

2.1.3 Tenký sklo epoxidový laminát

Jako flexibilní plošný spoj se může považovat i skelná tkanina s epoxidovou pryskyřicí o tloušťkách menších než 200 µm. Jejich fyzikální vlastnosti jsou v podstatě stejné jako klasické pevné sklo epoxidové plošné spoje (FR4). Nicméně jejich ohebnost oproti předchozím materiálům je výrazně nižší a nejsou vhodně pro opakovatelné ohýbání [10].

2.1.4 Fluorokarbon

První flexibilní obvody byly na bázi fluorovaných uhlovodíků. Jejich vynikající chemická odolnost, vysoká tepelná odolnost a dobré mechanické vlastnosti tvořily fluorované uhlovodíky téměř ideálním dielektrikem. Bohužel jejich vysoká cena a rozměrová nestabilita jsou hlavním důvodem ukončení používání. V dnešní době se flurované uhlovodíky používají ve formě náplastí k zesílení slabých rohů polyimidového základu [2].

Tab. 2: Porovnání základních substrátů, převzato z [1].

	Polyimid	Polyester
Maximální pracovní teplota	>200 °C	<70 °C
Standardní rozměry tloušťky	12,5; 25; 50; 75; 125 µm	25; 50; 75; 100; 125; 188 µm
Pájení	Ano	Nemožné
Flexibilita	Vysoká	Vysoká
Cena materiálu	Vysoká	Nízká

2.2 Vodivé materiály

Dalším důležitým prvkem v ohebném plošném spoji je měď. Jedním ze základních požadavků na měď v odvětví ohebných spojů je pružnost, která pochází z mnoha faktorů. Základní pravidlo je, že čím tenčí vrstva mědi, tím pružnější [11].

Pro flexibilní plošné spoje se používají dva typy měděných fólií. Electro Deposited (ED) – Elektrolyticky nanesená fólie a Rolled Annealed (RA) – Válcovaná žíhaná fólie [3].

To, jakým způsobem jsou měděné fólie vyrobeny, určuje jejich mechanické vlastnosti. Na méně ohebné plošné spoje se používá elektrolyticky nanesená fólie, jelikož snese menší počet cyklů ohybu. Tam, kde je kladen důraz na větší odolnost v ohybu, se používá válcovaná žíhaná fólie, jelikož je více pružná než ED fólie. Cena, flexibilita a tloušťka materiálu jsou nejdůležitějšími aspekty pro sestavení ohebného plošného spoje [1]. Například válcovaná žíhaná měděná vrstva je lepší a levnější volbou než elektrolyticky nanesená vrstva a to především pro tloušťky menší než 18 μm [2], [3]. Po výrobě surové měděné fólie se finální úprava provádí ve třech stupních [2]:

1. Ošetření lepením – kdy se upravuje plocha povrchu mědi k dosažení lepší smáčivosti a přilnavosti mědi.

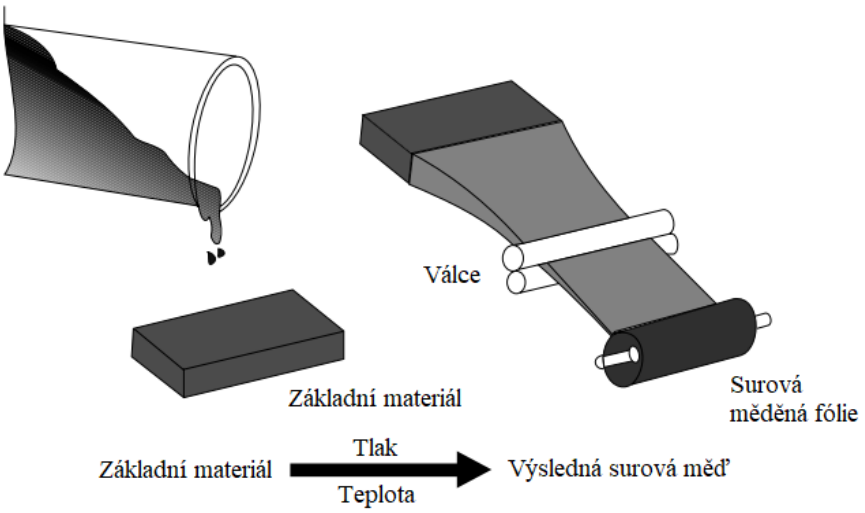
2. Úprava tepelnou bariérou – kdy dojde k ošetření mědi tak, aby její přilnavost zůstala nepoškozena vlivem teplotních rozdílů při výrobě flexibilního plošného spoje.

3. Antioxidace – dochází k ošetření mědi z obou stran tak, aby nedocházelo k oxidaci a barvení mědi.

Po ošetření se měděná fólie ořízne na požadovanou šířku a navine se na jádro.

2.2.1 Válcovaná žíhaná fólie

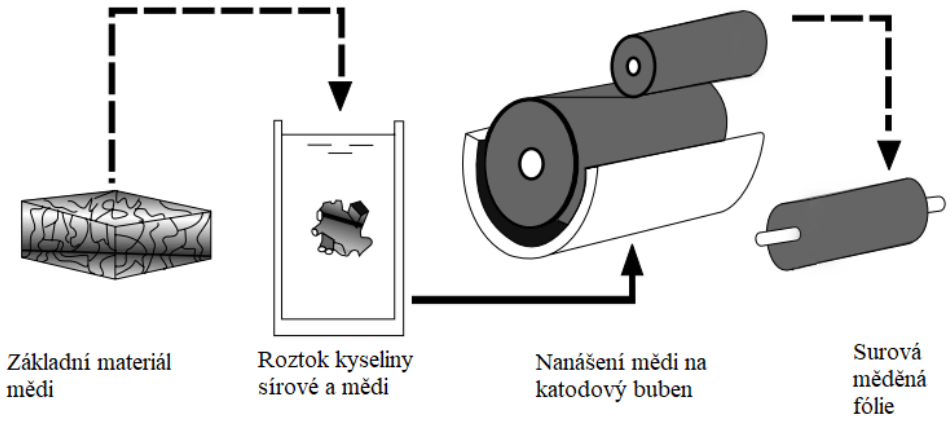
Vyrábí se zahřátím základního materiálu a následným válcováním skrz dva válce, které jsou nastaveny na určitou tloušťku, a výsledkem je tenká vrstva měděné fólie Obr. 1 [2].



Obr. 1 Proces výroby válcované žíhané měděné fólie. Převzato z [2].

2.2.2 Elektrolyticky nanesená fólie

Nejprve proces začíná rozpuštěním mědi v kyselině sírové. Následně roztok mědi se čerpá do elektrolytu, kde probíhá chemická reakce způsobená procházejícím proudem mezi anodou a katodou. Katoda je válcový buben, který je ponořen v elektrolytickém roztoku, a zatímco se buben rovnoměrně otáčí, malé částečky mědi se přichytávají na katodu. Vzápětí jsou tyto malé částečky odebírány na další válec, kde vzniká tenká vrstva měděné fólie. Tloušťka fólie je závislá na rychlosti otáčení bubnu [2]. Schématický proces lze vidět na Obr. 2.



Obr. 2 Proces výroby elektrolyticky nanášené měděné fólie. Převzato a překresleno z [2].

2.3 Pojivé materiály (lepidla)

Základní funkcí lepidel je spojení substrátu s vodivým materiálem nebo spojení vícevrstvého flexibilního plošného spoje s finální krycí vrstvou. Lepidla musí zajistit dostatečnou mechanickou pevnost, chemickou odolnost a být schopna vydržet flexibilní nároky. U lepidel chceme, aby byly v co nejtenčí možné vrstvě pro dynamické ohýbání. Na druhou stranu velmi tenké vrstvy lepidel ztrácejí svoji pevnost. Proto je nezbytné najít vyhovující tloušťku na základě experimentů a pokusů. Aplikace daného lepidla závisí na pevnosti spojení, rozměrové stabilitě a pružnosti po pájení [1]. Nejpoužívanější lepidla jsou akrylátová, epoxidová, polyimidová a polyesterová [1], [2]. Standardní tloušťka je od 12,5 μm až 127 μm [7].

2.3.1 Akrylátová lepidla

Akrylátová lepidla nabízejí vysokou tepelnou odolnost, pevnost v ohybu a jsou dobrou volbou pro polyimidové substráty. Jejich aplikační teplota se pohybuje v rozmezí 160 – 180 °C [1]. Nicméně jejich velká tloušťka je omezující a kromě toho jsou akrylátová lepidla náchylná odolávat některým rozpouštědlům použitým při foto-rezistu. Další nevýhodou je poměrně vysoká cena a vyšší koeficient tepelné roztažnosti [1], [2], [7].

2.3.2 Polyimidová lepidla

Polyimidová lepidla se také perfektně hodí k polyamidovým substrátům. Nabízejí nejlepší tepelnou odolnost ze všech lepidel a ostatní vlastnosti má podobné jako u akrylátových lepidel. Jeho využití můžeme najít v armádě, kosmonautice a letectví. Aplikační teplota tohoto termoplastu je nad 330 °C. Výhodou je, že polyimidové lepidlo má velmi nízký koeficient teplotní roztažnosti, proto se skvěle hodí do vícevrstvých spojů [2]. Nevýhodou je snížená schopnost dynamického ohybu a vyšší cena než u akrylátových lepidel [1], [7].

2.3.3 Polyesterová lepidla

Běžně používaná lepidla pro polyesterový substrát jsou polyesterová. Tento termoplast nabízí dobré vlastnosti, vynikající pružnost, nízkou cenu, ale má malou odolnost vůči

teplu. To není vždy nevýhodou, pokud aplikace lepidla je použita v případech, kdy plošný spoj není vystavován vysokým teplotám a pájení [2], [7].

2.3.4 Epoxidová lepidla

Epoxid vykazuje dobrou stabilitu při dlouhodobě zvýšených teplotních podmínkách do 120 °C. Obecně epoxidová lepidla jsou méně flexibilní než ostatní lepidla. Používanějšími jsou proto modifikované epoxidy, které jsou pružnější, levnější než akrylát, ale dražší než polyester [2], [7].

2.4 Bezlepidlové lamináty

V této novější metodě je měď spojena s dielektrikém materiálem bez lepidla. Ve srovnání s lepidly tato metoda poskytuje menší tloušťku výsledného plošného spoje, lepší flexibilitu a lepší tepelnou vodivost. Byly vyvinuty tři metody bezlepidlového nanášení mědi [2]:

- odlévání,
- naprašování,
- laminování.

2.4.1 Odlévání

Tato metoda spočívá v odlévání tekutého dielektrického materiálu, např. polyimidu, na povrch kovové fólie a následně se nechá hotový laminát vytvrdit. Obvykle se polyimidový film nanáší ve dvou a více vrstvách a výsledná tloušťka se může pohybovat okolo 12 μm [2]. Tato metoda má výbornou pevnost vazby mezi laminátem a měděnou fólií a dobrý poměr flexibility vůči tloušťce [2], [7].

2.4.2 Naprašování

Naprašování se provádí ve dvou postupech. První postup je naprašování substrátu ve vakuové komoře malými částečkami chromu nebo niklu, které vytvoří vodivou vrstvu na nevodivém substrátu a zlepší pevnost vazby. Tato vrstva je běžně tenká 100 nm. V druhém postupu dochází k elektrolytickému nanesení mědi a vytvoří se tenká vrstva mědi. Pomocí této metody se dosahuje velmi tenkých vrstev mědi, klidně tenčích než 10 μm. Nicméně přilnavost mědi je horší než u metody odlévání [1], [2].

2.4.3 Laminování

Proces, kdy termoplastický polyimid je zahřátý na vysokou teplotu a stane se tekutým. Následně se velmi tenká vrstva nanese v tekuté formě na základní polyimid, který je v pevné formě, a na horní stranu se aplikuje měděná vrstva pomocí laminace. Tento tekutý polyimid tvoří takzvanou pojivou složku mezi měděnou vrstvou a základní polyimidovou pevnou vrstvou. Pro maloobjemovou výrobu stačí konvenční stlačování ve vakuu při 350 °C. Pro velkoobjemovou výrobu je zapotřebí použít tepelnou laminaci. Nevýhodou je, že tloušťka dielektrického materiálu je větší než u předchozích dvou metod [1], [2].

2.5 Krycí vrstvy

Důležitou součástí flexibilních plošných spojů je krycí vrstva. Chrání před mechanickým poškozením vodivých cest. Základním požadavkem na krycí vrstvu je co nejmenší tloušťka a zachování ohebnosti plošného spoje. Nejpoužívanějšími materiály jsou akrylát, epoxid nebo polyimid. Krycí vrstvy se rozdělují do dvou skupin dle nanášení. První je aplikace předem připraveného kusu polyimidu pomocí akrylátového nebo epoxidové lepidla a druhá bezlepidlové nanášení tzv. fotocitlivá krycí vrstva [1], [12].

2.5.1 Aplikace pomocí lepidla

Jedná se o aplikaci krycí vrstvy pomocí akrylátového nebo epoxidového lepidla. První zmíněný materiál je nanesen na substrát a následně nalepen polyimidový krycí film od firmy DuPont Pyralux LF. Teplota laminace této krycí vrstvy je 180 °C. Má vyšší odolnost v ohybu a není odolný proti ohni. Druhý zmíněný materiál je nanášen na substrát a poté se

nanese polyimidový film od firmy Nikka Industry, který je laminována při 160 °C a splňuje podmínky nehořlavosti podle certifikace UL 94. Výhodou je, že oba materiály mají velmi dobrou pružnost v ohybu. Jejich nevýhodou je, že mají složitý proces aplikace a uskladňování, například epoxid se musí skladovat v chladicím zařízení, tudíž použití tohoto materiálu je dražší. Oproti akrylátu, který se skladuje při pokojové teplotě. Výsledná tloušťka je samozřejmě u této metody větší než u bezlepidlové metody [1], [13].

2.5.2 Bezlepidlová suchá metoda

Suchá krycí vrstva se aplikuje za pomocí vakuové laminace nebo válcové laminace, kdy dojde k výbornému zapouzdření vodivých spojů. Pomocí vakuové laminace se používá akrylát nebo epoxid a pro válcovou laminaci se používá polyimid. Polyimid dobře odolává pájení, jelikož je odolný vůči vyšším teplotám. Suchou metodou se dosahuje tenčích vrstev a je vhodná pro maloobjemovou výrobu, ale cena za jednotku plochy vyjde dráž v porovnání s tekutými krycími vrstvami [1], [13], [14].

2.5.3 Bezlepidlová tekutá metoda

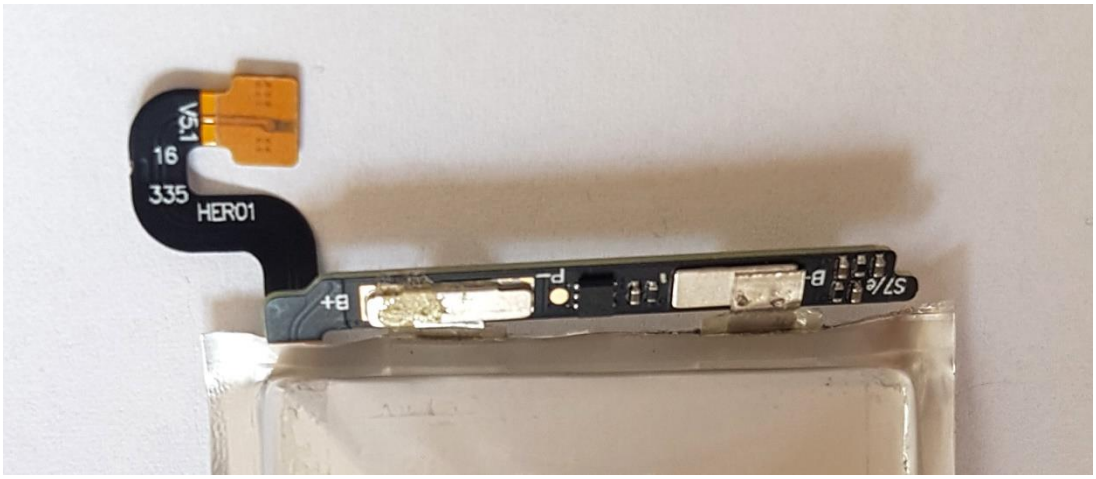
Tekutou vrstvou se nanáší epoxid nebo polyimid. Pomocí této metody se dosahuje nejtenčích vrstev a je vhodná pro velkoobjemovou výrobu. Nanášení probíhá sítotiskem nebo za použití speciálního nástroje na principu spreje, kdy je materiál v tekuté formě nanášen na výrobek. Nevýhodou bezlepidlového druhu je, že je křehčí než krycí vrstva s lepidlem [1].

Tab. 3: Rozdílná tloušťka krycích vrstev, převzato z [1].

	Tloušťka [μm]
Klasická lepidlová vrstva	30 – 100
Suchá bezlepidlová vrstva	25 – 50
Tekutá bezlepidlová vrstva	10 – 20

3 Flex-rigid plošné spoje

Flex-rigid Obr. 3 spoj kombinuje vlastnosti pevného (rigid) a ohebného (flexible) plošného spoje v jednom výrobku. Ke stabilnímu uchycení součástek a konektorů slouží pevný plošný spoj nejčastěji vyrobený z FR4. Flexibilní spoj je z velmi tenké vrstvy Kaptonu a mědi z důvodu zachování vysoké ohebnosti. Hlavní funkce flexibilní části je vzájemně propojit dvě a více pevných desek. Pro výrobu flex-rigid spoje se uvádí minimální délka flexibilní části mezi pevnými deskami 4 mm [15]. Použití těchto dvou technologií nahrazuje velký počet kabelových svazků, snižuje celkovou hmotnost a umožňuje dynamické a pružné ukládání do hotového výrobku. Velkou výhodou je zlepšení spolehlivosti vzájemného propojení pevných plošných spojů. Obvykle flex-rigid spoj bývá levnější variantou, než ohebné plošné spoje a nejčastěji je můžeme najít v televizorech, monitorech, fotoaparátech a SSD discích [3], [16], [17].



Obr. 3 Fotografie flex-rigid spoje.

4 Standardizace flexibilních plošných spojů

Obecné standardy a normalizace jsou navržené tak, aby sloužily veřejnému zájmu, usnadnily kupujícímu snadnější výběr a odstranily nedorozumění mezi výrobci a odběrateli. Jedná-li se o výrobu na zakázku, tak to v praxi může fungovat tak, že bývá smluvní dohoda na konkrétních parametrech a specifikacích výrobku mezi výrobcem a zákazníkem, která nemusí být závislá na oficiálních normách. Nicméně normalizace výrobků a součástek dovoluje jejich hromadnou výrobu, zaměnitelnost a kompatibilitu.

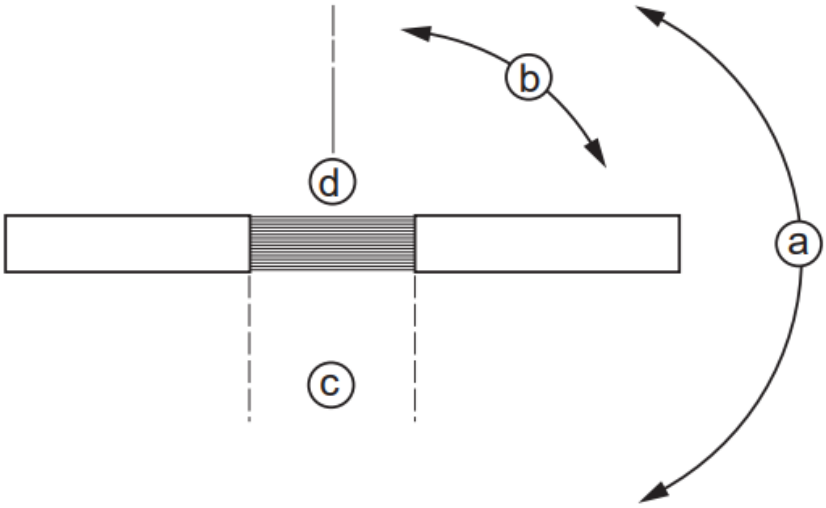
V hierarchii firmy IPC je několik norem, které se týkají flexibilních plošných spojů. Např. norma IPC-6013 se zabývá kvalifikačními a výkonnostními požadavky pro jednovrstvé, vícevrstvé flexibilní tištěné spoje i flex-rigid. Dále popisuje všeobecné požadavky pro mechanické testy flexibilních plošných spojů [18]. Norma IPC-2223 se zabývá návrhovými a konstrukčními požadavky pro zcela ohebné plošné nebo flex-rigid spoje [19]. Norma IPC-4203 zavádí klasifikační požadavky na shodu kvality dielektrických ohebných materiálů, lepicích a krycích materiálů pro ohebné plošné spoje [20]. Norma IPC-TF-870 se zaměřuje na kvalifikaci a výkon polymerních pevných i flexibilních tištěných spojů se silnou krycí fólií [21]. IPC- 6202 IPC/JPCA je vytvořený standard ve spolupráci s Japonským sdružením elektronických obvodů, který se zaměřuje na výkonnostní požadavky jednostranných a oboustranných flexibilních plošných spojů od vizuální inspekce, přes elektrické a mechanické testování až po skladování, marketing a balení výrobku [22].

4.1 Všeobecné mechanické požadavky podle IPC-6013

Všeobecné požadavky pro mechanické vlastnosti podrobněji popisuje norma IPC-6013 a její znění je popsáno následovně [18]:

Pro zkoušky v ohybu je jeden cyklus definován tak, že konec vzorku je uchycen na válec, který ohýbá vzorek jedním směrem o 180° nebo v druhém případě válec ohne vzorek jedním směrem o 90°, pak se vrátí do výchozí pozice a ohne vzorek druhým směrem také o 90°. Takto se provede specifikovaný počet cyklů ohybu a následně se provede elektrická zkouška vzorku. Test odpovídá zobrazenému Obr. 4 a musí být stanoveny minimálně tyto parametry:

- Směr ohybu (a)
- Stupeň ohybu (b)
- Počet cyklů ohybu (c)
- Průměr ohýbacího válce (d)



Obr. 4 Vzorek testu ohybu s minimálními stanovenými parametry. Převzato z [18].

Zkouška počtu cyklů flexibilních vzorků popisuje jejich životnost. Zkoumá se, kdy dojde k přerušení vodivých cest ohebného vzorku. V příslušném dokumentu zkoušky musí být zaznamenány následující parametry:

- Počet cyklů
- Poloměr ohybu
- Směr a pohyb ohybu

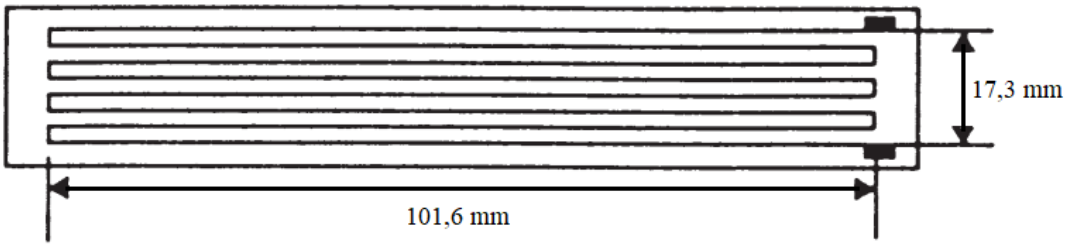
V testu přilnavosti vodičů s pružným podkladem se zkoumá, jaká síla je zapotřebí k odtržení vodičů od flexibilního podkladu bez tuhé výztuže a s výztuží. Měření se provádí na počátku, uprostřed a na konci odtržení. Podle této normy by měly vodiče bez výztuže vydržet sílu 1,86 kg tahu nebo 35 kg/cm^2 po pěti cyklech pájení a odpájení. Vodiče s výztuží by měly vydržet 1,4 kg na každých 25 mm šířky.

4.2 Testování flexibilních vzorků podle testovací normy IPC-TM-650

Všeobecné mechanické požadavky byly popsány výše. Nicméně standardů, které by konkrétně popisovaly jakým způsobem provádět mechanické testování flexibilních plošných spojů, je stále velmi málo [23]. Testovací norma IPC-TM-650, která zkoumá např. metodu chemických zkoušek, elektrických zkoušek, rozměrových zkoušek atd., se jako jedna z mála zabývá i metodou mechanických zkoušek flexibilních plošných spojů v tom smyslu, zda zamýšlené použití vzorku vyhovuje předepsaným normám této metody [23], [24].

4.2.1 Metoda 2.4.3: Zkoumání počtu ohnutí ohebného vzorku před selháním

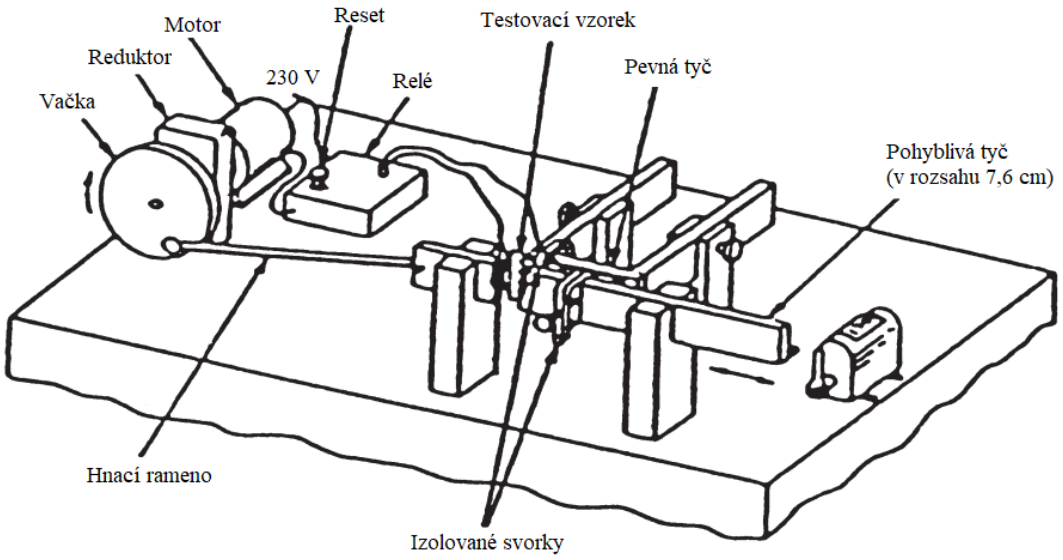
Metoda počtu ohnutí vzorku před selháním podle standardu IPC-TM-650 je popsána následovně [23], [25]: Metoda popisuje, kolik počtů ohnutí vydrží vzorek vodičů na flexibilním plošném spoji, než dojde k poruše. Zkušební vzorek se skládá z vyleptaného zkušebního vzoru vodičů na jedné straně o rozměrech 101,6 mm a 17,3 mm. Vzor je vidět na Obr. 5. Vodivé spoje jsou široké 1,5 mm a 2,5 mm vzdálené od sebe. Jedná se o zkoušku vzorku, který má vodivý vzor pouze na jedné straně a druhá strana je zcela nevodivá. Připraví se minimálně šest vzorků s danou délkou vodiče.



Obr. 5 Zkušební vzor vodičů pro zkoušku pevnosti vodičů v ohybu. Překresleno z [25].

Testovací přístroj je zobrazen na Obr. 6. Postup testování začíná inspekcí daného testovacího vzorku, jestli vodič nemá již dříve existující mikroskopické praskliny a jiné poškození. Pokud ano, vzorek se vymění za jiný. Vzorek musí být namontován tak, aby

vnitřní průměr byl 6 mm ± 1 mm. Následně se vzorek namontuje do přístroje. Otočný pohyb vačky zapříčiní horizontální kmitání hnacího ramena a způsobí pohyb zkušebního vzorku z neutrální napnuté pozice do maximálního ohybu. Takto se otestují tři vzorky na vnější stranu, kdy dochází k vnějšímu tahovému napětí, a zapíše se počet cyklů, dokud nedojde k porušení vodících cest daného vzorku. Další tři vzorky se testují na opačnou stranu, kde dochází k vnitřnímu tlakovému napětí vodivých cest. Vratný pohyb posuvné hlavy by neměl překročit 10 cyklů za minutu a posuvná dráha smyčky musí být dlouhá 25 mm ± 5 mm.



Obr. 6 Testovací zařízení pro zkoušku pevnosti vodičů v ohybu. Převzato z [25].

4.2.2 Metoda 2.4.5: Určení mechanického a elektrického chování flexibilního tištěného spoje

Metoda 2.4.5 je popsána podle normy IPC-TM-650 následujícím způsobem [26]: Test slouží k určení mechanických a elektrických vlastností po vystavění dvěma cyklům ohýbání. Bere se náhodný vzorek flexibilního materiálu s minimální délkou 61 cm. Měřicí přístroj se skládá z dvou kovových desek, kdy horní deska je schopná vynaložit sílu 206 kPa. Druhým měřícím zařízením je elektrický zkušební přístroj pro měření elektrických vlastností a dielektrické pevnosti. Postup měření je následující: Vzorek se ohne o 180° příčně v úhlu 45° k vodičům a zatlačí se mezi dvě kovové desky s tlakem 206 kPa po dobu 15 minut. Po ukončení se vzorek odebere a následně se stejný vzorek podrobí testu po dalších 15 minut. Po dvou cyklech se vzorek zkontroluje, zda nemá jakékoliv přerušení, poškození nebo jiné praskliny a podrobí se elektrickému testu [26].

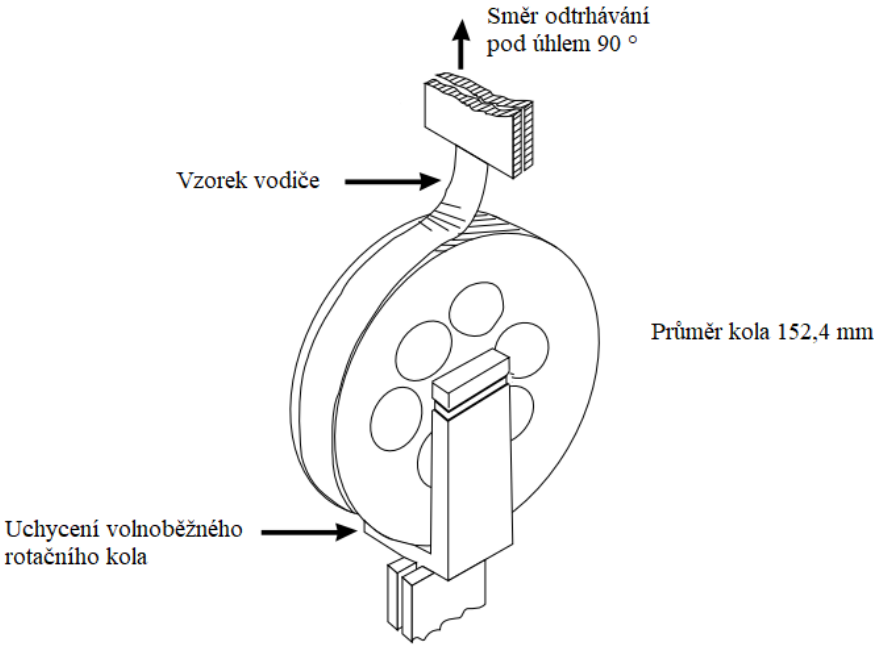
4.2.3 Metoda 2.4.9 Pevnost vazby vodiče na pružném dielektrickém podkladu při pokojové teplotě a po prudkých změnách teploty

Tato zkouška definuje pevnost vazby 18 μm tlusté vrstvy vodivé fólie na dielektrickém pružném podkladu [27]: Připraví se vodivý vzor na flexibilním podkladu o rozměrech 3,2 mm x 228,6 mm. Jako testovací přístroj by mělo být použito volnoběžné rotační kolo Obr. 7 o průměru 152,4 mm a jakékoliv tažné zařízení poháněné elektrickým motorem s konstantní rychlostí, které odtrhává vodič od pružného základu pod úhlem 90°. Postup testování začíná ponecháním vzorku 24 hodin v pokojové teplotě tj. přibližně 23 °C ± 2 °C při relativní vlhkosti 50 %. Pružný dielektrický vzorek se poté připevní ke kolu oboustrannou lepicí páskou nebo jakýmkoliv lepidlem, ale je preferované epoxidové lepidlo, a začátek vodiče se uchytí svorkami tažného zařízení. Tažné zařízení se spustí s konstantní rychlostí 50,8 mm/min a průběh zatížení se zaznamenává. Minimální odtržená vzdálenost by měla být 57,2 mm.

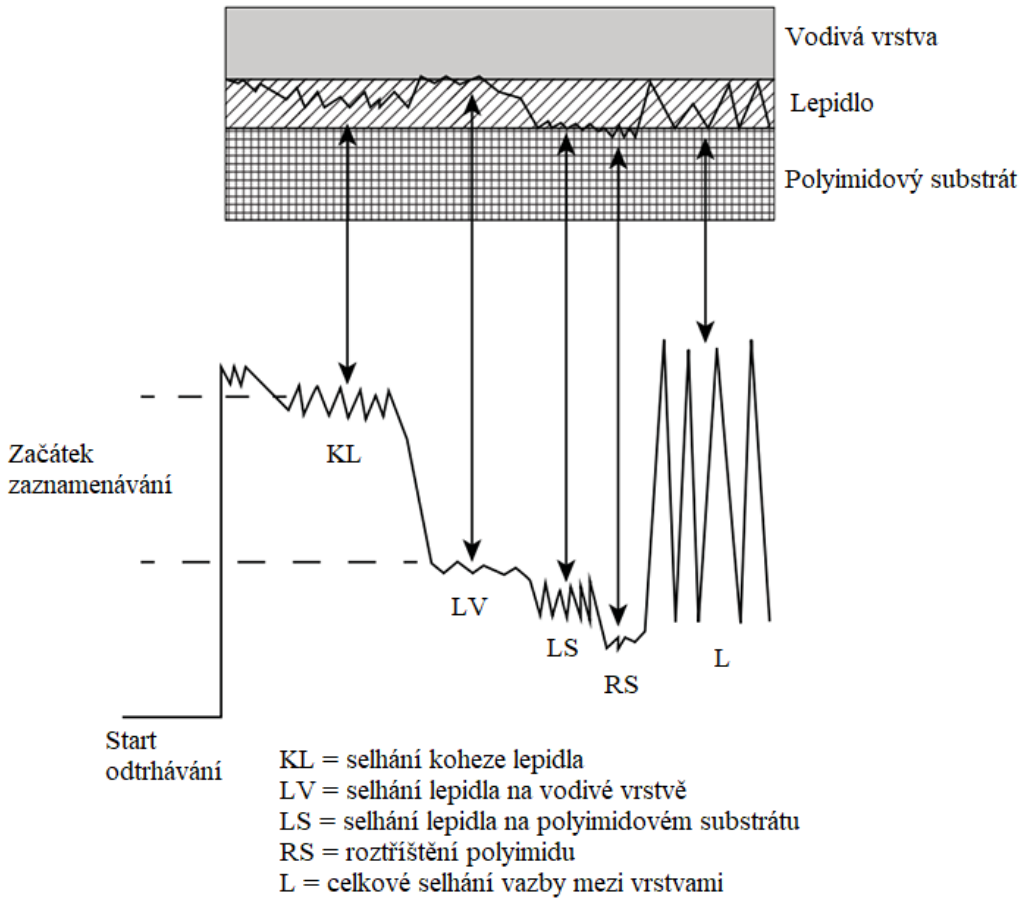
Cyklická zkouška je provedena tak, že vzorek se nechá aklimatizovat 24 hodin při pokojové teplotě, následně se zkušební vzorek vystaví pěti prudkým teplotním změnám. Prvních 30 minut se nechá při teplotě 150 °C, dalších 15 minut se nechá při teplotě 23 °C, dalších 30 minut vzorek zůstane při teplotě - 55 °C a posledních 15 minut se ponechá při 23 °C. Následně se provede stejná zkouška, která byla popsána výše.

Vyhodnocení výsledků se provede zprůměrováním všech sil zatížení zaznamenaných během odtrhávání, jak během pokojové teploty, tak během cyklických změn. Výsledek průměrné hodnoty zatížení na šířku vodiče se rovná síle pevnosti udávané v N/m. Grafické znázornění příkladů možného selhání pevnosti vazby mezi vodivou vrstvou a substrátem vidíme na Obr. 8.

Zajímavostí je, že firma Mektec CZ s.r.o. sídlící v Českých Budějovicích, která vyrábí flexibilní plošné spoje, uvádí, že síla adheze lepidel při stejné metodě testování by neměla být nižší než 196 N/m. Zkouška probíhala pro krycí vrstvu s vodivou vrstvou. Hodnota je udávaná pro 12,5 μm tlustou krycí vrstvu. Pro 25 μm krycí vrstvu by síla pevnosti neměla být nižší než 343 N/m.



Obr. 7 Volnoběžné rotační kolo. Převzato z [27].



Obr. 8 Příklady možného selhání pevnosti vazby mezi vodivou vrstvou a substrátem. Převzato z [27].

4.2.4 Metoda 2.4.19: Definice pevnosti v tahu a prodloužení flexibilních plošných spojů

Po vystavení mechanického napínání tato zkouška stanovuje pevnost vzorku v tahu a jeho prodloužení [28]: Zkušební vzorek se skládá z proužku pružného materiálu o rozměru 152,4 mm x 12,7 mm. Celkově se připraví minimálně 10 takových vzorků. Jako testovací zařízení je doporučené Tinius-Olsen Super L Tester Obr. 9, a to je zařízení pro zkoušku napínání a stlačování vzorků. Nicméně lze použít jakýkoliv jeho ekvivalent s podobnými funkcemi a se snímačem zatížení. Stroj vždy před zkouškou musí být správně nakalibrován pro rozsah napnutí daného vzorku. Doporučená teplota v místnosti by měla být 23 °C ± 2 °C s relativní vlhkostí 50 %. Jednotlivé vzorky by se měly před začátkem testování nechat 24 hodin přizpůsobit podmínkám v místnosti. Před zahájením zkoušky se provede výpočet plochy průřezu vzorku pomocí délky a šířky. Zkouška probíhá tak, že se svorky přístroje nastaví ve vzdálenosti 101,6 mm od sebe a spustí se rychlost natahování na 50,8 mm/min. Vzorek se musí umístit přesně do středů svorek testovacího přístroje, aby ve vzorku nebyla žádná vůle. Následně se zaznamená síla zatížení podle vzorce (4.2). Takto se provede test v kolmém směru a ve svislém směru. Vyhodnocení výsledků spočívá vydělením zatížení při přetrhnutí k původní ploše průřezu podle vzorce (4.1).

Určení prodloužení:

$$\frac{d2 - d1}{d1} * 100 = Prodloužení\ [\%] \tag{4.1}$$

Kde:

d1 = Počáteční vzdálenost svorek (101.6 mm)

d2 = Vzdálenost svorek při přerušení vzorku [mm]

Určení pevnosti v tahu:

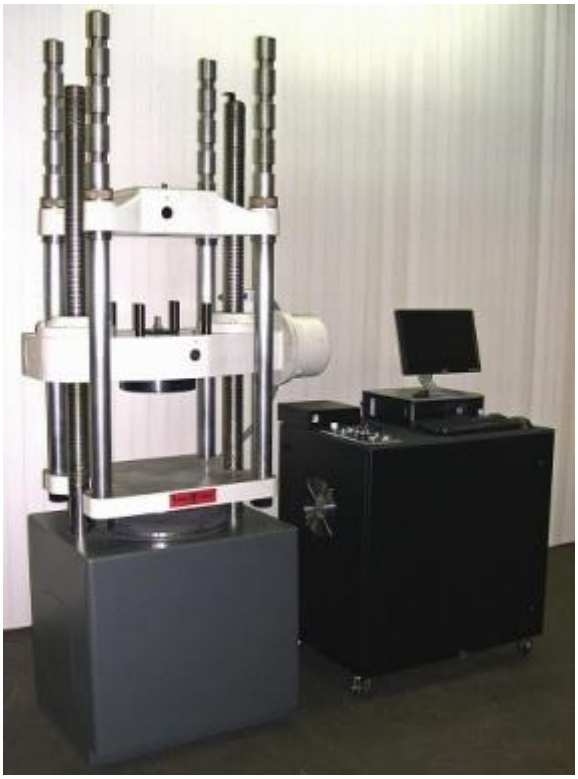
$$\sigma = \frac{F}{S} \tag{4.2}$$

Kde:

σ = napětí v tahu [Pa]

F = velikost namáhají síly při napínání [N]

S = plocha vzorku [m^2]



Obr. 9 Ilustrační fotka testovací zařízení prodloužení Tinius-Olsen Super L. Převzato z [29].

4.2.5 Metoda 2.4.18: Metoda určení pevnosti v tahu a prodloužení flexibilních měděných fólií

Předmětem této zkoušky je určit pevnost v tahu a prodloužení měděných fólií používaných pro flexibilní plošné spoje při pokojové a při zvýšené teplotě. Její znění je [30]: Přístroj na zkoušku pevnosti v tahu by měl být takový, který je schopný táhnout rychlostí 1,27 mm/min a 5,08 cm/min. Dále je doporučená komora nebo svítidlo schopné

dosáhnout a udržet teplotu 180 °C ± 10 °C během zkoušení. Testování probíhá tak, že nejprve se připraví 5 vzorků z velkého kusu plátované mědi o rozměrech 25,4 cm x 15,24 cm. Pro zajímavost - hustota elektrolyticky nanesené mědi je 8.909 g/cm^3 a hustota válcované mědi je 8,93 g/cm^3. Vzorek se umístí mezi svorky přístroje a musí se dbát zvýšené opatrnosti na vycentrování vzorku, protože je nutné se vyhnout nadměrnému upínacímu tlaku. Nastaví se počáteční rozsah svorek na 5,08 cm pro obě rychlosti. Pustí se tepelná komora nebo svítidlo a pomocí termočlánku se sleduje teplota v komoře. Vzorek se nechá po dobu 5 minut při teplotě 180 °C. Po uplynutí 5 minut se nastaví zkouška na danou rychlost. Zkouška se provede pro obě rychlosti a jak pro zvýšenou teplotu, tak i pro pokojovou teplotu. Výpočty prodloužení a pevnosti v tahu jsou stejné jako v předchozí kapitole.

Poznámka: Při rychlosti natahování 5,08 cm/min, při rychlosti grafu 50,8 cm/min v počítači a při počáteční vzdálenosti svorek 5,08 cm je každých 2,54 cm v grafu rovno 5 % prodloužení vzorku.

Tab. 4: Přehled hodnot pevnosti v tahu na plošnou hmotnost vzorku mědi. Uvedeny jsou obě metody výroby měděných fólií. Převzato z [30].

Plošná hmotnost vzorku mědi [g/m^2]	Síla pevnosti v tahu pro elektrolyticky nanesenou měď [N/cm^2]	Síla pevnosti v tahu pro válcovanou žíhanou měď [N/cm^2]
152,57	10342	10342
305,15	20684	17237
610,3	20684	17237

Tab. 5: Přehled hodnot procentuální vyjádření prodloužení na plošnou hmotnost vzorku mědi. Hodnoty jsou vedeny pro obě metody výroby měděných fólií. Převzato z [30].

Plošná hmotnost vzorku mědi [g/m^2]	Prodloužení elektrolyticky nanesené mědi [%]	Prodloužení válcované žíhané mědi [%]
152,57	2	5
305,15	3	10
610,3	3	20

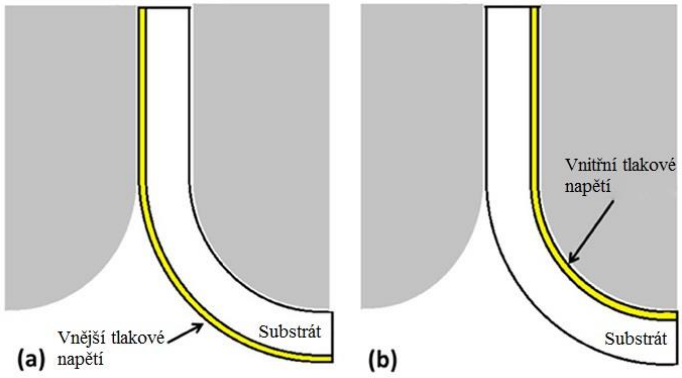
5 Druhy testovacích zařízení a mechanických zkoušek flexibilních plošných spojů

V dnešní době nejsou flexibilní plošné spoje využívané jen ve výkonové elektronice, automobilovém průmyslu, ale stávají se používanější již v dostupných komerčních zařízeních, jako jsou např. mobilní telefony, bezdrátová sluchátka, chytré hodinky, fotoaparáty atd. Všechna tato zařízení jsou kolikrát ve velmi malém kompaktním pouzdru a těchto malých rozměrů je možné dosáhnout jen díky flexibilní elektronice. Nejdůležitějšími parametry ohebných tištěných spojů je počet cyklů ohybu tak, aby zůstaly stejné elektrické vlastnosti a maximální průměr ohybu.

Mezi základní mechanické testování flexibilních plošných spojů patří metoda statických a metoda dynamických zkoušek. Statická zkouška je, kdy flexibilní vzorek je testován napínáním, kroucením nebo řízeným ohybem přes válečky, kde předem víme průměr ohybu. Zkoumá se, zdali je vzorek schopný vydržet v daném ohybu bez jakéhokoli poškození.

Dynamická zkouška spočívá v opakovatelném ohýbání vzorků z klidové pozice do plného ohnutí. Jedná se o náhlé a proměnlivé změny. Zkoumá se počet cyklů ohybů, než flexibilní vzorek selže. Mezi dynamické zkoušky patří např. lineární test pružnosti, test neřízeného ohybu a test počtu ohybů.

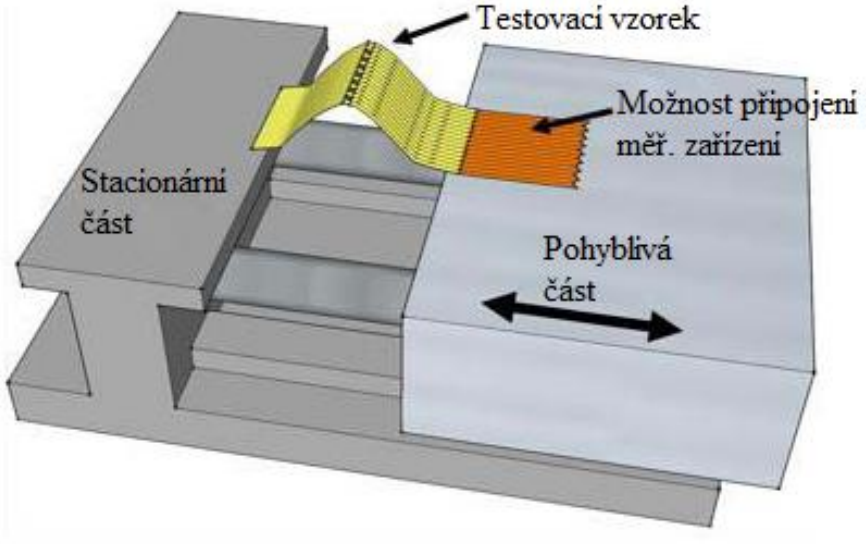
Jestliže uvažujeme, že ohebný substrát má vodivou vrstvu na horní straně, dochází při lineárních mechanických zkouškách ohybu především k dvěma namáháním. Vnější tahové napětí je, když vodivá vrstva je ohnuta směrem ven, a vnitřní tlakové napětí je, když vodivá strana je ohnuta směrem dovnitř Obr. 10.



Obr. 10 Názorná ukázka a) vnějšího tahového napětí, b) vnitřního tlakového napětí. Převzato z [31].

5.1 Metoda lineárního neřízeného ohybu Push-to-Flex

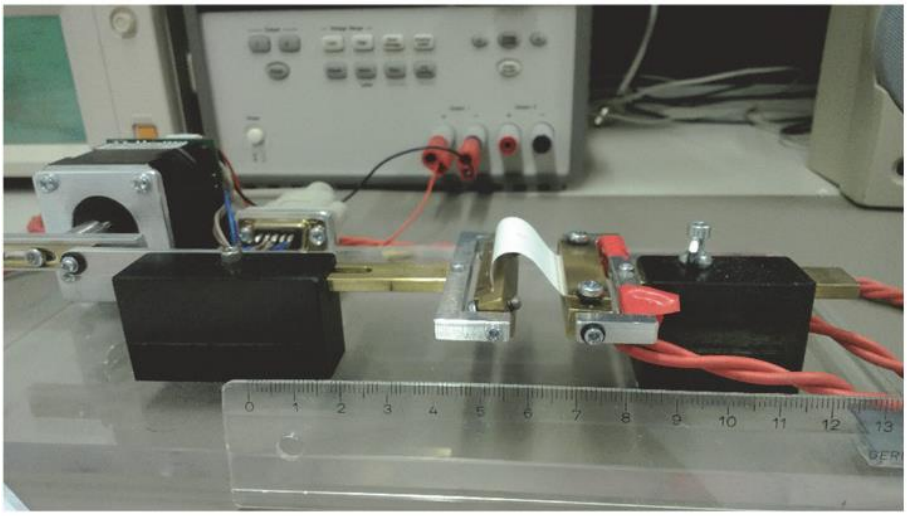
Jedná se o metodu, která spočívá v opakovatelném ohýbání flexibilního vzorku pomocí posuvného stolu. Posuvný stůl je řízen elektronikou a pohyb zaručují nejčastěji krokové motory nebo pneumatické elektromagnetické ventily. Jedna část stolu je stacionární a druhá část je posuvná v lineárním směru po dvou kolejnicích Obr. 11. Testovací vzorek je umístěn do mezery mezi pohyblivou a stacionární částí. Posouvání pohyblivé části mění velikost zakřivení ohybu vzorku z výchozí napnuté pozice až do maximální pozice ohnutí [32], [33].



Obr. 11 Testovací zařízení pro zkoušku Push-to-Flex. Převzato z [32].

Jedná se o neřízený ohyb vzorku, kdy poloměr ohybu není žádným způsobem přesně stanoven, takže vzorek se samovolně ohne podle vlastností svých materiálů. Vzorek je na jedné straně připojen k měřicím přístrojům, které během testování nepřetržitě měří napětí a proud. Na základě těchto hodnot se vyhodnocuje rozdíl odporu vodivých cest výchozí hodnoty.

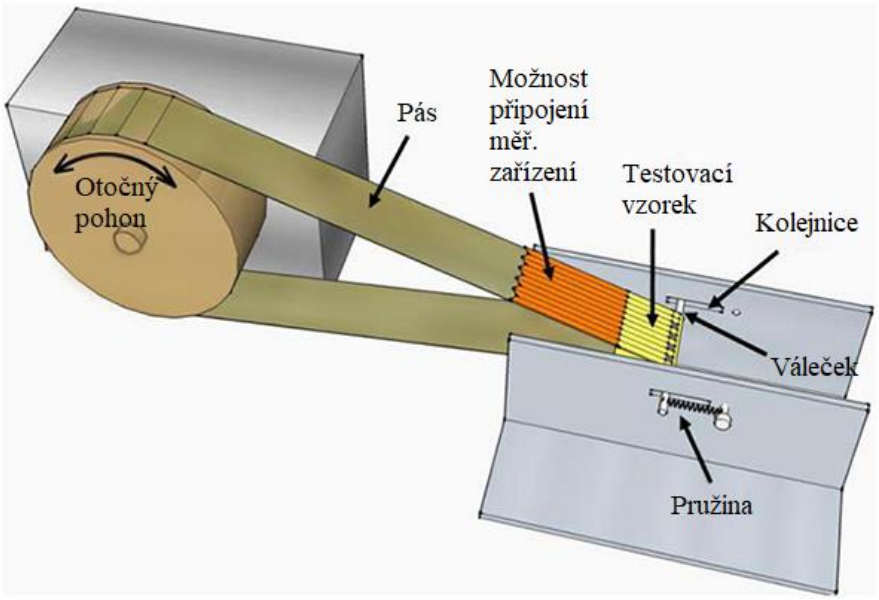
V rámci jedné ze studií byl takto testován flexibilní tenkovrstvý tranzistor na polyimidovém substrátu o tloušťce 4,8 μm [32], [33]. Vzorek je ohýbán ve směru toku proudu tranzistorem. Ve stlačené pozici má vzorek poloměr 1,75 mm. Jeden cyklus z výchozí pozice do stlačené trvá přibližně 5 sekund. Bylo zjištěno, že k selhání došlo mezi 90 000 a 100 000 cykly ohybů [32].



Obr. 12 Ukázka konkrétního zařízení pro metodu Push-to-Flex. Převzato z [34].

5.2 Metoda řízeného ohybu flexibilního vzorku na požadovaný poloměr

V metodě Push-to-Flex byl testovací vzorek samovolně ohýbán v závislosti na vlastnostech materiálu a poloměr ohybu nebylo možné změnit. V praxi některé aplikace mohou vyžadovat statický ohyb flexibilní elektroniky s definovaným poloměrem až o jednotkách milimetrů. S ohledem na tento fakt, bylo navrženo testovací zařízení Obr. 13, na kterém je vzorek přes malý váleček ohnut na požadovaný poloměr [32].



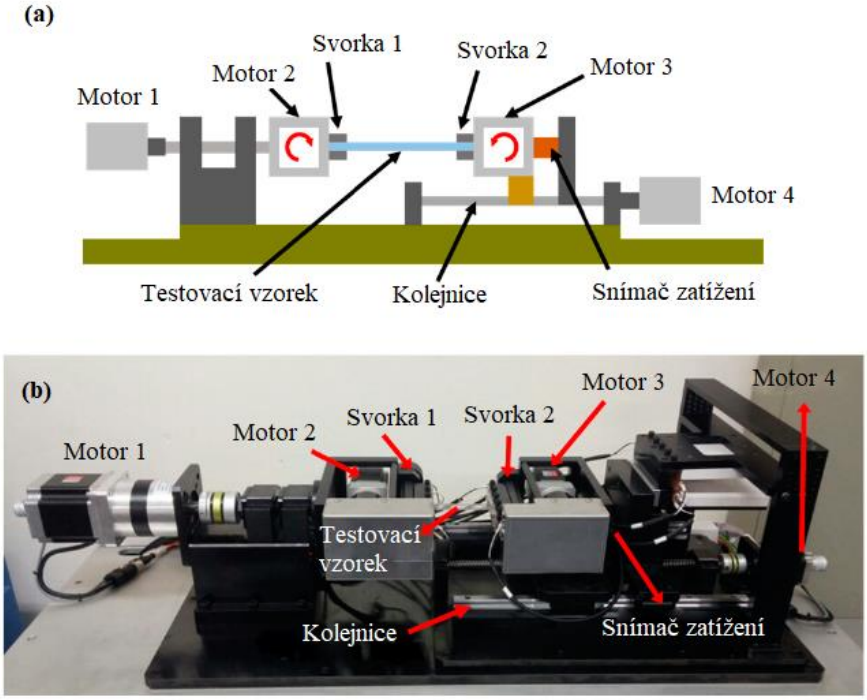
Obr. 13 Testovací zařízení pro zkoušku řízeného ohybu flexibilního vzorku. Převzato z [32]

Zařízení se skládá z jednoho malého válečku a otočného pohonu, který pohání krokový motor [34]. Přes tyto dvě části je natažen 50 μm tlustý polyimidový Kaptonový pružný pás, který slouží jako kolejnice pro testovací vzorek. Malý válec je napínán dvěma

pružinami, které vytváří konstantní sílu 0,0086 N/mm a drží tak vzorek konstantně napnutý, který přiléhá na povrch válečku. Většinu mechanického napětí přebírá otočný pohon, nikoli testovací vzorek, takže na vzorek působí pouze vnější tahové napětí. Flexibilní vzorek je připevněn na posuvný pás v místě kolem malého válce a je v tomto případě dosaženo poloměru 1,6 mm. Velikost válce je závislá na požadovaném poloměru a lze ho libovolně zaměňovat za jiný [34]. Otočný pohon se otáčí jen po dobu, kdy je testovací vzorek ohýbán přes malý válec, následně se pohon zastaví a začne se otáčet v opačném směru [32].

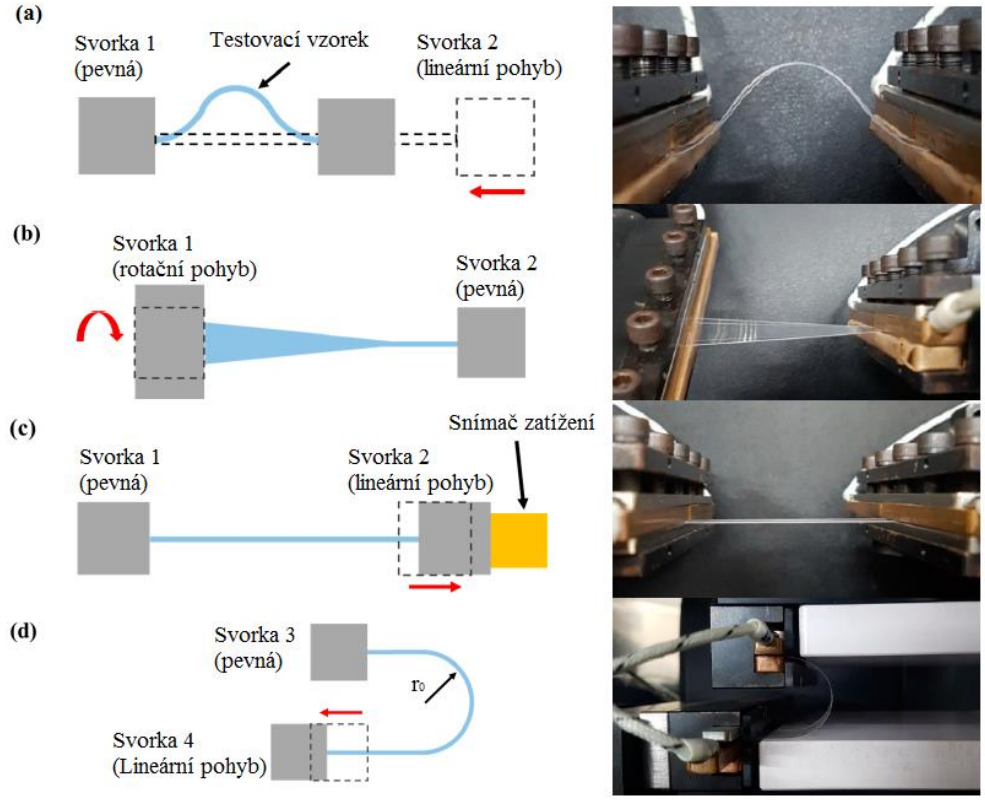
5.3 Univerzální testovací zařízení pro mechanické deformace ohebného spoje

V rámci zjednodušení testování flexibilních plošných spojů bylo navrženo a vyrobeno univerzální testovací zařízení, které je schopné mechanicky otestovat flexibilní plošný spoj více způsoby, např. metodou opakovaného ohybu na jednu stranu, střídavého ohýbání na obě strany, kroucení, natahování a měření elektrických parametrů. Testovací zařízení se skládá ze tří hlavních částí. Mechanika je složena z krokových motorů a kuličkového šroubu. Motory provádí veškeré lineární, otočné a posuvné pohyby. Dále zde najdeme měřicí zařízení pro měření odporu a napětí a řídící jednotku pro zpracování signálů pro pohyb motorů [35].



Obr. 14 Univerzální testovací zařízení a) pohled z boku, b) fotografie zařízení. Převzato z [35].

Na Obr. 14 vidíme podrobný popis testovacího zařízení. Svorky slouží k pevnému uchycení a připojení elektrod vzorku s měřicím zařízením. Motor 4 pohybuje se svorkou 2 v lineárním pohybu po kolejnicích. Rotační pohyb po vertikální ose dělá motor 1 se svorkou 1. Dále je možné pomocí motorů 2 a 4 řídit v omezeném úhlu náklon na svorkách 1 a 2 [35].

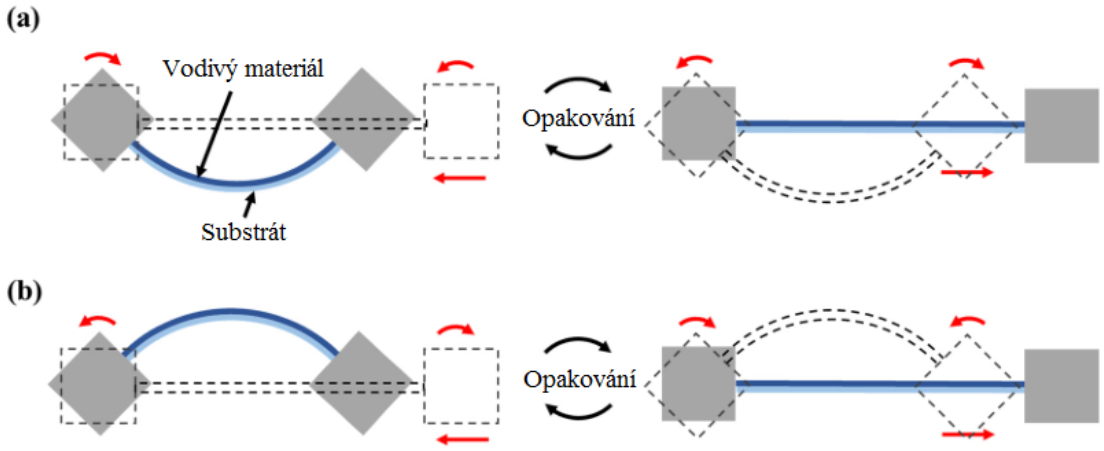


Obr. 15 Univerzální testovací zařízení a) lineární test, b) rotační test, c) napínací test, d) test ohybu za konstantního poloměru. Převzato z [35].

Jednotlivé typy testů vidíme na Obr. 15, kde levá strana znázorňuje schematický nákres a pravá strana skutečnou fotografii testu. Obr. 15 a) ukazuje lineární test ohybu, kdy svorka 1 je pevná a druhá pohyblivá. Ohyb vzorku v tomto případě je neřízený. Obr. 15 b) znázorňuje rotační test, kde motor 1 otáčí svorkou 1 a svorka 2 je pevně fixovaná. V další testovací fázi je vzorek podroben napínacímu testu. Napínání je měřeno snímačem zatížení znázorněno na Obr. 15 c). Poslední znázorněná zkouška je test ohybu za konstantního poloměru r_0. Svorka 3 je v tomto případě pevně fixována a pohybuje se pouze svorka 4, kterou pohání motor 4 [35].

Následující Obr. 16 demonstruje test, kdy ohyb vzorku je řízený. Na vzorku dochází k dvěma namáháním. Na straně, kde se vzorek smršťuje, se toto namáhání nazývá vnitřní

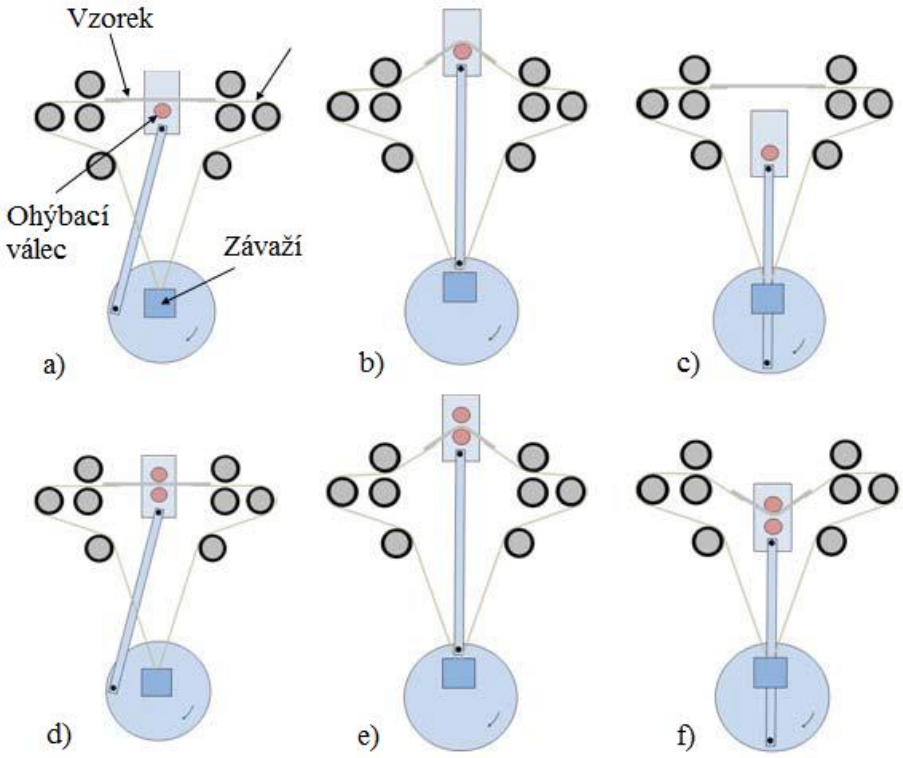
tlakové napětí a na vnější straně dochází k vnějšímu tahovému napětí. Vzorek v tomto případě je umístěn mezi svorky 1 a 2. K řízenému ohybu dojde tak, že svorky se natočí v úhlu 45° a následně se svorka 2 lineárně posune ke svorce 1. Celý proces se opakuje na opačnou stranu, jak znázorňuje Obr. 16 [35].



Obr. 16 Test řízeného ohybu na univerzálním testovacím zařízení a) vnitřní tlakové napětí , b) vnější tahové napětí. Převzato z [35].

5.4 Cyklický test

Tento test je navržen speciálně pro cyklickou zkoušku ohybů flexibilních plošných spojů [36]. Cyklický test umožňuje testovat vzorek střídavě na obě strany vysokou rychlostí, kdy dochází k vnitřnímu tlakovému ohybu a vnějšímu tahovému ohybu. Test je také možné provádět pouze na jednu stranu, kdy ohyb je aplikován ze spodní strany tzn. ze strany substrátu [37]. Nicméně poloměr ohybu umístěného vzorku je omezen použitými válci. Testovací zařízení je znázorněno na Obr. 17. Jakmile se rotor roztočí, ohýbací válec se začne pohybovat vertikálním směrem, rychlost cyklů se přibližuje ke 103 cyklům/min [37]. Vzorek je umístěn na pružném pásku, který je veden přes kladku a v dolní části zatížen závažím tak, aby se vzorek vždy vrátil do počáteční pozice. Na Obr. 17 a) je znázorněná výchozí pozice vzorku. V dalším kroku je vzorek v maximální pozici ohybu. První tři obrázky se týkají jednosměrného ohybu, takže v posledním kroku se vzorek vrací do výchozí pozice.



Obr. 17 Schématický popis cyklického testu a) vzorek je ve výchozí pozici, b) vzorek je ohnut na jednu stranu pomocí válečku, c) výchozí pozice, d) výchozí pozice pro další test, e) vzorek je ohnut na jednu stranu, d) vzorek je ohnut na druhou stranu. Převzato z [37].

Na Obr. 17 d), e), f) je ukázána metoda obousměrného ohybu. Zde místo jednoho ohýbacího válce jsou dva a díky tomu je možné vzorek ohnout do vnitřní strany. Ve směru nahoru je vzorek ohýbán přes spodní válec a je vyvíjeno vnější tahové napětí a ve směru dolu přes horní válec a je vyvíjeno vnitřní tlakové napětí [37]. Opakované ohyby na vnější a vnitřní stranu mají za následek vytvoření trhlin ve vzorku a to zvyšuje elektrický odpor [37]. Nejprve je změřen odpor vzorku před zahájením zkoušky. Po určitém počtu cyklů ohybů se testování zastaví a změří se odpor. Relativní procentuální změna elektrického odporu je vynesena proti počtu cyklů.

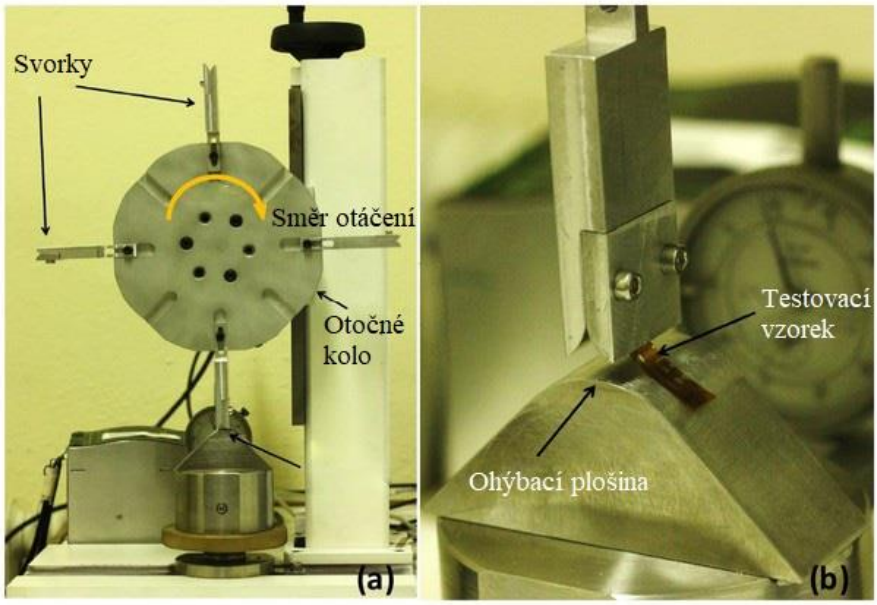
V rámci experimentů byl testován vzorek o tloušťce 127 μm z polyethylentereftalátu (PET), na kterém je 200 nm respektive 500 nm tlustá vrstva mědi nanesena metodou válcováním [36]. Rozměry vzorku byly 100 mm x 25,5 mm a vzorek byl testován v jeho středu. Vzdálenost od neutrální pozice do maximální pozice ohybu byla 2 cm a byly použity ohýbací válce o průměru 5 mm respektive 8,9 mm [35]. Experimentálně bylo zjištěno, že trhliny vznikají ve středu a dál se šíří k okrajům vzorku, při rozšiřování se vícero trhlin spojí v jednu větší trhlinu. Dále bylo zjištěno, že odpor měděné vrstvy se dramaticky zvýší, jakmile trhlina dosáhne přibližně 80 % - 90 % své

celkové šířky vzorku [36]. Vzorky, které se testovaly při vyšších teplotách anebo v prostorech s vyšší vlhkostí měly větší sklon k rychlejšímu selhání a také bylo zjištěno, že vzorek s tenčí vrstvou mědi při stejných podmínkách měl rychlejší průběh rostoucího odporu [38].

5.5 Flex-E-Test

Tato testovací aparatura byla vyvinuta v institutu materiálových věd Ericha Schmida ve spolupráci s NanoTec centrem v Rakousku. V této aparatuře může být jakákoliv pružná elektronika vystavena danému počtu cyklů ohybu s předem danou rychlostí, poloměrem, i daným směrem ohybu. Je popsána následovně [31]:

Hlavní část této aparatury je otočné kolo, které má osm souměrně rozmístěných drážek, do kterých se umístí speciální svorky vzorků. Tyto svorky jsou zasunuty do drážek a na opačném konci jsou zaoblené z toho důvodu, aby hrana svorky se nezařezávala do testovacího vzorku. Zaoblené svorky také definují poloměr ohybu vzorku. Vzorky jsou umístěné do svorek pomocí šroubků. Otočné kolo se vzorky je připevněno na vertikálním posuvném úchytu nad ohýbací plošinou tak, aby se konce svorek míjely s plošinou, ale flexibilní vzorky byly ohýbané přes plošinu. Ve spodní části je ohýbací plošina, která není plochá, ale je do tvaru oblouku. Pomocí softwaru je řízena rychlost a směr otáčení kola. Test lze provádět jednotlivě na každou stranu anebo i střídavě na každou stranu po deseti cyklech. Velkou výhodou tohoto testu je schopnost testovat až 8 vzorků najednou.



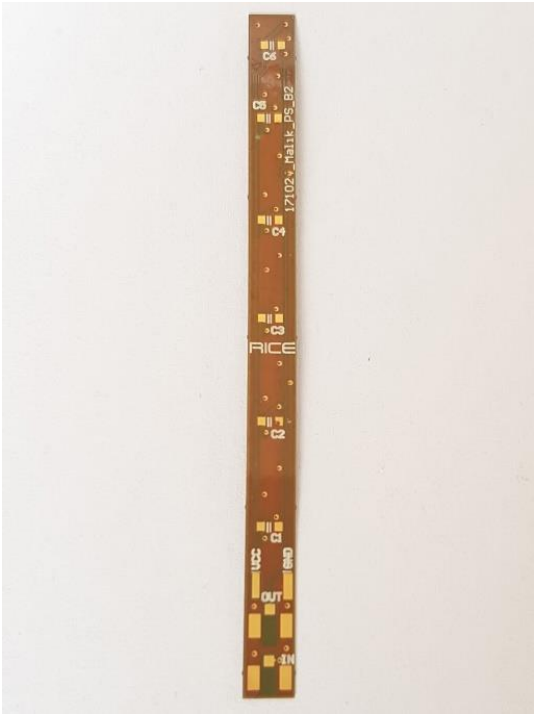
Obr. 18 Testovací aparatura pro Flex-E-Test a) přední pohled, b) detajlní pohled na testovací vzorek. Převzato z [31].

6 Návrh metody testování předloženého vzorku

V této části je popsán návrh metody pro statickou a dynamickou zkoušku dostupného flexibilního vzorku, který byl navržen pro účely katedry technologií a měření (KET) na Západočeské univerzitě v Plzni. Daný vzorek byl změřen, technologicky popsán a porovnán s popisem vzorků použitých při zkouškách podle standardů. Pokud byla nalezena shoda, bylo možné testovat vzorek podle testovací metody IPC-TM-650. Pokud nebyla, bylo naším úkolem zvolit co nejvhodnější metodu testování, abychom zjistili, jak se daný vzorek chová a jaké má mechanické vlastnosti.

6.1 Technický popis vzorku

Jedná se o vzorek Obr. 19, který byl navržen v programu Altium. Následně byl zaslán firmě PragoBoard sídlící v Praze, která vzorek vyrobila s následujícími vlastnostmi. Flexibilní vzorek je oboustranný a jedná se o bezlepidlovou metodu, tzn., že jednotlivé materiály k sobě nejsou připevněny lepidlem, ale drží na sobě pomocí speciálních nanášecích metod, které jsou podrobněji popsány v kapitole (2.4). Délka vzorku byla 73 mm a šířka 5 mm. Jako dielektrický materiál byl použit Kapton o tloušťce 100 µm, metoda výroby měděné vrstvy byla použita válcovaně žíhaná měděná fólie Dupont Pyralux AP 8545R o tloušťce 18 µm. Pájecí plošky mají povrchovou úpravu pozlacením (ENIG). Obě strany mají nepájivou krycí vrstvu v jantarové barvě.



Obr. 19 Fotografie vzorku v narovnané poloze.

6.2 Porovnání vzorku dle standardů

Po přezkoumání všech testovacích metod dle standardu IPC-TM-650 nebyla shledána rozměrová shoda s naším zkušebním vzorkem. Ve většině testovacích metod byl použitý jednostranný flexibilní vzor a naším vzorkem byl oboustranný motiv. Většina těchto metod a návodů vznikla v dřívějších letech, a proto byly jejich návrhy koncipovány pro jednodušší vzorky o větších rozměrech. Dnešní technologie jsou schopné vyrobit flexibilní plošné spoje o menších tloušťkách a s lepšími vlastnostmi. Je tedy nutné při návrhu těchto metod počítat s tím, že náš vzorek má jiné rozměry, může se tedy při zkoušce chovat odlišně vlivem nových výrobních technologií a materiálů a uzpůsobit tomu i testovací zařízení pro konkrétní zkoušku.

Obr. 20 Fotografie vzorku vyrobeného pro integraci do modelu lidské ruky v ohnuté poloze.

6.3 Návrh statické zkoušky

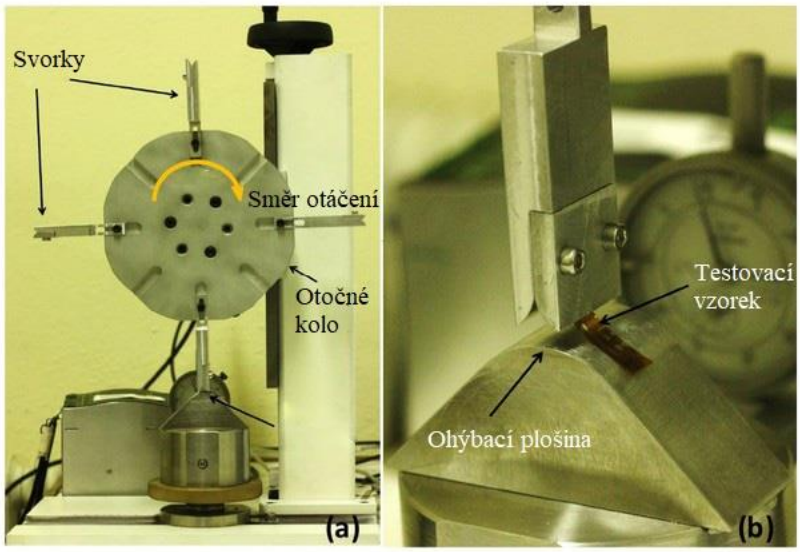
Jako statická zkouška připadá v úvahu metoda řízeného ohybu, kdy vzorek je připevněn na pás z pružného podkladu, aby nedocházelo k tření vzorku o váleček, jak je popsáno v kapitole (5.2). Pás je poháněn rotačním kolem a náš vzorek se kontrolovaně ohne přes váleček. Pomocí tohoto válečku jsme schopni dosáhnout řízeného ohybu a známe tedy průměr ohnutí. Test by probíhal od největšího až po nejmenší průměr válce.

Námi zkoumaný vzorek flexibilního plošného spoje je určen pro integraci do modelu lidské ruky. Nemělo by tedy docházet k dynamickým ohybům testovaného vzorku, ale spíše k trvalému ohybu v určitém úhlu. Plošný spoj se tedy částečně samovolně vrací z ohnuté pozice do výchozí pozice a působí proti směru ohybu. Na základě toho byly zvoleny průměry válečku pro tento test 30 mm, 20 mm, 10 mm, 5 mm a 3 mm. Samotné testování by začínalo uchycením našeho vzorku na pružný pás, poté by se spustil mechanismus, který by otáčel kolem do té doby, než by vzorek najel na váleček. Zhruba ve středu vzorku by se vypnul mechanismus. Takto by se vzorek nechal 15 min a následně by se podrobil mikroskopické inspekci a elektrickému testu, kde by se zjišťoval rozdíl hodnoty odporu vůči počátečnímu stavu. Následně by se váleček vyměnil za jiný a test by se opakoval.

6.4 Návrh dynamické zkoušky

Dynamickou zkoušku je potřeba správně navrhnout vzhledem k parametrům daného vzorku. Může zde docházet buď k lineárnímu neřízenému ohybu, nebo k prudkým cyklickým změnám, kde jsme limitováni použitým válcem pro ohyb. Jako nejčastější použití dynamického testu bývá lineární test neřízeného ohybu, kde bývá vzorek zpravidla uchycen pomocí svorek s ostrými hranami. Vzhledem k vlastnostem našeho vzorku bude pravděpodobně velké namáhání působit právě v místech uchycení vzorku, kde se ostré hrany svorek mohou zařezávat do testovacího vzorku. Nejlepší variantou proto bude testovací aparatura typu Flex-E-Test (5.5). Její velkou výhodou je, že konec svorky není ostrý, ale zaoblený a nedochází tak k namáhání vzorku při uchycení. Pomocí vertikálního posuvného úchytu lze nastavit, v jak těsné blízkosti se bude testovací vzorek ohýbat, a lze tedy dosahovat velkých i malých poloměrů. Testovací vzorek je oboustranný, takže můžeme sledovat jak vnitřní tlakové napětí, tak vnější tahové napětí. Doporučená rychlost otáčení rotačního kola pro náš vzorek je 3 ot/s, ale je možné během testování rychlost měnit pomocí softwaru. Možnosti měření hodnot odporu vzorku jsou online a offline. Online měření slouží ke sledování změn odporu při ohýbaní vzorku během spuštěného testování a je vyžadováno velmi rychlé měření s malou periodou sběru dat [23]. Offline měření se používá pro postupné měření po několika cyklech, ale je velmi přesné [23]. Hodnoty odporu se porovnávají s počáteční hodnotou neohýbaného vzorku. V tomto testu

není možné online měření z důvodu špatného napojení vzorku s měřicím přístrojem. Offline měření je možnou volbou, kde se vzorek změří každých 1000 cyklů.



Obr. 21 Vhodná aparatura typu Flex-E-Test pro dynamickou zkoušku vzorku a) přední pohled, b) detailní pohled na testovací vzorek. Převzato z [31].

Závěr

Tato bakalářská práce se nejprve podrobně zaměřuje na výrobu flexibilních plošných spojů, kde jsou přehledně zpracovány dielektrické materiály a jejich fyzikální vlastnosti. Dále jsou vysvětleny dvě nejpoužívanější metody nanášení vodivých vrstev. V praxi se nejčastěji používá válcovaná žíhaná měděná vrstva z důvodu nižších nákladů na výrobu a kratšího času produkce. V další podkapitole jsou popsány druhy pojivých materiálů neboli lepidel, jejich vlastnosti a základní požadavky. Dnešní technologie umožňují i bezlepidlové spojení substrátu a vodivé vrstvy. Bezlepidlové spojení má velkou výhodu v dosažení menší tloušťky výsledného ohebného plošného spoje, nicméně v praxi se víc používá klasické spojení pomocí lepidel z důvodu lepšího vyplnění prostoru mezi vrstvami a tím i vyšší odolnosti proti nečistotám. Flex-rigid kombinuje dva druhy plošného spoje do jednoho celku. Vzniká tím velká úspora kabeláže mezi pevnými deskami a lepší spolehlivost propojení.

Standardy pro flexibilní plošné spoje jsou navržené tak, aby sloužily veřejnému zájmu a klasifikovaly kvalitu plošných spojů. Většina standardů popisuje obecně návrhové, konstrukční, kvalifikační a výkonnostní požadavky pro ohebné plošné spoje i flex-rigid. V současné době je IPC-TM-650 jako jedna z mála metod popisující podrobný návod a metodiku mechanických zkoušek. Podrobně popsáno a vybráno je pět metod. Popsány jsou mechanické zkoušky pro ohebnost vzorků a jejich životnost, pružnost při natahování a pevnost vazby mezi jednotlivými vrstvami. Jedná se o hlavní pilíře pro funkčnost flexibilních plošných spojů v praktickém použití.

V kapitole pět je zpracován přehled testovací aparatury. Všechny tyto testovací přístroje jsou sestrojeny a vyvíjeny soukromě v laboratořích nebo výzkumných centrech. Možnost koupě těchto zařízení na trhu není možná.

Poslední kapitola je věnována návrhu nejvhodnější testovací metody pro předložený flexibilní spoj. Pokud by se vzorek přibližně shodoval se vzorky použitými v testovacích metodách podle normy IPC-TM-650, bylo by možné ho podrobit konkrétně stejným testům. Bohužel shoda nebyla shledána, proto byla na základě dalších informací a osobní konzultace s firmou Mektec s.r.o., která se zaměřuje na výrobu flexibilních plošných spojů, navržena nejideálnější metoda. Tato firma zákazníkům garantuje až 1 000 000 ohybů jejich

výrobků bez poškození. Ve fabrice jsou schopni za den produkovat přibližně 20 km flexibilního spoje, přibližně 230 mm/s. Jako statická zkouška byla navržena metoda řízeného ohybu. Pomocí této metody by bylo možné dosáhnout přesného poloměru ohybu. Zvolené průměry válečků pro tento testovací vzorek byly 30 mm, 20 mm, 10 mm, 5 mm a 3 mm. V dynamické zkoušce by byl sledován počet cyklů ohnutí před selháním. Doporučuje se volba Flex-E-Testu. Rychlost otáčení rotačního kola byla zvolena 3 ot/s. Pro tento test by nebylo možné online zaznamenávání hodnot, proto každých 1000 cyklů by bylo zaznamenáváno offline měření.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] C. F. Coombs and H. Holden, *Printed Circuits Handbook*, Seventh Ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016. 1648 s. ISBN 978-0071833967.

[2] R. S. Khandpur, *Printed circuit board: design, fabrication, assembly and testing*. New Delhi: McGraw-Hill Education, 2006. 717 s. ISBN 0071589252.

[3] Contag AG, "Flexible printed circuits," 2018. [Online]. Dostupné z: http://www.contag.eu/leiterplatten.php?leiterplatten_produkte_starrflex.html. [Cit: 1-04-2019].

[4] Ensinger plastics, "Polyimid." [Online]. Dostupné z: https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/vysokovykonne-plasty/pi-polyimid. [Cit: 28-04-2019].

[5] Omnexus, "Comprehensive Guide on Polyimide." [Online]. Dostupné z: https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyimide-pi-plastic. [Cit: 01-05-2019].

[6] GES electronics, "Kaptonová páska." [Online]. Dostupné z: https://www.ges.cz/cz/pajeni-plosne-spoje/kaptonova-paska/SLT.html. [Cit: 27-04-2019].

[7] P. Knowledge, *Flexible Circuit Technology and its Applications*. Loughborough: PRIME Faraday Partnership, 2002. 59 s. ISBN 1844020231.

[8] RTP imagineering plastics, "UL94 V-0, V-1, V-2 FLAMMABILITY STANDARD." [Online]. Dostupné z: http://web.rtpcompany.com/info/ul/ul94v012.htm. [Cit: 20-03-2019].

[9] DuPont, "Mylar Polyester Film, Electrical Properties," 2003. [Online]. Dostupné z: http://usa.dupontteijinfilms.com/wp-content/uploads/2017/01/Mylar_Electrical_Properties.pdf. [Cit: 25-04-2019].

[10] C. F. Coombs and H. Holden, *Printed Circuits Handbook*, Fifth Ed. New York: McGraw-Hill Education, 2001. 1344 s. ISBN 978- 0071350160.

[11] PFC flexible circuits limited, "Technology discussion – RA vs ED Copper." [Online]. Dostupné z: https://pfcflex.com/technology-discussion-ra-vs-ed-copper/. [Cit: 30-03-2019].

[12] Tech-etch Inc, "Flexible Printed Circuits Design Guide." [Online]. Dostupné z: https://www.tech-etch.com/flex/flex_design_guide.pdf. [Cit: 28-04-2019].

[13] DuPont, "Pyralux ® LF Coverlay," 2018. [Online]. Dostupné z: https://www.dupont.com/content/dam/Dupont2.0/Products/Electronics-and-imaging/Literature/PyraluxLFcoverlay_DataSheet.pdf. [Cit: 29-04-2019].

[14] DuPont, “Pyralux PC 1000 - Technical datasheet,” 2011. [Online]. Dostupné z: http://www.flexiblecircuitry.com/wp-content/uploads/2017/05/Dupont-PC1000-Coverlay.pdf. [Cit: 17-04-2019].

[15] Multi-CB, “Flex and Rigid-Flex boards.” [Online]. Dostupné z: https://www.multi-circuit-boards.eu/en/pcb-design-aid/flex-rigid-flex.html. [Cit: 28-04-2019].

[16] A. Roy, “Designing with Ultra-Thin, Flexible Printed Circuit Boards,” 2017. [Online]. Dostupné z: https://www.electronicdesign.com/industrial-automation/designing-ultra-thin-flexible-printed-circuit-boards. [Cit: 17-04-2019].

[17] Minco company, “Rigid Flex,” 2019. [Online]. Dostupné z: https://www.minco.com/products/circuits/rigidflex. [Cit: 19-05-2019].

[18] IPC, “IPC-6013A Qualification and Performance Specification for Flexible Printed Boards,” *Master Drawings*, 2000. [Online]. Dostupné z: http://www.flex-plus.com/Upload/下载中心/IPC6013A-23192439247.pdf. [Cit: 05-05-2019].

[19] IPC, “IPC-2223A Sectional Design Standard for Flexible Printed Boards,” *Ipc*, 2004. [Online]. Dostupné z: http://www.ipc.org/toc/ipc-2223a.pdf. [Cit: 06-05-2019].

[20] IPC, “IPC-4203 Adhesive Coated Dielectric Films for Use as Cover Sheets for Flexible Printed Circuitry and Flexible Adhesive Bonding Films,” 2002. [Online]. Dostupné z: http://www.ipc.org/TOC/IPC-4203.pdf. [Cit: 10-05-2019].

[21] IPC, “IPC-TF-870 Qualification and Performance of Polymer,” 1989. [Online]. Dostupné z: http://www.ipc.org/TOC/IPC-TF-870.pdf. [Cit: 15-05-2019].

[22] IPC/JPCA, “IPC/JPCA - 6202 Performance Guide Manual for Single - and Double - Sided Flexible Printed Wiring Boards,” 1999. [Online]. Dostupné z: http://www.ipc.org/toc/ipc-jpca-6202.pdf. [Cit: 20-05-2019].

[23] J. Reboun, S. Pretl, J. Navratil, and J. Hlina, “Bending endurance of printed conductive patterns on flexible substrates,” *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2016. [Online]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/7563185. [Cit: 02-05-2019].

[24] IPC, “IPC TM-650 Test Methods Manual for 2.4.18,” 2009. [Online]. Dostupné z: https://www.ipc.org/test-methods.aspx. [Cit: 10-04-2019]

[25] IPC, “IPC-TM-650 test methods manual for 2.4.3,” 2009. [Online]. Dostupné z: http://www.ipc.org/TM/2.4.3e.pdf. [Cit: 10-04-2019].

[26] IPC, “IPC-TM-650 test methods manual for 2.4.5,” 2009. [Online]. Dostupné z: http://www.ipc.org/4.0_Knowledge/4.1_Standards/test/2.4.5.pdf. [Cit: 12-04-2019].

[27] IPC, “IPC-TM-650 test methods manual for 2.4.9,” 2015. [Online]. Dostupné z: https://www.ipc.org/TM/2.4.9e.pdf. [Cit: 10-05-2019].

[28] IPC, “IPC-TM-650 test methods manual for 2.4.19,” 2009. [Online]. Dostupné z: https://www.ipc.org/TM/2-4-19C.pdf. [Cit: 12-05-2019].

[29] Frank Bacon Machinery sales company, "TINIUS OLSEN SUPER L," 2019. [Online]. Dostupné z: https://frankbacon.com/product/120k-600kn-tinius-olsen-super-l-extra-tall/. [Cit: 01-06-2019].

[30] IPC, "IPC-TM-650 test methods manual for 2.4.18," 2009. [Online]. Dostupné z: https://www.ipc.org/TM/2.4.18b.pdf. [Cit: 13-05-2019].

[31] O. Glushko and M. Cordill, "FLEX-E-TEST: Bending test optimized for flexible electronics," *Erich Schmid Institute of Materials Science*. [Online]. Dostupné z: https://www.oeaw.ac.at/esi/research/complex-materials/flex-e-test/. [Cit: 30-04-2019].

[32] H. U. Li and T. N. Jackson, "Flexibility testing strategies and apparatus for flexible electronics," *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016. [Online]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7450192. [Cit: 16-04-2019].

[33] Y. Kumaresan *et al.*, "Highly Bendable In-Ga-ZnO Thin Film Transistors by Using a Thermally Stable Organic Dielectric Layer," *Scientific Reports*, 2016. [Online]. Dostupné z: http://dx.doi.org/10.1038/srep37764. [Cit: 17-04-2019].

[34] T. Happonen, "Reliability studies on printed conductors on flexible substrates under cyclic bending," *University of Oulu, Faculty of Information Technology and Electrical Engineering*, 2016. [Online]. Dostupné z: http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526212425.pdf. [Cit: 30-04-2019].

[35] C. Kim and C. H. Kim, "Universal testing apparatus implementing various repetitive mechanical deformations to evaluate the reliability of flexible electronic devices," *Micromachines*, 2018. [Online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/327877756_Universal_Testing_Apparatus_Implementing_Various_Repetitive_Mechanical_Deformations_to_Evaluate_the_Reliability_of_Flexible_Electronic_Devices. [Cit: 29-04-2019].

[36] K. Alzoubi, S. Lu, B. Sammakia, and M. Poliks, "Factor effect study for the high cyclic bending fatigue of thin films on PET substrate for flexible displays applications," *IEEE/OSA Journal of Display Technology*, 2011. [Online]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/5657538. [Cit: 6-05-2019].

[37] M. M. Hamasha, K. Alzoubi, J. C. Switzer, S. Lu, M. D. Poliks, and C. R. Westgate, "Reliability of sputtered aluminum thin film on flexible substrate under high cyclic bending fatigue conditions," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2012. [Online]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/6305468. [Cit: 03-05-2019].

[38] K. Alzoubi, S. Lu, B. Sammakia, and M. Poliks, "Experimental and analytical studies on the high cycle fatigue of thin film metal on PET substrate for flexible electronics applications," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2011. [Online]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/5678598. [Cit: 01-06-2019].