

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

Diplomová práce

Testování ohebnosti prvků tištěné elektroniky

Jan Bejček

Plzeň 2016

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan BEJČEK**
Osobní číslo: **E14N0130P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Testování ohebnosti prvků tištěné elektroniky**
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. Seznamte se s prakticky využívanými metodami pro testování prvků tištěné elektroniky v ohybu a v tahu a vypracujte rešerši dostupných standardů.
2. Navrhněte vhodné postupy testování tištěných prvků v ohybu a v tahu s využitím laboratorního vybavení KET.
3. Navrhněte a realizujte vzorky a nezbytné přípravky pro měření tištěných prvků v ohybu a v tahu.
4. Na sérii vybraných vzorků prakticky ověřte navržené testovací postupy a proveďte měření vzorků. Dosažené výsledky kriticky zhodnoťte.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. B. Bensaïd: Reliability of OTFTs on flexible substrate: Mechanical stress effect, The European Physical Journal Applied Physics 55, 2, 2011
2. Eerik Halonen: Dynamic Bending Test Analysis of Inkjet-Printed Conductors on Flexible Substrates, Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2012
3. Jay Lewis: Material challenge for flexible organic devices, Materials Today Volume 9, Issue 4, April 2006, Pages 38-45
4. Elektronické informační zdroje, firemní literatura, normy

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Řeboun, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2015
Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2016


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá testováním tištěné elektroniky v ohybu. Nejdříve byly popsány jednotlivé standardy pro testování mechanických vlastností flexibilních elektronických komponent a prakticky využívané metody. Další kapitoly jsou zaměřené na návrh postupů, vzorků a testovacího zařízení za pomoci laboratorního vybavení katedry technologií a měření. Závěr práce obsahuje vyhodnocení měření navrženého testovacího postupu.

Klíčová slova

Tištěná flexibilní elektronika, pevnost v ohybu, mechanické namáhání, pevnost v tahu.

Abstract

This diploma thesis is focused on bending test of flexible printed electronics. First was described individual standards and practically used methods for testing mechanical properties of flexible electronic components. Following chapters are focused on design testing techniques, samples and test equipment with the assistance of laboratory equipment from department of technologies and measurement. Last part of thesis includes a measurement evaluation of the proposed test procedure.

Key words

Printed flexible electronics, flexural strength, mechanical stress, tensile strength.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou 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 16.5.2016

Jméno příjmení

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 TIŠTĚNÁ ELEKTRONIKA	11
1.1 TECHNOLOGIE TIŠTĚNÉ ELEKTRONIKY.....	12
1.1.1 <i>Sítotisk</i>	12
1.1.2 <i>Injekt</i>	12
1.1.3 <i>Flexografický tisk</i>	14
1.1.4 <i>Offset</i>	15
1.2 SUBSTRÁTY A JEJICH VLASTNOSTI	16
1.2.1 <i>Kovové folie</i>	17
1.2.2 <i>Tenká skla</i>	18
1.2.3 <i>Plastové folie</i>	18
2 POSTUPY A STANDARTY PRO TESTOVÁNÍ TIŠTĚNÉ ELEKTRONIKY	19
2.1 TESTOVÁNÍ OHYBEM	19
2.1.1 <i>Výdrž v ohybu</i>	20
2.1.2 <i>Standardní metody testování tažnosti a ohebnosti</i>	22
2.1.3 <i>Standardní metody testování ohybových vlastností plastů</i>	23
2.2 TESTOVÁNÍ V TAHU	24
2.2.1 <i>Standardní testovací metoda pro určení mechanické vlastnosti tenkých plastových fólií</i>	25
2.2.2 <i>Standardní testovací metoda pro provedení zkoušek v tahu kovových fólií</i>	26
2.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI FILMŮ NA POLYMERNÍM SUBSTRÁTU.....	27
2.3.1 <i>Druhy trhlin</i>	28
2.3.2 <i>Vznik řetězcových trhlin ve filmu při tahových zkouškách</i>	29
2.3.3 <i>Odlupování filmu při tahovém namáhání a stlačování</i>	31
2.4 PRAKTICKÉ ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	32
2.4.1 <i>Navíjení na vřeteno</i>	32
2.4.2 <i>Ohyb pomocí pojízdné plošiny</i>	34
2.4.3 <i>Vychylování trnů</i>	35
3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ ELEKTROMECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VZORKŮ	37
3.1 POPIS NAVRŽENÝCH TESTOVACÍCH VZORKŮ.....	37
3.2 POPIS TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ.....	40
3.2.1 <i>Nastavení krokového motoru</i>	41
3.3 TESTOVÁNÍ VZORKŮ V OHYBU.....	43
3.3.1 <i>Měření elektrického odporu vzorků vyrobeného metodou AJP</i>	44
3.3.2 <i>Měření elektrického odporu vzorků ošetřených plasmou</i>	46
3.3.3 <i>Měření elektrického odporu vzorků připravených na PEN substrátu</i>	48
3.3.4 <i>Měření elektrického odporu vzorků na kaptonovém substrátu</i>	50
ZÁVĚR	51
SEZNAM LITERATURY	52

Seznam symbolů a zkratek

IPC	Asociation Connecting Electronics Industries
IEC	International Electrotechnical Commission
RFID	identifikace na rádiové frekvenci
CAGR	složená roční míra růstu
OLED.....	organické elektroluminiscenční dioda
PET	polyethylentereftalát
PI.....	polyamid
CTE.....	koeficient teplotní roztažnosti [K^{-1}]
T	teplota [$^{\circ}C$]
CIGS	měď, indium, galium, selen
EMC.....	elektromagnetická kompatibilita
R2R	Roll 2 Roll
LCD	displej z tekutých krystalů
PEN.....	Polyethylenafthalát
ASTM	American Society for Testing and Materials
ϵ	deformace (prodloužení) [-,%]
h	tloušťka [m]
r	poloměr [m]
N.....	počet cyklů [-]
F	síla [N]
E.....	modul pružnosti [Pa]
ČSN.....	Česká technická norma
ISO.....	Mezinárodní organizace pro normalizaci
l	délka [m]
σ	pevnost v tahu [Pa]
S	plocha [m^2]
ITO.....	oxid cínu a indium
PEDOT:PSS.....	poly(3,4-ethylen dioxythiophen):poly(styrene sulfonat)
CAD.....	počítačem podporované projektování
R.....	elektrický odpor [Ω]

Úvod

Díky pokroku ve výrobních procesech je nyní možné vyrábět flexibilní solární články, tištěné senzory, spoje pro identifikaci na rádiové frekvenci a mnoho dalších. Je nezbytné, aby tyto systémy měli konzistentní elektrické a mechanické chování v širokém rozsahu namáhání (tah, ohyb, krut). Standardy a normy poskytují pouze referenční bod pro vykonání testů. Avšak pro měření kombinace elektro-mechanických vlastností, může být často nutné navrhnout nové metody či modifikovat metody v standardech.

Podrobování tištěné elektroniky zkouškám v ohybu je jedním z nejpoužívanějších způsobů jejich testování, neboť výsledný flexibilní produkt je tomuto namáhání nejvíce vystaven.

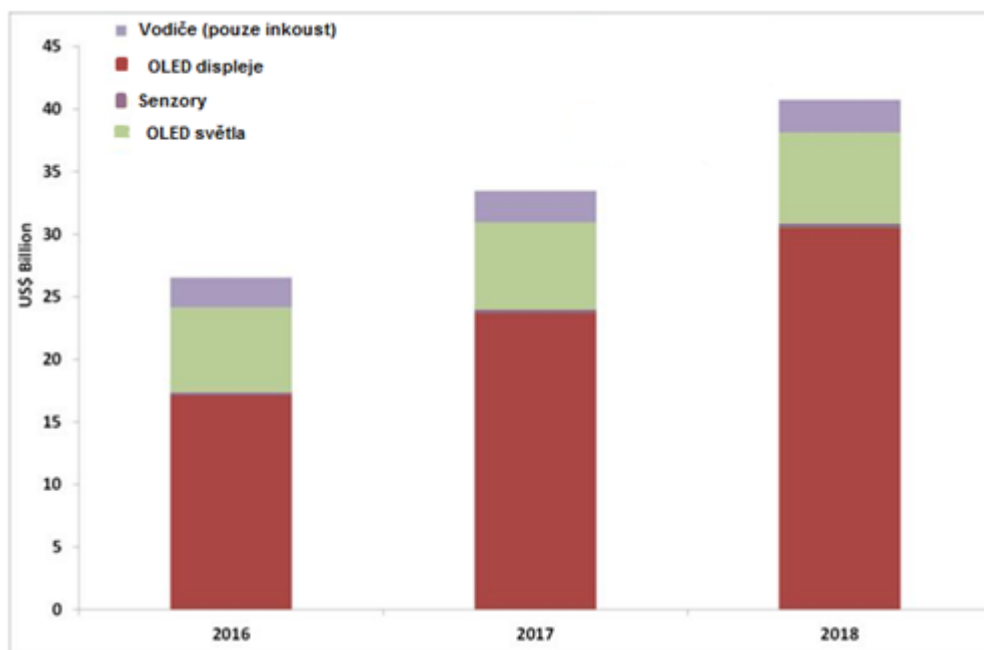
Účelem diplomové práce je shrnout základní znalosti o flexibilní elektronice potřebné k pochopení problematiky, hlavně pak standardy, normy a prakticky využívané metody pro testování mechanických vlastností flexibilní tištěné elektroniky. Dále návrh vlastního vzorku a postupu pro testování tištěných prvků.

1 Tištěná elektronika

Tištěná elektronika je pojem, o kterém se ve velkém začalo mluvit teprve nedávno, je však známý, již od 30. let minulého století. Cleo Brunetti v roce 1947 publikoval první souhrnný přehled technologie po tisknutí elektronických obvodů. Po více než dekádě intenzivního výzkumu v oblasti materiálů a výrobních technologií se stala tištěná elektronika běžnou součástí výroby elektroniky. V roce 2011 vytvořila asociace IPC pracovní skupiny zabývající se standardizací, základním funkčním materiálem, výrobními procesy i požadavky na výrobky. Podobně také organizace IEC vytvořila skupinu TC119, která se problematice věnuje [1].

V dnešní době má tištěná elektronika široké spektrum použití, například tištěné obvody pro identifikaci rádiovou frekvencí (RFID), ohebné fotovoltaické články, senzory, tištěné baterie a mnoho dalších [1,2].

Hlavní část trhu s tištěnou elektronikou se nachází v Asii, přesto Americký trh roste se složenou roční mírou růstu (CAGR) 33,8%. Odhaduje se, že trh vzroste z \$26.54 bilionů v 2016 na \$69.03 v roce 2026. Velkou mírou se na nárůstu trhu podílí E-Ink (Taiwan), Vorbeck Materials (U.S.A.), ThinFilm Electronics (Norsko), T-ink (U.S.A.) a mnoho dalších. Graf podílu jednotlivých tištěných komponent je zobrazen na následujícím grafu [2].



Obr.1.1 Graf podílu komponent tištěné elektroniky na trhu [3].

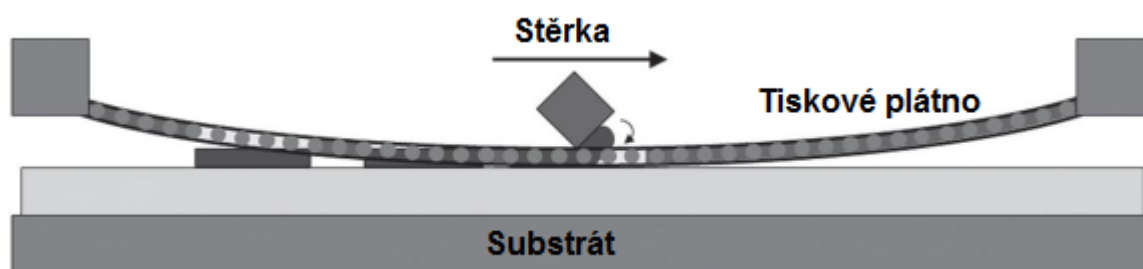
1.1 Technologie tištěné elektroniky

Většinou si termín tisk vztahuje k procesu reprodukování textu a obrázků na papíře. V souvislosti s tištěnou elektronikou se tiskem rozumí, proces přilnutí elektronicky funkčních materiálů na základní substrát jako papír či plast. V následujících kapitolách si některé z tiskařských technologií blíže přiblížíme.

1.1.1 Sítotisk

Princip sítotisku je založen na protlačování barvy průchodnými místy obrazové šablony. Nejprve se na síto nanese barva. Šablona je kontaktně přiložena na potiskové médium a přes ni se pohybuje stěrka. Barva se přitom protlačí pouze v místech, kde je to žádoucí, v ostatních místech se barva skrz šablonu nedostane. Barva vytvoří výsledný motiv. Tento postup je znázorněn na obr 1.2 [4].

V posledních letech se objevil tzv. pokročilí sítotisk jako odezva na potřebu snížit výrobní náklady. Tento proces dovoluje výrobu ultra tenkých vrstev za mnohem nižší cenu v porovnání s tradičními tiskařskými metodami. Další výhodou je fakt, že lze vytvářet více vrstev například izolačních, odporových a mnoho dalších [4].



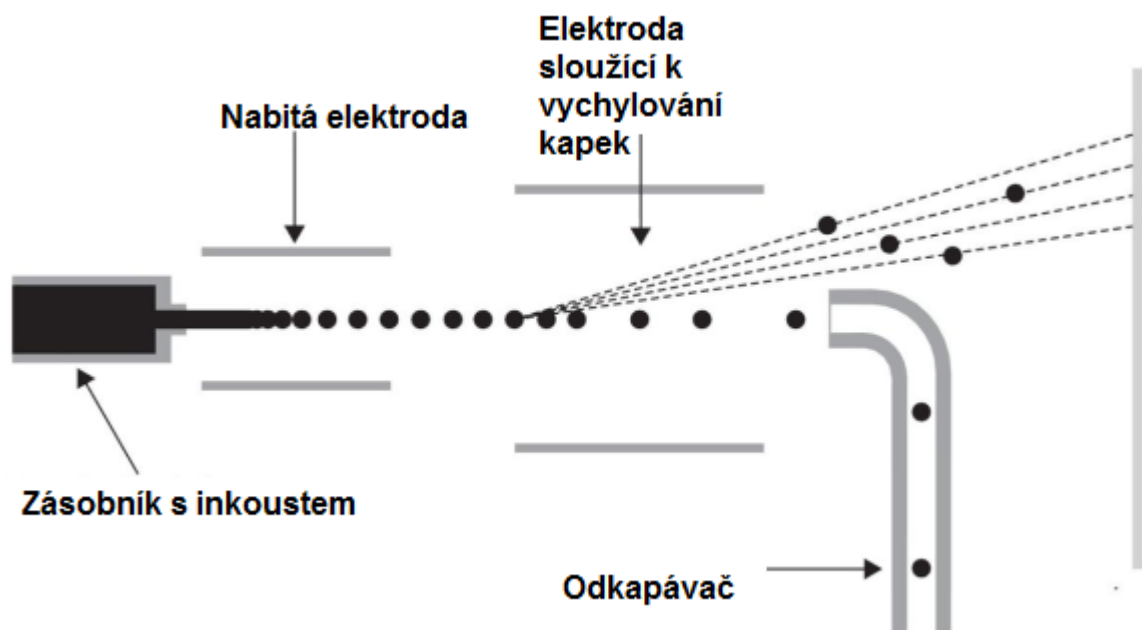
Obr. 1.2 Grafické znázornění metody sítotisku [4].

1.1.2 Injekt

Tisknutí metodou Inkjet poskytuje výhody z hlediska nízkých cen a nízkých teplot procesů. Tato metoda významně snižuje množství odpadu a dává nám možnost velkoplošné výroby díky tomu je o ni zvýšený zájem. Proces výroby začíná produkcí inkoustových kapek, které jsou elektronicky řízeny. V souvislosti se vznikem kapek a jejich řízením se inkjet technologie dělí do dvou typů: kontinuální tisk (Continou InkJet) a tisk na vyžádání (Drop on Demand) [5,8].

1.1.2.1 Kontinuální tisk

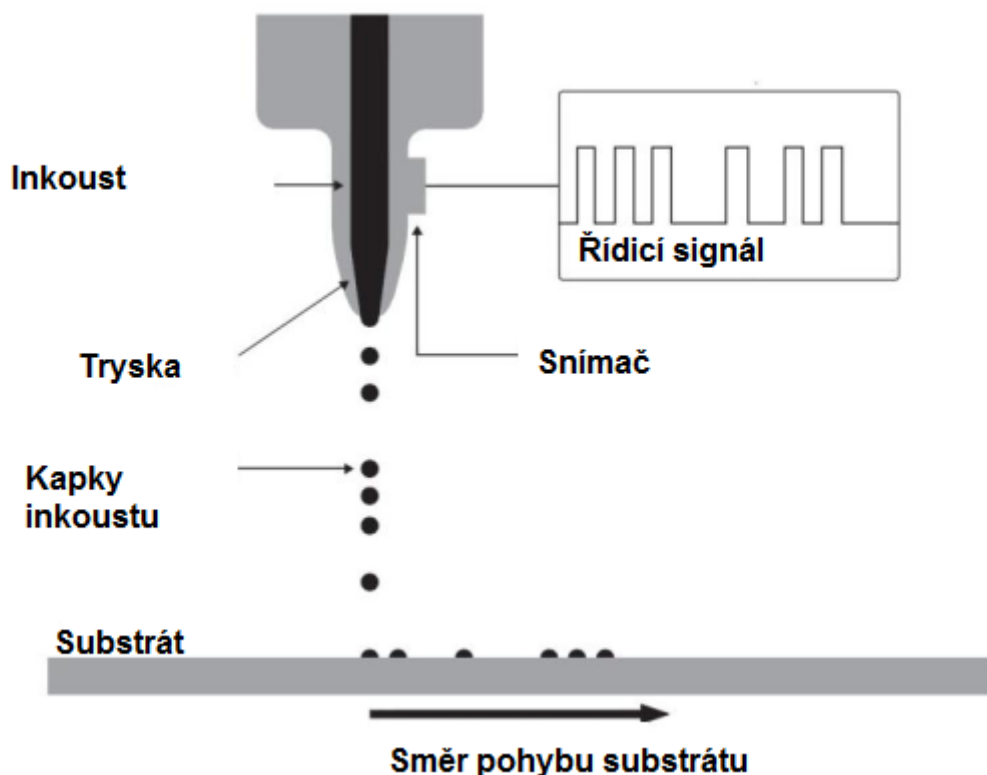
U kontinuálního tisku lze pomocí trysek složených z mnoha dílů vytvořit v řádu 100 000 kapek za sekundu, proud kapek je dále nabíjen a vychylován elektrostatickým polem pomocí vychylovací elektrody, vychýlený paprsek dopadá na substrát. Nevychýlený proud kapek dopadá do sběrného zařízení a filtruje se zpět do zásobníku. Princip funkce je znázorněn na obr. 1.3 [6].



Obr. 1.3 Grafické znázornění metody kontinuálního tisku [6].

1.1.2.2 Tisk na vyžádání.

Princip tisku na vyžádání neboli „Drop on Demand“ je znázorněn na obr 1.4. Dále se tento tisk dělá na dvě metody.



Obr. 1.4 Grafické znázornění metody Drop on Demand [6].

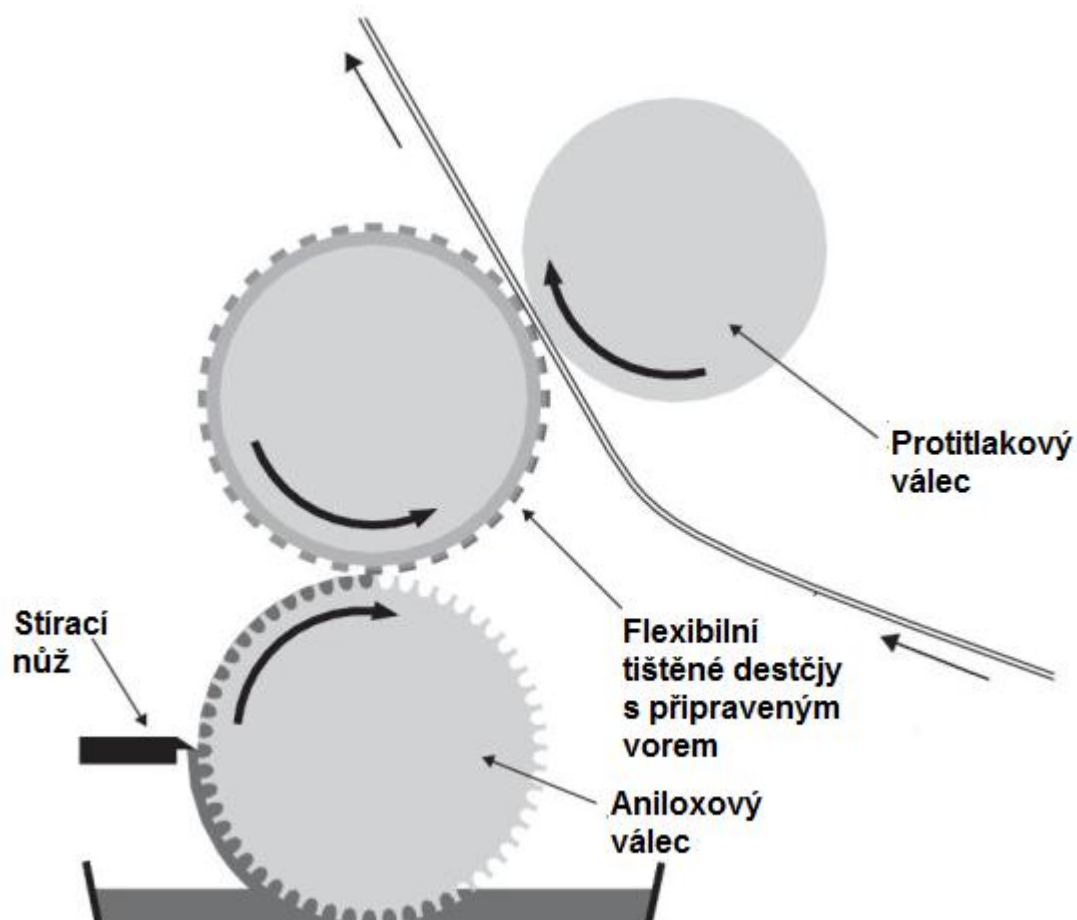
Termální inkoustový tisk používá trysky ve formě malých komůrek, které jsou vybavené odporovým topením. Při průchodu řídicího proudu se inkoustu ohřeje, v komoře naroste tlak a vytlačí proud kapek inkoustu na substrát. Výhodou je velmi levná výroba trysek, nevýhodou je pak menší životnost trysek [5].

Piezoelektrický inkoustový tisk je nejrozšířenější obdoba systému Drop on Demand. Využívá komor, u kterých je nahrazeno topné tělísko piezoelektrickým materiálem, které jsme schopni řídit pomocí napětí a měnit tak tlak v komoře. Proud kapek je z komory vystřelován pomocí tohoto tlaku. Trysky mají delší životnost, ale jejich výroba je nákladnější [5].

1.1.3 Flexografický tisk

Flexografický tisk je přímá metoda tisku, kde válce pokryté inkoustem aplikují vzor přímo na substrát. Tento proces je znázorněn na obr. 1.5. Pomocí aniloxového válce je inkoust aplikován na válec s připraveným vzorem, který je přenesen na substrát. Povrch aniloxového válce je tvořen buňkami různých velikostí a tvarů, které nesou specifické množství inkoustu. Počet buněk na centimetr čtvereční se mění s potřebou přesnosti až do

20 μm . Ty jsou například RFID antény, tištěné baterie, organické obvody, nebo nízko nákladové osvětlení [5, 6].



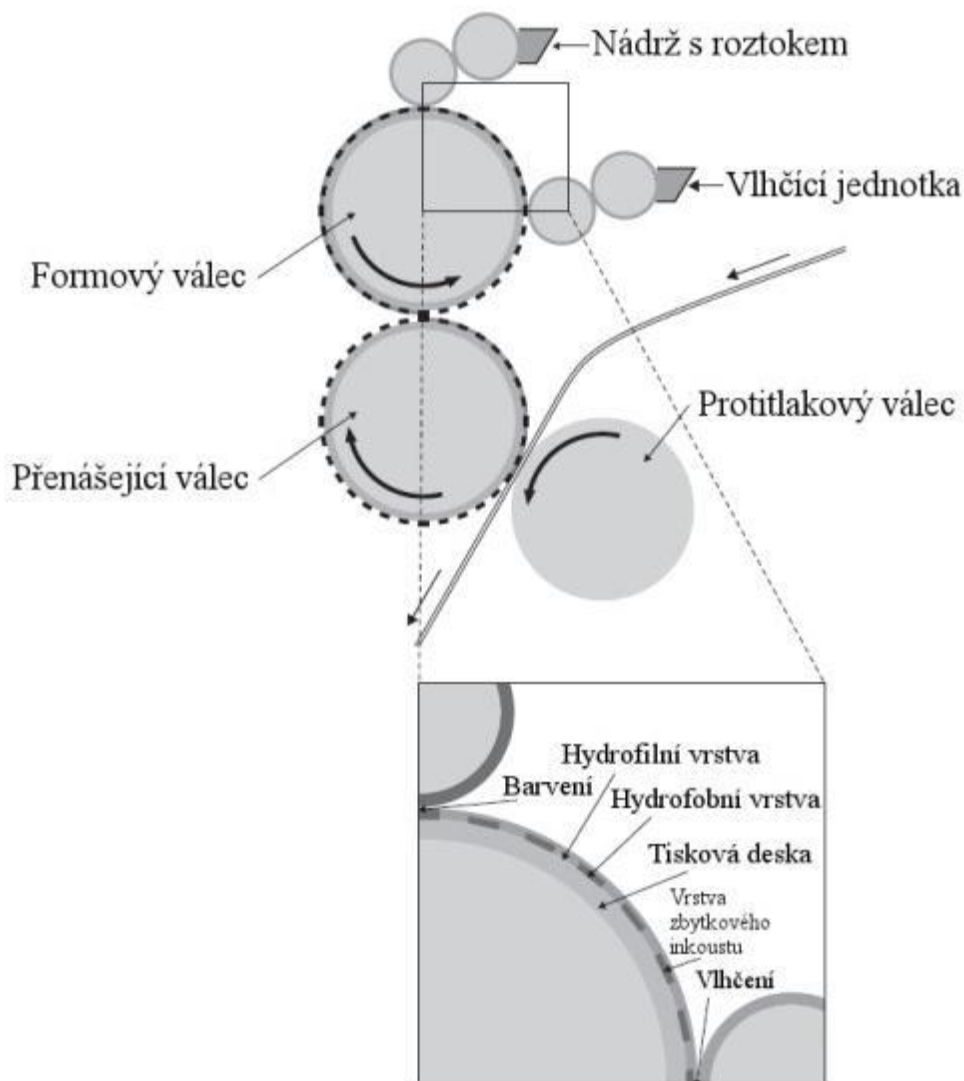
Obr. 1.5 Princip metody Flexografického tisku [6].

1.1.4 Offset

Jde o nepřímý tisk, kdy se inkoust nanáší nejprve na gumové válce a z něj až na substrát. Jedná se o techniku tisku z plochy. Tento druh tisku je velice rychlý a s vysokým rozlišením (šířka čar < 25micronu), mezi další výhody pak patří cena a možnost vyrábět flexibilní solární panely, OLED displeje[5,6].

Princip tohoto tisku je založen na různých fyzikálně-chemických vlastnostech tiskové formy. Na povrchu formy jsou naneseny 2 rozdílné vrstvy. Vrchní vrstva je hydrofobní (odpuzuje vodu) a spodní vrstva ji naopak přitahuje. Nanesení dat se provádí pomocí laseru, který naruší hydrofobní vrstvu v místech, kde se nemá tisknout. Místa určená k tisknutí zůstanou neporušena. Forma projede tzv. vývojkou, která vyplaví narušenou vrstvu. Tisková forma se napne do stroje na formový válec, po kterém shora rolují 4 válce s připraveným inkoustem a jeden s vodou. Synchronně s formovým válcem se točí přenášející válec, na který se přenáší barva z tiskové formy. Na tomto válci je už inkoust bez přítomnosti vody, je tedy

možné přenášet vzor na připravený substrát. Dotyk substrátu a přenášejícího válce zajistí protitlakový válec. Tento princip je znázorněn na obr. 1.6 [35].



Obr. 1.6 Princip offsetového tisku [35].

1.2 Substráty a jejich vlastnosti

Volba mezi substráty, ať je to papír, plast, či kovové folii je velice podstatný při navrhování tištěné elektroniky. Každý z těchto substrátů má své specifické vlastnosti, které výrazně ovlivňují výsledné vlastnosti výrobku. Dnešní průmysl se zaměřuje na použití polyethylentereftalátu (PET), který je více odolný proti natržení a proti vlhkosti ve srovnání s papírem a levnější než vysoko-teplotní řešení jakým je třeba polyamid (PI) [7,8].

Substráty pro tištěnou elektroniku musí splňovat několik požadavků.

- **Optické vlastnosti**

Substráty pro displeje musí být čiré a mít nízký index lomu.

- **Povrchová drsnost**

Čím tenčí je výsledný produkt tím jsou elektrické vlastnosti citlivější na povrchovou drsnost substrátu.

- **Teplné a termomechanické vlastnosti**

Pracovní teplota substrátu musí být kompatibilní s maximální teplotou při výrobní procesu. Rozdíl mezi délkovým součinitelem teplotní roztažnosti substrátu a vodivých cest (součástek), může způsobit přerušování vodivých cest při výrobě. Maximální odchylka je:

$$|\Delta\text{CTE} \cdot \Delta T| \leq 0,1-0,3\% \quad (1.1)$$

kde ΔCTE je rozdíl v koeficientech teplotní roztažnosti mezi substrátem a vrstvou zařízení [K^{-1}],

ΔT je teplota během zpracování [$^{\circ}\text{C}$].

- **Chemické vlastnosti**

Substrát by měl být inertní vůči průmyslovým chemikáliím a neměl by uvolňovat nečistoty.

- **Mechanické vlastnosti**

Vysoký modul pružnosti činí substrát tuhý, tvrdý povrch chrání vrstvy zařízení při nárazu.

- **Elektrické a magnetické vlastnosti**

Vodivé substráty mohou sloužit jako elektromagnetické stínění. Izolované substráty zabraňují vzniku vířivých proudů [7].

1.2.1 Kovové fólie

Kovové fólie představují alternativu k plastovým foliím, kde je vyžadovaná vysoká teplota během výroby, jako jsou například výroba CIGS solárních panelů a křemíkových tranzistorů. Nerezové fólie vydrží procesy při teplotě až 1 000 $^{\circ}\text{C}$, poskytují ochranu proti vlhkosti, kyslíku, EMC a také slouží jako chladič. Obecně platí, že nerezové fólie jsou více odolné než plastové či skleněné. Mezi nevýhody patří drsnost povrchu ~ 100 nm, ten se musí dále upravovat leštěním či tenkovrstvým povlakem, v případě OLED displejů je potřeba dosáhnout na drsnost povrchu méně než 5 nm. Tenkovrstvý povlak také poskytuje potřebnou elektrickou izolaci a chemickou odolnost [9, 10].

1.2.2 Tenká skla

Tenká skla přinášejí řadu výhod v porovnání s ostatními substráty. Mezi hlavní patří nízký koeficient tepelné roztažnosti a vysoká rozměrová stabilita, kvalita povrchu s drsností méně než 0,5 nm, optická propustnost > 90 %, odolnost vůči většině průmyslových chemických látek, nepropustnost kyslíku a vody. Tyto výhody zajišťují, zlepšené rozlišení, výkonnost a životnost elektronických zařízení. Začlenění flexibilního skla do výroby bylo po dlouhý čas omezeno mechanickou nekompatibilitou s výrobním procesem. Mechanická pevnost skla závisí na minimalizaci závad vyvolaných při zpracování skla. Použití dočasných procesních nosičů nebo organických ochranných nátěrů je nutné k dosažení kompatibility s výrobním procesem. Ultra tenká flexibilní skla o šířce <200µm dovolují použití R2R technologie. V dnešní době je možné použití ultra tenkých skel při výrobě LCD a OLED displejů, dotykových senzorů a fotovoltaiky [11,12,13].

1.2.3 Plastové folie

Tenké polymerní fólie jsou velmi lehké a levné, díky tomu je možné je použít v komerčních produktech. Zpracování těchto materiálů se obvykle provádí při teplotách pod 180 °C, to z nich dělá zvláště atraktivní alternativu pro ekologické technologie založené na nízké teplotě tisku. Také, mohou být transparentní, což je nezbytným předpokladem pro aplikaci v osvětlení, fotovoltaice a fotodetekci. Tyto polymerní fólie jsou ve své podstatě z plastu, což umožňuje vysoký stupeň mechanické pružnosti a přizpůsobivosti. V dnešní době je k dispozici široká škála plastových fólií, včetně termoplastů a amorfních polymerů, jako je polykarbonát, polyethersulfonát, polyethylentereftalát a polyimide. Poslední zmiňovaný má dobré tepelné vlastnosti, ale vzhledem k jeho nízké transparentnosti se obvykle používá jako neprůhledný substrát na straně zadní elektrody pro anorganické solární články, křemíkové solární články, světlo emitující a reflexní displeje. Jsou to právě tyto (PET a PEN), které představují dva hlavní transparentní flexibilní substráty používané dnes v rozvoji flexibilní elektroniky. Nejen že poskytují dobrou odolnost vůči rozpouštědlům a dostatečnou toleranci vůči teplotě, ale i jejich transparentnost je dělá ideálními pro všechny optoelektronické aplikace, které vyžadují přenos světla a elektrického vedení [14].

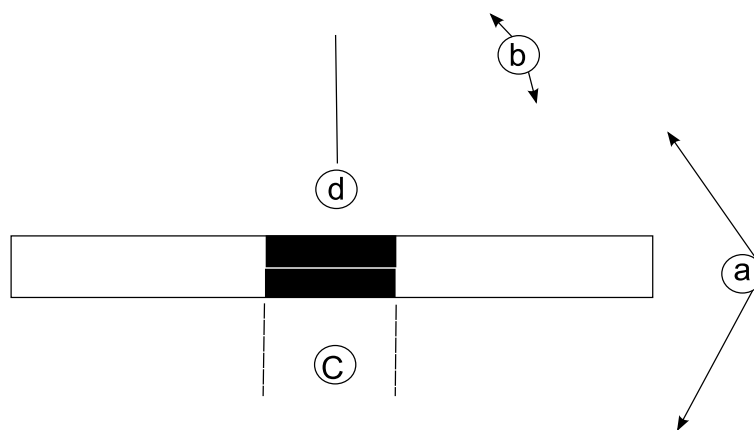
2 Postupy a standardy pro testování tištěné elektroniky

V tištěné elektronice neexistují standardy pro postupy výroby, sestavy materiálů a modely zařízení. Pro testování mechanických vlastností flexibilních plošných spojů se používají postupy vyvíjené asociací výrobců tištěné elektroniky, jako jsou IEC, IPC, ASTM. Poskytují univerzální návod pro pochopení, jaké vlastnosti by měl výsledný produkt mít a jak se bude chovat při testování. Standardy a manuály poskytují pouze návod na testování, avšak je nutné pamatovat, že specifikace produktu může být odlišná. Testováním mechanických vlastností se zabývá například standard IPC-6013. Tento standard má za účel poskytnout detailní kritéria pro testování flexibilních plošných spojů. Nahrazuje tak starší standardy IPC-RF-245 a IPC-FC-250A a byl vytvořen jako revize těchto dokumentů. Dále slouží jako doplněk k obecným požadavkům obsaženým v IPC-6011 [17].

2.1 Testování ohybem

Podrobování tištěné elektroniky zkouškám v ohybu je jedním z nejpoužívanějších způsobů jejich testování, neboť výsledný flexibilní produkt je tomuto druhu namáhání nejvíce vystaven. Organizace IPC vydala pro tento účel testovací manuál IPC-TM-650 v kterém jsou obsaženy metody pro testování v ohybu vodivých motivů. V mnoha případech jediný rozdíl mezi flexibilní a konvenční elektronikou byla změna substrátu, často se používají tenkovrstvé povlaky, pokud je to nutné i snížení teploty při výrobním procesu. Nicméně velmi málo pozornosti bylo věnováno právě omezené flexibilitě těchto nenahrazených komponent. Mechanické selhání zařízení je určeno jeho nejslabším článkem. U těchto zařízení, která používají anorganické tenké vrstvy, jsou tato místa nejčastějším zdrojem poruch.

Pro testování ohybu je nutné si určit základní parametry znázorněné na následujícím obrázku.



Obr. 2.1 Ilustrační obrázek testu ohybu dle normy IPC-6013 [17].

- a. směr ohýbání
- b. úhel ohybu
- c. počet ohýbacích cyklů
- d. průměr válce (trnu)

Ohýbací cyklus je definovaný jako ohnutí jednoho konce vzorku kolem trnu a poté zpět do původní polohy. Vzorek se tedy otočí kolem trnu o 180° jedním směrem a o 180° opačným. Ohýbací cyklus může být také definovaný jako ohýbání opačných konců vzorku směrem k sobě kolem trnu a zpět do původní polohy, konce vzorku se tedy otočí kolem trnu o 90° . Specifikovaný počet ohýbacích cyklů by měl být vykonán s trnem umístěným na jedné straně vzorku a poté znovu s trnem umístěným na opačné straně [17].

Při ohýbání vzorku působí na jeho vnější povrch tahové napětí a na vnitřní povrch naopak tlakové. Filmy nanesené na jedné nebo na obou stranách vzorku přenášejí namáhání, ale pokud je film velmi tenký relativně k tloušťce substrátu, můžeme udělat jednoduchý odhad vztahu pro deformaci v ohybu.

$$\varepsilon = \frac{h}{2r}$$

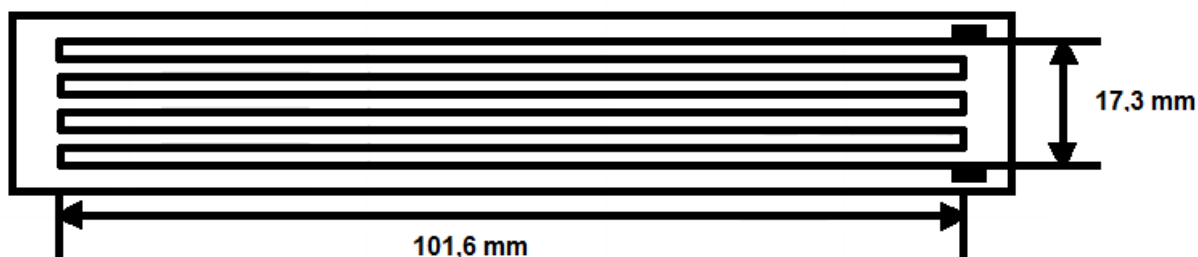
- Kde h je tloušťka substrátu
 r je poloměr zakřivení.

Po vykonání těchto testů je nutné, aby byl vzorek otestován na elektrické defekty s ohledem na požadavky prostředí a projít vizuální kontrolou [17].

2.1.1 Výdrž v ohybu

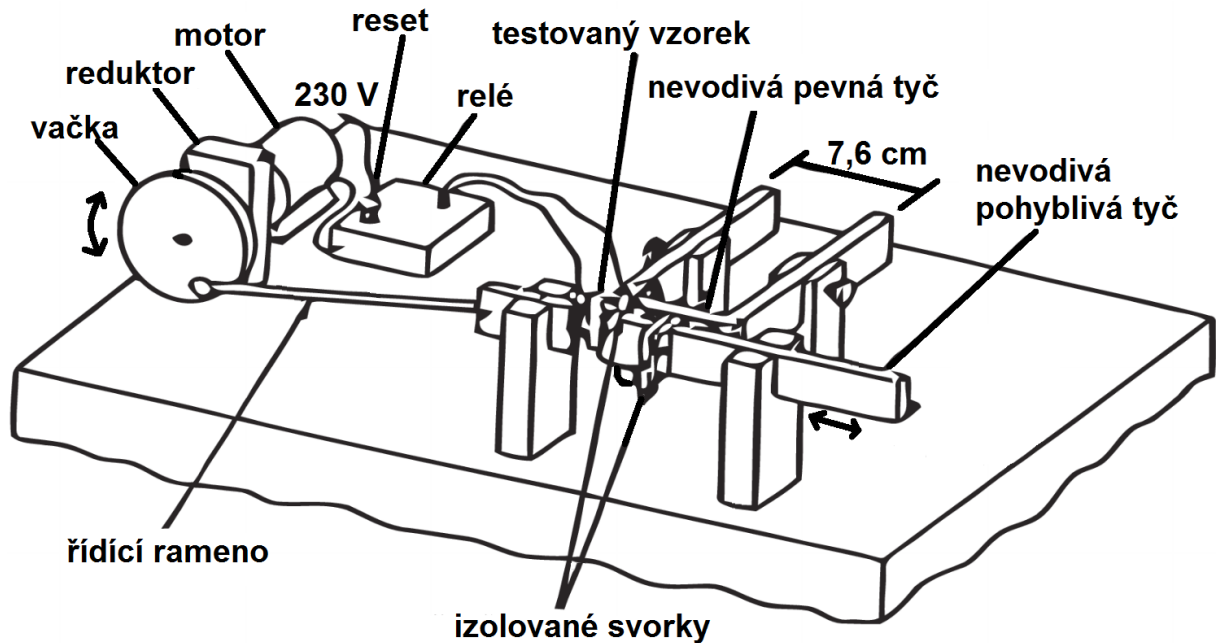
Správné zkušební metody a kritéria selhání jsou nezbytné pro stanovení životnosti. Výdrž v ohybu se zabývá norma IPC-TM-650 č. 2.4.3, zkoumá kolik je třeba ohybů, než

dojde k selhání. Selháním se rozumí porušení vodivé cesty, kde dojde k nárůstu odporu nad přijatelnou hodnotu. Pro testování je nutné mít minimálně šest vzorků s dlouhými příčnými vodiči. Testovací vzorek má svůj specifický motiv, který je znázorněn na následujícím obrázku. V případě oboustranných vzorků je nutné připravit si minimálně šest vzorků pro testování každé strany [17].



Obr. 2.2 Vzorek pro měření výdrže v ohybu [17].

Před samotným testováním je nutné zkontrolovat vzorek, zda se na něm nevyskytují defekty jako malé trhliny a škrábance či jiné porušení vodivých cest, které by mohlo zapříčinit předčasné selhání testovaného vzorku. Takto poškozené vzorky musí být z testování vyřazeny. Krátký izolovaný drát musí být připojen ke konci vodivé cesty každého ze šesti vzorků. Vlastní upevnění vzorku do testovacího zřízení je zobrazeno a obr. 2.3. Vzorek musí být upevněn tak, aby vodivý vzor byl na vnitřní straně smyčky a v počáteční poloze ohyb nepřesahoval $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Horizontální oscilace pohyblivé tyče zapříčiní ohnutí vzorku. Pro účely této normy se maximální ohyb rozumí pohyb smyčky o $25 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. Maximální rychlost testování nesmí přesáhnout 10 cyklů za minutu. Testování je nutné provádět až do selhání, tedy do porušení vodivých cest. Výsledkem testování je pak průměrný počet cyklů, kterým vzorek odolá, než dojde k přerušení vodivých cest [17].



Obr. 2.3 Příklad sestaveného testovacího zařízení [17].

2.1.2 Standardní metody testování tažnosti a ohebnosti

Testováním tažnosti a ohebnosti, tedy schopnosti materiálu podstoupit elastickou deformaci než dojde k jejich selhání, se zabývají normy IPC-TM-650 č. 2.4.2.1 a ASTM E796-94. Tyto metody jsou v principu totožné. Za podmínku se klade testování vzorků do tloušťky 0,15mm, dále je nezbytné, aby při testování tažnosti došlo k selhání vzorku mezi 30 a 500 cykly. Tažnost se určí z rovnice:

$$N^{-0,6} * \varepsilon^{0,75} + 0,9 * \frac{F}{E} * \frac{e^D}{0,36} * 0,1785 * \log\left(\frac{10^5}{N}\right) - \frac{2h_j}{2r + h} = 0 \quad (2.1)$$

Kde N je počet cyklů do selhání [-],

ε je prodloužení [%],

F je síla v tahu před selháním [N],

E je modul pružnosti [Pa],

h_j je tloušťka jádra [m],

h je tloušťka vzorku [m],

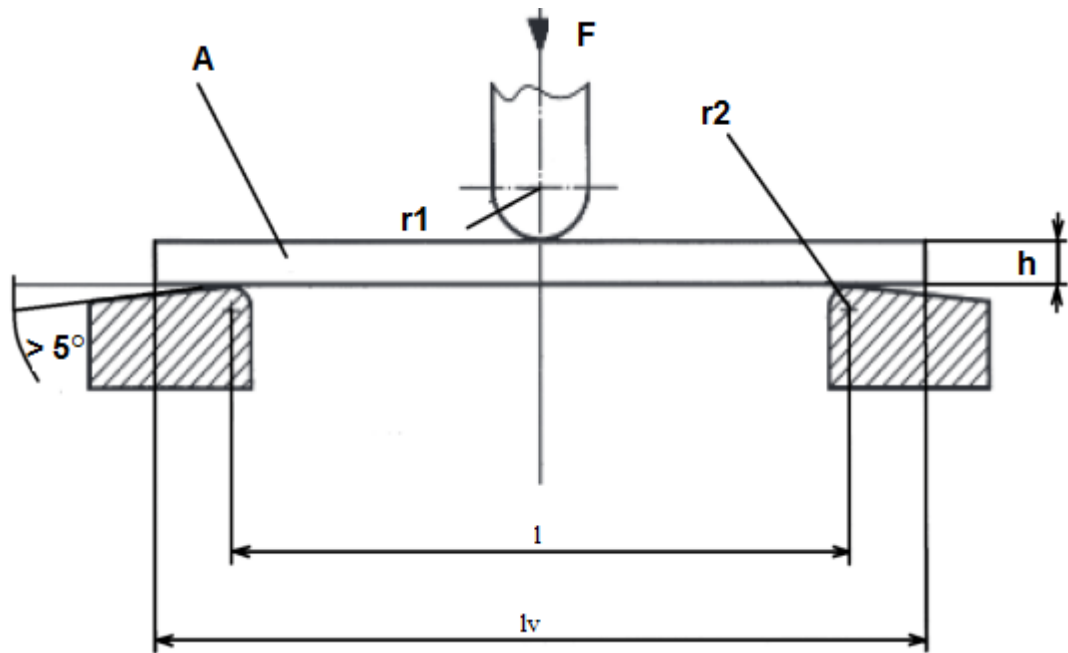
r je poloměr křivosti trnu [m].

Tato metoda není příliš vhodná pro testování tažnosti tenkých vzorků, neboť využívá nízkého počtu cyklů [17,18].

2.1.3 Standardní metody testování ohybových vlastností plastů

Metody popsané ve standardu ASTM D790, zahrnují stanovení ohybových vlastností nevyztužených i vyztužených plastů, včetně kompozitních elektroizolačních materiálů ve formě obdélníkových tyčí tvarovaných přímo nebo poskládaných z více menších plátů materiálu. Tyto zkušební metody obecně platí jak pro neohebné tak ohebné materiály. Avšak, pevnost v ohybu nelze stanovit pro materiály, které se nelámou ani po 5% deformaci. Zde přichází na řadu ČSN EN ISO 178, kde je standardní zkušební vzorek definovaný, ale jeho parametry velikosti se dle potřeby mohou lišit, stejně jako rychlost testování. Testování je ukončeno, když dojde k porušení testovaného materiálu. Oba tyto standardy vycházejí z tříbodového ohybu. Standard ASTM D6272 a IPC-TM-650 č 2.4.4 jsou velmi blízké standardu ASTM D790, první zmiňovaný se zabývá čtyřbodový ohybem, druhý je určen pro testování pevnosti v ohybu laminátů [18,19,20,21,22].

Pro zmíněné standardy využívající tříbodového ohybu, nejsou jasně definované rozměry vzorků. Standard ASTM D790 určuje dvě základní metody testování, dle předpokládané odolnosti vzorků. Metoda A je vyvinuta pro méně odolné materiály, kdežto metoda B je vyvinuta pro materiály, které vydrží velmi vysokou deformaci. Hlavním rozdílem těchto dvou metod je pak deformační rychlost, tedy rychlost, kterou trn tlačí na testovaný vzorek, jenž je umístěn na dvou vzpěrách, jak je znázorněno na následujícím obrázku [18,19,20,21,22].



Obr. 2.4 Model tříbodového ohybu dle ČSN EN ISO 178 [38].

- Kde A je testovaný vzorek,
 F je aplikovaná síla [N],
 r1 je poloměr trnu [m],
 r2 je poloměr podpěr [m],
 h je tloušťka vzorku [m],
 l je délka mezi podpěrami [m],
 lv je délka vzorku [m].

2.2 Testování v tahu

Podrobování prvků tištěné elektroniky zkouškám v tahu není tak časté jako testování ohybem, ale i tak jsou tyto zkoušky velice důležité například u kaptonových substrátů či polymerních desek. Určením pevnosti v tahu a prodloužením se zabývá standard IPC-TM-650 č. 2.4.19. Pro správné provedení testování dle toho manuálu je doporučeno mít minimálně 10 vzorků o délce 152,4 mm a 12,7 mm širokých. Vzorky musí mít hladké okraje, proto je doporučeno vzorky brousit na okrajích 400-600 brusným papírem k dosažení hladších hran a zlepšení opakovatelnosti testu. Před samotným testováním musí být vzorky vystaveny teplotě $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a $50\% \pm 5\%$ relativní vlhkosti po dobu 24 hodin. Tato doba stabilizace může být zkrácena pouze v případě jasných statistických důkazů, že testovaný vzorek již nabytl stability po kratší době. Dále je nutné změřit a zaznamenat šířku a tloušťku vzorku na několika místech podél celé délky vzorku a provést výpočet minimální plochy průřezu. U vzorků

pokrytých nátěrem, se tloušťka nátěru ignoruje, neboť se předpokládá, že nijak nepřispívá k tahovým vlastnostem substrátu [23].

Pevnost v tahu se určí ze vztahu:

$$\sigma_n = \frac{F}{S} \quad (2.2)$$

Kde σ_n je pevnost v tahu [Pa],

F je velikost natahující síly při přerušení vzorku [N],

S je vypočtená plocha průřezu vzorku [m²].

Prodloužení se určí ze vztahu:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_2}{l_1} * 100 \quad (2.3)$$

Kde ε je prodloužení [%],

l₁ je počáteční vzdálenost mezi svorkami [mm],

l₂ je vzdálenost mezi svorkami při přetržení vzorku [mm]

Výsledkem výpočtu pevnosti v tahu a prodloužení, je průměrná hodnota z dílčích testů [23].

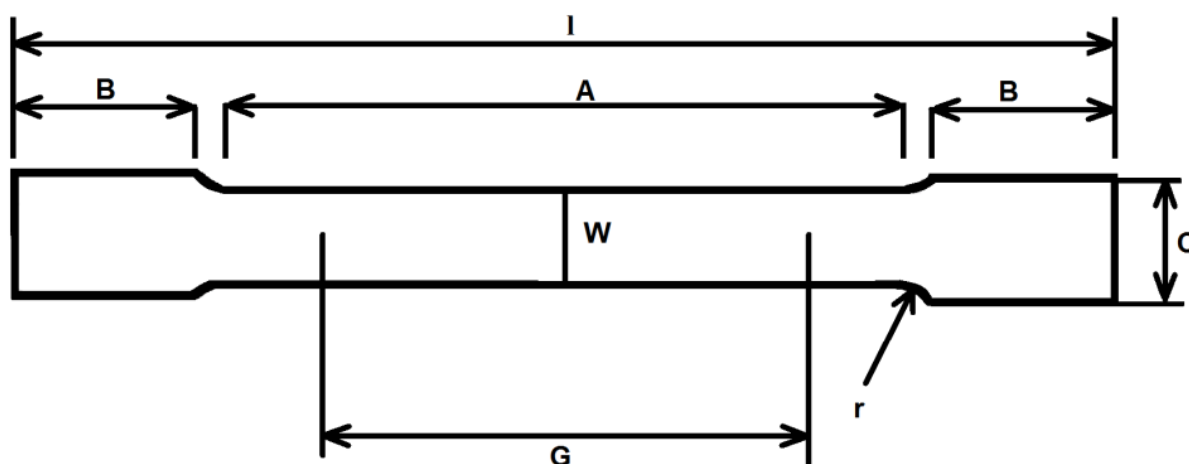
2.2.1 Standardní testovací metoda pro určení mechanické vlastnosti tenkých plastových fólií

Jednou z metod pro stanovení mechanických vlastností tenkých plastových fólií je ASTM D882. Touto metodou lze zjistit vlastnosti jako je síla v tahu potřebná pro přetržení, modul pružnosti, relativní prodloužení, pevnost v tahu a faktor zlomu pro vzorky o maximální tloušťce 1 mm. Tato metoda je podobná ISO 527-3, ale není považována za ekvivalentní. Hlavním rozdílem je specifikace testovaných vzorků. Vzorky se skládají z proužků jednotné šířky a tloušťky minimálně o 50 mm delších, než je vzdálenost mezi svorkami testovacího zařízení. Jmenovitá šířka vzorků nesmí být menší než 5mm nebo větší než 25,4 mm. Poměr mezi tloušťkou a šířkou vzorku by měl být nejméně osm. Zvýšenou pozornost je nutné věnovat při stříhání vzorků, aby se zabránilo škrábancům a natržením, které by mělo za

následek permanentní zničení vzorku. Hrany musí být rovnoběžné s tolerancí do 5% šířky, po celé délce vzorku. V případě anizotropních materiálů je nutné připravit dvě sady vzorků tedy 5 a 5. První sada bude zhotovena podél osy anizotropie a druhá kolmo k této ose [24].

2.2.2 Standardní testovací metoda pro provedení zkoušek v tahu kovových folií

Provedením zkoušek v tahu u kovových folií se zabývá standard ASTM E345. Zkoušky tahem poskytují informace o pevnosti a tažnosti materiálů, avšak výsledky z vybraných částí vzorku nemusí určovat jeho celkovou tažnost a jeho chování v provozu. Tato testovací metoda zahrnuje testování dvou typů vzorků (typ A, typ B), při pokojové teplotě o maximální tloušťce 0,15mm. Vzorky se od sebe liší ve tvaru, rozměrech i způsobu přípravy jak je znázorněno na obr. 2.5 [25,26,27].



Obr. 2.5 Návrh vzorku pro provedení zkoušky v tahu [27].

- Kde
- G je délka kalibru [mm],
 - W je šířka vzorku [mm],
 - r je poloměr zakřivení [mm],
 - L je celková délka vzorku [mm],
 - A je délka zkrácené části vzorku [mm],
 - B je délka části pro upnutí [mm],
 - C je šířka části pro upnutí [mm].

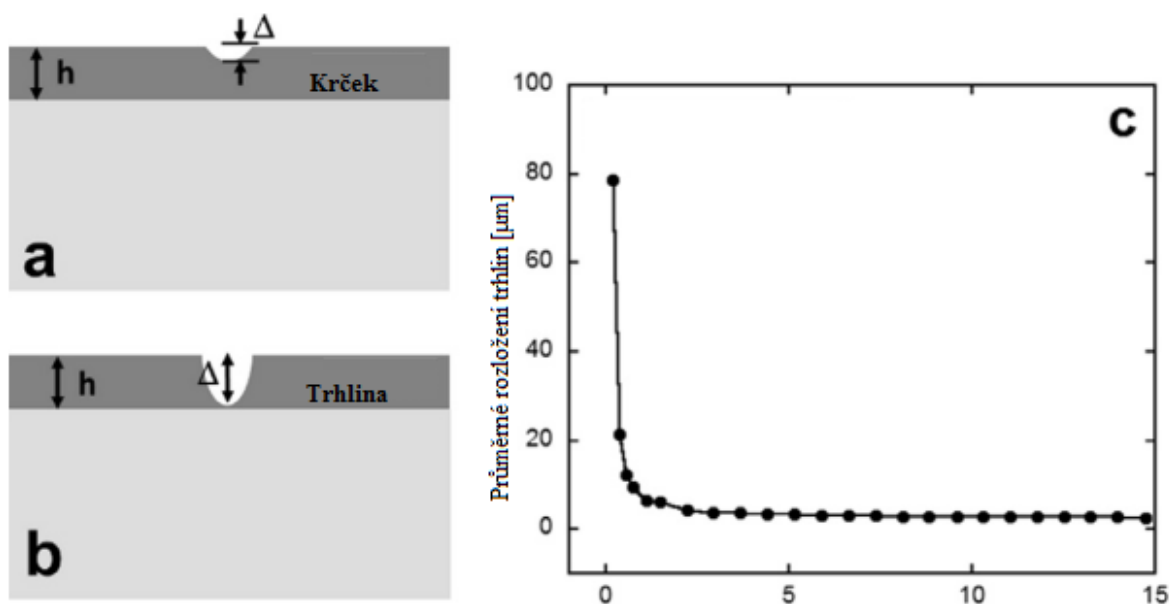
Tab 2.1 Rozměry vzorku Typu A a Typu B [27]

rozměr	Typ A	Typ B
G [mm]	50 ± 0,1	125
W [mm]	12,5 ± 0,25	12,5
r [mm]	19	-
l [mm]	200	230
A [mm]	60	-
B [mm]	50	-
C [mm]	20	12,5

Před samotným testováním je nutné vzorky prozkoumat pod dvacetinásobným zvětšením zda netrpí defekty, jako otřepy, škrábance a zvrásnění. Vzorky trpící defekty musí být z testování vyraženy. Tloušťka vzorku musí být změřena s přesností na 2%. U vzorků z měkkých fólií či fólií užších než 0,05mm je nutné fólie zvážit dle standardu E252. Ten se zabývá určením tloušťky materiálu z jeho hmotnosti. Pro účely změření tloušťky fólií z pevných materiálů, nebo při tloušťce větší než 0,0245 mm může být použito optimetru nebo elektrického měřicího přístroje, který zajistí adekvátní přesnost. Způsob natahování vzorků na zařízení je obdobný jako u výše uvedených standardů, stejně tak jako vypočet flexibilních vlastností. Testováním tažnosti a pevnosti v tahu měděných fólií při zvýšené teplotě se zabývá testovací metoda IPC-TM-650 č. 2.4.18. [25,26,27].

2.3 Mechanické vlastnosti filmů na polymerním substrátu

K zjištění mechanických vlastností kovových filmů na polymerním substrátu, jsou vzorky podrobovány fragmentačním testům. Během těchto testů je vzorek natahován a zkoumán pod světelným mikroskopem nebo skenován pod elektronovým mikroskopem, aby bylo možné pozorovat vznik prvních trhlin. Křehké kovové a keramické filmy mají tendenci tvořit řetězcové trhliny kolmé ke směru namáhání. Na druhé straně, tvárné kovové fólie při nízkém pnutí, tvoří nejprve lokální deformace ve formě krčků (obr. 2.6a), až se zvyšující se silou se tyto krčky mění na trhliny (obr. 2.6b). Díky mikroskopu pak lze pozorovat průměrné rozložení trhlin, jako funkci prodloužení (obr. 2.6c) [28].



Obr. 2.6 (a) krček (b) trhlina (c) Průměrné rozložení trhlin jako funkce prodloužení pro 100nm tlustý vzorek) [28].

Tvoření prvních trhlin u křehkých filmů vzniká již při velmi nízkém prodloužení (<1%), s vzrůstajícím prodloužením vzniká větší množství trhlin, dokud není dosaženo saturace. To znamená, že není možné, aby vznikli další trhliny mezi již existujícími. Elektronový a světelný mikroskop jsou velmi dobré zobrazovací techniky pro křehké filmy, avšak stejná metoda nelze aplikovat na ohebné filmy jako měděné a stříbrné. Pro ty je nutné použít mikroskop atomárních sil, který umožňuje trojrozměrné zobrazení povrchu filmů, tedy odhalení trhlin a krčků v povrchu filmu [28].

2.3.1 Druhy trhlin

Na obr 2.7 jsou vyobrazeny různé variace základních vzorů trhlin. Detailněji budou popsány v následujících kapitolách. U povrchových trhlin není namáhání dostatečně velké k vytvoření řetězcových trhlin, můžeme pozorovat izolované, stabilizované, nepropojené trhliny. Izolované trhliny mohou být v některých aplikacích kritické, jako v ochranném vinutí, ale naprosto tolerovatelné pro jiné [29].

Proces vytvoření řetězcových trhlin je velice nestabilní, jakmile řetězcová reakce započne nelze ji zastavit, dokud nedojde k okraji. To má za následek vytvoření řetězcové sítě trhlin oddělující od sebe okolní plochy neporušeného filmu. Pro většinu aplikací jsou neakceptovatelné. Trhliny v povrchu filmu se mohou šířit dále a způsobit poškození substrátu do určité hloubky [29].

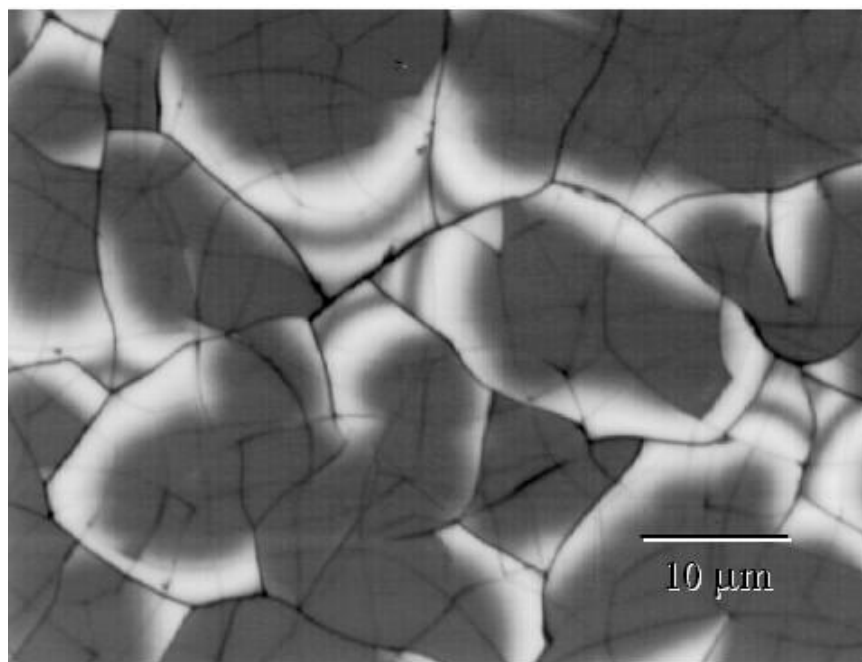
Odlupování substrátu je velice zajímavý jev. Trhlina si vybere cestu o určité hloubce paralelně k rozhraní. Není to lokalizovaná trhlina, spíše dochází k odlupování rozsáhlejších odštěpů. Rozlepování nejčastěji vzniká z okrajových defektů nebo dna kanálku. Dochází k přerušení sil, které drží dva různé materiály u sebe, silou nebo působením okolního prostředí [29].



Obr. 2.7 Druhy trhlin [29].

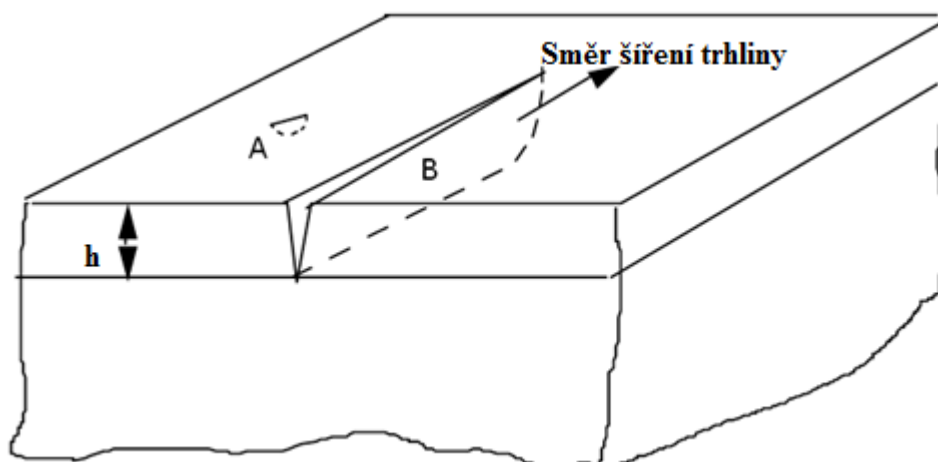
2.3.2 Vznik řetězcových trhlin ve filmu při tahových zkouškách

Jedním z hlavních důvodů selhání u křehkých filmů pod napětím, je vznik trhlin. Začíná z vady ve filmu a postupuje napříč celou šířkou filmu, dokud nenarazí na okraj nebo další trhlinu. Příčná délka trhliny může být často rovna šířce filmu. Těmto trhlinám se říká řetězcové trhliny. Jelikož může mít film mnoho nedostatků, dochází pod velkým namáháním ke vzniku mnoha řetězcových trhlin. Výsledné pole řetězcových trhlin je vyobrazeno na obr. 2.8, na světlých plochách lze pozorovat odlupování materiálu [30].



Obr. 2.8 Pole řetězcových trhlin [30].

Velká pozornost je zaměřena na vytvoření první řetězcové trhliny z největší vady ve filmu. Tedy je důležité zda může film vydržet namáhání bez toho, aby prasknul. Na obr. 2.9 jsou vyobrazeny dva případy (A a B), v prvním zmíněném je velikost již existující trhliny mnohem menší než je tloušťka filmu, $a \ll h$. Při výpočtu hnací síly, tedy síly potřebné ke vzniku trhlin se mění pouze numerický koeficient tvaru. Trhlina se začne šířit, když hnací síla je rovna odporu trhliny. Odpor trhliny je síla potřebná k šíření trhliny na jednotku plochy. Kritické namáhání potřebné k vytvoření řetězcové trhliny je závislé na velikosti již existující vady. Tyto vady pocházejí buď již z výroby, nebo vznikají při pozdějším použití, měření velikosti těchto vad na rutinní bázi je velice nepraktické [30].



Obr. 2.9 (A) velikost trhliny je mnohem menší než tloušťka filmu, (B) velikost trhliny odpovídá tloušťce filmu [30].

Vše výše zmíněné nás vede k druhé možnosti, kdy velikost již existujících trhlin je skoro stejná v porovnání s tloušťkou filmu, $a=h$, trhliny se mohou ve filmu šířit jen příčně. Když příčná délka trhliny několikrát překročí tloušťku filmu. Hnací síla závisí na elastičnosti substrátu a filmu. V případě že je substrát tvrdší než film, koeficient elastičnosti substrátu a filmu se pohybuje v rozmezí 1 až 2. Hlavní podmínkou zůstává, že síla potřebná ke vzniku trhliny musí být větší než odpor trhliny. Pokud není tato podmínka splněna, nemůže dojít k vytvoření řetězcových trhlin. V případě její splnění, nemá nutně za následek vznik trhlin, protože je šířka filmu mnohem větší než tloušťka filmu. Pravděpodobnost výskytu vad ve filmu, hlavně u jeho okrajů je velmi vysoká [30].

2.3.3 Odlupování filmu při tahovém namáhání a stlačování

K odlupování dochází při zkouškách v tahu, počátek má buď u kořene řetězcových trhlin obr. 2.8, nebo na okrajích fólie obr. 2.10. Pokud délka rozlepení několikrát přesáhne tloušťku filmu, proces se ustálí a hnací síla se stane nezávislou na délce rozlepení [30].

Film se odlepuje pozvolna, když je hnací síla rovna odporu. Pokud je film vystaven tlaku, může také docházet k odlupování filmu od substrátu, ale to zcela odlišným způsobem, než v případě filmu pod napětím. Obrázek 2.10 znázorňuje rozlepení materiálu od okraje. Odlepený film zůstává v kontaktu se substrátem. To lze chápat následovně. Pokud čela dvou trhlin nejsou v kontaktu, nebude na ně působit žádná trakční síla [30].

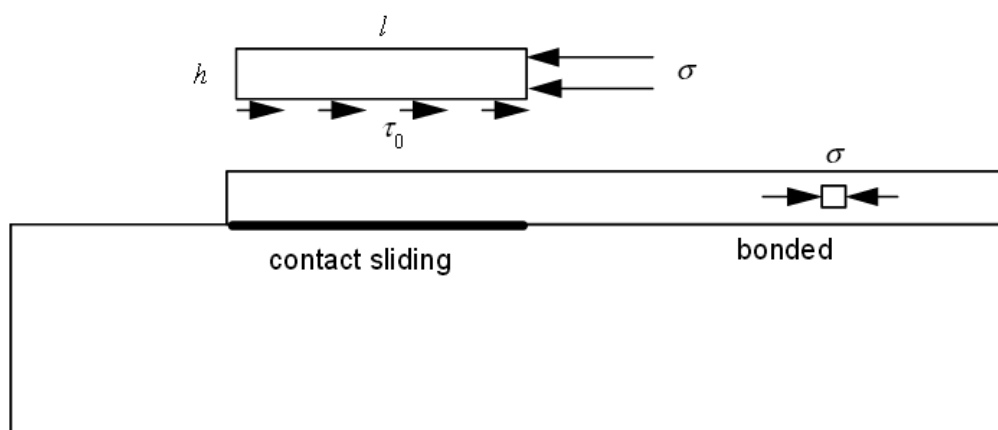
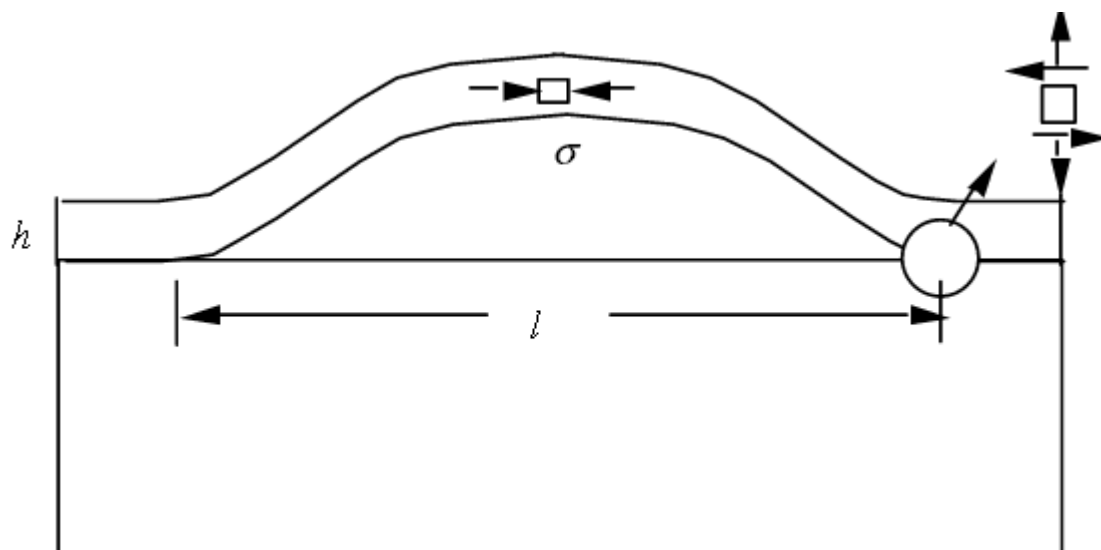


Figure 4 A debond crack initiated from an edge of the film.

Obr. 2.10 Odlepení filmu od substrátu u okraje [30].

Další uvažme možnost odlepení filmu daleko od okrajů, když je film dokonale propojený se substrátem. I když je povrch pod filmem odlepen od substrátu, dokud zůstane v kontaktu, nepůsobí na rozhraní žádný přebytečný stres. Často však dochází k odloupení filmu a

vytvoření bubliny jak je znázorněno na obr. 2.11. Dojde ke zvýšení namáhání mezi filmem a substrátem, to má za následek možné zvětšování bublin. Mohou se šířit jako řetězcové trhliny a vytvořit tak řetězec tunelů mezi filmem a substrátem, které pokračují, až k okraji [30].



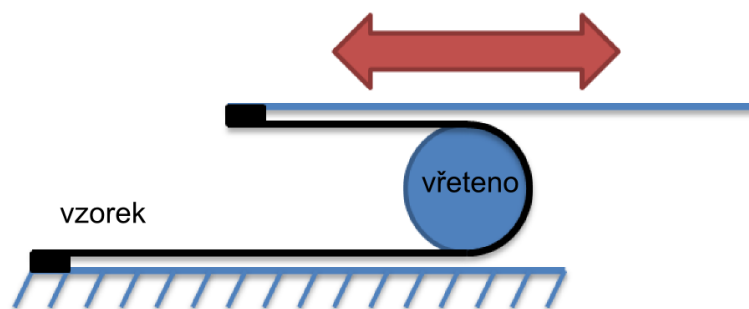
Obr. 2.11 Příklad odloupenutí a vyboulení filmu [30].

2.4 Praktické způsoby testování mechanických vlastností

Následující kapitoly budou věnovány praktickým způsobům testování mechanických vlastností flexibilních komponent. Tyto metody nejsou nijak standardizovány, případně autor publikace nezmiňuje, jaké standardy a normy dodržel při provádění zkoušek.

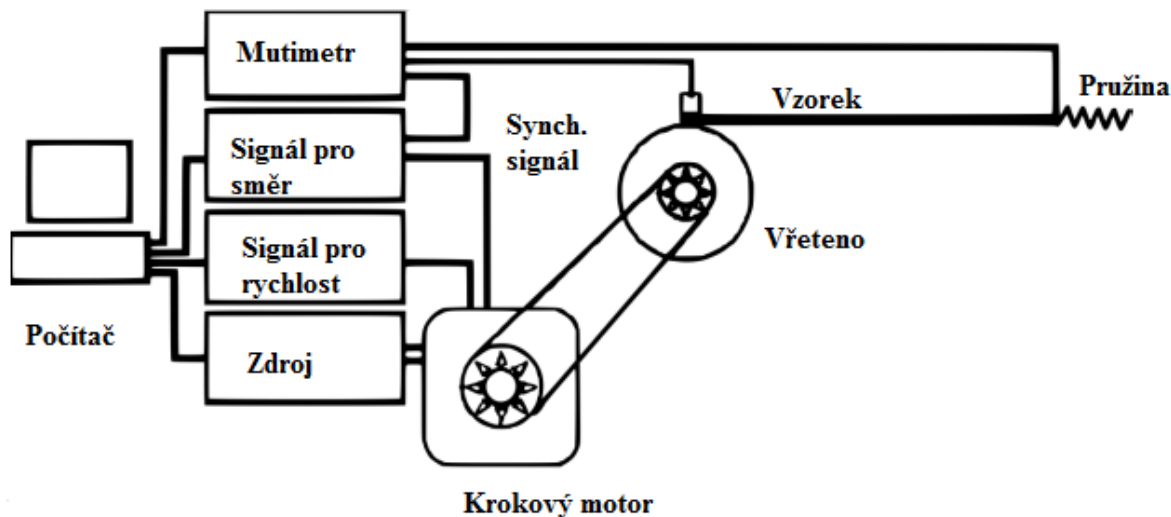
2.4.1 Navíjení na vřeteno

Navíjení na vřeteno patří mezi běžně používané způsoby periodického ohýbání plochých materiálů. Vychází ze standardu ASTM pro testování elektrických kabelů. Vzorek je umístěn mezi dvě rovnoběžné desky a přes vřeteno je rolován tam a zpět. Tento princip je znázorněn na následujícím obrázku. Poloměr ohybu je zhruba polovina rozmezí mezi deskami [31].



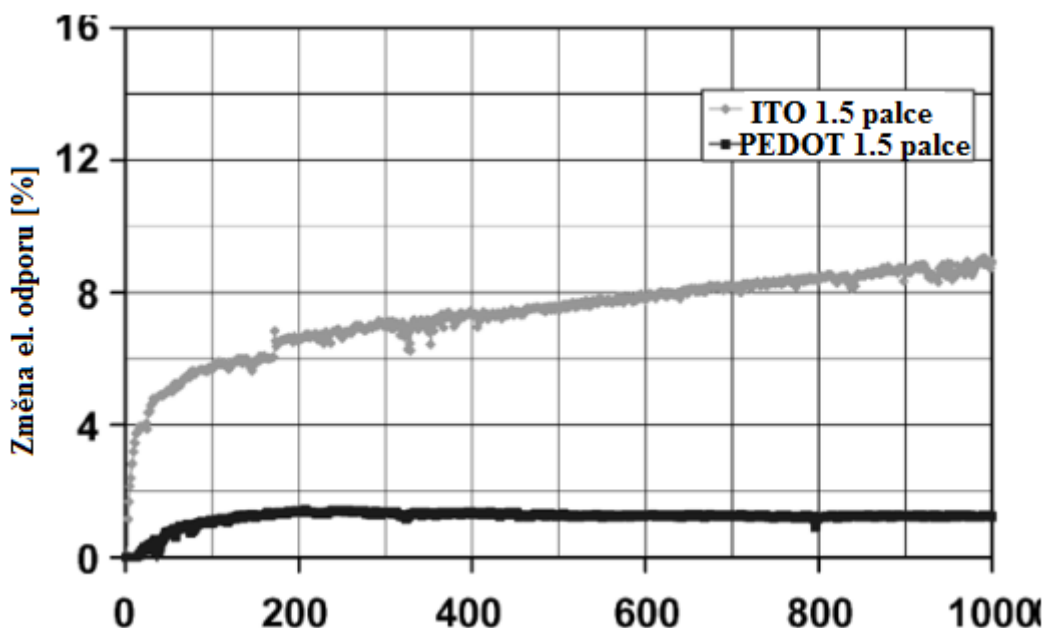
Obr. 2.12 Ohýbání vzorku pomocí navíjení na vřeteno[31].

Změna odporu při zvýšeném namáhání je velice podstatná informace z hlediska navrhování. Nicméně je nutné vzít v potaz, že v provozu bude zařízení vystaveno opakované deformaci. Pro porozumění dlouhodobému namáhání byl sestaven přístroj na monitorování odporu při cyklickém ohýbání vzorků. Schematický náčrt zkušebního přístroje je znázorněn na obr. 2.13. Systém umožňuje kontrolovat zatížení vzorku. Konstrukce byla postavena na masivním stole, aby došlo k redukci okolních vibrací. Vzorky o maximální délce 254 mm a šířce 76,2mm mohou být testovány. Upevnění vzorku je řešeno pomocí kovové desky, která přichytí jeden konec vzorku k povrchu vřetene. Druhý konec je sevřen mezi dvojicí tenkých kovových desek, které jsou drženy na své pozici pomocí slabé pružiny. Pár kovových desek drží pružinu a vzorek ve vodorovné poloze, aby se zabránilo prohýbání vzorku. Ke koncům vzorku jsou připojeny pomocí tenkých vodivých pásek dva ploché vodiče. Ty slouží k získávání hodnot odporu při testování. Princip testování je tedy postupné navíjení vzorku na vřeteno pomocí krokového motoru, který je řízen pomocí řídicích signálů a následné odvíjení [32].



Obr. 2.13 Schéma přístroje pro monitorování odporu během cyklického ohýbání [32].

V praxi byl tento systém použit například p. Cairnsem, zkoumal dva druhy vzorků na PET substrátu. První tvořený s anodami ze směsi oxidu india a cínu (ITO), a s vodivým polymerem (PEDOT:PSS). Práce prokázala procentuální zvyšování elektrického odporu obou vzorků v závislosti na počtu cyklů obr. 2.14. Zvyšování odporu je také přímo úměrné průměru vřetene [32].



Obr. 2.14 Závislost elektrického odporu na počtu provedených cyklů [32].

2.4.2 Ohyb pomocí pojízdné plošiny

Tento způsob ohybu pro zjištění elektromechanických vlastností tenkých filmů na flexibilním substrátu použili ve své práci například Korejští experti p. Eun a p. Woo Chon. Princip způsobu ohybu je znázorněn na obr. 2.15. Jedna strana vzorku je upevněna na pohyblivém stojanu. Druhá strana je upevněna na protější nepohyblivý stojan. Motor rozpohybuje pohyblivý stojan a dojde k ohnutí vzorku, změně poloměru zakřivení.

Ohybová zkouška může být proveden za použití dvou přístupů, v závislosti na zatížení filmu. Vnější ohýbání vzorku, ohne vzorek do konvexního tvaru (\cap), na film působí tahová síla, zatímco vnitřní ohybová zkouška, ohne vzorek do konkávního tvaru (\cup), na film pak působí tlakové napětí. Při působení tlakového napětí dochází častěji k odlepování filmu od substrátu. Poloměr zakřivení (r) vzorku přibližně vypočteme z rovnice:

$$r = \frac{L}{2\pi \sqrt{\frac{dL}{L} - \frac{\pi^2 h_s^2}{12L^2}}} \quad (2.8)$$

Kde L je délka vzorku

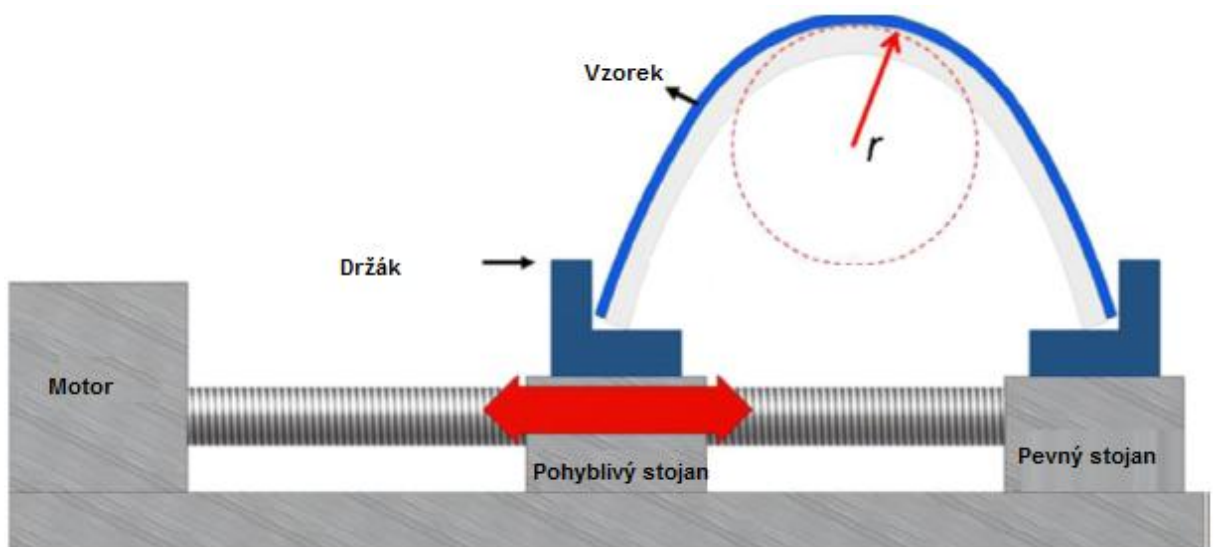
dL/L je rychlost změny délky

h_s je tloušťka substrátu

Na základě rovnice 2.8 můžeme určit nominální hodnotu ohybového napětí [33].

$$\varepsilon \cong \frac{h_s + h_f}{2r}$$

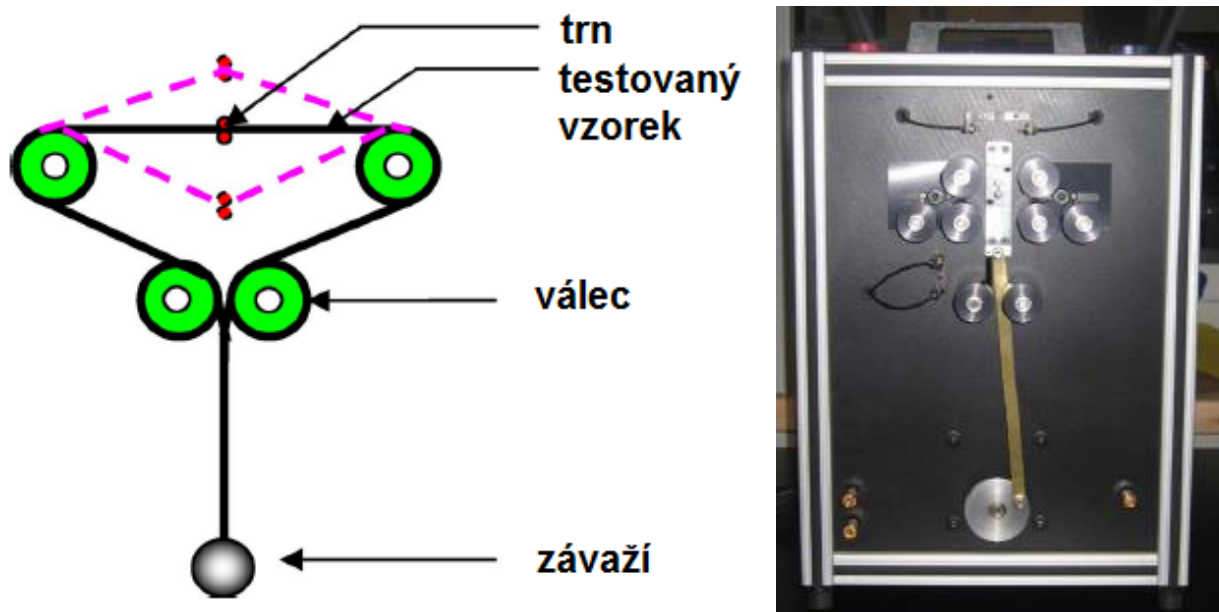
Kde h_f je tloušťka filmu.



Obr. 2.15 Systém s pojízdnou plošinou pro ohybové testy [33].

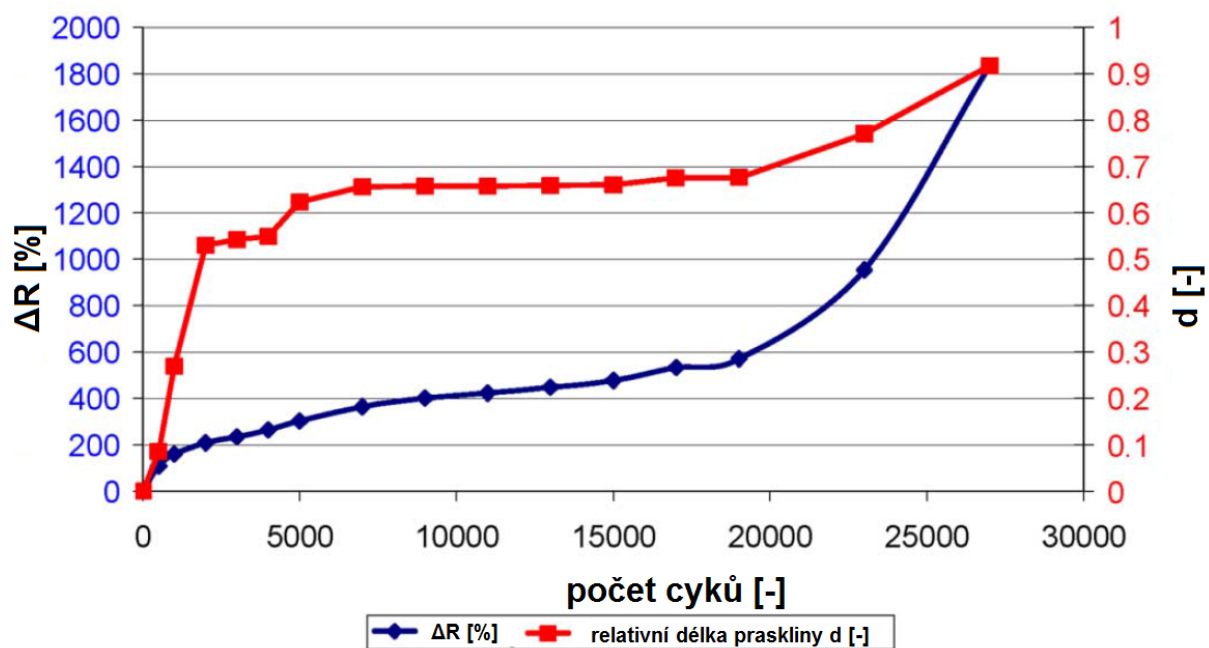
2.4.3 Vychylování trnů

Schéma a princip činnosti je zobrazen na obr 2.16a. Cyklickým pohybem trnů ve vertikální poloze, dochází k změnám tvaru vzorku z konvexního (\cap) na konkávní (\cup). Válec slouží k eliminaci vibrací způsobených pohybem závaží. Vlastní ohyb vzorku je způsoben pohybem ramene spojeného s trnem. Popsané zařízení postupně měří hodnoty odporu, dokud nedojde k porušení vodivé cesty například vznikem trhlin. Automaticky zaznamená počet cyklů, které byly nutné ke zničení vzorku. Přístroj pracuje ve třech rychlostních režimech a to 58 cyklů/min, 67 cyklů/min a 100 cyklů/min. Tento tester byl navrhnout speciálně pro vysoko cyklické ohýbání, ve své práci jej použil například p. Alzoubi, fotografie samotného zařízení je na obr 2.16b [34].



Obr. 2.16 (a) Schéma testovacího zařízení (b) Fotografie zařízení pro ohýbání pomocí vychylování trnů [34].

V práci p. Alzoubi, byly testovány dva typy vzorků na PET substrátu o tloušťce 127 μ m, šířce 3,5mm a délce 100mm, hlavním rozdílem byla tloušťka vodivé vrstvy 200nm a 500nm. Testy byly prováděny při teplotě 23 °C, a relativní vlhkosti 20%. Na obrázku 2.17



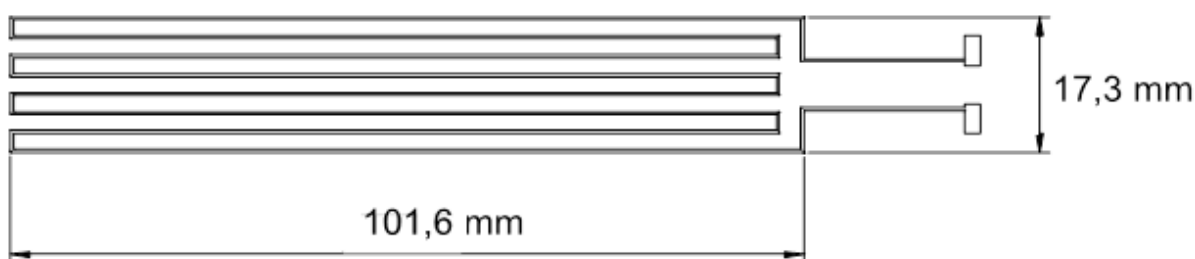
Obr. 2.17 Změna elektrického odporu a relativní délky trhlin [34].

3 Experimentální měření elektromechanických vlastností vzorků

Hlavním cílem tohoto měření bylo zjistit změnu elektrického odporu při mechanickém namáhání v ohybu, za použití vybavení katedry.

3.1 Popis navržených testovacích vzorků

Navrhování testovaných vzorků proběhlo v souladu s pokyny uvedenými v dokumentu IPC-TM-650 č. 2.4.3. Byla provedena korekce umístění ploch určených ke kontaktování, tak aby výsledný spoj nebyl vystaven mechanickému namáhání. Tato skutečnost je vyobrazena na obr 3.1.



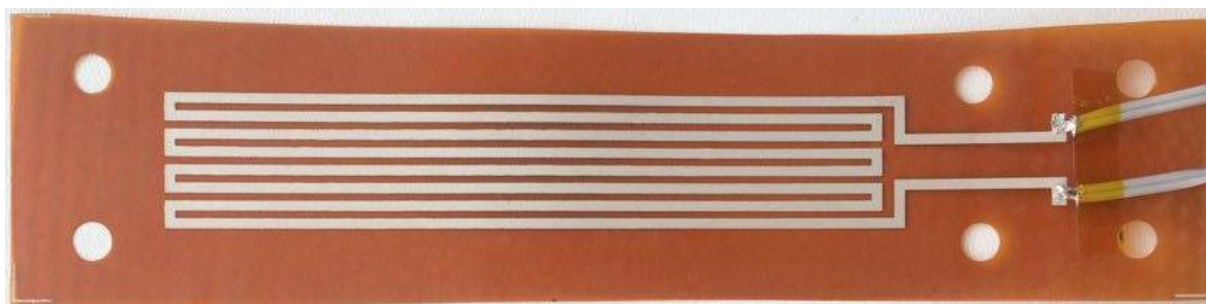
Obr. 3.1 Modifikovaný návrh vzorku

Vodivý vzor byl navržen v programu progeCAD 2016, ve třech variantách. Celkově byly vzorky vyrobeny v osmi provedeních, minimálně se třemi kusy od každého vzorku. Vzorky se od sebe lišily v použitém materiálu pro substrát, v technologii přípravy a v šířce vodivého motivu. Pro testování byly připraveny následující vzorky:

- S vodivým vzorem o tloušťce 1,5 mm a 0,4 mm vytvořené pomocí sítotisku na kaptonový substrát. Povrch vzorku byl vytvrzen UV zářením.
- S vodivým vzorem o tloušťce 1,5mm a 0,4 mm vytvořené sítotiskem na kaptonový substrát. Povrch vzorku byl ošetřen plasmou.
- S vodivým vzorem o tloušťce 1,5mm a 0,4 mm vyrobené pomocí sítotisku na polyetylen-terphtalatové (PEN) fólii.

- S vodivým vzorem o tloušťce 1mm naneseným metodou Aerosol Jet Printing na kaptonový substrát.
- S vodivým vzorem o tloušťce 1,5mm vytvořené sítotiskem na kaptonový substrát. Povrch substrátu byl upraven pomocí brusného papíru.

Jejich fotografie s popisem jsou uvedeny na obr. 3.2, obr. 3.3, obr. 3.4, obr. 3.5, obr. 3.6, obr. 3.7, obr. 3.8 a obr. 3.9. Ke každému ze vzorků bylo nutné přilepit pomocí dvousložkového epoxidového lepidla s příměsí stříbra (MG Chemicals 8331S-15G) dva páry izolovaných vodičů. Díky nim bylo možné odečítat hodnoty pro čtyřbodové měření odporu jak online tak offline metodou. Tato metoda byla vybrána z důvodu eliminace odporu vodičů a odporu epoxidového lepidla. Technologické otvory pro upnutí vzorku nejsou normou stanoveny, proto byl při jejich umístění brán ohled hlavně na mechanické namáhání elektrických spojů.



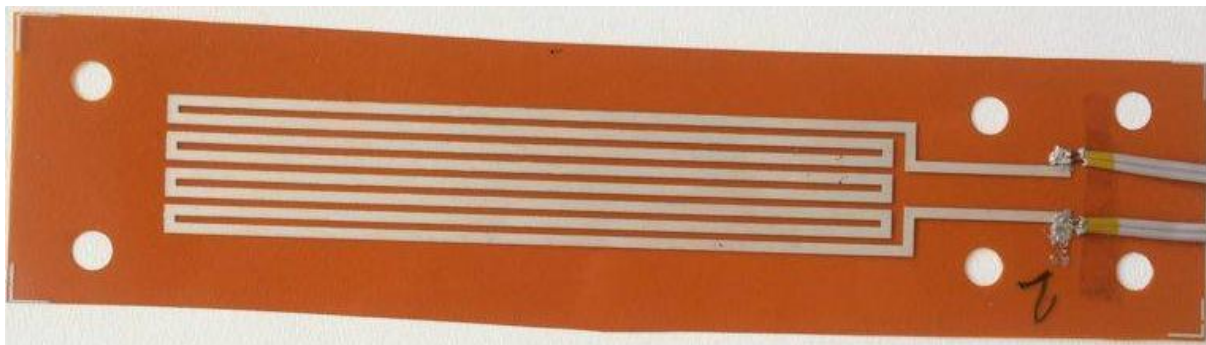
Obr. 3.2 Vzorek s vodivou cestou o tloušťce 1,5mm na kaptonové fólii, broušený.



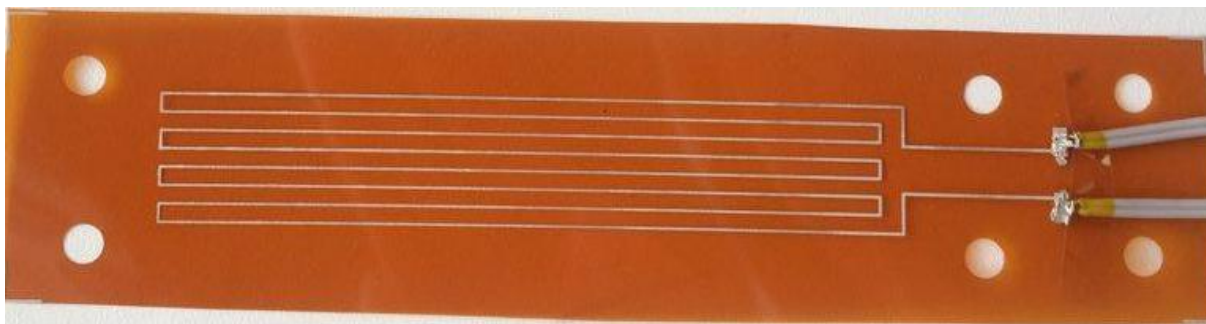
Obr. 3.3 Vzorek s vodivou cestou o tloušťce 0,4 mm na PEN substrátu.



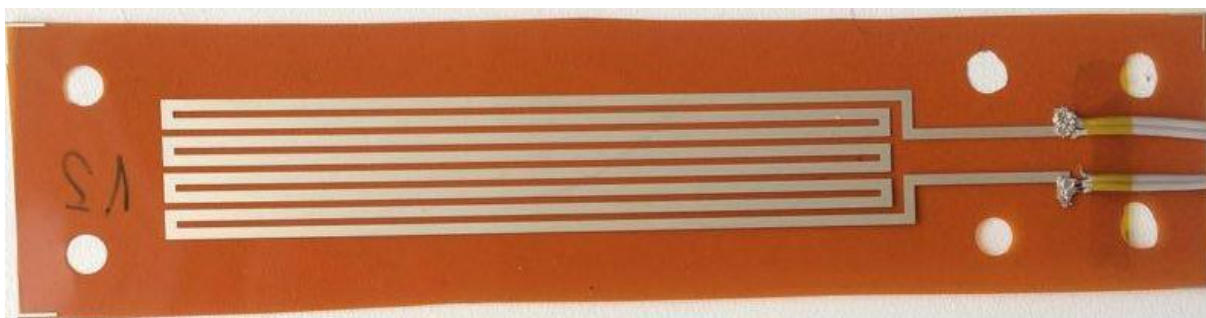
Obr. 3.4 Vzorek s vodivou cestou o tloušťce 1,5 mm na PEN substrátu.



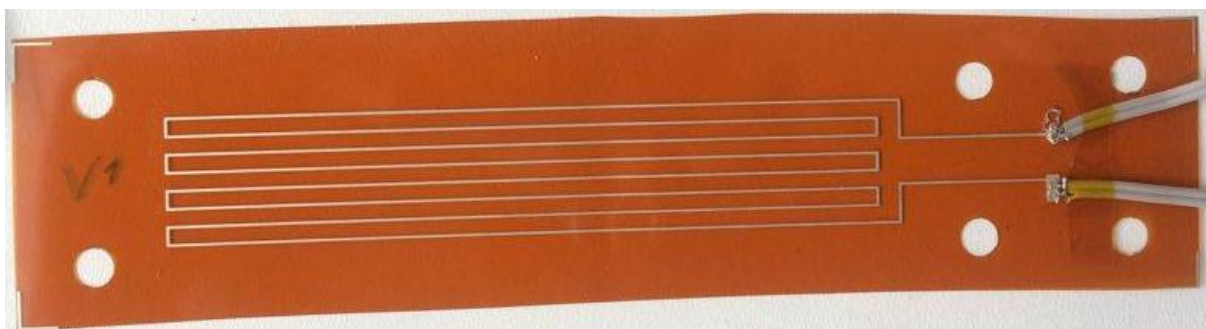
Obr. 3.5 Vzorek s vodivou cestou o tloušťce 1,5mm na kaptonovém substrátu.



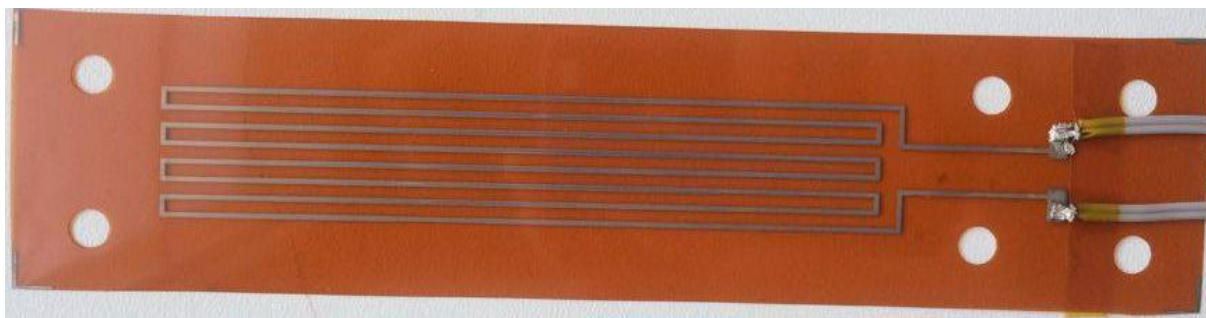
Obr. 3.6 Vzorek s vodivou cestou o tloušťce 0,4 mm na kaptonovém substrátu.



Obr. 3.7 Vzorek s vodivou cestou o tloušťce 1,5 mm na kaptonovém substrátu. Ošetřeno plasmou.



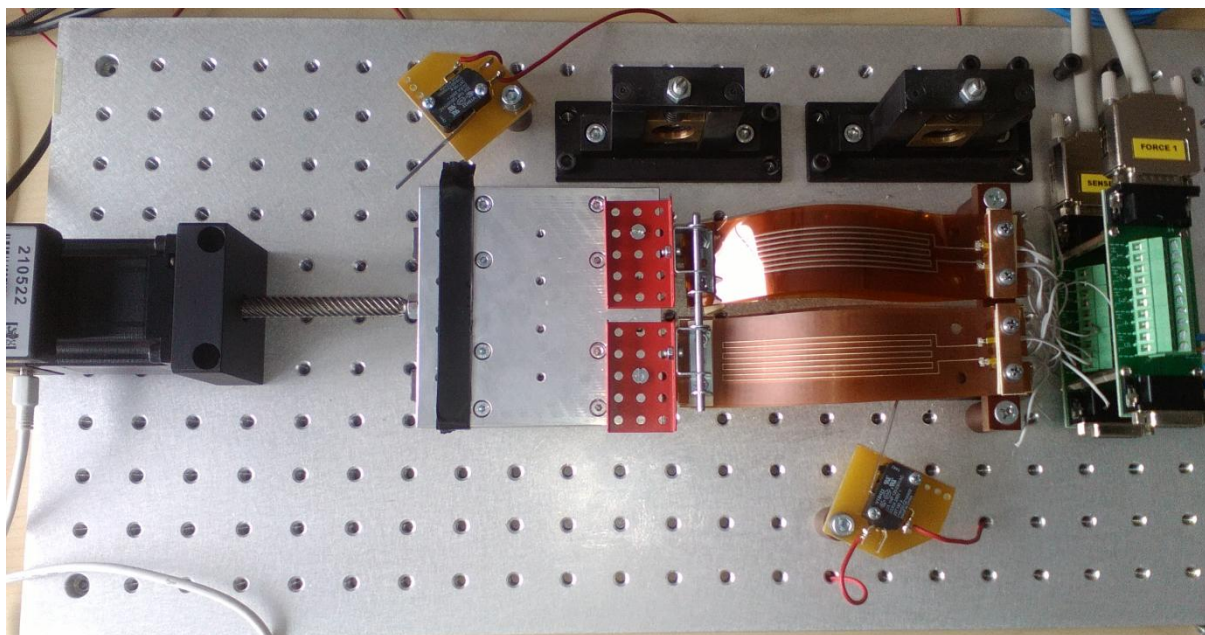
Obr. 3.8 Vzorek s vodivou cestou o tloušťce 0,4 mm na kaptonovém substrátu. Ošetřeno plasmou.



Obr.3.9 Vzorek s vodivou cestou o tloušťce 1 mm připravený metodou AJP.

3.2 Popis testovacího zařízení

Pro konstrukci vhodného testovacího zařízení, byl vybrán stroj primárně určen pro depozici materiálů. S navrženými modifikacemi stroje, bylo možné použít stroj pro cyklické namáhání ohybem. Navržené řešení respektuje normy a díky možnosti řídit rychlost testování, dokáže provádět mechanické testy nad rámec této normy. Na obr 3.10 je fotografie modifikovaného zařízení.

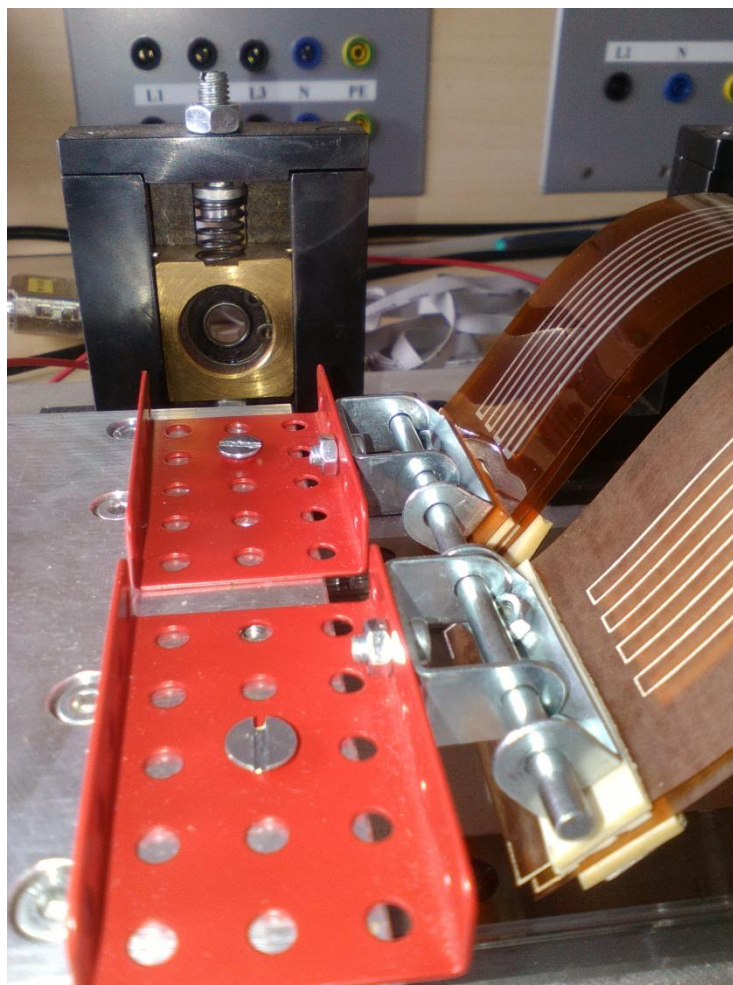


Obr. 3.10 Testovací zařízení použité pro testování vzorků v ohybu.

Testovací zařízení se skládá z krokového motoru, dvou rovnoběžných kovových ližin, kovovou posuvnou plošinu, podstavec pro upevnění vzorků a koncových spínačů pro ochranu vzorků proti zničení v případě selhání krokového motoru. Celé zařízení je pevně uchyceno na masivní kovovou desku.

Na posuvné plošině bylo nutné realizovat mechanismus pro uchycení vzorků, tak aby vzorky byly co nejméně namáhány v místech mechanického spojení vodičů pro odečítání

hodnot se vzorkem. Na následujícím obrázku je detailní fotografie realizovaného mechanismu.



Obr. 3.11 Mechanismus pro uchycení vzorků zhotovený v laboratoři katedry technologií a měření na FEL ZČU.

3.2.1 Nastavení krokového motoru

Nastavení krokového motoru bylo provedeno pomocí softwaru dodávaného výrobcem IDEA. Pro testování byl použit níže uvedený skript, původně navržený pro depozici materiálů.

Action	Label	Description	Comment
0		Wait 5 sec	
1	start	Move To 69,99684375 mm	
2		Wait For Move	
3		Wait 0,01 sec	
4		Move To 0 mm	
5		Wait For Move	
6		Wait 0,01 sec	
7		Jump N Times start	
8		Abort	

Obr. 3.12 Skript použitý k ovládání krokového motoru.

Kde *Wait* je doba, kdy motor čeká na další příkaz,
Move To je příkaz k pohybu hřídele na předepsané souřadnice,
Wait For Move je doba čekání potřebná pro vykonání příkazu *Move To*,
Jump N Times start počet opakování kódu,
Abort je ukončení skriptu.

Nejdůležitějším příkazem je „*Move To*“, u kterého se dají měnit funkční parametry, jako například pozice, rychlost, zrychlení a další. Na obr 3.13 je uveden příklad nastavení příkazu, který byl použit k ohýbání vzorku.

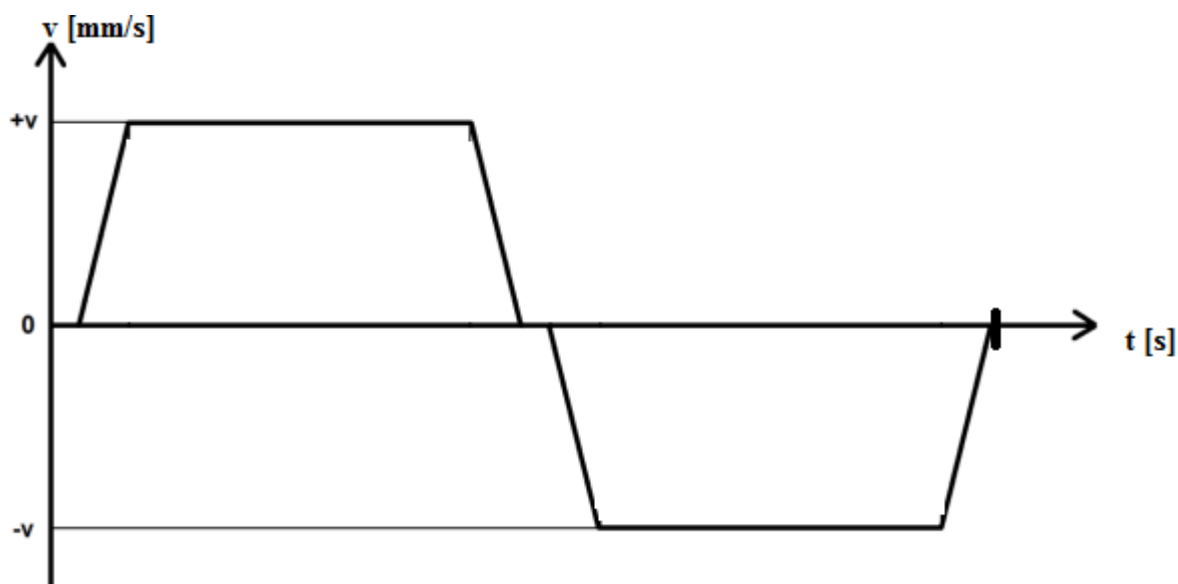
Obr. 3.13 Příkaz „*Move To*“ a jeho parametry.

Kde *Position* je vzdálenost, kterou posuvná plošina urazí,
Speed je maximální rychlost pohybu plošiny,
Run Current je elektrický proud, použitý k chodu plošiny,
Hold Current je elektrický proud ve vinutí motoru po ukončení pohybu,
Delay Time je doba změny velikosti proudu z *Run Current* na *Hold Current*,
Step Mode je jemnost kroku,
Accel Rate je zrychlení posuvné plošiny,
Decel Rate je zpomalení posuvné plošiny,
Start Speed je počáteční rychlo, pokud je použita volba *Accel Rate*,
End Speed je koncová rychlo, pokud je použita volba *Decel Rate*,
Accel Boost je proudové zesílení až o 30 % po dobu 300 ms během zrychlování,
Decel Boost je proudové zesílení až o 30 % po dobu 300 ms během zpomalování,
Label je návěští a

Comment je komentář uživatele.

Teoretická časová náročnost pro měření jedné sady vzorků, vzhledem k rychlosti měření, byla stanovena na pět hodin. Praxe se však lišila z důvodu nutnosti restartování krokového motoru po každém odečtení hodnot, zaznamenávat offline i online hodnoty odporu a restartovat SW ExceLINX po naplnění všech řádků.

Pro úplnost je na obr 3.14 zobrazena všeobecná charakteristika jednoho cyklu. Cyklus začíná přijetím příkazu k pohybu, který se zpracuje v řádu milisekund. Plošina postupně zrychluje, dokud nedosáhne nastavené konstantní rychlosti, kterou pokračuje k stanoveným souřadnicím, kde zastaví. V druhé půlce periody se změní směr pohybu a plošina se vrací do výchozího stavu.



Obr. 3.14 Perioda jednoho ohýbacího cyklu. Testování vzorků v ohybu

Testování všech vzorků bylo provedeno v laboratoři KET při teplotě $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti $40\% \pm 10\%$. Vzorky byly upevněny k testovacímu zařízení, jak je znázorněné na obr 3.11 a 3.12. Vzorky vytvořené metodou AJP byly testovány po třech najednou paralelně se vzorky s povrchovou úpravou broušení. Ostatní vzorky byly testovány po šesti, jednalo se vždy o šestici vzorků, které se lišili pouze rozměry vodivých cest. Při návrhu testovací metody, byla brána v potaz rozdílná odolnost vzorků vůči cyklickému ohýbání. Dále bylo nutné zohlednit negativní vlastnosti krokového motoru, mezi které patří například přehřívání při vysokých rychlostech, velké vibrace při neoptimalizované rychlosti a jeho celková nespolehlivost. Dále byly zohledněny limity měřicího přístroje, který při paralelním online měření dokáže pracovat pouze s omezenou snímkovací frekvencí. V případě použití vysoké snímkovací frekvence může dojít ke zničení přístroje příliš rychlým

spínáním relé pro měření více vzorků. Hodnoty byly odečítány online i offline metodou. Online měření bylo zaměřeno na detailní proměření ohýbacího cyklu, proto bylo během jednoho cyklu odečteno alespoň deset hodnot. Hodnoty offline měření byly odečítány vždy po ukončení série cyklů, v počáteční i koncové poloze pojízdné plošiny. V koncové poloze působí na vzorek největší namáhání. V následujících podkapitolách jsou popsána jednotlivá měření.

K měření byl použit multimetr Keithley 2700, který byl díky USB modulu KUSB-488A spojen s počítačem a SW ExceLINX.

3.2.2 Měření elektrického odporu vzorků vyrobeného metodou AJP

Testování vzorků vyrobených metodou AJP (obr. 3.9), proběhlo paralelně s měřením vzorku s povrchovou úpravou broušením (obr. 3.2). Bylo zvoleno testování pomocí maximálního ohybu. To bylo možné díky extrémní flexibilitě kaptonových substrátů. Jelikož zvýšení rychlosti ohybu tenkého vzorku nemá znatelný vliv na celkový počet vykonaných cyklů, byla navýšena i testovací rychlost přibližně třikrát. Rychlost testování udávaná normou IPC-TM-650 č. 2.4.3 je 10 cyklů za minutu. V tabulce 3.1 jsou hodnoty získané offline měřením. Žlutě vyznačené řádky označují vzorky, které byly měřeny i online metodou. Vzorek č. 4 byl vzorek s povrchovou úpravou broušením, ostatní vzorky byly vyrobeny metodou AJP. Bylo nutné vyřadit z měření ostatní vzorky s povrchovou úpravou broušením, neboť vykazovali defekty před samotným testováním.

Tab. 3.1 Offline hodnoty elektrického odporu vzorků

n[-]	R1 ₀ [Ω]	R1 _{max} [Ω]	R1 _{MAX} /R1 ₀ [Ω]	R2 ₀ [Ω]	R2 _{max} [Ω]	R2 _{max} /R2 ₀ [Ω]	N[-]
1	123,37	128,91	1,0449	112,24	132,8	1,1831	7000
2	76,87	78,85	1,0257	77,32	79,19	1,0241	11000
3	93,55	102,3	1,0935	98,55	123,5	1,2544	9000
4	2272,62	8302,64	3,6533	2269,62	7888,89	3,4758	10000

Kde n je číslo vzorku

R1₀ je hodnota odporu ve výchozí poloze před testováním,

R1_{max} je maximální hodnota odporu ve výchozí poloze po N cyklech,

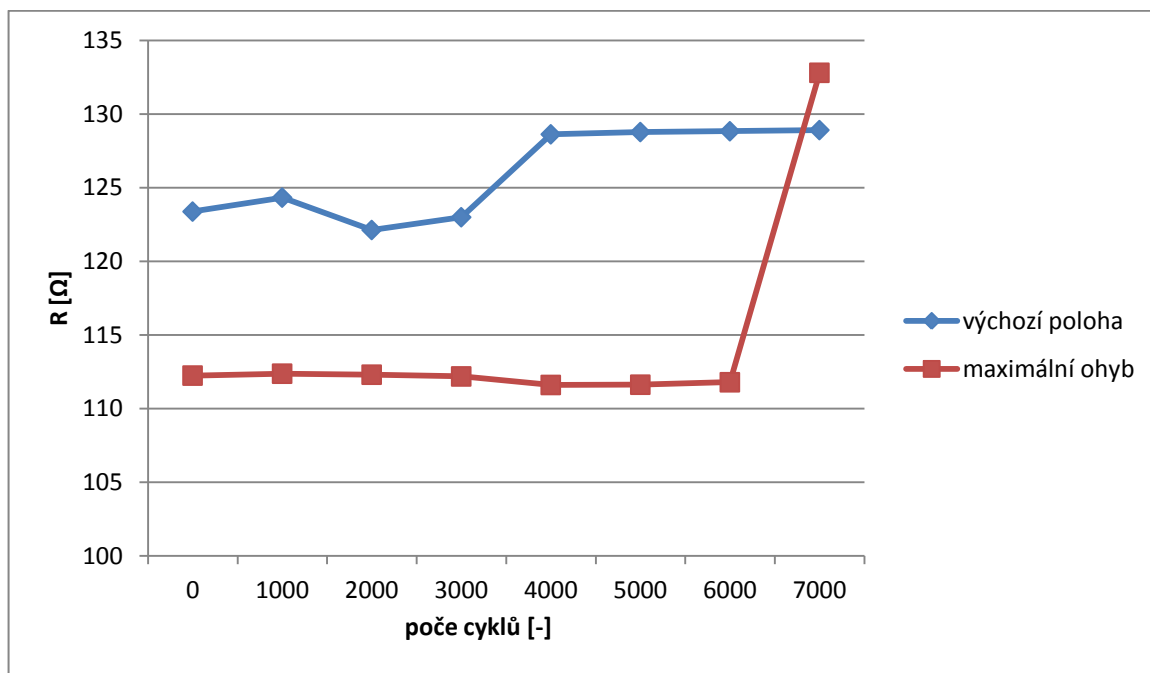
R1_{MAX}/R1₀ je poměr zvýšení odporu změřeného ve výchozí poloze po N cyklech,

R2₀ je hodnota odporu v maximálním ohybu před testováním,

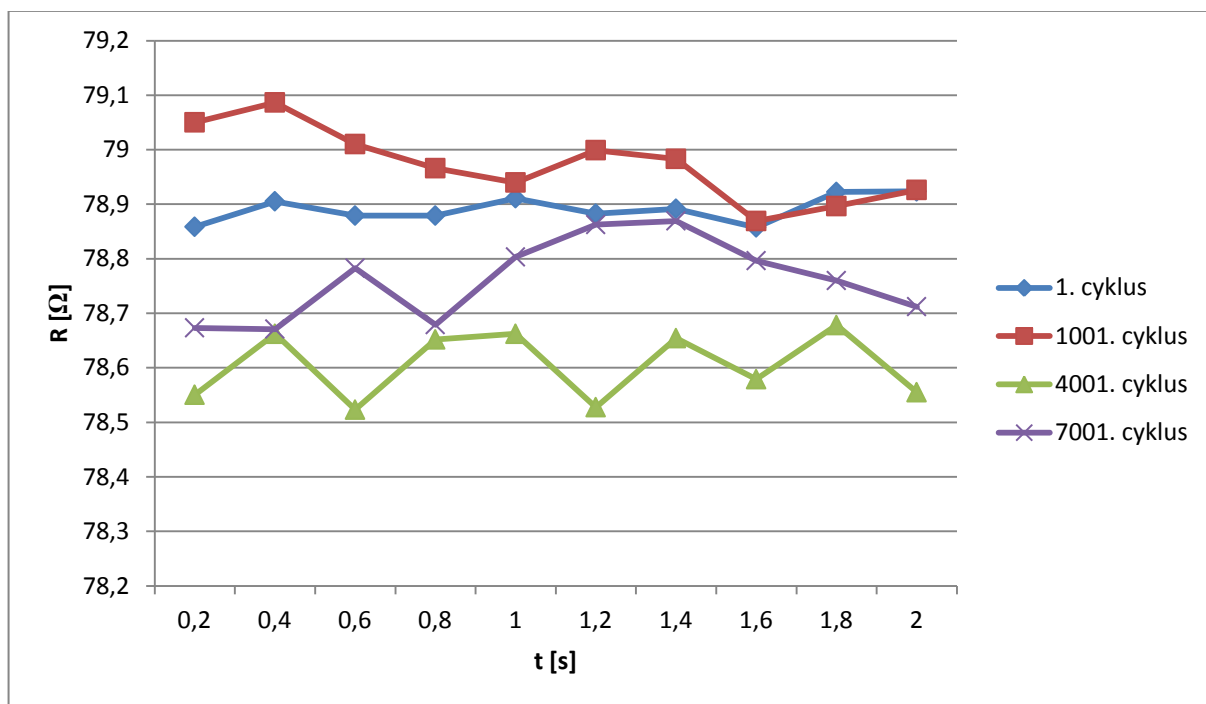
$R_{2_{max}}$ je maximální hodnota odporu v ohybu po N cyklech,

$R_{2_{max}}/R_{2_0}$ je poměr zvýšení odporu změřeného v ohybu po N cyklech,

N je počet provedených cyklů před selháním.



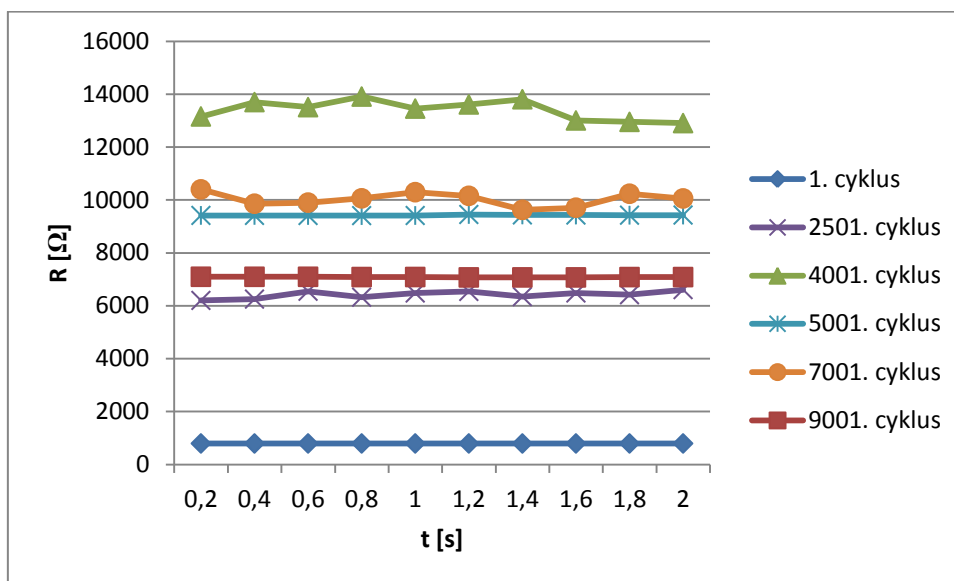
Obr. 3.15 Offline hodnoty odporu AJP vzorku č. 1.



Obr. 3.16 Online hodnot odporu AJP vzorku č. 2 ve vybraných cyklech.

Z grafu offline měření je patrný mírný růst elektrického odporu s přibývajícím cykly. Velký nárůst elektrického odporu kolem 6500 cyklu byl pravděpodobně způsoben tvorbou

řetězcové trhliny. Vzorčky vyrobené metodou AJP odolaly v průměru 9000 cyklů. Online měření potvrdilo předpoklad, že je elektrický odpor závislý na měnící se velikosti ohybu.



Obr. 3.17 Online hodnoty elektrického odporu vzorku č. 4 ve vybraných cyklech s patrnou regenerací při 5000 cyklech.

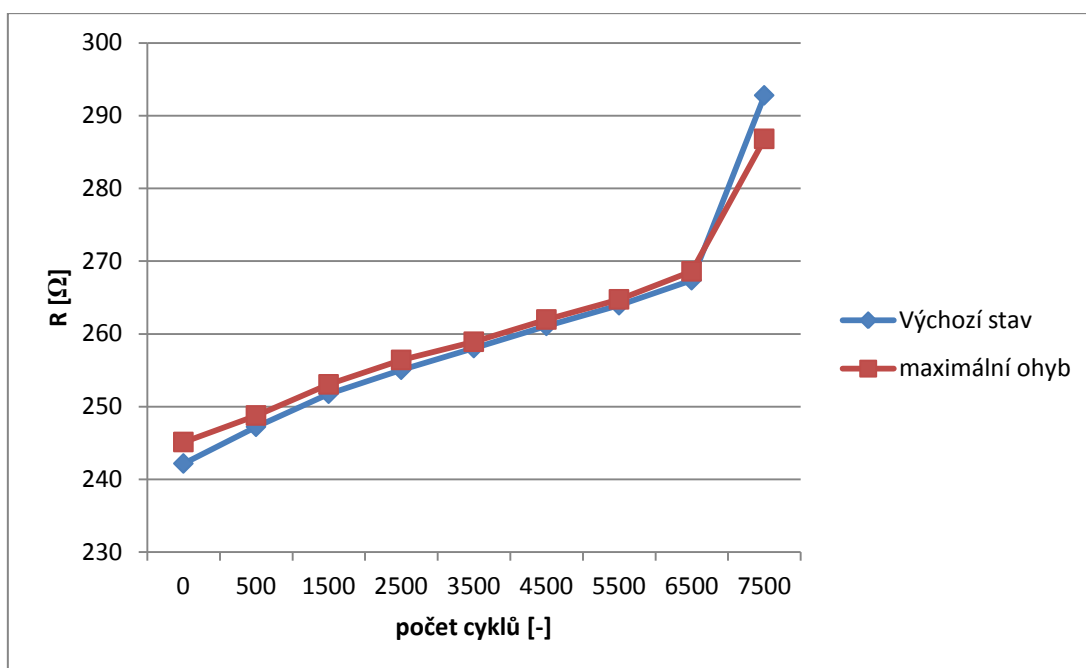
Z důvodu časové náročnosti měření, bylo nutné měření přerušit při po 5000 cyklech. Časové rozmezí mezi měřeními bylo 48 hodin. Z grafu online hodnot je zřejmé skokové snížení odporu mezi 4001 a 5001 cyklem z přibližně 13000 Ω na 9700 Ω. To je způsobeno regenerací materiálu.

3.2.3 Měření elektrického odporu vzorků ošetřených plasmou

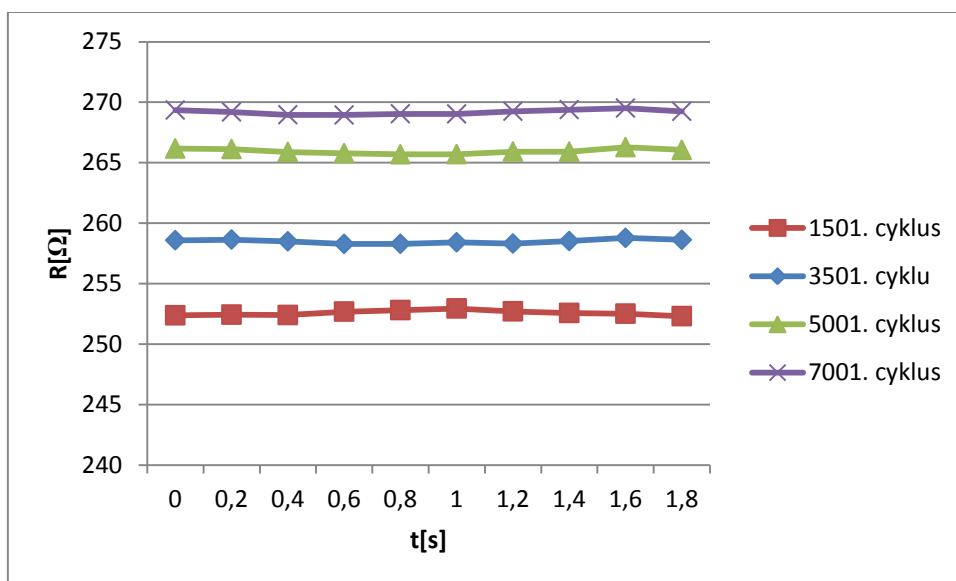
Při měření elektrického odporu vzorků ošetřených plasmou na kaptonovém substrátu byly měřeny dvě trojice vzorků. Vzorky byly popsány v předchozí kapitole a jsou vyobrazeny na obr. 3.7 a obr. 3.8. Tyto trojice vzorků se lišili pouze šířkou vodivých cest 1,5 mm a 0,4 mm. Vzorky byly podrobeny maximální možné deformaci v ohybu. Rychlost měření byla stanovena přibližně na 33 cyklů za minutu. V tabulce 3.2 jsou uvedeny offline hodnoty elektrického odporu všech šesti měřených vzorků. První tři vzorky byly s šířkou vodivých cest 0,4mm. Vzorky 4 až 6 s šířkou 1,5 mm.

Tab. 3.2 Offline hodnoty elektrického odporu vzorků.

n[-]	R1 ₀ [Ω]	R1 _{max} [Ω]	R1 _{MAX} /R1 ₀ [Ω]	R2 ₀ [Ω]	R2 _{max} [Ω]	R2 _{max} /R2 ₀ [Ω]	N[-]
1	242,17	292,78	1,2090	245,12	286,79	1,1700	7500
2	187,81	194,44	1,0353	189,89	194,44	1,0240	500
3	114,67	117,40	1,0239	115,89	117,40	1,0131	500
4	87,70	105,27	1,2003	88,90	105,27	1,1841	12500
5	48,84	55,58	1,1380	49,42	55,87	1,1305	12500
6	48,99	58,21	1,1882	49,55	58,21	1,1749	12500



Obr. 3.18 Offline hodnoty elektrického odporu vzorku č. 1.



Obr. 3.19 Online hodnoty elektrického odporu vzorku č. 1.

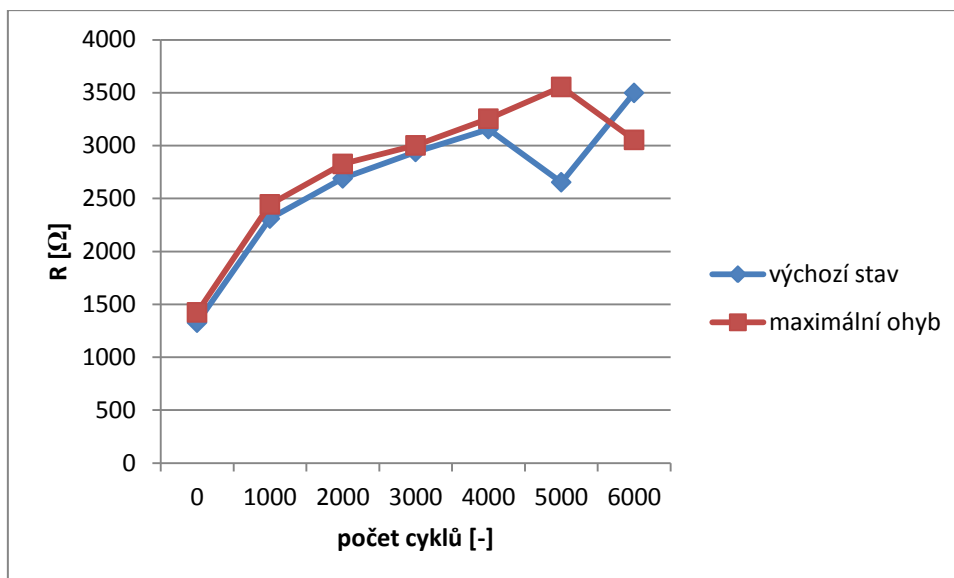
Během měření došlo k odlupování vodivé vrstvy a předčasnému zničení vzorků č. 3 a 5 již po 500 cyklech. Z výsledků online měření není patrná závislost elektrického odporu na velikosti ohybu. Vzorky s vodivou cestou o šířce 1,5 mm se ukázaly jako velice odolné, všechny tři po provedení 12500 cyklů nevykazoval známky vad. Elektrický odpor těchto vzorků narostl maximálně o 18Ω .

3.2.4 Měření elektrického odporu vzorků připravených na PEN substrátu

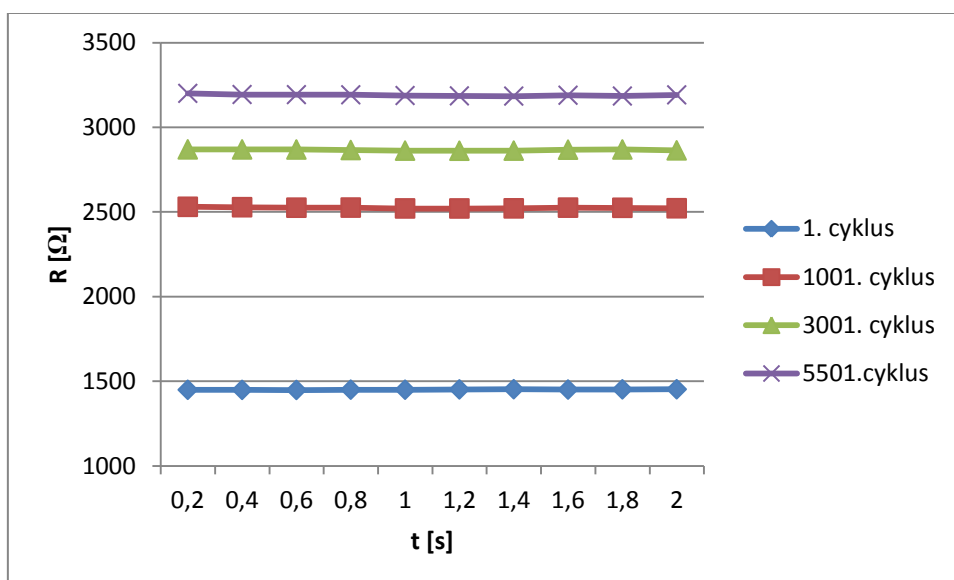
Vzorky připravené na PEN substrátu jsou podstatně méně odolné než při použití kaptonu. Povrch vzorků navíc nebyl ošetřen plasmou, můžeme tedy předpokládat nižší počet cyklů před zničením. Pohyblivá plošina se pohybovala po ližinách 70 mm směrem k upínacímu podstavci a zpět do výchozí polohy. Vzorky byly testovány stejnou rychlostí jako v předchozích dvou případech, opět paralelně dvě trojice vzorků. V následující tabulce jsou uvedeny naměřené offline hodnoty odporů a žlutě vyznačeny vzorky měřené i online metodou.

Tab 3.3. Offline hodnoty el. odporu vzorků připravených na PET substrátu.

n[-]	R1 ₀ [Ω]	R1 _{max} [Ω]	R1 _{MAX} /R1 ₀ [Ω]	R2 ₀ [Ω]	R2 _{max} [Ω]	R2 _{max} /R2 ₀ [Ω]	N[-]
1	53,84	68,77	1,2772	55,02	70,00	1,2722	6000
2	67,29	83,45	1,2402	67,62	71,52	1,0577	3500
3	61,37	78,98	1,2869	63,06	73,86	1,1713	4000
4	1326,16	3497,80	2,6376	1423,37	3053,85	2,1455	6000
5	2302,21	2939,80	1,2769	2420,41	2826,64	1,1678	3000
6	2787,16	3138,01	1,1259	2804,47	3153,17	1,1243	2500



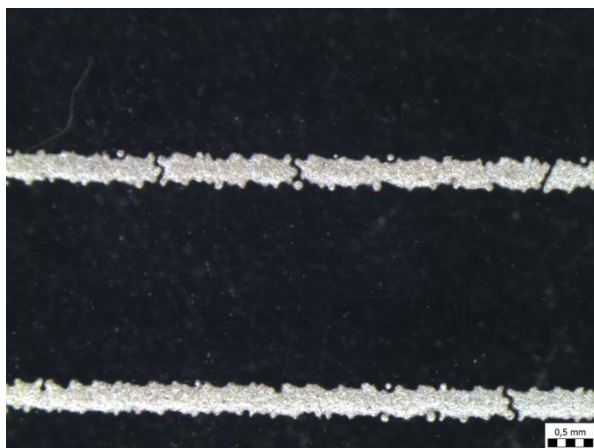
Obr. 3.20 Offline hodnoty elektrického odporu vzorku č. 4



Obr. 3.21 Online hodnoty elektrického odporu vzorku č. 4

Z výsledků měření byl potvrzený teoretický předpoklad, že vzorky vyrobené na PET substrátu bez povrchové úpravy plasmou jsou méně odolné. Graf offline hodnot má předpokládaný rostoucí charakter až na snížení odporu při 4000 cyklu. To je jen další příklad regenerace materiálu, tentokrát však z offline hodnot. Z grafu online hodnot není patrná závislost velikosti elektrického odporu na měnící se velikosti ohybu v průběhu jednoho cyklu.

Na obrázcích, pořízených mikroskopem při několikanásobném zvětšení, jsou zobrazeny dva defekty ve vodivé cestě vzorku, které měly za následek jeho selhání. Měřítka je uvedeno v pravém dolním rohu obrázků.



Obr. 3.22a Trhliny ve vodivé cestě způsobující selhání vzorku.



Obr. 3.22b Trhliny ve vodivé cestě způsobující selhání vzorku.

3.2.5 Měření elektrického odporu vzorků na kaptonovém substrátu

Jelikož tyto vzorky nebyly ošetřeny plasmou, dá se předpokládat nižší životnost vzorů, oproti měření popsaném v kapitole 3.3.2.

V průběhu měření bylo vyzorováno, že namáhání v místě upnutí vzorku bylo pro toto měření fatální. V místech kontaktování motivu s vodivými dráty, došlo odlepování motivu a celkovému zničení vzorků. Pro minimalizaci tohoto namáhání byl navrhnout mechanismus pro uchycení vzorků (obr. 3.11), bohužel pro toto měření nebyl dostatečně účinný.

Závěr

Účelem této diplomové práce bylo zmapovat problematiku testování mechanických vlastností flexibilních tištěných komponent. V práci jsou popsány praktické metody pro testování i normy. Jako nejvhodnější postup pro testování byla zvolena norma IPC-TM-650 č. 2.4.3, který byl dále upraven pro účely měření elektrického odporu s využitím laboratorního vybavení KET. Dále byl upraven vodivý motiv vzorků, tak aby nedocházelo ke zbytečnému namáhání v místech kontaktu. Z tohoto důvodu byl také navržen a zkonstruován mechanismus pro uchycení vzorů na pojízdné plošině. Vzorky byly cyklicky namáhány ohybem, neboť je flexibilní elektronika tomuto namáhání nejvíce vystavena.

V průběhu měření bylo pořízeno tisíce offline i online hodnot popisujících změnu elektrického odporu při cyklickém ohýbání. Vzorky připravené na kaptonovém substrátu, které nebyly ošetřeny plasmou, se v měření ukázali jako nejméně vyhovující, neboť došlo k poškození v místech kontaktování, i přes veškeré snahy namáhání v těchto místech minimalizovat. Naopak vzorky na kaptonovém substrátu ošetřeny plasmou s šířkou vodivých čar 1,5 mm, se ukázali jako nejvíce odolné, kdy ani po 12500 cyklech nedošlo k výraznému zvýšení elektrického odporu. Dále byly pozorovány regenerační vlastnosti flexibilní tištěné elektroniky při měření vzorků na PET substrátu a vzorků připravených metodou AJP.

Pro zlepšení testování vzorků v ohybu a možnosti testovat vzorky přesně podle norem a standardů, by bylo vhodné sestavit zařízení pro tyto účely sloužící. Krokový motor vykazoval řadu omezení a poruch při práci s vyššími rychlostmi, jako zvýšené vibrace a přehřívání motoru. Pokračováním této práce by mohlo být testování cyklickým namáháním v tahu, které zde nebylo provedeno jak z časových důvodů, tak z nutnosti nových sad vzorků.

Seznam literatury

- [1] KATSUAKI SUGANUMA. Introduction to Printed Electronics. Imprint: Springer, 2014. ISBN 9781461496250.
- [2] HU, Jupiter. Overview of Flexible Electronics from ITRI's Viewpoint [online]. Taiwan, 2010,[cit. 2015-04-26]. Dostupné z:
<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5469608>
- [3] DAS, Raghu a Peter HARROP. Printed, Organic & Flexible Electronics Forecasts, Players & Opportunities 2016-2026. IDTechEx, 2015.
- [4] SOUKUP, R., A. HAMÁČEK a J. ŘEBOUN. Advanced Screen Printing for the Fabrication of Organic Humidity Sensors [online]. Pilsen, 2012 [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6542183>.
- [5] BARBONELOVA, Angelina. Experiments on Printed Intelligence and Its Applications. Helsinki, 2015.
- [6] HORMADALY, Jacob.; PRUDENYIATI, Maria. Printed films: Materials science and applications in sensors, electronics and photonics. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials: Number 26. [cit. 2013-06-03].
- [7] WONG, William S a Alberto SALLES. Flexible electronics: materials and applications. New York: Springer, c2009, xviii, 462 p.[cit. 2015-04-26]. ISBN 978-038-7743-639.
- [8] CHANG, Joseph, Xi ZHANG, Tong GE a Jia ZHOU. Fully printed electronics on flexible substrates: High gain amplifiers and DAC. [online]. 2014 [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566119913005685>
- [9] Haruki H, Uchida Y (1983) Stainless steel substrate amorphous silicon solar cell. In: HAMAKAWA, Y. Amorphous Semiconductor: Technologies and Devices. 1983. Tokyo: OHM, 1983, 345 s.[cit. 2015-04-26].
- [10] AFENTAKIS, T., M. HATALIS, A.T. VOUTSAS a J. HARTZELL. Design and fabrication of high-performance polycrystalline silicon thin-film transistor circuits on flexible steel foils. [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1109/ted.2006.871174.
- [11] PLICHTA, Armin, Andreas WEBER a Andreas HABECK. Ultra Thin Flexible Glass Substrates. [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1557/proc-769-h9.1.

- [12] Plichta A, Habeck A, Knoche S, Kruse A, Weber A, Hildebrand N (2005) Chapter 3: Flexible glass substrates. In: Grawford GP (ed) Flexible Flat Panel Displays. Wiley, England, [cit. 2015-04-26], pp 35–55
- [13] Active Matrix Color-LCD on 75 μm Thick Flexible Glass Substrates [online]. IEEE, 2012 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6186843>
- [14] Substrates for Flexible Electronics: A Practical Investigation on the Electrical, Film Flexibility, Optical, Temperature, and Solvent Resistance Properties [online]. Universito of Rome, 2011 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/polb.22227/pdf>
- [15] CAIRNS, D.R. a G.P. CRAWFORD. Electromechanical Properties of Transparent Conducting Substrates for Flexible Electronic Displays. [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1109/jproc.2005.851515.
- [16] ALZOUBI, Khalid, Susan LU, Bahgat SAMMAKIA, Mark POLIKS a R. COPPARD. Experimental and Analytical Studies on the High Cycle Fatigue of Thin Film Metal on PET Substrate for Flexible Electronics Applications: mechanical stress effect. [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1109/tcpmt.2010.2100911.
- [17] IPC-6013 Qualification and Performance Specification for Flexible Printed Boards [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: [http://listserv.ipc.org/scripts/wa.exe?A3=ind0704&L=TGASIA&E=base64&P=29400971&B=-----_%3D_NextPart_001_01C7870C.50D63720&T=application%2Foctet-stream;%20name=%22IPC-6013\(L\).pdf%22&N=IPC-6013\(L\).pdf&attachment=q](http://listserv.ipc.org/scripts/wa.exe?A3=ind0704&L=TGASIA&E=base64&P=29400971&B=-----_%3D_NextPart_001_01C7870C.50D63720&T=application%2Foctet-stream;%20name=%22IPC-6013(L).pdf%22&N=IPC-6013(L).pdf&attachment=q)
- [18] ASTM D 790 – 03 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Dostupné z: <http://www.nuflowbc.com/wp-content/uploads/2014/06/ASTM-D790-03.pdf>
- [19] ASTM D 6272 – 02 Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending. Dostupné z: <http://library.sut.ac.th:8080/astm/cd08032005/PDF/D6272.pdf>
- [20] IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL č. 2.4.4: Flexural Strength of Laminates (at Ambient Temperature). Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2.4.4b.pdf>
- [21] European Standard EN ISO 178: Plastics Determination of flexural properties. Dostupné z: <http://211.67.52.20:8088/xitong/BZ\9516771.pdf>
- [22] Flexural Properties Testing: Testing the flexural properties of Plastics and Polymers by using ASTM D790 and ISO 178. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.intertek.com/polymers/testing/flexural-properties/>
- [23] IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL č. 2.4.19: Tensile Strength and Elongation, Flexible Printed Wiring Materials [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://www.ipc.org/4.0_Knowledge/4.1_Standards/test/2.4.19c.pdf

- [24] ASTM D 882 – 02 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://tankpaint.com/wpcontent/uploads/D882-02-Thin-Plastic-Sheeting.pdf>
- [25] IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL 2.4.18: Tensile Strength and Elongation, Copper Foil [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2.4.18b.pdf>
- [26] ASTM E252 - 06: Standard Test Method for Thickness of Foil, Thin Sheet, and Film by Mass Measurement. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.astm.org/Standards/E252.htm>
- [27] ASTM E345 - 93: Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Foil. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.astm.org/Standards/E345.htm>
- [28] Measuring electro-mechanical properties of thin films on polymer substrates [online]. Austrian Academy of Sciences, 2015 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167931714003347>
- [29] Mixed Mode Cracking in Layered Materials [online]. Harvard University [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.seas.harvard.edu/suo/papers/017.pdf>
- [30] Fracture in Thin Films [online]. Princeton University, 2001 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.seas.harvard.edu/suo/papers/098.pdf>
- [31] Testing flexible electronics. [online]. [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://dashdotrobot.com/2012/05/16/testing-flexible-electronics/>.
- [32] CAIRNS, D.R. a G.P. CRAWFORD. Electromechanical Properties of Transparent Conducting Substrates for Flexible Electronic Displays. [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1109/jproc.2005.851515.
- [33] Electromechanical properties of printed copper ink film using a white flash light annealing process for flexible electronics [online]. Republic of Korea, 2015 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002627141400537X>
- [34] ALZOUBI, Khalid, Susan LU, Bahgat SAMMAKIA, Mark POLIKS a R. COPPARD. Experimental and Analytical Studies on the High Cycle Fatigue of Thin Film Metal on PET Substrate for Flexible Electronics Applications: mechanical stress effect. [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1109/tcpmt.2010.2100911.