

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Kontaktování tištěných vodivých motivů na flexibilních  
substrátech**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**Fakulta elektrotechnická**

**Akademický rok: 2018/2019**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav ZIGO**  
Osobní číslo: **E17N0031P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Kontaktování tištěných vodivých motivů na flexibilních substrátech**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Seznamte se s metodami a postupy používanými pro vytváření kontaktů na flexibilních substrátech s tištěnými vodivými motivy.
2. Vyhledejte vhodné testovací postupy pro stanovení klíčových elektrických a mechanických parametrů a odolnosti kontaktních struktur na flexibilních substrátech.
3. Navrhněte a realizujte testovací vzorky nezbytné přípravky pro měření vybraných parametrů kontaktních struktur na flexibilních substrátech.
4. Na sérii vzorků prakticky realizujte kontaktní struktury, proveďte měření a získané výsledky zhodnoťte.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

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

Seznam odborné literatury:

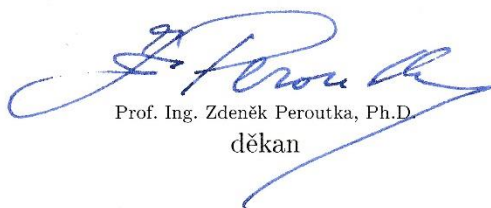
1. **William S. Wong, Alberto Salleo, Flexible Electronics: Materials and Applications, Springer, 2009, ISBN 978-0-387-74363-9**
2. **Joseph Fjelstad, Flexible Circuit Technology, BR Publishing, 2011**
3. **Elektronické informační zdroje (Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Wiley Online Library, AIP Scitation, Google Scholar, ResearchGate, Mendeley ...)**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Řeboun, Ph.D.**

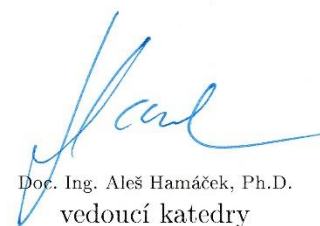
Katedra technologií a měření

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

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**



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



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

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je zaměřena na způsoby kontaktování tištěných vodivých motivů na flexibilních substrátech. Práce obsahuje základní přehled substrátů, aditivních technologií tisku na flexibilních substrátech a možné způsoby jejich kontaktování. Dále jsou zde popsány vhodné testovací postupy elektrických kontaktů, pomocí kterých je možné zkoumat jejich kvalitu a spolehlivost. V praktické části je poté popsán návrh a výroba testovacích vzorků pomocí technologie krimpování a odporového svařování. Tyto vzorky jsou následně testovány klimatickými a mechanickými zátěžovými testy. Mezi užitými klimatickými zkouškami je suché teplo, vlhké teplo a změna teploty. Z mechanických testů byl použit bend a pull off test. Obecně v zátěžových testech obstály lépe vzorky vytvořené pomocí technologie krimpování, ale při použití správných materiálů a vhodně optimalizované strojové výroby je možné pomocí technologie svařování dosáhnout v některých aplikacích vhodnějších spojů.

## **Klíčová slova**

Kontaktování, flexibilní substrát, krimpování, odporové svařování, vodič, zátěžové testy, odpor kontaktu

## **Abstract**

This thesis is focused on methods of contacting printed conductive motifs on flexible substrates. The work contains a basic overview of substrates, additive printing technologies on flexible substrates and possible ways of contacting them. In addition, suitable electrical contact testing procedures are described to examine their quality and reliability. The practical part then describes the design and production of test samples using crimping and resistance welding technology. These samples are then tested by climatic and mechanical stress tests. Among the climatic tests used are dry heat, wet heat and temperature change. The mechanical tests used bend and pull off test. Generally, in stress tests, crimp technology samples were better suited, but by using the right materials and appropriately optimized machine production, more suitable joints can be achieved in some applications using welding technology.

## **Key words**

Contacting, flexible substrate, crimping, resistance welding, conductor, stress tests, contact resistance

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 27.5.2019

Miroslav Zigo

## **Poděkování**

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

# Obsah

ÚVOD .....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	10
<b>1 SUBSTRÁTY .....</b>	<b>11</b>
1.1 PEVNÉ SUBSTRÁTY .....	13
1.2 FLEXIBILNÍ SUBSTRÁTY .....	15
<b>2 TVORBA MOTIVŮ NA FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTECH VYUŽITÍM ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ.....</b>	<b>17</b>
2.1 KONTAKTNÍ TECHNOLOGIE .....	17
2.1.1 <i>Sítotisk</i> .....	17
2.1.2 <i>Flexotisk</i> .....	19
2.1.3 <i>Hlubitisk</i> .....	19
2.1.4 <i>Porovnání kontaktních technologií</i> .....	20
2.1.5 <i>Roll-to-Roll</i> .....	21
2.2 BEZKONTAKTNÍ TECHNOLOGIE .....	21
2.2.1 <i>Inkjet printing</i> .....	21
2.2.2 <i>Aerosol Jet</i> .....	22
<b>3 ZPŮSOBY VODIVÉHO KONTAKTOVÁNÍ.....</b>	<b>24</b>
3.1 PÁJENÍ.....	24
3.2 VODIVÉ LEPENÍ .....	25
3.3 KRIMPOVÁNÍ.....	26
3.4 ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	27
<b>4 ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ ELEKTRICKÝCH KONTAKTŮ.....</b>	<b>29</b>
4.1 PŘECHODOVÝ ODPOR KONTAKTU .....	29
4.2 KLIMATICKÉ TESTY .....	31
4.3 MECHANICKÉ TESTY .....	32
<b>5 NÁVRH A REALIZACE TESTOVACÍCH VZORKŮ .....</b>	<b>34</b>
5.1 NÁVRH TIŠTĚNÉHO VODIVÉHO MOTIVU .....	34
5.2 REALIZACE VODIVÉHO MOTIVU NA SUBSTRÁTECH .....	35
5.3 REALIZACE VZORKŮ POMOCÍ KRIMPOVÁNÍ .....	36
5.4 REALIZACE VZORKŮ POMOCÍ ODPOROVÉHO SVAŘOVÁNÍ .....	37
5.4.1 <i>Výběr vodiče</i> .....	37
5.4.2 <i>Realizace vodivého spoje</i> .....	38
<b>6 TESTOVÁNÍ VODIVÉHO SPOJENÍ.....</b>	<b>43</b>
6.1 POČÁTEČNÍ PARAMETRY TESTOVANÝCH VZORKŮ .....	44
6.2 KLIMATICKÉ TESTY .....	46
6.2.1 <i>Suché teplo</i> .....	46
6.2.2 <i>Vlhké teplo</i> .....	50
6.2.3 <i>Změna teploty</i> .....	54
6.3 MECHANICKÉ TESTY .....	58
6.3.1 <i>Bend test</i> .....	58
6.3.2 <i>Pull off test</i> .....	60
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>64</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>66</b>



## Úvod

Flexibilní elektronika v dnešní době začíná ve spoustě aplikacích nahrazovat tu konvenční elektroniku založenou na pevných konstrukcích. Velký rozmach zaznamenaly například tisknuté antény, RFID systémy a fotovoltaické či zobrazovací panely na flexibilních substrátech. Stejně tak se flexibilní substráty díky své ohebnosti v přístrojích využívají k propojování součástek. Jejich větší využití ale brzdí dosud nevyřešená problematika kontaktování vycházející ze samotné podstaty flexibilních substrátů, tj. z požadavku na jejich ohebnost. Aby byly substráty ohebné, jsou mnohdy tvořeny velmi tenkými polymerními vrstvami. Vodivé motivy na těchto substrátech jsou zpravidla tvořeny tiskovými technikami pomocí metalických past s polymerním pojivem. Vodivé motivy jsou tedy ve většině případů nepájitelné a substráty vykazují nízkou tepelnou odolnost. Vzhledem k tomu, že se flexibilní elektronika bude objevovat v čím dál více aplikacích, tak účelem této práce je nalézt a ověřit nové možnosti vytváření vodivých spojení na flexibilních substrátech s tištěnými vodivými motivy a detailně tato vodivá spojení otestovat.

První čtyři kapitoly této práce jsou věnovány teoretické části. Zaměřeny jsou na používané typy substrátů, jak je možné pomocí aditivních technologií na nich vytvořit vodivý motiv a jak tento motiv následně kontaktovat. Poslední část teoretické části pak představuje metody, pomocí kterých je možné tyto vytvořené vodivé spoje testovat.

Finální dvě kapitoly této práce se poté věnují praktické části. Pátá kapitola obsahuje návrh a realizaci jednotlivých testovacích vzorků vodivých spojení, které byly vytvořeny pomocí technologie krimpování a odporového svařování. V poslední kapitole jsou poté představeny jednotlivé provedené testy a zároveň jsou prezentována naměřená data. Na závěr je uvedeno vyhodnocení celé práce.

## Seznam symbolů a zkratk

3D .....	Trojrozměrný
Ag .....	Stříbro
AJP .....	Aerosol Jet printing
Al .....	Hliník
Au .....	Zlato
CAD.....	Computer Aided Design
CEM-1 .....	Kompozitní substrát
Cu .....	Měď
DoD .....	Drop-on-Demand
FR-4.....	Epoxidový substrát
IPT .....	Inkjet printing
Ni .....	Nikl
Pb.....	Olovo
PEN.....	Polyethylenaftalát
PET.....	Polyethylentereftalát
PI.....	Polyimid
PTFE.....	Polytetrafluorethylen
R2R.....	Roll-to-Roll technologie
Sn.....	Cín
TCE.....	Koeficient tepelné roztažnosti
Ti.....	Titan
ZČU .....	Západočeská univerzita v Plzni
Zn.....	Zinek

# 1 Substráty

Pro jednoduché pochopení pojmu substrát, si můžeme představit jakýkoliv nosný materiál, na který následně umístíme například elektronické součástky nebo na něj nanášíme funkční či grafické motivy a jiné. Nejjednodušší příklad může být například novinový papír, který tvoří základní substrát a poté na něj natiskneme text. Z elektrotechnických substrátů můžeme zmínit pevný kompozitní epoxidový substrát FR-4, který se stal jakýmsi světovým standardem [1].

V elektrotechnice substráty nejčastěji tvoří nosnou plochu pro elektronické součástky a také pro nanášené vodivé motivy, kterými jednotlivé součástky vodivě spojíme. Konstrukce u většiny substrátů je tvořena ze tří základních částí – výztuž, vodič a dielektrikum. Jinak tomu může být u flexibilních substrátů, které obsahují výztuž pouze lokálně nebo vůbec. Nejčastěji používané materiály podle [1] pro tyto části můžeme vidět v *Tab. 1*.

*Tab. 1 Přehled složek základního materiálu [1].*

Výztuž	Dielektrikum	Vodič
Bez výztuže	epoxid	měď
Skelná tkanina	fenol	nikl
Bavlněný papír	bismaleimid-triazin	měď/invar/měď
Buničitý papír	modifikovaný epoxid	měď/molybden/měď
Netkané skelné vlákno	polyamid	nikl/měď
Křemenné sklo	kyanatan esteru	
Aramidová tkanina	PTFE	
Netkané aramidové vlákno	polyester	
Lehčená PTFE tkanina	melamin	
Kevlarové vlákno		
Skelná rohož		

Samozřejmě existuje velké množství substrátů, ovšem ne každý je vhodný pro námi požadované řešení. Proto je třeba dbát na námi požadované mechanické, tepelné a v neposlední řadě i elektrické vlastnosti substrátu.

## Mechanické vlastnosti

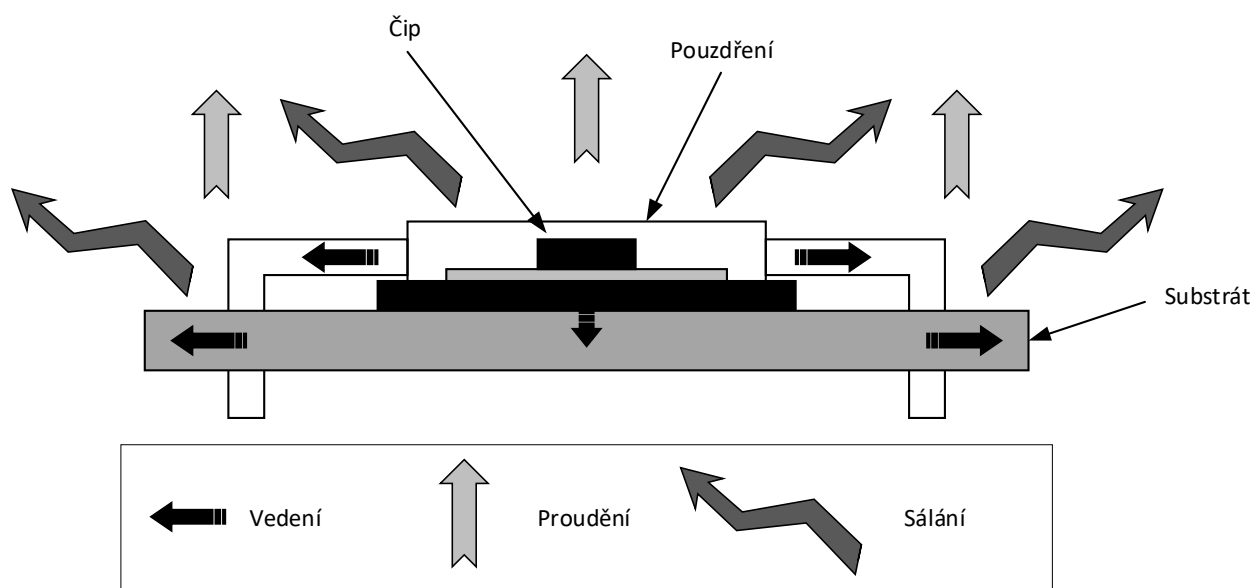
Vzhledem k modernímu přístupu v elektrotechnice, kdy se veškeré součástky zmenšují, je kladen větší důraz na mechanické vlastnosti substrátů. Ty totiž v dnešní době na sobě obsahují velmi složité a jemné motivy, které by nemusely správně fungovat, pokud se substrát bude jakkoliv deformovat či roztahovat. Těmi nejdůležitějšími mechanickými vlastnostmi podle [1] a [2] jsou:

- stálost rozměrů,
- odolnost proti roztržení,
- flexibilita/pevnost,
- nehořlavost,
- odolnost vůči výrobnímu a provoznímu prostředí,
- tepelná roztažnost,
- nasákavost vodou.

## Tepelné vlastnosti

Při provozu každé elektrické součástky se spotřebovává elektrická energie. To má za následek také přeměnu elektrické energie na energii tepelnou. Toto teplo ovšem negativně ovlivňuje pracovní podmínky pro součástky, které touto tepelnou změnou mohou začít fungovat jinak, například vlivem změny velikostí odporů či zesílení u tranzistorů. Zároveň teplo přispívá k rychlejší degradaci použitých materiálů, čímž přímo ovlivňuje spolehlivost a funkčnost celého systému. Proto je třeba předem myslet na odvádění tohoto nežádoucího tepla. K tomu samozřejmě musejí být uzpůsobeny i substráty, na kterých jsou tyto elektrické součástky umístěny, aby lépe toto teplo odváděly.[1],[3]

Odvod tohoto tepla se zajišťuje kombinací vedení, proudění a sálání. Vedení odvádí teplo trojdimenzionálně z místa s vyšší teplotou, do místa s teplotou nižší. Proudění se využívá hlavně externě a nejčastěji je využíván vzduch. Proudění je možno zefektivnit pomocí ventilátorů. Poslední typ sálání v elektrotechnice nemá moc velké využití, kvůli své nízké účinnosti v rozsazích teplot, při kterých je používána.[1]



Obr. 1 Teorie tepelného přenosu (převzato a upraveno z [3]).

## Elektrické vlastnosti

Prakticky nejdůležitější elektrickou vlastností substrátu je jeho vnitřní a povrchová rezistivita. Vzhledem k již zmíněnému trendu zmenšování, tak substráty dosahují hodnot až například  $10^{15} \Omega\text{cm}$ . Dále pak je velmi důležitá hodnota relativní permitivity a ztrátového činitele, a to obzvláště u obvodů pro vyšší frekvence. Méně významná je již dnes elektrická pevnost, jelikož se již používají ve většině aplikací velmi malá napětí.[1]

### 1.1 Pevné substráty

Tyto substráty můžeme rozdělit na 3 základní skupiny:

- organické,
- anorganické,
- kompozitní.

## Organické substráty

Jsou nejčastěji tvořeny z fenolické či epoxidové pryskyřice. Ta tvoří u těchto substrátů až dvě třetiny stavebního materiálu. S přibývajícím procentem pryskyřice se zvyšuje tvrdost, ale bohužel i nežádoucí křehkost. Výhodou je nízká cena a výborné elektrické vlastnosti. Mezi tyto substráty patří již zmíněný typ FR-4.[1],[4]



Obr. 2 Organický substrát typu FR-4.

## Anorganické substráty

Používají se pouze pro speciální konstrukce a jsou výhradně neohebné. Základním materiálem bývá korundová keramika. Další možností je beryliová keramika, ale ta se kvůli své toxicitě využívá spíše výjimečně. Mají velmi dobrou tepelnou vodivost a chemickou odolnost a velmi nízký koeficient tepelné roztažnosti (TCE). Naproti tomu jejich nevýhodou bývá vyšší hmotnost, cena a omezená použitelnost.[1],[4]

## Kompozitní substráty

Kompozitní substráty využívají kombinaci různých materiálů k dosažení co nejlepších požadovaných vlastností. Nejčastěji se využívá vlastností papíru a skla a typickým zástupcem je CEM-1. Ten má jádro z epoxidem impregnovaného celulózového papíru a z obou stran je pokryt vrstvou skloepoxidového prepregu. Tím kombinuje dobrou děrovatelnost, nízkou cenu a rozměrovou stabilitu.[1]

## 1.2 Flexibilní substráty

Flexibilní elektronika má již dlouhou historii. Již před čtyřiceti roky byly zúženy monokrystalické solární články na tloušťku přibližně 100  $\mu\text{m}$ , aby byl zlepšen jejich poměr výkon/hmotnost v aplikaci pro satelity. Jelikož tyto články byly opravdu tenké, byly flexibilní. V dnešní době se tedy spousta elektrických obvodů ubírá tímto směrem. Velké uplatnění flexibilní elektroniky je a bude především ve zdravotnictví a u záchranných složek. Zde se využívá flexibilních senzorů umístěných přímo v oblečení či výstroji k monitorování životních funkcí nositele či okolního prostředí. Toto je jen jedno z mála praktických využití flexibilních substrátů a elektroniky obecně.[5]

Flexibilita substrátu  $D$  je dána podle [5] vzorcem:

$$D = \frac{Et^3}{12*(1-\nu^2)} \quad (1.1)$$

kde  $E$  je Youngův modul pružnosti,  $t$  je tloušťka substrátu a  $\nu$  je Poissonův poměr.

Flexibilní substráty mohou být vyrobeny z tradičních materiálů pro klasické substráty, ovšem v elektrotechnice se většinou volí polymerní materiály. Hlavní změnou je, že postrádají výztuž, která se objevuje jen lokálně, pokud je třeba zpevnit místo na plošném spoji kde například bude nějaká součástka nebo konektor.

### Základní materiál

Základním materiálem pro tento typ substrátů je většinou tenký ohebný polymerní film, který zajišťuje základ pro laminát a další nanášené vrstvy. Za normální okolností poskytuje tento flexibilní film většinu fyzikálních a elektrických vlastností daného obvodu. Tloušťka většiny pružných fólií je v rozmezí od 12  $\mu\text{m}$  do 125  $\mu\text{m}$ . Je třeba pamatovat také na to, že pokud zdvojnásobíme tloušťku, dosáhneme osmkrát větší tvrdosti a pouze osminové ohebnosti.[2]

Jako základní materiál se podle [1] a [4] nejčastěji objevují:

- Polyimid PI (Kapton) – teploty až 400 °C (stálá pracovní teplota 135 °C),

- Polyester (Mylar) – použití omezeno do 85 °C,
- PET folie (Melinex) – použití do 150 °C,
- PEN folie (Teonex) – použití také do 150 °C.

Největšímu využití se v dnešní době těší polyimid a polyester. Velkou předností polyimidu je velká spolehlivost, díky čemuž se využívá i v armádě a lékařství. Další předností je jeho skvělá flexibilita ve velkém rozsahu teplot (do 400 °C), dobré elektrické vlastnosti, výborná chemická odolnost, velmi dobrá odolnost proti roztržení a vysoká pevnost v tahu. Nevýhodou je ovšem absorpce vlhkosti a cena v porovnání s polyesterem. Polyester je naopak levný, má malou absorpci vlhkosti, dobré elektrické vlastnosti a chemickou odolnost. Je ovšem nevhodný pro využití při velmi nízkých teplotách (polymer se stane křehkým) a kvůli nízké maximální přípustné teplotě je neslučitelný s technologií pájení.[1],[2]

### **Spojovací lepidlo**

Dále je přítomna flexibilní adhezivní vrstva lepidla. Ta buď slouží jako spojovací médium pro vytvoření laminátu, respektive spojení základního materiálu s kovovou folií, která je zmíněna v dalším odstavci, nebo pro spojení více vrstev laminátu. Ta stejně jako u základního polymerního filmu může dosahovat různé tloušťky, podle toho, jakou funkci bude plošný spoj plnit. Zároveň je zde i způsob, jak ušetřit na výrobních nákladech, pokud je možno použít tenčí vrstvu.[2]

Je opět možno vybírat z širokého spektra materiálů. Hojně používanými jsou podle [2] například:

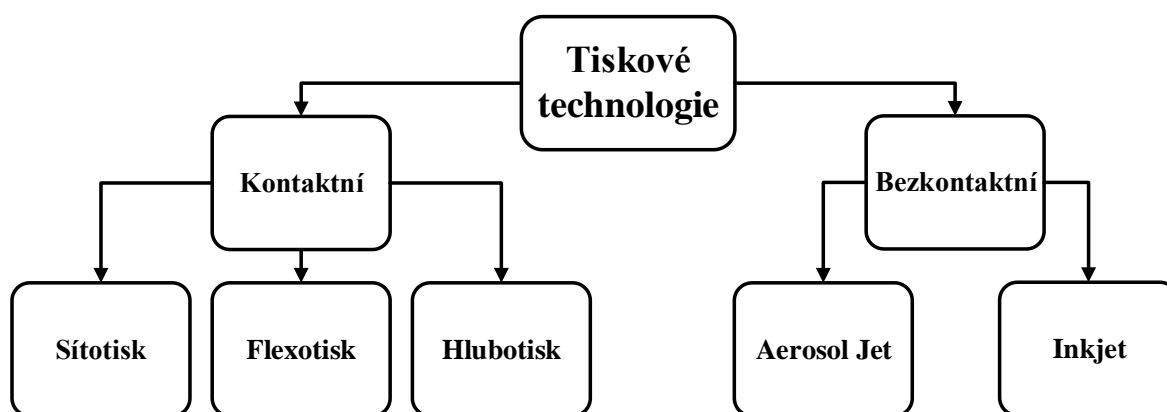
- Polyimidové – využívají se výhradně v kombinaci s polyimidovým základním materiálem,
- Polyesterové – nízká cena a nízká požadovaná teplota pro vytvoření spojení,
- Akrylové – výborná přilnavost a všeobecně rozumné vlastnosti, ovšem problém s bobtnáním při vysokých teplotách,
- Epoxidové – nejvíce využívány díky své univerzalitě, i když jsou poměrně křehké.



## Kovová folie

Jako vodivý prvek laminátu se používá kovová folie. Je to materiál, pomocí kterého jsou zpravidla subtraktivním způsobem, tedy nejčastěji leptáním, vytvářeny vodivé motivy. Typicky je na tuto vrstvu používána válcovaná žíhaná měď, ovšem je možno použít širokou škálu materiálů o různých tloušťkách.

## 2 Tvorba motivů na flexibilních substrátech využitím aditivních technologií



Obr. 3 Rozdělení aditivních tiskových technologií

### 2.1 Kontaktní technologie

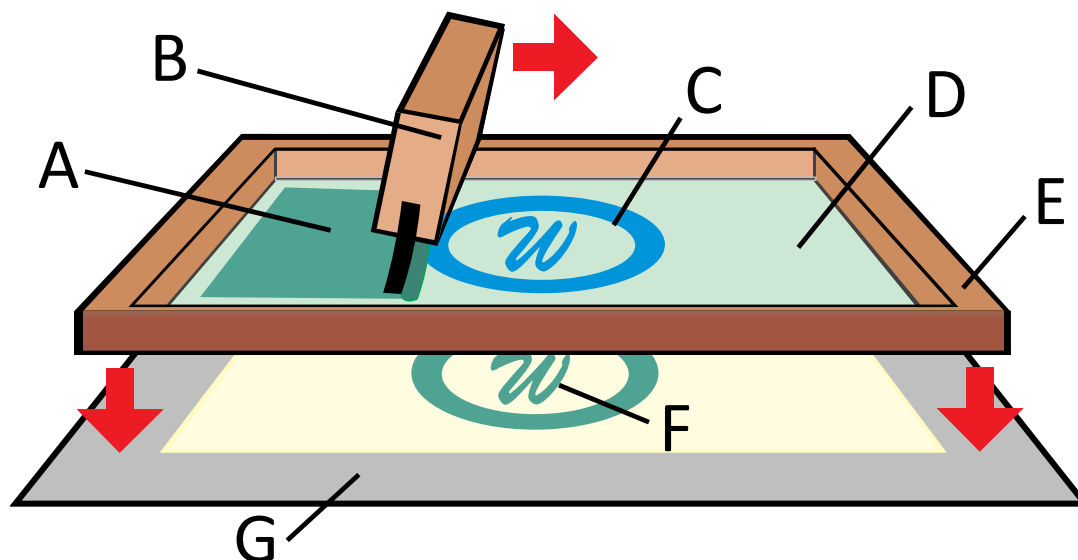
Tyto technologie jsou dnes těmi nejvíce používanými v průmyslu. Jejich nevýhodou je potřeba výroby tiskové matrice pro každý motiv a jejich použití limituje nemožnost tisku velmi jemných motivů. Ty nejvíce používané jsou popsány níže.

#### 2.1.1 Sítotisk

Tato aditivní technologie je jednou z těch nejstarších a její historie sahá až 1000 let před naším letopočtem. Ovšem zaměříme-li se na sítotisk v dnešní podobě, tak ten se začal objevovat na počátku 20. století. Technologie jako taková je jednou z nejrozšířenějších a

využívá se napříč všemi různými průmysly, ať už je to textilní, tiskařský či elektrotechnický.[6],[7]

Na Obr. 4 si můžeme vysvětlit základní princip této technologie. Ten spočívá ve vytlačování pasty (A) pomocí třerky (B) přes síto (D), na kterém je požadovaný koncový motiv (C). Toto síto je napnuto v rámu (E). Díky tomu se nám na substrátu (G) vytvoří požadovaný motiv (F).



Obr. 4 Princip sítotiskové technologie (převzato a upraveno z [8]).

Síto, na kterém je vytvořen požadovaný motiv se vyrábí z přírodního hedvábí, plastu nebo z kovových vláken. Na sítu je vytvořen motiv neboli šablona pro tisk, která je například ze světlo-citlivé emulze, takže neosvícené tiskové plochy jsou během procesu vyvolání vyplaveny a umožní tak při tisku průchod pasty přes síto. Rám, který nese napnuté síto se vyrábí z oceli, hliníku, plastu, nebo velmi ojediněle ze dřeva. Nejvíce užívané jsou ty kovové. Ocelové rámy nabízejí vysokou tuhost, stabilitu, odolnost, nižší cenu než hliníkové a také se lépe svařují. Ocel má také dvakrát menší koeficient lineární teplotní roztažnosti (ocel  $12,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ; hliník  $22,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [9]). Na druhou stranu hliníkové rámy díky nižší hustotě materiálu mají podstatně nižší hmotnost než ty ocelové, což je velká výhoda u rámu větších rozměrů (ocel  $7850 \text{ kg.m}^{-3}$ ; hliník  $2700 \text{ kg.m}^{-3}$  [10]). Třerka, která vytlačuje pastu přes síto, je nejčastěji vyráběna z pryže či polymeru. Pokud se jedná o třerku na ruční užití, její rukojeť bývá ze dřeva či plastu.[11]

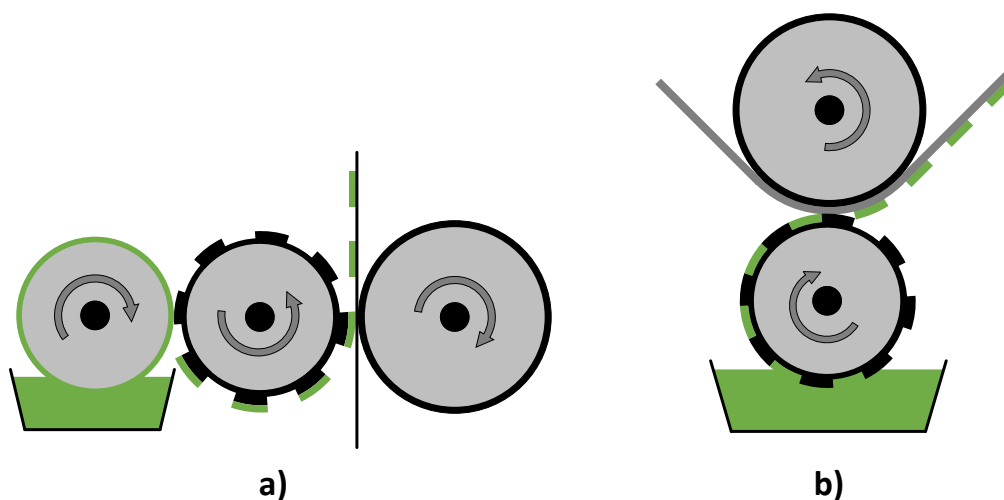
### 2.1.2 Flexotisk

Patří mezi techniky využívající takzvaný tisk z výšky. Postupným vývojem prochází od konce 19. století, ovšem tehdy ještě jako gumotisk nebo anilinový tisk. Základní princip této technologie můžeme vidět na *Obr. 5* a zjednodušeně řečeno je přibližně stejný jako u klasického razítka. Tím je myšleno, že místa, která se mají tisknout, jsou vyvýšeny oproti zbývajícimu povrchu.[12],[13],[14]

Tisková forma, která nese tiskový vzor dříve bývala pryžová, ale dnes se již používají nejrůznější polymery. Používané inkousty jsou charakteristické svojí menší viskozitou, která se pohybuje kolem 0,05-0,5 Pa·s, vysokým obsahem rozpouštědel a nízkou koncentrací pigmentu. Výjimkou jsou UV vytvrditelné inkousty, které neobsahují žádná rozpouštědla.[15]

### 2.1.3 Hlubotisk

Tato technologie byla vynalezena v druhé polovině 19. století Čechem Karlem Klíčem, který zdokonalil již fungující technologii heliogravura. Jak můžeme vidět na *Obr. 5* hlubotisk je opačným procesem flexotisku. To znamená, že motiv, který má být nanesen, je umístěn naopak v prohloubených místech povrchu tiskové formy. Technologie je vhodná pro nanášení inkoustů s nízkou viskozitou a vysokou výrobní rychlostí.[13],[16]



*Obr. 5 Princip technologie: a) flexotisk; b) hlubotisk.*

## 2.1.4 Porovnání kontaktních technologií

Sítotisk je z aditivních technologií nejvíce používán, a tudíž velmi znám. Je možno jej použít klasickým způsobem s rámem, sítím atd. nebo i v R2R technologii. Vyniká hlavně svou všestranností. Nevýhodou je relativní plýtvání materiálem a také se nehodí pro inkousty s nízkou viskozitou.[13]

Flexotisk se hodí hlavně pro potisk papírových a dnes už i plastických povrchů. Právě pro potisk plastových folií je v dnešní době nejvíce využíván. Výhodou technologie je také velká životnost tiskových forem. Ovšem s těmi je spojena i velká nevýhoda, a to deformace tiskového motivu, který se deformuje čím menší je průměr tiskového válce. Ovšem v dnešní době se této deformaci dá předcházet upravením tiskového motivu za pomoci nejrůznějších grafických programů. Dalším důležitým atributem jsou rychle schnoucí inkousty, což umožňuje použití vysokorychlostních strojů.[12],[13],[14],[15]

Pomocí hlubotiskové technologie je možno produkovat vysoce kvalitní vzory nákladově efektivním způsobem. Je ovšem důležitá optimalizace procesu a nanášeného materiálu, protože konečná kvalita tisku je velmi závislá na viskozitě inkoustu, rychlosti odpařování rozpouštědla a vytvrzování. Dále pak na smykové síle tiskového mechanismu a správném vyprazdňování buněk tisku.[13],[16]

Další porovnání tiskové kvality jednotlivých technologií můžeme vidět v *Tab. 2*.

*Tab. 2 Porovnání kontaktních technologií [11],[13],[15].*

Tisková technologie	Viskozita roztoku [Pa·s]	Minimální výška tisku [μm]	Rozlišení tisku [μm]	Povrchové pnutí [mN/m]
Sítotisk	0,1 - 10	5	30 - 100	38 - 47
Flexotisk	0,05 - 0,5	0,76	30 - 80	13,9 - 23
Hlubotisk	0,005 - 0,2	0,2	50 - 200	22 - 80

### 2.1.5 Roll-to-Roll

Roll-to-roll (R2R) je výrobní technologie, při které se zpracovává do role stočený flexibilní substrát za pomoci otáčejících se válců. Tyto válce zajistí postupné posouvání substrátu a protáhnou ho přes všechny potřebné přístroje, které na něm provedou veškeré povrchové úpravy a pomocí výše uvedených technologií nanasou materiál. Jakmile je proces správně nastavený, je možné pomocí této technologie vytvářet rychle velké množství námi požadovaných motivů na substrátu.[17]

## 2.2 Bezkontaktní technologie

Pokud tyto technologie budeme srovnávat s technologiemi kontaktními, tak mají velkou výhodu, že se substrát dostává do styku pouze s nanášeným materiálem. To přináší velkou výhodu ve snížení rizika poškození substrátu či již natisknutých vrstev materiálu. Další velkou výhodou těchto technologií je, že díky způsobu nanášení je možno dosáhnout přesnějších a jemnějších motivů, což nahrává například právě vícevrstevným propojovacím obvodům. Zároveň díky způsobu nanášení není zapotřebí fyzické masky nanášeného motivu, která je tak pouze v digitální formě. To je možno ocenit hlavně při prvotních návrzích, kde se minimalizují všelijaké vady a nedokonalosti tisknutého motivu a tím pádem je třeba často tento motiv měnit, což by se u většiny kontaktních technologií výrazně prodražilo. Další výhodou je široké spektrum použitelných materiálů a možnost nanášet materiály i na velmi hrubé, flexibilní či dokonce i 3D substráty.[13],[18]

### 2.2.1 Inkjet printing

Inkjet printing (IPT), neboli inkoustový tisk, je relativně novou technologií. IPT vzbuzuje zájem vědecké komunity a její momentální podoba je považovaná za úvodní fázi vývoje. Momentálně se využívá dvou způsobů nanášení materiálů na substrát – kontinuální tisk a tzv. „Drop-on-demand“.[13]

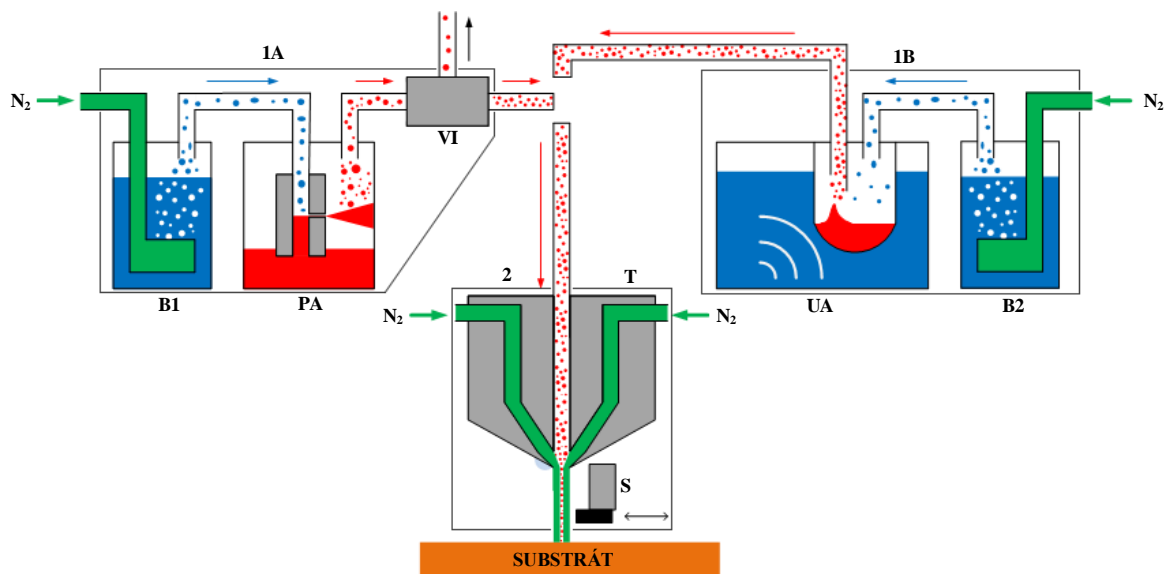
Kontinuální tisk využívá nepřetržitého vypuzování kapek nanášeného materiálu z trysky tiskové hlavy. Jakmile kapka opustí trysku, je poté na elektrickém poli, aby řídilo následnou

trajektorii kapky a tím i místo dopadu na substrát. Kapičky bývají odkloněny binárními nebo vícenásobnými vychylovacími systémy. U binárních systémů jsou kapičky nasměrovány do jediného pixelu na substrátu, nebo do zásobníku pro pozdější recyklaci. U vícenásobného vychylování jsou kapičky vychýleny na různých úrovních, čímž se vytváří více pixelů, respektive kapičky dopadají na více míst. Technologie kontinuálního tisku se využívá pro velké průmyslové výroby, například pro tisk čárových kódů nebo etiket.[13]

Druhou možností je Drop-on-Demand (DoD). Zjednodušeně již podle názvu je možno odvodit, že kapky jsou vytlačovány z trysky pouze pokud chceme, tedy pouze pokud v danou chvíli mají dopadnout na místo pod nimi. U DoD technologie nanášení se využívá dvou způsobů vypuzování kapiček inkoustu z trysek, a to buď pomocí termální či piezoelektrické metody. První způsob, tedy termální, funguje na principu rychlého zahřívání odporu, což způsobuje odpařování inkoustu. Díky tomu vzniká pára, která nakonec vytlačí kapku z trysky. Poté se vypne vyhřívání odporu, čímž se ochladí a dovnitř je vpuštěna další dávka inkoustu. Piezoelektrický způsob funguje na principu přivedení napětí do piezoelektrického materiálu, který se tím deformuje a vytlačí inkoust ven z trysky. Tento způsob může být výhodnější, pokud se používají tepelně citlivější inkousty. Pomocí této technologie je možno nanášet vodivé cesty od šířky kolem 30  $\mu\text{m}$ . [13],[19]

### 2.2.2 Aerosol Jet

Technologie Aerosol Jet printing (AJP) je jednou z nejnovějších technologií aditivního selektivního tisku. Za jejím vznikem je firma Optomec, která dostala zakázku na vývoj technologie, která by dokázala rychle vyrábět dnešní moderní elektroniku. Základním požadavkem bylo tisknutí jemných motivů, tisk na nejrůznější druhy substrátů (hladké, drsné, rovinné či 3D), možnost využívat širokého spektra materiálů a možnost návrhu v CAD systémech.[20]



Obr. 6 Princip technologie Aerosol Jet (převzato a upraveno z [21]).

Základním principem technologie je bezkontaktní depozice materiálu ve formě aerosolu na určenou plochu. Na *Obr. 6* můžeme vidět, že ke vzniku aerosolu je možno použít jeden ze dvou typů atomizérů. V levé části obrázku 1A je využit pneumatický atomizér (PA). Před ním je „Bubbler“ (B1), který do původního inkoustu zavádí kapičky rozpouštědla, které napomáhají tvorbě aerosolu. Poté v pneumatickém atomizéru (PA) je inkoust nasáván ze dna nádoby a tryskán o stěnu nádoby, čím je rozbíjen na mikrometrové kapičky a vzniká aerosolová směs, která je nosným plynem  $N_2$  unášena dále. Za pneumatickým atomizérem je ještě z důvodu homogenity směsi umístěn tzv. „Virtual Impactor“ (VI), který odsává větší částice ze směsi. Na druhé straně v části 1B je naznačen vznik aerosolové směsi za pomoci ultrazvukového atomizéru (UA). Postup je podobný, pouze inkoust je rozbíjen za pomoci ultrazvukových vln a následná aerosolová směs není třeba dále upravovat a jde rovnou do trysky (T). V trysce již proudí aerosolová směs, která je obepínána ze všech stran dusíkem, kterým reguluje přístroj správné množství, šířku a celkové parametry nanášené směsi na substrát. Na konci trysky je tzv. „Shutter“ (S), který dokáže rychle uzavřít trysku a tím přerušit depozici materiálu. Za použití této technologie je již možno nanést 8  $\mu m$  široké vodivé dráhy, což je v dnešní módě zmenšování elektroniky velmi žádané.[18],[21],[22]

## 3 Způsoby vodivého kontaktování

Dosud bylo popsáno, co je to substrát, jaké jsou jeho požadované vlastnosti a jakým způsobem jsou na něm vytvářeny ať už grafické či funkční vodivé motivy. V této kapitole jsou představeny některé způsoby elektrického kontaktování, díky kterým dosáhneme vodivého spojení mezi vodivými motivy, elektrickými součástkami nebo různými periferiemi.

### 3.1 Pájení

Pájení je technika, kde mezi dvěma kovy vzniká za pomoci přidaného materiálu nerozebíratelný spoj. Základním principem je tedy ohřátí a následné roztavení přidaného materiálu, tzv. pájky, která po ochladnutí spojí oba kovy. Z principu tedy vychází, že pájka by měla mít nižší teplotu tání než spojované kovy. Zároveň je třeba dbát na užití tavidla, které slouží pro očištění pájených kovů od nečistot, což umožní správné přilnutí pájky a vznik spolehlivého spoje. Podle teploty tání pájky se pájení dělí dle [23] a [24] na:

- měkké pájení – teplota tání pájky  $< 450$  °C,
- tvrdé pájení – teplota tání pájky  $> 450$  °C.

U měkkého pájení se nejčastěji využívá pájky na bázi slitin cínu a olova, které patří mezi takzvané snadno tavitelné kovy. Vzhledem k ekologii je ale čím dál tím více využíváno bezolovnatých pájek a jsou přidávány materiály jako stříbro a měď. Měkké pájení se využívá nejvíce v elektrotechnice a pro spoje, které nejsou příliš mechanicky namáhány. Pro tvrdé pájení je často využíváno pájek na bázi slitin hliníku, stříbra, mědi a zinku.[23],[24],[25]

Hlavními výhodami pájených spojů podle [24] jsou:

- možnost spojit kovy s odlišným chemickým složením (nesvařitelné),
- relativně nízká teplota pájení snižuje tepelné ovlivnění spojovaných kovů,
- pevný, nepropustný a elektricky vodivý spoj,
- pájky nepodléhají korozi.



### 3.2 Vodivé lepení

Pomocí technologie lepení vytváříme opět nerozebíratelný vodivý spoj. Ke spojení se využívá vodivá lepicí pasta, která je jakýsi kompozit, který se skládá z pojiva a z plniva. Pojivo neboli vazební složka, slouží po vytvrzení pro zajištění mechanické pevnosti a stálosti. Tvoří ji nejčastěji materiál na bázi reaktoplastické či termoplastické pryskyřice. Plnivo neboli vodivá složka, slouží k vytvoření vodivé cesty. Nejlepší vlastnosti vykazují pasty, využívající částic materiálů drahých kovů jako je stříbro, zlato, platina či palladium, které mají relativně vysokou elektrickou vodivost a zároveň vynikají svou stálostí a odolností proti oxidaci. Mohou být použity i levnější materiály jako například měď či nikl, ale samozřejmě tyto kovy mají horší vodivost, což ovlivní vodivost pasty a spoje. Další nevýhodou použití mědi je její oxidace. Dále je také třeba brát v potaz, že vodivost pasty také ovlivňuje i procentuální podíl těchto vodivých částic kovů v pastě.[26],[27]

Je třeba poznamenat, že podle [28] mají lepené spoje v porovnání s pájenými horší vlastnosti a zároveň cena lepidel je podstatně větší než cena pájek. I přes to všechno jsou ale lepené spoje prakticky nezastupitelné při kontaktování pomocí metod Chip-on-Glass nebo Chip-on-Foil.

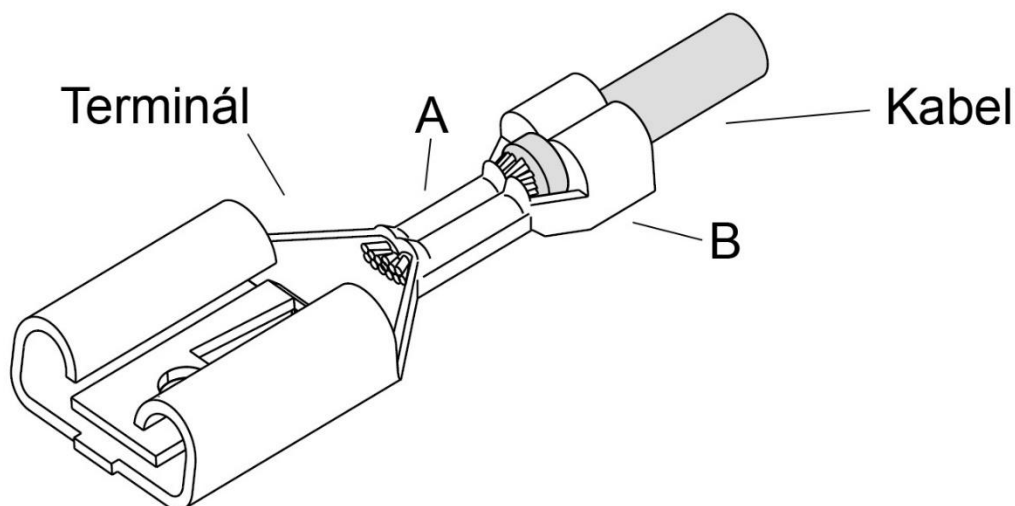
Pasty je možno nanášet nejrůznějšími depozičními technologiemi nebo i ručně s jehlou. Jejich následné vytvrzení závisí podle typu pasty. Podíváme-li se do nabídky [29] vodivých past Elecolit od firmy Panacol, můžeme vidět například vodivou pastu Elecolit 3036, která se používá pro tepelně citlivé části. Její vytvrzení je možno provést dvěma způsoby. Prvním je během 15 minut za teploty 120 °C, k čemu je třeba v ideálním případě teplotní komora. Druhým způsobem vytvrzení je při pokojové teplotě (cca 24 °C), ovšem tímto způsobem k dokonalému vytvrzení dojde až po uplynutí 24 hodin.

Elektricky vodivá lepidla se dělí na izotropní a anizotropní. Izotropní mají vodivou složku ze souměrných vodivých částic ideálně kulovitého tvaru a elektrická vodivost je u nich ve všech směrech stejná. U anizotropních lepidel jsou částice nesouměrného tvaru a záleží na jejich orientaci, čímž je možno ovlivnit směrovou vodivost lepidla.

### 3.3 Krimpování

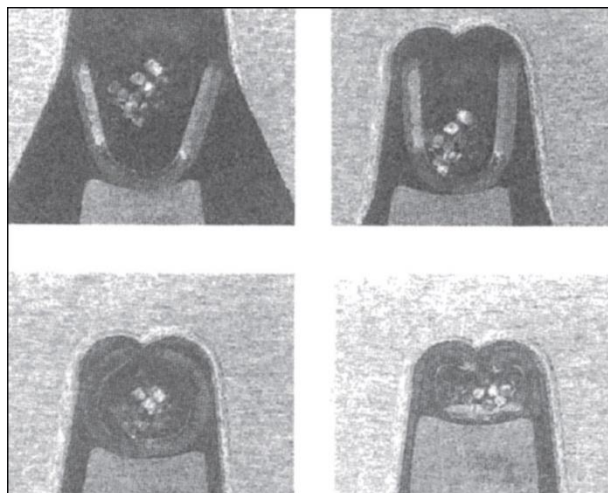
Krimpované spoje jsou využívány již přes 50 let a jsou brány jako jedny z nejspolehlivějších a nejkvalitnějších. Princip této metody kontaktování je relativně jednoduchý a jeho provedení je zároveň rychlé. Zjednodušeně jde o to, že pod vysokým tlakem lisovacího nástroje mezi drátem a krimpovacím terminálem vzniknou mikroskopické svary. Při krimpování se také dle [30] tvoří vrstvičky oxidu, které zajišťují, že je spoj plynotěsný. Díky tomu je poté spoj velmi odolný před korozí, obecně před stárnutím a také proti vibracím. Vytvořit jej je možno buď ručně pomocí krimpovacích kleští, nebo ve velkovýrobnách pomocí automatizovaných strojů.[30],[31]

Je třeba poznamenat, že existuje velké množství typů krimpovacích terminálů, svorek a spojek. Princip je v této práci ovšem vysvětlen na přibližně stejném typu, který je použit v praktické části práce.



Obr. 7 Krimpovaný spoj [32].

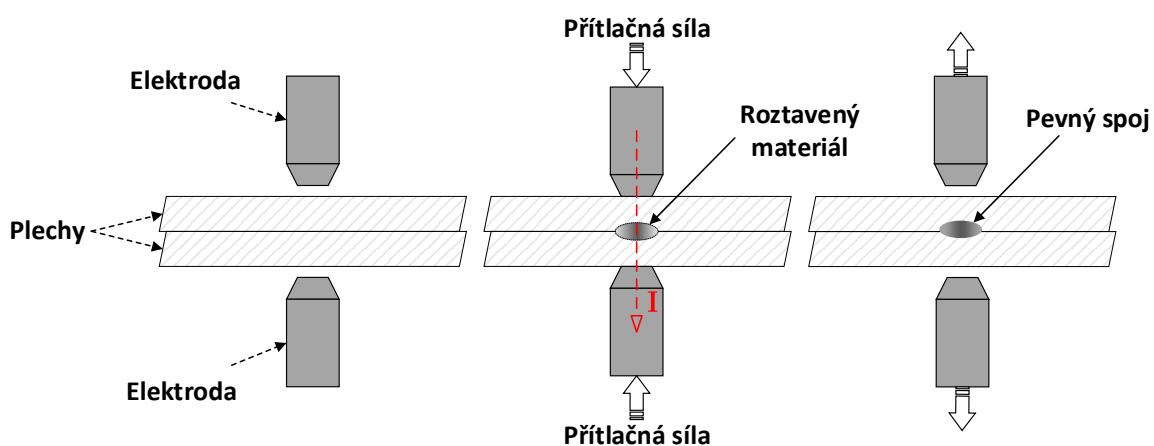
Na Obr. 7 je možnost vidět již provedený krimpovaný spoj. Nejdůležitější jsou místa označená A a B, kde pomocí lisovacího nástroje je aplikován tlak. Na místě A, kde je odizolovaný drát vložený do terminálu, došlo k vytvoření výše popsaného vodivého kontaktu mezi terminálem a kabelem. Tento kontakt vznikl za pomoci stlačení lisovacím nástrojem, který zkroutí vztyčené části terminálu kolem drátu. Tento proces je možno vidět na Obr. 8. Stejným způsobem obepnou vztyčené části kabelu na místě B. Ovšem toto místo slouží hlavně jako mechanická podpora pro kontakt, kde se terminál za vodivým kontaktem zafixuje do izolace kabelu a zvýší tím odolnost před možným vytržením kabelu z již nakrimpovaného terminálu.



Obr. 8 Fáze procesu krimpování terminálu k drátu [31].

### 3.4 Odporové svařování

Odporové svařování je metoda, při které vzniká nerozebíratelný spoj mezi dvojicí materiálů, které jsou k sobě přiloženy. Nejčastější užití je například při bodování ocelových plechů či spojování drátů do mříží. Princip této technologie je znázorněn na Obr. 9, kde jsou k sobě odporově svařovány dva kovové plechy. Svařovací zařízení obsahuje dvě elektrody, které jsou v tomto případě umístěny proti sobě. Po aplikování přítlačné síly se dotýkají obou materiálů v místě požadovaného spoje. Mezi elektrodami poté prochází elektrický proud, který nám v důsledku odporového zahřívání průchodem elektrického proudu zajistí prudký ohřev materiálu a tím i jeho tavení.



Obr. 9 Fáze procesu odporového svařování (převzato a upraveno z [33]).

Objem toho roztaveného materiálu závisí na množství dodaného tepla, které přímo ovlivňuje pevnost svaru jako takového. Toto dodané teplo do plechů a elektrod může být podle [33] vyjádřeno jako:

$$Q = I^2 R t \quad (1.2)$$

kde  $Q$  je dodané teplo,  $I$  je svařovací proud,  $R$  je celkový odpor soustavy a  $t$  je doba trvání průchodu proudem, tedy svařovací doba. Celkový odpor soustavy  $R$  zahrnuje dva přechodové odpory mezi elektrodami a plechy, mezi plechy a zároveň odpory samostatných elektrod a plechů. Což nás v tomto případě dostává na celkový počet sedmi dílčích odporů.

Každý z těchto odporů se dynamicky mění během procesu sváření. U přechodových odporů má na jejich hodnotu velký vliv například čistota povrchu, jeho drsnost, přítomnost pokovovacích materiálů a v neposlední řadě i přitlačná síla, která oba povrchy materiálů tlačí k sobě. Z principu odporového svařování vychází, že největší odpor a tím tedy i teplo chceme mezi dvěma spojovanými materiály, v tomto případě plechy. Elektrody tedy bývají vyrobeny z vysoce tepelně a elektricky vodivé slitiny mědi, což zajišťuje jejich co nejmenší odpor.[33],

Odporového svařování větších ploch jako je například výše popsané spojování plechů, je již prozkoumáno a existuje velké množství doporučení a specifikací, jak správně svařovat. Ovšem u odporového svařování miniaturních elektronických prvků, které je známé pod pojmem "resistance microwelding" tomu tak není a v žádném případě to není stejné. U odporového svařování větších ploch se například využívá chlazení elektrod. Díky tomu se elektrody nezahřívají na vysoké teploty a nehrozí tedy svařování samotných elektrod neboli jejich přichycení ke svařovanému materiálu. Dalším příkladem mohou být použité materiály, kdy se při svařování plechů ap. využívá převážně ocelí a v menší míře i jiné slitiny. Naproti tomu v elektrotechnice se využívá nepřeberné množství materiálů od vzácných kovů jako zlato, stříbro a platina až po měď či hliník. Navíc se často stává, že materiály pro elektrotechniku jsou ještě pokoveny, čímž mění fyzikální vlastnosti materiálu a ovlivňují svařitelnost. To jsou jen některé z rozdílů, další rozdíly jsou znázorněny v *Tab. 3*. [33]

Tab. 3 Rozdíly mezi odporovým svařováním malých a velkých ploch [33].

	malé plochy	velké plochy
<b>Tloušťka materiálů</b>	< 0,2 - 0,4 mm	> 0,6 mm
<b>Přítlačná síla elektrod</b>	< 100 - 200 N	> 1000 N
<b>Svařovací proud</b>	< 2000 A	> 6000 A
<b>Chlazení elektrod</b>	Ne	Ano
<b>Svařované materiály</b>	Neželezné kovy (Ni, Ti, Cu atd.)	Hlavně oceli a slitiny Al
<b>Pokovovací materiály</b>	Ag, Au, Ni, Pb aj.	Převážně Zn
<b>Užití</b>	Elektronika	Automotive a strojírenství

## 4 Způsoby testování elektrických kontaktů

Elektrický kontakt obecně slouží pro propojení minimálně dvou vodičů, ať už vodičem myslíme například drát, či natištěnou vodivou cestu na substrátu. Tento kontakt ovšem není nikdy ideální, protože k sobě nikdy nepřiložíme dvě absolutně rovné a čisté plochy. Díky tomu nám vzniká přechodový odpor, který nám velkou mírou určuje kvalitu elektrického kontaktu. Dále je také třeba uvažovat, v jakém prostředí bude kontakt pracovat a jaké klimatické vlivy na něj budou působit. Vysoká teplota a vlhkost může zapříčinit degradaci materiálu, zrychlit oxidaci a tím zničit kontakt. V neposlední řadě je třeba myslet na mechanické vlastnosti kontaktů, tím spíše bavíme-li se o flexibilní elektronice, u které se očekává jisté spolehlivosti i za pohybu a deformace vlivem jejího ohýbání.[31]

### 4.1 Přechodový odpor kontaktu

Elektrický odpor je fyzikální veličina, která charakterizuje schopnost elektrických vodičů vést elektrický proud. Čím vyšší je odpor, tím menší proud prochází. Vzhledem k tomu, že u elektrického kontaktu požadujeme co nejmenší zkreslení procházejícího signálu, tedy aby samotný kontakt měl co nejmenší vliv ať už na vstupní či výstupní signál, tak požadujeme jeho co nejmenší odpor. Přechodový odpor kontaktu je tedy možno považovat za nejdůležitější parametr elektrického kontaktu. Jeho hodnotu ve velké míře ovlivňují dotykové plochy kontaktu. Vzhledem k tomu, že kovy mají krystalickou strukturu, tak nejsou ideálně hladké, tím pádem se dvě kontaktní plochy nikdy nebudou dotýkat celou svou plochou. Dalším důvodem je, že tyto plochy nebývají ideálně čisté z důvodu oxidací

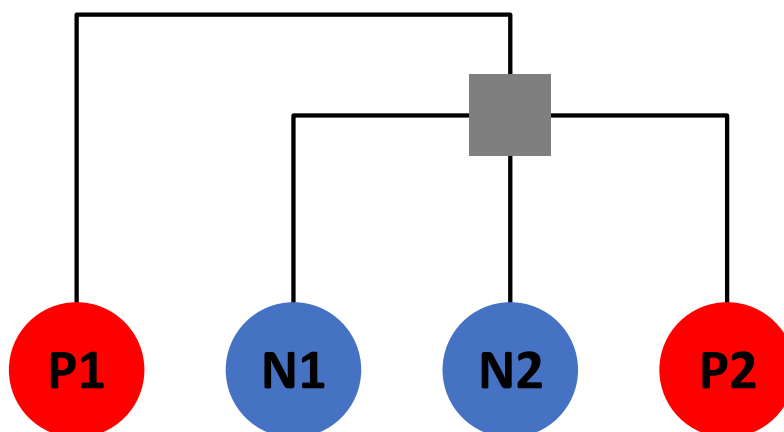
materiálů nebo je pokrývají tenké vrstvy nečistot. V neposlední řadě má na kontaktní odpor vliv také síla, která tyto plochy k sobě tlačí.[31],[34],[35] Tyto vlivy jsou dle [35] zohledněny následujícím vzorcem pro kontaktní odpor:

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{nP}} \quad (1.3)$$

kde  $\rho$  je rezistivita,  $H$  je tvrdost materiálu,  $n$  je počet kontaktních bodů a  $P$  je síla, která tlačí plochy k sobě.

Měřit elektrický odpor je možno pomocí můstkových metod, mezi které patří Thomsonův či Wheatstoneův můstek, nebo pomocí dvou vodičové a čtyřvodičové (Kelvinovy) metody. Nejvhodnější z těchto metod pro měření malých kontaktních odporů je čtyřvodičová metoda. Nevýhoda dvouvodičové metody je, že je zatížena chybou způsobenou odporem přívodních vodičů, což se nehodí pro měření velmi malých odporů.

Čtyřvodičová metoda, která je znázorněna na *Obr. 10*, tyto neduhy odstraňuje, jelikož přivádíme pomocí dvou vodičů na měřené místo proud (P1, P2) a pomocí dalších dvou vodičů měříme napětí (N1, N2), které v tomto místě vzniklo průchodem přivedeného proudu. Díky tomu nevzniká chyba úbytku napětí na přívodních vodičích, jelikož voltmetr má vysoký odpor a tím pádem přes něj neteče skoro žádný proud. Následně se odpor vypočítá z hodnoty přivedeného proudu a změřeného napětí.[36]



*Obr. 10 Princip čtyřvodičové metody.*

## 4.2 Klimatické testy

Při testování elektrických kontaktů je možno se inspirovat normami předepsanými pro testování elektrických výrobků. Touto normou je ČSN EN 60068-1 ed 2 [37] (česká verze evropské normy EN 60068-1:2014), která obsahuje metody pro zkoušení vlivů prostředí a klimatických podmínek především pro elektrotechnické výrobky. Z klimatických testů je v jejím obsahu možno najít zkoušky na chlad, suché teplo, vlhké konstantní teplo, vlhké teplo cyklické, prach a písek, změna teploty, tlak vzduchu a další. Tyto testovací postupy slouží k posouzení funkce testovacích zařízení neboli vzorků, v různých klimatických podmínkách, které na ně mohou působit v praxi při následném skladování, přepravě, instalaci či za provozu.

Zkouška chladem, která je popsána ČSN EN 60068-2-1 ed. 2, umožňuje posouzení schopnosti vzorků odolávat nízkým teplotám. Norma navrhuje postup pro testování vzorku, který uvolňuje teplo a stejně tak i pro vzorek který teplo neuvolňuje. Při této zkoušce je také důležité omezit převádění tepla sáláním na testovaný vzorek. To znamená, že je třeba vyvarovat se dotyku vzorku s obvodovými stěnami komory. Ideální tedy je, aby byl vzorek například zavěšen v komoře. Norma dále předepisuje stupně přísnosti, tedy jakou teplotu je vhodné na testování použít a v jakém časovém intervalu ji aplikovat. Tyto hodnoty je možno vidět v následující *Tab. 4*. Pokud tyto hodnoty nevyhovují, je třeba je buďto odvodit ze známého prostředí, nebo z jiných známých zdrojů příslušných dat.[38]

Zkouška suchým teplem je popsána ČSN EN 60068-2-2. Zkoušku vycházející z této normy je opět možno aplikovat na vzorky, které uvolňují či neuvolňují teplo. Cílem zkoušky je posouzení odolnosti vzorku vůči vysoké teplotě. I u této zkoušky je třeba omezit přenos tepelné energie sáláním na minimum. Předepsané používané teploty a časové intervaly je možno vidět v *Tab. 4*. [39]

Zkouška konstantním vlhkým teplem je popsána ČSN EN 60068-2-67. Norma stanovuje zkušební postup pro zrychlené vyhodnocení odolnosti malých elektrotechnických výrobků proti účinkům vlhkého tepla. Zkouška je definována konstantní teplotou 85 °C a vlhkostí 85 %. Mění se pouze předepsaný časový interval zkoušky, který se pohybuje mezi 168 a 2000 hodinami. Přesné hodnoty je možno vidět v *Tab. 4*. Tato zkouška se také dříve používala pro zrychlení koroze na integrovaných obvodech.[40]

Tab. 4 Předepsané specifikace pro klimatické zkoušky dle normy[38],[39],[40],[41].

Zkouška	Teplota [°C]	Časový interval [h]
Chlad	-65; -55; -50; -40; -33; -25; -20; -10; -5; +5	2; 16; 72; 96
Suché teplo	1000; 800; 630; 500; 400; 315; 250; 200; 175; 155; 125; 100; 85; 70; 65; 60; 55; 50; 45; 40; 35; 30	2; 16; 72; 96; 168; 240; 336; 1000
Konstantní vlhké teplo	85 (při 85% vlhkosti)	168; 504; 1000; 2000

Zkouška změnou teploty je popsána ČSN EN 60068-2-14 ed. 2. Jedná se o zkoušku, která stanovuje vliv změny teploty na testovaný vzorek. Typicky se jedná o zkoušení vzorku, který se přesouvá mezi minimálně dvěma komorami. Tyto komory mají odlišné vnitřní teploty, z nichž jedna je vyšší a druhá nižší. Zkouška pomáhá posoudit schopnost vzorku správně fungovat i po rychlých a velkých změnách okolní teploty. To se v praxi typicky stává při zapnutí vypnutého přístroje, který se svou činností začne rychle ohřívat, nebo když je například venkovní zařízení rychle ochlazeno deštěm. Užívané teploty a počty cyklů u této zkoušky nejsou obecně předepsány z důvodu různorodosti testovaných vzorků. Časové intervaly jsou na tom podobně, ovšem často užívané jsou od 3 hodin do 10 minut pro pobyt vzorku v jedné teplotě.[41]

### 4.3 Mechanické testy

Při výběru metody testování mechanické flexibility je třeba myslet na to, že ohebné substráty mohou být pružné nebo nepružné. Vzhledem k tomu že v praktické části této diplomové práce se využívají substráty nepružné, budou následující testy směřovány právě na ně. Pro nepružné ohebné substráty je dle [42] nejjednodušší a nejvíce používaným mechanickým testem flexibility metoda statického ohýbání. Pro provedení tohoto testu se vzorky většinou připevní na povrch válcového tvaru s určitým poloměrem.[42]

Pro testování, které má lépe napodobit reálné pracovní podmínky ohebných spojů je ovšem třeba, aby se opakovaně ohýbaly. Proto je možno využít testovacích zařízení, do kterých se upne přímo testovaný vzorek, nebo se připevní na ohýbaný povrch. Ten se opakovaně ohýbá a narovná. Princip toho zařízení spočívá v tom, že jedna strana vzorku



je připevněna ke stacionární části přístroje a druhá strana vzorku je připevněna k pohyblivé části, která se přibližuje a oddaluje od té stacionární, čímž ohýbá testovaný vzorek.[42]

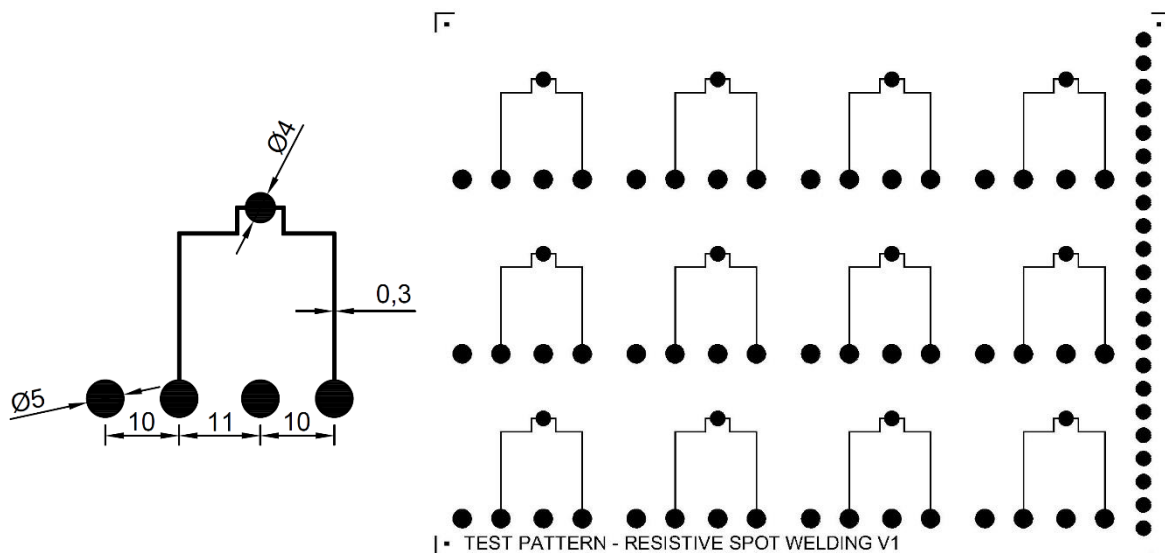
Další možný test je pull off. Často se využívá u krimpovaných spojů ke zjištění potřebné síly, k odtržení terminálu od vodiče či substrátu. Obecně se využívá tři typů této zkoušky. U prvního se pomocí natáhnutí o určitou vzdálenost vyvine síla na testovaný vzorek a poté se povolí. U druhého typu se opět vyvine síla, ale tentokrát pro určitou dobu zařízení tuto tažnou sílu ponechává. Třetím typem je destruktivní zkouška, kdy se postupně vyvíjí větší a větší síla, až do doby, kdy dojde k odtržení.[43]

## 5 Návrh a realizace testovacích vzorků

Tato kapitola je zaměřena na návrh a realizaci tištěných vodivých motivů na flexibilních substrátech za účelem následného kontaktování a testování elektrických a mechanických vlastností provedeného vodivého kontaktu.

### 5.1 Návrh tištěného vodivého motivu

Při návrhu testovacího motivu je dobré myslet na jeho univerzálnost, praktičnost a také na využití co největšího procenta povrchu substrátu z důvodu úspory materiálu. Při navrhování vodivého motivu pro tuto práci, který je na *Obr. 11*, bylo již od začátku známo, jaké technologie kontaktování budou testovány – odporové svařování a krimpování. Bylo tedy třeba myslet na to, aby se dalo ke kontaktní plošce, která je v horní části vzorku a má průměr 4 mm, dostat pomocí lisovacího nástroje a provést krimpovaný spoj. Vodivé cesty k této plošce jsou tedy navrženy tak, aby nepřekážely při procesu manuálního krimpování dostupným lisovacím nástrojem. Pro univerzálnost motivu ale bylo také třeba myslet na to, aby se na stejném kontaktním místě dal vytvořit spoj pomocí odporového svařování.



Obr. 11 Vlevo – detail jednoho testovacího vzorku; Vpravo – kompletní tisknutý motiv.

Z teoretické části v kapitole 4 této práce dále vychází, že klíčovou vlastností každého elektrického kontaktu je jeho přechodový odpor a že pro měření kontaktního odporu se nejvíce hodí čtyřvodičová metoda, pomocí které se dají nejlépe měřit nízké hodnoty přechodového odporu s co nejmenším možným zkreslením. To tedy znamenalo vytvoření čtyř měřících plošek pro spolehlivé připojení měřícího přístroje ve spodní části vzorku. Tyto měřící plošky mají průměr 5 mm a rozestupy mezi nimi jsou navrženy tak, aby vyhovovaly použitým měřícím sondám, které jsou popsány v kapitole 6 této práce.

Dalším důležitým faktorem při návrhu motivu bylo rozhodnutí, že pro tisk vodivých drah bude využita technologie sítotisku, kvůli čemuž byla zvolena z důvodu zajištění dostatečné robustnosti minimální šířka vodivých cest 300  $\mu\text{m}$ . Poté co byl navržen motiv pro jeden vzorek, byl s jeho kopiemi v rámci co největší úspory místa vyplněn celý tisknutelný prostor, který byl 140x190 mm. Zároveň bylo po pravé straně testovacího motivu umístěno 20 kontaktních plošek, na kterých je možné provést prvotní pokusné kontaktování či následně pull off testy. Samotný návrh vodivého motivu byl vytvořen v programu AutoCAD.

## 5.2 Realizace vodivého motivu na substrátech

Jako substrát pro testovací vzorky byly použity polyesterové folie typu Melinex 506 a Melinex 339. V prvním případě se jedná o čirou a v druhém případě o bílou folii s tloušťkou 175  $\mu\text{m}$ . Použité folie jsou z obou stran upraveny k podpoře přilnavosti většiny průmyslových nátěrů a využívají se jako substrát pro široké spektrum aplikací, od grafického a elektrotechnického průmyslu až ke zdravotnictví [44],[45]. Na tyto substráty poté pomocí technologie sítotisku byl natisknut navržený vodivý motiv, který je zobrazen na *Obr.11*. Tisk proběhl v prostorách ZČU a bylo využito polo automatizovaného sítotiskového stroje E2 od firmy EKRA. Při tisku byla využita vodivá pasta DuPont™ PE873. Jedná se o roztažitelnou vodivou stříbrnou pastu na potisk elastických a textilních podkladů pro nízkonapěťové obvody [46]. Síto užitá při tisku bylo z nerezové tkaniny s jemností MESH 325.

### 5.3 Realizace vzorků pomocí krimpování

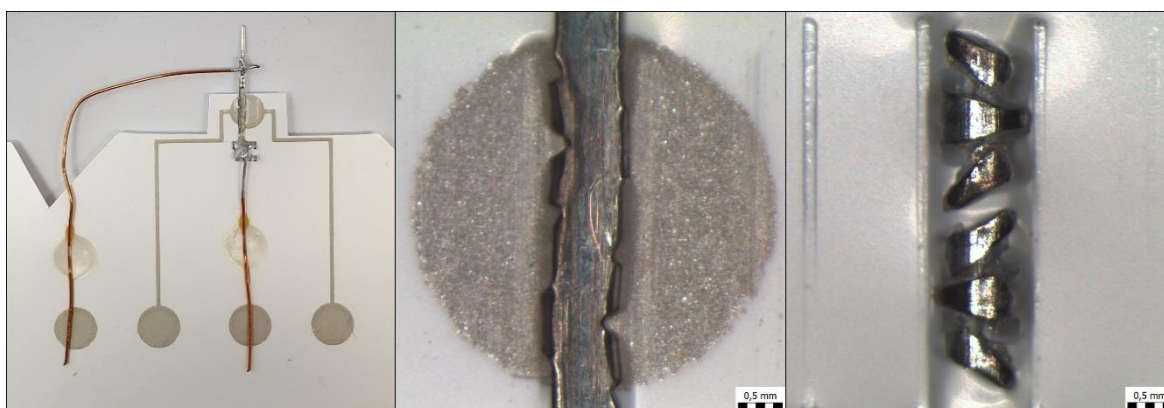
Pro vytvoření vodivých kontaktů pomocí technologie krimpování, která je popsána v kapitole 3.3, bylo využito krimpovacích terminálů a lisovacího zařízení od firmy Nicomatic. Zvolený terminál a použité manuální krimpovací kleště je možné vidět na následujícím *Obr. 12*. Terminál je pocínovaný a jedná se o typ samce s roztečí 1,27 mm. Přesné modelové číslo je T16069-1x. Krimpovací kleště jsou typu HCT-127.



*Obr. 12 Vlevo – krimpovací terminál T16069-1x; Vpravo – krimpovací kleště [47].*

Krimpovací terminál byl u většiny testovacích vzorků kontaktován ideálním způsobem, což znamená že se dotýkal co největší vnitřní kontaktní plochou vodivé plošky na substrátu a vztyčené části terminálu proříznuly substrát, ohnuly se a zafixovaly na nevodivé straně substrátu. V rámci experimentu byl ale vytvořen i menší počet vzorků, kde byly krimpovací terminály kontaktovány opačně. Tedy že kontakt tvořily vztyčené části terminálu, které proříznuly substrát a zafixovaly se do vodivých plošek. Po provedení kontaktního spoje pomocí této technologie bylo ještě nutné na oba konce krimpovacího terminálu připájet měděný vodič, který dosáhl až na níže položené vodivé plošky, což je možné vidět na *Obr. 13*. Z těchto plošek se následně měřil přechodový odpor pomocí sond, které jsou popsány v kapitole 6 této práce. Z důvodu minimalizace možnosti zničení vodivého kontaktu při ruční manipulaci se vzorkem a při jeho přeměrování, byly ještě připájené vodiče fixovány k substrátu pomocí UV vytvrditelného lepidla Blufix PW. U vzorků pro mechanické testování pomocí bend testu nebyla tato fixace provedena, jelikož by ohýbající se dráty mohly vyvíjet nežádoucí sílu na krimpovaný spoj a tím ho více opotřebovávat.

Pomocí technologie krimpování bylo vyrobeno celkem 60 vzorků, které byly následně testovány. Dále je třeba poznamenat, že tvorbu vzorků pomocí technologie krimpování neprovázely žádné problémy díky jednoduchému postupu a způsobu vytváření krimpovaných spojů, což je při manuální práci výhodou této technologie. Finální testovací vzorek a detail krimpovaného spoje je možné vidět na *Obr. 13*.



*Obr. 13* Finální testovací vzorek krimpovaného vodivého spoje; zleva – finální vzorek, detail spoje zepředu, detail spoje zezadu.

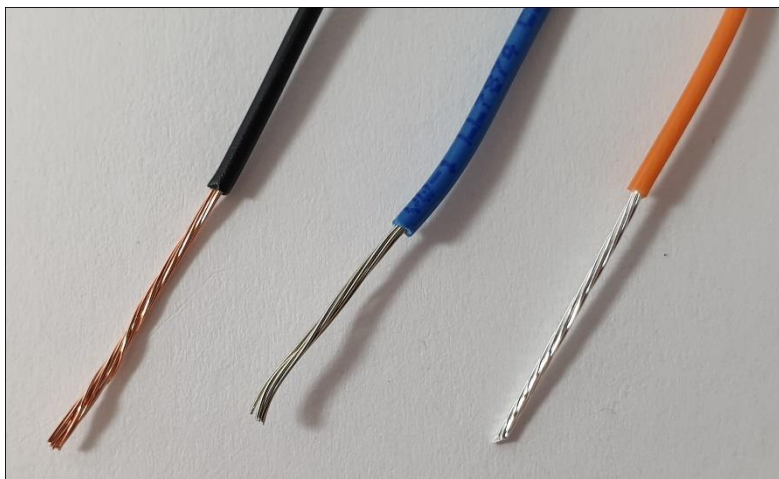
## 5.4 Realizace vzorků pomocí odporového svařování

Před realizací vodivých kontaktních spojů pomocí technologie odporového svařování bylo rozhodnuto, že bude využito tří různých druhů vodičů. Důvodem tohoto rozhodnutí bylo porovnání vlastností rozdílných vodičů při vytváření vodivých spojů pomocí technologie odporového svařování a zkoumání jejich parametrů před, během a po testování klimatickými a mechanickými zkouškami.

### 5.4.1 Výběr vodiče

Všechny tři vodiče byly jednožilová lanka s jádrem z mědi (Cu) o průřezu  $0,35 \text{ mm}^2$ , ale důležitým rozdílem byla jejich povrchová úprava. Prvním typem byl čistý Cu vodič s modelovým označením – BQ CABLE LGY0.35/25-BK. Druhým typem byl Cu vodič s pocínovaným jádrem a modelovým označením – BELDEN 9921 006100. Posledním, a tedy třetím typem byl postříbřený Cu vodič s modelovým označením – BELDEN 83005

003100. Všechny tři vodiče byly doručeny navinuty na cívce s délkami mezi 25 a 30 metrů. Vodiče byly zakoupeny na internetové portálu Transfer Multisort Elektronik (TME) a je možné je vidět na *Obr. 14*.



*Obr. 14* Zvolené vodiče; zleva – měděný; měděný pocínovaný; měděný postříbřený.

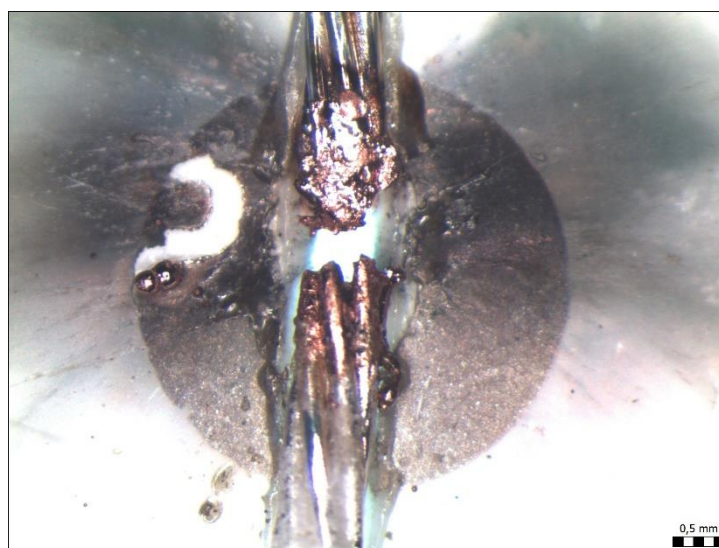
#### 5.4.2 Realizace vodivého spoje

Pro vytvoření vodivého spoje pomocí technologie odporového svařování, která je popsána v kapitole 3.4, bylo využito odporové svářečky značky Sunkko s typovým označením – 709A, která je na *Obr. 15*. Jedná se o impulsní svářovačku a pájecí přístroj. Svařovací modul je vybaven dvojicí elektrod, které jsou na přední straně přístroje a možností připojit dvojici elektrod pomocí vodičů, čehož bylo využito v této práci. Pulzní svářečka nabízí možnost nastavení velikosti proudu na otočném regulátoru v rozsahu od 1 do 8 a zároveň je možno zvolit počet svařovacích impulsů na hodnoty 2, 4, 6 a 8, které je možné i kombinovat. Svářečka je dle specifikací schopna svářet elektrickým proudem o hodnotách 50 – 800 A. Délka jednoho svařovacího impulsu je 5 ms a maximální počet impulsů je 18.[48]



Obr. 15 Odporová svářečka a páječka Sunkko 709A [49].

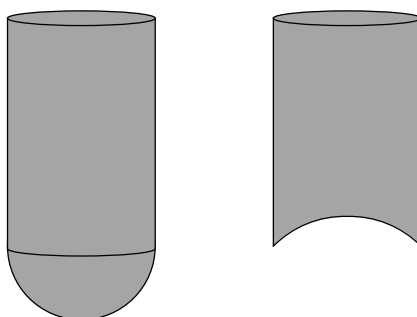
Před vytvářením finálních testovacích vzorků touto technologií bylo na rozdíl od krimpování třeba vytvořit několik desítek pokusných spojů, z důvodu nalezení vyhovujícího nastavení přístroje. Pro každý ze tří použitých vodičů bylo tedy provedeno pár desítek pokusných spojů, kdy za pomoci postupného zvyšování či snižování dodané energie, čehož bylo docíleno pomocí změny délky impulzu a regulace velikosti proudu, byly hledány vyhovující parametry. Pokud byla dodaná energie příliš malá, logicky neproběhl proces odporového svařování, jelikož dodaná energie nedokázala roztavit spojovaný materiál. Pokud ovšem dodaná energie byla příliš vysoká, objevoval se nežádoucí výboj, který poškodil vodič i substrát. V extrémním případě při dodání příliš vysoké energie byl vodič i substrát v místě spoje kompletně zničen, což je možné vidět na Obr. 16 kde v důsledku výboje došlo k přerušení vodiče a v substrátu vznikla díra.



Obr. 16 Svařované místo po dodání příliš vysoké energie.

Je třeba dodat, že volba vyhovujících parametrů pro nastavení svařovacího zařízení byla posuzována velmi subjektivně, za pomoci prozkoumávání jednotlivých spojů pod mikroskopem a zjišťování, jak je vodič k vodivé plošce na substrátu přivařen. Ohled byl brán hlavně na opakovatelnost tvorby spoje, stav vodiče po svaření, mechanickou pevnost spoje a jak moc byl deformován polyesterový substrát.

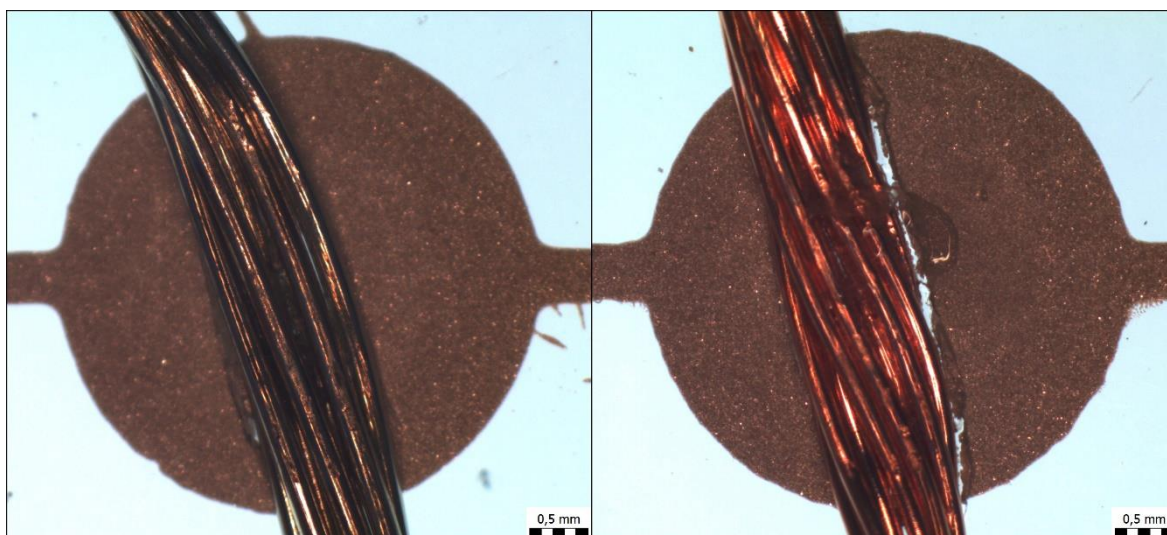
Při manuálním odporovém svařování k vytváření vzorků pro tuto práci bylo využito klasických elektrod, které je možné vidět v levé části *Obr. 17*. Vzhledem k jejich tvaru bylo třeba určité zručnosti k uskutečnění svařovaného spoje. Do budoucna by bylo pro svařování svazkových vodičů určitě vhodnější mít elektrody, které by částečně kopírovaly tvar vodiče, jako je to ukázané v pravé části *Obr. 17*.



*Obr. 17 Vlevo – užívané svařovací elektrody; vpravo – navrhované elektrody.*

Jejich výhodou by bylo, že díky částečnému kopírování tvaru vodiče by elektroda obejmula vodič a tím pádem by nehrozilo, že při vyvinutí určité přítlačné síly elektrody z jeho povrchu sklouznou. Dalším důvodem pro užití navrhovaných elektrod je, že občas při svařování za pomoci použitých elektrod docházelo k poškození vodivé plošky, jak je zobrazeno na *Obr. 18*. Důvodem tohoto poškození bylo, že při vyvinutí přítlačné síly, která se z elektrod přenášela na vodič, se vodič při procesu odporového sváření v době zapékání do folie vlivem tvaru elektrod posunul do strany. Díky tomu vznikl na vodivé plošce pruh, který neobsahoval žádný natisknutý vodivý materiál a tím pádem byla přerušena vodivá dráha. Využití navrhovaných elektrod by tedy mohlo napomoci lepší opakovatelnosti a spolehlivosti vytváření svařovaných spojů.



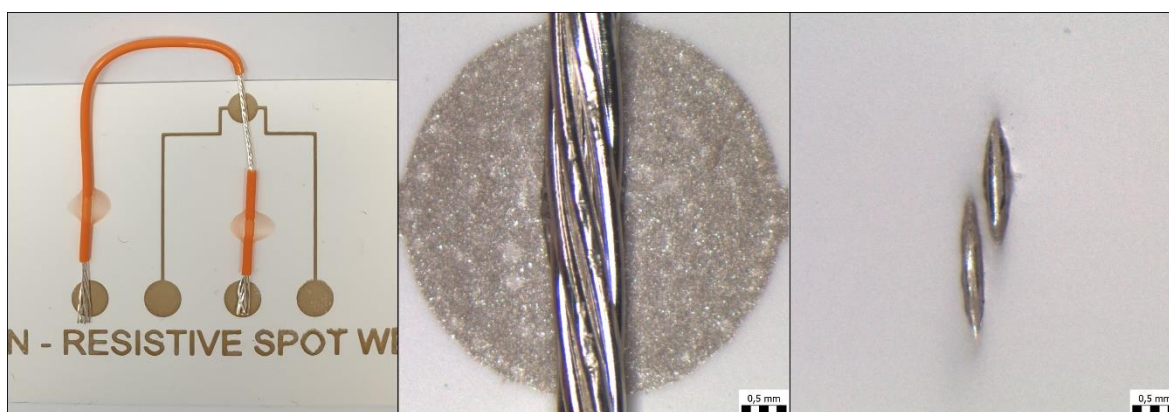


Obr. 18 Vlevo – správně svařený kontakt; vpravo – špatně svařený kontakt v důsledku posuvu vodiče při svaření.

Po nalezení vyhovujících parametrů bylo vytvořeno přibližně 140 vzorků, ovšem kvůli výše popsaným problémům při svařování bylo přibližně 10 % vzorků vadných a musely být vyřazeny. Vybrané nastavení přístroje pro finální vzorky a jednotlivé vodiče je možné vidět v následující Tab. 5. Finální testovací vzorek pro svařování je možné vidět na Obr. 19.

Tab. 5 Nastavené parametry přístroje pro odporové svařování.

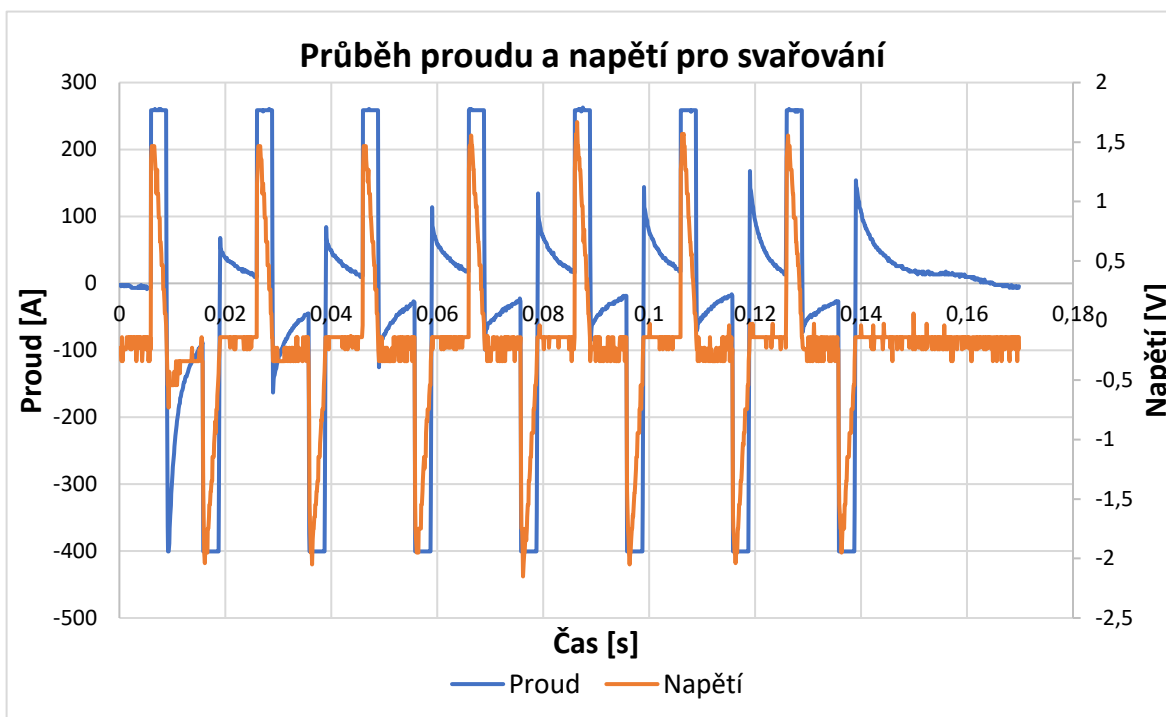
Jádro vodiče	Povrchová úprava	Doba svařování	Zvolený proud	Dodaná energie [J]
Cu	-	4P / 20 ms	5	8,12
Cu	Sn	6P / 30 ms	4,5	8,16
Cu	Ag	14P / 70 ms	4	17,26



Obr. 19 Finální testovací vzorek svařovaného vodivého spoje; zleva – finální vzorek, detail spoje zepředu, detail spoje zezadu.

Dodaná energie byla vypočtena na základě zkoumání každého ze tří použitých nastavení přístroje pro odporové svařování. Toto zkoumání bylo provedeno pomocí měřící proudové

sondy Agilent 1146A, která byla připojena k osciloskopu Agilent DSO-X 3012A. Zároveň pro měření napětí byly na druhý kanál osciloskopu zapojeny sondy, které měřily průběh napětí mezi elektrodami. Výsledkem měření je dosažení grafů průběhů jednotlivých svařovacích parametrů. Pro ukázkou je v grafu na *Obr. 20* možno vidět průběh svařovacího proudu a napětí pro postříbřený měděný vodič.



*Obr. 20 Graf průběhu svařovacího proudu a napětí pro postříbřený měděný vodič.*

Dodaná energie byla následně z průběhu získána za využití principu vzorkování. Měřené hodnoty pomocí osciloskopu byly zaznamenávány každých 0,0001 s. To umožnilo zvolit pro nejpřesnější způsob vzorkování stejně velkou periodu. Poté už bylo pouze využito vzorce pro výpočet elektrické energie, který je vyjádřen jako:

$$E = UIt \quad (1.4)$$

kde  $U$  je napětí,  $I$  je proud a jako  $t$  byla použita již zmíněná časová perioda.

Proud a napětí byly následně převedeny na absolutní hodnoty a pro každou deseti tisícinu sekundy průběhu byla spočítána hodnota elektrické energie. Poté byly tyto dílčí hodnoty elektrické energie sečteny, což vedlo k dosažení výpočtu celkové elektrické energie spotřebované ke svaření jednoho vzorku. Jednotlivé hodnoty je možné vidět v *Tab. 5*.

## 6 Testování vodivého spojení

Při výběru testovacích postupů pro vytvořené vzorky v rámci této diplomové práce bylo třeba simulovat reálné vnější vlivy, které mohou na elektrický kontakt na ohebném substrátu v praxi působit. Inspirace byla čerpána hlavně z rešerše sepsané v kapitole 4 této práce a zároveň byl brán zřetel na vybavení a možnosti ZČU. Hlavním parametrem pro posuzování kvality vodivého spoje byl zvolen přechodový odpor spoje, který je představen v kapitole 4.1 této práce a byl měřen pomocí čtyřvodičové metody.

K měření pomocí čtyřvodičové metody bylo po celou dobu testování využito měřícího přístroje značky Keithley s typovým číslem 2701. Jedná se o přístroj, který je schopný měřit odpor již od hodnoty  $100 \mu\Omega$ . Použité měřící sondy je možné vidět na následujícím *Obr. 21*. Jedná se o sondy, které byly navrženy pro měření při dřívějších projektech ZČU, ovšem svými vlastnostmi se hodily i pro tuto práci. Sonda má plastové tělo, které bylo vytvořeno pomocí 3D tisku. Ve spodní části je umístěn silný samariový magnet, který se stará o fixaci sondy a zároveň v kombinaci s pružnými měřícími jehlami (v tomto případě kruhové) zajišťuje konstantní přitlačnou sílu. Jelikož bylo měřeno pomocí čtyřvodičové metody, bylo třeba pro měření využít dvě sondy.



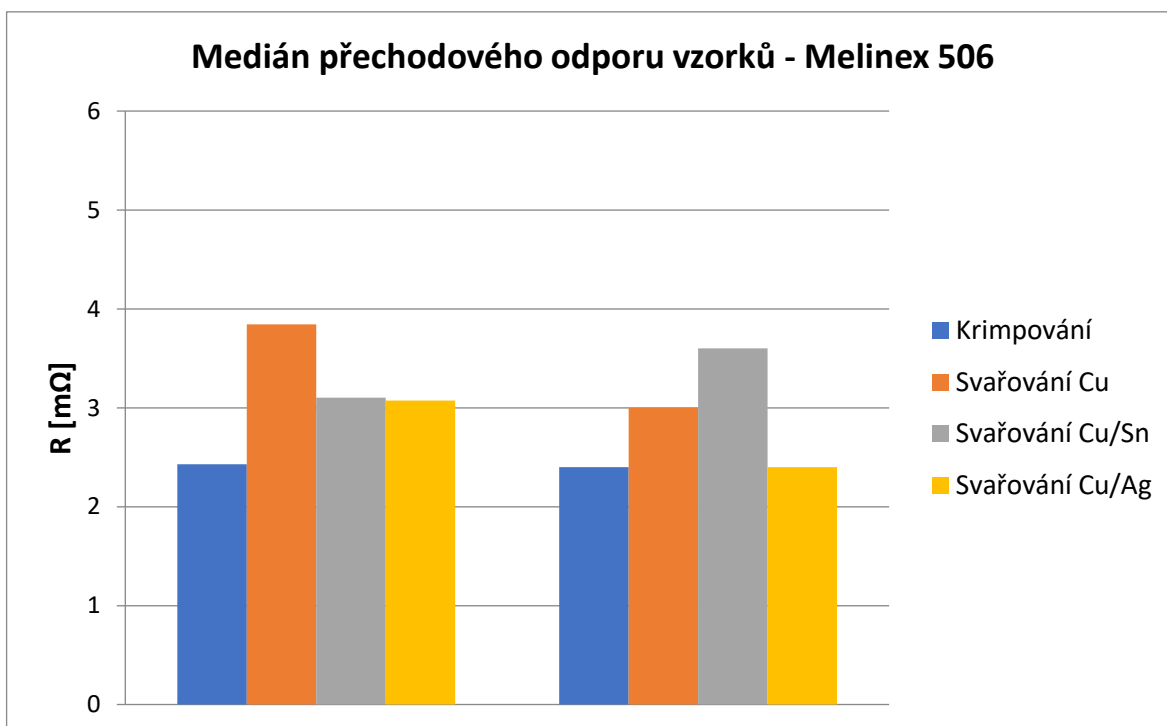
*Obr. 21 Sondy použité pro měření přechodového odporu.*

Grafy pro porovnání jednotlivých technologií v této práci vyobrazují medián přechodového odporu vodivého spoje vzorků. Medián byl oproti průměrné hodnotě zvolen, jelikož ve valné většině případů dosahují přechodové odpory nízkých hodnot do  $15 \text{ m}\Omega$ . Tím pádem by jeden nekvalitní vzorek mohl ve vytvořeném počtu vzorků velmi ovlivnit výsledky. Medián naproti tomu je hodnota, kde 50 % hodnot je vyšších a 50 % hodnot

nižších. Díky tomu nehrozí ovlivnění výsledků v důsledku jedné extrémní hodnoty. V tabulkách je poté možno vidět přesnou minimální, maximální a průměrnou hodnotu. Dále je třeba říci, že pokud dosáhl přechodový odpor kontaktu vyšší hodnotu než  $1 \Omega$ , byl tento vzorek brán jako nekvalitní vodivý spoj a tím pádem byl před testováním vyřazen, nebo v průběhu testování byl označen jako zničený vlivem testování.

## 6.1 Počáteční parametry testovaných vzorků

Po vytvoření všech finálních testovacích vzorků byly vybrané vzorky nafoceny pomocí mikroskopu Olympus SZX10 pro pozdější zkoumání povrchových změn na vodivém spoji a zároveň byl u každého vzorku před začátkem jeho testování změřen přechodový odpor, aby po provedení testů bylo možné posoudit odolnost vytvořených vodivých spojů. Na následujících *Obr. 22 a Obr. 23* je tedy pro porovnání v grafu zobrazen medián všech hodnot přechodového odporu vzorků pro obě technologie kontaktování a u svařování pro zvolené povrchové úpravy vodičů, než na nich byly provedeny testy.



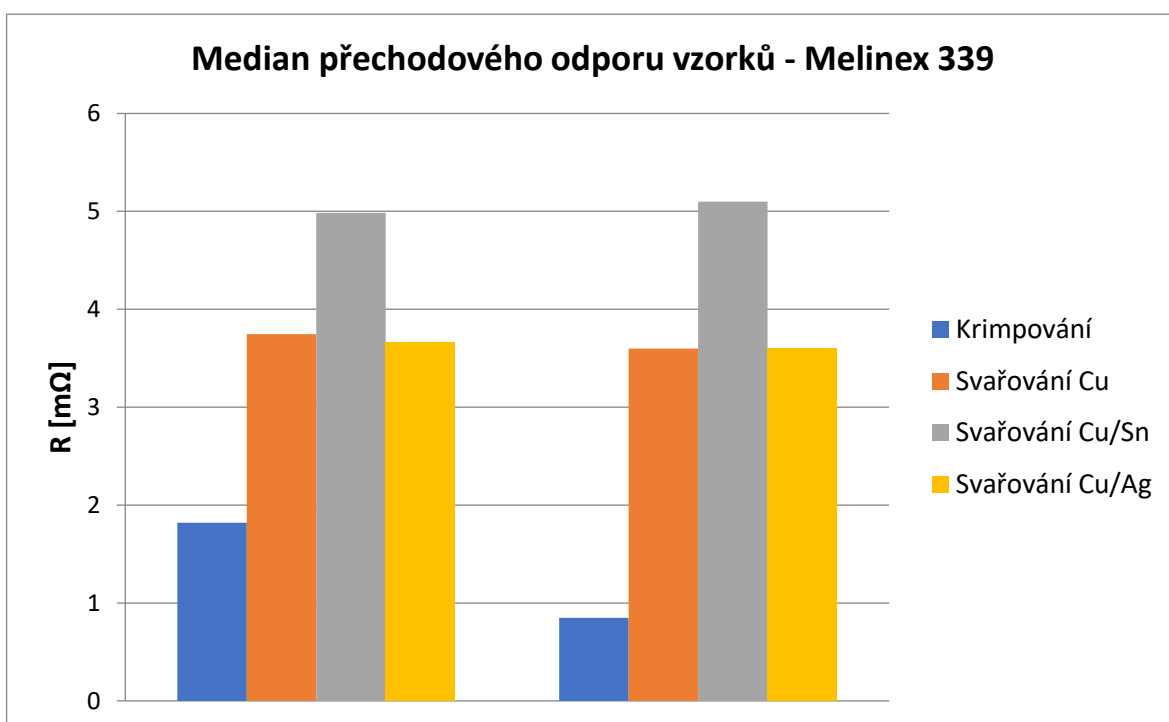
Obr. 22 Graf mediánu přechodového odporů vzorků před testy pro substrát Melinex 506.

Na prvním grafu, který je na *Obr. 22*, je zobrazen medián hodnot přechodového odporu spojů naměřených na substrátu Melinex 506. Z grafu je možné vidět, že nejmenší mediánovou hodnotu přechodového odporu dosahují spoje vytvořené pomocí krimpování a zároveň pomocí svařování, jedná-li se o postříbřený měděný vodič. Mediánové hodnoty jednotlivých testovaných typů nabývají hodnot mezi 2,4 – 3,6 mΩ. Rozdíly mezi počátečními hodnotami jsou tedy u toho substrátu velmi malé a všechny čtyři testované typy vodivého spoje nabývají hodnot prakticky ideálního elektrického kontaktu. V následující *Tab. 6* je pak možné vidět detailnější informace o naměřených počátečních hodnotách.

*Tab. 6 Detail pro počáteční hodnoty přechodového odporu vzorků na Melinex 506.*

Technologie	Materiál	R [mΩ]			
		Min	Max	Průměr	Medián
Krimpování	-/Sn	0,1	5,5	2,43	2,4
Svařování	Cu	0,2	16,1	3,84	3
	Cu/Sn	0,7	5,6	3,10	3,6
	Cu/Ag	0,1	8,5	3,07	2,4

Mediánové hodnoty přechodového odporu pro vodivé spoje vytvořené na substrátu Melinex 339 jsou v grafu znázorněny na *Obr. 23*. Z grafu je možné vidět, že na tomto substrátu je v naměřených hodnotách pro jednotlivé technologie větší rozdíl, než tomu bylo na substrátu Melinex 506.



*Obr. 23 Graf mediánu přechodového odporů vzorků před testy pro substrát Melinex 339.*

Detailnější naměřené hodnoty je možné vidět v *Tab. 7*. Z tabulky je možné vidět, že medián hodnot naměřených pro technologii svařování se pohybuje v rozmezí mezi 3,6 – 5,1 m $\Omega$ , což je více jak čtyřnásobek hodnot pro vodivé spoje vytvořené užitím technologie krimpování. I v tomto případě se ale celkově jedná o hodnoty, které jsou velmi uspokojivé.

*Tab. 7 Detail pro počáteční hodnoty přechodového odporu vzorků na Melinex 339*

Technologie	Materiál	R [m $\Omega$ ]			
		Min	Max	Průměr	Medián
Krimpování	-/Sn	0,1	10,8	1,82	0,85
Svařování	Cu	0,1	7,6	3,74	3,6
	Cu/Sn	1,3	7,1	4,99	5,1
	Cu/Ag	0	7,8	3,67	3,6

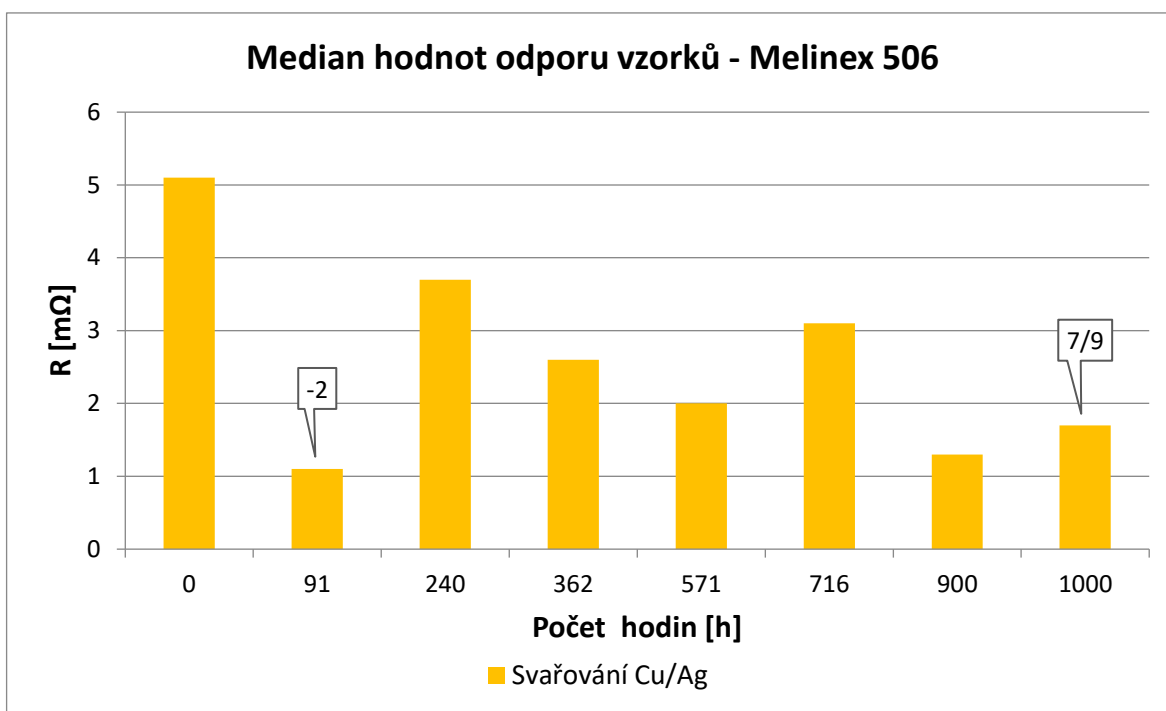
## 6.2 Klimatické testy

Pro klimatické testování vytvořených vzorků vodivého spojení bylo na základě provedené rešerše, konzultací a možnostech ZČU vybráno testování suchým teplem, vlhkým teplem a šokovou změnou teploty.

### 6.2.1 Suché teplo

Vzhledem k tomu, že prakticky každé elektronické zařízení se svou činností a tepelnými ztrátami zahřívá, je třeba jej chladit. Podíváme-li se ovšem například na dnešní moderní grafické karty, tak ty dosahují pracovních teplot kolem 80 – 100 °C i přes to že jsou chlazeny. Dlouhodobé působení takto vysoké teploty může vyústit v degradaci materiálu, což může narušit jeho mechanickou pevnost a způsobit nefunkčnost zařízení. Je tedy třeba zajistit, aby celé zařízení dokázalo správně a spolehlivě fungovat i za takovéto teploty. To samé platí u vytvořených vodivých spojích, které jsou testovány v této práci. Dle normy ČSN EN 60068-2-2, která se zabývá testováním suchým teplem bylo provedeno testování celkem 28 vytvořených vzorků. Tato norma předepisuje, aby bylo zamezeno dotyku testovacích vzorků se stěnami teplotní komory a tím zamezeno přenosu teploty sáláním a vedením. Toho bylo docíleno zavěšením vzorků pomocí svorek k výškově nastavitelnému roštu, který byl umístěn do takové výšky, aby vzorky byly přibližně uprostřed testovací komory. Dle normy poté byl vybrán stupeň přísnosti. V tomto případě se jednalo o testování při teplotě 85 °C po dobu 1000 hodin, což je nejdelší časový interval, který norma předepisuje. Vzorky byly

v průběhu testu 6x vyjmuty z teplotní komory na maximálně 1 hodinu kvůli změření hodnot přechodového odporu. Využito bylo teplotní komory od firmy Memmert.

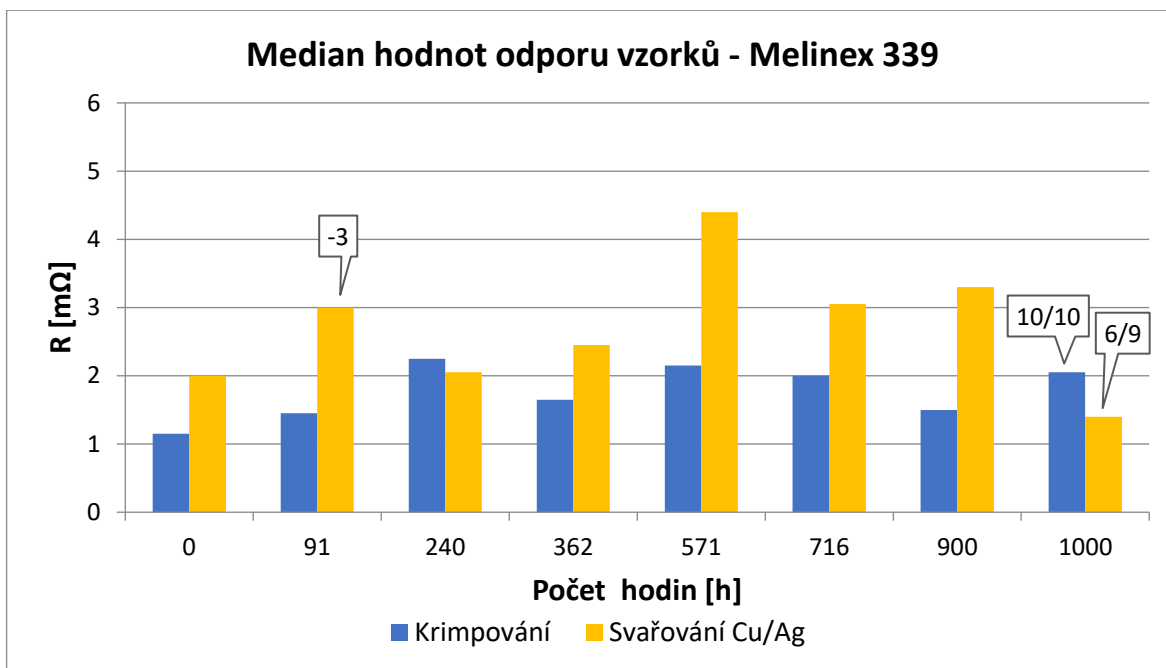


Obr. 24 Graf mediánu přechodového odporu vzorků při testování suchým teplem na substrátu Melinex 506.

Na Obr. 24 je možné vidět medián hodnot přechodového odporu testovaných vzorků na substrátu Melinex 506. Hodnoty v obdélníkovém popisovém poli nad jednotlivými sloupci, značí počet vzorků, které byly v tomto bodě zničeny. Nad posledním sloupcem je hodnota udávající kolik vzorků zůstalo vyhovujících. Vzhledem k tomu, že byl dostupný omezený počet substrátů a u této zkoušky nebyly očekávány zásadně rozdílné naměřené hodnoty za použití různých povrchových uprav vodičů, jedná se pouze o vzorky vyrobené technologií svařování a vodičem s postříbřenou povrchovou úpravou. Z grafu je možné vidět, že medián hodnot naměřených po určitých časových prodlevách se pohybuje mezi hodnotami 1,1 – 5,1 mΩ a zničeny byly pouze 2 z celkového počtu 9 testovaných vzorků, a to hned po prvním časovém intervalu 91 hodin. V Tab. 8 je možné vidět detailnější přehled naměřených hodnot.

Tab. 8 Detail naměřených hodnot při testování suchým teplem na substrátu Melinex 506.

Technologie	Materiál	R [mΩ]	Počet hodin [h]							
			0	91	240	362	571	716	900	1000
Svařování	Cu/Ag	min	0,2	0,2	1,3	0,5	0,1	0,1	0,4	0,1
		max	8,5	3	4,7	5	6,3	7	6,2	6
		průměr	4,79	1,39	3,45	2,64	2,47	2,74	2,03	2,00



Obr. 25 Graf mediánu přechodového odporu vzorků při testování suchým teplem na substrátu Melinex 339.

Graf na Obr. 25 zobrazuje medián naměřených hodnot vzorků vytvořených na substrátu Melinex 339. Na tomto substrátu byly vytvořeny vodivé spoje pomocí obou testovaných technologií, tedy krimpováním i svařováním. Vzhledem k tomu, že se u tohoto testu neočekávala žádná znatelná oxidace vodičů, bylo u vzorků, které byly vytvořeny svařováním opět použito pouze postříbřeného Cu vodiče. U krimpovaných vzorků dosahovaly mediánové hodnoty přechodového odporu v průběhu testování hodnot mezi 1,15 – 2,05 mΩ. V tomto případě se tedy jednalo o velmi kvalitní, stabilní a zároveň spolehlivé spoje, jelikož v průběhu celého testu se ani jeden krimpovaný spoj nezničil. Podíváme-li se na svařované spoje, tak u těch se mediánová hodnota přechodového odporu pohybovala mezi hodnotami o velikostech 1,4 – 4,4 mΩ. I přes vyšší hodnoty se ale pořád jednalo o kvalitní spoje, ovšem opět hned po prvním časovém intervalu testování byly zničeny 3 vzorky. V Tab. 9 je opět možné vidět detailnější informace o naměřených datech tohoto testu.

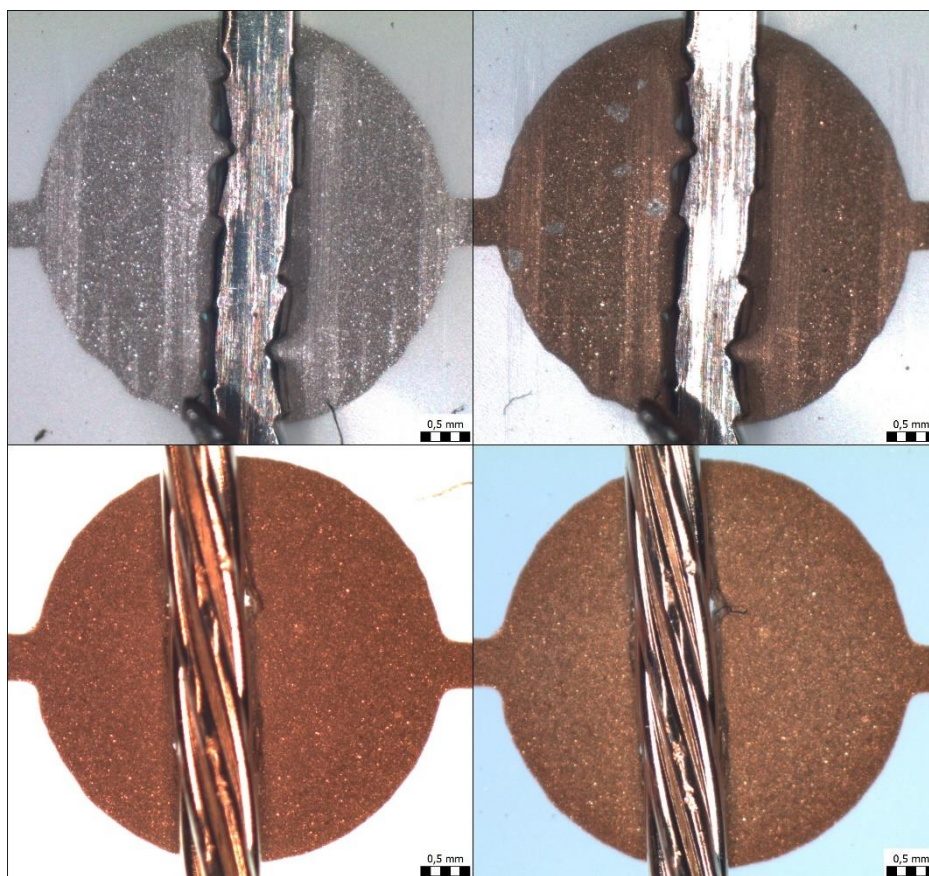
Tab. 9 Detail naměřených hodnot při testování suchým teplem na substrátu Melinex 339.

Technologie	Materiál	R [mΩ]	Počet hodin [h]							
			0	91	240	362	571	716	900	1000
Krimpování	-/Sn	min	0,1	0,1	0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
		max	5	4,1	4,6	5,3	6,5	7	2,9	5,5
		průměr	1,53	1,59	2,25	2,05	2,24	2,19	1,53	1,88
Svařování	Cu/Ag	min	0,1	0	0,4	0,2	0,1	2	0,1	0,6
		max	3,8	7,2	5,2	5,2	6,2	4,4	5,1	3,6
		průměr	2,04	3,15	1,95	2,76	3,85	3,12	3,06	1,51



Podíváme-li se na naměřené hodnoty po testování suchým teplem, je třeba říci, že krimpované spoje z tohoto testu vyšly lépe. Nejen že dosahují menších hodnot přechodového odporu kontaktu, ale zároveň nebyl v průběhu celého testování ani jeden z deseti vzorků vytvořených touto technologií zničen.

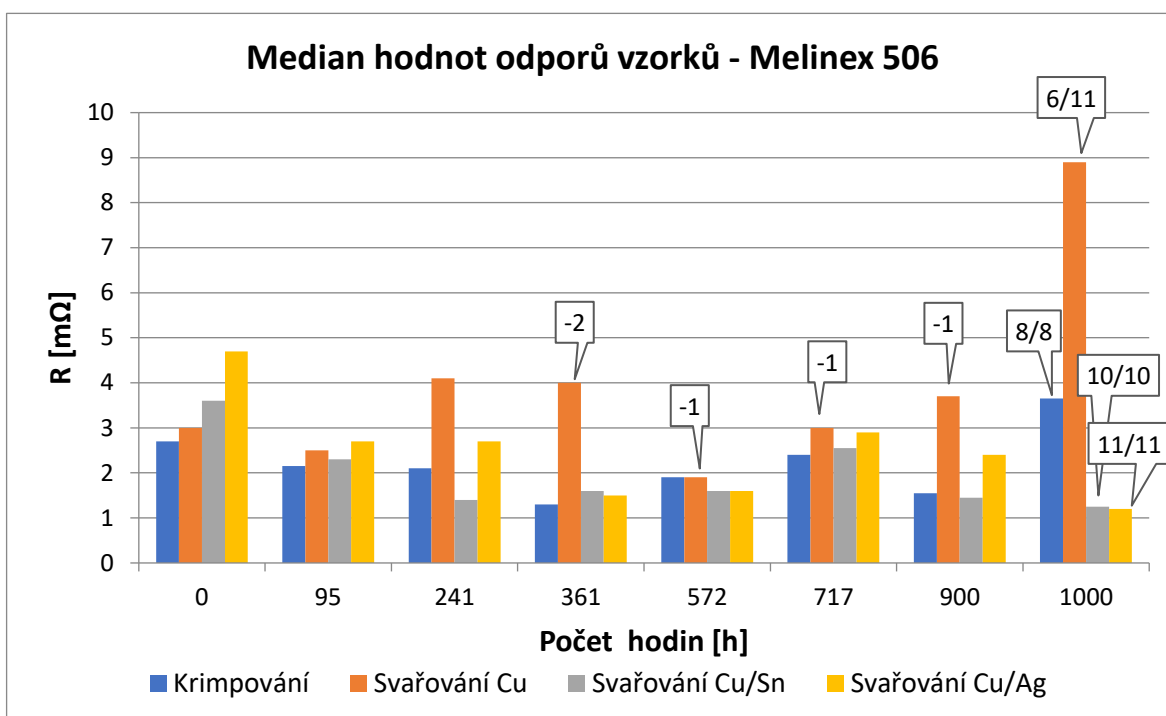
Vzorky vytvořené technologií svařování, které fungovaly po celou dobu testování sice dosahovaly vyšších hodnot přechodového odporu, ovšem i u nejvyšší naměřené hodnoty 8,5 m $\Omega$  se pořád jedná o velice kvalitní vodivý spoj. Problém se ovšem objevil u spolehlivosti těchto vodivých spojů, jelikož z celkového počtu 18 vzorků jich bylo 5 zničeno po prvním časovém intervalu 91 hodin. Ovšem v následujících 909 hodinách nebyly žádné další vzorky zničeny. Důvodem nefunkčnosti všech 5 vzorků bylo přerušení vodivého spojení mezi vodičem a jednou, či oběma stranami kontaktní plochy na substrátu. Tento problém se ale projevil pouze v prvním časovém intervalu, tedy v počátku testování. Je tedy možné spekulovat, že vzorky byly z důvodu manuálního svařování nekvalitní a prvotní působení tepla pouze tyto nedokonalosti gradovalo. Na následujícím *Obr. 26* je možno vidět fungující vytvořené spoje před a po testu.



*Obr. 26 Ukázka vzorků pro testování suchým teplem; vlevo – před testem; vpravo – po testu.*

## 6.2.2 Vlhké teplo

Při testování vlhkým teplem bylo očekáváno, že se projeví vliv oxidace materiálu, zejména čistého měděného vodiče. Bylo proto pro tento test použito všech čtyřech typů vzorků na obou dostupných polyesterových substrátech. Dle normy ČSN EN 60068-2-67, která je popsána v kapitole 4.2 bylo opět zajištěno, aby vzorky nebyly ovlivňovány dotykem se stěnami klimatické komory. Z předepsaných časových intervalů testování bylo vybráno 1000 hodin, během kterých byly vzorky vystaveny předepsané teplotě 85 °C a vlhkosti 85 %. Po celou dobu testování bylo využito klimatické komory Vötsch VC 7018, ze které byly vzorky během testování opět vyjmuty 6x, přičemž pokaždé na maximální dobu 1 hodiny.



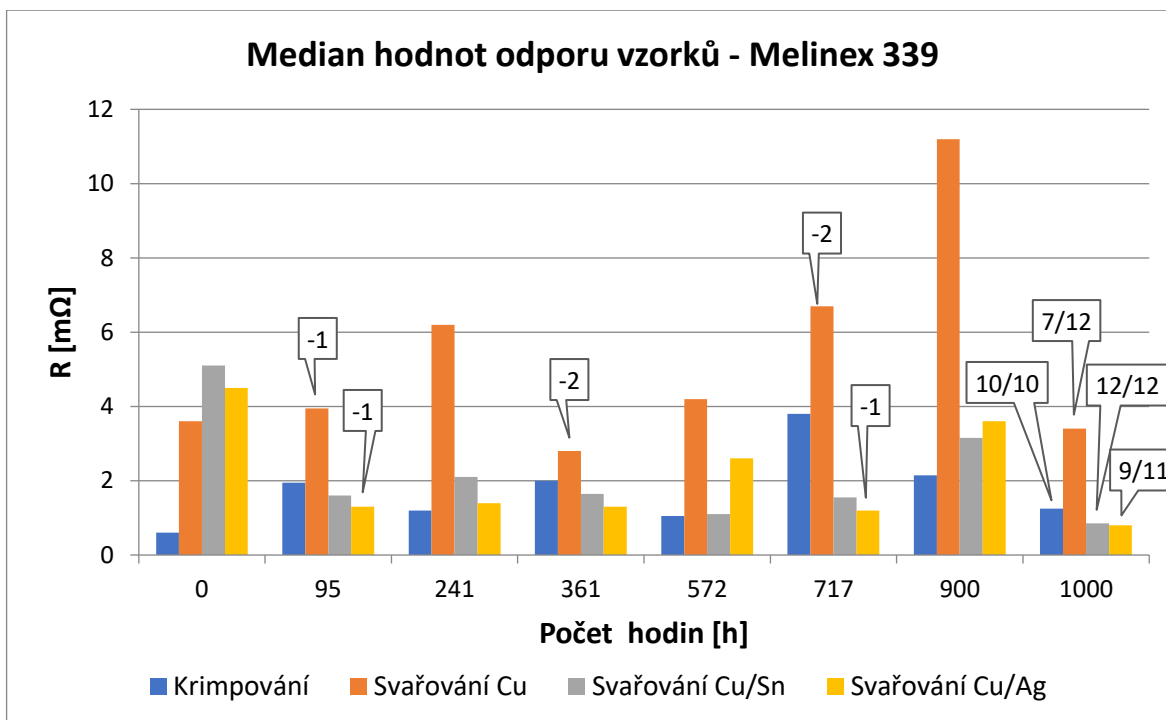
Obr. 27 Graf mediánu přechodového odporu vzorků při testování vlhkým teplem na substrátu Melinex 506.

Mediánové hodnoty testovaných vzorků vytvořených na substrátu Melinex 506 je možné vidět v grafu na Obr. 27. Jak již bylo výše zmíněno, pro toto testování bylo využito všech testovaných druhů vodivého spojení. Z grafu je tedy možné vypočítat, jaký vliv měla vysoká teplota a vlhkost na hodnotu odporu jednotlivých druhů spojů v průběhu testování vlhkým teplem. U krimpovaných vzorků, které všechny fungovaly v průběhu celého testu, se jedná o mediánové hodnoty pohybující se mezi 1,3 – 3,65 mΩ. U prvního typu svařovaných vzorků, kde byla jako vodič použita měď bez povrchové úpravy byly hodnoty mediánu mezi 1,9 – 8,9 mΩ, přičemž bylo v průběhu testu zničeno 5 vzorků.

U druhého typu svařovaných vzorků, kde byly použity pocínované měděné vodiče, fungovaly opět všechny vzorky po celou dobu testu a medián dosahoval hodnot mezi 1,25 – 3,6 mΩ. Poslední typ vzorků, kde bylo využito přivařování postříbřeného měděného vodiče, nabýval medián hodnot 1,2 – 4,7 mΩ a v průběhu testování nebyl žádný vzorek zničen. Až na vzorky, využívající pouze měděné vodiče jsou hodnoty velice podobné. Na všech vzorcích byla po testu viditelná oxidace, která se nejvíce vizuálně projevovala na měděném vodiči bez povrchové úpravy. Detailnější informace a naměřené hodnoty pro toto měření je možné vidět v *Tab. 10*.

*Tab. 10 Detail naměřených hodnot při testování vlhkým teplem na substrátu Melinex 506.*

Technologie	Materiál	R [mΩ]	Počet hodin [h]							
			0	95	241	361	572	717	900	1000
Krimpování	-/Sn	min	0,5	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1
		max	4,8	9,5	5,9	2,6	4,2	11	5,1	15,2
		průměr	2,54	2,95	2,42	1,32	1,95	3,93	1,90	4,26
Svařování	Cu	min	0,2	0,3	0,2	0,1	0,4	0,2	0,9	0,1
		max	16,1	24,2	8,6	16,7	6,4	19,2	12,9	21,4
		průměr	3,84	4,89	4,10	4,87	2,26	6,80	4,91	10,31
	Cu/Sn	min	0,7	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0,2	0,4
		max	5,6	6,6	5,6	6,5	7,6	4,6	3,4	3,5
		průměr	3,10	2,54	1,94	2,59	2,09	2,43	1,71	1,35
	Cu/Ag	min	0,4	0,4	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,1
		max	8,2	7,2	5,6	4,6	7,5	5,7	7,4	6,3
		průměr	4,30	2,98	2,45	1,74	2,43	2,68	2,89	1,72



Obr. 28 Graf mediánu přechodového odporu vzorků při testování vlhkým teplem na substrátu Melinex 339.

Sada vzorků vytvořených na substrátu Melinex 339 a jejich mediánové hodnoty přechodového odporu v průběhu testu je vidět v grafu na Obr. 28. Na tomto substrátu byly vytvořeny všechny čtyři typy vzorků. Stejně jako v předchozím případě je možné z grafu sledovat, že nejhorších výstupních hodnot dosahují svařované vzorky s měděným vodičem bez povrchové úpravy. Jejich mediánová hodnota přechodového odporu se pohybuje mezi 2,8 – 11,2 mΩ, což je největší rozptyl hodnot ze všech vzorků. Zároveň bylo v průběhu testování zničeno 5 těchto vzorků. Krimpované spoje opět potvrdily své vynikající vlastnosti a medián jejich hodnot se pohybuje mezi 0,6 – 3,8 mΩ, přičemž opět žádný ze vzorků nebyl vlivem probíhajícího testu zničen. Stejně spolehlivé byly i svařované spoje s pocínovaným měděným vodičem, kde se hodnoty pohybují mezi 0,85 – 5,1 mΩ. Skoro totožných hodnot dosahoval i poslední typ vzorků s postříbřeným měděným vodičem, kde byly hodnoty rozptýleny mezi 1,2 – 4,5 mΩ. V tomto případě ale byly 2 vzorky v průběhu testu zničeny. Vizualně bylo na vzorcích v průběhu a po konci testování opět vidět značné oxidace. Detailnější hodnoty je opět možné vidět v následující Tab. 11.

Tab. 11 Detail naměřených hodnot při testování vlhkým teplem na substrátu Melinex 339.

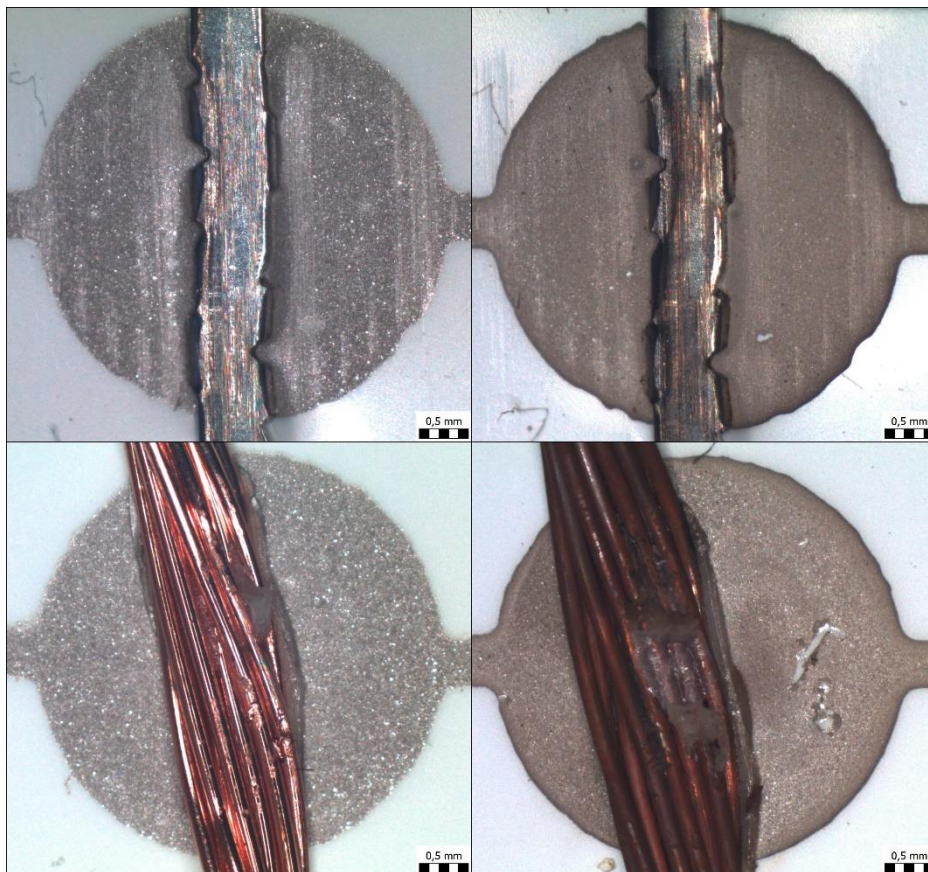
Technologie	Materiál	R [mΩ]	Počet hodin [h]							
			0	95	241	361	572	717	900	1000
Krimpování	-/Sn	min	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	1,7	0,2	0,1
		max	10,8	7,7	5,4	7,8	3,4	13	12,7	6,7
		průměr	2,11	2,29	1,53	2,43	1,43	5,07	3,45	2,26
Svařování	Cu	min	0,1	0,4	0	0,3	2,5	0,9	1,9	0,1
		max	7,6	23,3	25,3	20,6	12	14	58,9	15,5
		průměr	3,74	6,20	7,90	5,67	5,60	6,51	16,94	5,52
	Cu/Sn	min	1,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1
		max	7,1	7,7	9	9,6	5	7,1	4	9,9
		průměr	4,99	1,95	2,63	2,18	1,28	1,87	2,97	1,85
	Cu/Ag	min	3	0,1	0	0,1	0,1	0,1	2,9	0,1
		max	7,8	6	3	7,1	5	3,6	5,2	6,6
		průměr	4,77	1,85	1,38	1,49	2,64	1,51	3,51	1,67

Z celkového počtu 18 krimpovaných vzorků nebyl ani jeden v průběhu testování zničen a jejich mediánové hodnoty přechodového odporu opět dosahovaly velmi slibných hodnot po celou dobu testování. Ty se i přes velmi náročný test pohybovaly maximálně do hodnoty 12,7 mΩ, a to až po 900 hodinách testování, ovšem medián nepřekročil hranici 3,8 mΩ.

Svařované vzorky s povrchovou úpravou dosahovaly přibližně stejných hodnot jako ty krimpované. U pocínovaných vzorků se maximální hodnota objevila na hranici 9,9 mΩ, přičemž všech 22 vzorků zůstalo funkčních po celou dobu testu. Nejvyšší mediánová hodnota se pak zastavila na hodnotě 5,1 mΩ. Postříbřené vzorky dosáhly nižší maximální hodnoty 8,2 mΩ, s nejvyšší mediánovou hodnotou 4,7 mΩ. Bohužel ale v průběhu testování byly zničeny 2 vzorky z 22. Jeden ze vzorků byl zničen hned po prvním časovém úseku 95 hodin, tudíž je opět možné, že se jednalo o nekvalitní vzorek, ovšem druhý vzorek byl zničen až po 717 hodinách, což u něj tuto možnost vylučuje. I tak se ale u takto agresivního klimatického testu jedná o dobré výsledky pro oba tyto typy vzorků.

Naproti tomu svařované měděné vzorky bez povrchové úpravy z testu vyšly zcela podle očekávání naprosto nejhůře. Velká oxidace, kterou je možno vidět ve spodní části Obr. 29, se na nich projevila zničením 10 z celkového počtu 23 testovaných vzorků. Mezi zničenými vzorky se objevily i takové, které sice při měření multimetrem měly vodivé spojení, ovšem jejich odpor dosahoval i desítek mega ohmů. Ze vzorků, které zůstaly funkční nebo tak byly vyhodnoceny se maximální hodnota přechodového odporu vyšplhala až na hodnotu 58,9

m $\Omega$ . To je oproti vzorkům s povrchovou úpravou nebo krimpováním téměř pětinasobek. Stejně tak nejvyšší mediánová hodnota, která dosahuje 11,2 m $\Omega$  je minimálně dvakrát vyšší, než je tomu u ostatních vzorků.



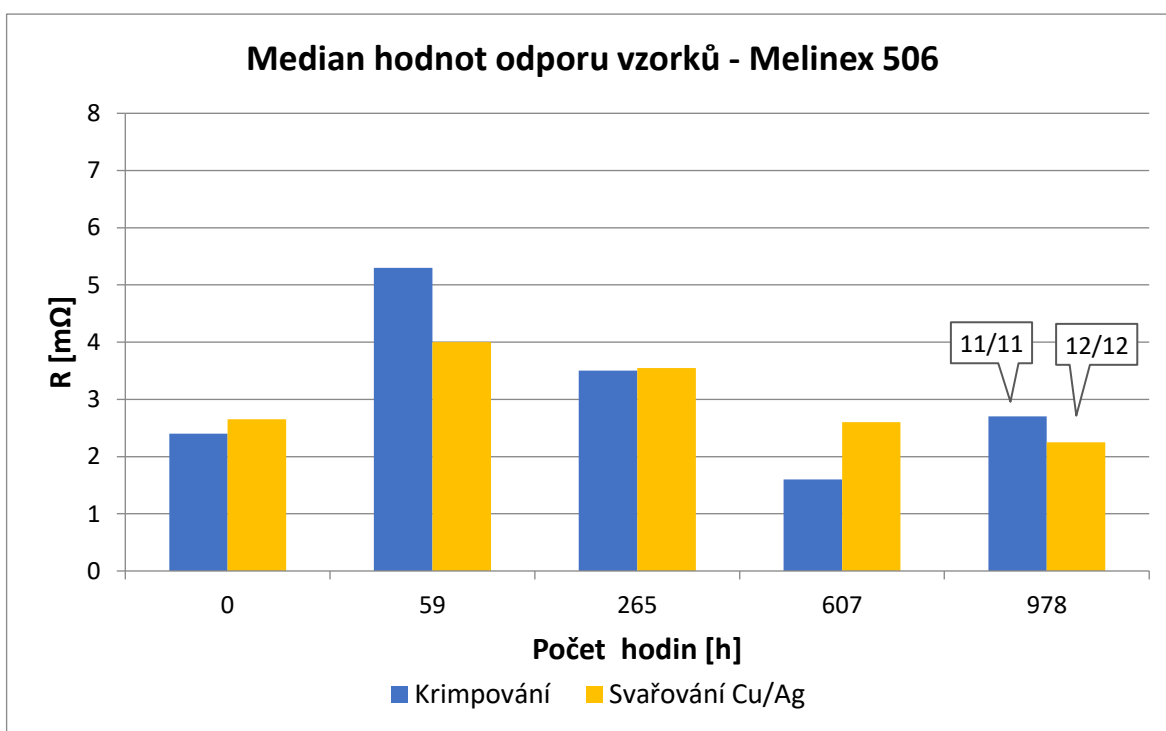
Obr. 29 Ukázka vzorků pro testování vlhkým teplem; vlevo – před testem; vpravo – po testu.

Z výsledků testů pro vlhké teplo je tedy patrné, že pokud budou vodivé spoje vystavovány nepříznivým klimatickým podmínkám, které budou způsobovat jejich oxidaci, je třeba v zájmu zajištění kvality a spolehlivosti vodivého spoje vybrat vodiče z materiálů, které jsou schopny oxidaci odolávat nebo minimálně mají z takového materiálu realizovanou alespoň povrchovou úpravu.

### 6.2.3 Změna teploty

Test šokovou změnou teploty má za úkol ověřit, jak se testovaný vzorek chová v případě, že je v krátkém časovém horizontu opakovaně vystaven rychlé změně teploty. Během toho může například vlivem různých tepelných roztažností použitých materiálů

docházet k deformaci či popraskání spoje. Inspirace pro tento test byla brána z normy ČSN EN 60068-2-14 ed. 2, která je blíže popsána v kapitole 4.2 této práce. Využito bylo teplotní šokové komory Vötsch VT3 7012, která je uzpůsobena tak, že v horní části je komora s vyšší teplotou a ve spodní části s nižší. Dle norem byly zvoleny teploty  $-25\text{ °C}$  a  $85\text{ °C}$ , které měly zajistit dostatečně velký rozdíl teplot, který by mohl na vzorky působit v praxi. Časový interval byl nastaven na 10 minut pro pobyt v každé komoře, který měl zajistit dostatečnou dobu pro ohřátí, či ochlazení vzorku na zvolenou teplotu. Čas potřebný k přemístění vzorků mezi komorami je menší než 10 sekund. Délka jednoho cyklu tedy byla s přičtením času pro přemístění vzorků mezi jednotlivými komorami něco málo přes 20 minut a celkový zvolený počet cyklů byl nastaven na hodnotu 1000. Vzorky byly v průběhu testování 3x přeměřeny. Vzorky použité v tomto testu byly vytvořeny pomocí krimpování a u svařování se jednalo pouze o vodič s postříbřenou povrchovou úpravou.



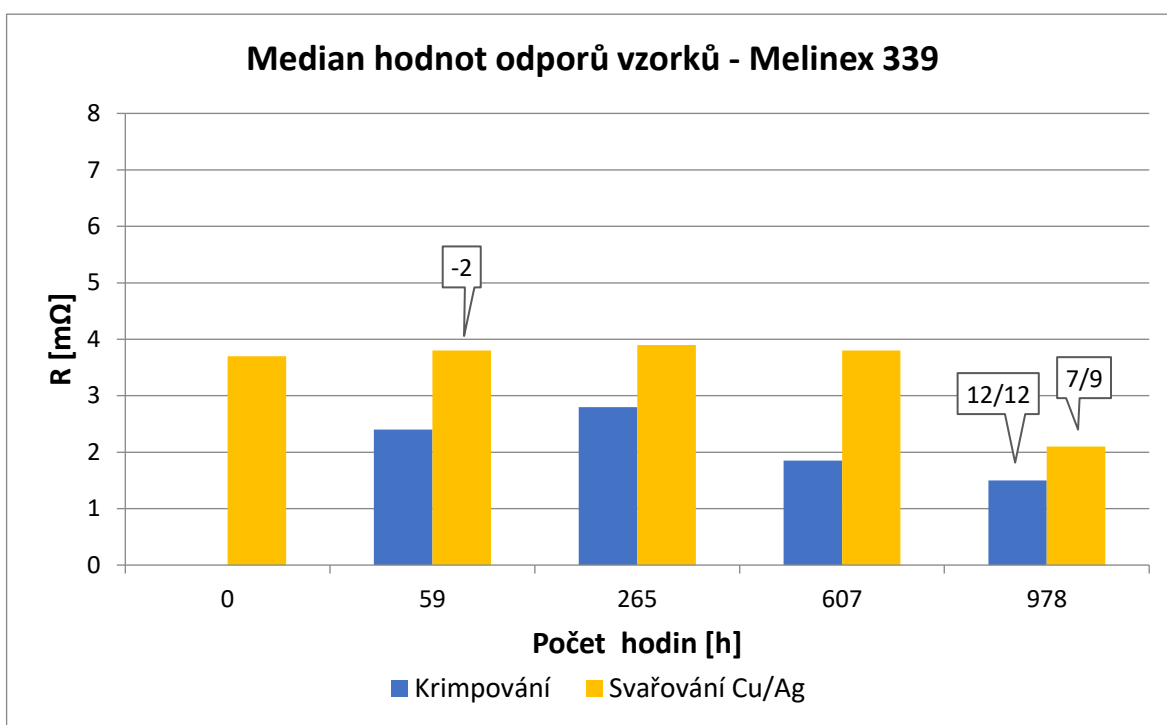
Obr. 30 Graf mediánu přechodového odporu vzorků při testování šokovou změnou teploty na substrátu Melinex 506.

Na Obr. 30 je zobrazen graf pro mediánové hodnoty přechodového odporu vzorků vytvořených na substrátu Melinex 506. V této sadě vzorků nebyl zničen vlivem testování žádný z krimpovaných či svařovaných vzorků. Obě technologie dosahovaly v průběhu měření skoro stejných naměřených hodnot, přičemž nejvyšší hodnota pro krimpovaný spoj dosahovala v tomto případě  $9,1\text{ m}\Omega$  po 265 cyklech a nejvyšší medián  $5,3\text{ m}\Omega$ . U

svařovaného spoje tyto hodnoty byly lepší, když maximální hodnota dosahovala 8,9 mΩ a medián nepřekročil v jednotlivých měřeních hodnotu 4 mΩ. Bližší informace o naměřených hodnotách pro tuto sadu vzorků je možno vidět v *Tab. 12*.

*Tab. 12 Detail naměřených hodnot při testování šokovou změnou teploty na substrátu Melinex 506.*

Technologie	Materiál	R [mΩ]	Počet cyklů				
			0	59	265	607	978
Krimpování	-/Sn	min	0,2	1,6	0,4	0	0
		max	5,3	8,7	9,1	4,1	5,3
		průměr	2,45	5,49	3,53	1,63	2,72
Svařování	Cu/Ag	min	0,6	0,1	0,7	0,2	0,2
		max	8,1	8,9	6,1	7,4	5,4
		průměr	3,54	3,94	3,58	2,82	2,50



*Obr. 31 Graf mediánu přechodového odporu vzorků při testování šokovou změnou teploty na substrátu Melinex 339.*

Výše zobrazený graf na *Obr. 31* se vztahuje k sadě vzorků na substrátu Melinex 339. Hned na úvod je třeba říci, že vlastní vinou nebyly u krimpovaných vzorků změřeny výchozí hodnoty před začátkem měření. Naštěstí ovšem v průběhu celého testu žádný z těchto vzorků nebyl zničen. Stejně tak i přechodový odpor nepřesáhl hodnoty 9,8 mΩ a medián dokonce pouze 2,8 mΩ. Co se týče svařovaných vzorků, ty se opět držely na přibližně stejných



hodnotách, když maximální naměřená hodnota byla 9,7 mΩ a medián měl nejvyšší hodnotu 3,9 mΩ. Bohužel ale u těchto vzorků po prvních 59 cyklech byly 2 nefunkční. Opět je možné v následující *Tab. 13* vidět přesnější informace o naměřených hodnotách.

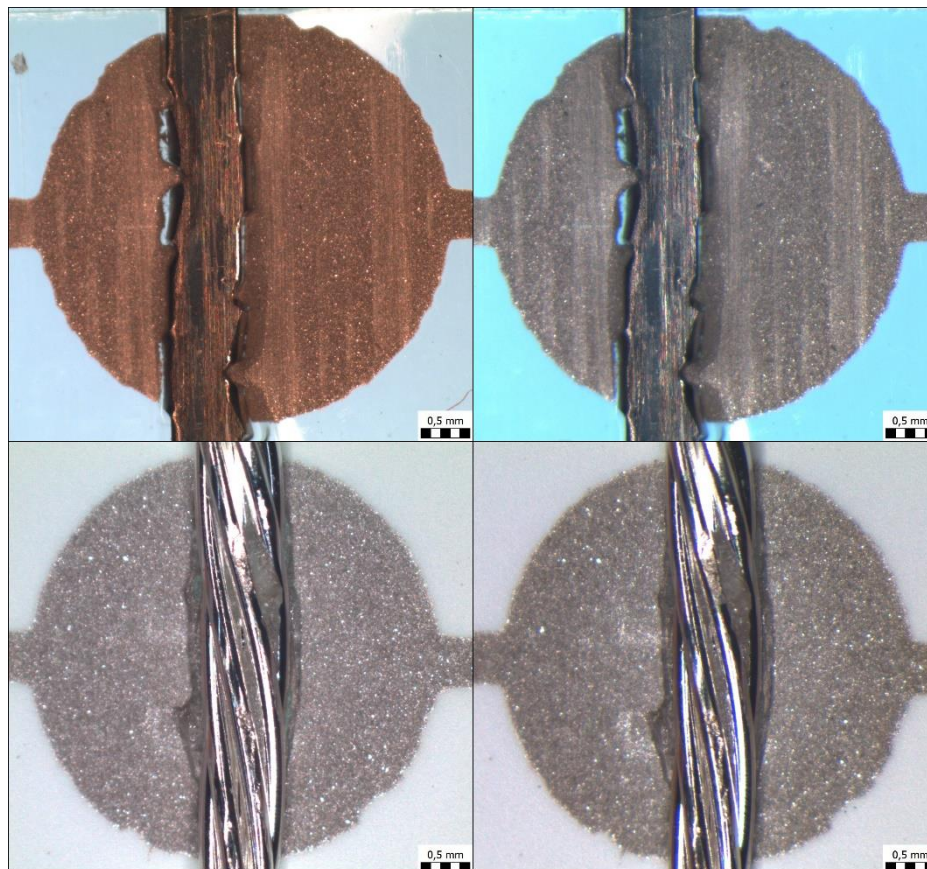
*Tab. 13 Detail naměřených hodnot při testování šokovou změnou teploty na substrátu Melinex 339.*

Technologie	Materiál	R [mΩ]	Počet cyklů				
			0	59	265	607	978
Krimpování	-/Sn	min	-	0,5	0,2	0,1	0
		max	-	8,2	5,4	3,6	9,8
		průměr	-	2,81	2,90	1,69	2,21
Svařování	Cu/Ag	min	0	0	0,9	0,8	0,1
		max	6,5	9,7	6	6,5	5
		průměr	3,94	4,07	3,57	4,34	2,33

Shrneme-li data získaná tímto testem, opět se potvrdila kvalita a spolehlivost krimpovaných spojů, když z celkem 23 vzorků vytvořených touto technologií nebyl ani jeden v průběhu testování zničen. Stejně tak naměřené hodnoty se opět držely v rozmezí do 10 miliohmů.

Svařované vzorky v tomto testu projevily velkou stálost, když se medián jednotlivých měření pohyboval ve valné většině případů mezi 3 a 4 mΩ. Jediné, co v tomto případě odlišuje vzorky vytvořené touto technologií jsou 2 zničené vzorky z celkového počtu 21, přičemž k jejich zničení došlo hned během prvního měřeného úseku po 59 cyklech. I v tomto případě je ale nejisté, jestli byly vzorky kvalitní, když se v následujících 919 cyklech žádné další nezničily.

Celkově si ale všechny vytvořené vzorky pomocí obou technologií vedly velmi dobře, když maximální naměřená hodnota nepřekročila jednotek miliohmů, což se dá opět považovat za výborný vodivý spoj. Z následujícího *Obr. 32* je zároveň vidět, že tento test prakticky vůbec vizuálně nepoznamenal testované vzorky.



Obr. 32 Ukázka vzorků pro testování šokovou změnou teploty; vlevo – před testem; vpravo – po testu.

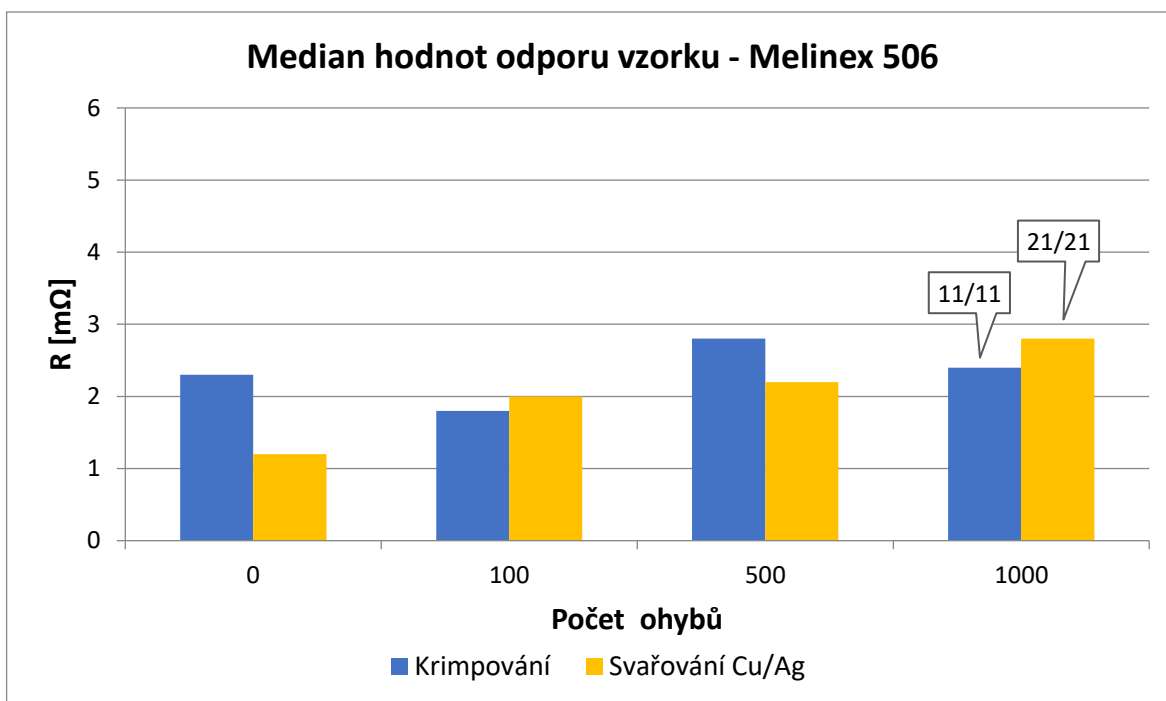
### 6.3 Mechanické testy

Na základě rešerše provedené v kapitole 4.3 této práce, byl jako první pro mechanické testování vzorků vybrán bend test neboli test ohybem. Druhým testem byl zvolen pull off, který zkoumá sílu potřebnou pro přerušení spoje odtržením.

#### 6.3.1 Bend test

Vzhledem ke skutečnosti, že u flexibilní elektroniky se očekává v praxi jistých možností ohybu při zachování původních parametrů a funkčnosti, byly i vytvořené vzorky v rámci této práce takovému testu podrobeny. V tomto případě se jedná o bend test, tedy test ohybem. Bylo využito zařízení zkonstruované na ZČU. Zařízení pracuje na principu pohyblivé a stacionární části. Mezi tyto dvě části byla umístěna teflonová folie, která se pohybem pohyblivé části ohýbala. Přístroj byl nastaven tak, aby poloměr ohnuté teflonové folie byl 3

cm. V místě, kde docházelo k největšímu ohybu, byly v řadě umístěny testované vzorky, které následně absolvovaly 1000 ohybů. V průběhu testování stejně jako u předchozích testů byla provedena kontrolní měření. Pro tento test bylo využito vzorků krimpovaných a u svařovaných se jednalo o variantu s postříbřeným vodičem. Jak již bylo v práci zmíněno, vzorky pro tento test neměly fixované vodiče, které vedou k měřícím ploškám na substrátu z důvodu možného ovlivnění měření. Použity byly vzorky vytvořené pouze na substrátu Melinex 506.



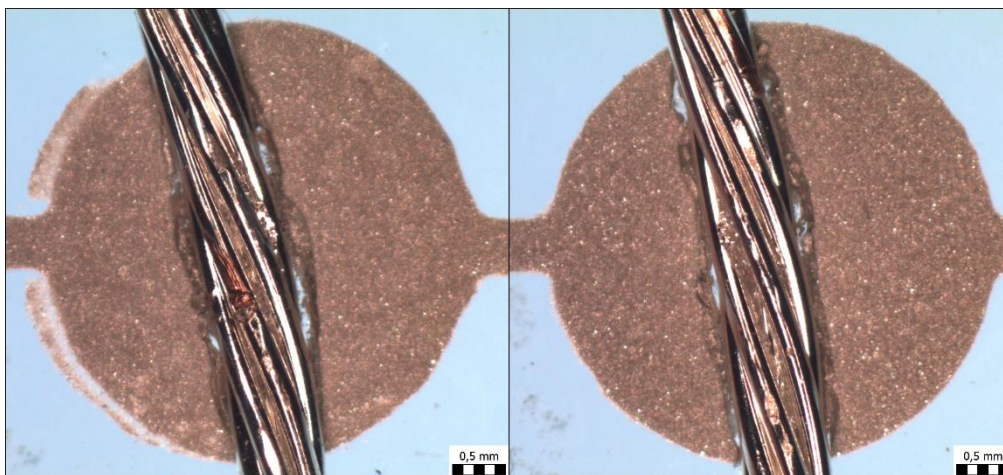
Obr. 33 Graf mediánu přechodového odporu vzorků pro test ohybem na substrátu Melinex 506.

Z grafu, který je na Obr. 33 je možné vidět medián hodnot odporu vzorků, které byly podrobeny testování ohybem. Z celkového počtu 11 krimpovaných a 21 svařovaných vzorků nebyl žádný vlivem testování zničen. Obě technologie tento test absolvovaly s přibližně stejnými hodnotami přechodového odporu, který u krimpovaných vzorků nepřekročil 7,1 mΩ a u svařovaných vzorků 8,1 mΩ. V Tab. 14 je možno zjistit bližší informace k měření.

Tab. 14 Detail naměřených hodnot pro test ohybem na substrátu Melinex 506.

Technologie	Materiál	R [mΩ]	Počet ohybů			
			0	100	500	1000
Krimpování	-/Sn	min	0,1	0,2	0,6	0,1
		max	5,5	6,5	5,5	7,1
		průměr	2,29	2,60	2,81	2,84
Svařování	Cu/Ag	min	0,1	0,1	0,1	0,1
		max	5,1	6,5	7,1	8,1
		průměr	1,43	2,29	2,31	3,00

U tohoto testu nebylo žádným překvapením, že krimpované spoje toto namáhání vydržely, jelikož ze způsobu, jakým jsou terminály spojeny se substrátem a vodivou ploškou na něm, se dalo dopředu vytušit, že vodivý spoj zůstane zachovaný i po testech. Pozitivem ovšem zůstává, že přechodový odpor spoje zůstal po celou dobu testování v jednotkách miliohmů i přes značné ohýbání. Velkým překvapením ovšem bylo, že všech 21 svařovaných vzorků tímto testem prošlo úspěšně, tedy že svařené vodiče neodpadnuly. Do jisté míry tomu velmi napomáhá použitý substrát, jelikož v procesu svařování se do něj vodič zataví a tím v nemalé míře zvýší mechanickou odolnost spoje. Na Obr. 34 je možné vidět, že provedený test neměl prakticky žádný viditelný vliv na testované vzorky.

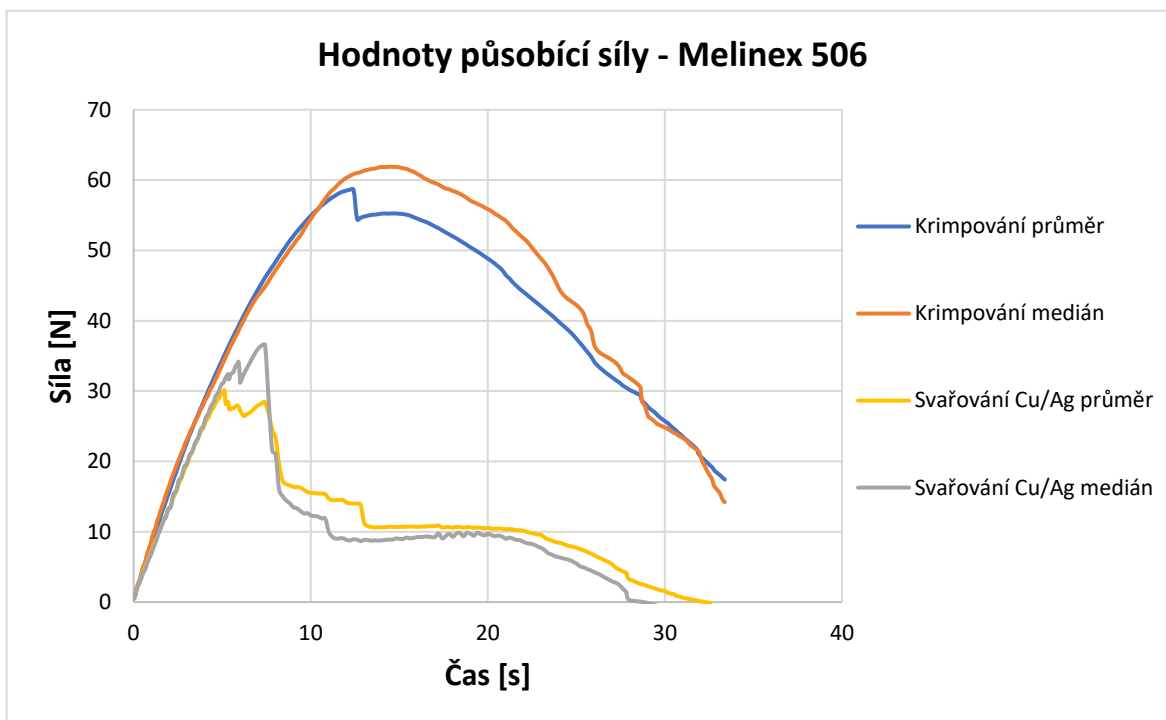


Obr. 34 Ukázka vzorků pro testování ohybem po testu.

### 6.3.2 Pull off test

Druhým mechanickým testem pro vytvořené spoje by pull off test. V tomto případě se jednalo o test, který měl zjistit, jakých hodnot síly je třeba k odtržení krimpovacího terminálu

a svařené vodiče od substrátu. U krimpovaných vzorků bylo třeba na terminál z důvodu zpevnění připájet drát, jelikož terminál se v průběhu testu ve své nejužší části přetrhával dříve, než se vytrhl ze substrátu. Použité zařízení funguje na podobném principu jako zařízení pro bend test. V tomto případě je stacionární část ve spodní části a pohyblivá část, která se stará posuvem nahoru o vyvíjení síly, je umístěna nad ní. Posuv horní části byl nastaven na rychlost 2 mm za 60 sekund.

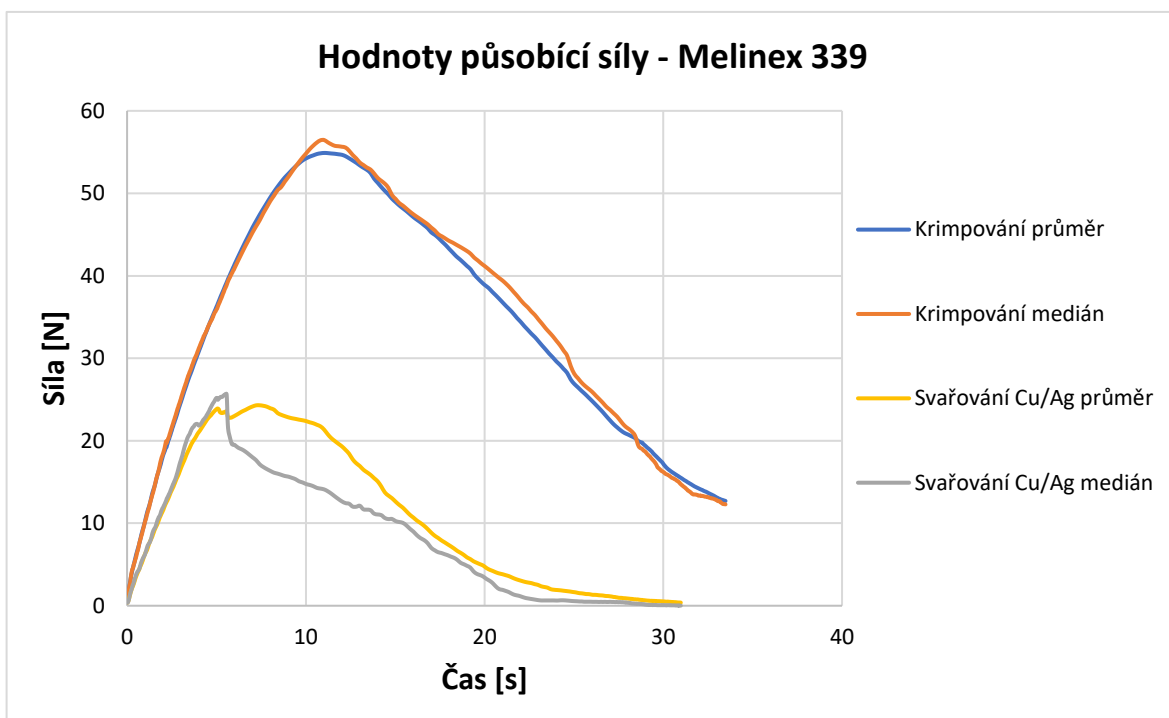


Obr. 35 Graf vývoje síly působícího na vodivý spoj na substrátu Melinex 506.

První graf na Obr. 35 zobrazuje průběh vyvinuté síly na vzorky vytvořené na substrátu Melinex 506. Tentokrát se jedná o graf, který zobrazuje jak mediánovou, tak i průměrnou hodnotu síly v závislosti na čase. Z grafu je možné vidět, že krimpované spoje v tomto ohledu jsou podstatně odolnější, když síla potřebná k jejich odtržení je víceméně dvakrát větší než u vzorků pro svařování. U krimpovaných vzorků se tato hodnota pohybuje kolem hranice 60 N, přičemž nejvyšší naměřená síla byla 72,83 N. Svařované vzorky dosahovaly průměrné hodnoty síly potřebné k odtržení od substrátu kolem 30 N, ovšem maximální hodnota u jednoho vzorku se vyšplhala až na 61 N. V Tab. 15 je možné vidět detaily hodnot sil potřebných k odtržení na tomto substrátu.

Tab. 15 Detail naměřených hodnot při pull off testu na substrátu Melinex 506.

Technologie	Materiál	Síla [N]			
		min	max	medián	průměr
Krimpování	-/Sn	46,48	72,83	62,72	61,33
Svařování	Cu/Ag	19,79	61	38,88	38,82



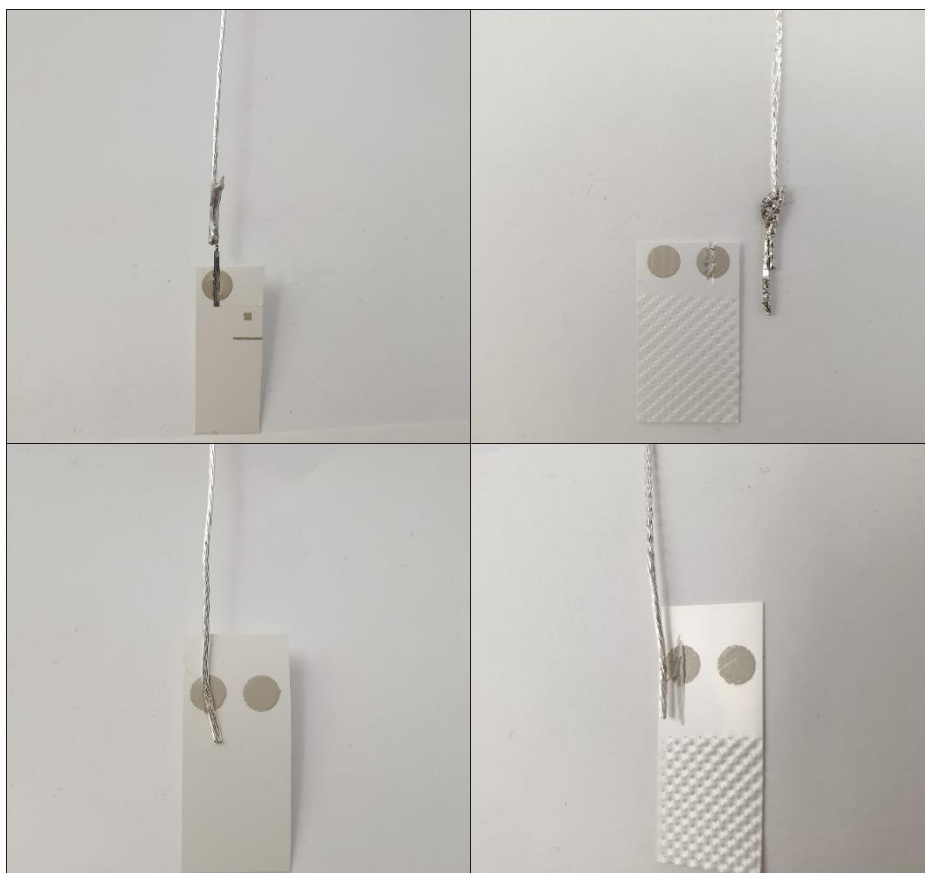
Obr. 36 Graf vývoje síly působícího na vodivý spoj na substrátu Melinex 339.

Hodnoty naměřené pro vzorky na substrátu Melinex 339 je možné vidět na grafu vykresleném na Obr. 36. Na tomto substrátu se u obou typů vzorků jedná o přibližně 5 N nižší síly, které jsou zapotřebí k odtržení od substrátu. U krimpovaných vzorků se jedná o hodnu kolem 55 N. Svařované kontakty i na tomto substrátu potvrdily své horší mechanické vlastnosti, když průměrná hodnota síly nutná pro odtržení od substrátu se pohybuje těsně pod hranicí 30 N. Z Tab.16 je možné opět vyčíst přesnější data, přičemž výrazná je zejména hodnota minimální dosažené síly potřebné k odtržení u jednoho ze svařovaných vzorků 6,21 N. Ovšem vzhledem k tomu že se tato hodnota výrazně vymyká průměrné i mediánové hodnotě, je možné, že se jednalo o jeden z méně kvalitních vzorků.

Tab. 16 Detail naměřených hodnot při pull off testu na substrátu Melinex 339.

Technologie	Materiál	Síla [N]			
		min	max	medián	průměr
Krimpování	-/Sn	45,74	65,92	58,25	56,92
Svařování	Cu/Ag	6,21	45,68	26,86	29,09

Shrneme-li data získané tímto testem, bylo zjištěno, že obecně u substrátu Melinex 506 je zapotřebí větší síly, aby došlo k odtržení vodiče od substrátu. Stejně tak test prokázal, že ať už se jedná o substrát Melinex 506 nebo 339, svařované vzorky nemají tak dobrou mechanickou odolnost proti odtržení, přičemž dosahují zpravidla pouze poloviční potřebné síly k odtržení než vzorky vytvořené krimpováním. Je ovšem třeba poznamenat, že svařované spoje mají dostatečnou adhezi k substrátu a jelikož nebyly k substrátu fixovány žádným jiným způsobem než přivařením, jedná se o dobré výsledky. Na následujícím *Obr. 37* je možné vidět, jak vypadaly vytvořené vzorky pro tento test před a po provedení testu.



*Obr. 37 Ukázka vzorků pro pull off test; vlevo – před testem; vpravo – po testu*

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo seznámit se s postupy používanými pro vytváření kontaktů na flexibilních substrátech s tištěnými vodivými motivy a vyhledat pro ně vhodné testovací postupy. Následně bylo třeba vytvořit vlastní vzorky s vodivými spoji, podrobit je testování a získaná data zhodnotit.

Práce ve své teoretické části obsahuje přehled užívaných substrátů v elektrotechnice a zároveň popisuje jejich konstrukci a požadované vlastnosti. Dále seznamuje s technologiemi pro tvorbu vodivých motivů na flexibilních substrátech využitím aditivních technologií, přičemž je zde stručný přehled kontaktních a bezkontaktních tiskových technologií. Teoretická část se poté zabývá možnými způsoby vodivého kontaktování na flexibilních substrátech s tištěnými vodivými motivy. Jsou zde představeny technologie jako je pájení, vodivé lepení, krimpování a odporové svařování. Nalezeny byly také vhodné způsoby testování elektrických kontaktů pomocí klimatických a mechanických zkoušek, které byly následně použity pro testování vzorků vodivých kontaktů.

Praktická část práce začíná pátou kapitolou, ve které je popsán návrh tištěného motivu, jeho realizace na polyesterových flexibilních substrátech a následně je popsána i samostatná realizace testovacích vzorků vodivého spojení, které byly vytvořeny pomocí technologie krimpování a odporového svařování. Je třeba říci, že výrobu vzorků pomocí technologie krimpování neprovázely, díky jejímu snadnému postupu, žádné problémy. Naproti tomu při svařování docházelo vlivem použitých elektrod a manuálního svařování k poškození vodivé plošky na substrátu, což zavinilo nefunkčnost přibližně 10 % vytvořených vzorků pomocí této technologie. Práce ovšem obsahuje doporučení, jak by bylo možné tyto problémy minimalizovat.

Pro ověření kvality a odolnosti vytvořených kontaktních struktur bylo realizováno 200 vzorků, které byly následně testovány pomocí klimatických a mechanických testů. Jako základní ukazatel kvality byl zvolen přechodový odpor vodivého spoje, který se u každého vzorku měřil před, během i po testování. Vzorky byly podrobeny zkoušce suchým teplem, která měla ověřit jejich odolnost vůči vysoké teplotě. Vzhledem k tomu, že z celkového počtu 28 vzorků pro tento test bylo 5 zničených již po prvních 91 hodinách, bylo vyhodnoceno, že tento test není třeba dělat celých 1000 hodin, ale stačila by podstatně nižší



doba na objevení nekvalitních vzorků touto zkouškou. Další byla zkouška vlhkým teplem, pomocí které byl testován vliv oxidace použitých materiálů na vlastnosti vodivého spoje. Tato zkouška potvrdila, že je třeba na kontakty využít materiály, které odolávají oxidaci nebo je využít alespoň na povrchovou úpravu. Posledním klimatickým testem byla zkouška změnou teploty. Jejím významem bylo zjistit, jestli se vzorky vlivem různých tepelných roztažností použitých materiálu při šokových změnách okolní teploty nezničí. Vzorky vytvořené pomocí technologie krimpování v klimatických testech prokázaly, proč jsou momentálně využívaným způsobem kontaktování na flexibilních substrátech, jelikož potvrdily svou výbornou kvalitu a spolehlivost. Jejich přechodový odpor v žádné fázi testování nepřesáhl hranici 16 m $\Omega$  a žádný ze vzorků nebyl zničen. Z naměřených dat pro vzorky vytvořené pomocí odporového svařování je zřejmé, že pokud se budou strojově vyrábět a tento postup bude dobře optimalizován, mohou se rovnat se vzorky vytvořenými pomocí technologie krimpování. Je ovšem třeba dbát na použití správných materiálů, což prokázala zkouška vlhkým teplem, kde vzorky s měděným vodičem bez povrchové úpravy dopadly nejhůře. Porovnáme-li ovšem u obou technologií vzorky s povrchovou úpravou, hodnoty jsou velmi podobné.

Vzorky byly mechanicky zkoušeny pomocí bend testu a pull off testu. Je třeba poznamenat, že při bend testu nebyl žádný vzorek zničen a všechny dosahovaly uspokojivých hodnot přechodového odporu v jednotkách miliohmů. Při pull off testu bylo v tomto případě dokázáno, že svařované vzorky dosahují v průměru poloviční potřebné síly k odtržení, než je tomu u těch krimpovaných. U krimpovaných vzorků tato hodnota dosahovala průměrně 60 N a u svařovaných lehce nad 30 N. Ovšem obě tyto hodnoty jsou dostatečné pro realizaci vodivého kontaktu.

Pokud se podíváme na krimpované vzorky jako na standard, tak si vzorky vytvořené svařováním nevedly špatně. Použité krimpované terminály jsou totiž určeny k užití na PET substrátech, ovšem svařování je v této oblasti zcela nové. Pokud tedy bude kontaktování na flexibilních substrátech dobře průmyslově zvládnuté (definovaný a kolmý přítlak a tvar elektrod) je možné pomocí této technologie dosáhnout jemnější rozteče kontaktních spojů při použití rychlejší a porovnatelně kvalitní technologie. Také vzhledem k tomu, že při svařování není jako u krimpování třeba terminály nejdříve připevňovat na vodiče a až pak na samotný substrát, ale pouze holý vodič přivařit na substrát, je možné dosáhnout spoje v méně krocích, což může ve velkoobjemové výrobě ušetřit značné množství peněz.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektrotechnice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] FJELSTAD, Joseph. *FLEXIBLE CIRCUIT TECHNOLOGY, Third Edition* [online]. Seaside, USA: BR Publishing, Inc., 2007. ISBN 978-0-9796189-0-1. Dostupné z: <http://read.pudn.com/downloads157/ebook/699595/Flexible-Circuit-Technology-3rd-3.pdf>
- [3] SZENDIUCH, Ivan. *Základy tepelného managementu* [online]. [vid. 2018-12-28]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/09a\\_tepelny\\_management.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/09a_tepelny_management.pdf)
- [4] VYSOKÁ ŠKOLA BAŇSKÁ. *Materiály pro desky plošných spojů* [online]. [vid. 2018-12-01]. Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/~hav278/Konstrukce\\_zarizeni\\_prumyslove\\_elektroniky/Studijni\\_opory/Desky\\_plosnych\\_spoju.pdf](http://homen.vsb.cz/~hav278/Konstrukce_zarizeni_prumyslove_elektroniky/Studijni_opory/Desky_plosnych_spoju.pdf)
- [5] S. WONG, William a Alberto SALLEO. *Flexible Electronics: Materials and Applications* [online]. 2009 [vid. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://erdinckuruoglu.files.wordpress.com/2011/03/flexible-electronics.pdf>
- [6] KAŠPÁRKOVÁ, Lenka. *Sítotisk (serigrafie)* [online]. 2011 [vid. 2018-12-13]. Dostupné z: [http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/\\_sablon/Technologie\\_grafiky\\_IV/VY\\_32\\_INOVACE\\_B-05-17.pdf](http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/_sablon/Technologie_grafiky_IV/VY_32_INOVACE_B-05-17.pdf)
- [7] HOBBY, Alan. *Screen Printing for the Industrial User. Gwent Group* [online]. 1997 [vid. 2018-12-14]. Dostupné z: [doi:10.1177/1088357614528797](https://doi.org/10.1177/1088357614528797)
- [8] WAD, Harry. *Screenprinting* [online]. [vid. 2017-04-20]. Dostupné z: 14.12.2018
- [9] KRATINA, Jakub. *Lineární teplotní roztažnost materiálů* [online]. 2013 [vid. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/linearni-teplotni-roztaznost-mateialu>
- [10] CONVERTER. *Hustota pevných látek* [online]. [vid. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-pevne.htm>
- [11] KA, Nemanja. *15 Screen Printing* [online]. 2016, 247–261. Dostupné z: [doi:10.1016/B978-0-323-37468-2.00015-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37468-2.00015-4)
- [12] THOMA, Patrik. *Flexotisk* [online]. 2005 [vid. 2018-12-30]. Dostupné z: [http://www.svettisku.cz/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=1960](http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1960)
- [13] CRUZ, Sílvia Manuela Ferreira, Luís A. ROCHA a Júlio C. VIANA. *Printing Technologies on Flexible Substrates for Printed Electronics. Flexible Electronics* [online]. 2018 [vid. 2018-12-30]. Dostupné z: [doi:10.5772/intechopen.76161](https://doi.org/10.5772/intechopen.76161)

- [14] KAŠPÁRKOVÁ, Lenka. *Tisk z výšky; flexotisk* [online]. 2012 [vid. 2018-12-30]. Dostupné z: [http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/\\_sablony/Technologie\\_grafiky\\_IV/VY\\_32\\_INOVACE\\_B-05-11.pdf](http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/_sablony/Technologie_grafiky_IV/VY_32_INOVACE_B-05-11.pdf)
- [15] IZDEBSKA, Joanna. *11 Flexographic Printing* [online]. B.m.: Elsevier Inc., 2016. ISBN 9780323374682. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-37468-2.00011-7
- [16] KAŠPÁRKOVÁ, Lenka. *Tisk z hloubky; hlubotisk* [online]. 2012 [vid. 2018-12-30]. Dostupné z: [http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/\\_sablony/Technologie\\_grafiky\\_IV/VY\\_32\\_INOVACE\\_B-05-12.pdf](http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/_sablony/Technologie_grafiky_IV/VY_32_INOVACE_B-05-12.pdf)
- [17] ENERGY.GOV. Roll to Roll (R2R) Processing [online]. 2015, 36. Dostupné z: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/QTR\\_Ch8 - Roll To Roll Processing TA Feb-13-2015.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/QTR_Ch8_-_Roll_To_Roll_Processing_TA_Feb-13-2015.pdf)
- [18] HW.CZ. *Aerosol Jet printing aneb když tranzistor prochází tryskou* [online]. 2015 [vid. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [19] CADER, Hatim K, Graham A RANCE, Morgan R ALEXANDER, D ANDREA, Clive J ROBERTS, Chris J TUCK a Ricky D WILDMAN. Water-Based 3D Inkjet Printing of an Oral Pharmaceutical Dosage Form. *International Journal of Pharmaceutics* [online]. 2019. ISSN 0378-5173. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpharm.2019.04.026
- [20] OPTOMECH INC. Aerosol Jet Technology for 3D Printed Electronics. [Online] [online]. [vid. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://www.optomech.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>
- [21] NAVRÁTIL, Jiří. *Možnosti systému Aerosol Jet® Opportunities of the Aerosol Jet® system*. 2015. ISBN 978-80-261-0514-5.
- [22] ZIGO, Miroslav. *Porovnání sitotiskové technologie a technologie aerosol jet printing* [online]. B.m., 2017. b.n. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/27801>
- [23] KUBÁLEK, Jaroslav. *Pájení kovů* [online]. 2012 [vid. 2019-04-02]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/pajeni-kovu/>
- [24] RAYNOCH, Jindřich. *PÁJENÍ A LEPENÍ* [online]. 2012 [vid. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/PÁJENÍ A LEPENÍ-UT.pdf>
- [25] PRACH, Michal a Roman KOLEŇÁK. Soldering of Copper with High-Temperature Zn-Based Solders. *Procedia Engineering* [online]. 2015, **100**, 1370–1375. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2015.01.505
- [26] HOF, Manfred a Tomáš BRAVENÝ. *Lepidla a techniky lepení součástek* [online]. 2013 [vid. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:2612/lepidla-a-techniky-lepeni-soucastek>

- [27] PANACOL. *Lepidla Elecolit* [online]. 2011 [vid. 2019-04-03]. Dostupné z: [http://www.lepidla-centrum.cz/storage/106-elecolit\\_cz.pdf](http://www.lepidla-centrum.cz/storage/106-elecolit_cz.pdf)
- [28] MACH, P. *Modifikovaná elektricky vodivá lepidla* [online]. 2009 [vid. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/528/1/r3c2c7.pdf>
- [29] PANACOL. *Elecolit® Conductive Adhesives* [online]. 2017 [vid. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.panacol.com/panacol/pdf/en/general/elecolit-electrically-and-thermally-conductive-adhesives-and-glues.pdf>
- [30] SMT CENTRUM. *Teorie krimpování* [online]. 2017 [vid. 2019-04-05]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/teorie-krimpovani/teorie-krimpovani/>
- [31] TAYLOR & FRANCIS GROUP. *Electrical Contacts Principles and Applications*. 2nd vyd. 2014. ISBN 978-1-4398-8130-9.
- [32] JST. *Precaution for Crimping Process* [online]. [vid. 2019-04-05]. Dostupné z: <http://www.jst-mfg.com/precaution/eP-Crimp.pdf>
- [33] TAN, W. Resistance microwelding [online]. 2008, 27. Dostupné z: doi:10.1533/B981845694043.2.473
- [34] TRKAL, Viktor. *o kontaktním odporu.pdf* [online]. [vid. 2019-04-16]. Dostupné z: [https://physics.mff.cuni.cz/historie/Trkal/DVD/TistenePublikace/P02\\_CPMF48\\_289.pdf](https://physics.mff.cuni.cz/historie/Trkal/DVD/TistenePublikace/P02_CPMF48_289.pdf)
- [35] ŠAFÁ, Veronika. An Approach to Electrical Resistance Measurement Eliminating Contact Resistance Problem [online]. 2015, (1). Dostupné z: doi:10.1109/AE.2014.7011715
- [36] *Kelvin (4-wire) Resistance Measurement* [online]. [vid. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-8/kelvin-resistance-measurement/>
- [37] TECHNOR HRADEC KRÁLOVÉ. *Náhled normy ČSN EN 60068 1 ed 2* [online]. 2014 [vid. 2019-04-20]. Dostupné z: [http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled\\_normy.php?norma=345791-csn-en-60068-1-ed-2&kat=95422](http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled_normy.php?norma=345791-csn-en-60068-1-ed-2&kat=95422)
- [38] ZKOUŠKA CHLADEM. *ČSN EN 60068-2-1*. 2008.
- [39] ZKOUŠKA SUCHÝM TEPLEM. *ČSN EN 60068-2-2*. 2008.
- [40] ZKOUŠKA KONSTANTNÍM VLHKÝM TEPLEM. *ČSN EN 60068-2-67*. 1997.
- [41] ZKOUŠKA ZMĚNOU TEPLoty. *ČSN EN 60068-2-14 ed. 2*. 2010.
- [42] LI, Haoyu U. a Thomas N. JACKSON. Flexibility testing strategies and apparatus for flexible electronics. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2016, **63**(5), 1934–1939. ISSN 00189383. Dostupné z: doi:10.1109/TED.2016.2545706
- [43] MECMESIN. *Pull test standards and methods* [online]. [vid. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.wireterminalstrength.com/pull-test-standards-and-methods>

- [44] DUPONT TEIJIN FILMS U.S. *Melinex*® 339 [online]. 2016 [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://usa.dupontteijinfilms.com/wp-content/uploads/2017/01/339-Datasheet.pdf>
- [45] DUPONT TEIJIN FILMS. *Melinex*® 506 [online]. [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: [http://www.cadillacplastic.co.uk/wp-content/uploads/2013/10/Melinex\\_5051.pdf](http://www.cadillacplastic.co.uk/wp-content/uploads/2013/10/Melinex_5051.pdf)
- [46] DUPONT. *DuPont*<sup>TM</sup> PE873 [online]. [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.dupont.com/content/dam/Dupont2.0/Products/Electronics-and-imaging/Literature/PE873.pdf>
- [47] NICOMATIC. *CrimpFlex crimping equipment* [online]. 2019 [vid. 2019-05-07]. Dostupné z: [http://www.nicomatic.com/product-crimpflex\\_crimping\\_equipment-59-en-1-53-426.htm](http://www.nicomatic.com/product-crimpflex_crimping_equipment-59-en-1-53-426.htm)
- [48] SUNKKO. *Sunkko 709A* [online]. [vid. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.sunkko.net/content/JFHSW/709A-MANUAL.pdf>
- [49] HOTAIR. *Sunkko 709A* [online]. [vid. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/pajeni/tvrde-pajeni/bodova-svarecka-kontakto-baterii-a-aku-packu-sunkko-709a-s-mikropajkou.html>

## **Přílohy**