

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Testování mechanických vlastností flexibilních
elektronických komponent**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Robin WOHLRAB**
Osobní číslo: **E13N0038P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Testování mechanických vlastností flexibilních elektronických komponent**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Zpracujte rešerši dostupných standardů a běžně prakticky využívaných metod pro testování mechanických vlastností flexibilních elektronických komponent.
2. Navrhněte vhodné postupy pro realizaci mechanických zkoušek s využitím laboratorního vybavení KET.
3. Na vybraných vzorcích flexibilních elektronických komponent prakticky ověřte navržené postupy a zhodnoťte jejich aplikovatelnost.

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


1. **B. Bensaid: Reliability of OTFTs on flexible substrate: Mechanical stress effect, The European Physical Journal Applied Physics 55, 2, 2011**
2. **Alzoubi, Khalid: Experimental and analytical studies of the high cycle bending fatigue of thin films on flexible substrates for flexible electronics applications, Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2011**
3. **Elektronické informační zdroje, firemní literatura, normy**

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

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


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Diplomová práce se věnuje testování mechanických vlastností flexibilních elektronických komponent. V úvodu se práce zaměřuje na popis standardů a běžně prakticky využívaných metod pro testování mechanických vlastností flexibilních elektronických komponent. Další kapitoly pojednávají o návrhu postupů pro realizaci mechanických zkoušek s využitím laboratorního vybavení katedry technologií a měření. V závěru práce jsou uvedeny aplikované postupy na vybraných vzorcích flexibilních elektronických komponent a jejich zhodnocení.

Klíčová slova

flexibilní elektronika, elektronické komponenty, mechanické namáhání, pevnost v ohybu, pevnost v tahu

Abstract

This diploma thesis is concerned with testing of mechanical properties of flexible electronic components. The first part of the thesis describes the standards and commonly used methods for practical testing of mechanical properties of flexible electronic components. Following chapter discuss the proposal for realization of mechanical tests examinations using the laboratory equipment of the department of technologies and measurement. In the very last part of the thesis, applied procedures on selected samples of flexible electronic components are depicted, including their evaluation.

Key words

flexible electronics, electronic components, mechanical strain, flexural strength, tensile strength

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 5.5.2015

Robin Wohrab

Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Řebounovi Ph.D za poskytnutí profesionálních znalostí, odborných konzultací a za jeho vstřícné jednání.

OBSAH

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKA	11
1.1 POŽADAVKY KLADE NÉ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI FLEXIBILNÍ ELEKTRONICKÝCH KOMPONENTŮ.....	12
1.1.1 <i>Stupeň flexibility</i>	12
1.1.2 <i>Substráty</i>	13
1.1.2.1 <i>Tenká skla</i>	14
1.1.2.2 <i>Plastové fólie</i>	14
1.1.2.3 <i>Kovové fólie</i>	15
1.1.3 <i>Zapouzdření</i>	15
1.2 TIŠTĚNÁ ELEKTRONIKA	16
1.2.1 <i>Výhody tištěné elektroniky</i>	17
1.2.2 <i>Nevýhody tištěné elektroniky</i>	17
1.3 HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE	18
2 NORMY A POSTUPY PRO TESTOVÁNÍ FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKY	19
2.1 SPECIFIKACE TESTOVÁNÍ FLEXIBILNÍCH KOMPONENT DLE STANDARDU IPC	19
2.1.1 <i>IPC-6011 Obecné specifikace pro provozování desek plošných spojů</i>	20
2.1.2 <i>IPC-6013 Specifikace způsobilosti a provozování flexibilních desek plošných spojů</i>	20
2.1.3 <i>IPC/JPCA-6202 Provozní manuál pro jednostranné a dvoustranné flexibilní desky plošných spojů</i> 20	
2.1.4 <i>IPC-TF-870 – Způsobilost a použitelnost polymerních desek plošných spojů se silnou fólií</i>	21
2.1.5 <i>IPC-A-600 Dokumenty kontroly a přijatelnosti</i>	21
2.2 VIZUÁLNÍ KONTROLA	21
2.2.1 <i>Profil</i>	21
2.2.2 <i>Konstrukční nedokonalosti</i>	21
2.2.3 <i>Značení</i>	24
2.2.4 <i>Pájitelnost</i>	24
2.2.5 <i>Přilnavost pokovení</i>	24
2.2.6 <i>Obecné požadavky</i>	25
2.3 NORMALIZOVANÉ POSTUPY TESTOVÁNÍ FLEXIBILNÍCH KOMPONENT	25
2.3.1 <i>Testování ohybem</i>	26
2.3.1.1 <i>Výdrž v ohybu</i>	27
2.3.1.2 <i>Standardní metody testování tažnosti a ohebnosti</i>	28
2.3.1.3 <i>Standardní metody testování ohybových vlastností plastů a elektroizolačních materiálů</i>	29
2.3.2 <i>Testování prodloužením</i>	30
2.3.2.1 <i>Pevnost v tahu a prodloužení flexibilních DPS</i>	31
2.3.2.2 <i>Standardní testovací metoda pro zjištění flexibilních vlastností tenkých plastů a fólií</i>	32
2.3.2.3 <i>Standardní testovací metoda pro zjištění flexibilních vlastností kovových fólií</i>	32
2.4 PRAKTICKY POUŽÍVANÉ ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	34
2.4.1 <i>Testování ohybem</i>	34
2.4.1.1 <i>Ohyb vzorku pomocí navijení na vřetenno</i>	34
2.4.1.2 <i>Ohyb vzorku pomocí vychylování trnů</i>	36
2.4.1.3 <i>Ostatní způsoby ohýbání flexibilních materiálů pro elektroniku</i>	39
2.4.2 <i>Testování natažením</i>	40

3	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ FLEXIBILNÍCH KOMPONENTŮ	44
3.1	KONSTRUKCE TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ	44
3.2	NASTAVENÍ KROKOVÉHO MOTORU	45
3.3	POPIS TESTOVACÍCH VZORKŮ	48
3.4	PROVEDENÍ EXPERIMENTU	51
3.4.1	<i>Měření elektrického odporu čtyřvrstvého AJP vzorku</i>	52
3.4.2	<i>Měření elektrického odporu jednovrstvého AJP vzorku</i>	55
3.4.3	<i>Měření elektrického odporu vzorku na polyimidové fólii</i>	57
3.4.4	<i>Měření elektrického odporu vzorku připraveného na sklolaminátu</i>	59
3.4.5	<i>Měření elektrického odporu vzorku připraveného sítotiskem</i>	61
4	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU A DOPORUČENÍ	63
4.1	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU ČTYŘVRSTVÉHO AJP VZORKU	64
4.2	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU JEDNOVRSTVÉHO AJP VZORKU	65
4.3	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU VZORKU NA KAPTONOVÉ FÓLII	66
4.4	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU VZORKU NA SKLOLAMINÁTOVÉM SUBSTRÁTU	67
4.5	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU VZORKU PŘIPRAVENÉHO SÍTOTISKEM	68
	ZÁVĚR	69
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	70
	PŘÍLOHY	75

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Seznam symbolů:

CTE	koeficient teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]
C	kapacita	[F]
E	modul pružnosti	[Pa]
F	síla	[N]
h	tloušťka	[m]
l	délka	[m]
L	indukčnost	[H]
N	počet cyklů	[-]
n	číslo vzorku	[-]
Q	činitel jakosti	[-]
r	poloměr	[m]
R	elektrický odpor	[Ω]
Ra	střední aritmetická drsnost	[μm]
RMS	střední kvadratická hodnota drsnosti	[μm]
S	plocha	[m ²]
T	teplota	[°C]
t	čas	[s]
v	rychlost	[m·s ⁻¹]
Z	impedance	[Ω]
ε	deformace (prodloužení)	[-, %]
ρ	rezistivita	[Ω.m]
σ	pevnost v tahu	[Pa]

Seznam zkratk:

AJP	aerosol jet printing
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	computer aided design
ČSN	Česká technická norma
DPS	deska plošných spojů
FEL	Fakulta elektrotechnická
FPC	ohybný tištěný obvod
IEC	International Electrotechnical Commission
IPC	Association Connecting Electronics Industries
ISO	International Organization for Standardization
ITO	oxid cínu a india
JEDEC	Joint Electron Devices Engineering Council
JPCA	japan printed circuit association
KET	Katedra technologií a měření
OFET	organický polem řízený tranzistor
OLED	organické světlo emitující diody
OPV	organický fotovoltaický článok
PEDOT:PSS	poly(3,4-ethylene dioxythiophene):poly(styrene sulfonate)
PET	polyethylentereftalát
R2R	Roll 2 Roll
RFID	identifikace na rádiové frekvenci
ZČU	Západočeská univerzita

ÚVOD

Testy a kontroly patří ve výrobním procesu k nejdůležitějším operacím, ač na první pohled nepřidávají výslednému produktu hodnotu. Jejich důležitost tkví ve zpětné vazbě, kterou nám poskytují a kterou zjišťujeme technický stav testovaného prvku, jeho aplikovatelnost a jeho očekávané chování v různých podmínkách. Z ekonomického hlediska je testování důležité kvůli odhalování defektů v co nejranější fázi výrobního procesu, což má za následek minimalizaci výdajů na opravu při velkovýrobě a snižuje se pravděpodobnost zaslání vadného produktu zákazníkovi. Standardizované postupy a normy zajišťují reprodukovatelnost provedených testů a zároveň umožňují porovnávat naměřené hodnoty získané stejnými technologickými postupy.

Obsah dokumentu je zaměřen na způsoby mechanického testování flexibilní elektroniky. Práce se zvláště zaměřuje na namáhání v tahu a ohybu. Právě odolnost v ohybu je pro flexibilní elektroniku klíčovou vlastností, neboť právě tomuto druhu zátěže jsou ohebná elektronická zařízení v praxi vystavována.

Účel předkládané práce je předat čtenáři základní znalosti o flexibilní elektronice, především pak informace o standardizovaných i běžně prakticky využívaných metodách pro testování mechanických vlastností flexibilních elektronických komponent. Na základě zjištěných postupů mechanického namáhání bylo v rámci práce testováno pět druhů vzorků flexibilní elektroniky. Díky více než třem milionům naměřených hodnot bylo možné popsat chování jednotlivých vzorků a zhodnotit jejich aplikovatelnost pro reálné použití.

1 FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKA

Flexibilní elektronika pokrývá široké spektrum aplikací, jako jsou flexibilní displeje, ohebné solární články, tištěné obvody pro identifikaci rádiovou frekvencí (RFID), pružné osvětlení, tlakové a dotykové senzory, elektronické součástky a další možnosti použití. V současné době se odhaduje, že se asi 1500 celosvětových výzkumných center věnuje různým aspektům flexibilní elektroniky. Analýza trhu odhaduje příjmy z flexibilní elektroniky 30 miliard USD v roce 2017 a více než 300 miliard USD v roce 2028. Ve spojených státech se výzkum primárně zaměřuje na vojenské aplikace, zatímco vývoj v asijských společnostech se nejvíce soustřeďuje na ohebné displeje [1, 2].

Flexibilní komponenty mohou být chápány jako součástky vyznačující se následujícími společnými vlastnostmi: ohebnost, elasticita, nerozbitnost či tisknutelnost. Důvodem pro rozvoj flexibilní elektroniky je snižování výrobních nákladů elektrotechniky díky jednodušší výrobě a její nasazení v aplikacích, kde by dnešní konvenční (rigidní) elektronika nemohla být použita. Její další charakteristické rysy jsou nízká váha, tloušťka, nezlomitelnost a možnost použití v nových aplikacích [3].

Jakkoliv atraktivně můžou tyto vlastnosti znít, je nerozumné očekávat, že flexibilní polovodičové součástky budou brzy schopné soutěžit s tradičními integrovanými obvody na poli nízkonákladových a vysoce funkčních produktů [4].

1.1 Požadavky kladené na mechanické vlastnosti flexibilní elektronických komponentů

1.1.1 Stupeň flexibility

Flexibilita může znamenat mnoho rozdílných vlastností pro výrobce i uživatele. Mechanické charakteristiky lze vhodně rozdělit do tří kategorií:

1. ohebné a rolovatelné,
2. permanentně tvarované,
3. elasticky roztažitelné [3].

1. Pro dosažení mechanických vlastností, které by umožnily ohyb a srolování, je nezbytné použít velmi tenké materiály. Pro tyto účely se používá elektronických papírů, polymerních a kovových fólií a ultra tenkých skel o tloušťce 100 μm a nižší. Rolovatelné materiály nejvíce nacházejí uplatnění v zobrazovací technice. Dnešní rolovatelné displeje lze ohnout podél poloměru 7,5 mm a jejich největší výhodou je skladnost [4, 5].

2. Permanentně tvarované substráty jsou tvarovány plastickou deformací. Rozsah deformace může lehce přesáhnout kritické namáhání v tahu, a tedy způsobit zlomeninu nebo zúžení substrátu. Z tohoto důvodu se používají materiály, které vydrží plastickou deformaci, případně jsou méně tvárná zařízení umístována na pevné ostrůvky, které zabezpečí jejich ochranu [6, 7, 8].

3. Roztažitelná elektronika může podstoupit početné vratné deformace. Pokud je substrát elastomer, zařízení jsou umístěna na pevné ostrůvky a ty jsou propojovány roztažitelnými vodiči [9, 10].

Výroba flexibilních substrátů využívá nástrojů běžně používaných pro výrobu pevných podkladů. Modifikace těchto nástrojů pro účely flexibilní elektroniky je zařazena až na konec produkčního procesu. Tím je dosaženo ekonomické efektivity, neboť výrobní proces flexibilní elektroniky těží z obrovské technologické základny, která byla vybudována pro průmyslovou výrobu integrovaných obvodů a displejů [3].

Když je mechanicky homogenní list o tloušťce h [m] ohnut na cylindrický poloměr r [m] kolmo k ose ohybu, je jeho vnější povrch roztáhnut a jeho vnitřní povrch je stlačen deformací v ohybu [-]:

$$\varepsilon = \frac{h}{2r} \quad (1.1)$$

Pokud však list není homogenní (např. pokud je na substrátu nanесena vodivá vrstva jiného materiálu), je namáhání odlišné kvůli této nehomogenitě. Namáhání v ohybu musí být vždy pod kritickou hodnotou. Toho lze docílit při použití co nejtenčích materiálů [3].

1.1.2 Substráty

Flexibilní substráty pro elektroniku musí splňovat mnoho požadavků:

- Optické vlastnosti – Substráty pro displeje potřebují transparentní substráty.
- Povrchová drsnost – Čím je tenčí funkční vrstva, tím jsou citlivější jeho elektrické vlastnosti na povrchovou drsnost. Funkční vrstvou se zde rozumí vrstva s vodivým motivem.
- Tepelné a termomechanické vlastnosti – Pracovní teplota substrátu musí být kompatibilní s maximální výrobní teplotou. Teplotní rozdíl mezi vrstvou zařízení a substrátem může způsobit porušení vrstvy zařízení během tepelného cyklování spojeného s výrobou. Pravidlo pro snesitelný rozdíl je:

$$|\Delta\text{CTE} \cdot \Delta T| \leq 0,1-0,3\% \quad (1.2)$$

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 neměl uvolňovat nečistoty a měl by být inertní vůči průmyslovým chemikáliím.
- Mechanické vlastnosti – Vysoký modul pružnosti činí substrát tuhý. Tvrdý povrch chrání vrstvy zařízení proti nárazům.
- Elektrické a magnetické vlastnosti - Vodivé substráty mohou sloužit jako elektromagnetické stínění. Elektricky izolované substráty zamezují vzniku vířivých proudů.

Používají se tři základní typy substrátů pro flexibilní aplikace: flexibilní skla, polymery a kovy [3].

1.1.2.1 Tenká skla

Skleněné desky jsou vhodný substrát pro nasazení ve flexibilní elektronice, protože při výrobě o tloušťce menší než 200 μm je skleněná vrstva relativně ohebná. V současné době je možné vyrobít plátek o tloušťce 30 mikrometrů. Skleněná fólie si zachovává všechny výhody skleněné desky – optická propustnost $> 90 \%$, hladký povrch s drsností Ra 1 nm nebo méně (ve starší literatuře měřeno také v RMS – tedy efektivní hodnota), teplotní tolerance až 600 $^{\circ}\text{C}$, vysoká rozměrová stabilita, nízký koeficient tepelné roztažnosti (CTE), odolnost vůči většině průmyslových chemických látek, nepropustnost kyslíku a vody, odolnost proti poškrábání a dobré elektroizolační vlastnosti. Bohužel aplikační oblast skelných fólií je malá, neboť je materiál stále křehký, složitý na výrobu velkých ploch a nevhodný pro zpracování technologií „Roll-to-Roll“ (dále jen R2R) [11, 12].

1.1.2.2 Plastové fólie

Polymerní substráty jsou vysoce ohebné, levné a vhodné k R2R procesu. Jejich nevýhodou je nižší teplotní a rozměrová stabilita než u skelných substrátů a snadněji jimi prostupuje voda a kyslík. Typický polymerní film se zmenšuje zahřívacími a ochlazujícími cykly. Tato vlastnost lze minimalizovat procesem žíhání. Je nezbytné, aby při jednotlivých technologických operacích přípravy funkčních vrstev nedošlo k překročení teploty skelného přechodu substrátu [13].

1.1.2.3 Kovové fólie

Kovové fólie o tloušťce menší než 125 μm jsou flexibilní, mají vynikající tepelné vlastnosti a jsou kompatibilní s R2R procesem. Nerezové fólie již byly úspěšně integrovány do flexibilních matic elektroforetických a OLED displejů. Nerezové substráty mají teplotní toleranci až 1000 $^{\circ}\text{C}$, jsou rozměrově a teplotně stabilní, odolné proti pronikání vlhkosti a kyslíku a mohou sloužit jako elektromagnetické stínění. Obecně platí, že nerezové materiály jsou odolnější než polymerní a skelné fólie. Z tohoto důvodu budou hrát kovové fólie prominentní roli ve flexibilní elektronice. Nejpečlivěji válcovaná nerezová ocel má drsnost povrchu cca 100 nm. K zajištění elektrické integrity tenkovrstvého zařízení na kovové fólii musí být kovový substrát dobře vyleštěn. Typicky se však aplikuje na všechny kovové fólie tenkovrstvý povlak, který poskytuje odpovídající kombinaci povrchové drsnosti, elektrické izolace a chemické odolnosti potřebné pro běžné užití [14, 15].

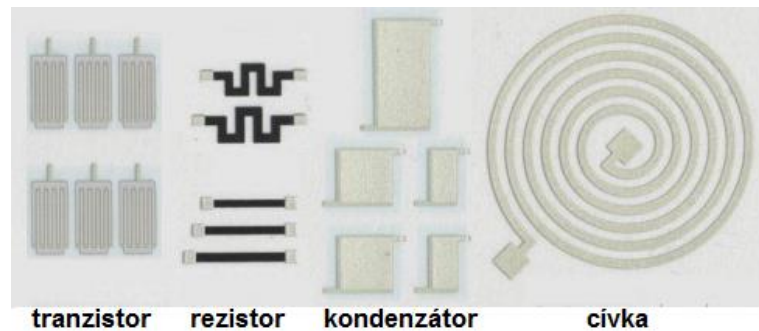
1.1.3 Zapouzdření

Tenkovrstvé bariérové filmy se používají již po desetiletí. Jednovrstvé kovové povlaky byly později nahrazeny jednovrstvými transparentními a nyní vícevrstevnými kompozitními povlaky. Od roku 1970 se komerčně využívaly tenké hliníkové fólie napařené na polymerních substrátech jako obalový materiál zabraňující pronikání plynu do potravin. V současné době se metalizované fólie široce používají pro balení citlivých elektronických součástek. Hliníková fólie o tloušťce 10 až 100 nm snižuje propustnost atmosférických plynů až na jednu tisícinu obyčejné polymerní fólie. K potažení polymerních substrátů jsou běžně použity tenké vrstvy oxidů, které jsou flexibilní při tenkovrstvé výrobě [3].

Typicky se pro tyto účely používají materiály jako je SiO_2 , SiN_x , a Al_2O_3 , které jsou vysoce nepropustné pro atmosférické plyny. Teoreticky může jedna tenká vrstva redukovat proniknutí plynu do substrátu na neměřitelnou hodnotu. Prakticky se však setkáváme s mikroskopickými defekty, které poskytují difúzní cesty pro plyny a páry [3].

1.2 Tištěná elektronika

Tištěnou elektroniku lze definovat jako podmnožinu flexibilní elektroniky, která může být nanášena na povrch použitím standardních tiskařských technik, běžně známých z grafického průmyslu (sítotisk, flexotisk, hlubotisk, ofsetový tisk a jiné metody) případně za použití nekontaktních „ink-jet“ technologií. Předpokladem je, že celé elektronické zařízení včetně elektronických komponent (rezistor, induktor, kondenzátor) a zdrojů energie budou tisknuty na ohebná média technologií R2R. Způsoby nanášení vodivých vzorů na podklad se blíže zabývají publikace [16, 17]. Technologie tištěné elektroniky představuje velký posun od běžných metod používaných pro výrobu konvenčních součástek a to díky možnosti výroby lehkých, flexibilních a tenkých zařízení na materiálech jako je papír, plast, textilie či jiné flexibilní substráty [4, 18].



Obr. 1 Tištěné součástky pro elektrotechniku [19].

1.2.1 Výhody tištěné elektroniky

Konvenční křemíková výroba elektronických komponent zahrnuje mnoho kroků, které požadují vysoké teploty a kontrolované prostředí. Při mikro výrobě (optické litografii) jsou zapotřebí masky, které umožní výrobu požadovaných vzorů na substrátu. Během komplikované fotolitografie dochází k leptání či k odstraňování materiálu – tedy k plýtvání. Naproti tomu zahrnuje výroba tištěné elektroniky méně dílčích kroků a je finančně efektivnější, neboť k nanášení materiálu dochází pouze v požadovaných oblastech a pro výrobu není třeba dosahovat tak vysokých teplot jako u konvenční výroby. Zařízení vyrobené tištěnou technologií lze vyprodukovat za jednotky minut oproti týdnům u konvenční výroby. Další nespornou výhodou je fakt, že pro výrobu flexibilní elektroniky není vždy nutné zajistit vakuové prostředí (výjimku tvoří např. organické polemy řízené tranzistory OFET, organické fotovoltaické články OPV a organické světlo emitující diody OLED) [18, 20].

1.2.2 Nevýhody tištěné elektroniky

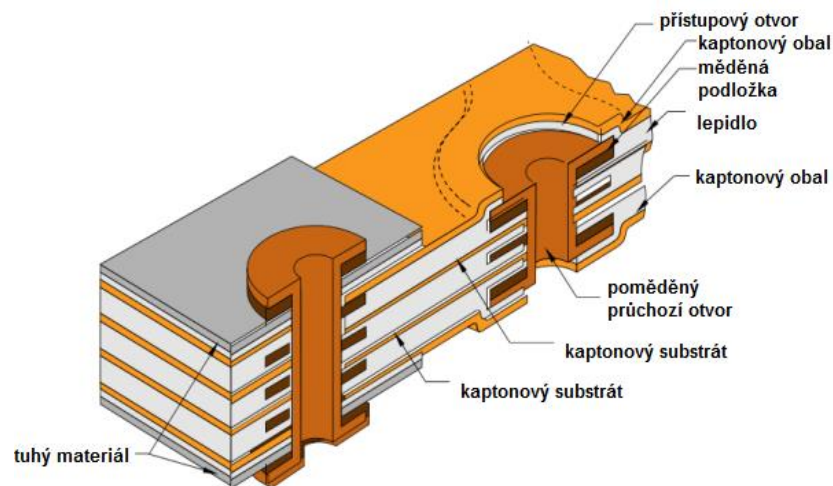
Vlivem teploty, vlhkosti a různého napínání dochází k obtížím s manipulací a vyrovnáním plastického substrátu. Není jednoduché kontrolovat morfologii fólie kvůli molekulárním konfiguracím s dlouhým řetězcem a výrobním podmínkám. Vodivost vodivých cest je nepřímo úměrná flexibilitě zařízení. Kvalita motivu je méně přesná než u běžné výroby, kvůli použitým nanášecím technologiím. Nelze odhadnout, jakým způsobem bude koncový uživatel namáhat flexibilní zařízení [1].

1.3 HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE

Přechodný krok na cestě k budoucí vysoce výkonné tištěné elektronice je tzv. hybridní technologie. Hybridní technologie je technologie výroby flexibilní elektrotechniky za použití diskretních elektronických součástek nebo za použití flexibilních spojů mezi rigidními částmi substrátů [4].

Montáž diskretních součástek na flexibilní substrát se skládá z dvou hlavních kroků. Aplikace vodivého lepidla na podklad a následné osazování diskretních součástek. Tento postup je typický pro sériovou montáž, ve které jsou součástky umísťovány na požadované místo jedna po druhé. Samotné umísťování komponentů může zahrnovat stochastický nebo deterministický postup osazování [4].

Propojení pevných částí substrátu ohebnými spoji se běžně říká tzv. „Rigid-flex“ obvod. Jedná se o hybridní konstrukci, kde jsou ohebné i pevné části laminovány do jedné struktury a následně sekvenčně elektricky propojeny průchozími otvory [21].



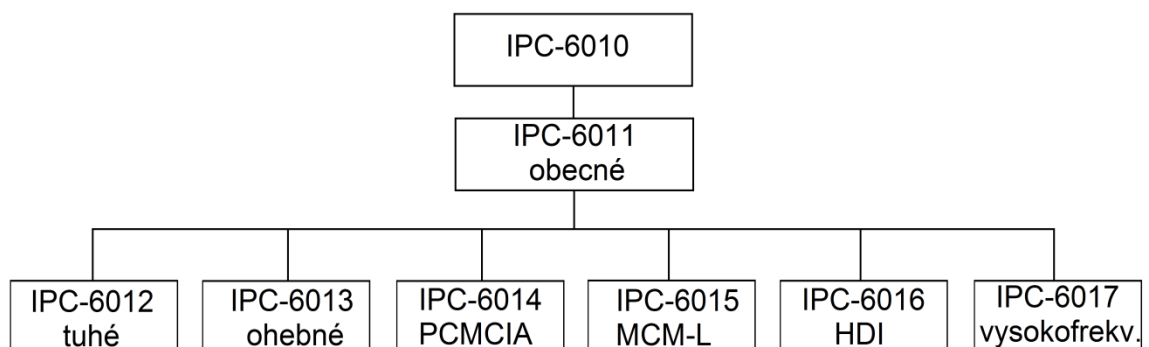
Obr. 2 Hybridní technologie – „Rigid-flex“ [20].

2 Normy a postupy pro testování flexibilní elektroniky

Ve flexibilní elektronice neexistují žádné standardy pro sestavy materiálů, modely zařízení a postupy výroby. Tento nedostatek standardů má za následek zpomalení návrhu nových systémů a úspěch flexibilní elektroniky jako celku. Pro testování mechanických vlastností flexibilních komponent se používají postupy vyvíjené asociací výrobců jako je IEC, IPC, JEDEC, ASTM či se používají nenormalizované postupy, které si stanovují uživatelé flexibilní elektroniky. Standardy a specifikace sice poskytují referenční bod pro vykonání testů, avšak je nutné mít na paměti, že reálné specifikace každého produktu jsou vždy smluvně dohodnuty zákazníkem a výrobcem. Specifikace, na kterých se domluví zákazník i výrobce se však nestávají nadnárodním standardem. Vývoj těchto standardů je velmi pomalý proces a implementace podnikových standardů do nadnárodních by narušila vývoj nových materiálů, zařízení a postupů [22, 23, 24].

2.1 Specifikace testování flexibilních komponent dle standardu IPC

Pro provedení jakýchkoliv testů a kontrol je nutné dodržovat hierarchickou strukturu standardů společnosti IPC. Dílčí testy mechanické odolnosti (např. test ohybu) se tedy musí vykonávat dle přístupné specifikace a zároveň musí splňovat požadavky, které jsou kladeny v nadřazeném standardu. Pro získání oprávnění k deklarování splnění příslušné normy je bezpodmínečně nutné dodržovat hierarchickou strukturu těchto norem, která je znázorněna na níže uvedeném schématu [25].



Obr. 3 Hierarchie standardů odvozených od IPC-6010 [25].

2.1.1 IPC-6011 Obecné specifikace pro provozování desek plošných spojů

Tento dokument obsahuje obecné požadavky na desky plošných spojů, jejich kvalitu a spolehlivost. Záměrem této specifikace je umožnění rozvíjet optimální postupy pro výrobu desek plošných spojů. Skládá se z běžných požadavků na DPS a odkazuje se na specifitější dílčí standardy. Tato norma definuje tzv. „třidu přijatelnosti“, která rozděluje desky plošných spojů do třech kategorií podle požadavků kladených koncovým spotřebitelem.

1. třída je určena primárně pro obecné elektronické výrobky (spotřební zboží).
2. třída je určena primárně pro specializované produkty s vyšší mírou používání.
3. třída je určena primárně pro vysoce spolehlivé výrobky, kde je požadován nepřetržitý provoz [24, 26].

2.1.2 IPC-6013 Specifikace způsobilosti a provozování flexibilních desek plošných spojů

Specifikace vychází ze standardu IPC-6011, ale je více zaměřena na problematiku flexibilních desek plošných spojů (neboli FPC). Dokument pokrývá kvalifikační a provozní požadavky na flexibilní desky plošných spojů. Tyto desky mohou být jednostranné, dvoustranné, vícevrstvé nebo se může jednat o „Rigid-flex“. Všechna výše uvedená provedení mohou zahrnovat výztuhy, průchozí otvory či skryté průchody. Tento standard vychází z původně vojenských norem MIL-P-50884 a MIL-PRF-31032 [25, 27, 28].

2.1.3 IPC/JPCA-6202 Provozní manuál pro jednostranné a dvoustranné flexibilní desky plošných spojů

Jedná se o první společný standard vyvinutý IPC spolu s japonskou asociací desek plošných spojů (JPCA), který se zabývá požadavky na jednostranné a dvoustranné flexibilní desky plošných spojů. Soubor zahrnuje přes 30 příkladů přijatelných a nepřijatelných kritérií pro FPC. Dále je zde zahrnuto všech sedm japonských výrobních standardů (známé pod zkratkou JIS). Později byl vydán i veřejný standard schválený společností IPC, který je určen pro veřejnost (tzv. Publicly Available Standard) [29].

2.1.4 IPC-TF-870 – Způsobilost a použitelnost polymerních desek plošných spojů se silnou fólií

Tato specifikace je zaměřena na materiály, způsobilost, certifikaci a požadavky kladené na vícevrstvé polymerní desky se silnou fólií. Tištěné či jinak realizované vodivé motivy musí splňovat všechny příslušné požadavky a nákresy, uvedené v tomto dokumentu [30].

2.1.5 IPC-A-600 Dokumenty kontroly a přijatelnosti

Jedná se o jeden z nejstarších IPC dokumentů, který se zabývá vizuální přijatelností desek plošných spojů. V této listině jsou obsaženy fotografie a ilustrace správně a nesprávně vypadajících desek plošných spojů. Jedná se tedy o pomocný dokument, který stanovuje, jaké desky plošných spojů jsou pro použití ještě přijatelné a jaké již trpí vážnějšími defekty [31].

2.2 Vizuální kontrola

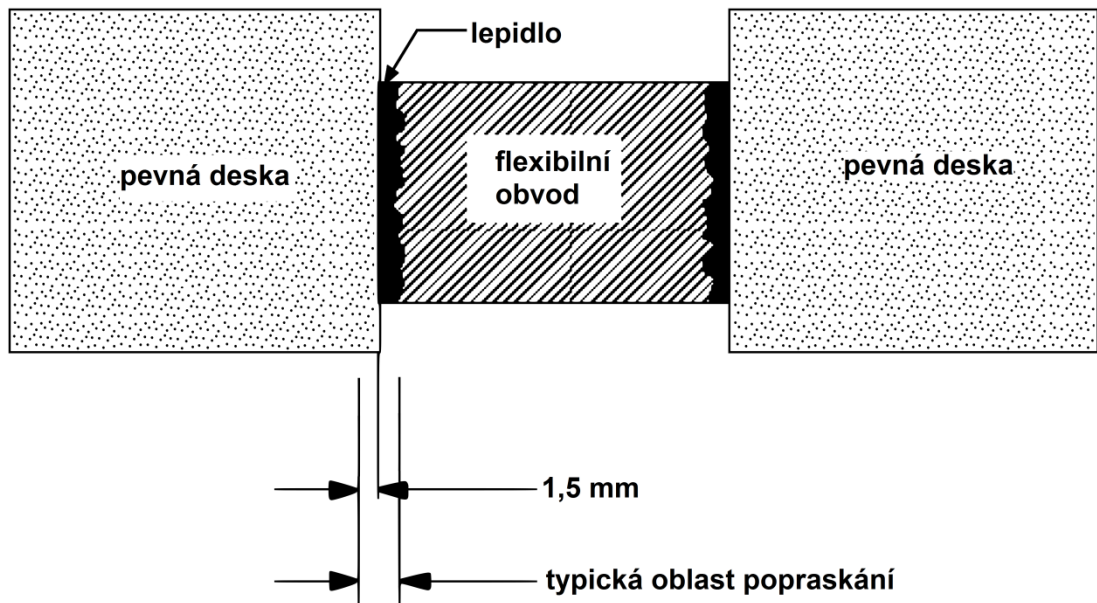
Vizuální kontrola musí být provedena při zvětšení alespoň 1,75x, ale pokud by určení stavu vzorku nebylo jednoznačné, lze použít postupně větší zvětšení až k čtyřicetinásobku původní velikosti [25].

2.2.1 Profil

Hrany pevné sekce – škrábanec podél hran flexibilních plošných spojů jsou přijatelné za předpokladu, že škrábanec nepřesáhne 50 % vzdálenosti mezi hranou a nejbližším vodičem nebo pokud má škrábanec 2,5 mm (podle toho, který požadavek je nižší). Hrany musí být čisté bez metalických otřepů. Nekovové otřepy jsou přijatelné, pokud nejsou volné a neovlivňují funkčnost. Nesmí docházet k odstávání vodivého motivu od substrátu [25].

2.2.2 Konstrukční nedokonalosti

Nedokonalosti DPS jako je např. skvrnitost, popraskání, delaminace, štěpení musí splňovat požadavky kladené dokumentem IPC-A-600. Popraskání kolem otvorů desky či jiných mechanicky namáhaných částí může být maximálně do 2,5 mm nebo do 50 % vzdálenosti k nejbližšímu vodiči podle toho, které z kritérií je nižší. Typické místo vzniku tohoto jevu je zobrazeno na ilustraci níže [25, 32].



Obr. 4 Typická oblast vzniku popraskání [25].

Oddělování vláken skelné tkaniny základního laminátu, které se projevuje pod povrchem materiálu bílými tečkami, je přijatelné, pokud se vyskytuje v mezích definovanými standardem IPC-A-600. Transparentní částice zachycené na desce jsou přijatelné. Ostatní částice, které jsou zachycené na desce, jsou přijatelné, pokud splňují následující požadavky:

- Částice musí ležet ve vzdálenosti 0,125 mm či dále od nejbližšího vodiče.
- Částice nesnižuje vzdálenost mezi sousedními vodiči pod minimální rozestupy uvedené na hlavním výkresu flexibilního DPS nebo musí být vzdálena alespoň 0,125 mm, pokud tento požadavek není specifikován.
- Maximální rozměr částice není definován [25, 32].

Narušená či odhalená skelná vlákna jsou přijatelná pro všechny třídy přijatelnosti, pokud tato nedokonalost nesnižuje vzdálenost mezi vodiči pod minimum. Škrábance, důlky a stopy po výrobních strojích jsou přijatelné, pokud nepřemostují vodiče. Povrchové mikrotrhliny jsou přijatelné, pokud jejich velikost nepřesáhne 0,8 mm, pokud nepřemostují vodiče nebo pokud nepřesáhnou 5 % z celkové oblasti DPS [25, 32].

Změna barvy či skvrnitost v místě lepení jsou přijatelné, pokud nejsou na více jak 10 % lepidlem ošetřené plochy DPS. Krycí film musí být jednotný a nesmí se oddělovat od substrátu (např. kvůli zvrásnění či pomačkání filmu). Oddělení krycího filmu je přijatelné pouze v případě, že neporušuje požadavky kladené na výskyt cizích částic v materiálu a splňuje následující body:

- Je menší než 2,5 mm x 2,5 mm a nevyskytuje se milimetr od kraje desky či od počátku krycí fólie.
- Celkový počet těchto defektů nesmí přesáhnout tři výskyty na každou plochu 25 mm x 25 mm.
- Celkové oddělení nesmí přesáhnout 25 % vzdálenosti mezi sousedními vodiči [25, 32].

Ochranný povlak musí splňovat požadavky na pokrytí v neohebných oblastech, na jeho opravitelnost a přilnavost a tloušťku, které jsou uvedeny v dokumentu IPC-6013. Prosakování pájky nesmí zasahovat do ohybu nebo do ohebné oblasti DPS a musí být v souladu s minimálními požadavky na vzdálenosti mezi vodiči. Prosakování pájky nesmí přesahovat limity dané třídami přijatelnosti, které jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Tab. 2.1 Limitní hodnoty prosakování pájky do substrátu [25]

Třída 1	Třída 2	Třída 3
dle dohody mezi uživatelem a dodavatelem	< 0,5 mm	< 0,3 mm

Výztuhy jsou brány pouze jako mechanická podpora. Na lepení výztuhy k flexibilnímu DPS nejsou kladeny zvláštní požadavky. Veškeré nároky na výztuhy jsou tedy pouze závislé na dohodě mezi dodavatelem a zákazníkem [25, 32].

2.2.3 Značení

Pokud je potřeba, musí se všechny flexibilní DPS i zkušební desky označovat. Značení je potřeba pro zajištění sledovatelnosti. Lze pak tedy dohledat dodavatele a výrobní dokumenty. Jako značení se může použít např. logo. Značení musí být zhotoveno stejnou výrobní metodou, jako je vyroben vodivý vzor, permanentním inkoustem či barvou, laserem nebo vibrační tužkou, s kterou se označí kovový štítek na DPS. Vodivé značení musí být považováno jako elektrický element obvodu a nesmí kolidovat s požadavky na rozložení elektricky vodivých cest. Všechny způsoby označení musí být kompatibilní s použitými materiály a v žádném případě nesmí ovlivnit flexibilní vlastnosti DPS. Označení nesmí překrývat oblasti ploch, které budou pájeny (touto problematikou se zabývá dokument IPC-A-600) [25].

2.2.4 Pájitelnost

Testy pájitelnosti se provádějí u flexibilních DPS, které budou v následném výrobním procesu pájeny. U flexibilních DPS, které budou použity jenom pro povrchovou montáž, se nepoužívá celá sada testů. Flexibilní desky plošných spojů, které se dále ve výrobním procesu nebudou pájet, nevyžadují toto testování. Zvláštní pozornost je třeba věnovat tloušťce desky a měděné cesty, neboť se díky tomuto faktoru prodlužuje čas nutný pro správné smáčení pájených povrchů. Informace o pájitelnosti musí být specifikovány na hlavním výkresu. Pro zjištění trvanlivosti pájeného spoje se využívají testy zrychleného stárnutí, které však nejsou vždy požadovány. Pro tyto účely se využívá standard J-STD-003 [25, 33].

2.2.5 Přílnavost pokovení

Přílnavost pokovení musí být testována v souladu se standardem IPC-TM-650, metodou 2.4.1 za použití proužku lepicí pásky, která se přilepí na pokovený povrch a následně se odstraní silou kolmou na kovový povrch. Po provedení testu nesmí být na pásce přilepen žádný kus ochranného pokovení nebo vodivého vzoru. Pokud na pásce zůstane přilepena část odloupaná z pokovení, které přesahovalo zamýšlenou pokovovanou plochu, nejedná se o selhání přílnavosti [25].

2.2.6 Obecné požadavky

Flexibilní DPS musí být vyrobeny tak, aby byly jednotné v kvalitě, nevykazovaly přítomnost prachových částic a jiných cizorodých látek, stop po oleji, otiscích prstů, nečistot po pájce na dielektrickém povrchu a jiné kontaminace, které by zkrátily životnost a provozuschopnost. Flexibilní DPS musí být bez defektů, mimo těch, které byly v této kapitole uvedeny. Na deskách nesmí být žádné náznaky vypouklých oblastí a nesmí docházet k překrývání mezi pozlacenými částmi a pájenými oblastmi mimo přípustné meze, které jsou závislé na třídě přijatelnosti [25].

2.3 Normalizované postupy testování flexibilních komponent

Používané standardy pro testování mechanických vlastností elektrických komponent byly častokrát původně vyvíjeny pro testování různých druhů substrátů a materiálů. Až postupem času si tyto normy našly uplatnění i ve sféře flexibilní elektroniky.

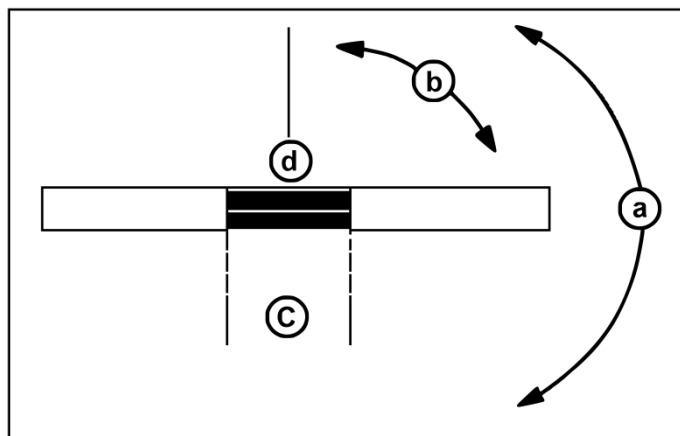
Testováním mechanických vlastností ohybem se zabývá na příklad standard IPC-6013, který stanovuje požadavky kladené pro správné a jednoznačné provedení zkoušek. Standard vychází a rozšiřuje obecné požadavky na kvalifikaci a provedení specifikací pro flexibilní desky plošných spojů IPC-6011 a zároveň nahrazuje starší standardy IPC RF 245 a IPC FC 250A [25].

2.3.1 Testování ohybem

Zatěžování flexibilních materiálů a komponent ohybem je nejpoužívanější způsob jejich testování, neboť finální ohebná zařízení jsou tomuto namáhání nejvíce vystavena. Pokud se pro testování ohybu flexibilních komponent nehodí žádný z metodických manuálů uvedených v normě IPC-TM-650, je nutné, aby zkouška splňovala obecné mechanické požadavky definované dokumentem IPC-6013, které jsou popsány dále [25].

Pro vykonání testu je nutné stanovit si parametry, které jsou znázorněny na obrázku.

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



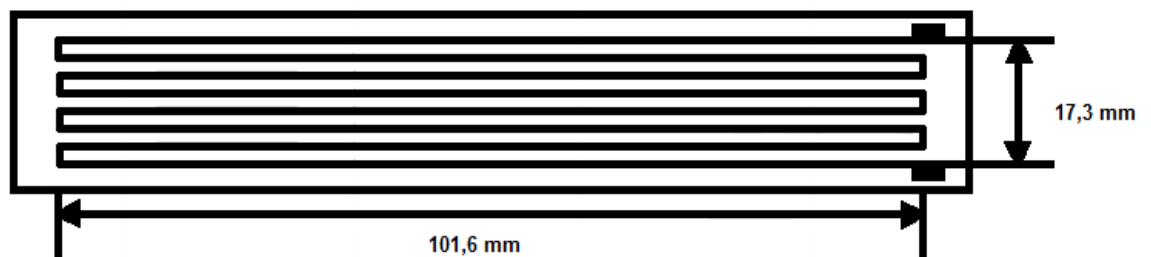
Obr. 5 Ilustrační obrázek testu ohybu dle normy IPC-6013 [25].

Ohýbací cyklus je definovaný jako otočení jednoho konce exempláře kolem válce a následné vrácení do původní polohy. Exemplář se tedy otočí kolem válce o 180° jedním směrem a o 180° druhým směrem. Ohýbací cyklus může být také definovaný jako otočení obou konců kolem válce směrem k sobě a následné vrácení do výchozí polohy. Každý konec exempláře se tedy otočí kolem válce o 90° [25].

Specifikovaný počet ohýbacích cyklů musí být vykonán z obou stran exempláře, respektive exemplář se otáčí kolem válce jednou stranou a následně stranou opačnou. Po skončení ohýbacích testů v obou směrech je nutné provést zkoušku zaměřenou na elektrické vady v souladu požadavky na prostředí a obstát ve vizuální kontrole [25].

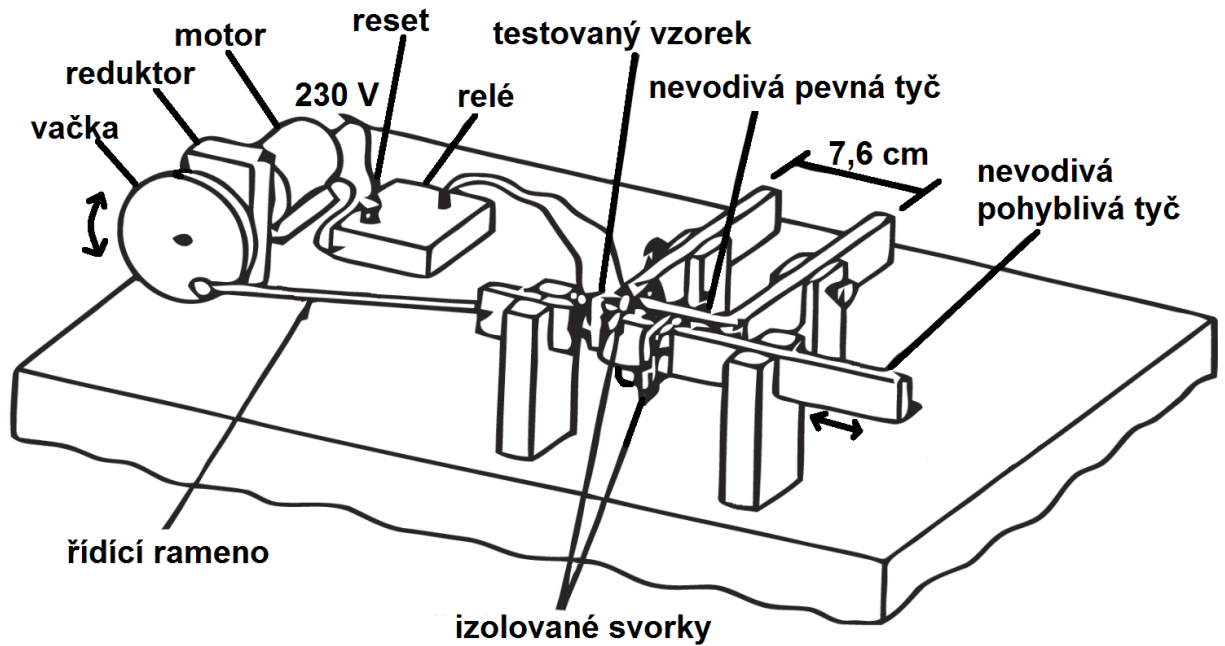
2.3.1.1 Výdrž v ohybu

Výdrž v ohybu se zabývá IPC-TM-650 č. 2.4.3. Metoda se využívá pro určení počtu ohybů substrátu, než dojde k selhání. Selháním se zde rozumí např. zvýšení elektrického odporu vodivé cesty nad přijatelnou úroveň. Pro testování dle této normy je zapotřebí minimálně šest vzorků s dlouhými příčnými vodiči. V případě, že je vodivý vzor nanesen na obou stranách, je nutné připravit šest vzorků pro testování každé z nich. Testovací vzorky by měly obsahovat vodivý vzor, který je v souladu s níže uvedeným obrázkem [25].



Obr. 6 Vzorek pro měření výdrže v ohybu [25].

Před samotným testováním flexibilních vlastností je nutné stanovit si tzv. „třídu přijatelnosti“, která je definována v standardu IPC-6011. Dále je zapotřebí zkontrolovat, jestli se na vzorku nevyskytují prasklinky nebo jiné anomálie (malé otvory, škrábance a jiné defekty), které by mohly zapříčinit předčasné poškození vzorku. V případě takového nálezu je nezbytné vzorek vyřadit. Ke koncům vzorku musí být připojen krátký izolovaný drát, který bude během měření připojen k měřicímu zařízení. Vlastní prvek se upevní k testovacímu zařízení tak jako je zobrazeno na obrázku č. 7. Vodivý vzor musí být na vnitřní straně smyčky. Počáteční poloha testovacího vzorku je taková, aby byl ohyb smyčky $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Jedná se tedy o mírné ohnutí vzorku, kde je střed vzorku vychýlen oproti pomyslné rovině vedené mezi místy úponu vzorku o $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Následná horizontální oscilace pohyblivé tyče způsobí, že se bude testovaný model ohýbat. Maximální ohybem se pro účely této normy rozumí pohyb smyčky o $25 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. Střed vzorku tedy bude od pomyslné základny vzdálen $31 \text{ mm} \pm 6 \text{ mm}$. Po maximálním ohnutí vzorku je třeba vrátit tento model do počáteční polohy. Nejvyšší přípustná rychlost ohybu nesmí přesáhnout 10 cyklů za minutu. Shora uvedené ohýbání je nutné provádět až do poruchy vodivých cest. Výsledkem této metody je průměrný počet cyklů, kterým byly vzorky vystaveny, než došlo k elektrickému přerušení [25].



Obr. 7 Příklad sestaveného testovacího zařízení [25].

2.3.1.2 Standardní metody testování tažnosti a ohebnosti

Testováním tažnosti a ohebnosti se zabývají normy ASTM E796-94 a IPC-TM-650 č. 2.4.2.1, které jsou v principu totožné. Tyto metody se zabývají určením tažnosti, tedy schopnosti podstoupit elastickou deformaci v tahu nebo v ohybu, kovových fólií do tloušťky 0,15 mm před jejich přetržením. Zkoumaný vzorek je podroben únavové zkoušce, která je přesně řízená, cyklická, symetrická, má konstantní amplitudu a která způsobí přetrhnutí při namáhání v ohybu. Tažnost se určí z rovnice, která je odvozená z univerzálních, empirických vztahů:

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

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],

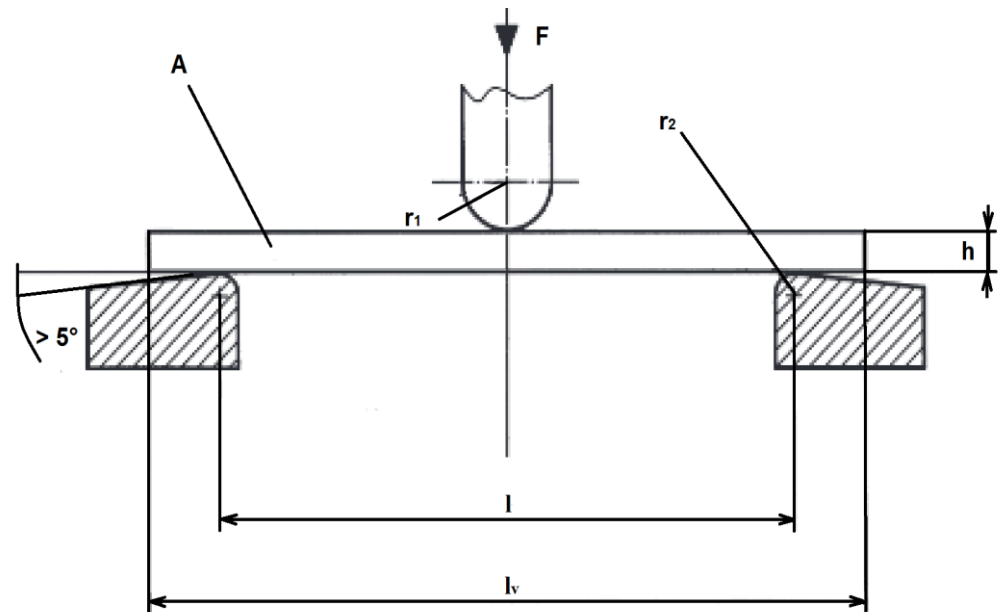
r je poloměr křivosti trnu [m].

Zmíněná metoda je vhodná pro testování objemných vzorků, kde poskytuje adekvátní hodnoty pro určení tažnosti materiálu. Pro stanovení tažnosti tenkých vzorků však není moc užitečná, neboť tato metoda využívá nízko cyklického namáhání [25, 34].

2.3.1.3 Standardní metody testování ohybových vlastností plastů a elektroizolačních materiálů

Metody uvedené ve standardu ASTM D790 se zaměřují na určení ohybových vlastností vyztužených i nevyztužených plastů včetně kompozitních elektroizolačních materiálů ve formě tyčí vytvarovaných do dlouhých kvádrů nebo uříznutých z plátů základního elektroizolačního materiálu. Uvedené metody jsou aplikovatelné na neohebné i ohebné materiály, avšak nemohou být použity pro testování materiálů, které se nezlomí ani po 5% deformaci. Pokud je očekáváno, že materiál je schopen obstát při větších deformacích, lze použít standard ISO 178, respektive ČSN EN ISO 178, kde je testování ukončeno porušením testovaného materiálu, případně při 3,5% deformaci pokud nedojde k poruše. Metody uvedené v těchto dokumentech vychází z tříbodového ohybu. Na základě standardu ASTM D790 byl odvozen standard IPC-TM-650 č. 2.4.4 pro testování pevnosti v ohybu laminátů. Standardu ASTM D790 je pak velmi blízký standard ASTM D6272, který se zabývá čtyřbodovým ohybem [35, 36, 37, 38, 39].

Normy definující provedení tříbodového ohybu udávají rozdílné rozměry zkušebních vzorků. Vzorky definované v dokumentu ASTM D790 mají rozměry 3,2 mm x 12,7 mm x 125 mm, zatímco vzorky stanovené standardem ISO 178 mají rozměry 10 mm x 4 mm x 80 mm. Směrnice ASTM D790 odlišuje metody testování dle předpokládané poruchy při deformaci. Metoda A je navržena pro materiály, které se poruší při poměrně malé deformaci a metoda B je vyvinuta pro materiály, které snesou zvláště vysokou deformaci. Rozdíl mezi těmito způsoby je v deformační rychlosti, tedy v rychlosti, kterou trn válcovitého tvaru tlačí na testovaný substrát, jenž je umístěn na dvou stejně velkých vzpěrách. Ilustrační obrázek tříbodového ohybu a typické závislosti pevnosti na namáhání v ohybu je uveden níže [35, 36, 37, 38, 39].



Obr. 8 Model tříbodového ohybu dle ČSN EN ISO 178 [38].

- Kde
- A je testovaný vzorek,
 - F je aplikovaná síla [N],
 - r_1 je poloměr trnu [m],
 - r_2 je poloměr podpěr [m],
 - h je tloušťka vzorku [m],
 - l je délka mezi podpěrami [m],
 - l_v je délka vzorku [m].

2.3.2 Testování prodloužením

Zatěžování flexibilních materiálů a komponent prodloužením není tak časté jako testování ohybem, ale má své opodstatnění u testování tenkých fólií, kaptonových substrátů či polymerních desek.

2.3.2.1 Pevnost v tahu a prodloužení flexibilních DPS

Stanovením pevnosti v tahu a prodloužením flexibilních DPS se zabývá standard IPC-TM-650 č. 2.4.19. Pro zjištění těchto vlastností je zapotřebí dostatečně výkonného kalibrovaného trhacího přístroje a alespoň deseti vzorků o délce 152,4 mm a šířce 12,7 mm. Vzorky musí být vystaveny po dobu 24 hodin před testováním teplotě $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a 50% relativní vlhkosti $\pm 5\%$. Podmínky stabilizace mohou být zkráceny pouze v případě poskytnutí důkazů, které statisticky dokládají, že testovaný vzorek disponuje stabilními vlastnostmi již při kratší stabilizační době. Před samotným testováním je nutné změřit a zaznamenat šířku a tloušťku vzorku na několika místech podél jeho délky a na základě těchto hodnot spočítat minimální plochu průřezu. Pro vzorky, které jsou opatřeny jakýmkoliv nátěrem, se tloušťka tohoto nátěru neuvažuje, neboť se nepředpokládá, že by měl vliv na zjišťované vlastnosti. Dalším krokem je upnutí zkoumaného vzorku do trhacího přístroje tak, aby jeho svorky upínaly testovaný vzor ve vzdálenosti 101,6 mm od sebe a následné nastavení rychlosti oddalování svorek na hodnotu 50,8 mm za minutu. Po sepnutí stroje je nutné zaznamenávat hodnotu natahující síly a prodloužení [40, 41].

Pevnost v tahu se určí se vzorce:

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

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 lze určit ze vztahu:

$$\epsilon = \frac{l_1 - l_2}{l_1} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Kde ϵ je prodloužení [%],

l_1 je počáteční vzdálenost mezi svorkami (101,6 mm),

l_2 je vzdálenost mezi svorkami při přetržení vzorku [mm].

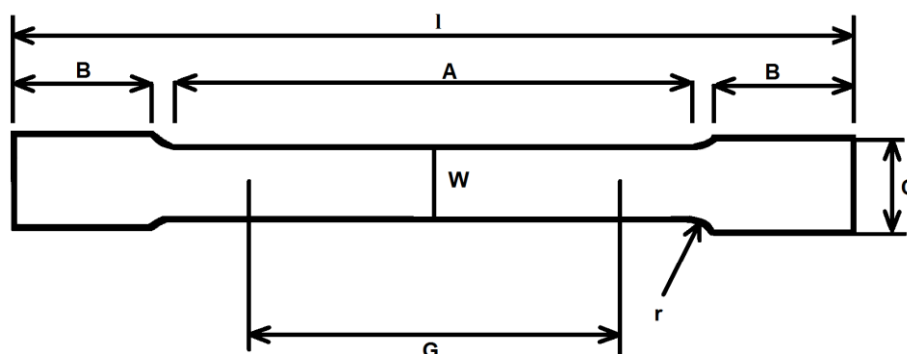
Výsledné hodnoty pevnosti v tahu a prodloužení se vypočítají jako průměrná hodnota z dílčích testů provedených na všech vzorcích [40, 41].

2.3.2.2 Standardní testovací metoda pro zjištění flexibilních vlastností tenkých plastů a fólií

Metoda ASTM D882 je určena pro stanovení flexibilních vlastností plastů a fólií o maximální tloušťce 1 mm. Pomocí tohoto dokumentu lze zjistit vlastnosti vzorku jako je relativní prodloužení, energie v tahu potřebná pro jeho přerušeni, modul pružnosti, pevnost v tahu a faktor zlomu. Principiálně je testování, požadavky kladené na prostředí a výpočty vlastností obdobné jako u standardu IPC-TM-650 č. 2.4.19, ale v dokumentu ASTM D882 jsou požadavky na rozměry vzorku více specifikované. Pro izotropní materiály je nutné připravit alespoň pět vzorků, pro anizotropní materiály je třeba připravit alespoň deset vzorků tak, aby jich bylo pět zhotoveno podél osy anizotropie a pět napříč této osy. Vzorky musí být jednotné a musí být alespoň o 50 mm delší, než je vzdálenost mezi svorkami. Je tedy nutné, aby byl vzorek upnut mezi svorky a dále je přesahoval na každé straně o 25 mm. Šířka vzorku musí být v intervalu od 5 mm do 25,4 mm. Poměr mezi šířkou a tloušťkou musí být vyšší než osm [41, 42].

2.3.2.3 Standardní testovací metoda pro zjištění flexibilních vlastností kovových fólií

Dokument ASTM E345 se věnuje určování flexibilních vlastností kovových fólií za pokojové teploty v tloušťkách do 0,15 mm. Zkoušky v tahu poskytují informace o síle a tažnosti materiálu při napínání v jednom směru. Tyto informace jsou užitečné při porovnávání materiálů, jejich vývoji a kontrole kvality. Stejně jako v předchozích standardech zabývajících se natahováním materiálů, je zde uvedeno, že je pro provedení zkoušky potřeba vhodné upevnění testovacího vzorku a dostatečně výkonné natahovací zařízení. Tato norma rozlišuje dva druhy vzorků (typ A, typ B), které se odlišují svými rozměry, tvarem a doporučeními pro jejich přípravu. Názorný obrázek popisující tuto skutečnost je zobrazen na Obr. 9 [43, 44, 45].



Obr. 9 Návrh vzorku pro provedení zkoušky v tahu [45].

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

Tab 2.2 Rozměry vzorku Typu A a Typu B [45]

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

Nezávisle na typu musí být vzorek prozkoumán pod dvacetinásobným zvětšením pro účely detekování otřepů, škrábanců a zvrásnění. Vzorky, které trpí těmito defekty, musí být z testování vyřazeny. Pro účely změření tloušťky měkkých fólií či fólií tenčích než 0,05 mm s odchylkou do 2 % je nutné fólie zvážit dle standardu ASTM E252, který stanovuje způsob pro zjištění tloušťky fólie pomocí její váhy. Pro zjištění tloušťky fólií získaných z pevných materiálů nebo při její tloušťce větší než 0,0245 mm může být použito optimetru nebo elektrického měřicího zařízení, které zajistí přesnost zjištění tloušťky s odchylkou do 2 %. Šířka fólie se změří, zaokrouhlí s přesností 0,025 mm a zaznamená. Rychlost natahování by měla být specifikována v produktové dokumentaci. Princip natahování vzorků zařízením a vypočítávání flexibilních vlastností je obdobné ostatním, shora uvedeným standardům. Natahování měděných fólií se zabývá standard IPC-TM-650 č. 2.4.18 [43, 44, 45].

2.4 Prakticky používané způsoby testování mechanických vlastností

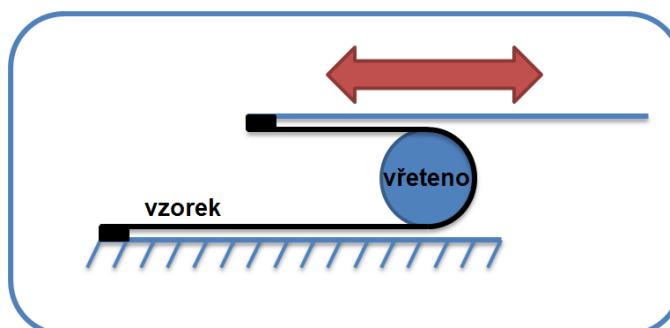
Vzhledem k faktu, že mnoho testovacích metod není standardizováno, případně autor publikace neuvádí, jaké normy byly pro účely zkoušek využity, je tato část práce věnována právě těmto metodám.

2.4.1 Testování ohybem

Jako běžně používané způsoby pro ohyb testovaných exemplářů lze uvést navíjení vzorku na vřeteno, jeho ohýbání pomocí pohyblivých trnů či ohyb realizovaný pomocí dvoubodového upnutí vzoru. Tyto zmíněné metody jsou blíže popsány v následujících podkapitolách.

2.4.1.1 Ohyb vzorku pomocí navíjení na vřeteno

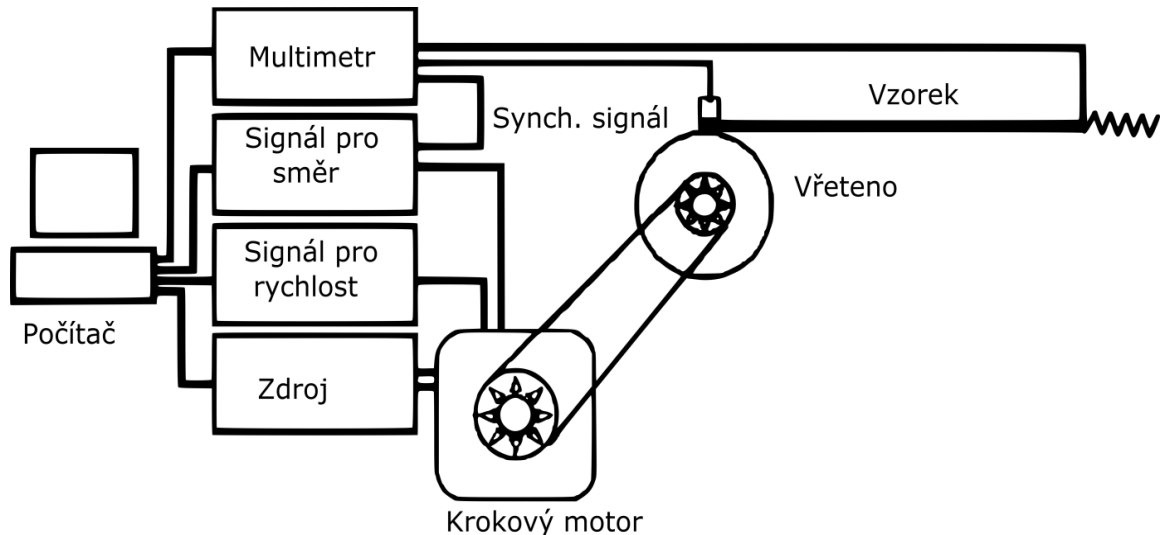
Jeden z mnoha běžně používaných způsobů periodického ohýbání plochých materiálů je realizován pomocí navíjení na vřeteno. Tento princip ohybu je ilustrován na následujícím nákresu [46].



Obr. 10 Ohýbání vzorku pomocí navíjení na vřeteno [46].

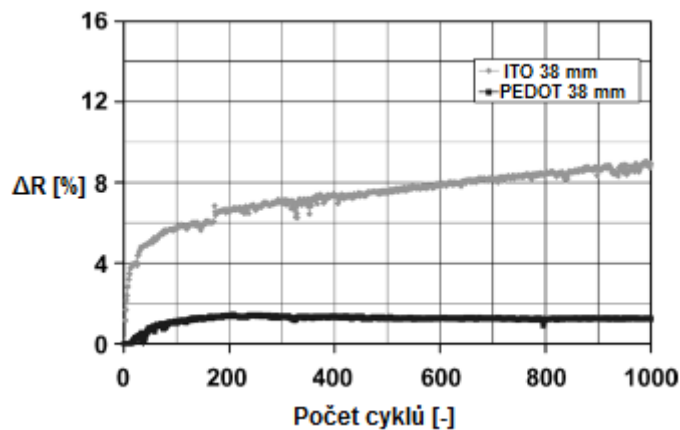
Ohyb zkoumaného prvku přes vřeteno byl použit např. p. Cairnsem a p. Bensaidem v níže citované literatuře. Vyobrazení testovacího zařízení a jeho hlavních komponentů, které výše jmenovaní sestavili, je zobrazeno obrázku č. 11. Tento systém dovoluje přesně zatěžovat a kontrolovat testovaný vzorek. Testovací model byl postaven na masivním stole, aby se eliminovaly externí vibrace. Pomocí tohoto zařízení lze testovat vzorky o rozměrech až 76,2 mm x 254 mm (šířka x délka). Jeden konec vzorku je upevněn k vřetenu pomocí kovové desky, která je přišroubovaná k jeho zakřivenému povrchu. Druhý konec vzorku je upnut mezi pár tenkých kovových desek, které jsou drženy na místě pomocí pružiny.

Pružina slouží k držení vzorku v horizontální poloze a k jeho vypínání při protichůdném chodu motoru. Princip ohybu je tedy navíjení testovaného vzorku na vřeteno pomocí krokového motoru a následné odvíjení vzorku z vřetena opačným chodem otáčení motoru spolu s vypínáním vzorku pružinou. Ke koncům vzorku je připojen pár plochých vodičů, které jsou k vodivému povrchu vzorku připojeny pomocí tenkých vodivých pásek. Spojení vřetena a krokového motoru je realizováno řemenem [47, 48].



Obr. 11 Zařízení pro ohýbání pomocí navíjení na vřeteno [47].

Pomocí tohoto přístroje byly testovány dva druhy vzorků zhotovené na PET substrátu s anodami tvořenými směsným oxidem india a cínu (ITO) a vodivým polymerem (PEDOT:PSS). Práce prokázala, že je zvyšování odporu vzorku přímo úměrné snižujícímu se průměru vřetena. Procentuální zvýšení elektrického odporu obou vzorků v závislosti na počtu cyklů a za použití vřetena o průměru 3,8 mm je znázorněn na obr. 12 [47].

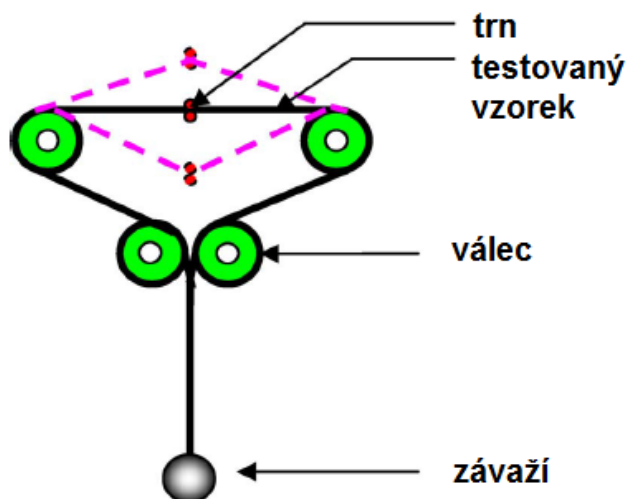


Obr. 12 Závislost elektrického odporu na počtu provedených ohýbacích cyklů [47].

2.4.1.2 Ohyb vzorku pomocí vychylování trnů

Tento způsob ohybu pro zjišťování parametrů flexibilních materiálů použil p. Alzoubi v níže citovaném pojednání. Princip způsobu ohybu a fotografie samotného zařízení je zobrazena na obr. 13 a obr. 14.

Jak je patrné z obr. 13, vlivem vertikálního posouvání trnů dochází k cyklické změně tvaru vzorku z konkávního na konvexní. Ohyb materiálu je realizován díky hřídeli, která je spojena s vačkou a jejím otáčením dochází k pohybu ramena spojeného s trny. Znázorněné válce eliminují nežádoucí vibrace, které vznikají pohybem závaží. Popisované zařízení kontinuálně měří elektrický odpor vodivého potahu na substrátu a zastaví se až po přerušení této vodivé vrstvy, kdy zařízení automaticky zaznamená počet provedených cyklů. Přístroj je schopený měřit v rychlostech 58 cyklů/min, 67 cyklů/min a 100 cyklů/min [49].



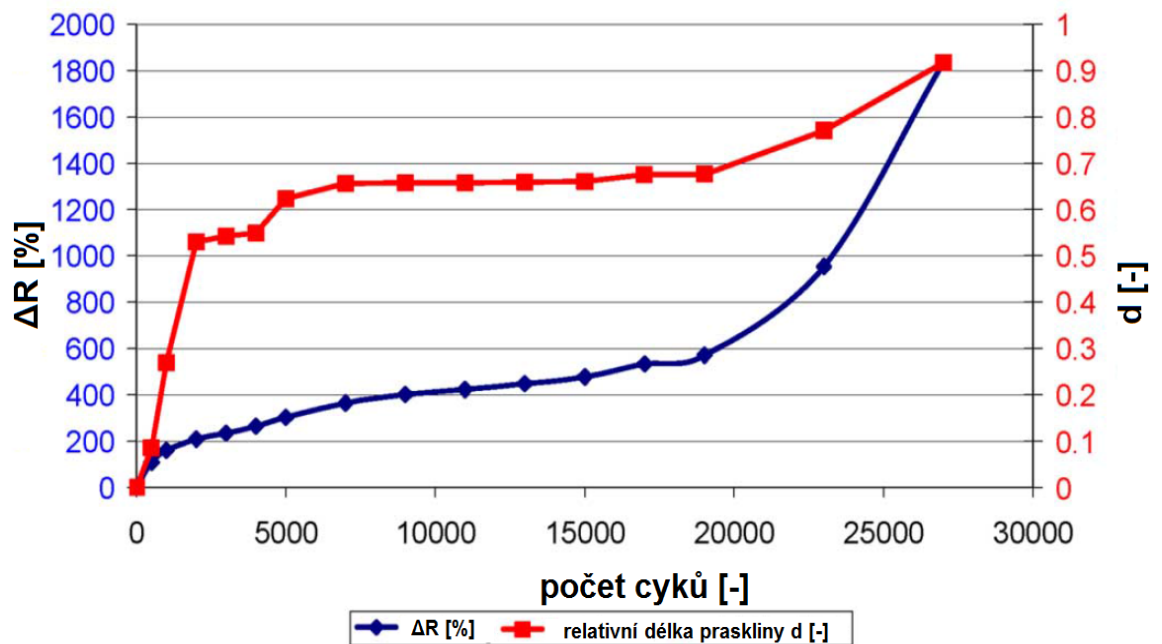
Obr. 13 Schéma principu ohýbání pomocí vychylovacích trnů [49].



Obr. 14 Fotografie zařízení pro ohýbání pomocí vychylování trnů [49].

Testování byly vystaveny dva typy vzorků s PET substrátem o tloušťce 127 μm , lišící se tloušťkou měděné vodivé vrstvy 200 nm a 500 nm. Jako adhezní mezivrstva byl použit chrom. Šířka obou typů vzorku byla 3,5 mm a délka 100 mm. Pro všechny uváděné testy byla zajištěna teplota okolí 23 $^{\circ}\text{C}$, 20% relativní vlhkost a průměr pohyblivého trnu 2,54 mm [49].

Jak znázorňuje obr. 15, elektrický odpor měděné fólie dramaticky roste, když délka praskliny je rovna přibližně 90 % šířky testovaného vzorku. V tento moment docházelo ke zničení vzorku. Podobné výsledky byly získány během matematického modelování. Důvodem pro tento fakt je, že se vlivem postupného šíření trhliny zmenšuje plocha, kterou může téct elektrický proud [49].



Obr. 15 Změna elektrického odporu a relativní délky praskliny [49].

Odpor vodivé fólie, který roste se zmenšující se plochou umožňující průchod proudu, lze tedy zapsat vztahem:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.4)$$

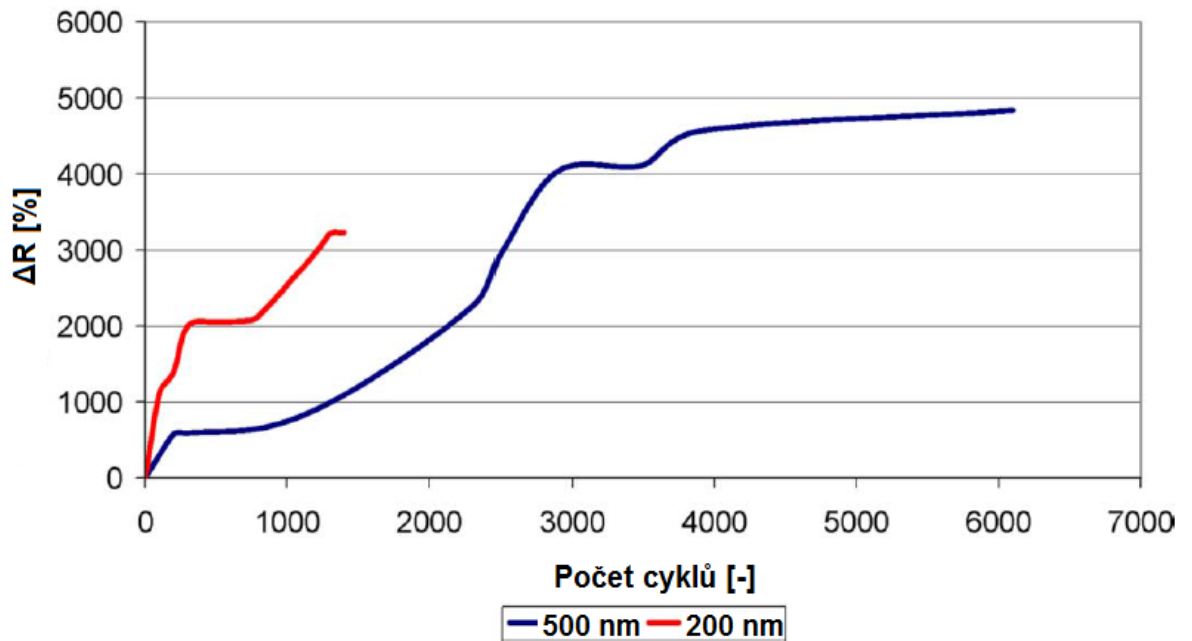
Kde R je elektrický odpor [Ω],

ρ je rezistivita [$\Omega \cdot m$],

l je délka fólie [m],

S je plocha průřezu fólie [m^2].

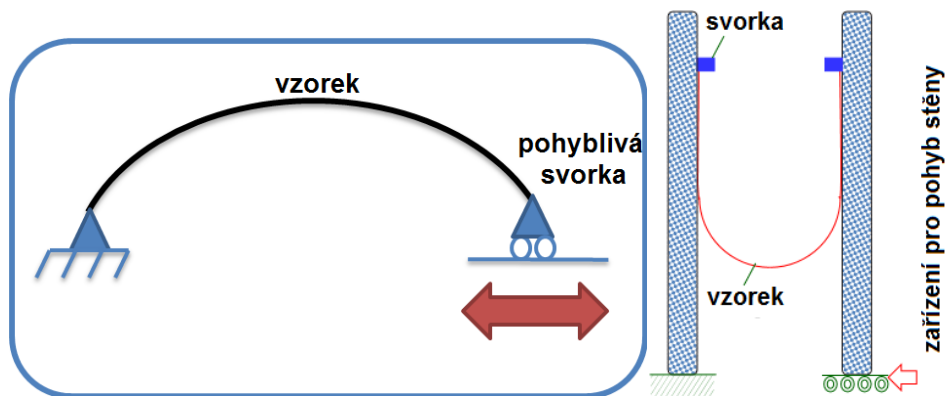
Pokusem bylo dále zjištěno, že vzorek s tloušťkou vodivé vrstvy 500 nm je odolnější vůči růstu elektrického odporu. Toto je způsobeno nižším namáháním silnější vrstvy, ačkoliv byly zajištěny stejné podmínky zatížení. Nižší rychlost vzrůstu elektrického odporu u silnějšího materiálu je zapříčiněna množstvím mědi, neboť trvá déle, než se větší vrstvou materiálu prasklina rozšíří. Tento fakt je znázorněn na obr. 16 [49].



Obr. 16 Změna elektrického odporu u vzorků s 200nm a 500nm vrstvou mědi [49].

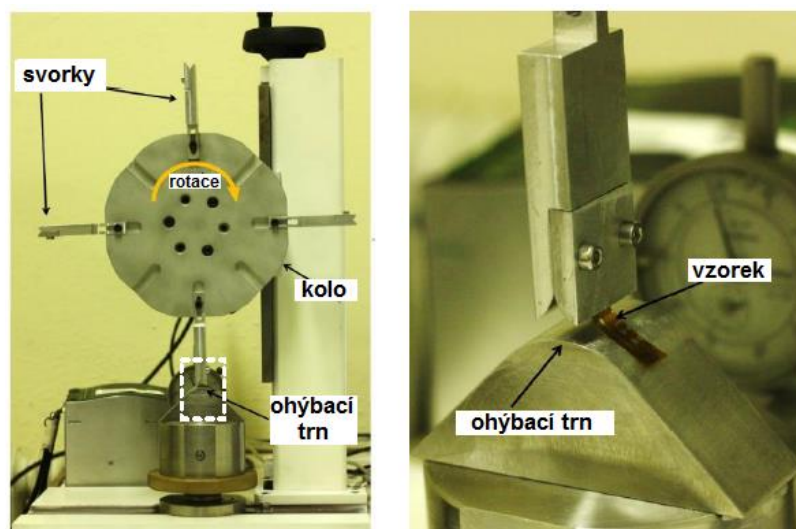
2.4.1.3 Ostatní způsoby ohýbání flexibilních materiálů pro elektroniku

Níže znázorněný dvoubodový způsob ohybu se provádí pomocí pevné a posuvné svorky, mezi kterými je zkoumaný vzorek upnut. Samotný ohyb testovaného prvku je periodicky prováděn přiblížením pohyblivé svorky s upnutým koncem zkoumaného prvku k protilehlé svorce a následným vrácením svorky do původní polohy [46, 50].



Obr. 17 a Obr. 18 Dva způsoby provedení dvojbodového ohybu za použití pohyblivé svorky [46, 50].

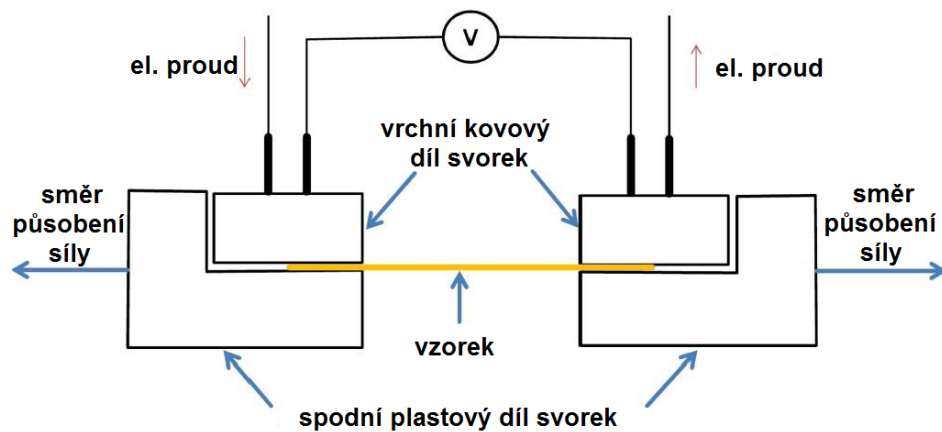
Dole zobrazená fotografie představuje další variantu ohybu vzorku. Konstrukce zařízení může vzdáleně připomínat ventilátor, kde jeho lopatky slouží pro úchop vzorků a rotaci zajišťuje libovolný druh elektromotoru. Výhoda této konstrukce je její jednoduchost, možnost souběžného testování osmi vzorků, ohýbání vzorků na obě strany díky reverznímu směru otáčení zařízení a nastavitelnost ohybu vzoru díky seřiditelné vzdálenosti trnu [51].



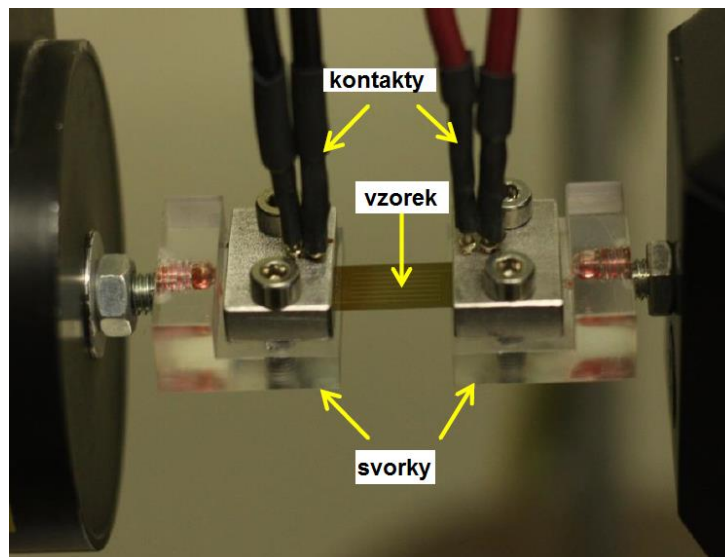
Obr. 19 Zařízení ohýbající vzorek přes trn [51].

2.4.2 Testování natažením

Na rozdíl od testování ohybem není u testování natažením tolik možností provedení. Pro účely natáhnutí obvykle slouží natahovací/trhací stroj s dvěma svorkami, mezi kterými je upnut vzorek. Samotné natáhnutí vzorku je pak realizováno vzdalováním jedné svorky od druhé pevně fixované svorky nebo vzájemným vzdalováním svorek od sebe. Schéma zapojení a názorná fotografie sestavy pro testování vzorku natažením je uvedena níže.



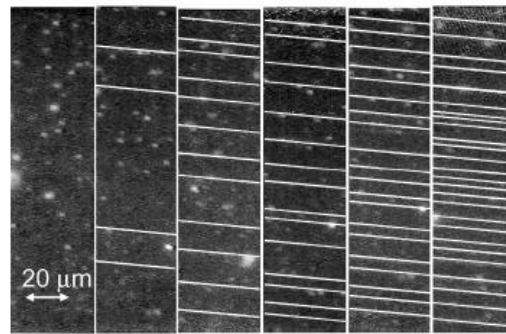
Obr. 20 Schéma zařízení pro napínání vzorků [51].



Obr. 21 Fotografie zařízení pro napínání vzorků [51].

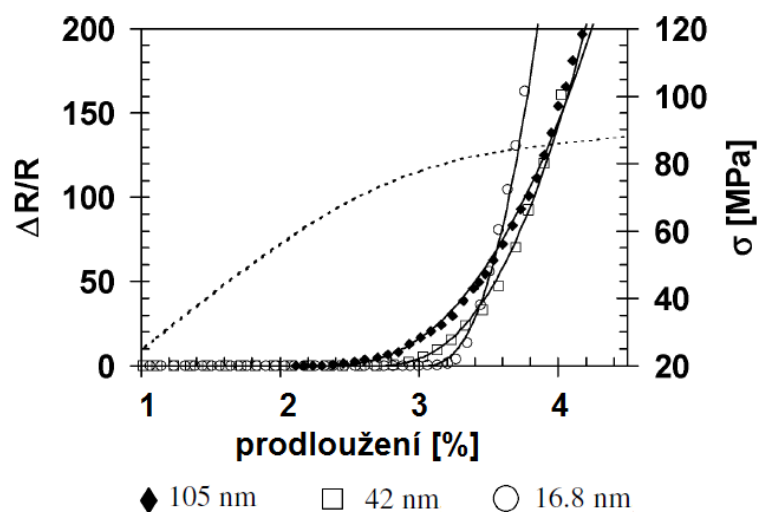
Při testování PET substrátů o tloušťce 125 μm s ITO filmem o tloušťce 105 nm a povrchovým odporem 70 Ω/sq bylo zjištěno, že praskliny vznikly v ITO vrstvě ve směru kolmém na směr síly natahování. K tomuto jevu začalo docházet při prodloužení o 2,3 % a výskyt trhlin rapidně rostl po prodloužení o 2,75 %.

Tato skutečnost je názorně zobrazena na několikanásobném zvětšení testovaného vzorku zobrazeného na obr. 22 [47].



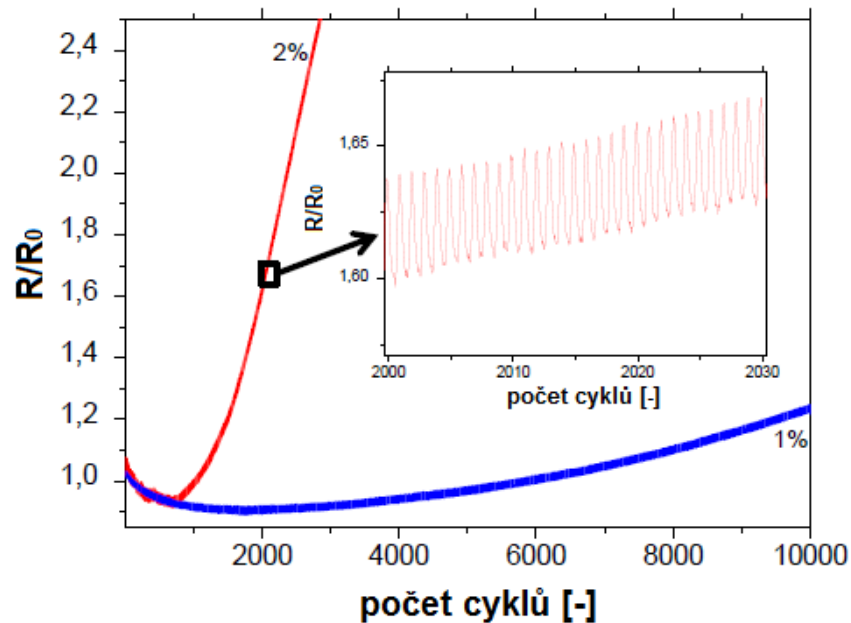
Obr. 22 Mikrotrhliny pro prodloužení od 2 % do 3,3 % [47].

Na obr. 23 je zobrazena změna odporu jako funkce prodloužení pro tři ITO filmy o tloušťkách uvedených pod obrázkem. Na pravé vertikální ose je zobrazena síla napínání což umožňuje znázornit závislost prodloužení na této síle (na obrázku vyznačeno tečkovaně). U všech testovaných tloušťek došlo v určitém bodě ke kritickému růstu odporu. Zajímavé zjištění bylo, že u vzorku s nejtlustší ITO vrstvou došlo k zvyšování odporu při nejmenším prodloužení, ale jeho následný růst se zvyšující se silou natahování nebyl tak strmý jako růst odporu vzorku s nejtenčí vrstvou ITO filmu. Z obr. 23 je patrné, že při vzniku trhliny nedojde k přerušení vodivého vzoru, ale pouze ke zvýšení odporu. To je podle níže citované literatury pravděpodobně způsobeno tím, že je vespod trhliny velmi tenká vodivá vrstva. Obdobná závislost, jako je na níže uvedeném obrázku, byla prezentována na konferenci LOPEC 2015. Zde byla navíc diskutována regenerace měřených vzorků, která je způsobena viskoelasticitou substrátu a přemostováním prasklin [47, 51].

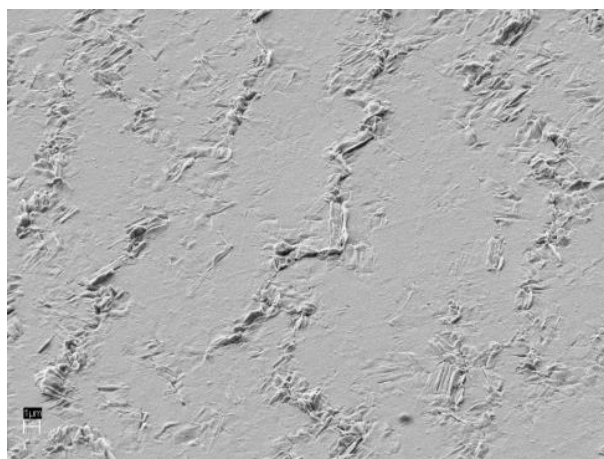


Obr. 23 Závislost odporu a pevnosti v tahu na prodloužení vzorku [47].

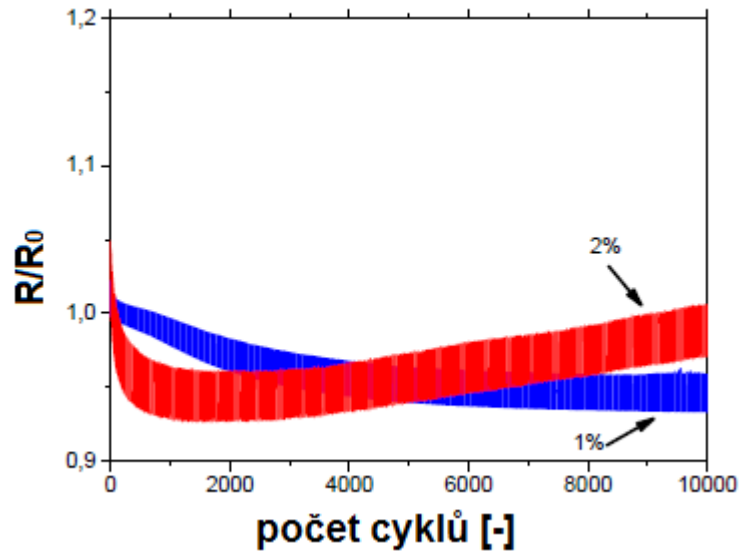
Další téma konference LOPEC 2015 bylo zkoumání změny odporu měděné a stříbrné cesty na polyimidovém substrátu při cyklickém namáhání. Tato závislost je znázorněna na obr. 24 a obr. 26. Mikroskopické snímky trhlin materiálů jsou vyfotografovány na obr. 25 a 27. Rozměry a tvar vodivých cest testovaných exemplářů je zobrazen na obr. 28. Oba dva typy vzorků měly šířku vodivé cesty 50 μm a její tloušťka byla 500 nm [51].



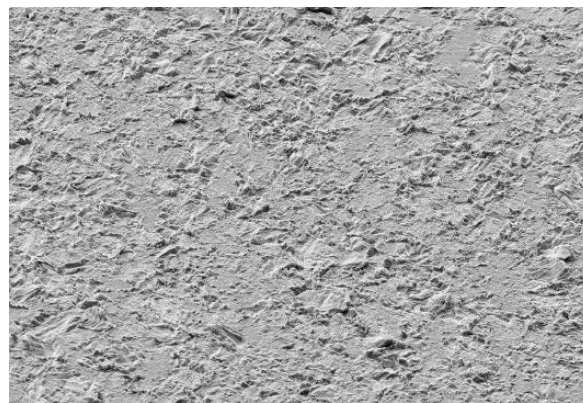
Obr. 24 Závislost změny odporu na počtu provedených cyklů vzorku s měděnou cestou při 1% a 2% prodloužení [51].



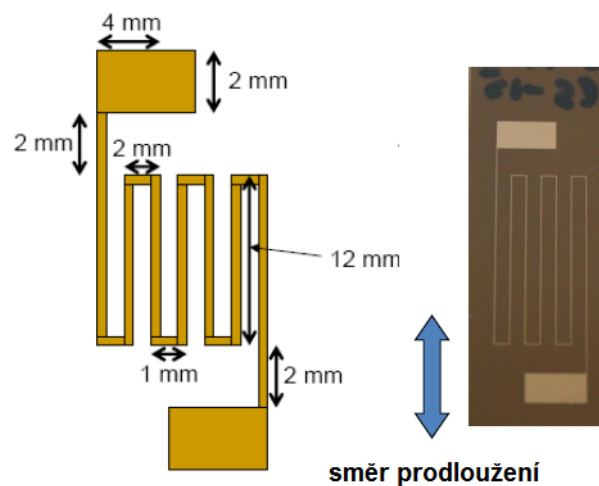
Obr. 25 Mikroskopický snímek vzorku s měděnou cestou po 4000 natahovacích cyklech při 2% prodloužení [51].



Obr. 26 Závislost změny odporu na počtu provedených cyklů vzorku se stříbrnou cestou při 1% a 2% prodloužení [51].



Obr. 27 Mikroskopický snímek vzorku se stříbrnou cestou po 10000 natahovacích cyklech při 2% prodloužení [51].



Obr. 28 Rozměry a tvar testovaných vzorků [51].

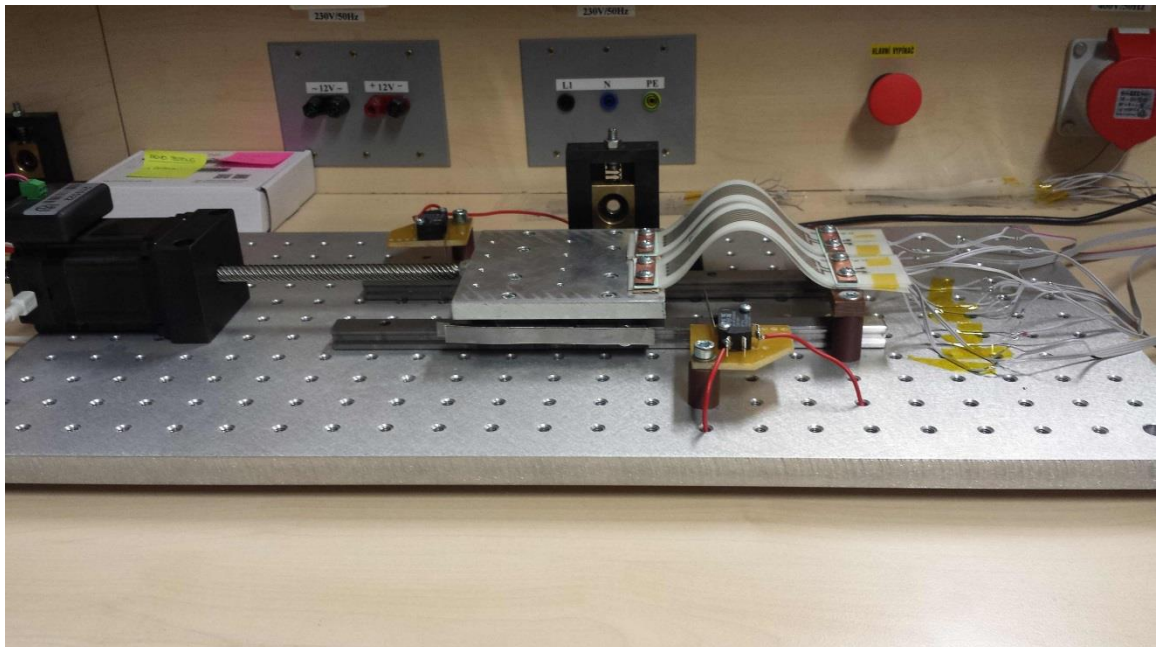
3 Experimentální měření elektrických vlastností flexibilních komponentů

Cílem tohoto měření bylo zjistit chování flexibilních komponent a vyšetření změny elektrického odporu při mechanickém namáhání prostřednictvím vybavení katedry technologií a měření (dále jen KET) fakulty elektrotechnické na ZČU.

3.1 Konstrukce testovacího zařízení

Po teoretické části věnované flexibilní elektronice a způsobech mechanického testování flexibilních elektronických prvků je dalším logickým krokem konstrukce vhodného testovacího zařízení.

Pro tyto účely byla navržena modifikace stroje primárně určeného pro depozici materiálů metodou „spiral coating“, aby jej bylo možné použít pro cyklické namáhání ohybem tenkých vzorků. Navržené řešení respektuje normy pro testování flexibilních komponent a díky své variabilitě umožňuje i provádění mechanických testů, které jsou nad rámec této normy. Zhotovené zařízení je zobrazeno na obr. 29.



Obr. 29 Testovací zařízení zhotovené v prostorách katedry technologií a měření na FEL ZČU.

Sestavené zařízení se skládá z krokového motoru, páru rovnoběžně umístěných kovových ližin, kovové posuvné plošiny, variabilně nastavitelného podstavce pro upnutí zkoumaného komponentu vytvořeného na tenkém substrátu, páru koncových spínačů pro ochranu vzorků v případě selhání motoru a pomocných upínacích součástek. Celé zařízení bylo umístěno na masivní kovovou desku s maticově vyvrtanými otvory, které umožňují variabilní umístění upínacího podstavce a koncových spínačů.

3.2 Nastavení krokového motoru

Krokový motor lze programovat pomocí výrobcem dodávaného software IDEA. Pro účely diplomové práce byl použit níže uvedený pozměněný skript, původně navržený pro depozici materiálů, díky kterému se pohyblivá plošina periodicky pohybovala po ližinách.

Action	Label	Description	Comment
0		Wait 5 sec	
1	start	Move To 20,99865625 mm	
2		Wait For Move	
3		Wait 0,1 sec	
4		Move To 0 mm	
5		Wait For Move	
6		Wait 0,1 sec	
7		Jump N Times start	
8		Abort	

Obr. 30 Skript pro ovládání krokového motoru.

Kde *Wait* je doba, po kterou je motor v nečinnosti a čeká na další příkaz,
Move To je pohyb hřídele na souřadnici o hodnotě ~ 21 mm (neceločíselná hodnota uvedená v obrázku je způsobena nepřesným převodem z palců na milimetry),
Wait For Move je doba čekání nutná pro provedení aktuální operace *Move To*,
Jump N Times start definuje počet opakování, kde každá další iterace začíná na návěští *start*,
Abort je přerušení celého skriptu.

Nejpodstatnější je příkaz „*Move To*“, u kterého lze po jeho zvolení měnit funkční parametry. Jako příklad je uvedeno nastavení respektující požadavky normy na rychlost a ohnutí vzorku.

Position	20,999	mm	Accel Rate	3175	mm/sec/sec
Speed	7,999	mm/sec	Decel Rate	3175	mm/sec/sec
Run Current	3,323	Ams	Start Speed	0	mm/sec
Hold Current	0	Ams	End Speed	0	mm/sec
Delay Time	0,3	sec	Accel Boost	Yes	
Step Mode	1/64		Decel Boost	No	
Label	start				
Comment					

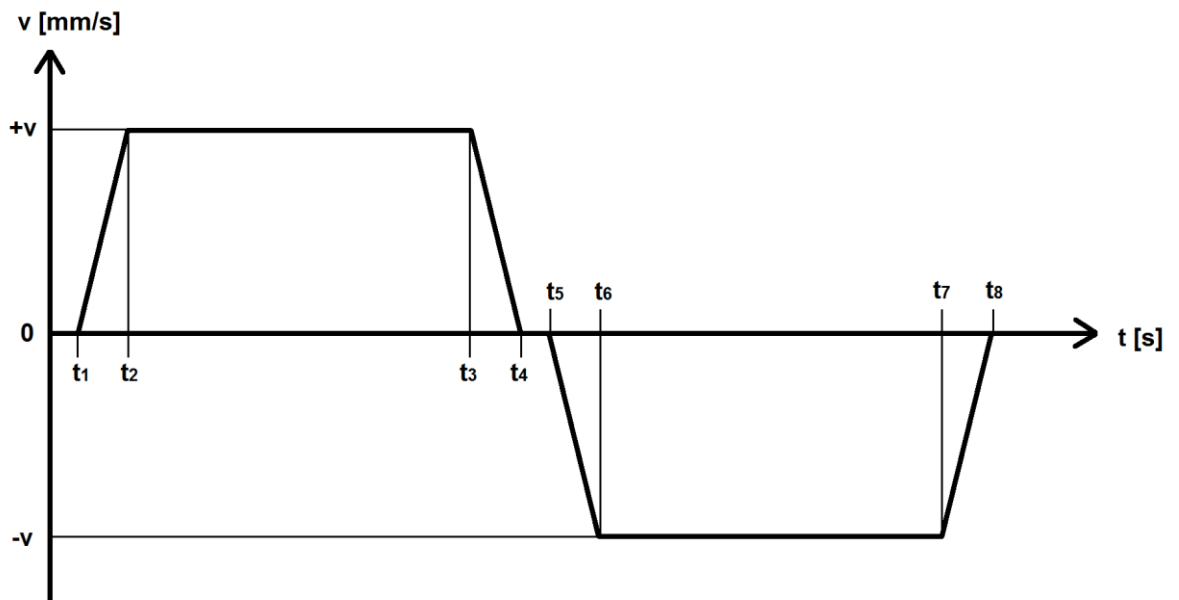
Buttons: Plot, Update, Cancel

Obr. 31 Parametry příkazu „*Move To*“.

- Kde
- Position* je vzdálenost, do které má posuvná plošina dojet,
 - Speed* je maximální rychlost, kterou se bude pohybovat plošina,
 - Run Current* je elektrický proud, použitý pro pohyb plošiny,
 - Hold Current* je elektrický proud ve vinutí motoru po skončení pohybu,
 - Delay Time* je doba změny velikosti proudu z *Run Current* na *Hold Current*,
 - Step Mode* je rozlišení (jemnost) kroku,
 - Accel Rate* je zrychlení posuvné plošiny,
 - Decel Rate* je zpomalení posuvné plošiny,
 - Start Speed* je rychlost, na které pohyb začne, pokud je použita volba *Accel Rate*,
 - End Speed* je rychlost, na které pohyb skončí, 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 popisek (návěští) a
 - Comment* je uživatelský popisek.

Pro měření vzorků dle normy IPC-TM-650 č. 2.4.3 byla zvolena rychlost jednoho cyklu na $\approx 6,1$ sekundy. Teoretická časová náročnost pro měření AJP vzorku č. 2 připraveného ve čtyřech vrstvách je přes pět a půl hodiny. Prakticky bylo ale nutné navíc zaznamenávat offline hodnoty odporu a restartovat po každém odečtení hodnot krokový motor, měřicí přístroj a po cca 400 cyklech i SW ExceLINX (po naplnění 65536 řádků).

Vzhledem k faktu, že bylo nastavení během testování mnohokrát optimalizováno pro zajištění ideálního chodu krokového motoru a zatížení vzorků, je níže uvedena všeobecná charakteristika jednoho ohýbacího cyklu, provedeného sestaveným zařízením. V první půlce periody se posuvná plošina pohybovala určitým směrem a v druhé půlce periody se plošina vracela opět do výchozího stavu.

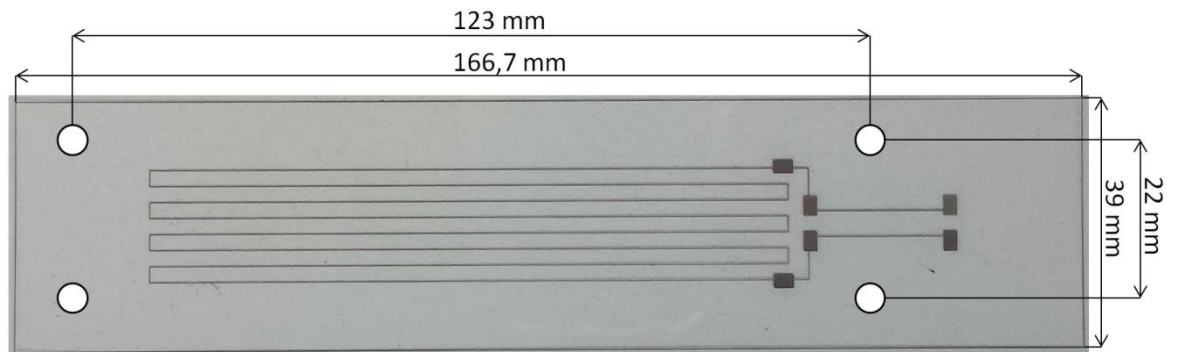


Obr. 32 Perioda jednoho ohýbacího cyklu.

Kde v $\langle t_1, t_2 \rangle$ a $\langle t_5, t_6 \rangle$ se plošina postupně zrychluje,
 v $\langle t_3, t_4 \rangle$ a $\langle t_6, t_7 \rangle$ se plošina postupně zpomaluje,
 v $\langle t_2, t_3 \rangle$ a $\langle t_5, t_6 \rangle$ se plošina pohybuje konstantní rychlostí a
 v $\langle 0, t_1 \rangle$ a $\langle t_4, t_5 \rangle$ se plošina nehýbe. Jedná se o čas v řádu milisekund, který program potřebuje pro zpracování dalšího příkazu.

3.3 Popis testovacích vzorků

Při návrhu vodivého motivu byly s mírnou modifikací umístění oblastí elektrického kontaktování respektovány pokyny uvedené v dokumentu IPC-TM-650 č. 2.4.3. Jak znázorňuje obr. 33, byla upravena pozice plochy určená pro kontaktování, což zajistilo elektrické propojení mezi vzorkem a měřícím zařízením bez mechanického zatížení spoje.



Obr. 33 Navržený vzorek pro testování se svými rozměry.

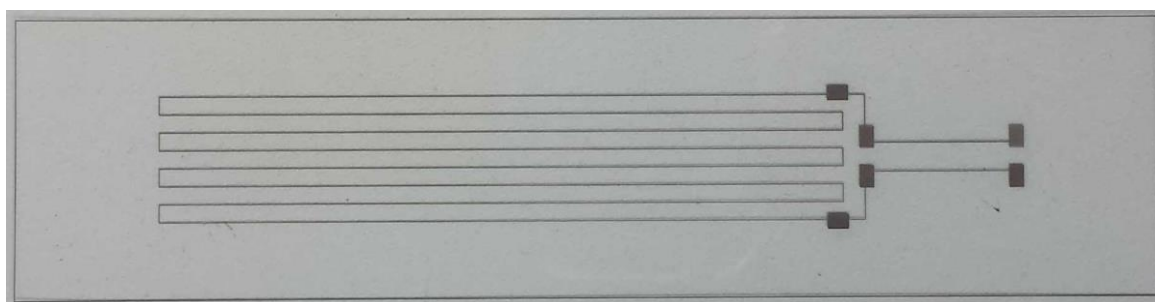
Samotný vodivý vzor byl navržen v CAD softwaru a jeho vyhotovení v několika provedení bylo realizováno v prostorách fakulty elektrotechnické ZČU, ve společnosti Pragoboard a ve společnosti OTK a.s. v kooperaci s Katedrou polygrafie a fotofyziky Univerzity Pardubice. Celkově byl vzorek vyroben v pěti provedeních, kde každé provedení bylo vyrobeno v souladu s četností vzorků, která je deklarována normou – tedy minimálně šest kusů. Jednotlivé vzorky se od sebe lišily v použitém materiálu pro substrát, vodivý motiv a v technologii přípravy. Pro testování byly připraveny vzorky:

- Se stříbrným vodivým inkoustem PARU PG-007 naneseným metodou Aerosol Jet Printing (dále jen AJP) ve čtyřech vrstvách o jejich celkové tloušťce 33,4 μm na substrát PET Melinex® ST504 o tloušťce 175 μm .
- Se stříbrným vodivým inkoustem PARU PG-007 naneseným metodou Aerosol Jet Printing v jedné vrstvě o tloušťce 4 μm na substrát PET Melinex® ST504 o tloušťce 175 μm .
- S vodivým vzorem o tloušťce 14,5 μm připraveným laminací měděné fólie na kaptonový (polyimidový) substrát o tloušťce 25 μm a následným leptáním přes rezist.
- S vodivou cestou o tloušťce 15,5 μm vytvořenou laminací mědi a leptáním přes rezist na sklolaminátový substrát (FR4) o tloušťce 180 μm .
- Se stříbrnou pastou REXALPHA™ RA FS 076 nanesenou ve vrstvě o tloušťce 10 μm , vytvrzenou UV zářením a vytištěnou na PET substrát o tloušťce 50 μm prostřednictvím tiskového stroje „Roll 2 Roll“ při konfiguraci 275 vláken na palec (~108 vl/cm) a přenosu 14 cm^3 .

Jejich fotografie a popis jsou uvedeny na obr. 34, obr. 35, obr. 36, obr. 37 a obr. 38. Ke každému vzorku byly připájeny nebo přilepeny pomocí dvousložkového epoxidového lepidla s příměsí stříbra (MG Chemicals 8331 S) dva páry 10 cm dlouhých izolovaných vodičů, díky kterým bylo možné měřit elektrický odpor čtyřbodovou metodou. Tato metoda byla zvolena kvůli přesnému měření, neboť el. odpor vzorků měl hodnotu i pouhých 0,7 Ω . Čtyřbodová metoda měření elektrického odporu eliminuje odpor vodičů (zejména dlouhých přívodů z multiplexové karty) a elektrický odpor vodivého lepidla. Provedení technologických otvorů pro upnutí a rozměry vzorku včetně okolí vodivého motivu nejsou normou stanoveny. Rozmístění otvorů bylo stanoveno tak, aby se místo elektrického spojení vodivého motivu a vodičů nacházelo mezi místem upnutí a měřícím zařízením. Toto místo je vhodné, neboť se nenachází v místě ohýbání vzorku, čímž není elektrický spoj mechanicky namáhán.



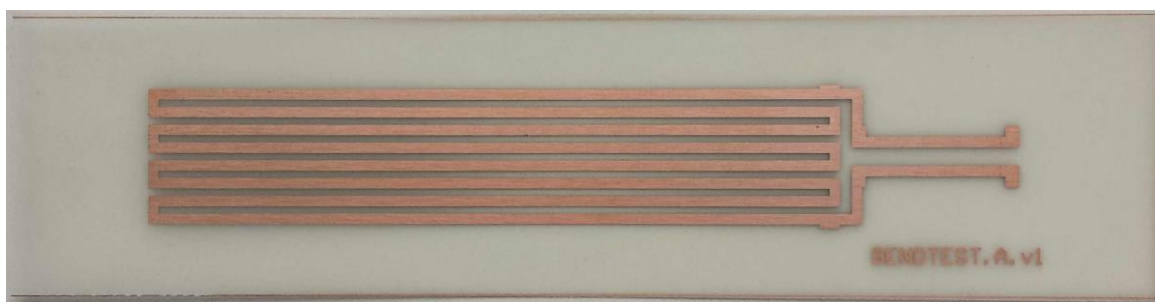
Obr. 34 Vzorek připravený AJP metodou ve čtyřech vrstvách.



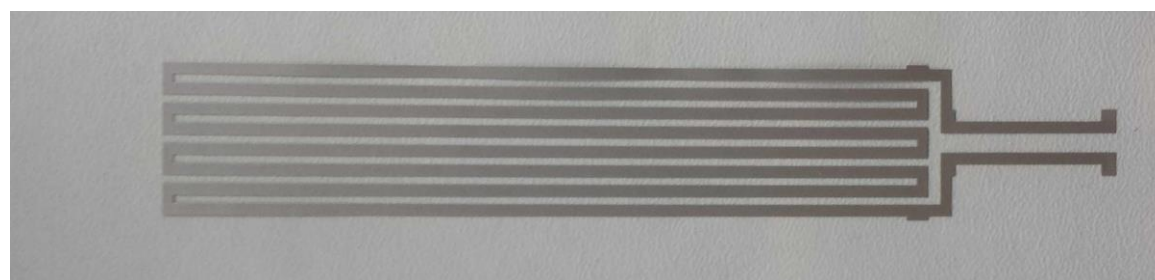
Obr. 35 Vzorek připravený AJP metodou v jedné vrstvě.



Obr. 36 Vzorek na kaptonové fólii.



Obr. 37 Vzorek na sklolaminátovém substrátu.



Obr. 38 Vzorek připravený sítotiskem.

3.4 Provedení experimentu

Testování bylo prováděno v laboratořích KET při teplotě $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a při 40% relativní vlhkosti $\pm 10\%$. Zkoumané vzorky byl připojen k testovacímu stroji tak jak znázorněno na obr. 29. Při měření AJP vzorků připravených ve čtyřech vrstvách byly vždy paralelně testovány pouze dva vzorky. Ostatní druhy exemplářů byly testovány vždy po šesti kusech najednou. Provedení testování jednotlivých druhů vzorků se od sebe vzájemně odlišovala. Díky těmto odlišnostem bylo možné relativně málo odolné vzorky podrobit poměrně mírnému zatížení specifikovaného normou IPC-TM-650 č. 2.4.3 a extrémně flexibilní vzorky podrobit maximálnímu možnému zatížení, které je testovací zařízení schopné vyvinout a to v přiměřeném časovém rozpětí přibližně 200 hodin. Při navrhování rozdílných testovacích metod vhodných pro jednotlivé typy vzorů byla uvažována jejich předpokládaná odolnost vůči poškození při zatížením cyklickým ohýbáním, která byla odvozena od empirických znalostí použitých materiálů a výrobních metod. Dále byly zohledněny omezující provozní vlastnosti krokového motoru, mezi které patří přehřívání při vysokých rychlostech, rychlých změnách směru pohybu a jeho celkové nespolehlivost při vyšších rychlostech. Při stanovování testovacích postupů byl kladen důraz na co největší identičnost provedení s požadavky uvedenými ve výše uvedeném standardu bez zanesení výraznější odchylky od měření, které by bylo provedeno přesně dle normy. V neposlední řadě bylo nutné počítat s omezeními měřicího přístroje. Při online měření elektrického odporu je možné odečíst za jednotku času pouze omezené množství hodnot. Druhé omezení bylo v paralelním online měření při vysoké snímkovací frekvenci, která byla potřebná pro dostatečně jemné prozkoumání vlastností vzorku. Měřicí přístroj nestíhá při vysoké snímkovací frekvenci dostatečně rychle přepínat relé pro měření více elektrických obvodů a navíc by zcela jistě došlo během dlouhého paralelního měření k překročení výrobcem stanoveného počtu přepnutí mezi měřenými obvody a tím ke zničení měřicího přístroje. Odečítání hodnot elektrického odporu bylo realizováno offline i online metodou. Při online měření elektrického odporu bylo dbáno na jemné proměření ohýbacího cyklu, a proto bylo v každém cyklu odečteno alespoň dvacet hodnot. Měřením by se mělo potvrdit předpokládané chování elektrického odporu při ohýbání vzorku, kdy se s rostoucím ohybem zvyšuje elektrický odpor. Přesné způsoby měření navržené pro odlišné druhy vzorků zahrnující výše uvedené faktory jsou popsány v následujících podkapitolách.

Pro měření byl použit SW ExceLINUX, multimetr Keithley 2700 s diferenčním multiplexním modulem 7700 a RLC můstek Motech MT4090.

3.4.1 Měření elektrického odporu čtyřvrstvého AJP vzorku

Vzorky připravené technologií AJP ve čtyřech vrstvách byly testovány přesně dle požadavků normy IPC-TM-650 č. 2.4.3. Rychlost ohýbání tedy byla ~ 10 cyklů za minutu při maximálním ohybu vzorku 31 mm od pomyslné roviny vedené mezi body upnutí. Bylo testováno 6 kusů vzorků. Podle hodnot získaných offline měřeními odporu odolal průměrně vzorek 1233 cyklům, než došlo k jeho selhání. Selháním se zde rozumí přerušení vodivé cesty nebo zvýšení elektrického odporu o tři a více řádů. Zjednodušená tabulka offline naměřených hodnot odporů je zobrazena níže. Žlutě zbarvená řádka označuje vzorek, který byl měřen offline i online metodou.

Tab. 3.1 Offline hodnoty el. odporu AJP vzorků připravených v čtyřech vrstvách

n [-]	R1 ₀ [Ω]	R1 _{MAX} [Ω]	R1 _{MAX} /R1 ₀ [-]	R2 ₀ [Ω]	R2 _{MAX} [Ω]	R2 _{MAX} /R2 ₀ [-]	N [-]
1	16,47	16,5	1,002	16,47	42,47	2,579	200
2	47,37	88,45	1,867	n/o	180,55	n/o	1800
3	18,93	20,34	1,074	18,09	36,14	1,998	600
4	24,95	113,23	4,538	26,89	141,44	5,260	3400
5	17,06	17,07	1,001	17,12	27,08	1,582	100
6	28,42	28,75	1,012	30,41	38,47	1,265	1300

Kde n je číslo vzorku,

R_{1_0} je hodnota odporu ve výchozí poloze před testováním,

$R_{1_{MAX}}$ je maximální hodnota odporu ve výchozí poloze změřena v N -tém cyklu,

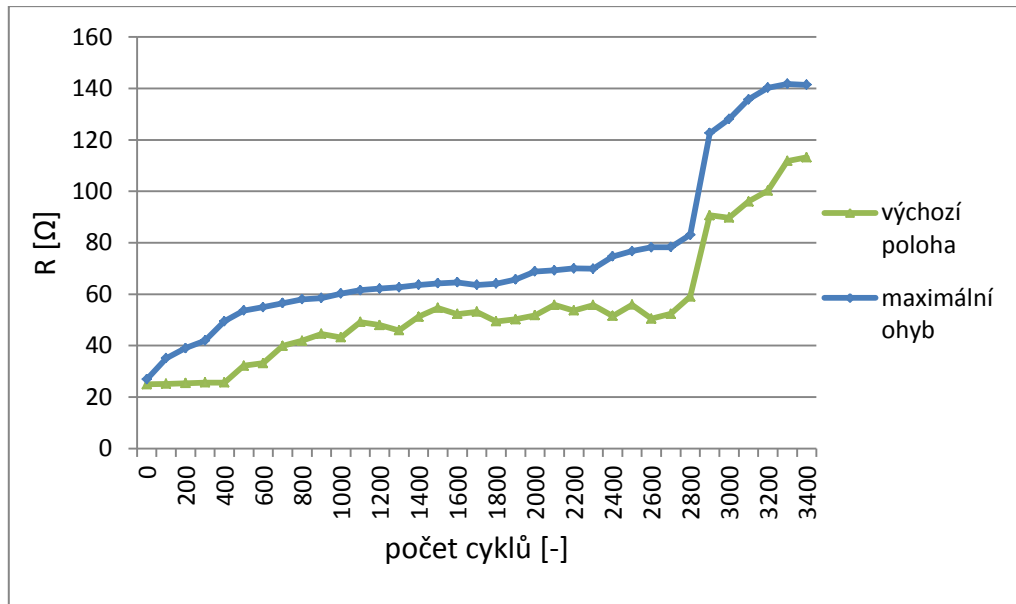
$R_{1_{MAX}}/R_{1_0}$ je poměr zvýšení odporu změřeného ve výchozí poloze po n cyklech,

R_{2_0} je hodnota odporu v ohybu před testováním,

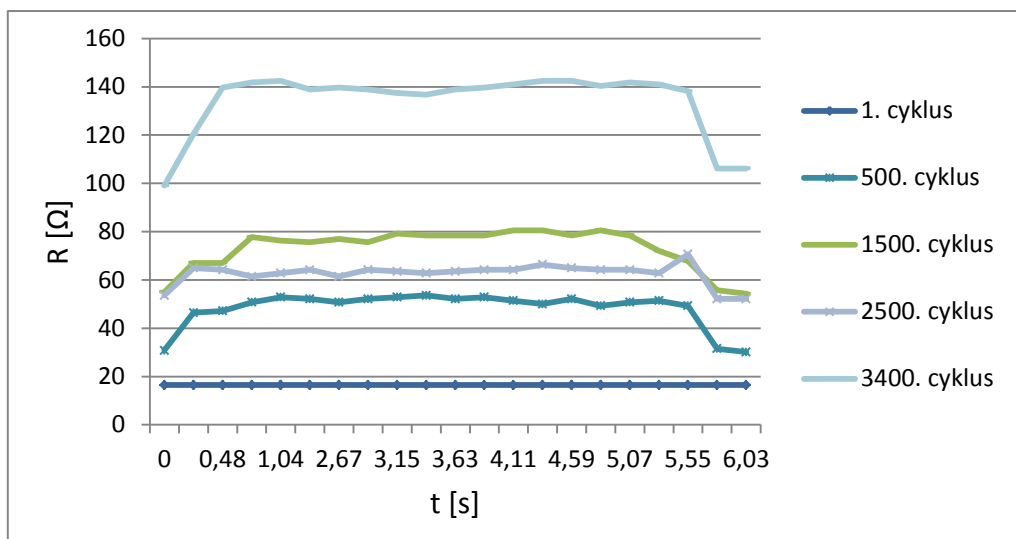
$R_{2_{MAX}}$ je maximální hodnota odporu v ohybu změřena v N -tém cyklu,

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

N je počet provedených cyklů před selháním.



Obr. 39 Offline hodnoty odporu čtyřvrstvého AJP vzorku č. 4.



Obr. 40. Online hodnoty odporu čtyřvrstvého AJP vzorku č. 4 v několika cyklech.

Tabulka č. 3.2 zobrazuje frekvenční závislost vzorků při konstantním napětí 1 V a tabulka č. 3.3 uvádí jejich další elektrické veličiny při konstantní frekvenci 10 kHz.

Tab. 3.2 Frekvenční závislost čtyřvrstvého AJP vzorku č. 1

$Z_{100\text{Hz}}$	16,69 [Ω]	0,0042 °
$Z_{1\text{kHz}}$	16,74 [Ω]	0,0304 °
$Z_{10\text{kHz}}$	16,67 [Ω]	0,3076 °
$Z_{100\text{kHz}}$	15,91 [Ω]	5,559 °

Tab. 3.3 Indukčnost, kapacita a jakost čtyřvrstvého AJP vzorku č. 1

L_{s0}	1,425 μH	L_{s1}	0,62 μH	L_{s2}	-140 H
Q_0	0,0053	Q_1	0,0022	Q_2	$5,27 \cdot 10^5$
C_{p0}	-5,13 pF	C_{p1}	-2,126 nF	C_{p2}	1,4 pF

Kde Z jsou impedance změřené při několika frekvencích a při konstantním napětí,

L_{s0} je sériová indukčnost před testováním,

Q_0 je činitel jakosti před testováním,

C_{p0} je paralelní kapacita před testováním,

L_{s1} je sériová indukčnost při selhání a v narovnaném stavu vzorku,

Q_1 je činitel jakosti při selhání a v narovnaném stavu vzorku,

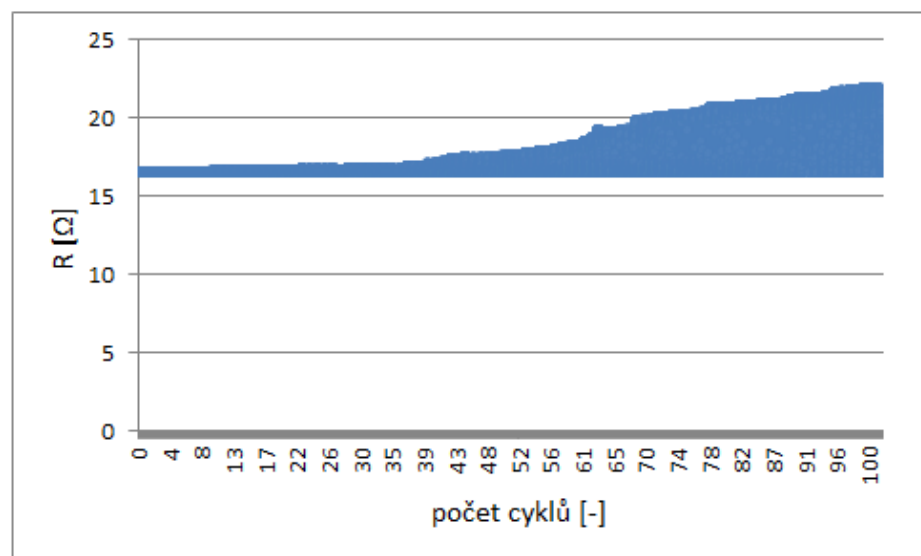
C_{p1} je paralelní kapacita při selhání a v narovnaném stavu vzorku,

L_{s2} je sériová indukčnost při selhání a v ohnutém stavu vzorku,

Q_2 je činitel jakosti při selhání a v ohnutém stavu vzorku,

C_{p2} je paralelní kapacita při selhání a v ohnutém stavu vzorku.

Ze změřených hodnot lze usuzovat, že se vzorky mají induktivní charakter až do doby, kdy dojde k poruše. Díky prasklině či vylomenému segmentu vodivé cesty se ze vzorku stává velmi malá kapacita. Na vzorku č. 1 byl dále zkoumán vývoj rozdílu mezi minimální a maximální hodnotou elektrického odporu obdobně, jako tomu bylo na obr. 24 a obr. 26.



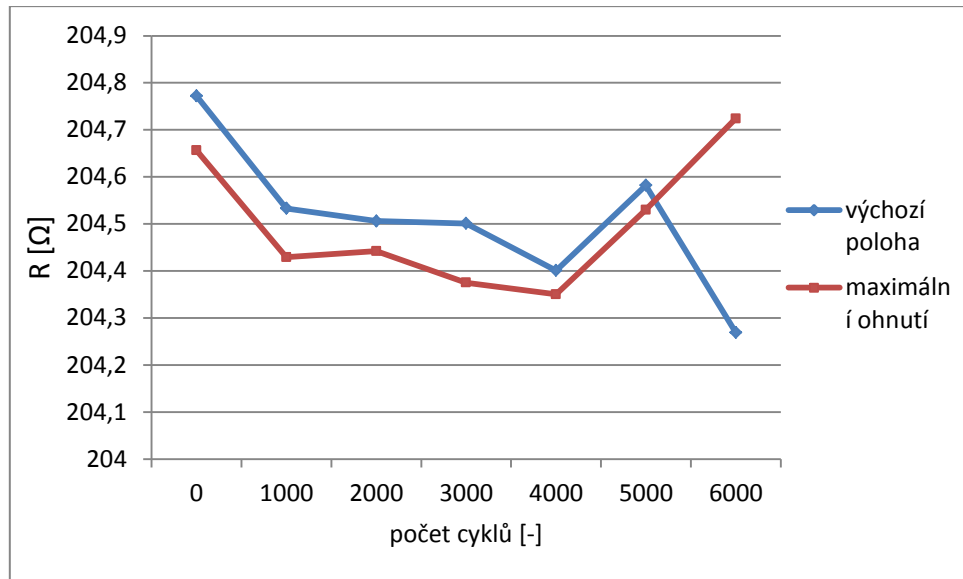
Obr. 41 Vliv provedených cyklů na rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou el. odporu.

3.4.2 Měření elektrického odporu jednovrstvého AJP vzorku

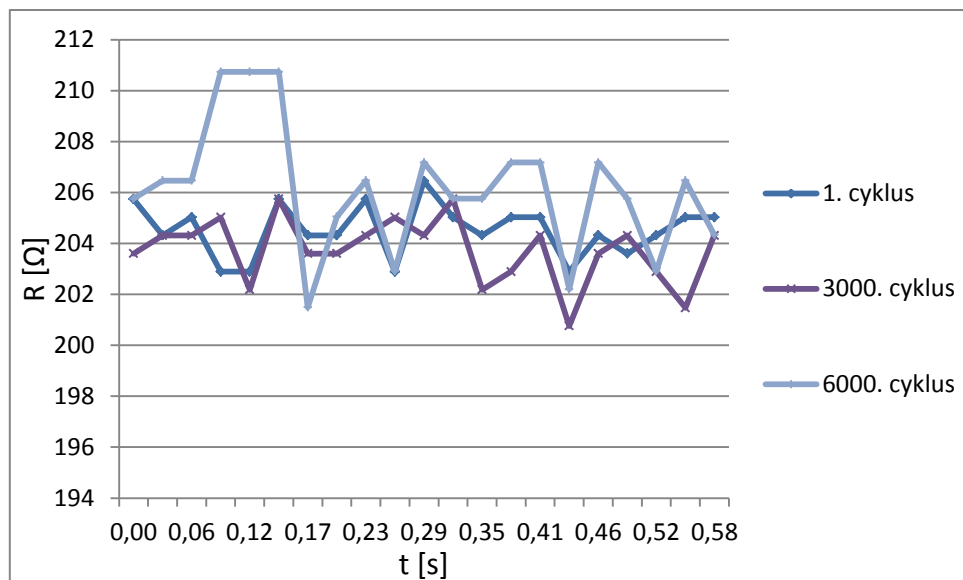
Pro testování vzorků vyrobených pomocí metody AJP v jedné vrstvě byla zvolena desetinásobná rychlost měření, než kterou předepisuje norma IPC-TM-650 č. 2.4.3. Toto rozhodnutí bylo provedeno na základě předpokladu, že zvýšení rychlosti ohybu tenkého vzorku nemá znatelný vliv na celkový počet vykonaných cyklů před selháním. Kvůli zvýšení rychlosti ohýbání bylo nutné optimalizovat velikost napájecího proudu motoru, neboť se motor při stávajícím nastavení začal přehřívat, což způsobilo zastavení motoru. Po několika testech byla stanovena minimální stabilní hodnota proudu „Run Current“, ve výrobcem dodávaném ovládacím software, na 2 Arms. Vzhledem ke zjištění, že čtyřvrstvé AJP vzorky selhávaly již po relativně málo cyklech, byly i jednovrstvé vzorky testovány s malým normou definovaným ohybem. Pro účely testování tohoto druhu vzorků byly použity jen čtyři kusy, neboť zbývajících šest z deseti vyrobených vykazovalo defekty již před samotným testováním. V průměru vydržel vzorek vyrobený jednovrstvou AJP metodou 9500 cyklů. Tabulka offline naměřených hodnot odporů je uvedena níže.

Tab. 3.4 Offline hodnoty el. odporu AJP vzorků připravených v jedné vrstvě

n [-]	R1 ₀ [Ω]	R1 _{MAX} [Ω]	R1 _{MAX} /R1 ₀ [-]	R2 ₀ [Ω]	R2 _{MAX} [Ω]	R2 _{MAX} /R2 ₀ [-]	N [-]
1	204,772	204,269	0,998	204,656	204,724	1,000	6000
2	250,251	255,017	1,019	250,146	253,782	1,015	11000
3	249,465	275,73	1,105	249,331	251,413	1,008	10000
4	281,266	283,083	1,006	281,154	283,031	1,007	11000



Obr. 42 Offline hodnoty odporu jednovrstvého AJP vzorku č. 1.



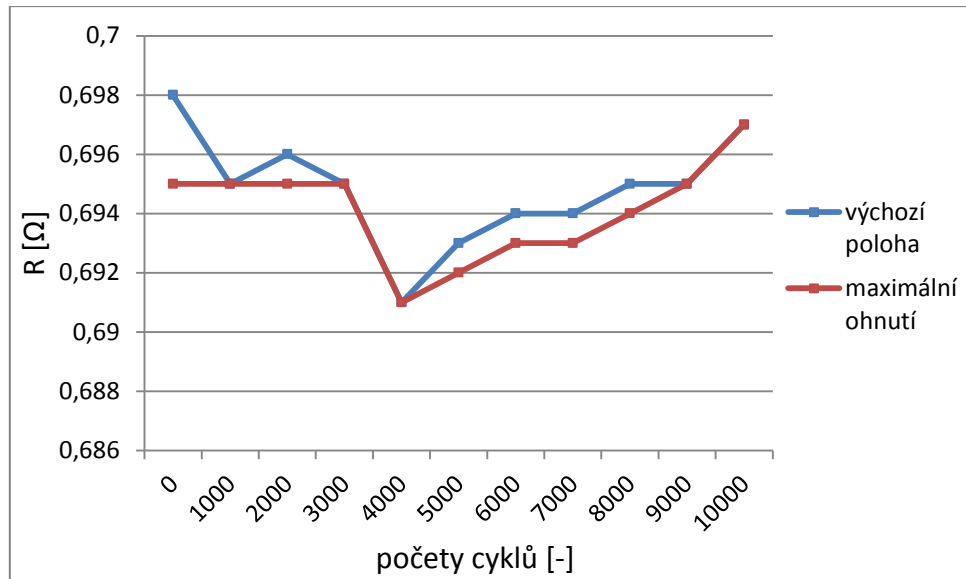
Obr. 43 Online hodnoty odporu jednovrstvého AJP vzorku č. 1 v několika cyklech.

3.4.3 Měření elektrického odporu vzorku na polyimidové fólii

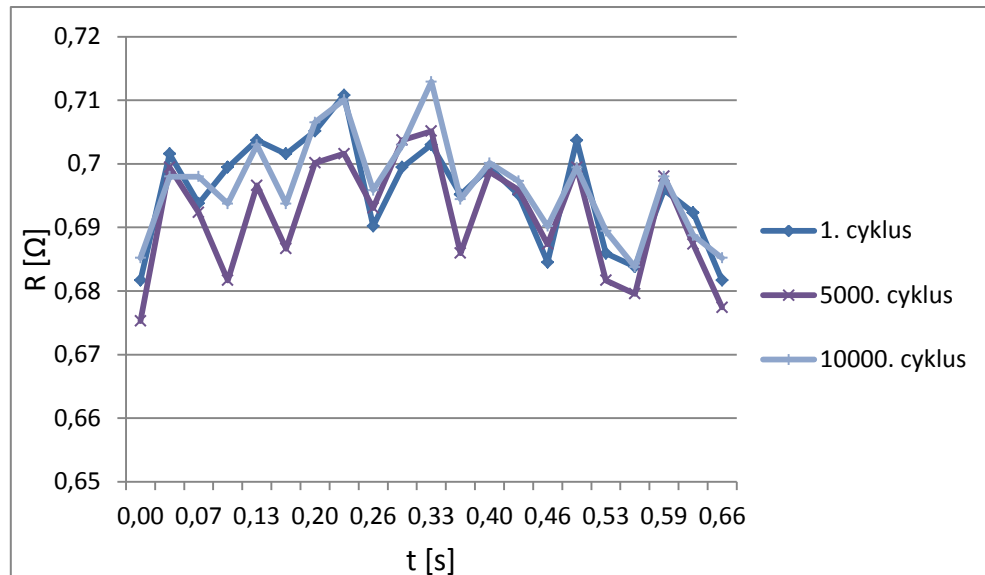
Kvůli extrémní flexibilitě kaptonových (polyamidových) substrátů bylo zvoleno testování pomocí maximálního ohybu dosažitelného měřicím přístrojem. Pohyblivá plošina se s upnutým vzorkem pohybovala po ližinách 100 mm směrem k upínacímu podstavci a zpět do výchozí polohy. Při tomto ohybu bylo nutné vložit mezi vnitřní plochy vzorku izolační materiál, aby nedocházelo k jejich dotyku a tím k jeho vyzkratování. Ačkoliv byla rychlost posuvné plošiny zvolena jako čtyřicetinasobek rychlosti pohybu plošiny použité pro testování čtyřvrstvých AJP vzorků, došlo ke zvýšení rychlosti ohybu oproti specifikacím v dokumentu IPC-TM-650 č. 2.4.3 o přibližně osminásobek, neboť došlo k pětinasobnému prodloužení dráhy posuvné plošiny oproti měření čtyřvrstvých AJP vzorků. Proud „Run Current“ byl v programu pro ovládání motoru nastaven na hodnotu 2,8 Arms. Počet kusů tohoto typu vyrobených pro účely testování byl v souladu s výše uvedenou normou. Všechny testované vzorky prošly 10 000 cykly ohybu bez známek degradace. Tabulka zobrazující výsledky měření je uvedena níže.

Tab. 3.5 Offline hodnoty el. odporu vzorků připravených na polyimidové fólii

n [-]	R1 ₀ [Ω]	R1 _{MAX} [Ω]	R1 _{MAX} /R1 ₀ [-]	R2 ₀ [Ω]	R2 _{MAX} [Ω]	R2 _{MAX} /R2 ₀ [-]	N [-]
1	0,698	0,697	0,999	0,695	0,697	1,003	10000
2	0,693	0,694	1,001	0,693	0,692	0,999	10000
3	0,695	0,696	1,001	0,694	0,695	1,001	10000
4	0,699	0,699	1,000	0,699	0,699	1,000	10000
5	0,692	0,692	1,000	0,692	0,692	1,000	10000
6	0,692	0,692	1,000	0,692	0,692	1,000	10000



Obr. 44 Offline hodnoty odporu vzorku č. 1 připraveném na polyimidové fólii.



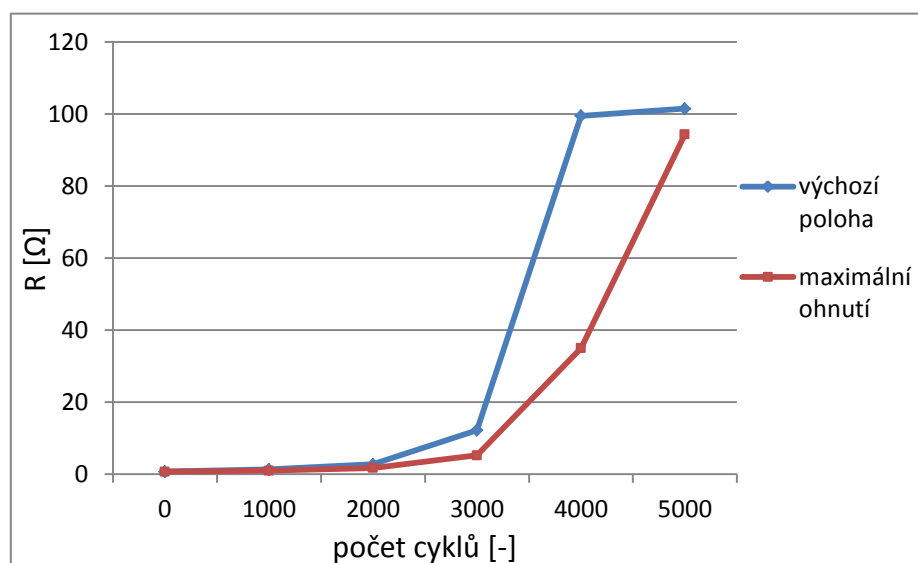
Obr. 45 Online hodnoty odporu vzorku č. 1 na polyimidové fólii v několika cyklech.

3.4.4 Měření elektrického odporu vzorku připraveného na sklolaminátu

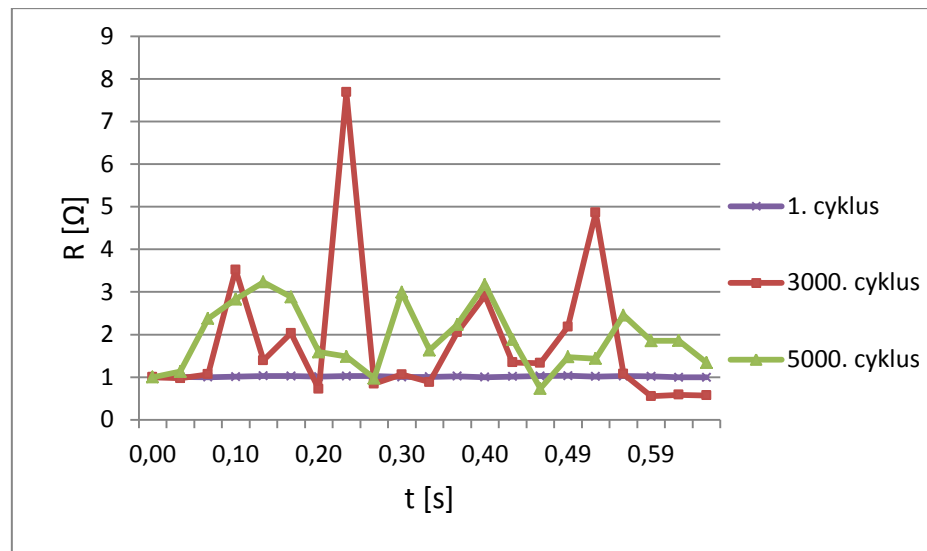
Testovací vzorky tohoto typu jsou podstatně méně ohebné než vzorky připravené na kaptonové fólii. Z tohoto důvodu byly zkoumané exempláře podrobeny 20 000 cyklů při standardním ohybu a s desetinásobnou rychlostí ohýbání než předepisuje norma IPC-TM-650 č. 2.4.3. Elektrický odpor se však po provedení všech cyklů průměrně zvýšil o méně než 1 %. Grafické zobrazení získaných hodnot při tomto nastavení není uvedeno v hlavní části práce a je k nalezení v příloze. Pro získání informací o chování těchto vzorků byly tedy podmínky testování nastaveny totožně s podmínkami testování vzorků na polyimidové fólii – maximální ohyb s čtyřicetinásobnou rychlostí pohybu vozíku. Při této metodice testování byly vzorky zatěžovány po dobu 5000 cyklů. Další testování již nebylo prováděno, neboť elektrický odpor vykazoval v online měření poruchy vzorku, ačkoliv toto poškození nebylo patrné z offline měření. Výsledky offline měření jsou zaznamenány v tabulce č. 3.6. Hodnoty online změřených odporů jsou v grafu znázorněny jako relativní hodnoty, vztažené k první hodnotě daného cyklu, neboť odpor vzorků s přibývajícím cykly rychle rostl a graf zobrazující absolutní hodnoty by zpříčinil zobrazení malých odporů jako konstantní přímku.

Tab. 3.6 Offline hodnoty el. odporu vzorků připravených na sklolaminátu

n [-]	R1 ₀ [Ω]	R1 _{MAX} [Ω]	R1 _{MAX} /R1 ₀ [-]	R2 ₀ [Ω]	R2 _{MAX} [Ω]	R2 _{MAX} /R2 ₀ [-]	N [-]
1	0,964	253,1	262,552	4,18	24,6	5,885167464	6000
2	1,342	87,9	65,499	0,999	19,35	19,36936937	6000
3	0,884	165,8	187,557	1,09	148,3	136,0550459	6000
4	0,746	74,3	99,598	0,748	48,8	65,24064171	6000
5	0,742	76,9	103,639	0,746	63,08	84,55764075	6000
6	0,76	80,9	106,447	0,789	95,01	120,418251	6000

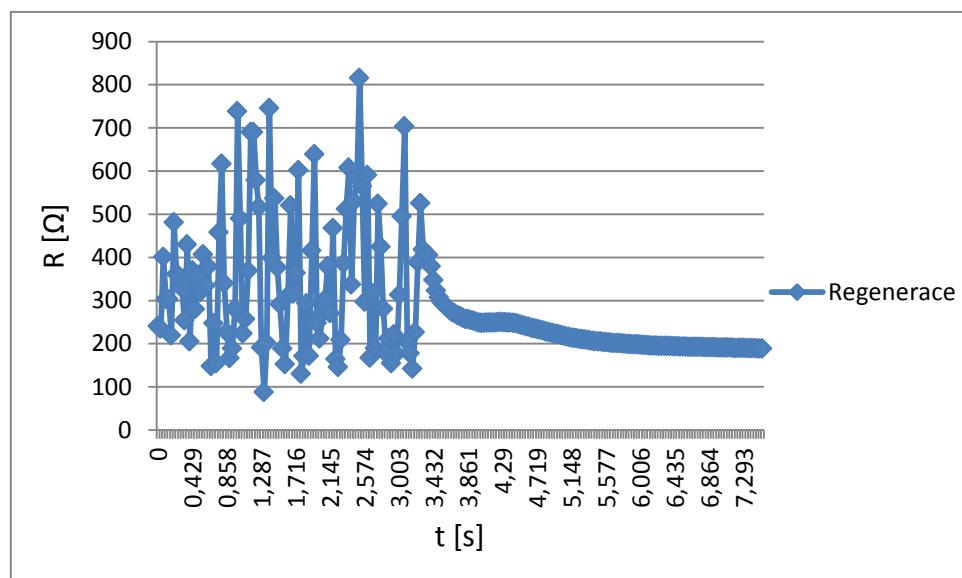


Obr. 46 Offline hodnoty odporu vzorku č. 2 připraveném na sklolaminátu.



Obr. 47 Online hodnoty odporu vzorku č. 2 připraveném na sklolaminátu.

Ačkoliv nebyla předmětem zkoumání regenerace vzorků po cyklickém namáhání, bylo toto chování pozorováno z offline hodnot, které byly pořízeny s odstupem alespoň jednoho dne. Z offline hodnot byla regenerace patrná u vzorků připravených na kaptonové fólii (obr. 44), u vzorků připravených na substrátu FR4 (příloha A) a u vzorků připravených sítotiskem (příloha C). Regenerace byla dále zaznamenána i při online měření laminátového vzorku č. 2, ze kterého je i nejlépe patrná. Z obrázku č. 48 je zřejmá změna elektrického odporu vlivem ohýbání vzorku, která probíhá až do znázorněného času ~ 3,3 sekundy. Po tomto čase je vzorek v natažené poloze a jeho odpor klesá, což lze označit jako regeneraci.



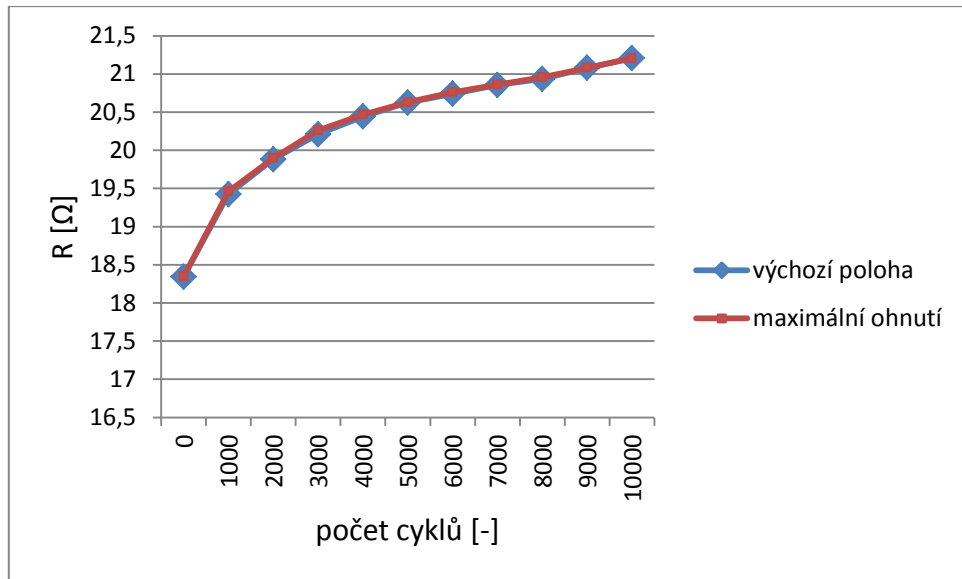
Obr. 48 Regenerační vlastnosti vzorku č. 2 připraveném na sklolaminátu.

3.4.5 Měření elektrického odporu vzorku připraveného sítotiskem

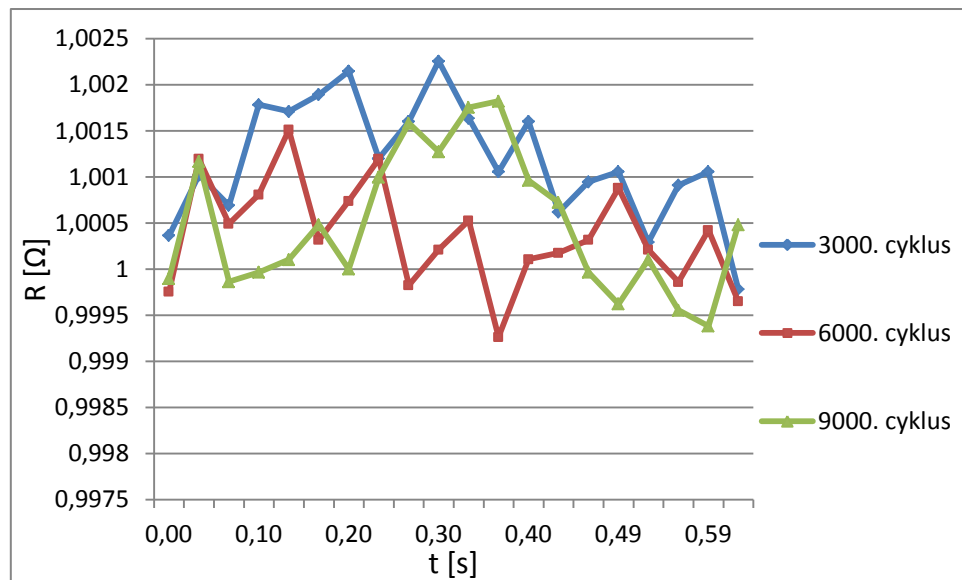
Jelikož nebyla známá adheze vodivé vrstvy, byly vzorky testovány 20 000 cykly dle normou deklarovaných pravidel. Toto zatížení nemělo na exempláře velký efekt. Grafické znázornění těchto hodnot je uvedeno v příloze. Vzorky byly dále tetovány stejnou rychlostí jako v předchozích dvou případech – počet provedených cyklů za minutu byl osmkrát vyšší než počet cyklů udávaných standardem IPC-TM-650 č. 2.4.3 a vzorek byl podroben maximálně proveditelnému ohybu. Všechny vzorky podstoupily 10 000 ohýbacích cyklů. Informace získané měřením těchto vzorků jsou uvedeny v tabulce 3.7 a dále jsou znázorněny na obrázku č. 49 a na obrázku č. 50. V tabulce je oranžově zvýrazněn řádek s použitým vzorkem, který byl použit pro znázornění vývoje offline hodnot elektrického odporu. Výsledky online měření jsou vyjádřeny jako relativní hodnoty, vztažené k první hodnotě daného cyklu, jelikož v absolutní hodnotě by je bylo možné zobrazit pouze jako konstantní přímky. V grafu online změřených hodnot odporu není znázorněno chování při nízkém počtu provedených cyklů, jelikož při měření docházelo k dotyku vnitřních ploch exempláře a tím ke zkratování vodivého vzoru. Tento fakt byl odhalen a napraven aplikací izolační vrstvy mezi stykové plochy až po provedení 2000 cyklů.

Tab. 3.7 Offline hodnoty el. odporu vzorků připravených metodou sítotisku

n [-]	R1 ₀ [Ω]	R1 _{MAX} [Ω]	R1 _{MAX} /R1 ₀ [-]	R2 ₀ [Ω]	R2 _{MAX} [Ω]	R2 _{MAX} /R2 ₀ [-]	N [-]
1	18,323	20,68	1,129	18,333	20,687	1,128	10000
2	18,342	21,205	1,156	18,345	21,208	1,156	10000
3	18,721	21,781	1,163	18,73	21,794	1,164	10000
4	18,13	20,426	1,127	18,134	20,429	1,127	10000
5	18,925	21,263	1,124	18,933	21,247	1,122	10000
6	15,171	16,797	1,107	15,166	16,783	1,107	10000



Obr. 49 Offline hodnoty odporu vzorku č. 2 připraveném technologií síťotisku.



Obr. 50 Online hodnoty odporu vzorku č. 1 připraveném technologií síťotisku.

4 Vyhodnocení experimentu a doporučení

Praktická měření vycházela z informací, získaných z normy IPC-TM-650 č. 2.4.3, která je nejvhodnější pro účely této diplomové práce. V tomto dokumentu však není přesně definované upnutí vzorků (např. umístění technologických otvorů). Při návrhu tohoto standardu se pravděpodobně neuvažovaly dnešní, vysoce ohebné materiály, které mohou být bezproblémově testovány i vyššími rychlostmi ohýbání. Zvýšená rychlost ohýbání, která byla pro měření použita, neměla patrný vliv na průběh testu či na samotné hodnoty el. odporu. Selhání vzorku lze nejdříve odhalit online měřením elektrického odporu, neboť při hodnotách získaných offline metodou, nemusí být poškození vzorku patrné. V případě použití offline metody je vhodné sledovat odpor jak ve výchozím stavu, tak ve stavu při maximálně ohnutém vzorku.

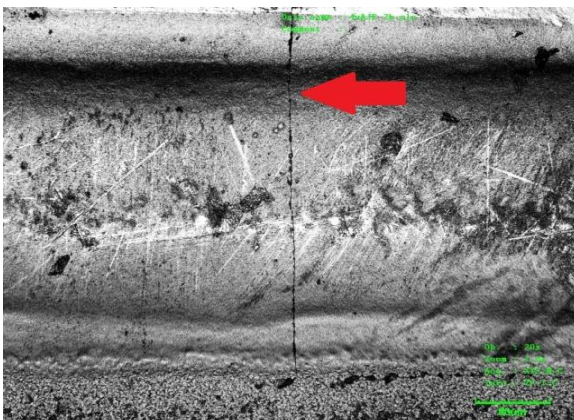
U všech vzorků mimo AJP vytvořeného v jedné vrstvě bylo možné sledovat předpokládané chování vzorku v průběhu cyklu. Nejvyšší elektrický odpor při maximálním ohybu nebyl u AJP vzorku připraveného v jedné vrstvě pozorován. Díky datům získaných pomocí online měření bylo možné vidět s cykly se zvětšující rozdíl mezi hodnotou změřenou ve výchozí poloze a v poloze s maximálním ohnutím. Tento jev však byl nejlépe vidět u čtyřvrstvého AJP vzorku, a proto byl znázorněn pouze na něm. Byly pozorovány regenerační procesy. Po úplném selhání vzorku připraveného metodou AJP ve čtyřech vrstvách a následném změření po několika hodinách, bylo možné opět naměřit hodnotu el. odporu.

Během práce bylo vyzorováno, že se testovaný vzorek značně namáhá i v místě jeho upnutí. Na straně vzorku, na které jsou vyvedeny vodivé dráhy pro kontaktování tak může dojít prasklinkám a tedy ke zničení vzorku. Pro minimalizaci tohoto namáhání je vhodné umístit upínací podstavec výše, než v jaké výšce se pohybuje posuvná plošina. Díky této optimalizaci dojde k orientaci smyčky na jednu ze stran, což lze využít tak, že se smyčka bude odklánět od místa spoje, pod kterým je vedena vodivá cesta motivu. Mechanické namáhání se tedy přesune na druhý spoj, pod kterým nejsou vedeny vodivé dráhy a oblasti pro kontaktování. U velmi ohebných substrátů jako je kapton je také možné orientovat smyčku pomocí tenkého motouzu, který jí prochází. Posouváním motouzu na jednu ze stran lze korigovat velikost namáhání ve spojích vzorku s místem upnutí.

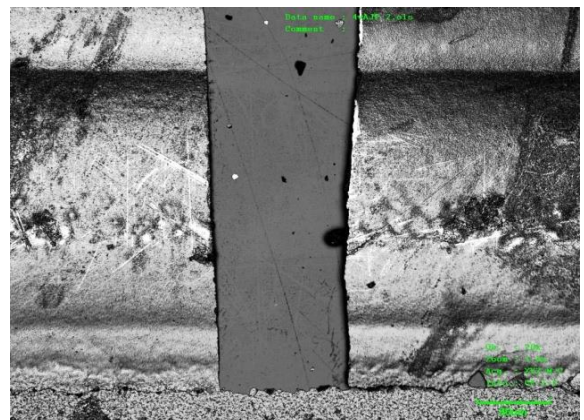
4.1 Vyhodnocení měření elektrického odporu čtyřvrstvého AJP vzorku

Tyto exempláře byly ze všech testovaných vzorků nejméně odolné vůči mechanickému namáhání ohybem. Mnoho z vzorků se poškodilo již během přípravných operací. Obvykle docházelo k vylamování segmentů vodivého vzoru, což bylo pravděpodobně způsobeno nízkou adhezí vodivého materiálu a velkým počtem vodivých vrstev, které způsobily nižší poddajnost. V případě, že došlo k odloupení vodivé dráhy, neznamenalo to obvykle okamžité selhání vzorku, neboť se jako první vylomila pouze nejtlustší oblast vodivého materiálu a tenký okraj vodivé cesty zůstal nepoškozen. Testované vzorky byly velmi rozdílné v počtu cyklů, kterým odolaly. U vzorku č. 5 došlo k selhání po 100 cyklech a u vzorku č. 4 nedošlo k selhání ani po 3400 cyklech.

Z grafu offline měření je dobře patrný růst elektrického odporu s přibývajícím cykly. Kolem cyklu 2800 došlo k poruše krokového motoru, což způsobilo jednorázové ohnutí vzorku na maximální možnou úroveň danou konstrukcí testovacího stroje. Tato chyba měla značný vliv na vývoj elektrického odporu, neboť došlo k nadměrnému namáhání již poškozeného exempláře. Graf online měřený odpovídá předpokládanému chování při periodickém ohýbání. Vzorky vykazují zvyšující se el. odpor se zvětšujícím se ohybem. Tento jev je méně patrný po krátkém testování, kdy ještě nedošlo k velkým strukturním změnám, a tak je rozdíl mezi el. odporem ve výchozím stavu a v ohnutém stavu malý. Na opak při delším testování dochází k dalším defektům a rozdíl mezi hodnotou elektrického odporu ve výchozím a ohnutém stavu je značný. Níže zobrazené mikroskopické snímky zobrazují charakter praskliny a oblasti s vylomeným vodivým vzorem.



Obr. 51 Mikroskopický snímek praskliny na čtyřvrstvého AJP vzorku při zvětšení 20x.



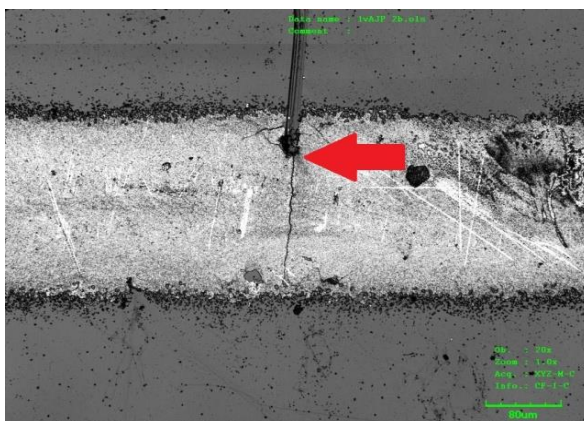
Obr. 52 Mikroskopický snímek vylomeného materiálu téhož vzorku při zvětšení 20x.

4.2 Vyhodnocení měření elektrického odporu jednovrstvého AJP vzorku

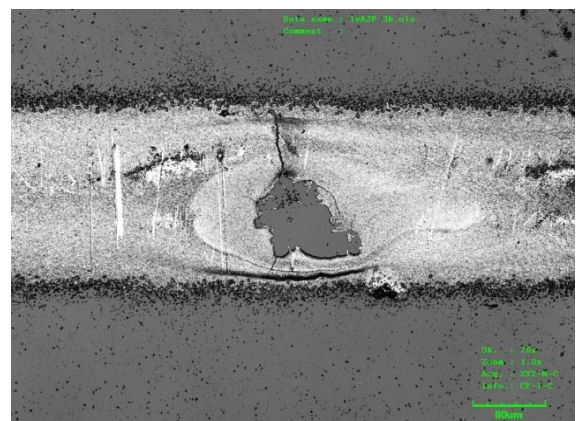
Bylo zjištěno, že vzorky připravené pomocí AJP metody pouze v jedné vrstvě jsou odolnější, než vzorky připravené čtyřmi vrstvami. To je pravděpodobně způsobené větší flexibilitou jedné vrstvy než většího počtu vrstev. Nevýhoda tohoto provedení je o řád vyšší odpor, který je způsoben výrobními nedokonalostmi. Pokud se ve vodivé cestě objeví defekt, či je vodivá cesta lokálně zúžena, nedojde k odstranění této chyby aplikováním další vrstvy, jak tomu bylo v předchozím případě. Tato vada způsobí snížení plochy, kterou může protékat proud a tím dojde ke zvýšení el. odporu.

Z výsledků offline měření lze usuzovat, že elektrický odpor s přibývajícímími cykly znatelně neroste. Z online měření není patrné, že je odpor vzorku závislý na jeho ohybu. Po překonání 10 000 cyklů docházelo ke zvýšení odporu o dva řády, ačkoliv tento fakt není patrný z offline měření. Toto zjištění signalizovalo začátek větších strukturních změn ve vodivém motivu, což mělo za následek brzké selhání vzorku.

Na mikroskopických obrázcích, které byly pořízeny při dvacetinásobném zvětšení, jsou znázorněny dva defekty vyskytující se u jednovrstvých AJP vzorků. K totálnímu selhání docházelo pouze v oblastech, kde byla přítomna výrobní vada.



Obr. 53 Defekt ve vodivé vrstvě způsobující selhání vzorku při zvětšení 20x.



Obr. 54 Defekt ve vodivé vrstvě způsobující selhání vzorku při zvětšení 20x.

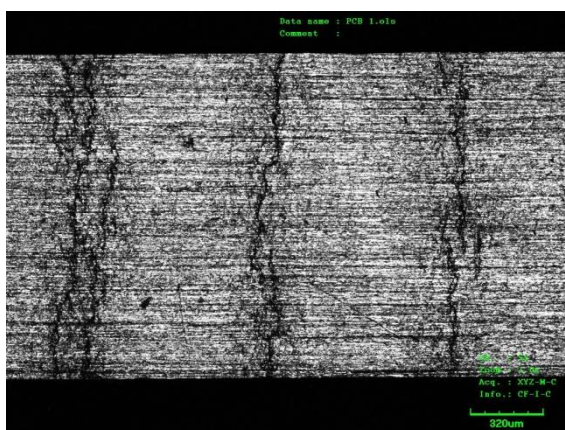
4.4 Vyhodnocení měření elektrického odporu vzorku na sklolaminátovém substrátu

Vzorky vyrobené na FR4 substrátu byly ze všech ostatních nejméně poddajné. Je však překvapivé, že po 20 000 standardních cyklech nedocházelo ke znatelnému zvýšení odporu. Lze je tedy doporučit pro nasazení v aplikacích, kde není vyžadována extrémní flexibilita.

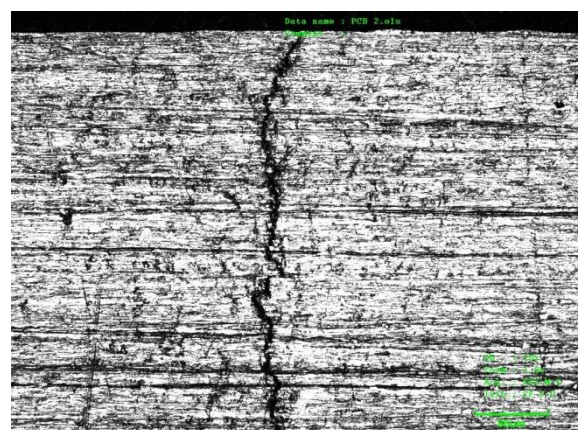
Z offline grafu měření el. odporu je zřejmé, že vzorky nejsou vhodné pro dlouhodobé namáhání větším ohybem. Již kolem 3000 cyklu docházelo k zvětšení odporu o jeden řád. S přibývajícím cykly bylo odečítání offline hodnot obtížnější, neboť ačkoliv se vzorek při měření nepohyboval, stále docházelo ke skokovým změnám odporu. Parametry vzorku byly tedy i v statickém stavu nestabilní. Z online grafu měření je taktéž dobře patrná nestálost elektrického odporu. V průběhu prvního cyklu se elektrický odpor nemění. To se však velmi rychle mění a po několika dalších tisících cyklech je pak chování el. odporu nepředvídatelné.

Z grafu offline měření, který je uveden v příloze, je dobře patrná regenerace při hodnotě el. odporu změřené v 4000. cyklu a v 13000. cyklu. Online graf hodnot, který je uveden v příloze, má předpokládaný charakter. Je patrné, že se vzorek chová při všech cyklech velmi podobně a vyvíjené zatížení na něj nemá velký vliv.

Podle předpokladů docházelo k praskání vodivého vzoru uprostřed vzorku – tedy v místě největšího ohybu. Tyto praskliny jsou dobře patrné již při pětinasobném zvětšení.



Obr. 57 Praskliny vzorku připraveného na substrátu FR4 při zvětšení 5x.



Obr. 58 Detail praskliny vzorku na substrátu FR4 při zvětšení 20x.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se v první části zaměřuje na požadavky kladené na mechanické vlastnosti flexibilních elektronických komponentů. Dále jsou v publikaci popsány normy a běžně používané metody pro testování flexibilní elektroniky. Na základě zjištěných postupů vhodných pro testování ohebné elektroniky byl pro tyto účely modifikován přístroj na depozici materiálů. Z nastudovaných technologických postupů pro ohyb flexibilní elektrotechniky byl jako nejvhodnější zvolen standard IPC-TM-650 č. 2.4.3, který byl upraven pro účely online a offline měření elektrického odporu s využitím laboratorního vybavení KET. Celkově bylo testováno 28 vzorků, které byly vyrobeny v pěti různých typech vyhotovení v souladu s navrženými úpravami vodivých motivů, a dále byly cyklicky namáhány ohybem. Tento způsob namáhání byl zvolen kvůli typickému využití flexibilní elektroniky a vnějším vlivům, kterým je tato elektronika vystavena.

Během praktické činnosti byl optimalizován skript na ovládání krokového motoru pro zajištění jeho dlouhodobého a rychlého chodu. Byly nalezeny nejvhodnější testovací podmínky a postupy pro budoucí zkoumání mechanických vlastností ohebné elektroniky v prostorách KET. Při měření byla objevena úskalí výše uvedeného standardu pro testování flexibilní elektroniky a navržena nejpříznivější opatření.

Bylo pořízeno několik miliónů hodnot popisujících chování testovaných vzorků, díky kterým lze označit vzorky připravené na kaptonové fólii jako nejspolehlivější a nejvhodnější pro nasazení ve flexibilní elektronice, neboť po 10 000 provedených ohýbacích cyklech nevykazovaly zvýšení elektrického odporu. Ačkoliv nebylo předmětem diplomové práce zkoumání regeneračních vlastností flexibilní elektroniky, byl tento jev pozorován a znázorněn v několika vyobrazeních.

Pro rozšíření této práce by bylo vhodné konzultovat a následně sestavit zařízení pro účely cyklického ohýbání flexibilní elektroniky přesně dle požadavků institutu, zabývajícího se návrhem standardů a norem. Pokračováním této studie by mohlo být praktické testování flexibilní elektroniky cyklickým namáháním v tahu, které zde bylo popsáno kvůli rozsahu práce pouze teoreticky. Tento dokument by dále mohl být námětem pro studii regeneračních vlastností, které byly v diplomové práci pozorovány.

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] TSAI, Chin-chin. Recent Development in Flexible Electronics [online]. Taiwan, 2011 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6015170>
- [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] WONG, William S a Alberto SALLEO. Flexible electronics: materials and applications. New York: Springer, c2009, xviii, 462 p.[cit. 2015-04-26]. ISBN 978-038-7743-639.
- [4] Simple, Inexpensive, and Reliable, High Density Interconnect Technology for Flexible Electronics Applications [online]. [cit. 2014-12-02]. Dostupné z:
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5069277&tag=1
- [5] Ultra-Thin Glass [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z:
http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/products/wafers-and-thin-glass/glass-wafer-and-substrates/ultra-thin-glass/index.html
- [6] HSU, P. I., R. BHATTACHARYA, H. GLESKOVA, M. HUANG, Z. XI, Z. SUO, S. WAGNER a J. C. STURM. Thin-film transistor circuits on large-area spherical surfaces. [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1063/1.1502199.
- [7] BHATTACHARYA, R., S. WAGNER, Yeh-Jiun TUNG, J.R. ESLER a M. HACK. Organic LED Pixel Array on a Dome. [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1109/jproc.2005.851536.
- [8] BHATTACHARYA, R., S. WAGNER, Y.-J. TUNG, J. ESLER a M. HACK. Plastic deformation of a continuous organic light emitting surface. [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1007/springerreference_26029.
- [9] LACOUR, Stéphanie Périchon, Sigurd WAGNER, Zhenyu HUANG a Z. SUO. Stretchable gold conductors on elastomeric substrates. [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1002/9780470405789.ch18.
- [10] GRAY, D. S., J. TIEN a C. S. CHEN. High-Conductivity Elastomeric Electronics (Adv. Mater. 2004, 16, 393.). [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1002/adma.200490017.

- [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] MACDONALD, William A., Bill A. MACDONALD, Keith ROLLINS, Duncan MACKERRON, Karl RAKOS, Robert EVESON, Katsuyuki HASHIMOTO a Bob RUSTIN. Engineered films for display technologies. [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1002/0470870508.ch2.
- [14] 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].
- [15] AFENTAKIS, T., M. HATALIS, A.T. VOUSAS 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.
- [16] MELICHAR, Bohuslav. Výrobní technologie pro tištěnou a flexibilní elektroniku. Plzeň, 2013. bakalářská práce (Bc.). ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Fakulta elektrotechnická, [cit. 2015-04-26].
- [17] Roll to Roll (R2R) Processing Technology Assessment [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: [http://energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/QTR Ch8 - Roll To Roll Processing TA Feb-13-2015.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/QTR_Ch8_-_Roll_To_Roll_Processing_TA_Feb-13-2015.pdf)
- [18] JAGANNATHAN, Lakshmi. Organic and Printed Electronics for Biological Microfluidic Applications [online]. 2010[cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2012/EECS-2012-84.pdf>
- [19] CHANG, Joseph, Xi ZHANG, Tong GE a Jia ZHOU. Fully printed electronics on flexible substrates: High gain amplifiers and DAC. [online]. 2014 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566119913005685>
- [20] CHANGE, Joseph, Tong GE a Edgar SANCHEZ-SINENCIO. Challenges of Printed Electronics on Flexible Substrates [online]. [cit. 2015-04-26]. ISBN 978-1-4673-2527-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6292087>

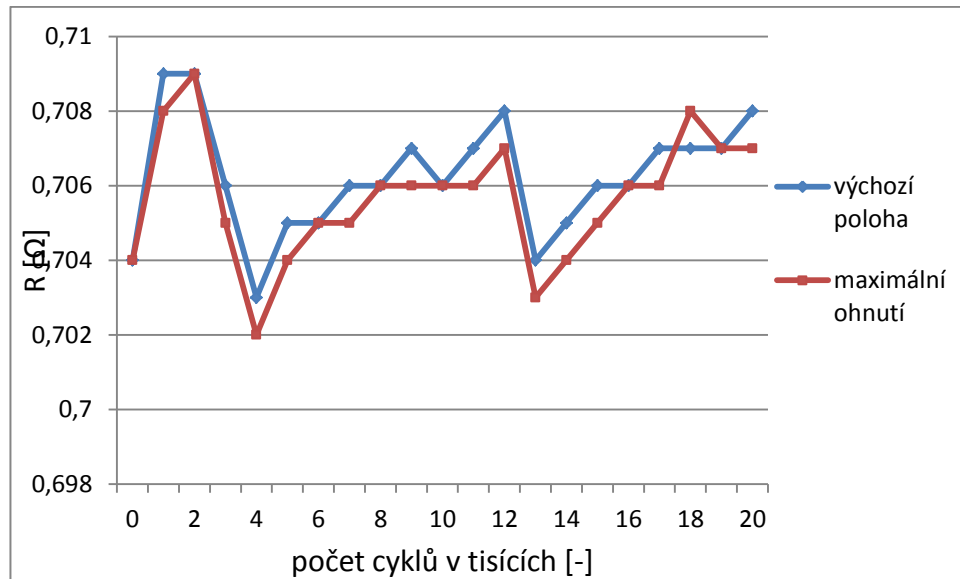
- [21] Rigid-Flex Circuits. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.fpcbinc.com/products/rigid-flex-pcbs.html>
- [22] Printed flexible electronics enabling new integrated systems: Katalog. In: [online]. [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://www.ee.princeton.edu/events/printed-flexible-electronics-enabling-new-integrated-systems>
- [23] Flexible circuit industry standards: Katalog. In: [online]. [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_electronics#Flexible_circuit_industry_standards_and_specifications
- [24] FJELSTAD, Joseph. Flexible circuit technology. [3nd ed.]. Sunnyvale, CA: Silicon Valley Publishers Group, c1998, v, 217 p. ISBN 09-667-0750-8.
- [25] 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)
- [26] IPC-6011 Generic Performance Specification for Printed Boards [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: www.ipc.org/TOC/IPC-6011.pdf
- [27] MIL-P-50884E, MILITARY SPECIFICATION PRINTED WIRING BOARD, FLEXIBLE OR RIGID-FLEX, GENERAL SPECIFICATION [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-P/MIL-P-50884E_12785/
- [28] MIL-PRF-31032B, PERFORMANCE SPECIFICATION PRINTED CIRCUIT BOARD/PRINTED WIRING BOARD, GENERAL SPECIFICATION [online]. 2012 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-PRF-31032B1.pdf>
- [29] IPC-JPCA-6202, Performance Guide Manual for Single- and Double-Sided Flexible Printed Wiring Boards [online]. 1999 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: www.ipc.org/TOC/IPC-JPCA-6202.pdf
- [30] IPC-TF-870, Qualification and Performance of Polymer Thick Film Printed Boards [online]. 1989 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: www.ipc.org/TOC/IPC-TF-870.pdf

- [31] IPC-A-600G Acceptability of Printed Boards [online]. 2004. vyd. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://www.gcb.com.hk/images/gcb_database/ipc-a-600g.pdf
- [32] Glossary of PCB Production Terms: Commonly Used PCB Production Terms and PCB Definitions. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.sfcircuits.com/pcb-production-capabilities/pcb-terms-glossary>
- [33] IPC J-STD-003B Solderability Tests for Printed Boards. 2003. Dostupné z: <http://www.ipc.org/TOC/J-STD-003B.pdf>
- [34] ASTM E 796 – 94 Standard Test Method for Ductility Testing of Metallic Foil. Dostupné z: http://www.aryatajhiz.com/userfiles/ASTM/E796_94R00_RTC5NG.pdf
- [35] 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>
- [36] 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>
- [37] 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>
- [38] European Standard EN ISO 178: Plastics Determination of flexural properties. Dostupné z: <http://211.67.52.20:8088/xitong/BZ\9516771.pdf>
- [39] 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/>
- [40] IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL č. 2.4.18.1: Tensile Strength and Elongation, In-House Plating [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2.4.18.1A.pdf>
- [41] 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

- [42] ASTM D 882 – 02 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://tankpaint.com/wp-content/uploads/D882-02-Thin-Plastic-Sheeting.pdf>
- [43] 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>
- [44] 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>
- [45] 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>
- [46] Testing flexible electronics. [online]. [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://dashdotrobot.com/2012/05/16/testing-flexible-electronics/>.
- [47] 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.
- [48] BENSaid, B., X. BODDAERT, P. BENABEN, R. GWOZIECKI a R. COPPARD. Reliability of OTFTs on flexible substrate: mechanical stress effect. [cit. 2015-04-26]. ISBN 10.1051/epjap/2011100426.
- [49] 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.
- [50] Two-point bending tester and test setup. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/amse/2015/106424/fig5/>
- [51] GLUSHKO. <http://uloz.to/xyWww9bD/lopec-2015-sc-patterning-glushko-erich-schmid-inst-pdf>: <http://uloz.to/xyWww9bD/lopec-2015-sc-patterning-glushko-erich-schmid-inst-pdf> [online]. 2015. vyd. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://uloz.to/xyWww9bD/lopec-2015-sc-patterning-glushko-erich-schmid-inst-pdf>

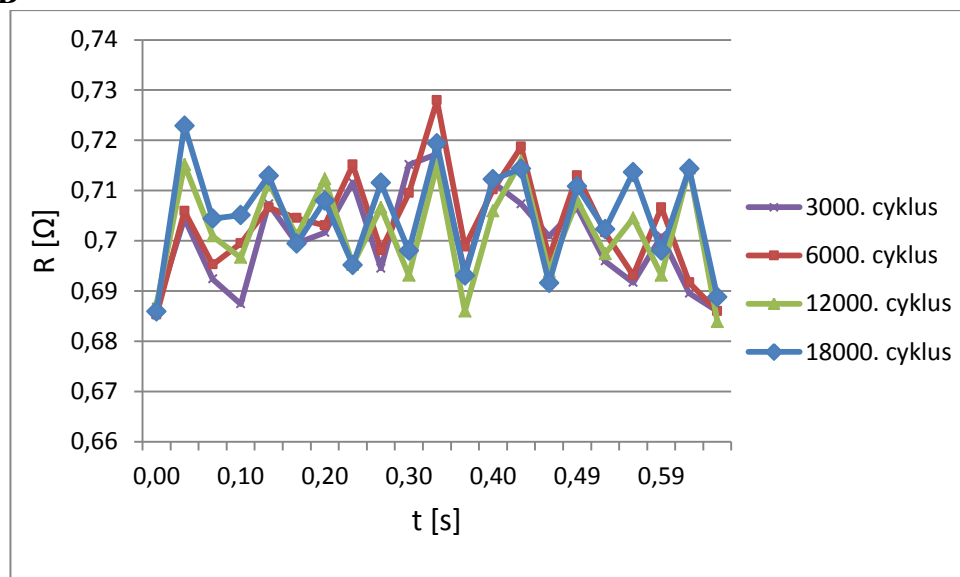
PŘÍLOHY

Příloha A



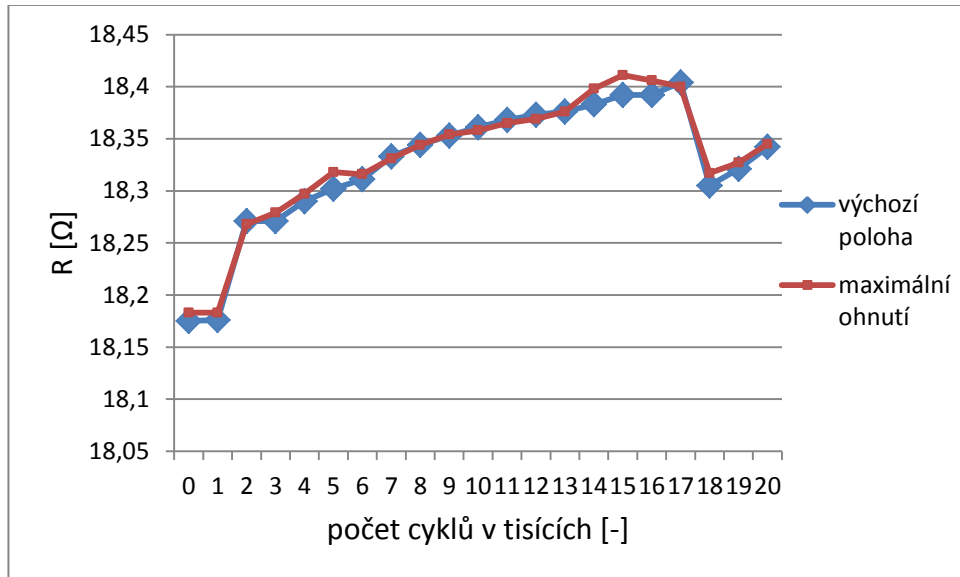
Offline hodnoty odporu vzorku č. 2 připraveném na sklolaminátu měřené při ohybu deklarovaným normou IPC-TM-650 č. 2.4.3 s patrnou regenerací při 4000 a 13000 cyklech.

Příloha B



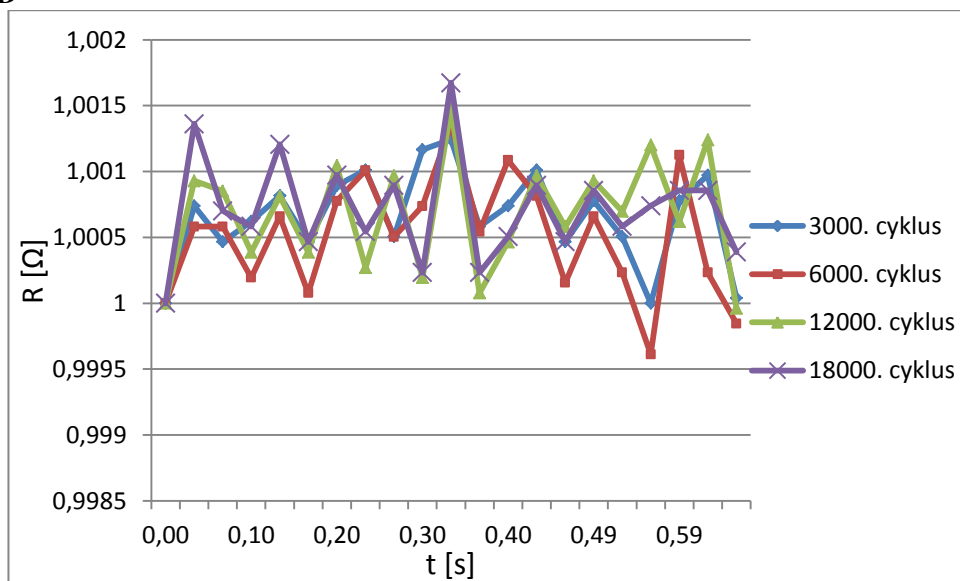
Online hodnoty odporu vzorku č. 2 připraveném na sklolaminátu měřené při ohybu deklarovaným normou IPC-TM-650 č. 2.4.3.

Příloha C



Offline hodnoty odporu vzorku č. 2 připraveném technologií síťotisku měřené při ohybu deklarovaným normou IPC-TM-650 č. 2.4.3 s patrnou regenerací při 18000 cyklech.

Příloha D



Online hodnoty odporu vzorku č. 1 připraveném technologií síťotisku měřené při ohybu deklarovaným normou IPC-TM-650 č. 2.4.3.