

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Testování spolehlivosti vodivých spojů na textiliích

Autor práce: **Bc. Kryštof Švagr**
Vedoucí práce: **Ing. Martin Hirman, Ph.D**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Kryštof ŠVAGR**
Osobní číslo: **E20N0023P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Testování spolehlivosti vodivých spojů na textiliích**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte rešerši metod používaných pro vytvoření elektricky vodivého spoje na vodivých textiliích.
2. Popište vybrané metody testování spolehlivosti spojů na textilních substrátech.
3. Navrhněte experiment pro zjištění vlivu zvolených testů na spolehlivost vodivých spojů SMD součástek na vodivých textiliích.
4. Proveďte a vyhodnoťte navržený experiment

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Vědecké publikace (z konferencí, impaktovaných časopisů, ...).
2. K.L. Mittal, A. Tanweer – Adhesion in Microelectronics.
3. R. J. Klein Wassink; Soldering in electronics.
4. S. Ebnesajjad, A.H. Landrock – Adhesives Technology Handbook.
5. Internetové zdroje.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Hirman, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Oponent diplomové práce: **Ing. Jiří Navrátil, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **20. srpna 2023**




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


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

V Plzni dne 19. července 2023

Abstrakt

Diplomová práce se v první části zaměřuje na elektricky vodivé textilie. Práce se také zabývá pevnými a odnímatelnými metodami kontaktování elektrických součástek na textilní substráty. Druhá část popisuje provedený experiment. Cílem experimentu bylo zjistit vliv solné mlhy a vlhkosti na vytvořené vodivé spoje během čtyř cyklů dle normy ČSN EN 60068-2-52. Spoje byly vytvořeny pomocí pájení, nevodivého lepení a termokomprese.

Klíčová slova

Kontaktování SMD součástek, vodivé textilie, elektricky vodivé pružné stuhly, pájení na textilie, nevodivé lepidlo, termokomprese, testování v solné mlze.

Abstract

The first part of the thesis focuses on electrically conductive textiles. The thesis also deals with fixed and removable methods of contacting electrical components on textile substrates. The second part describes the experiment carried out. The aim of the experiment was to determine the effect of salt spray and moisture on the formed conductive joints during four cycles according to CSN EN 60068-2-52. The joints were formed by soldering, non-conductive adhesive bonding and thermocompression.

Key words

SMD component assembly, conductive textiles, electrically conductive stretchable textile ribbons, soldering on textile, non-conductive adhesive, termocompression, salt spray testing.

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat Ing, Martinovi Hirmanovovi, Ph.D., za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce.

Obsah

Úvod	1
1 Vodivé textilie	2
1.1 Vodivá vlákna a textilie	2
1.1.1 Metalizovaná vodivá vlákna	3
1.1.2 Uhlíková vodivá vlákna/textilie	4
1.1.3 Polymerizovaná vodivá vlákna/textilie	4
1.2 Elektrický odpor textilií	5
1.3 Aplikace	6
2 Kontaktování součástek na textilie	9
2.1 Pevná připojení	9
2.1.1 Pájení	9
2.1.2 Nevodivé lepení	11
2.1.3 Termokomprese	11
2.1.4 Vodivé lepení	13
2.1.5 Svařování	15
2.1.6 Šití	18
2.2 Odnímatelná připojení	19
2.2.1 Stuhový uzávěr	20
2.2.2 Druky	20
2.2.3 Magnetické spoje	21
3 Příprava experimentu	22
3.1 Pájení	23
3.2 Nevodivé lepení	24
3.3 Termokomprese	27
4 Testovací metoda a měření	30
4.1 Testovací metoda experimentu	31
4.2 Měření odporu kontaktů	32
5 Vyhodnocení experimentu	33

5.1	Výsledky pájecí technologie	34
5.2	Výsledky experimentu metody nevodivého lepení	37
5.2.1	Lepidlo Loctite AA3926	38
5.2.2	Lepidlo Panacol Vitralit VBB-1 gel	40
5.2.3	Panacol Vitralit 4732 VT	43
5.3	Výsledky termokopresní technologie	46
5.3.1	Bez vodivého filamentu	46
5.3.2	S vodivým filamentem	49
5.4	Srovnání metod	52
	Zhodnocení a závěr	55
	Literatura	56
	Přílohy:	i

Seznam obrázků

Obr. 1.1	Průřez různých struktur vodivých vláken a přízí. (Převzato a upraveno z [7]).	3
Obr. 1.2	Možná aplikace vodivých textilií podle elektrického odporu na čtverec materiálu. (Převzato a upraveno z [10])	6
Obr. 1.3	Chytré triko měřící EKG (převzato z [12])	7
Obr. 1.4	Ponožky měřící tlak na chodidle. (Převzato z [19])	8
Obr. 2.1	Nezapouzdřený pájený spoj na vodivé textilii. (Převzato z [23]) . . .	10
Obr. 2.2	Princip nevodivého lepení na vodivé stuze. (Převzato a upraveno z [29])	11
Obr. 2.3	Princip termokomprese. (Převzato a upraveno z [33])	13
Obr. 2.4	Princip vodivého lepení pomocí tepla. (Převzato a upraveno z [32]) .	15
Obr. 2.5	Tři typy používaných elektrod: a) přímé, b) paralelní, c) krokové. (Převzato a upraveno z [39])	16
Obr. 2.6	Plošný spoj kontaktovaný pomocí přešití. (Převzato z [43])	19
Obr. 3.1	Průřez vodivou pružnou tkanou stuhou.	22
Obr. 3.2	Vodivé dráhy na stuze bez přerušování (vlevo), po přerušování (vpravo). .	23
Obr. 3.3	Nanesení pájky a umístění součástky na vodivou stuhu.	24
Obr. 3.4	Pájení pomocí horkého vzduchu a zapouzdření nevodivým lepidlem. .	24
Obr. 3.5	Nanesení nevodivého lepidla a umístění součástky.	26
Obr. 3.6	Vtlačení rezistoru do stuhy a vytvrzení lepidla pomocí UV záření. .	26
Obr. 3.7	Odebrání závaží, vznik otvoru a následné nanesení lepidla pro odstranění díry.	26
Obr. 3.8	Opětovné vytvrzení lepidla pomocí UV záření a konečný stav naktaktovaného SMD rezistoru.	27
Obr. 3.9	Rezistor v pevném pouzdře vedle flexibilního rámečku (vlevo), pouzdro s odporem vloženo do flexibilního rámečku (vpravo).	28
Obr. 3.10	Rezistor přichycený ke stuze a vložený do folie s nepřilnavým povrchem (vlevo), následně umístěný do termolisu (vpravo).	28
Obr. 3.11	Finální stav spoje s vodivým filamentem.	29
Obr. 4.1	Měření odporu pomocí Kelvinovy metody.	32
Obr. 5.1	Legenda krabicového grafu.	33

Obr. 5.2	Vývoj elektrického odporu pájených spojů.	35
Obr. 5.3	Statistika jednotlivého měření pájeného spoje.	36
Obr. 5.4	Testovaný rezistor focený po konci každého cyklu testování - pájení.	37
Obr. 5.5	Vývoj elektrického odporu spojů nakontaktovaných pomocí lepidla Loctite AA3926.	39
Obr. 5.6	Statistika jednotlivého měření - lepidlo Loctite AA3926.	39
Obr. 5.7	Testovaný rezistor focený po konci každého cyklu testování - lepidlo Loctite AA3926.	40
Obr. 5.8	Vývoj elektrického odporu jednotlivých spojů nakontaktovaných po- mocí lepidla Panacol Vitralit VBB-1 gel.	42
Obr. 5.9	Statistika jednotlivého měření, lepidlo Panacol Vitralit VBB-1 gel. . .	42
Obr. 5.10	Testovaný rezistor focený po konci každého cyklu testování - lepidlo Panacol Vitralit VBB-1 gel.	43
Obr. 5.11	Vývoj elektrického odporu jednotlivých spojů nakontaktovaných po- mocí lepidla Panacol Vitralit 4732 VT.	45
Obr. 5.12	Statistika jednotlivého měření, lepidlo Panacol Vitralit 4732 VT. . .	45
Obr. 5.13	Testovaný rezistor focený po konci každého cyklu testování, lepidlo Panacol Vitralit 4732 VT.	46
Obr. 5.14	Vývoj elektrického odporu jednotlivých spojů nakontaktovaných po- mocí termokomprese.	48
Obr. 5.15	Statistika jednotlivého měření, termokomprese.	48
Obr. 5.16	Testovaný rezistor focený po konci každého cyklu testování, ter- mokomprese.	49
Obr. 5.17	Vývoj elektrického odporu jednotlivých spojů nakontaktovaných po- mocí termokomprese s vodivým filamentem.	51
Obr. 5.18	Statistika jednotlivého měření, termokomprese s vodivým filamentem.	51
Obr. 5.19	Testovaný rezistor focený po konci každého cyklu testování, ter- mokomprese s vodivým filamentem.	52
Obr. 5.20	Porovnání metod dle jejich mediánu.	53
Obr. 5.21	Porovnání jednotlivých metod dle posledního měření.	54

Seznam tabulek

Tab. 1.1	Vlastnosti materiálů pro výrobu elektricky vodivých textilií. (Převzato a upraveno z [9]).	5
Tab. 4.1	Normy pro testování chytrých textilií	30
Tab. 5.1	Naměřené hodnoty odporu při použití pájení	35
Tab. 5.2	Naměřené hodnoty odporu při použití lepidla Loctite AA3926	38
Tab. 5.3	Naměřené hodnoty odporu při použití lepidla Panacol Vitralit VBB-1 gel	41
Tab. 5.4	Naměřené hodnoty odporu při použití lepidla Panacol Vitralit 4732 VT	44
Tab. 5.5	Naměřené hodnoty odporu při použití termokompresy bez měděné vločky	47
Tab. 5.6	Naměřené hodnoty odporu při použití termokompresy s vodivým filamentem	50

Seznam symbolů a zkratk

ACA	Anisotropic Conductive Adhesive - Anizotropní vodivé lepidlo
ČSN	Česko-Slovenská státní norma (Česká technická norma)
ECA	Electric Conductive Adhesive - Elektricky vodivé lepení
EKG	Elektrokardiografie
EMG	Elektromyografie
ESD	Electrostatic Discharge - Elektrostatický výboj
DPS	Deska plošných Spojů
FPC	Flexible Circuit Board - Flexibilní deska plošných Spojů
ISO	International Organization for Standardization - Mezinárodní organizace zabývající se tvorbou norem.
NCA	Non Conductive Adhesive - Nevodivé lepidlo
PC	Polykarbonát
PES	Polyester
PET	Polyethylentereftalát
PMMA	Polymethylmethakrylát
PVC	Polyvinylchlorid
SMD	Surf Mount Device - Součástky pro povrchovou montáž
TPU	Termoplastický polyuretán
UV	Ultraviolet - Ultrafialové

Úvod

V posledním desetiletí nalezneme elektricky vodivé textilie jako základní stavební kámen chytrých textilií, které nacházejí využití ve zdravotnictví, sportu či průmyslu. K vytvoření chytrých textilií je zapotřebí zkombinovat postupy jak z elektrotechnického, tak z textilního průmyslu. Propojením těchto dvou odvětví se objevují dosud nepoznané výzvy a problémy. Jedním z nich je vytvoření spolehlivého vodivého spoje mezi elektrickou součástíkou a vodivou cestou v textiliích, který by dosahoval uspokojivých elektrických a mechanických vlastností s vysokou odolností.

V teoretické části této diplomové práce jsou popsány různé metody kontaktování. Z těchto metod byly později vybrány tři nejvhodnější k provedení experimentu a ověření kvality spoje v praxi.

Cílem práce je nalezení spolehlivé technologie kontaktování na vodivých textiliích, a to z hlediska normy ČSN EN 60068-2-52, konkrétně podle testovací metody 1, která se jinak nazývá cyklická zkouška solnou mlhou. V experimentu je první použitou metodou nízkoteplotní pájení, jež patří mezi ověřené technologie používané v elektrotechnice. Nevýhoda nízkoteplotního pájení spočívá v relativně vysoké pracovní teplotě (180 °C) vzhledem k materiálu textilie, což může mít za následek její poškození. Druhá metoda kontaktování se zakládá na použití nevodivých lepidel na akrylátové bázi, které se vytvrzují pomocí UV záření. Poslední zvolenou metodou je termokompresa, kde je součástka připevněna pomocí teploty a tlaku ke kontaktní ploše na textilií. Poslední zmíněná metoda se vyznačuje šetrností vzhledem k textilií.

1 Vodivé textilie

V posledních letech došlo k rychlému rozvoji nositelné elektroniky a zároveň chytrých textilií. Ty mohou být využity například pro měření fyziologických funkcí v oblasti zdravotnictví a sportu. Výhoda chytrých textilií spočívá v nahrazení běžné nositelné elektroniky. Například by mohly chytré sportovní oděvy zastoupit nyní tak populární chytré hodinky. Nošení oděvů je tak jako tak nutností, naproti tomu nositelná elektronika může při některých aktivitách překážet. Tím pádem se textilie stává ideálním substrátem pro elektroniku.

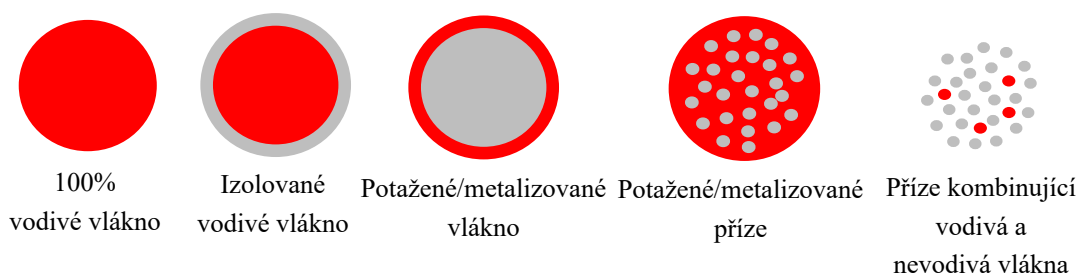
Jak je obecně známo, běžné textilie nejsou elektricky vodivé a ani vhodné k osazení elektronických součástek. Proto jsou běžné textilie upravovány různými metodami tak, aby na nich byly vytvořeny požadované elektricky vodivé dráhy. Díky tomu je možné osazovat a elektricky propojovat součástky a vzniká tak chytrá textilie. Vodivé motivy na textilu se vyrábí pomocí technik, které se využívají jak v textilním, tak elektrotechnickém průmyslu. Jedním ze způsobů je použití elektricky vodivých nití a přízí, které se vkládají přímo do struktury textilie [1]. Dalšími způsoby jsou: technologie tištěné elektroniky (vodivé inkousty) [1] či využití chemických reakcí k nanesení vodivých materiálů.

Tyto textilie musí v dané aplikaci zajistit stabilní a spolehlivé elektrické vlastnosti při zachování vlastností běžné textilie, jako je prodyšnost nebo elasticita. S technickým vývojem v oblasti textilu a elektroniky bylo možné plně integrovat elektroniku do textilií např. ve formě antén [2], pasivních senzorů (snímače teploty, vlhkosti nebo tahu) či aktivních senzorů (termočlánek) [3], které lze vyšívat hybridní vodivou nití přímo do textilu. Využití najdou například ve zdravotnictví, sportu, módním odvětví a také ve vojenství [3].

1.1 Vodivá vlákna a textilie

Elektricky vodivé textilie lze vyrobit pomocí vodivých vláken, přízí, polymerů a vodivých barev/inkoustů na textilie [4]. Zhotovit se dají díky tiskovým [5], textilním (tkaní, pletení) [5] či chemickým metodám (pokovování) [6]. Vlastnosti zhotovené textilie jsou výsledkem celého technologického procesu výroby [7]. Vlákna jsou základní úrovní textilní struktury s danou chemickou a morfologickou charakteristikou a mohou být spředeny do příze kroucením. Poté mohou být příze zpracovány do textilie tkaním, pletením, vyšíváním či opletením. Elektrické vodivosti textilie může být dosaženo různými způ-

soby, a to například pomocí kovů (tenké kroucené dráty, pokovení) nebo vodivých částic/polymerních nanokompozitních disperzí. Dále také pomocí vodivých povlaků samotné příze nebo celé tkaniny, galvanickým pokovením, napařováním, ponořením, chemickou polymerizací a vzorováním/potiskem vrstev na povrchu tkaniny [7]. Mezi požadované vlastnosti textilní struktury patří dostatečná mechanická pevnost, trvanlivost a pružnost. Textilie musí být odolná vůči namáhání, jako je natahování, ohýbání, kroucení a odírání během výroby a při běžném nošení [7]. Vhodné materiály pro vodivá vlákna a textilie jsou podrobněji zmíněny v kapitolách níže.



Obr. 1.1: Průřez různých struktur vodivých vláken a přízí. (Převzato a upraveno z [7]).

1.1.1 Metalizovaná vodivá vlákna

Nejdostupnější vodivé materiály jsou kovy. Disponují dobrou mechanickou odolností a výbornou elektrickou a tepelnou vodivostí. Typické materiály vhodné pro výrobu vodivých vláken jsou například nikl, hliník, stříbro, měď atd. Druhy metalizovaných vláken lze vidět na obr.1.1. Kovová monofilamentní vlákna mají vysokou elektrickou vodivost, ale jejich mechanické vlastnosti představují problém při využití v hromadné výrobě. Kvůli jejich tuhosti a nízké roztažnosti je nelze zařadit do běžných textilních výrobních procesů. Proto se kroučí nebo kombinují s nevodivými vlákny a vznikají tzv. hybridní nitě. Kombinací kovového a nevodivého vlákna lze získat mechanické vlastnosti blížíící se běžným přízím [7]. Nanášením tenkých kovových povlaků na nevodivá vlákna (bavlna, nylon, polyester) se vyrábí metalizovaná příze i vlákna. Jejich mechanické vlastnosti jsou vhodné pro integraci do zaběhlých textilních procesů. Na druhou stranu jejich nevýhoda spočívá ve vysoké degradaci a poškození při mechanickém namáhání, jako je otěr při nošení či praní [7].

1.1.2 Uhlíková vodivá vlákna/textilie

Uhlíkové materiály jsou vhodné pro využití ve výrobě vláken/textilií vzhledem k jejich specifickým vlastnostem: nízká roztažitelnost, dobrá elektrická vodivost, vynikající chemická stabilita a uspokojivé mechanické vlastnosti [8]. Mezi nejčastěji používané uhlíkové alotropy patří uhlíkové saze (CB), uhlíkové nanotrubičky (CNTs), grafen (G), redukovaný oxid grafenu (rGO), oxid grafenu (GO) a aktivní uhlí (AC) [8].

Uhlíkové saze mají podobu načernalého prášku tvořeného částicemi o průměru 10 až 100 nm [8]. Tento prášek se rozptýlí v chemickém roztoku a následně se vytvrdí v uhlíkové vlákno. Využívá se pro konstruování odporových snímačů tahu či tlaku.

Uhlíkové nanotrubičky se běžně používají pro výrobu uhlíkových vodivých vláken. Při výrobě vláken z nanotrubiček se musí dbát zvýšené opatrnosti, jelikož jsou pro člověka toxická. Proto se používají speciální výrobní postupy. Dalšími materiály pro získání uhlíkových vodivých textilií jsou grafen, oxid grafenu, redukovaný oxid grafenu a aktivní uhlí [8].

1.1.3 Polymerizovaná vodivá vlákna/textilie

V současnosti jsou na trhu k dispozici různé polymerní matrice, které se využívají k výrobě elektricky vodivých vláken a povlaků s nízkou hmotností, zvýšenou pružností a zvýšenou odolností proti korozi [8]. Mezi polymerní matrice používané pro vodivá vlákna patří polypyrrol (PPy), polyanilin (PANI), poly(3,4-ethylenedioxythiopen):polystyrensulfonát (PEDOT:PSS), polythiofen (PTh) a další [8]. Polymerní vodivá vlákna/textilie mohou vznikat chemickou reakcí vodivého polymeru na substrátu [4]. Častými metodami výroby jsou: dvoustupňová polymerace, in situ polymerace, chemické potahování vodivými polymery a zpevnění polymerních materiálů vodivými sloučeninami zvlákněním [4]. Vodivé polymery jsou obvykle využívány v senzorové technice pro snímání tlaku, tahu, plynů atd.

Tab. 1.1: Vlastnosti materiálů pro výrobu elektricky vodivých textilií. (Převzato a upraveno z [9]).

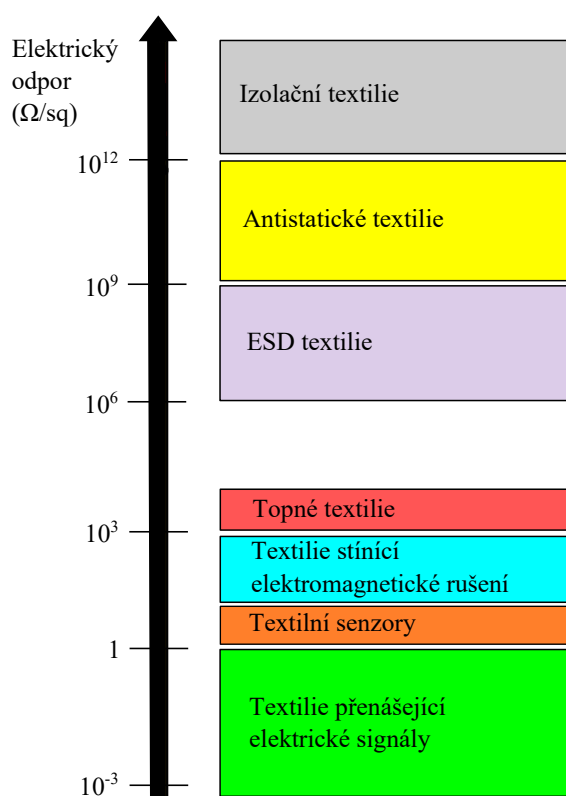
Elektricky vodivé materiály	Měrná elektrická vodivost
Kovové nanočástice/nanodrátky (Cu/Ag/Au/Ni)	$\approx 10^4 - 6,3 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
Vodivé polymery (PANI/PPy/PEDOT:PSS/PhT)	$\approx 10 - 1,73 \cdot 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
Uhlíkové materiály (CB/CNTs/GO/rGO)	$\approx 10^2 - 10^9 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$

1.2 Elektrický odpor textilií

Elektrický odpor textilních materiálů vyplývá z elektrického odporu jejich složek, tj. vláken, nití a dále také závisí na struktuře textilie. Tokarska M. ve své práci [10] rozděluje možnosti aplikace vodivých textilií podle elektrického odporu na čtverec materiálu. Izolační textilie dosahující hodnoty elektrického odporu vyšší než $10^{12} \Omega/\text{sq}$ mohou mimo jiné najít využití i v požární či geotechnické oblasti. Antistatické textilie mají elektrický odpor v rozmezí $10^9 - 10^{11} \Omega/\text{sq}$. Využívají se především jako ochranné oděvy. Brání před potencionálním vybitím statické elektřiny, která by mohla způsobit jiskru v oblastech s nebezpečím výbuchu [11, 12]. Antistatický ochranný oděv odpovídá normám: EN 1149-5 (zajišťuje, že elektrický náboj bude rychle neutralizován a nebude se hromadit), EN ISO 13688 a 2016/425 [11, 12]. Textilie zabraňující elektrostatickému výboji (ESD - electrostatic discharge) jsou charakteristické elektrickým odporem od 10^6 do $10^8 \Omega/\text{sq}$. Mezi dvěma objekty s různým elektrickým potenciálem může dojít k ESD. Pokud výboj nastane na citlivých elektronických součástkách, tak může dojít k jejich nenávratnému poškození. ESD oděvy musí splňovat normu IEC 61340-5-1, která zabraňuje elektrostatickému výboji [11, 12].

Vodivé textilie se mohou využívat také jako topná tělesa. Tokarska uvádí odpor $10^3 - 10^4 \Omega/\text{sq}$, za to autoři článku [9] zmiňují, že materiály využívané k výrobě topných textilií mohou mít rezistivitu od $10^{-1} - 10^4 \Omega/\text{sq}$. Záleží zda se textilie vytvoří pomocí nití a přízí na bázi kovu, vodivých polymerů či uhlíku [9]. Vodivé textilie s rezistivitou $10^1 - 10^2 \Omega/\text{sq}$ lze použít pro stínění elektromagnetického rušení. Tyto stínící textilie jsou schopny chránit citlivé elektronické přístroje před elektromagnetickým zářením absorbcí či od-

razem záření, popřípadě kombinací obou aspektů. V posledních letech se například využívají pro splnění standardů pro lékařská zařízení [13]. Účinnost stínění je závislá na materiálu a zpracování stínící textilie [13]. Vodivé textilie s elektrickým odporem $1 \Omega/\text{sq}$ a nižší se využívají pro textilní senzory a textilie přenášející elektrické signály. Textilní senzory se především využívají ve zdravotnickém a sportovním odvětví pro měření základních životních funkcí [14] nebo také jako senzory tlaku a mechanického napětí [15]. Mohou pracovat na odporovém, kapacitním, piezoelektrickém či triboelektrickém principu [15].



Obr. 1.2: Možná aplikace vodivých textilií podle elektrického odporu na čtverec materiálu. (Převzato a upraveno z [10])

1.3 Aplikace

V současné době jsou běžné textilie upravovány s důrazem na zvýšení jejich elektrické vodivosti tak, aby je bylo možné využít v oblasti chytrých textilií [16]. Tyto chytré textilie mohou mít širokou škálu využití, například snímání životních funkcí, komunikace (obvykle bezdrátová), přenos energie a propojení se senzory a dalšími zařízeními. Aplikace chytrých textilií zahrnují zdravotnické monitorování a stimulaci bioelektrických signálů

těla, ochranné oděvy pro vojenský a průmyslový personál a nositelná zařízení pro ukládání energie a další nositelné technologie [17].

Dále se práce věnuje několika aplikacím ve zdravotnictví a sportu.

Zdraví

Vývoj nositelných monitorovacích systémů významně ovlivňuje zdravotnickou péči. Nositelná zařízení umožňují nepřetržité sledování fyziologických signálů během běžných denních činností. To může překonat problém klinických návštěv, které umožňují pouze krátký pohled na fyziologický stav pacienta. Reprezentativními příklady jsou oděvy s bezdrátovým připojením a vestavěnými textilními senzory pro současné získávání a nepřetržité monitorování EKG, dýchání, EMG a fyzické aktivity [16].



Obr. 1.3: Chytré triko měřící EKG (převzato z [12])

Takamatsu a spol. [18] vyvinuli nositelné zařízení na bázi textilu, jež umožňuje zaznamenávat vysoce kvalitní EKG a určovat srdeční frekvenci za pomoci elektrod z vodivého polymeru PEDOT:PSS, které byly vyrobené na pletené vodivé textilii.

Sport

Sport je další důležitou oblastí pro vývoj chytrého oblečení. Nyní se pro měření biometrických funkcí využívají především nositelná zařízení (chytré náramky, hodinky). Po-

stupným vývojem by se mohly všechny funkce integrovat do oděvu. Měřily by více než základní životní funkce (srdeční tep, dýchání, tělesnou teplotu), ale i další fyziologické parametry jako například aktivitu jednotlivých svalů nebo tlak na chodidle či kloubu. Dlouhodobým měřením těchto parametrů by se dalo předejít mnoha zraněním. Společnosti Sensoria se podařilo vyvinout chytré ponožky znázorněné na obrázku 1.4. Senzory z vodivých přízí dokáží detekovat tlak na chodidlo. Naměřené hodnoty se ukládají do integrovaného náramku v ponožkách, jež pomocí bluetooth komunikuje s mobilní aplikací [19].



Obr. 1.4: Ponožky měřící tlak na chodidle. (Převzato z [19])

2 Kontaktování součástek na textilie

Hlavním problémem kontaktování součástek na textilie je spojení měkkých textilií s pevnými elektronickými součástkami. K propojení jednotlivých elektronických součástek na textilii musí být vodivé dráhy realizovány přímo v/na textilii. Základní funkcí vodivé textilie je poskytnutí elektricky vodivé cesty pro signál nebo distribuci energie [20]. Hlavním cílem je dosažení spojení, které vykazuje co nejnižší elektrický odpor a co nejvíce potlačuje parazitní jevy, jako je parazitní indukčnost a kapacita vedení [10]. Podle předpokládaného využití textilie lze určit, jakým druhům namáhání bude spoj vystaven a podle toho zvolit nejvhodnější metodu kontaktování. Dále je snaha o vytvoření co nejmenší velikosti spoje a také o docílení požadovaného tvaru spoje tak, aby co nejméně narušoval komfort uživatele [10].

Aplikace akčních členů a textilních senzorů v oblasti chytrých textilií zvyšuje požadavky na přenos a zpracování dat. Připojení komponentu k textilii může být tvořeno pevným spojením pomocí kontaktních metod, viz kapitola 2.1, či odnímatelnými konektory, kapitola 2.2.

V současné době se hledá vhodná metoda kontaktování, která by byla nenáročná, neprobíhala ve vysokých teplotách a dala se plně automatizovat.

2.1 Pevná připojení

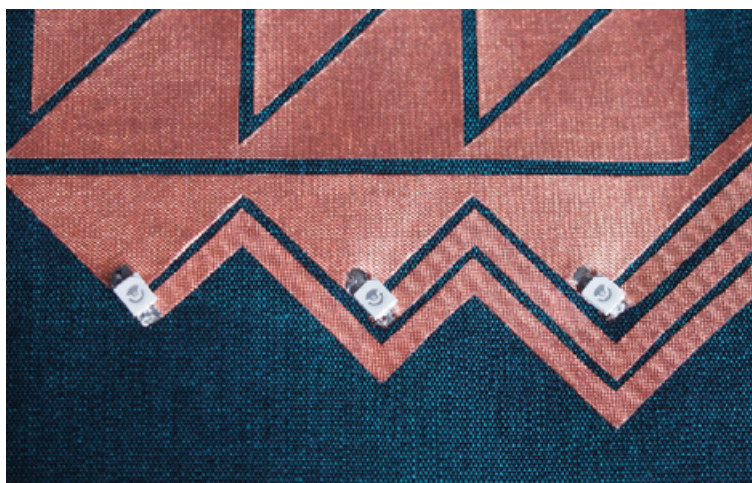
V následujících podkapitolách budou postupně rozebrány vybrané metody, díky kterým je možné realizovat pevné připojení. Jedná se o následující: pájení, nevodivé lepení, termokomprese, vodivé lepení, svařování a šití. Při popisu každé metody kontaktování jsou zmíněny její kladné a záporné vlastnosti vyplývající z jejího použití v oblasti chytrých textilií. Dále je také rozebrán postup samotného procesu kontaktování.

2.1.1 Pájení

Pájení je standardní a široce používaná technologie pro kontaktování elektronických komponentů na substráty. Dva kontakty se spojují roztavením třetího kovu, pájky, což je slitina s teplotou tání nižší než teplota tání kontaktů. Tradičně se v elektrotechnickém průmyslu používaly pájky ze slitin cínu a olova, ale jejich toxicita v kombinaci s širšími obavami o životní prostředí omezily jejich používání. V rámci Evropské unie je platná směrnice o

omezení používání nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních, která je nejčastěji označována zkratkou RoHS [21, 22].

V oblasti chytrých textilií se pájení používá ke spojování součástek s vodivými cestami textilie [23]. Pájené spoje mají nízký kontaktní odpor, ale jsou mechanicky křehké. Jsou-li vystaveny výraznějšímu ohybu či natažení, musí být vyztuženy, aby se v textilní aplikaci zabránilo poškození spoje, například odtržením vodivého vlákna od nakontaktované plošky. Vyztužení může způsobit nekomfort při nošení. Některé vodivé materiály používané v chytrých textiliích nejsou pájitelné, např. nerezová ocel a postříbřená nylonová vlákna [23]. Mezi pájitelné materiály patří vlákna složená z měděné nebo mosazné příze. Pájení na vodivé textilie vyžaduje nízkoteplotní pájku. Teploty nad 200 °C [23], které jsou obvykle vyžadovány pro standardní pájení, jsou pro využití v oblasti vodivých textilií příliš vysoké, protože spálí nebo roztaví většinu tkanin a mnoho plastových fólií [23, 24]. Z toho vyplývá, že jako použitelné pájky pro textilní průmysl se jeví nízkoteplotní pájecí slitiny. Využívají se především komerčně dostupné slitiny Bi-Sn a Bi-Sn-Ag, které se taví při teplotě 138 °C, resp. 140 °C [24].



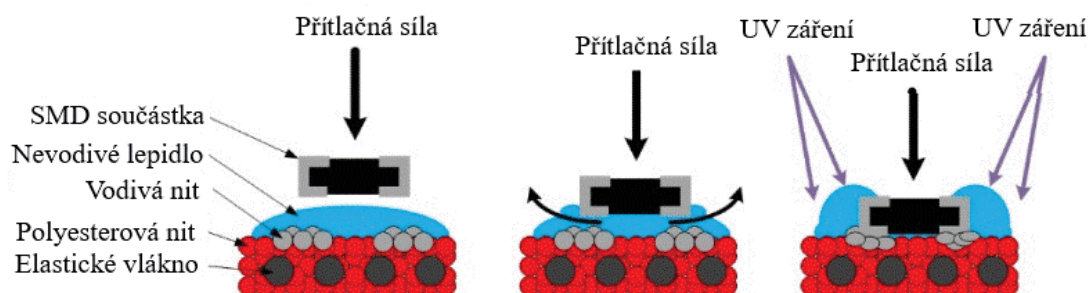
Obr. 2.1: Nezapouzdřený pájený spoj na vodivé textilii. (Převzato z [23])

Proces kontaktování začíná nanesením pájky na kontaktní plošku např. pomocí šablony či dispenzeru. Dále se osadí elektronické součástky na kontaktní plošky, na které byla v předchozím kroku nanesena pájka. Nakonec dojde působením tepla (podle teplotního profilu pájky) k roztavení pájky a vzájemnému spojení obou kontaktních ploch. Dodání tepla potřebného pro pájení lze provést například: přímým kontaktním pájením, pájením horkým vzduchem, pájením laserem, ultrazvukem nebo infračerveným pájením

[20]. Pájené spoje na textilních substrátech vykazují nízký elektrický odpor a vysokou mechanickou pevnost [25]. Další výhodou spočívá v tom, že proces kontaktování pomocí pájení je dlouhodobě zavedený a dobře škálovatelný [26]. Nevýhodou této technologie je vysoká teplota při jejím zpracování [26], a také fakt, že je nutné každou součástku kontaktovat samostatně.

2.1.2 Nevodivé lepení

Elektricky vodivý spoj mezi součástkou a vodivou textilií lze také vytvořit pomocí elektricky nevodivých lepidel (NCA). Spojení dosáhneme nanesením lepidla mezi vodivé cesty a osazením součástky do lepidla. Následně se vyvine tlak na horní stranu součástky, což má za následek vytlačení lepidla z kontaktní oblasti a vznik vodivého propojení. Poté se lepidlo zpravidla vytvrdí pomocí UV záření [27]. Vodivé spoje s nevodivými lepidly poskytují ve srovnání s jinými technikami řadu výhod. NCA spoje zabraňují zkratování a nejsou omezeny roztečí konektorů. Dále současná realizace elektrického a mechanického kontaktu a možnost opravy spoje pomocí opětovného přetavení termoplastické lepidla [26]. A v neposlední řadě nízká výrobní cena, snadné zpracování s ohledem na možnost aplikace lepidla, dobrá kompatibilita s širokou škálou kontaktních materiálů a vytvrzování při nízkých teplotách [28]. Nevýhody spočívají v samostatném kontaktování součástek, dále v omezené dostupnosti vhodných lepidel a v omezeném rozsahu pracovních teplot zvoleného lepidla [26].



Obr. 2.2: Princip nevodivého lepení na vodivé stuze. (Převzato a upraveno z [29])

2.1.3 Termokompresa

Obecný princip termokompresa spočívá v kombinaci působení tlaku a teploty. S tímto principem se můžeme setkat například v případě mikrodrátkového bondování [30], tzv.

„Hot bar“ pájení, nebo kontaktování na textilní substráty [31]. Poslední zmíněná metoda využívá zvýšené teploty a tlaku k fixaci součástky na textilním substrátu pomocí termoplastického materiálu s využitím termolisu pro termotransfer na textil, jež je v textilním průmyslu běžně používán. Proces termokompresního kontaktování je velice komplexní a lze jej shrnout do několika částí: návrh, výroba a realizace [31].

První krok spočívá v návrhu elektrického obvodu a rozmístění součástek na substrát. Návrh obvodu se řídí stejnými pravidly jako u standardních DPS, avšak s dvěma omezeními: 1.) jednostranná montáž součástek a návrh propojení a za 2.) použití součástek s rovinnou styčnou plochou. Pro realizaci návrhu se využívá ECAD (electronic computer-aided design) software [31].

Další krok je navrhnutí pouzdra pro součástku či součástky, jež chceme kontaktovat. S ohledem na 3D rozměry modelu elektrického rozložení se navrhne plnohodnotné pouzdro pro součástky, které se následně zvětší cca o 2 %. Výsledkem je, že součástky se do pouzdra vejdu a současně jsou v nich upevněny bez nutnosti použití lepidla [31].

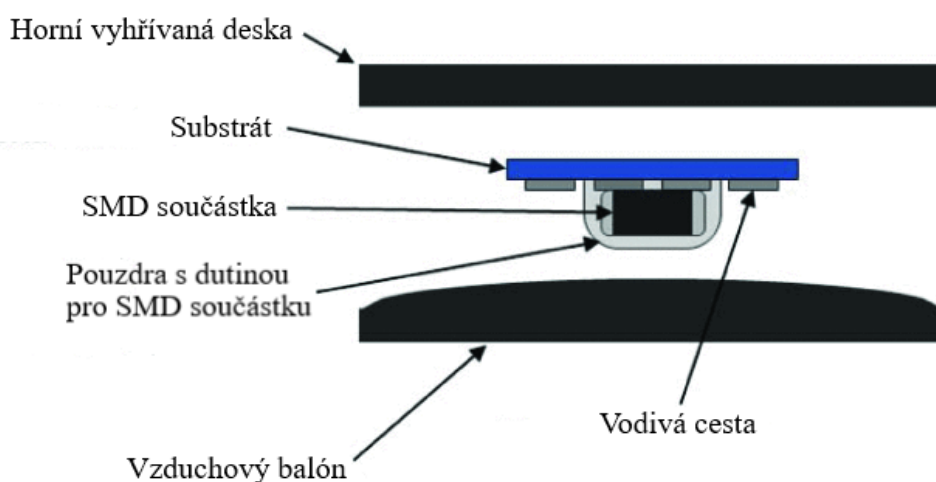
Navrhnuté pouzdro lze vyrobit na 3D tiskárně. K dispozici je široké spektrum materiálů s různou pružností a teplotou tání, mechanickou a chemickou odolností a také s různou barvou. Pouzdra vyrobená 3D tiskárnou se dají snadno upravovat na rozdíl od vstřikovacích forem, jež jsou jednoúčelové. K výrobě pouzder se používají materiály PC (polykarbonát), PMMA (polymethylmethakrylát), ABS (akrylonitrilbutadienstyren), TPE (termoplastický elastomer), TPU (termoplastický polyuretan) [31].

Následně se musí vytvořit vodivé cesty pro propojení součástek podle elektrického návrhu. Vodivé uspořádání lze realizovat pomocí vodivých textilií. Součástky lze taktéž propojit pomocí vodivého inkoustu/pasty přímo na pouzdře nebo využít flexibilní či pevné DPS.

Poslední krok procesu spočívá v realizaci elektrického kontaktu v termolisu pomocí třech způsobů. V prvním je součástka ze spodní strany lisu přitlačena pomocí vzduchového balónu k vodivé cestě (pouze mechanické spojení), ve druhém je možnost vložit mezi součástku a vodivou cestu vodivý filament (také pouze mechanické spojení). Při třetím způsobu je přidána mezi součástku a vodivou cestu nízkoteplotní pájka. Dále je lis zahříván na teplotu mezi 175 °C až 180 °C a pod stálým tlakem vzduchového balónu se nechá teplo působit na sestavu po dobu 60 až 90 vteřin. Tím se roztaví pouze pouzdro součástky a spojí se se substrátem. U třetího způsobu se navíc roztaví pájka, což zajistí i

metalurgické spojení. Poté se vypne vyhřívání a sestava v lisu se nechá vychladit pod 50 °C. Roztavené pouzdro (a pájka) ztuhne a zajistí kvalitní mechanické spojení se substrátem [30].

Tato technologie kontaktování je snadno dostupná, 3D tiskárna a termolis jsou volně k dostání za nízké ceny. Může se kombinovat mnoho materiálů s různými barvami a vlastnostmi, které lze přizpůsobit substrátu. Tato metoda pro kontaktování součástek na vodivé textilie se jeví jako velmi vhodná. Technologie byla ověřena testy v článkách [31, 32, 33].



Obr. 2.3: Princip termokomprese. (Převzato a upraveno z [33])

2.1.4 Vodivé lepení

Elektricky vodivé lepení (ECA) se již desítky let používá pro obalové aplikace v elektronice při montáži interposerů, displejů a další. Neustálé zdokonalování technologie lepidel umožnilo, aby nahradily pájku v mnoha elektronických montážních aplikacích. Vodivé lepení nabízí několik potenciálních výhod oproti konvenční technologii pájení. Například tisk s menší roztečí, zpracování při nižší teplotě a flexibilnější a jednodušší zpracování. Vytvrzení lepidla probíhá převážně teplem a tlakem. Lepidla jsou složena ze dvou základních složek. První složkou je izolační matrice, nejčastěji tvořena reaktoplastickou pryskřicí (epoxidová či silikonová) a druhou složkou jsou vodivé částice [34]. Nejčastěji jsou užívány částice stříbra, zlata, niklu či grafitu. Pro aplikace vyžadující nejen elektrickou, ale i tepelnou vodivost jsou nejvhodnější lepidla se zlatými či stříbrnými částicemi [34]. Vodivá lepidla lze rozdělit na anizotropní a izotropní [34, 35].

Anizotropní lepidla

Anizotropní lepidla jsou vodivá v jednom směru, tj. pouze podél jedné osy. Této vlastnosti se dosahuje použitím koncentrace vodivého plniva pod úrovní perolokačního prahu, což znamená, že koncentrace vodivých částic je omezena. V současné době je k dispozici ve dvou formách. První formou jsou jednosložkové tepelně vytvrzující pasty a druhou formou jsou tepelně vytvrzující termosetové nebo termoplastické fólie [28, 35]. Plnivo je zpravidla tvořeno kulovými částicemi s průměrem několika μm . Koncentrace vodivých částic v lepidle se pohybuje v rozsahu 8 až 15 % [34].

Využití anizotropního lepidla ke kontaktování na vodivých textiliích se ve své práci věnují například autoři článku [36], kde využívají lepidlo od firmy Ztach. Pro test byla použita vodivá textilie a roztažitelný vodič. Tahová zkouška potvrdila, že čím je vzorek více roztažen, tím větší má elektrický odpor a že po odebrání mechanického napětí z textilie se vodivost kontaktu rychle vrátí na původní hodnotu. Při cyklickém namáhání si vzorek vedl velice dobře. Za 1000 cyklů při 30% natažení ze své původní velikosti, s rychlostí roztahování 0,5 mm/s, se odpor spojení nezměnil. To lze považovat za velice spolehlivý kontakt.

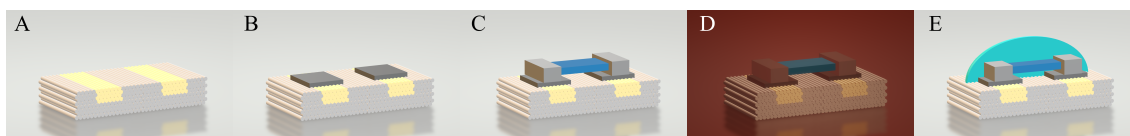
Izotropní lepidla

Izotropní vodivá lepidla nabízejí všesměrovou vodivost. Obsahují větší koncentraci vodivého plniva, zpravidla jsou plněna vodivými šupinkami o maximálních rozměrech 15 μm . Lze je vytvrdit za zvýšené nebo pokojové teploty, rozdíl je v době vytvrzení lepidla. Mohou být jednosložková či dvousložková. Skládají se z pojiva a plniva. Jako pojivo se nejčastěji používají epoxidy pro jejich nízkou vytvrzovací teplotu, zatímco stříbro je nejoblíbenějším plnivem díky své ceně a vysoké vodivosti. Obsah vodivých částic v lepidle bývá mezi 60 a 80 %. Izotropní lepidla lze použít pro elektrické propojení na nepáji- vých substrátech (keramika, plasty, textil) nebo jako náhradu pájky na tepelně citlivých součástkách [28, 35].

Proces kontaktování

Kontaktování za pomoci izotropního vodivého lepidla probíhá následovně: připraví se lepidlo k aplikaci, buď pro ruční či strojové nanášení. Lepidlo se aplikuje na vodivou cestu na textili. Dále se součástka umístí do lepidla a vytvrdí se pomocí tepla. Po vytvrzení vodivého lepidla je vhodné spoj zapouzdit například pomocí nevodivého lepidla, které

zvýší mechanickou a chemickou odolnost [50].



Obr. 2.4: Princip vodivého lepení pomocí tepla. (Převzato a upraveno z [32])

Výhody této metody spočívají ve zpracování při nízkých teplotách, odolnosti proti únavě, disponují nízkou toxicitou a zpracování bez použití tavidel či čištění po vytvoření spoje. Naopak proces kontaktování je velice nákladný na materiál a potřebná dlouhá doba vytvrzení zvyšuje energetické náklady. Vytvořený elektrický spoj má nízkou rázovou pevnost a v aplikacích s vysokou proudovou hustotou selhává [25].

2.1.5 Svařování

Svařování je tepelný proces, který vyžaduje tavení materiálu na spojovaných plochách tkaniny. Je použitelný pro plně nebo částečně syntetické tkaniny s termoplastickými složkami (např. nylonové, polyesterové nebo polypropylenové příze), které jsou při tavení vzájemně kompatibilní. Obecně platí, že svařované tkaniny musí být ze stejného termoplastu [38]. Tuto technologii lze aplikovat i na vodivé textilie. Svaření dvou vodivých textilií v místě vodivých stop se dosáhne elektrického spojení. Existuje několik druhů svaření. Pro vodivé textilie se nejčastěji využívá:

- odporové svařování,
- ultrazvukové svařování,
- laserové svařování.

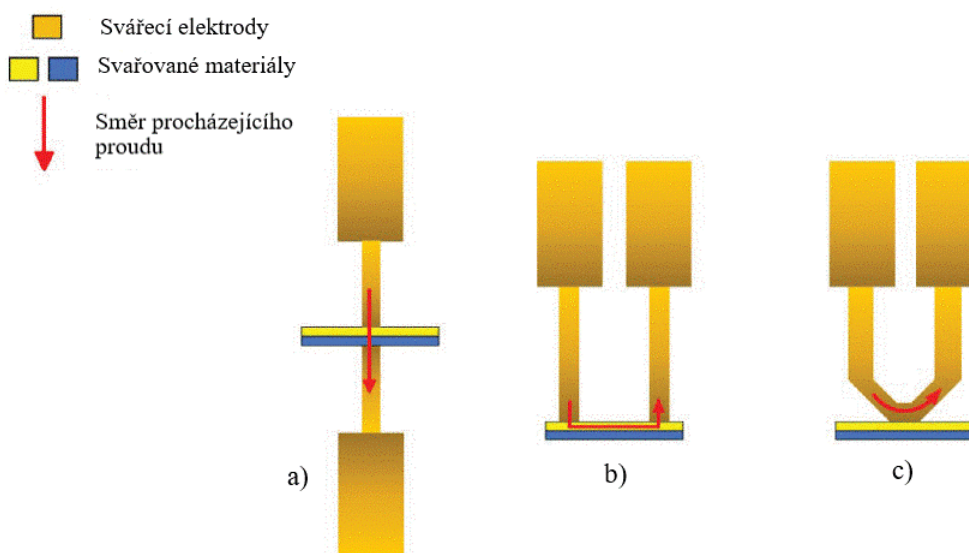
Odporové svařování

Při odporovém svařování se na rozhraní spojovaných součástí vytváří teplo průchodem elektrického proudu. Pro vytvoření svaru se proud aplikuje po pevně stanovenou dobu, přičemž se na rozhraní svařovaných součástí působí přiměřenou silou pomocí elektrody (elektrod) [39, 40]. Teplo vznikající při odporovém svařování je funkcí proudu (I) procházejícího svařovanými vodivými vlákny, elektrického odporu (R) vodivých vláken, tepelné

konstanty (c), která je funkcí geometrie vodivého vlákna a svařovací síly, a doby (t) průchodu proudem [40]:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \cdot c. \quad (2.1)$$

Existují tři hlavní druhy odporových svařovacích metod, jež se běžně používají – přímé, paralelní a krokové svařování, viz obr. 2.5.



Obr. 2.5: Tři typy používaných elektrod: a) přímé, b) paralelní, c) krokové. (Převzato a upraveno z [39])

V případě svařování přímou metodou je proud přiváděn v místě křížení z horní elektrody a protéká přes rovinu tkaniny k dolní, čímž dochází k zahřívání a tavení vodivých vláken v místě křížení [40]. V případě paralelního svařování se proud přivádí z jedné strany tkaniny pomocí dvou paralelních svařovacích sond [40]. Proud teče z jedné ze svařovacích sond do kolmých vodivých vláken v místě křížení a poté do druhé sondy. V krokové metodě neprochází proud svařovanými materiály, ale pouze hrotem elektrody, proto ji lze také použít ke svařování nevodivých materiálů [39, 40].

Ultrazvukové svařování

Při této metodě svařování vznikají vlny v ultrazvukovém rozsahu 18 kHz až 500 kHz, jež způsobují vibrace povrchů spojovaných materiálů [41]. Tření, které takto vzniká mezi oběma povrchy, materiály zahřívá a plastifikuje [41]. Vibrace jsou přenášeny na tkaninu pomocí sonotrody zajišťující potřebný tlak na spojovaný materiál [41]. Proces obvykle trvá přibližně 1 sekundu [38]. Tento typ svařování lze použít pro spojování plastů, kovů

nebo různorodých materiálů. Schopnost ultrazvukového svařování na textiliích závisí na jejich termoplastickém obsahu a požadovaném konečném výsledku. Materiál musí mít rovnoměrnou tloušťku a minimální obsah termoplastu 65 % [38]. Hustota příze, hustota vazby, pružnost materiálu a styl pleteniny jsou faktory, jež mohou ovlivnit schopnost svařování [41]. Kromě svařování dvou tkanin lze metodu ultrazvukového svařování použít také k řezání tkanin nebo k zatavování okrajů, čímž jsou čisté a hladké; tkaniny nejsou po zatavení výrobním strojem opálené nebo zbarvené [41].

Laserové svařování

Zahřívání se provádí průchodem infračerveného laserového paprsku horní tkaninou, který má být absorbován spodní tkaninou. Proces laserového svařování se skládá ze tří fází, jež lze spojit do jednoho procesu:

- nanesení absorbéru na místo spojení,
- vytvoření švu a jeho pevné upnutí,
- ozáření švu laserem v blízkém infračerveném pásmu, aby se materiál roztavil v místě, kde byl aplikován absorbér, a vytvořil se trvalý svar.

Nanesení absorbéru - do místa spojení se na spodní textilií nanese absorbér (obchodní označení Clear Weld), který je schopen pohltit infračervené světlo [42]. Během sváření se v tomto místě absorbuje energie z laseru a poté dojde k roztavení povrchu materiálů a jejich svaření [38].

Vytvoření švu - šev se sestaví a upevní na místě tak, aby rozhraní mezi textilií mohlo být přístupné laseru. Zároveň se na spoj musí aplikovat určitý tlak pro vznik kvalitního spojení [38].

Ozařování - k ozáření švu se používá infračervený laser. Volba vlnové délky a intenzita výkonu laseru umožňuje kontrolovat proces sváření. Systém absorpčního materiálu pohlcuje záření a koncentruje teplo na rozhraní mezi textilií [38].

V každé textilií se roztaví tenká vrstva polymeru a působením upínacího tlaku se tyto vrstvy dostanou do kontaktu. Tlak se udržuje, zatímco se filmy ochlazují a tuhnou, čímž vzniká trvalý svar [38].

2.1.6 Šití

Šití je technika používaná pro spojení dvou materiálů pomocí stehů. Rozlišujeme ruční a strojní steh. Ruční steh vytvoříme provlečením jehly s nití skrz oba materiály a zpět. Strojní steh vzniká pomocí horní nitě, jež se pomocí jehly vpichuje do látky a při zpětném pohybu se vytvoří očko, kterým se prohodí spodní nit a poté se steh utáhne. Kontinuální řada stehů tvoří šev. Vlastnosti spojení závisí na čtyřech faktorech [41]:

- druh stehu,
- druh švu,
- materiál šicí nitě,
- materiál tkaniny.

Šicí a vyšívací technologie lze pomocí vhodně zvolené příze připojit pevným mechanickým spojením elektronické součástky (desky plošných spojů, senzory, aj.) k vodivé textilní tkanině [1]. Pro spolehlivé elektrické spojení je nutné vybrat vhodnou vodivou přízi, která má jak mechanickou, tak chemickou odolnost. Autor článku [1] se zmiňuje o experimentu, kde byla použita komerčně dostupná vícevláknová polyamidová nit potažená stříbrem k výrobě šitých spínačů. Tato nit svou pružností a ohebností odpovídá „běžným“ textilním nitím, ale po vyprání byla zaznamenána nežádoucí zratelná změna elektrické vodivosti.

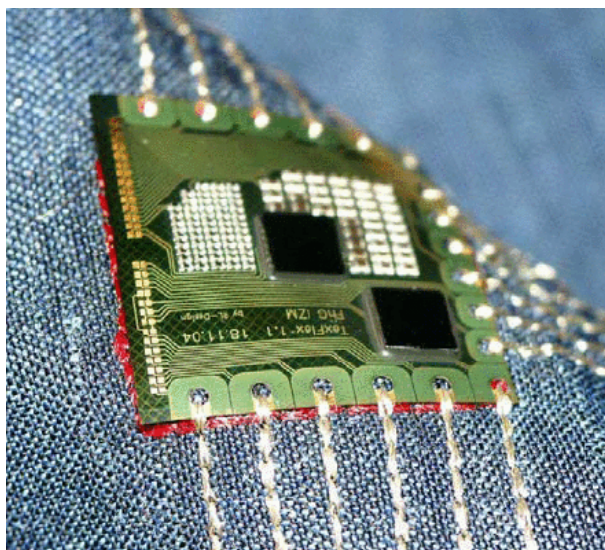
Při využití této metody pro aplikaci v blízkosti těla je nutné umístit vodivé cesty a součástky na vnější stranu tkaniny. Zajistí to ochranu proti vyskytujícím se vodivým látkám jako je například pot, dále zvýší komfort při nošení a omezí namáhání třením. Dále lze pomocí zalaminování spoje termoplastickým polyuretanem či zapouzdřením pomocí epoxidové směsi zvýšit ochranu proti mechanickému namáhání a také zvýšit odolnost proti vlhkosti, solím či atmosférickým nečistotám [1].

V současnosti se provádí šití hlavně strojově pro nenáročnost a možnost automatizace. Společnost ZSK Stickmaschinen zabývající se strojním vyšíváním vyvinula šicí stroj, připravený pro vyšívání vodivými nitěmi [23]. Při použití šicího stroje je třeba dbát na použití speciálních přízí a jehel, které zajistí nepřetržení příze při procesu kontaktování, mezi ně patří například niklová vodivá nit či nit Silver-tech 50 [1].

Týmu pana T. Linze [43] se povedlo pomocí šití kvalitně a spolehlivě nakontaktovat flexibilní desku plošného spoje (FPC) na vodivou textilii. Ta se částečně dokáže pomocí své pružnosti přizpůsobit textilii a zajistit komfort při nošení. Nejprve se nevodivou nití vyšil obrazec pro správné umístění. Poté došlo k umístění a prošití předem vytvořenými vodivými otvory v FPC .

Pan Linz také zpracoval mnoho vědeckých článků o metodě šití na vodivých textiliích. Všechny nabyté poznatky sepsal do jedné knihy [44]. Zde pojednává o motivacích, proč se věnovat chytrým textiliím, fundamentálním analýzám o vodivých vyšívacích přízích a jejich složení, zpracování a vlastnostech. Dále o kontaktování s DPS, o elektrickém odporu kontaktu, mechanických vlastnostech a spolehlivosti. Dále také podrobně popisuje své otestované prototypy a popisuje celý proces vytvoření.

Mezi výhody této technologie patří snadná automatizace procesu. Nevýhoda je nutně použití nití s vysokou odolností proti oděru a nutnost přizpůsobit součástku k provlečení jehly s nití.



Obr. 2.6: Plošný spoj kontaktovaný pomocí přešití. (Převzato z [43])

2.2 Odnímatelná připojení

Tato kapitola se věnuje odnímatelným spojením elektroniky s vodivými textiliemi. Výhoda těchto metod spočívá v opakovaném odpojení/připojení elektronického zařízení. Využití naleznou například při: nutnosti odstranění elektronického modulu před praním, potřebě nabíjení zařízení nebo nutnosti přerušit vodivé cesty při vysvléknutí oděvu. Mezi

tyto metody se například řadí stuhový uzávěr, druky a magnetické spoje [45].

2.2.1 Stuhový uzávěr

Stuhový uzávěr, komerčně známý jako suchý zip, se skládá ze dvou částí. Tyto části jsou připevněné k protilehlým plochám, které mají být spojeny. První část je tvořena menšími smyčkami, druhá malými háčky. Přitisknutím k sobě se háčky zachytí ve smyčkách a spojí se. Stuhový uzávěr se v oděvním průmyslu používá jako náhrada zipů, tkaniček či knoflíků.

Vodivý stuhový uzávěr je patentován již od 80. let 20. století [45]. Háčky a smyčky jsou obvykle vyrobeny z nylonu a polyesteru a následně jsou potaženy vodivým materiálem, nejčastěji stříbrem [45, 46]. Elektrický odpor spoje komerčně dostupného postříbeného suchého zipu o šířce 2,54 cm dosahuje $0,8 \Omega$ s předpokládanou životností 5000 otevření/zavření [46]. Distributor uvádí, že použitím bělidel či špatnou kvalitou vody při praní se mohou zhoršit elektrické vlastnosti [46]. Autor článku [47] se ve svém experimentu zmiňuje, že odpor spoje je závislý na použité síle při zapínání. Výsledky ukazují, že při nejlepším možném spojení dosahoval spoj odporu pod $0,8 \Omega$ a při nedůsledném spojení se hodnota odporu téměř ztrojnásobila.

Výhody vodivého stuhového uzávěru spočívají ve snadné integraci do textilie pomocí vodivé nitě a také v dobré přizpůsobivosti se substrátem (stuhový uzávěr je ohebný obdobně jako tkanina). Nevýhody této metody jsou: závislost elektrického odporu spoje na použité síle pro spojení, omezený počet rozpojení-spojení při zachování elektrických vlastností, citlivost na určité prací prostředky. Stuhový uzávěr lze použít pro elektrostatické stínění, elektrické kontakty či pro propojení funkčních bloků v chytrých textiliích [45].

2.2.2 Druky

Druky se zpravidla připevňují k látce šitím nebo nýtováním a používají se především pro spojování dvou částí oděvů. Potažením vodivými materiály lze dodat plastovým drukům elektrickou vodivost, případně ještě zvýšit elektrickou vodivost u druků kovových. Lze je využít jako elektrické kontakty na chytrých textiliích nebo pro připevnění elektronického modulu na oděv. V druhém případě je jedna část druku našita/nánytovaná na vodivou textilií a druhá je připevněna k modulu např. pomocí pájení, lepení, šití a jiné [45, 47]. Expe-

řiment autora článku [47] se věnuje možným způsobům připojení DPS s vodivou textilií pomocí druků. V experimentu vytvořil dvě varianty nakontaktování. V první verzi byly spodní poloviny druků ručně přišity na vodivou látku a osazeny do pokovených otvorů DPS, druhá polovina se zacvakla pro dosažení mechanické pevnosti. V druhé variantě se spodní poloviny druků osadily do zvětšených otvorů na vodivé straně DPS a připájely, což zajistilo zvětšení plochy kontaktu. Horní části se přišily k vodivé textilii a poté se obě poloviny secvakly. První verze dosáhla elektrického odporu v průměru $0,99 \Omega$. Za to u druhé verze, se zvýšenou kontaktní plochou a pájkou, bylo naměřeno $0,49 \Omega$. Autor uvádí, že faktorem zlepšení bylo přidání pájky, které zajistilo plnohodnotný kontakt mezi spodní částí duku a DPS.

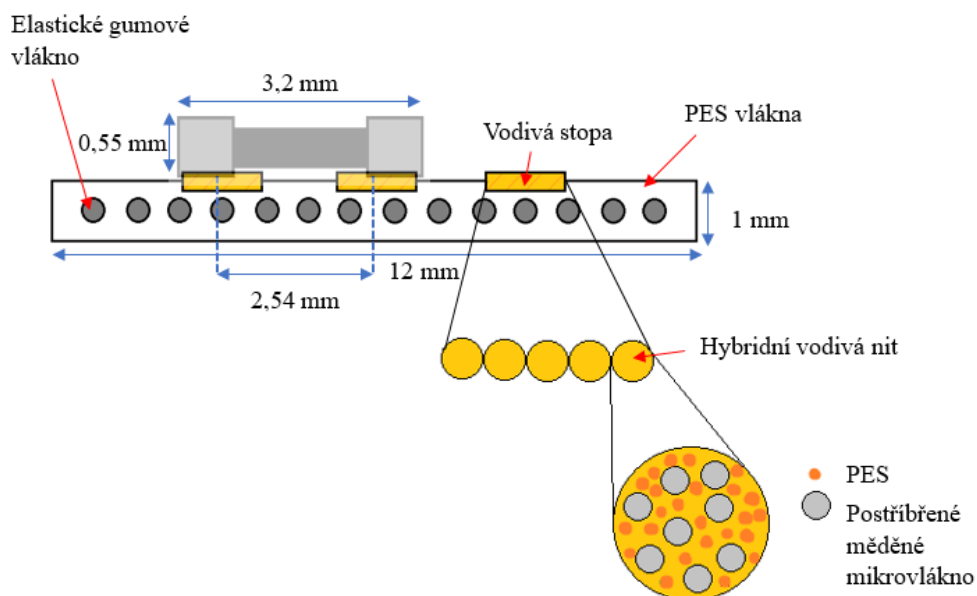
Jejich výhody spočívají ve snadné integraci do textilií a snadnému připojení. Na druhou stranu opakované připojování/odpojování může oslabit pevnost a stabilitu spoje. Případně může dojít během používání k rozpojení a tím ke zvýšení elektrického odporu spoje tvořeného více druky nebo dokonce k úplnému odpojení.

2.2.3 Magnetické spoje

Magnetické spoje se používají v elektrotechnickém průmyslu pro jejich snadné odpojení a připojení. Jeden z nejznámějších příkladů je napájecí konektor MagSafe od společnosti Apple, který se momentálně využívá pro bezdrátové nabíjení mobilních telefonů či chytrých hodinek [48]. Pro použití na chytrých textiliích je třeba zvolit vhodný druh magnetu, který se následně nalepí na vodivou cestu. Tvar, síla magnetického pole a povrchová úprava magnetu jsou rozhodujícími aspekty [49]. Scheulen a spol. ve své práci [49] popisují využití neodymových magnetů k vytvoření odnímatelného spoje pro chytré textilie. Pro experiment použili dva druhy magnetů, s a bez Au vrstvy, která je často aplikována pro zvýšení odolnosti vůči korozi. Kombinací izotropního vodivého lepidla a nevodivého lepidla se upevnily magnety k vodivé textilii. Práce poukazuje na nízký kontaktní odpor mezi dvěma magnety, méně než $0,01 \Omega$. Elektrický odpor spoje mezi vodivou textilií a magnety bez Au povlaku je velice kolísavý, ale nepřesahuje hodnoty 7Ω . Za to odpor spoje s magnety s Au povlakem nepřesáhl hodnotu 1Ω .

3 Příprava experimentu

Pro tento experiment byla jako vodivá textilie použita vodivá pružná tkaná stuha. Celková tloušťka stuhy činí přibližně 1 mm a šířka 12 mm. Skládá se ze třech základních vláken, jak lze vidět na obrázku 3.1. První vlákna jsou polyesterové nitě (PES) nacházející se v osnově a útku, dodávají stuze pevnost a odolnost. Druhá jsou elastická gumová vlákna, která jsou v osnově stuhy. Náchází se uprostřed a dodávají stuze roztažitelnost. Poslední základní vlákna jsou hybridní vodivé nitě, které zajišťují elektrickou vodivost stuhy. Skládají se z polyesterových kontinuálních monovláken o průměru 14,5 μm , mezi kterými se nachází osm postříbřených měděných mikrodrátků. Každý vodivý drátek má průměr okolo 30 μm .



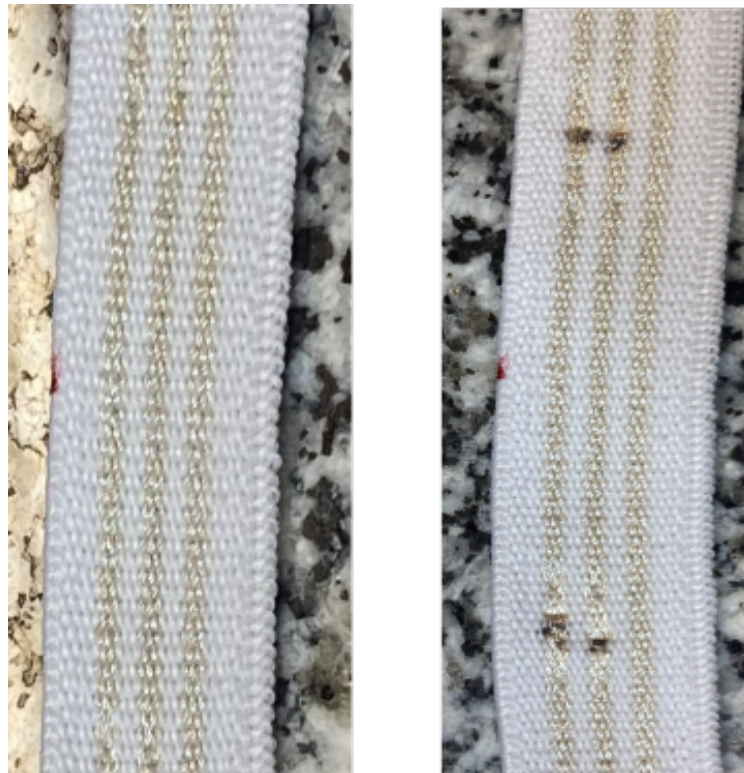
Obr. 3.1: Průřez vodivou pružnou tkanou stuhou.

Pro dosažení kvalitního elektrického spojení se v jedné vodivé stopě nachází pět hybridních vodivých vláken. Stuha je utkána pomocí tkalcovského stavu. Pro dosažení nižších hodnot elektrického odporu vodivých cest při mechanickém namáhání byla stuha utkána v napnutém stavu. Díky tomuto procesu výroby dosahuje elektrický odpor vodivé stopy jednotek ohmů na metr a to i při natažení o 70 %. Z toho důvodu je tato vodivá stuha vhodná pro použití ve většině chytrých textilií. Ve stuze jsou celkem vetkány tři vodivé stopy. Pro zjednodušení procesu kontaktování mají rozteč 2,54 mm, která odpovídá standardu pro elektronický průmysl. Z toho důvodu je tato stuha vhodná pro experiment s

SMD součástkami.

Na experiment bylo celkově použito šest 40 cm dlouhých kusů vodivé pružné stuhu. Jedna pro metodu pájení, tři pro metodu nevodivého lepení a dvě pro technologii termokomprese. Na každou stuhu bylo nakontaktováno deset SMD rezistorů s nulovým elektrickým odporem v pouzdře typu 1206 (viz datasheet příloha A). Rezistory s délkou 3,2 mm a šířkou 1,6 mm dle předpokladu odpovídaly rozteči vodivé cesty stuhu.

Z důvodu umožnění měření elektrického odporu jednotlivých spojů bylo nezbytné přerušit vodivé cesty na stuze. Přerušení bylo realizováno pomocí odporové bodové svářečky od společnosti Sunstone před nakontaktováním jednotlivých rezistorů vždy po 4 cm, viz obr. 3.2.



Obr. 3.2: Vodivé dráhy na stuze bez přerušení (vlevo), po přerušení (vpravo).

3.1 Pájení

První využitou metodou pro nakontaktování SMD rezistorů na vodivou stuhu s přerušenými vodivými cestami bylo pájení. Z důvodu nízké tepelné odolnosti stuhu byla použita komerčně dostupná nízkoteplotní pájecí pasta Nevo Shenmao PF 602 (SnBi) složená z 42 % cínu a 58 % bismutu s bodem tání 138 °C (viz datasheet příloha B). Pájené vzorky

byly vytvořeny následujícím postupem. Prvním krokem bylo nanesení pájecí pasta na dvě sousedící vodivé stopy pomocí ručního dispenseru. Následně byl rezistor připájen na stuhu pomocí ruční horkovzdušné pájecí stanice, jež byla nastavena na 180 °C. Pro zlepšení mechanické a chemické odolnosti pájeného spoje byly všechny součástky jednotlivě zapouzdřeny nevodivým lepidlem Loctite AA 3926 (datasheet uveden v příloze C) vytvrzeným pomocí UV záření po dobu patnácti vteřin. Výroba pájených vzorků je detailně zobrazena na obrázcích níže.



Obr. 3.3: Nanesení pájky a umístění součástky na vodivou stuhu.



Obr. 3.4: Pájení pomocí horkého vzduchu a zapouzdření nevodivým lepidlem.

3.2 Nevodivé lepení

Druhá metoda pro nakontaktování SMD rezistorů byla technologie nevodivého lepení. Celkem byla použita tři nevodivá lepidla na bázi akrylátu, každé pro jednu stuhu. Celkem tedy byly tři vzorky. Prvním lepidlem bylo Loctite AA 3926 (viz datasheet příloha C), jež bylo také použito k zapouzdření pájených vzorků, viz kapitola 3.1. Skládá se z akrylátového monomeru, N-dimethylakrylamidu, gamaglycidoxypropyl trimethoxysilanu, oxidu křemičitého, difenyl trimethylbenzoylfosfin oxidu. Poměr jednotlivých látek je výrobním

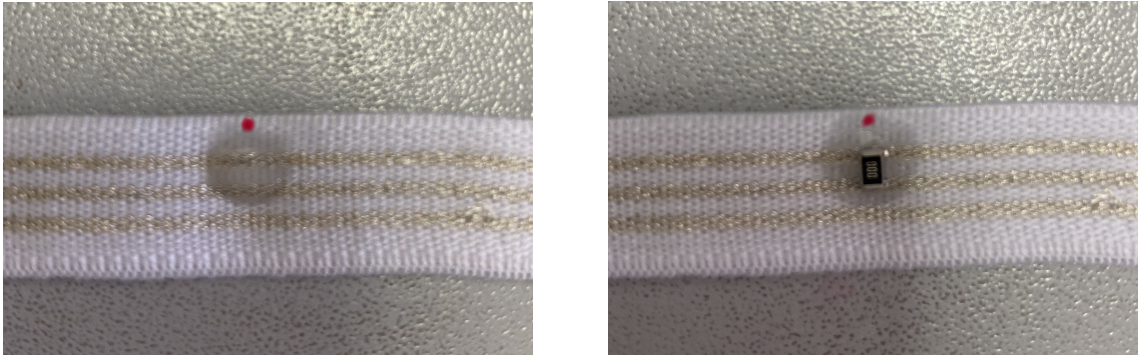
tajemstvím firmy. Lepidlo disponuje širokým rozsahem pracovních teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dosahuje vynikající adheze k plastům, kovům a skleněným povrchům. Po rychlém vytvrzení UV zářením (řádově pár desítek vteřin) je lepidlo čiré, pružné a odolné vysokému tlaku. Lepidlo získalo certifikát ISO 10993, a tudíž lze také použít pro spojování jednoúčelových zdravotních pomůcek [50].

Další dvě lepidla byla od německé firmy Panacol, která dodává na mezinárodní trh nevodivá, vodivá, konstrukční a UV lepidla pro průmysl a zdravotnictví. Neobsahují rozpouštědla, těžké kovy a ani ftaláty.

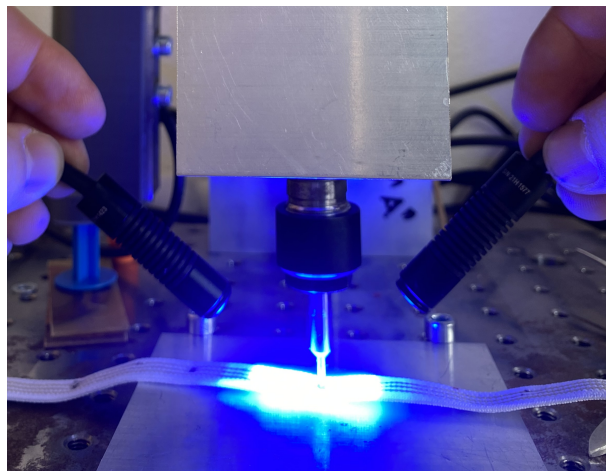
Prvním produktem od Panacolu byl Vitralit VBB-1 gel (viz datasheet příloha D). Lepidlo se používá v aplikacích, kde jsou potřeba tuhé a trvanlivé spoje odolné proti vlhkosti. Po vytvrzení je lepidlo opticky čiré, pružné a s nízkou nasákavostí. Pracovní teploty se pohybují od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Poslední aplikované lepidlo bylo také z řady Vitralit, typ 4732 VT (viz datasheet příloha E). Je velice univerzální, s dobrou přilnavostí k plastům, keramice, sklu, kovům a substrátům s nízkou povrchovou energií, proto ho lze použít v mnoha průmyslových odvětvích. Oproti předešlým lepidlům je použitelné v nižším rozsahu pracovních teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

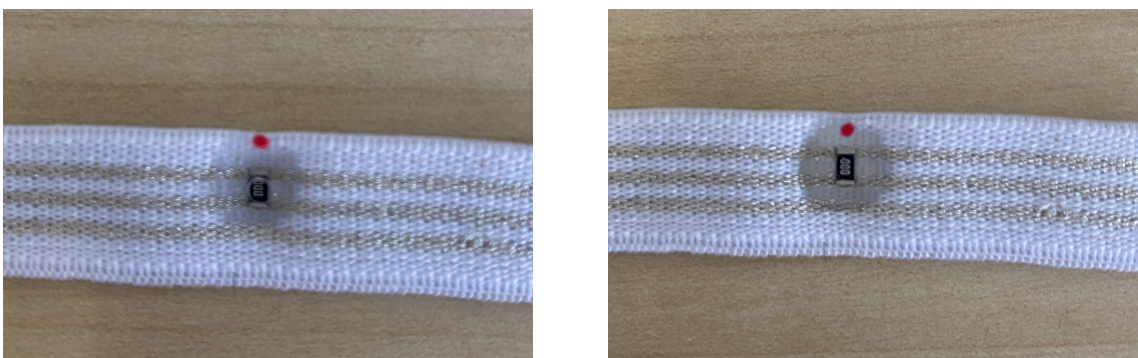
Následující postup výroby testovacích vzorků byl pro všechny druhy lepidel shodný. V první fázi se lepidlo nanese mezi dvě vodivé cesty na stuhu a následně se do něj osadil rezistor pinzetou. Pomocí trnu, který působil silou 30 N , se rezistor vtlačil do stuhu, což způsobilo vytlačení lepidla z místa kontaktu. Za stálého působení síly na rezistor se lepidlo vytvrdilo pomocí UV záření po dobu patnácti vteřin. Po vytvrzení lepidla byla zátěž odebrána. Po vytvrzení je zajištěn nepřetržitý kontakt mezi rezistorem a vodivou cestou pomocí vnitřního pnutí lepidla. V místě trnu vznikl otvor, jež se následně zaplnil opětovným nanesením lepidla aplikovaného na rezistor se shodnou dobou vytvrzení jako v předchozím kroku. Proces výroby vzorku lze vidět na obrázcích níže.



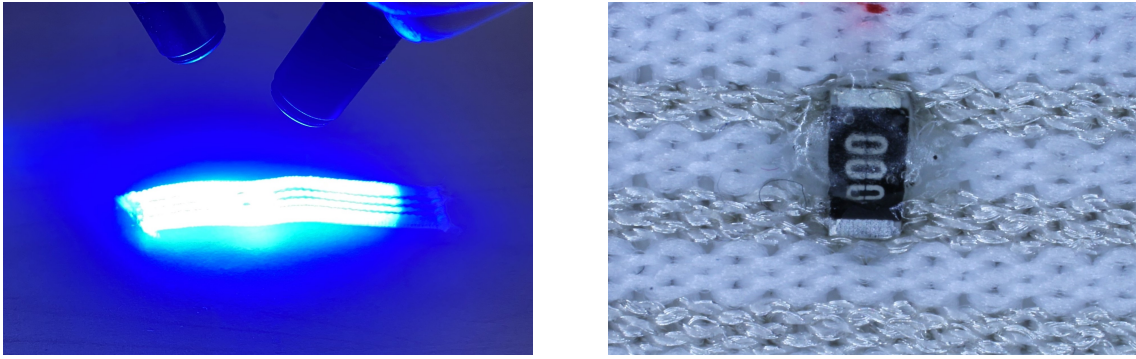
Obr. 3.5: Nanesení nevodivého lepidla a umístění součástky.



Obr. 3.6: Vtlačení rezistoru do stuhy a vytvrzení lepidla pomocí UV záření.



Obr. 3.7: Odebrání závaží, vznik otvoru a následné nanesení lepidla pro odstranění díry.



Obr. 3.8: Opětovné vytvrzení lepidla pomocí UV záření a konečný stav nakontaktovaného SMD rezistoru.

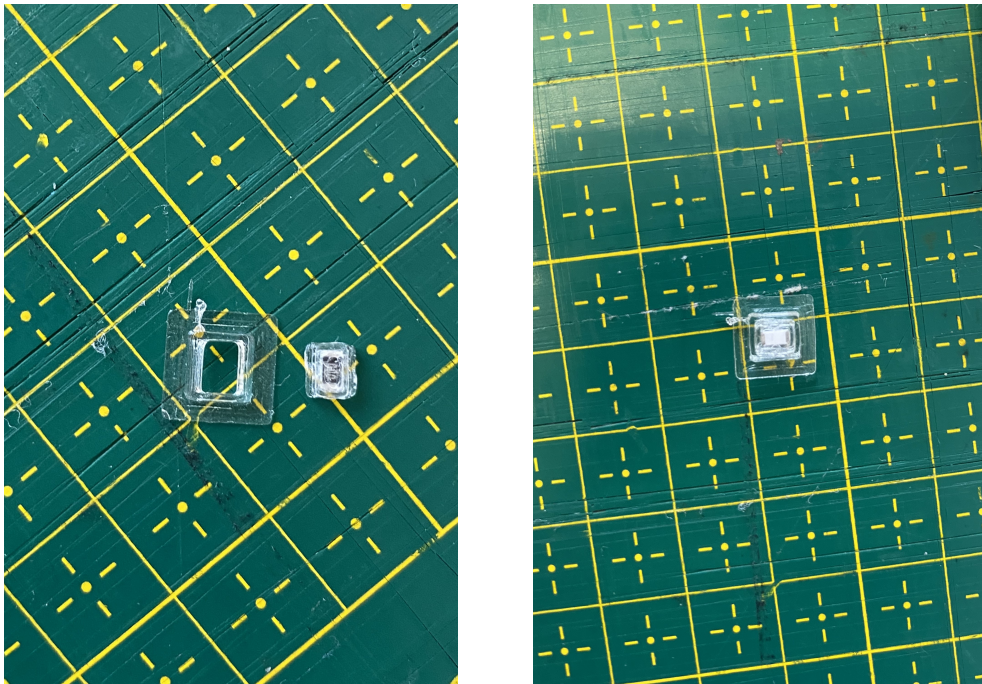
3.3 Termokomprese

Třetí metodou použitou v experimentu byla termokomprese. U termokompresního kontaktování jde o mechanické spojení mezi vodivou cestou a součástkou za působení stálé teploty a tlaku.

Při výrobě vzorků pro testování se postupovalo následovně. SMD rezistor s nulovým elektrickým odporem byl vložen do pevného fóliového pouzdra. Pouzdro bylo vyrobeno kombinací materiálů PC a PMMA a slouží k pevné fixaci součástky. Pouzdro s rezistorem se následně vsunulo do flexibilního rámečku vyrobeného z TPU 70-A, jež slouží k zvětšení kontaktní plochy k substrátu. Kompletní pouzdro s rezistorem se obezřetně přichytilo k vodivé stuze pomocí manuální svářečky na plasty. Pro zvýšení mechanické a chemické odolnosti byla na rovinnou plochu stuhu použita fólie ze stejného materiálu jako flexibilní rámeček. Pro nepřilepení plastického pouzdra na rozežhátou plochu termolisu se přes vzorek aplikovala folie s nepřilnavým povrchem. S rezistory orientovanými směrem dolů se stuha vložila do termolisu. Zesponu na stuhu působil nafouklý vzduchový balón s tlakem 600 g/cm^2 a z vrchní strany rozežhátý plát o teplotě $175 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 90 sekund. Poté se stuha pod tlakem balónu nechala vychladit pod $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Ztuhnutí pouzdra zajistilo kvalitní mechanické spojení se stuhou. Po vyjmutí z lisu součástky nepotřebují žádné zapouzdření jako u předchozích metod.

Touto technologií byly vytvořeny dva druhy vzorků. V prvním případě dosedají kontaktní plochy odporu přímo na vodivé cesty stuhu. Ve druhém se mezi kontaktní plochy a vodivou cestu vložil vodivý filament s měděnými částicemi. Velká výhoda této technologie oproti předchozím spočívá v nakontaktování všech součástí zároveň. Celý proces je

znázorněn na obrázcích níže.



Obr. 3.9: Rezistor v pevném pouzdře vedle flexibilního rámečku (vlevo), pouzdro s odporem vloženo do flexibilního rámečku (vpravo).



Obr. 3.10: Rezistor přichycený ke stuzce a vložený do folie s nepřilnavým povrchem (vlevo), následně umístěný do termolisu (vpravo).



Obr. 3.11: Finální stav spoje s vodivým filamentem.

4 Testovací metoda a měření

Vodivé textilie osazené elektrickými součástkami se nazývají chytré textilie nebo e-textilie. Aby bylo možné pro společnost vyrábět bezpečné a spolehlivé produkty, musí být zavedena standardizace pomocí norem, jež také zajistí širokou komercializaci, a tím rozvoj a větší podíl e-textilií na trhu.

V současné době se národní a mezinárodní normalizační organizace věnují vývoji norem pro chytré textilie. Patří mezi ně Evropský výbor pro normalizaci (CEN) s technickou komisí CEN TC 248/WG 31, Mezinárodní elektrotechnická komise (IEC) s technickou komisí IEC TC 124, dále ASTM International s technickou komisí ASTM D13.50, Mezinárodní organizace pro normalizaci s technickou komisí ISO/TC 38/WG 32, Americká asociace textilních chemiků a koloristů (AATCC) s technickou komisí AATCC RA111 [51] a organizace IPC. V tabulce 4.1 je zmíněný popis několika platných standardů pro testování chytrých textilií.

Tab. 4.1: Normy pro testování chytrých textilií

Norma	Název
TNI CEN ISI/TR 23383	Textilie a textilní výrobky - Chytré (inteligentní) textilie - Definice, kategorizace, aplikace a potřeby normalizace
ČSN EN ISO 24584	Textilie - Chytré textilie - Metoda zkoušení plošného odporu vodivých textilií bezkontaktním způsobem
ČSN EN 16812	Textilie a textilní výrobky - Elektricky vodivé textilie - Stanovení lineárního elektrického odporu vodivých drah
ČSN EN IEC 63203-201-1	Nositelná elektronická zařízení a technologie - Část 201-1: Elektronické textilie - Metody měření základních vlastností vodivé příze
IEC 63203-101-1:2021	Nositelná elektronická zařízení a technologie - Část 101-1: Terminologie
IEC 63203-201-2:2022	Nositelná elektronická zařízení a technologie - Část 201-2: Elektronické textilie - Metody měření základních vlastností vodivých tkanin a izolačních materiálů

IEC 63203-201-3	Nositelná elektronická zařízení a technologie - Část 201-3: Elektronické textilie - Stanovení elektrického odporu vodivých textilií v simulovaném mikroklimatu
IEC TR 63203-250-1:2021	Nositelná elektronická zařízení a technologie - Část 250-1: Elektronické textilie - Zapínací spoje mezi elektronickými textiliemi a odnímatelnými elektronickými zařízeními
IPC/JPCA-8911	Požadavky na vodivé příze pro aplikace v elektronických textiliích
IPC-8981	Kvalita a spolehlivost e-textilních nositelných materiálů
AATCC EP13	Postup hodnocení elektrického odporu elektronicky integrovaných textilií
IEC TR 62899- 250: 2016	Tištěná elektronika - Část 250: Materiálové technologie požadované v tištěné elektronice pro nositelná inteligentní zařízení

Více se současným i rozepsaným normám věnuje Ikra Iftekhar Shuvo ve svém článku [51], které rozděluje podle druhu namáhání. Pro zachování původních vlastností textilie jako je prodyšnost, flexibilita, omyvatelnost či udržitelnost lze postupovat podle technické normy ČSN 80 – Textilní suroviny a výrobky.

4.1 Testovací metoda experimentu

Na vodivé stuhly byly nakontaktovány SMD rezistory s nulovým odporem třemi různými metodami, které jsou popsány v kapitole 3. Celkem se testovalo šest stuh, jedna metodou pájení, tři nevodivým lepením a dvě pomocí termokomprese.

Test byl realizován dle normy ČSN EN 60068-2-52, Testovací metoda 1 nebo-li cyklická zkouška solnou mlhou [52]. Norma udává salinitu roztoku 5 %. Jedná se o zkoušku vlivu vnějších činitelů prostředí v elektrotechnice. Celkem byly prováděny 4 cykly, přičemž každý z nich trval 7 dní. Testovací cyklus probíhal následovně: zkušební vzorky se umístily do solné komory a vystavily se dvouhodinovému působení nepřetržitého nepřímého postřiku neutrálním roztokem slané vody (pH 6,5 až 7,2), který dopadá na vzorky při teplotě 35 °C. Ty se poté přemístily do oddělené klimatické komory s teplotou 40 °C

s relativní vlhkostí 93 % na dobu 166 hodin.

4.2 Měření odporu kontaktů

Měření probíhalo dvakrát v jednom cyklu. Nejprve po vyjmutí vzorků ze solné komory a následně po uplynutí doby v klimatické komoře. K měření hodnoty odporů byla použita tzv. Kelvinova metoda neboli metoda čtyř vodičů. Měření je postaveno na principu Ohmova zákona, který říká, že proud procházející elektrickým zařízením je přímo úměrný napětí, vyjádřeno vzorcem:

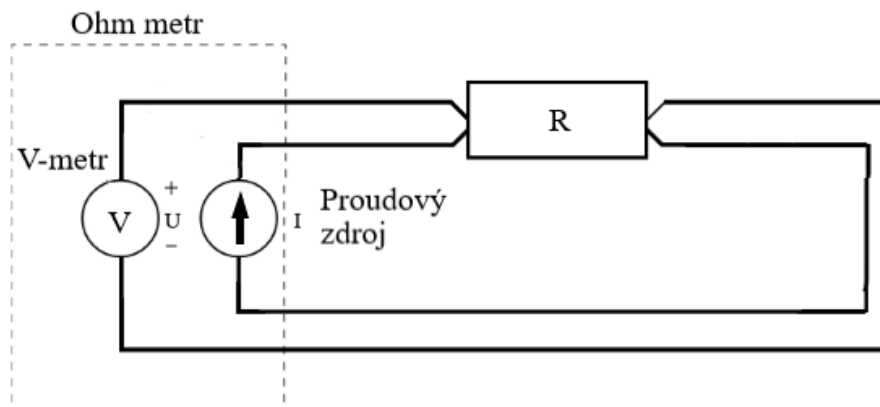
$$R = \frac{U}{I}, \quad (4.1)$$

kde R je elektrický odpor [Ω], U napětí [V] a I proud [A].

Pro tento experiment se nemohla zvolit Ohmova metoda pro měření odporů, protože bychom nezměřili pouze hodnotu odporu kontaktu, ale celého obvodu. Ten zahrnuje odpor přívodních vodičů R_a a R_b (cca 0,2 Ω), který je v tomto případě větší než námi nakontaktovaný nulový rezistor (reálně jednotky m Ω) na zkušebních vzorcích.

$$R_c = \frac{U}{I} = R_a + R_b + R. \quad (4.2)$$

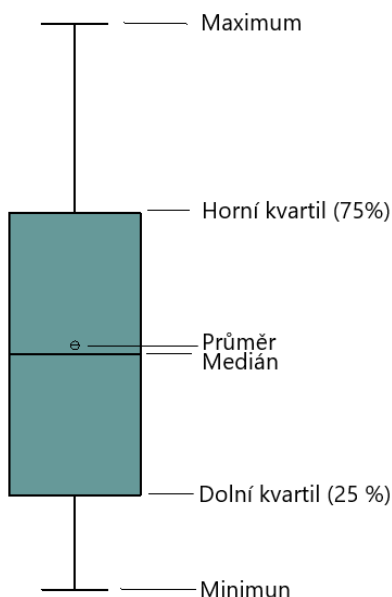
Právě pro odstranění nežádoucích systematických chyb (odpor přívodních vodičů) se použila již zmíněná čtyřvodičová metoda, obr. 4.1. Dva vodiče přivádí konstantní proud do měřicí součásti a další dva měří pokles napětí na součástce za pomoci voltmetru. Obecně se tato metoda využívá k měření malých a velmi malých odporů.



Obr. 4.1: Měření odporu pomocí Kelvinovy metody.

5 Vyhodnocení experimentu

Tato kapitola se věnuje výsledkům jednotlivých metod kontaktování SMD rezistorů na vodivé stuze. Pro každou metodu bylo použito 10 rezistorů s elektrickým odporem 0Ω , (reálně jednotky $m\Omega$). Naměřené hodnoty představují elektrický odpor dvou spojů a rezistoru. Hodnoty byly statisticky zpracovány a jsou uvedeny v tabulkách a ve dvou typech grafů. Nejprve jsou ve spojnicových grafech zobrazeny odpory v jednotlivých fázích cyklu. Tento typ grafu ukazuje, jaký trend vykazuje hodnota elektrického odporu jednotlivého spoje po vyndání z klimatické komory či solné mlhy. Dále prezentuje, zda spoj vydržel po celou dobu testování nebo se přerušil s vodivou stuhou. Druhý typem grafu je tzv. krabicový. V něm ukazuje konec spodní úsečky minimum, konec horní úsečky maximum, spodní hranice krabice představuje 25% percentil a horní hranice 75% percentil. Střední čára reprezentuje medián a kolečko s čarou uvnitř průměr, viz legenda na obr. 5.1. První měření bylo provedeno před zahájením testu. Každé sudé měření proběhlo po 2 hodinovém intervalu v solné mlze a další liché (3., 5., 7. a 9.) po 166 hodinách v klimatické komoře.



Obr. 5.1: Legenda krabicového grafu.

Žádná norma nedefinuje přijatelnou hranici elektrického odporu spoje pro použití na vodivých textiliích. V praxi záleží na konkrétní aplikaci. Pokud vodivou textilií využijete pro vyhřívání, kvalitní spoj s vyšší hodnotou odporu nemá zásadní dopad. Naopak

pokud se takovýto spoj vyskytne mezi citlivým senzorem a vyhodnocovací jednotkou, zavádí chybu, která může mít zásadní vliv např. pro akční člen, jež pracuje na základě hodnoty ze senzoru. Z tohoto důvodu byla stanovena limitní hodnota na 10Ω . Spoje přesahující tuto hodnotou jsou posouzeny jako nevhodné pro použití na vodivých textiliích. Během experimentu tuto hodnotu několik vzorků přesáhlo v řádu desítek Ω , avšak nadále zůstaly v testu pro pozorování jejich vývoje. Některé vzorky byly z experimentu vyjmuty, protože jejich hodnota dosahovala stovek $k\Omega$ nebo jejich elektrický odpor nešlo změřit z důvodu rozpojení spoje.

Dále proběhlo focení jednotlivých vzorků pomocí digitálního fotoaparátu Canon EOS 1100D na mikroskopu Olympus SZX 10 po konci každého měřicího cyklu (po 168 hodinách testování) pro zaznamenání případné změny kolem kontaktních míst a struktury zapouzdřené SMD součástky.

5.1 Výsledky pájecí technologie

Hodnoty elektrického odporu připájených vzorků jsou zobrazeny v tabulce 5.1. Po experimentu následovalo statistické zpracování a vyhodnocení pomocí grafů na obrázcích 5.2 a 5.3. Ze spojnicového grafu, obr. 5.2, je vidět vývoj elektrického odporu pájených vzorků. Na první pohled je patrné, že hodnoty vykazují obdobný trend. V prvním cyklu po solné mlze byl zaznamenán mírný nárůst hodnot, kromě spoje na rezistoru R10, tomu hodnota výrazně klesla. Dále se hodnoty pohybují okolo hranice $20 m\Omega$. Spoj na rezistoru R9 vykázal vysoký nárůst odporu ve 3. cyklu po vyndání ze solné mlhy, ale v dalších měřeních se ustálil. Výsledky ukazují, že medián elektrického odporu pájených vzorků je po celou dobu experimentu v rozsahu od 5 do $30 m\Omega$. S jistotou lze usoudit, že se hodnota elektrického odporu vzorku udržela pod limitní hranicí. Metoda kontaktování pájením dosáhla skvělých výsledků, z toho důvodu je vhodná k vytvoření elektrického spojení s vodivou textilií.

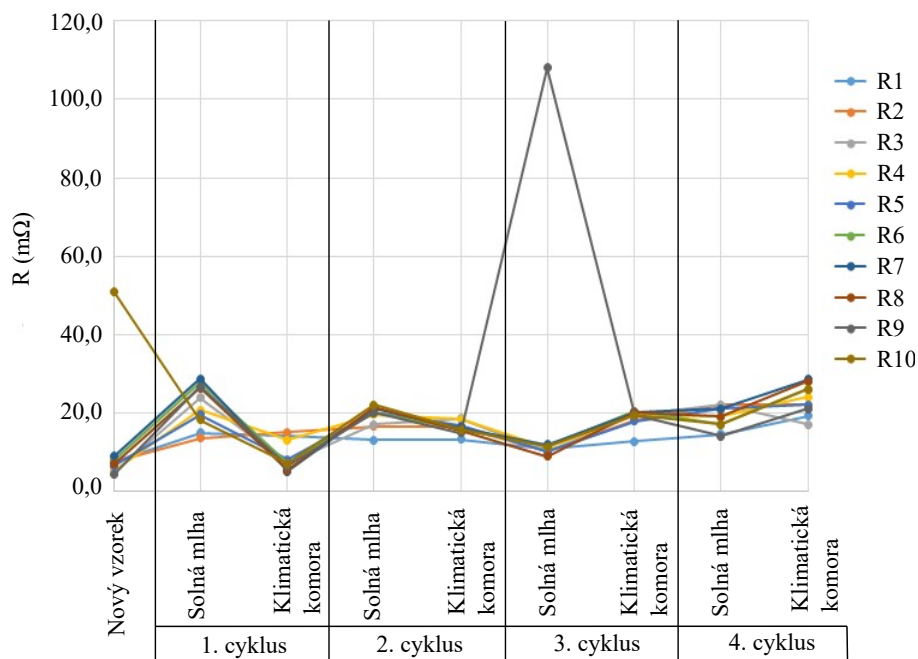
Tab. 5.1: Naměřené hodnoty odporu při použití pájení

Cyklus	Fáze cyklu	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
0.	N. vzorek	7,3	7,5	4,9	5	6,3	7,8	8,9	6,8	4,2	51
1.	S	14,8	13,6	23,8	20,6	19,5	27,8	28,7	26,3	26,6	18,2
	K	14	15	7	13	8	7	5	5,3	6,3	7
2.	S	13	16,5	17	19,5	20	20	21	21,5	20	22
	K	13,2	16,4	18,6	18,3	16,7	15,9	16,2	15,3	14,9	15,7
3.	S	10,7	10,1	10,1	11,1	10,1	11,3	11,9	8,9	108	11,4
	K	12,7	18,2	19,3	19,5	17,9	20,3	20	20,2	19,6	19,3
4.	S	14,6	22	22	19	21	17	21	19	14	17
	K	19,2	22	17	24	22	26	28,5	28	21	26

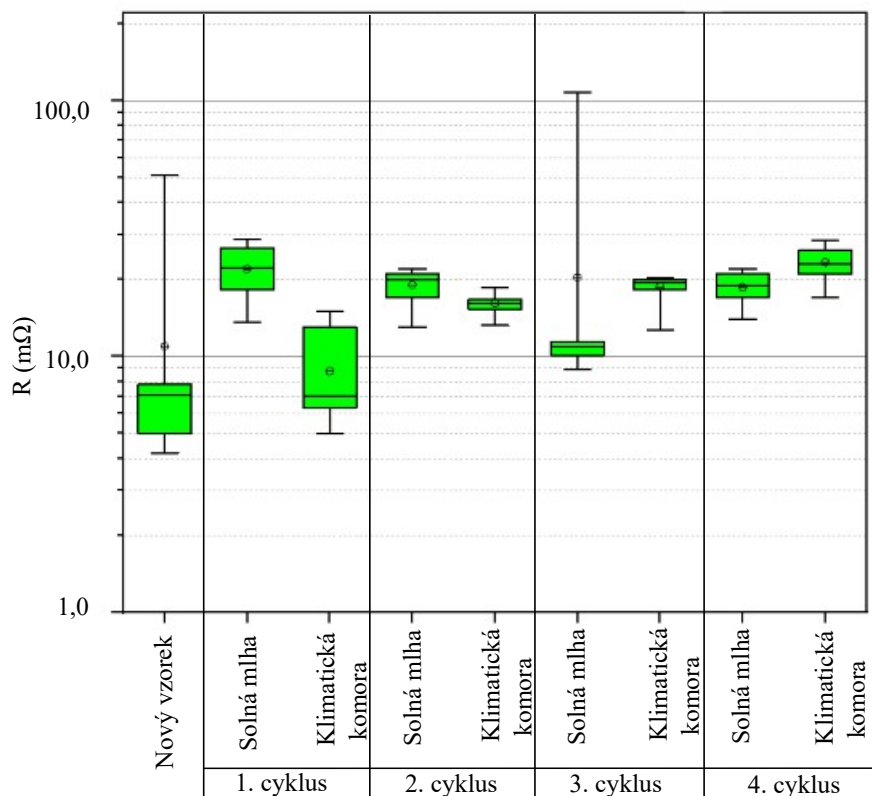
*Jednotlivé hodnoty odporu jsou uvedeny v mΩ.

S = Solná komora

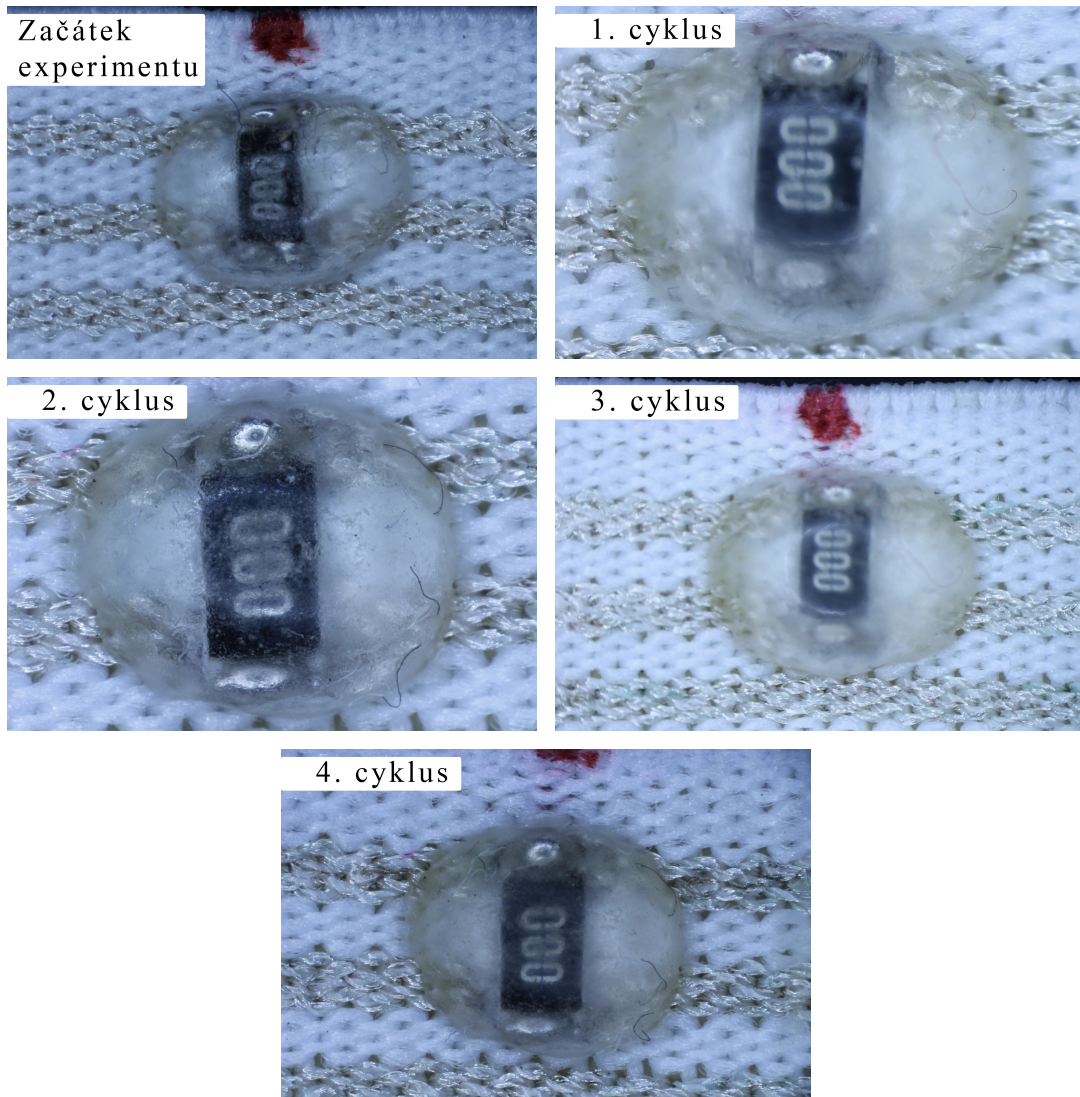
K = Klimatická komora



Obr. 5.2: Vývoj elektrického odporu pájených spojů.



Obr. 5.3: Statistika jednotlivého měření pájeného spoje.



Obr. 5.4: Testovaný rezistor focený po konci každého cyklu testování - pájení.

Na obrázku 5.4 je viditelné, že kontakty testovaného spoje a struktura zapouzdření v průběhu testu nezaznamenaly žádnou změnu.

5.2 Výsledky experimentu metody nevodivého lepení

Pomocí této metody vznikly tři typy vzorků, kde pro každý vzorek bylo použité jiné lepidlo. První vzorek se nakontaktoval pomocí lepidla Loctite AA3926. Druhý a třetí typ lepidel byl od firmy Panacol, Vitralit VBB-1 gel a Vitralit 4732 VT. Pro všechny vzorky byl aplikován stejný postup kontaktování, viz kapitola 3.2. V závěru je nezbytné brát v potaz, že jde pouze o mechanické propojení součástky a vodivé cesty, nevzniká zde metalurgické spojení jako u pájení.

5.2.1 Lepidlo Loctite AA3926

V tabulce 5.2 jsou zobrazeny hodnoty elektrického odporu všech vzorků nakontatovaných pomocí lepidla Loctite AA3926. Po provedeném měření proběhlo statistické zpracování a vyhodnocení výsledků pomocí grafů na obrázcích 5.5 a 5.6.

Ve spojnicovém grafu lze pozorovat jistý trend shodně se vyvíjejícího odporu všech spojů až na rezistory R1 a R4. Spoj R1 vykazuje stabilní hodnotu odporu, která se ve 3. cyklu sníží a následně začne stoupat. Hodnota elektrického odporu spoje R4 vzrůstá po konci 1. cyklu, kromě poklesu ve 4. cyklu po solné mlze. Po prvním a druhém procesu solné mlhy byl zaznamenán mírný nárůst hodnot, naopak po vyndání vzorků z klimatické komory v 1. a 3. cyklu se hodnota některých odporů snížila o 20 až 40 %.

Tab. 5.2: Naměřené hodnoty odporu při použití lepidla Loctite AA3926

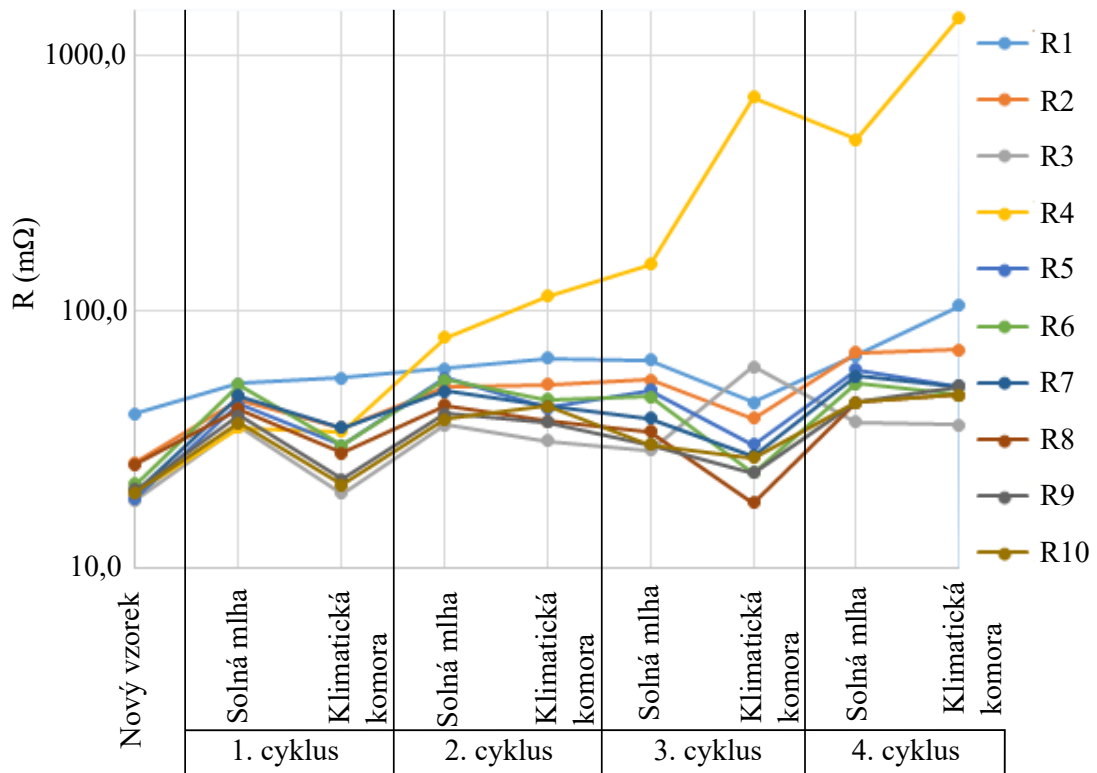
Cyklus	Fáze cyklu	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
0.	N. vzorek	39,8	25,7	18,3	19,6	18,6	21,1	19,8	25,3	20,2	19,6
1.	S	52,3	45,4	35,3	35,1	43,5	51,6	46,6	41,5	39,2	36,5
	K	55	35	19,5	34	30	30	35	28	22	21
2.	S	60	51	36	79	55	54	49	43	40	38
	K	65,3	51,8	31,2	114	41,9	45,2	42,8	37,2	36,9	42,8
3.	S	64,3	54,2	28,7	152	49,1	46,2	38,1	33,9	30,1	30,2
	K	44,2	38,3	61	682	30,2	23,5	27,3	17,9	23,5	26,9
4.	S	67	69	37	470	59	52	56	44	44	44
	K	105	71	36	1400	51	47	51	47	51	47

*Jednotlivé hodnoty odporu jsou uvedeny v $m\Omega$.

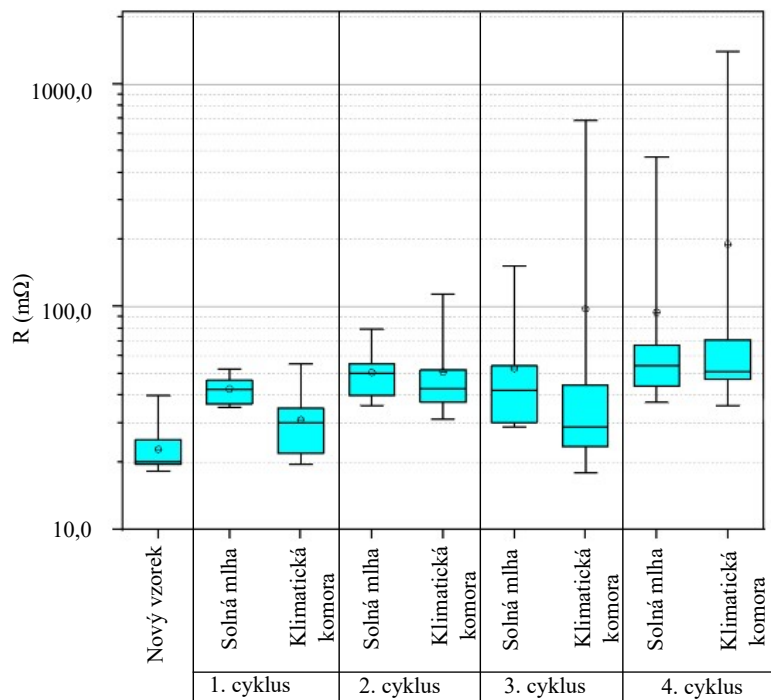
S = Solná komora

K = Klimatická komora

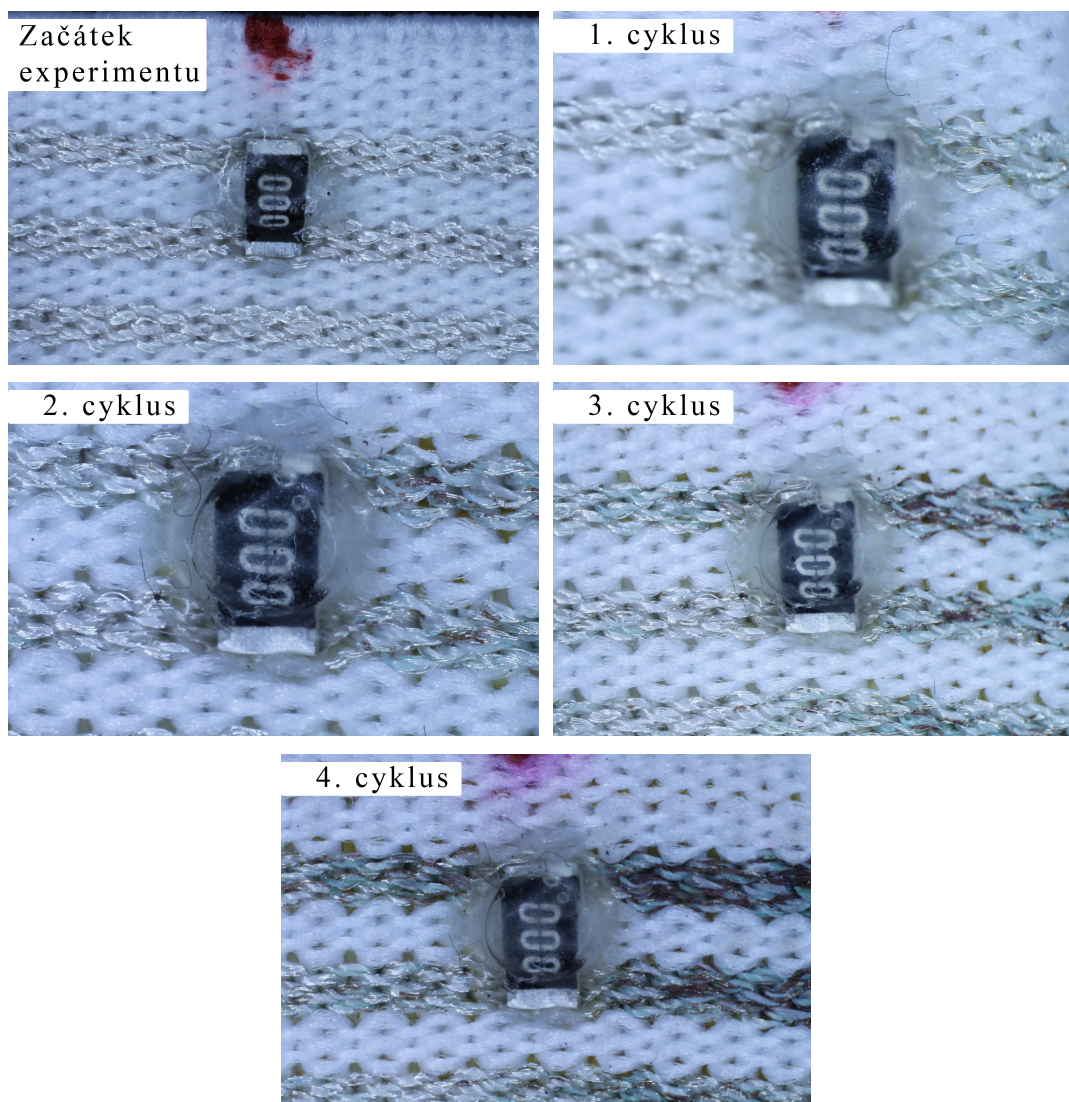
Z výsledků je zřejmé, že elektrický odpor většiny spojů se stabilně pohyboval od 10 do 100 $m\Omega$, což vykazuje mírně vyšší hodnoty než předchozí metoda pájení. Použitím tohoto lepidla lze dosáhnout velice nízkých hodnot elektrického odporu, což značí dobré elektrické spojení a možné použití pro kontaktování elektronických součástí na vodičových textiliích.



Obr. 5.5: Vývoj elektrického odporu spojů nakontaktovaných pomocí lepidla Loctite AA3926.



Obr. 5.6: Statistika jednotlivého měření - lepidlo Loctite AA3926.



Obr. 5.7: Testovaný rezistor focený po konci každého cyklu testování - lepidlo Loctite AA3926.

Na obrázku 5.7 lze vidět, že kontakty testovaného spoje a struktura zapouzdření v průběhu testu nezaznamenaly žádnou změnu. Zato vodivé nitě patrně ztratily svoje posříbření a měď zkorodovala. Elektrický odpor a vizuální stránka vodivé textilie nebyly součástí experimentu, proto se práce touto problematikou nezabývá podrobněji.

5.2.2 Lepidlo Panacol Vitralit VBB-1 gel

Hodnoty elektrického odporu vzorků nakontatovaných pomocí Panacol Vitralit VBB-1 gel jsou zobrazeny v tabulce 5.3. Po experimentu následovalo statistické zpracování a vyhodnocení obdržných výsledků pomocí grafů na obrázcích 5.8 a 5.9.

Z naměřených výsledků zobrazených ve spojnicovém grafu, obr. 5.8, lze vidět, že

elektrický odpor spojů nevykazuje jednotný trend jako v předešlých případech. Po druhém procesu v klimatické komoře dosahovaly spoje na rezistorech R1 a R6 jednotek kΩ elektrického odporu, proto byly z experimentu odebrány. Do začátku 3. cyklu se většina hodnot pohybuje v přijatelné hranici 10 Ω. V dalších měřeních tuto hodnotu překročily nebo došlo k rozpojení spoje a elektrický odpor byl neměřitelný.

Po vizuální stránce, viz obr. 5.10, lze zhodnotit, že použité lepidlo Panacol Vitralit VBB-1 gel má větší viskozitu než u předchozího vzorku lepidlo Loctite AA3926. Po zalpení díry a vytvrzení zůstal na vzorku viditelný výběžek. Na konci experimentu vzorek mírně zežloutl.

Použité lepidlo nevykázalo dostatečnou chemickou odolnost. Test dokončily pouze čtyři vzorky, z toho přijatelnou hranici splnily pouze tři. Tento typ lepidla není považován za vhodný pro kontaktování součástek na vodivé textilie.

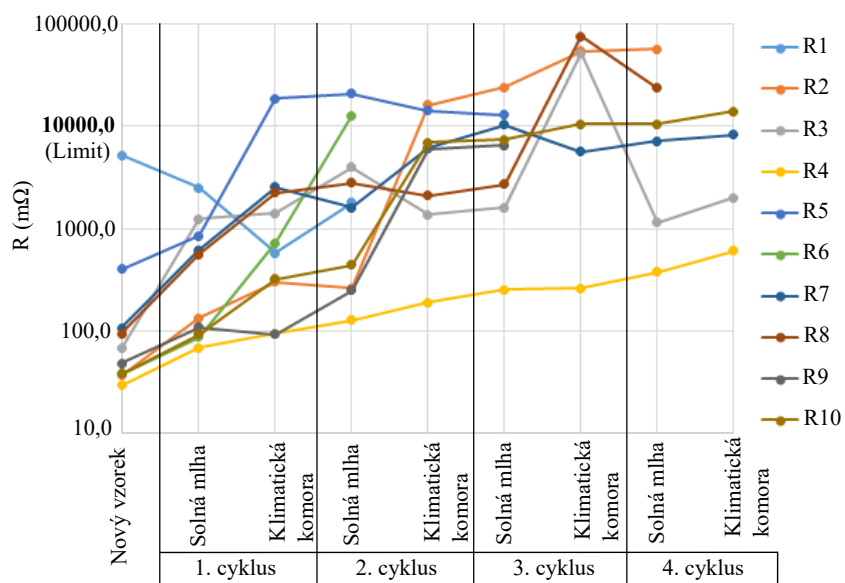
Tab. 5.3: Naměřené hodnoty odporu při použití lepidla Panacol Vitralit VBB-1 gel

Cyklus	Fáze cyklu	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
0.	N. vzorek	5240	36,8	67,1	29,6	402,1	37,9	106,7	95,1	48,7	38,3
1.	S	2490	133,3	1243	68,7	846	86,9	621	557,8	109	93,3
	K	580	300	1420	94	18500	725	2530	2230	93	320
2.	S	1800	260	4000	128	21000	12700	1600	2800	250	440
	K	-	16080	1370	190,3	14120	-	6120	2101	6060	6920
3.	S	-	23900	1600	252	12900	-	10300	2720	6490	7380
	K	-	54000	51400	263	17200	-	5650	75600	-	10490
4.	S	-	56500	1150	380	21400	-	7200	23600	-	10530
	K	-	-	2000	610	-	-	8240	-	-	14000

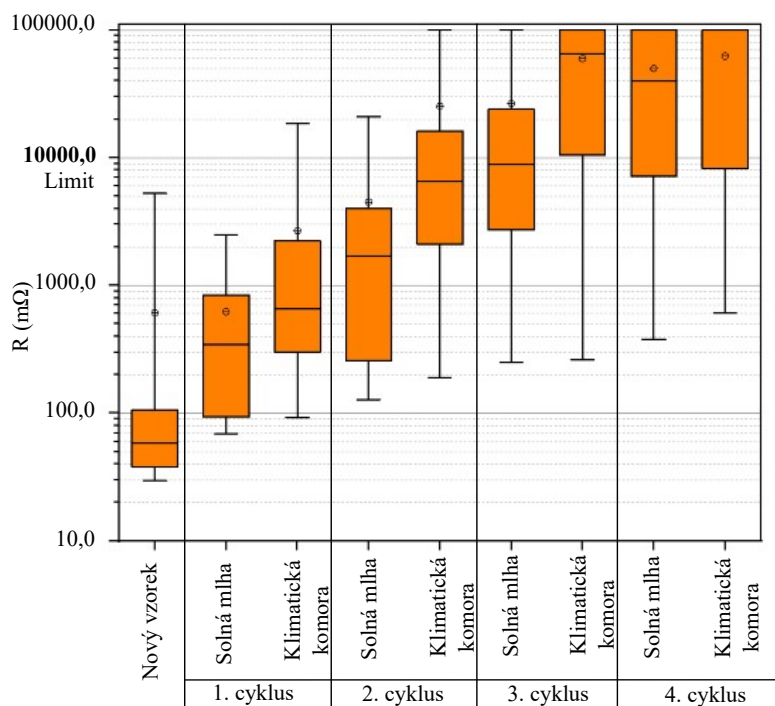
*Jednotlivé hodnoty odporu jsou uvedeny v mΩ

S = Solná komora

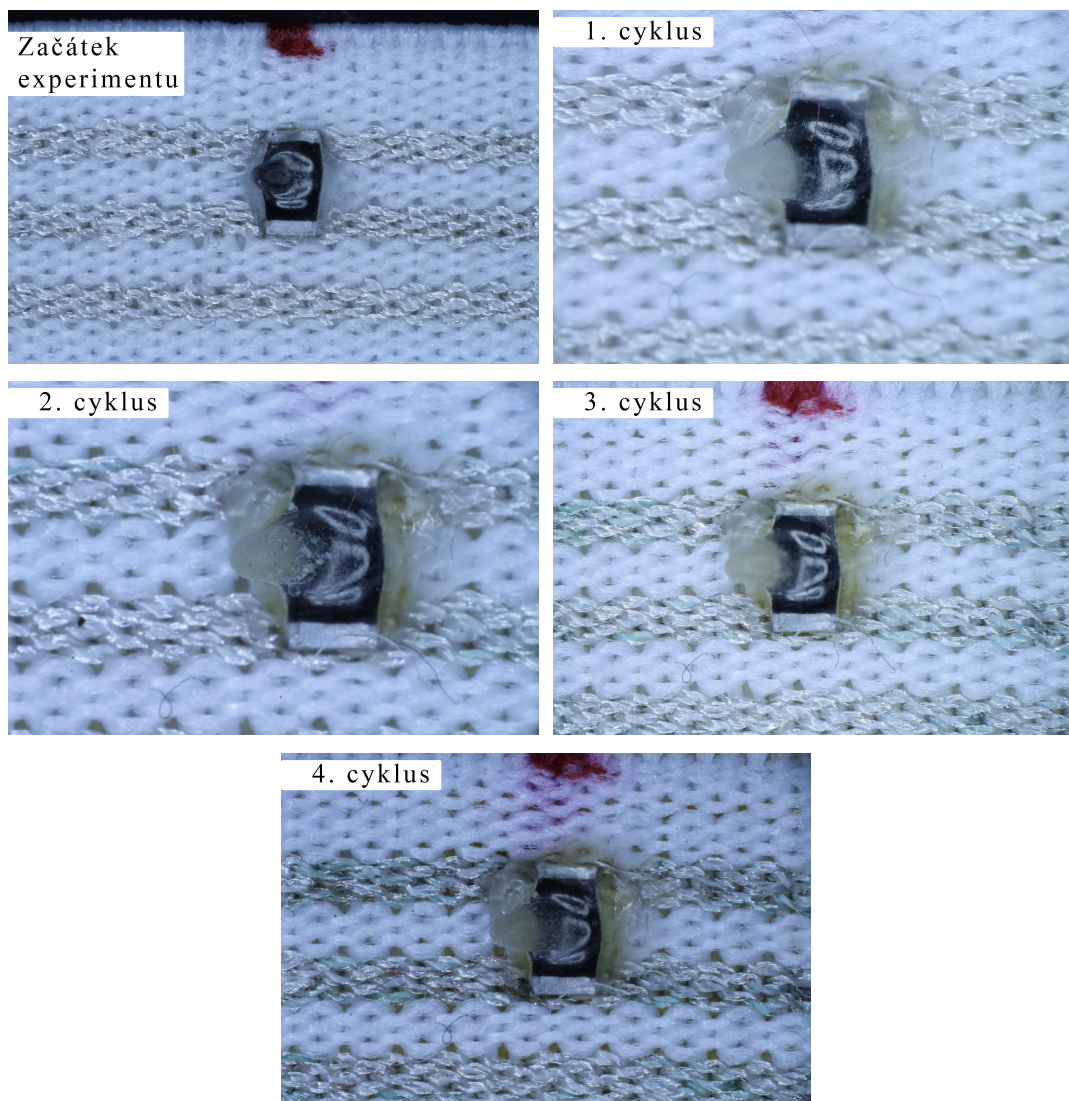
K = Klimatická komora



Obr. 5.8: Vývoj elektrického odporu jednotlivých spojů nakontaktovaných pomocí lepidla Panacol Vitalit VBB-1 gel.



Obr. 5.9: Statistika jednotlivého měření, lepidlo Panacol Vitalit VBB-1 gel.



Obr. 5.10: Testovaný rezistor focený po konci každého cyklu testování - lepidlo Panacol Vitralit VBB-1 gel.

5.2.3 Panacol Vitralit 4732 VT

V tabulce 5.4 jsou zobrazeny hodnoty elektrického odporu vzorků nakontaktovaných pomocí Panacol Vitralit 4732 VT.

Z výsledků experimentu znázorněných na obrázcích 5.11 a 5.12 lze vidět, že u vzorku R1 se nepodařilo vytvořit mechanické spojení mezi vodivou stuhou a vodivými kontakty. Hodnoty elektrického odporu v první cyklu po působení solné mlhy vzrostly a následně vykazují rostoucí trend kromě spoje R4. Po konci působení solné mlhy ve třetím cyklu už dosahuje přijatelnou hranici 10Ω pouze spoj na rezistoru R8, kterou si udržel až do konce experimentu.

Použité lepidlo Panacol Vitralit 4732 VT nevykázalo dostatečnou odolnost proti vy-

branému testu. Pouze jeden vzorek úspěšně dokončil celý test a jeho finální elektrický odpor splnil přijatelnou mez. Tento typ lepidla se nedoporučuje pro kontaktování součástek na vodivé textilie.

Už po prvním týdnu testování lze zpozorovat, viz obrázku 5.13, že v okolí vodičů kontaktů rezistoru dochází k jistému zbarvení. Na konci experimentu je viditelné, že zbarvení zasáhlo i široké okolí. Jsou zde patrné bílé skvrny, které značí poničení ochranné vrstvy rezistoru.

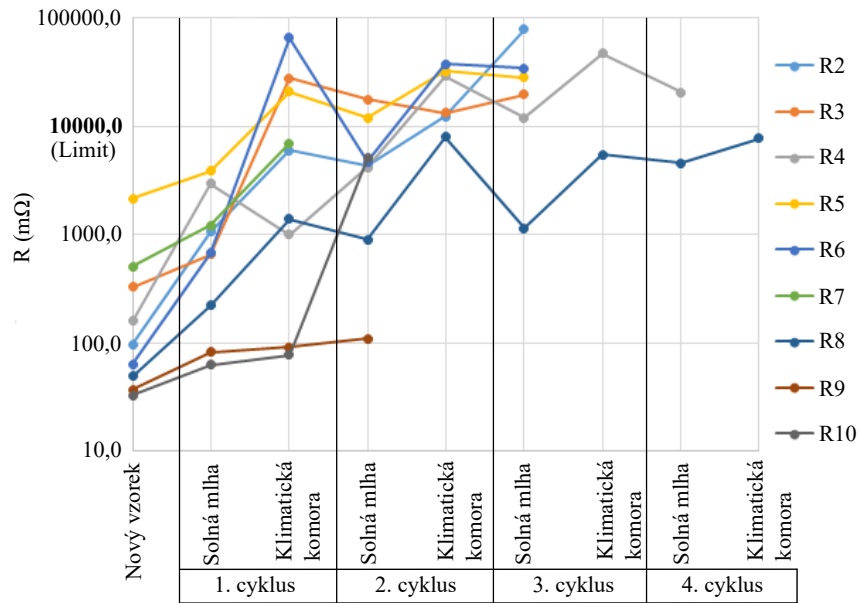
Tab. 5.4: Naměřené hodnoty odporu při použití lepidla Panacol Vitralit 4732 VT

Cyklus	Fáze cyklu	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
0.	N. vzorek	-	97,5	329,7	160,3	2154	63,6	509,1	49,5	36,9	32,9
1.	S	-	1064	655	2945	3862	678	1221	222	82,4	62,3
	K	-	6000	28000	1000	21000	66000	7000	1400	92	78
2.	S	-	4300	17820	4200	12000	4700	-	900	110	5100
	K	-	12370	13400	29320	32420	37678	-	8030	-	-
3.	S	-	78500	19700	11970	28100	34360	-	1152	-	-
	K	-	-	-	47200	-	-	-	5490	-	-
4.	S	-	-	-	20450	-	-	-	4570	-	-
	K	-	-	-	-	-	-	-	7690	-	-

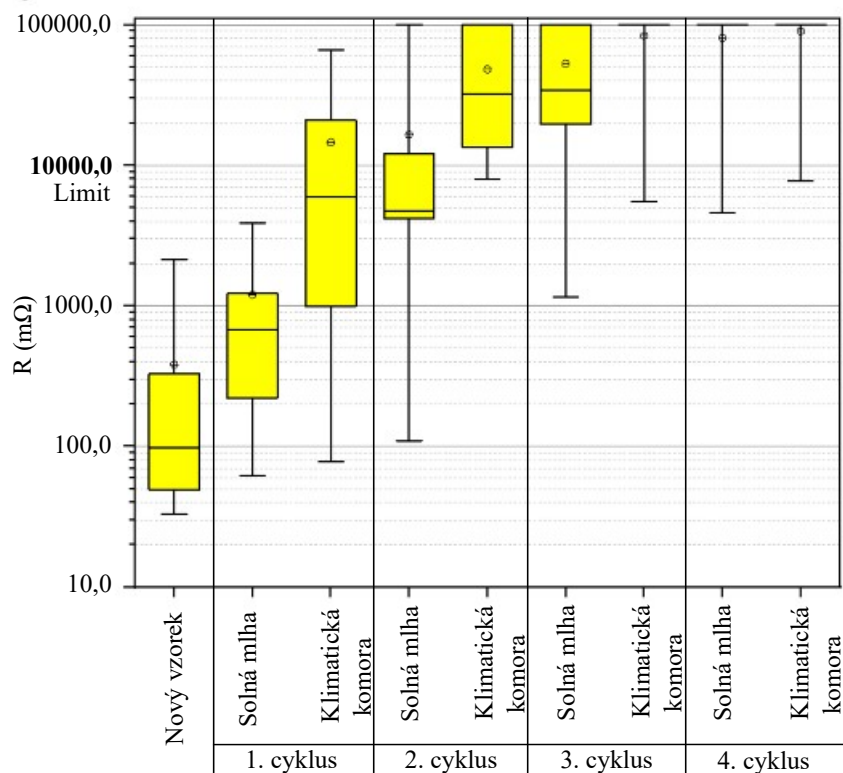
*Jednotlivé hodnoty odporu jsou uvedeny v mΩ.

S = Solná komora

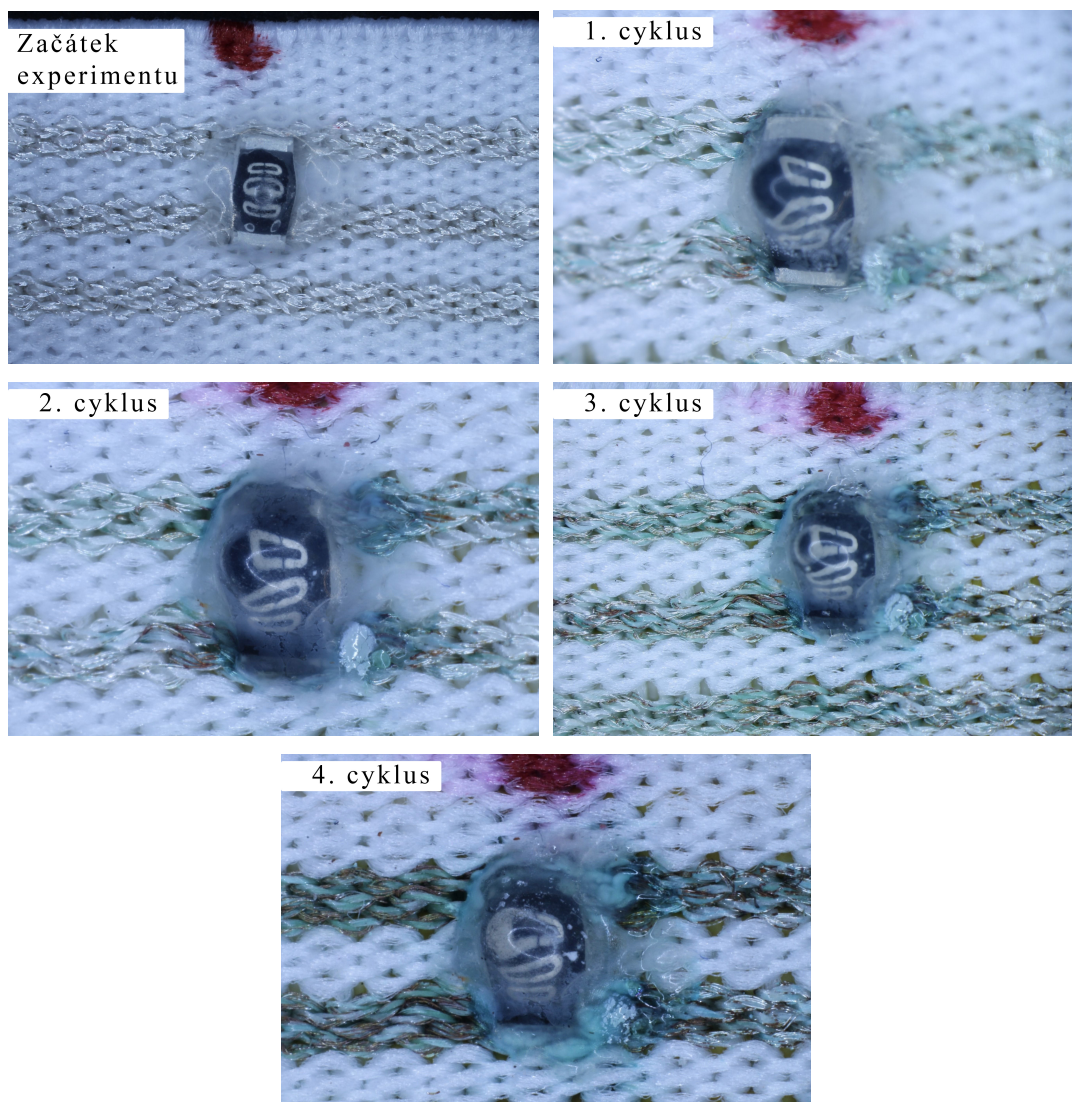
K = Klimatická komora



Obr. 5.11: Vývoj elektrického odporu jednotlivých spojů nakontaktovaných pomocí lepidla Panacol Vitralit 4732 VT.



Obr. 5.12: Statistika jednotlivého měření, lepidlo Panacol Vitralit 4732 VT.



Obr. 5.13: Testovaný rezistor focený po konci každého cyklu testování, lepidlo Panacol Vitralit 4732 VT.

5.3 Výsledky termokopresní technologie

Pro tuto metodu vznikly dva druhy vzorků. V prvním případě se vodivé části rezistoru přímo dotýkají vodivých cest na pružné stuzce. U druhého vzorku byl přidán vodivý filament s měděnými částicemi mezi kontaktními plochy. Pro oba typy platí, že vodivé spojení je pouze mechanické.

5.3.1 Bez vodivého filamentu

Hodnoty elektrického odporu všech vzorků nakontaktovaných bez vodivého filamentu jsou zobrazeny v tabulce 5.5.

Na první pohled jsou hodnoty elektrického odporu spojů velice nízké, to je zřejmé z obr. 5.14 a 5.15. Spoje na rezistorech R4 a R5 se zvyšují s téměř každým měřením. Ostatní nabývají hodnot elektrického odporu v rozsahu od 25 do 50 mΩ. Test dokončilo 8 vzorků z 10, kdy se při posledním měření nepodařilo zaznamenat elektrický odpor na R1 a R8 z důvodu rozpojení kontaktu.

Ostatní spoje vykazují velice nízké hodnoty elektrického odporu. Všechny splnily předem stanovený limit 10 Ω se značnou rezervou, medián jednotlivých měření nepřesáhl 50 mΩ. Tato metoda je vhodná pro kontaktování SMD součástek na vodivé textilie.

Dle obrázku 5.16 se v přímém okolí rezistoru vizuálně nic nemění. Na rozhraní zapouzdření a vodivé cesty si lze všimnout hnědých skvrn a korozi.

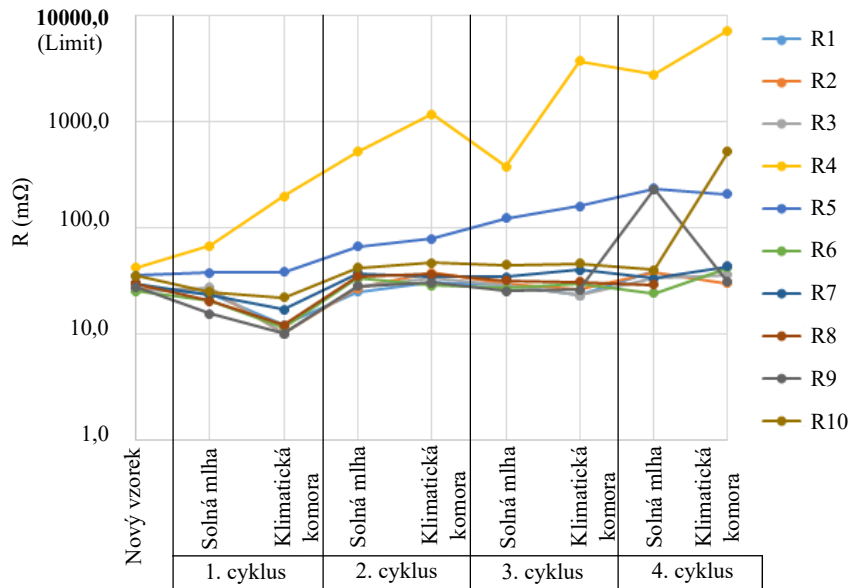
Tab. 5.5: Naměřené hodnoty odporu při použití termokomprese bez měděné vložky

Cyklus	Fáze cyklu	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
0.	N. vzorek	26,8	26,4	25,7	42	35,5	25,3	30	29,7	27,6	35,3
1.	S	23,7	25,8	27,3	67	37,5	20,6	23,3	20,3	15,4	24,8
	K	12	10	10	197	38	11,5	17	12	10	22
2.	S	25	27	28	520	66	33	37	35	28	42
	K	30,1	37,8	33,2	1165	78,1	28,6	34,8	36,7	30,4	46,5
3.	S	28,3	29,5	29	374	122	26,9	34,3	31,5	25,1	44,7
	K	23	26	23	3700	160	30	40	31	26	46
4.	S	39	38	33	2780	234	24	33	29	230	40
	K	-	30	36	7150	206	42	43	-	31	520

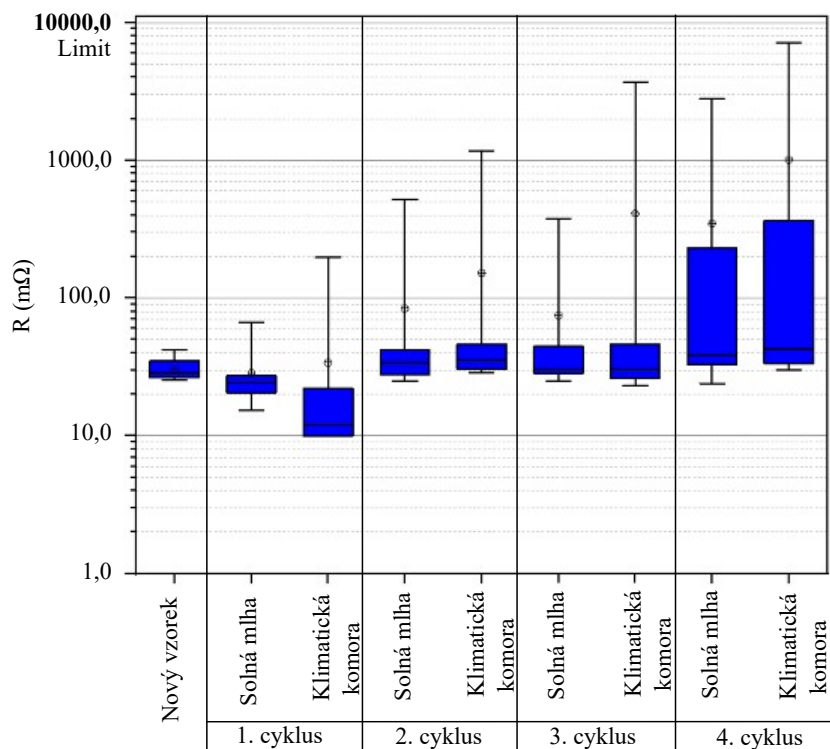
*Jednotlivé hodnoty odporu jsou uvedeny v mΩ.

S = Solná komora

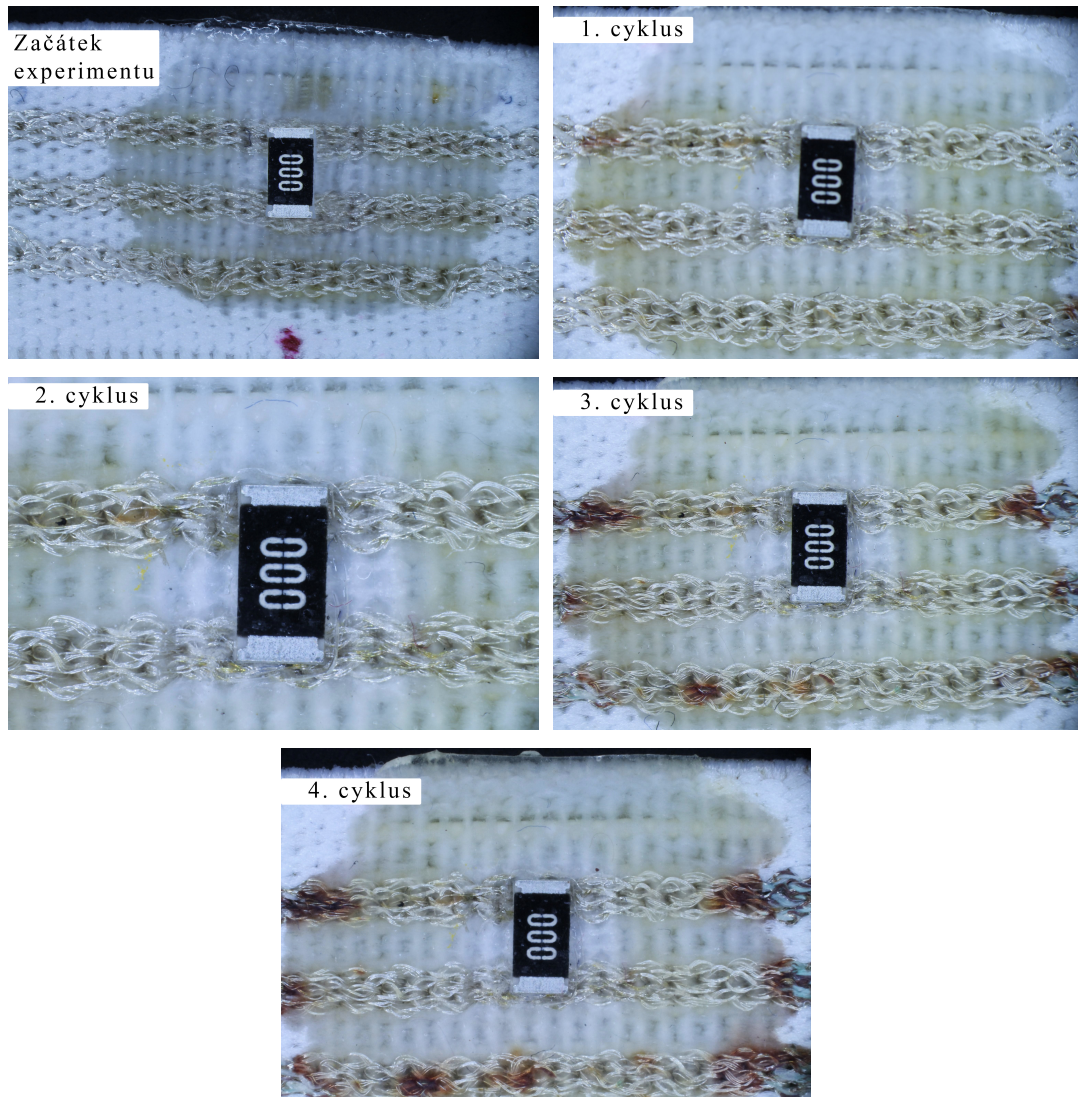
K = Klimatická komora



Obr. 5.14: Vývoj elektrického odporu jednotlivých spojů nakontaktovaných pomocí termokomprese.



Obr. 5.15: Statistika jednotlivého měření, termokomprese.



Obr. 5.16: Testovaný rezistor focený po konci každého cyklu testování, termokomprese.

5.3.2 S vodivým filamentem

V tabulce 5.6 jsou zobrazeny hodnoty elektrického odporu všech vzorků nakontaktovaných termokompresí s vodivým filamentem obsahující měděné částice. Po provedeném měření následovalo statistické zpracování a vyhodnocení výsledků pomocí grafů na obrázcích 5.17 a 5.18.

Na první pohled je patrné, že test dokončily všechny vzorky s velice nízkými hodnotami. Po prvním cyklu v solné mlze polovina hodnot elektrického odporu vzrostla skokově o několik set $m\Omega$, ale v dalších cyklech jejich hodnota klesla a držela se kolem $40 m\Omega$. Jediný spoj na rezistoru R1 zaznamenal rapidní výkyv hodnoty v posledním měření na $3100 m\Omega$.

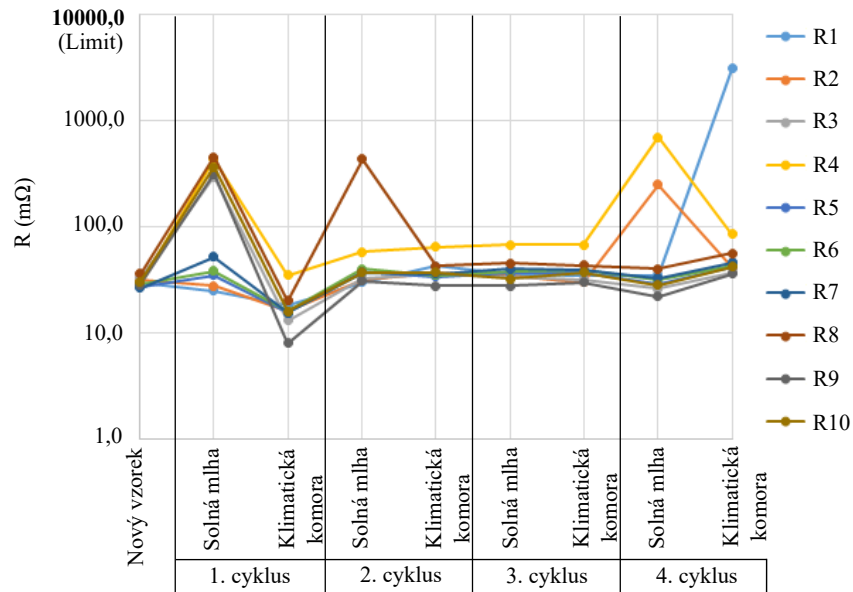
Z výsledků termokomprese s vodivým filamentem je patrné, že elektrický odpor měl výkyv pouze po druhém měření. Poté se hodnoty ustálily a mediány jednotlivých měření se pohybovaly kolem 40 mΩ. Z toho je možné usoudit, že tato metoda je také vhodná pro kontaktování SMD součástek na vodivé textilie.

Po vizuální stránce lze, dle obrázku 5.19, zhodnotit, že v okolí rezistoru došlo k mírnému zabarvení vodivých nití do zlatavé barvy. V širším okolí jsou zřejmé stejné hnědé skvrny na rozhraní zapouzdření a vodivé stuhý jako v kapitole 5.3.1.

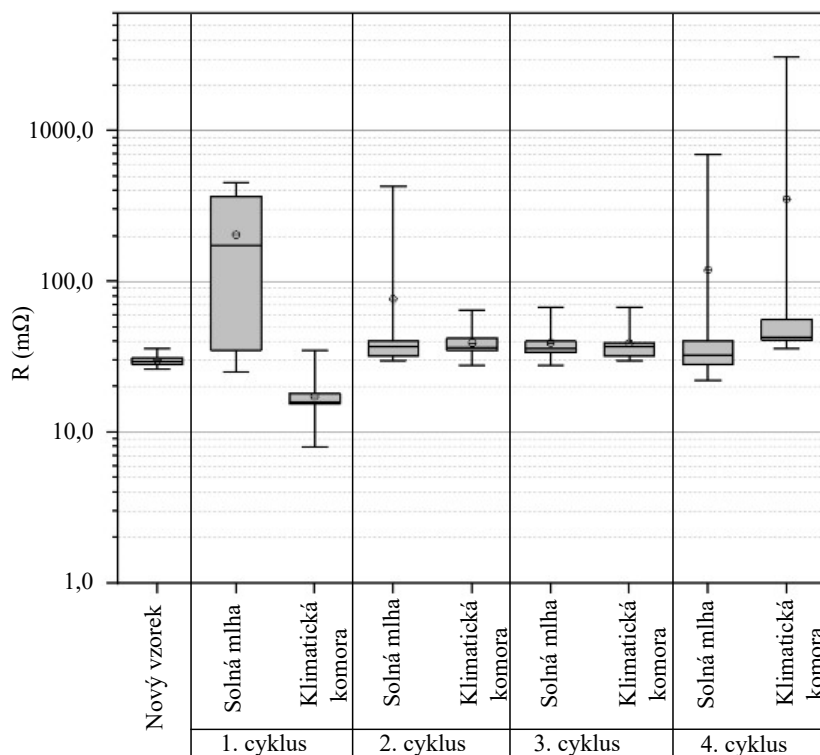
Tab. 5.6: Naměřené hodnoty odporu při použití termokomprese s vodivým filamentem

Cyklus	Fáze cyklu	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
0.	N. vzorek	30	31,2	33	29	27,4	28,4	26,3	36	28,5	30,2
1.	S	25	27,8	296	434	35,1	38,3	52	453	315	368
	K	18	16	13	35	15,5	16	15,5	20	8	16
2.	S	30	32	33	58	38	40	37	430	31	37
	K	42,4	36,6	35,3	64,6	33,8	34,8	36,2	42,7	27,8	37,3
3.	S	35,4	34,3	33,8	67,8	36,6	38,3	40	45,5	27,7	32,1
	K	35	30	32	68	37	39	39	43	30	37
4.	S	35	250	26	700	29	32	33	40	22	28
	K	3100	41	37	85	42	43	46	56	36	42

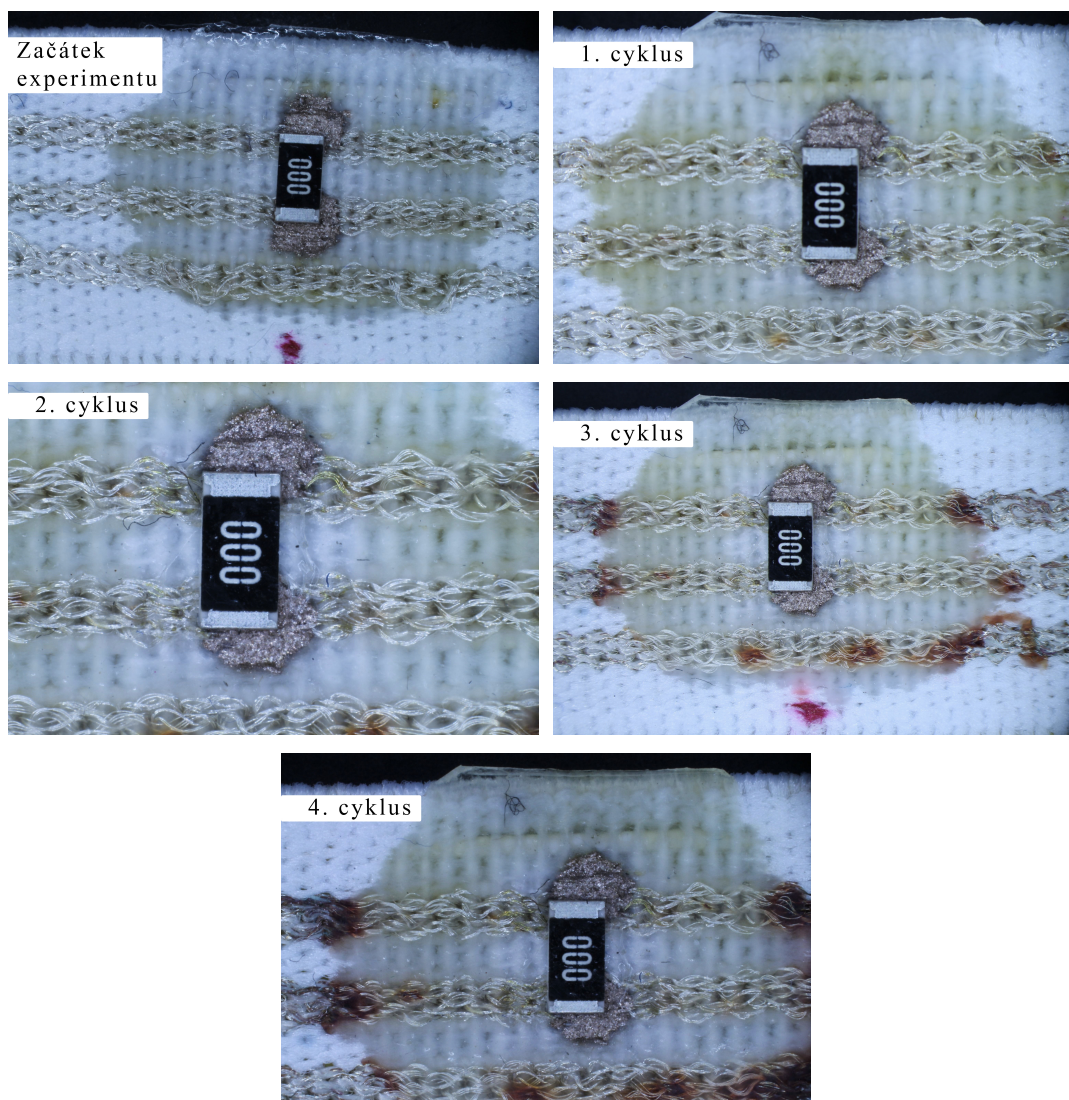
*Jednotlivé hodnoty odporu jsou uvedeny v mΩ.
 S - Solná komora
 K - Klimatická komora



Obr. 5.17: Vývoj elektrického odporu jednotlivých spojů nakontakovaných pomocí termokomprese s vodivým filamentem.



Obr. 5.18: Statistika jednotlivého měření, termokomprese s vodivým filamentem.



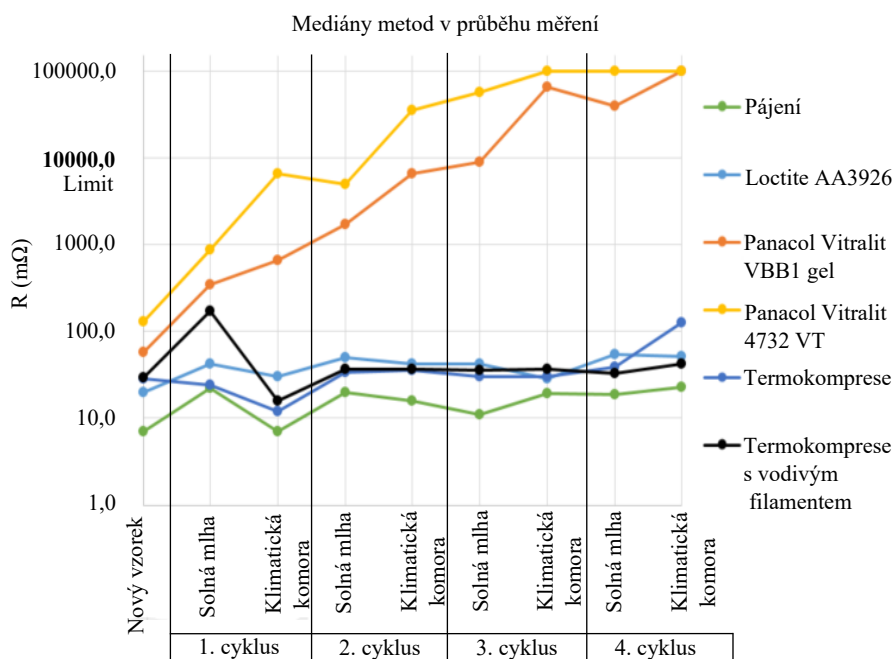
Obr. 5.19: Testovaný rezistor focený po konci každého cyklu testování, termokomprese s vodivým filamentem.

5.4 Srovnání metod

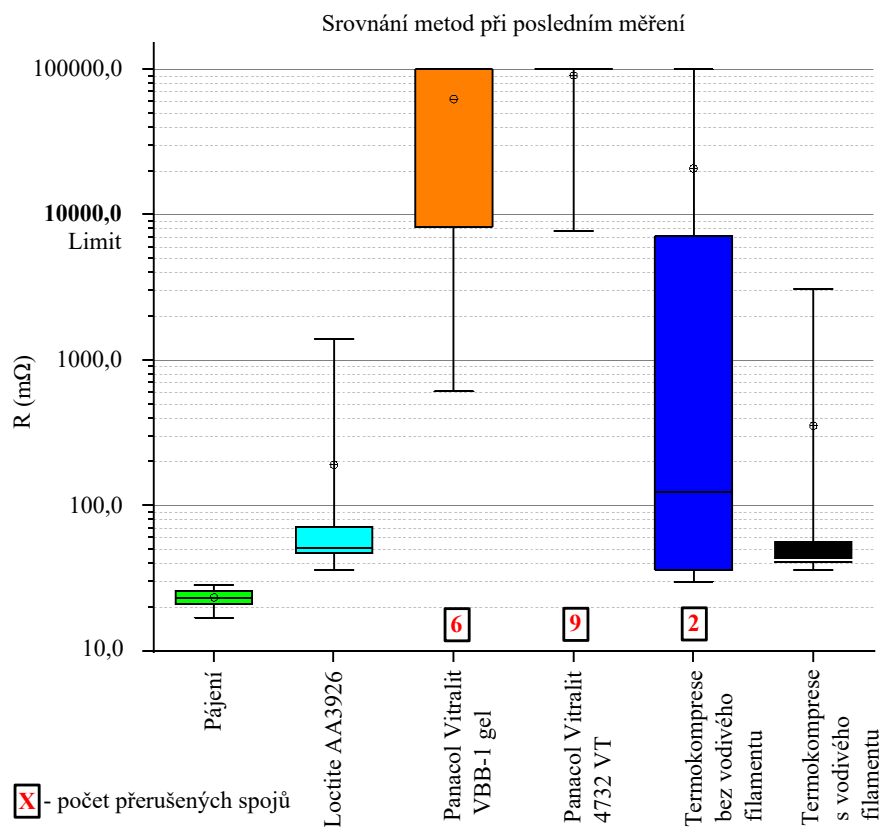
Všechny použité metody jsou porovnány na obrázcích 5.20 a 5.21, výsledky jsou zobrazeny pomocí spojnicového a krabicového grafu. Metody jsou mezi sebou porovnány dle mediánu z jednotlivých měření, neboť střední hodnota je více vypovídající než průměr.

Spojnicový graf s jistotou určuje, že čtyři experimenty na konci měření splnily stanovený limit 10Ω . Kromě termokomprese bez vodivého filamentu zaznamenaly všechny metody zvýšení elektrického odporu po prvních 2 hodinách v solné mlze. Pro přesnější zobrazení byly přerušené spoje nahrazeny hodnotou $100\,000 \text{ m}\Omega$. Jedná se o spoje v metodách nevodivého lepení a termokomprese bez vodivého filamentu.

Z grafů lze vyčíst, že nejlépe dopadla metoda pájení. Metody kontaktování nevodivým lepením pomocí lepidla Loctite AA3926 a termokompresí s vodivým filamentem docílily v průběhu celého experimentu vyšších hodnot elektrického odporu v řádu desítek mΩ, avšak se stále jedná o velice nízké hodnoty. Technologie termokompres bez vodivého filamentu se po celou dobu držela stejných hodnot okolo 35 mΩ, ale ke konci došlo ke zničení dvou spojů. Oproti tomu nevodivá lepidla od firmy Panacol Vitralit VBB-1 gel a Vitralit 4732 VT mají rostoucí hodnoty téměř po každém měření. Po konci prvního cyklu rostoucí trend naznačoval nevhodnost těchto lepidel. Tato hypotéza se na konci experimentu potvrdila. U lepidla Panacol Vitralit VBB-1 gel pouze čtyři spoje vydržely do konce experimentu, u druhého lepidla to byl pouze jeden spoj. Experiment prokazuje nevhodnost těchto lepidel pro kontaktování na chytrých textiliích.



Obr. 5.20: Porovnání metod dle jejich mediánu.



Obr. 5.21: Porovnání jednotlivých metod dle posledního měření.

Zhodnocení a závěr

Tato práce nejprve pojednává o elektricky vodivých textiliích, jejich elektrickém odporu a možných materiálech používaných pro výrobu. Dále zde byly shrnuty pevné a odnímatelné metody pro vytvoření elektricky vodivého spoje na vodivých textiliích.

Druhá, experimentální část se věnuje vodivé stuze, výrobě vodivých spojů pomocí pájení, nevodivého lepení a termokomprese a testování jejich spolehlivosti.

V poslední části jsou popsány výsledky jednotlivých vzorků, jejich porovnání a vhodnost jednotlivých metod pro kontaktování na vodivých textiliích.

Nejlépších výsledků bylo dosaženo metodou pájení, kdy metalurgický spoj dosáhl nejnižší hodnoty elektrického odporu. Nevýhody technologie pájení spočívají v komplikované automatizaci procesu a vysoké výrobní teplotě (180 °C), jež má za následek smršťování textilie, tudíž snížení flexibility. Nevodivé lepení pomocí lepidla Loctite AA3926 získalo taktéž velice dobré výsledky, pouze o desítky mΩ horší než pájení. Tato metoda je vhodná pro její nízkou výrobní teplotu a jednoduchý pracovní postup. Obdobných hodnot elektrického odporu bylo dosaženo metodou termokomprese s vodivým filamentem. Hlavní výhody této technologie spočívají v hromadném kontaktování součástek na textiliích a přestože dosahuje podobné pracovní teploty (175 °C) jako pájení, tak nedeformuje textiliích, tudíž nezhoršuje její flexibilitu. O něco horších výsledků dosáhla metoda termokomprese bez vodivého filamentu. Všechny výše zmíněné vzorky testované normou ČSN EN 60068-2-52 splnily stanovený limit 10 Ω.

Kontaktování pomocí nevodivých lepidel od firmy Panacol se ukázalo jako nevhodné z důvodu překročení stanoveného limitu odporu 10 Ω. Již na začátku experimentu bylo touto metodou dosaženo vyšších hodnot elektrického odporu než u ostatních vzorků. V jeho průběhu se však ukázalo, že spoj není dostatečně pevný k odolání chemického namáhání, a tím elektrický odpor vzorků stoupal.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] A. A. Simegnaw, B. Malengier, G. Rotich, M. G. Tadesse, and L. Van Langenhove, "Review on the integration of microelectronics for e-textile," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 17, Sep. 2021.
- [2] T. Linz et al., "Embroidered interconnections and encapsulation for electronics in textiles for wearable electronics applications," *CIMTEC 2008 - Proc. 3rd Int. Conf. Smart Mater. Struct. Syst. - Smart Text.*, vol. 60, pp. 85–94, 2008.
- [3] D. Canan Çelikel, "Smart E-Textile Materials," *Advanced Functional Materials*, 26-Nov-2020. [Online]. Available: www.intechopen.com. [Accessed: 08-Apr-2021].
- [4] "View of Investigating Properties of Electrically Conductive Textiles: A Review." [Online]. Available: <https://journals.uni-lj.si/tekstilec/article/view/11917/10611>. [Accessed: 04-Aug-2023]. *Tekstilec*, 2022, Vol. 65(3), 194–217 | DOI: 10.14502/tekstilec.65.2022045
- [5] A. Komolafe et al., "E-Textile Technology Review–From Materials to Application," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 97152-97179, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3094303.
- [6] C. Gonçalves, A. Ferreira da Silva, J. Gomes, and R. Simoes, "Wearable E-Textile Technologies: A Review on Sensors, Actuators and Control Elements," *Inventions*, vol. 3, no. 1, p. 14, Mar. 2018, doi: 10.3390/inventions3010014.
- [7] Le K, Narayana H, Servati A, et al. Electronic textiles for electrocardiogram monitoring: A review on the structure–property and performance evaluation from fiber to fabric. *Textile Research Journal*. 2023;93(3-4):878-910. doi:10.1177/00405175221108208
- [8] C. I. Idumah, "Design, fabrication, characterization and properties of metallic and conductive smart polymeric textiles for multifunctional applications," *Nano-Structures & Nano-Objects*, vol. 35, p. 100982, Jul. 2023.

- [9] Repon MR, Mikučionienė D. Progress in Flexible Electronic Textile for Heating Application: A Critical Review. *Materials (Basel)*. 2021 Oct 30;14(21):6540. doi: 10.3390/ma14216540. PMID: 34772066; PMCID: PMC8585370.
- [10] M. Tokarska, "Characterization of electro-conductive textile materials by its biaxial anisotropy coefficient and resistivity," *J. Mater. Sci. Mater.* pp. 185–198, DOI 10.1007/978-3-319-50124-6
- [11] "ESD | difference from anti-static | measures | uvex safety." [Online]. Available: <https://www.uvex-safety.com/blog/electrostatic-discharge/#antistatik-bekleidung>. [Accessed: 02-Aug-2023].
- [12] "Anti-static or ESD?" [Online]. Available: <https://eu.tencatefabrics.com/blog/anti-static-or-esd>. [Accessed: 02-Aug-2023].
- [13] T. Blachowicz, D. Wójcik, M. Surma, M. Magnuski, G. Ehrmann, and A. Ehrmann, "Textile Fabrics as Electromagnetic Shielding Materials—A Review of Preparation and Performance," *Fibers*, vol. 11, no. 3, p. 29, Mar. 2023, doi: 10.3390/fib11030029.
- [14] S. Coyle, D. Morris, K. -T. Lau, D. Diamond and N. Moyna, "Textile-Based Wearable Sensors for Assisting Sports Performance," 2009 Sixth International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, Berkeley, CA, USA, 2009, pp. 307-311, doi: 10.1109/BSN.2009.57.
- [15] Z. Zhou et al., "Textile-Based Mechanical Sensors: A Review," *Materials*, vol. 14, no. 20, p. 6073, Oct. 2021, doi: 10.3390/ma14206073.
- [16] M. Syduzzaman, S. Patwary, K. Farhana, and S. Ahmed, "Smart Textiles and Nano-Technology: A General Overview Analysis of structural parameters of woven fabrics View project Determination of the number of fibres in yarn cross-section from microscopic image using image processing processing software (ImageJ) View project *Textile Science & Engineering*," *J Text. Sci Eng*, vol. 5, p. 1, 2015.
- [17] A. Komolafe et al., "E-Textile Technology Review-From Materials to Application," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 97152–97179, 2021.

- [18] S. Takamatsu, T. Lonjaret, D. Crisp, J. M. Badier, G. G. Malliaras, and E. Ismailova, "Direct patterning of organic conductors on knitted textiles for long-term electrocardiography," *Sci. Reports* 2015 51, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, Oct. 2015.
- [19] A. M. Grancaric´1 et al., "Conductive polymers for smart textile applications," vol. 48, no. 3, pp. 612–642, 2018.
- [20] A. A. Simegnaw, B. Malengier, G. Rotich, M. G. Tadesse, and L. Van Langenhove, "Review on the integration of microelectronics for e-textile," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 17, pp. 1–26, 2021.
- [21] I. Jones and A. Patil, *Laser seaming of fabrics*. 2013. DOI: 10.1533/9780857093967.3.398 pp. 492-504
- [22] "Základní informace k problematice RoHS | MPO." [Online]. Available: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/rohs-elektrozarizeni/zakladni-informace-k-problematice-rohs--158558/>. [Accessed: 21-Jul-2023].
- [23] J. Stanley, J. A. Hunt, P. Kunovski, and Y. Wei, "A review of connectors and joining technologies for electronic textiles," *Eng. Reports*, vol. 4, no. 6, p. e12491, Jun. 2022.
- [24] T. Kirstein, *Multidisciplinary know-how for smart-textiles developers*. 2013.
- [25] "Selecting Conductive Fillers for Adhesives & Sealants." [Online]. Available: <https://adhesives.specialchem.com/selection-guide/conductive-fillers-adhesives-sealants>. [Accessed: 19-Jul-2023].
- [26] C. Dils et al., "Interconnecting embroidered hybrid conductive yarns by ultrasonic plastic welding for e-textiles," *Text. Res. J.*, vol. 92, no. 21–22, pp. 4501–4520, Nov. 2022.
- [27] M. Hirman, J. Navratil, M. Radouchova, J. Stulik, and R. Soukup, "Influence of Sweat on Joint and Sensor Reliability of E-Textiles," *Energies* 2022, Vol. 15, Page 506, vol. 15, no. 2, p. 506, Jan. 2022.

- [28] Y. Li and C. P. Wong, "Recent advances of conductive adhesives as a lead-free alternative in electronic packaging: Materials, processing, reliability and applications," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 51, no. 1–3, pp. 1–35, Jan. 2006.
- [29] M. Hirman, J. Navratil, F. Steiner, and A. Hamacek, "Higher Temperature Washing of Electrically Connected SMD Components onto the Textile Ribbons," *Proc. Int. Spring Semin. Electron. Technol.*, vol. 2022-May, 2022.
- [30] H. Clauberg, A. Rezvani, V. Venkatesan, G. Frick, B. Chylak, and T. Strothmann, "Chip-To-Chip and Chip-To-Wafer Thermocompression Flip Chip Bonding," *Proc. - Electron. Components Technol. Conf.*, vol. 2016-August, pp. 600–605, Aug. 2016.
- [31] D. Kalas, S. Suchy, J. Kalcik, J. Reboun, R. Soukup, and A. Hamacek, "Contacting of SMD Components on the Textile Substrates," *Proc. Int. Spring Semin. Electron. Technol.*, vol. 2020-May, May 2020.
- [32] M. Hirman, K. Hamernik, D. Kalas, J. Navratil, D. Moravcova, and F. Steiner, "Real-Life Functional Tests of Conductive Joints of SMD Components on E-Textiles," *2022 IEEE 9th Electron. Syst. Technol. Conf. ESTC 2022 - Proc.*, pp. 223–227, 2022.
- [33] D. Kalas, J. Kalcik, J. Reboun, R. Soukup, and A. Hamacek, "Stretch Testing of SMD Resistors Contacted by a Novel Thermo-compression Method on a Textile Ribbon," *Proc. Int. Spring Semin. Electron. Technol.*, vol. 2021-May, May 2021.
- [34] M. P. Fel and Č. Praha, "Modifikovaná elektricky vodivá lepidla," 2009.
- [35] I. Mir and D. Kumar, "Recent advances in isotropic conductive adhesives for electronics packaging applications," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 28, no. 7, pp. 362–371, Oct. 2008.
- [36] R. Al-Haidari et al., "Evaluation of an Anisotropic Conductive Epoxy for Interconnecting Highly Stretchable Conductors to Various Surfaces," *Proc. - Electron. Components Technol. Conf.*, vol. 2022-May, pp. 1422–1429, 2022.
- [37] HAMERNÍK, Karel. Funkční testy vodivých spojů SMD součástek na chytrých textiliích. Plzeň, 2022. Diplomová práce. ZČU.

- [38] “Novel Joining Methods for Textiles and Smart Garments - TWI.” [Online]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/novel-joining-methods-applicable-to-textiles-and-smart-garments-september-2005>. [Accessed: 12-Apr-2021].
- [39] S. Suchy, K. Rostas, and R. Soukup, “Encapsulation Methods for Resistance-Welded Contacts in Smart Textiles,” Proc. Int. Spring Semin. Electron. Technol., vol. 2022-May, 2022.
- [40] A. Dhawan, A. M. Seyam, T. K. Ghosh, and J. F. Muth, “Woven Fabric-Based Electrical Circuits: Part I: Evaluating Interconnect Methods,” Text. Res. J., vol. 74, no. 10, pp. 913–919, 2004.
- [41] F. K. Ko, “Seaming and joining methods,” Geotext. Geomembranes, vol. 6, no. 1–3, pp. 93–107, Jan. 1987.
- [42] “Svařování plastů laserem.” [Online]. Available: <https://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:41674/svarovani-plastu-laserem>. [Accessed: 04-Apr-2023].
- [43] T. Linz, C. Kallmayer, R. Aschenbrenner, and H. Reichl, “Embroidering electrical interconnects with conductive yarn for the integration of flexible electronic modules into fabric,” Proc. - Int. Symp. Wearable Comput. ISWC, vol. 2005, pp. 86–89, 2005.
- [44] T. Linz, Analysis of Failure Mechanisms of Machine Embroidered Electrical Contacts and Solutions for Improved Reliability Analyse van faalmechanismen van machinaal geborduurde elektrische contacten en oplossingen voor een betere betrouwbaarheid Torsten Linz. 2011.
- [45] S. Schneegass and O. Amft, “Human-Computer Interaction Series, Smart Textiles Fundamentals, Design, and Interaction.”
- [46] “Hook & Loop Fastener | Less EMF.” [Online]. Available: <https://lessemf.com/product/hook-loop-fastener/>. [Accessed: 10-Aug-2023].
- [47] F. S. Bagci, R. Angsetya, S. Logi and K. A. Kim, "Flexible PCB Connection Methods for Wearable Energy Harvesting Applications," 2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, USA, 2023, pp. 1881-1887, doi: 10.1109/APEC43580.2023.10131451.

- [48] “Apple MagSafe: malá revoluce, která z budoucích iPhonů odstraní poslední fyzický port – SMARTmania.cz.” [Online]. Available: <https://smartmania.cz/apple-magsafe-mala-revoluce-ktera-z-budoucich-iphonu-odstrani-posledni-fyzicky-port/>. [Accessed: 11-Aug-2023].
- [49] K. Scheulen, A. Schwarz, and S. Jockenhoevel, “Reversible contacting of smart textiles with adhesive bonded magnets,” ISWC 2013 - Proc. 2013 ACM Int. Symp. Wearable Comput., pp. 131–132, 2013. <https://doi.org/10.1145/2493988.2494338>
- [50] “Loctite AA 3926 - 25 ml UV konstrukční lepidlo, medicínální | lepidlatmely.cz.” [Online]. Available: <https://www.lepidlatmely.cz/loctite-aa-3926-25-ml-uv-konstrukcni-lepidlo--medicinalni/>. [Accessed: 20-Aug-2023].
- [51] I. I. Shuvo et al., “Smart Textiles Testing: A Roadmap to Standardized Test Methods for Safety and Quality-Control,” Text. Funct. Appl., Mar. 2021.
- [52] “ČSN EN IEC 60068-2-52 ED.2 (345791).” [Online]. Available: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iec-60068-2-52-ed-2-345791-183444.html>. [Accessed: 23-Apr-2023].

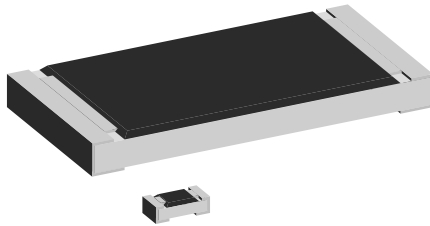
Přílohy:

Příloha A: Datasheet SMD rezistorů 1206 použitých v experimentu


www.vishay.com
D/CRCW e3

Vishay

Standard Thick Film Chip Resistors



FEATURES

- Stability at different environmental conditions
 $\Delta R/R \leq 1\%$ (1000 h rated power at 70 °C)
- 2 mm pitch packaging option for 0603 size
- AEC-Q200 qualified
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912


RoHS
COMPLIANT
HALOGEN
FREE

APPLICATIONS

- Automotive
- Industrial
- Telecommunication

LINKS TO ADDITIONAL RESOURCES



D/CRCW e3 standard thick film chip resistors are the perfect choice for most fields of modern electronics where high reliability and stability are of major concern. Typical applications include automotive, telecommunications, and industrial.

TECHNICAL SPECIFICATIONS									
DESCRIPTION	D10/CRCW0402 e3	D11/CRCW0603 e3	D12/CRCW0805 e3	D25/CRCW1206 e3	CRCW1210 e3	CRCW1218 e3	CRCW2010 e3	CRCW2512 e3	
Imperial size	0402	0603	0805	1206	1210	1218	2010	2512	
Metric size code	RR1005M	RR1608M	RR2012M	RR3216M	RR3225M	RR3246M	RR5025M	RR6332M	
Resistance range	1 Ω to 10 MΩ; jumper (0 Ω)					1 Ω to 2.2 MΩ; jumper (0 Ω)	1 Ω to 10 MΩ; jumper (0 Ω)		
Resistance tolerance	± 5 %; ± 1 %								
Temperature coefficient	± 200 ppm/K; ± 100 ppm/K								
Rated dissipation, P_{70} (1)	0.063 W	0.10 W	0.125 W	0.25 W	0.5 W	1.0 W	0.75 W	1.0 W	
Operating voltage, $U_{max, AC_{RMS}/DC}$	50 V	75 V	150 V	200 V	200 V	200 V	400 V	500 V	
Permissible film temperature, $\vartheta_{F max}$ (1)	155 °C								
Operating temperature range	-55 °C to +155 °C								
Max. resistance change at P_{70} for resistance range, $ \Delta R/R $, after (2):				≤ 1 %					
1000 h				≤ 2 %					
8000 h									
Permissible voltage against ambient (insulation):									
1 min, U_{ins}	75 V	100 V	200 V	300 V	300 V	300 V	300 V	300 V	
Failure rate: $FIT_{observed}$	≤ 0.1 × 10 ⁻⁹ /h								

Notes

- (1) Please refer to "Application Information" below
 (2) Apply to components with stability class 1

Revision: 05-Aug-2022

1

Document Number: 20035

 For technical questions, contact: thickfilmchip@vishay.com

 THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

Příloha B: Datasheet pájecí pasty použité v experimentu



Lead-Free
Solder Paste

Product Data Sheet

FORMOSA No Clean Solder Paste

Model: PF602-P

Specification:

NO	Item	Specification	Standard
1	Appearance	Gray paste , No foreign , No Stiff	
2	Alloy	Sn/Bi58	JIS-Z-3282
3	Melting Point	138℃	DSC
4	Particle Size	(Type 3) +45μm 1% large , -20μm 10% less (Type 4) +38μm 1% large , -20μm 10% less	IPC-TM-650, 2.2.14
5	Powder Shape	Sphere	
6	Flux Content	10 ± 1.0wt%	JIS-Z-3197, 6.1
7	Halide Content	0.05 ± 0.02wt% (in flux)	JIS-Z-3197, 6.5
8	Viscosity	180 ± 30 Pa.s (25±1℃, 10rpm, Malcom)	JIS-Z-3284, Annex 6
9	Flux Type	ROL1	J-STD-004

Physical Properties & Reliability Data

No	Test Item	Test Result	Test Method
1	Copper Plate Corrosion Test	PASS	JIS-Z-3197, 6.6.1
2	Spread Test	75% up	JIS-Z-3197, 6.10
3	Silver Chromate Test	PASS	IPC-TM-650, 2.6.33
4	Copper Mirror Test	PASS	IPC-TM-650, 2.6.32
5	Fluorides By Spot Test	PASS	IPC-TM-650, 2.3.35.1
6	S.I.R Test ▲	1×10 ⁹ up	IPC-TM-650, 2.6.3.3
7	Electro Migration Test ◆	1×10 ¹² up Pass	IPC-TM-650, 2.6.14.1
8	Viscosity Test(25℃, 10rpm)	180 ± 30 Pa.s	JIS-Z-3284. Annex 6
9	Tack Test (gf)	140 up(8hr)	JIS-Z-3284. Annex 9
10	Slump Test	Less than 0.3 mm	JIS-Z-3284. Annex 8
11	Solder Ball Test	PASS	JIS-Z-3284. Annex 11

▲Test Conditions : 85℃ , 85% RH

◆Test Conditions : 65℃ , 85% RH

www.shenmao.com

Příloha C: Datasheet nevodivého lepidla použitého v experimentu



Technical Data Sheet

LOCTITE[®] AA 3926[™]

Known as LOCTITE[®] 3926[™]
September 2020

PRODUCT DESCRIPTION

LOCTITE[®] AA 3926[™] provides the following product characteristics:

Technology	Acrylic
Chemical Type	UV acrylic
Appearance (uncured)	Transparent to hazy liquid and Free of undissolved solids ^{LMS}
Fluorescence	Positive under UV light ^{LMS}
Components	One component - requires no mixing
Viscosity	Medium
Cure	Ultraviolet (UV) / Visible light
Cure Benefit	Production - high speed curing
Application	Bonding

LOCTITE[®] AA 3926[™] is suitable for a wide variety of applications that require fast cure, flexibility, high adhesion and autoclave resistance. LOCTITE[®] AA 3926[™] cures in seconds when exposed to light of the proper wavelength and intensity and achieves excellent adhesion to glass, plastics and metal. The ability of this product to fluoresce under black light facilitates inspection of bonded assemblies for adhesive presence. LOCTITE[®] AA 3926[™] was specifically designed for bonding stainless steel cannulae into hubs, syringes and lancets for needle assemblies. The viscosity of this product makes the adhesive well suited for applications where the adhesive will be dispensed on the cannulae before assembly with the hub, needles with large gaps, or cannulae that end in the core pinbore to minimize the potential for blocking cannulae. Suitable for use in the assembly of **disposable medical devices**.

ISO-10993

LOCTITE[®] AA 3926[™] has been tested to Henkel's test protocols based on ISO 10993 biocompatibility standards, as a means to assist in the selection of products for use in the medical device industry.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Specific Gravity @ 25 °C	1.08
Flash Point - See SDS	
Viscosity, Brookfield - RVT, 25 °C, mPa·s (cP): Spindle 4, speed 20 rpm	3,000 to 8,000 ^{LMS}

TYPICAL CURING PERFORMANCE

Fixture Time

Fixture time is defined as the time to develop a shear strength of 0.1 N/mm².

UV Fixture Time, Glass, seconds:

Black light: 6 mW/cm ² , measured @ 365 nm	≤5 ^{LMS}
Zeta [®] 7410 light source: 30 mW/cm ² , measured @ 365 nm	<5
Electrodeless, D bulb: 100 mW/cm ² , measured @ 365 nm	<5

Tack Free Time

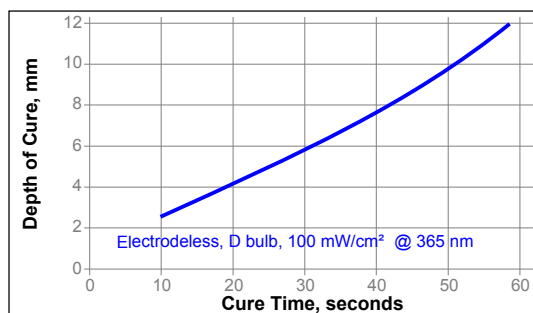
Tack Free Time is the time required to achieve a tack free surface

Tack Free Time, seconds:

Zeta [®] 7410: 30 mW/cm ² , measured @ 365 nm,	>60
Electrodeless, D bulb: 100 mW/cm ² , measured @ 365 nm	>60

Depth of Cure

The graph below shows the increase in depth of cure with time at 100mW/cm² as measured from the thickness of the cured product formed in an aluminum weighing dish.



TYPICAL PROPERTIES OF CURED MATERIAL

Cured @ 100 mW/cm², measured @ 365 nm, for 30 seconds per side using an Electrodeless system, D bulb

Physical Properties:

Coefficient of Thermal Expansion, ISO 11359-2, K ⁻¹ :	
Pre Tg	130×10 ⁻⁰⁶
Post Tg	220×10 ⁻⁰⁶



For the most direct access to local sales and technical support visit: www.henkel.com/industrial

Příloha D: Datasheet nevodivého lepidla použitého v experimentu

Technical Datasheet

Vitralit® VBB-1 Gel



Product Description

Modified acrylate | 1 K | solvent-free | UV / Visible light curing

- ▶ Alternative to silicone
- ▶ Potting
- ▶ Shear thinning
- ▶ Excellent peel strength
- ▶ Optical clear
- ▶ Very flexible, equalizing
- ▶ Low water absorption
- ▶ Low shore hardness
- ▶ Good resistance to moisture

Curing Properties

UV-A	LED 365nm	LED 405nm	Secondary heat cure
✓	✓	✓	-

✓ suitable - not suitable

If applicable, heat may only be used as a secondary cure for shadowed areas after the product has been cured with UV.

UV-curing (Hoenle Discharge lamp, 320-390nm)

Intensity [mW/cm ²]*	Layer thickness [mm]	Time [sec]
60	0.5	30

*measured by Hoenle UV-Meter 3.0 / UV-A F0

LED-curing (Hoenle LED Spot 100, 365nm)

Intensity [mW/cm ² **]	Layer thickness [mm]	Time [sec]
300	0.5	5

LED-curing (Hoenle LED Spot 100, 405nm)

Intensity [mW/cm ² **]	Layer thickness [mm]	Time [sec]
500	0.5	2

**measured by Hoenle UV-Meter 3.0 / LED F2

To obtain full cure at least one substrate must be transparent to the recommended wavelength. The curing speed depends on the wavelength spectrum of the light source, the intensity of light, the distance to the light source, the component geometry and the amount of adhesive. The final strength is reached after 12 hours.

Příloha E: Datasheet nevodivého lepidla použitého v experimentu

Technical Datasheet

Vitralit® 4732 VT



Product Description

Modified acrylate | 1 K | solvent-free | UV / Visible light curing

- ▶ Glass bonding
- ▶ Display potting
- ▶ Display sealing
- ▶ Plastic bonding
- ▶ Foil laminating
- ▶ Lens bonding
- ▶ Potting
- ▶ Dry surface
- ▶ Flexible and tearproof
- ▶ Good adhesion to PMMA/glass

Curing Properties

UV-A	LED 365nm	LED 405nm	Secondary heat cure
✓	✓	✓	-

✓ suitable - not suitable

If applicable, heat may only be used as a secondary cure for shadowed areas after the product has been cured with UV.

UV-curing (Hoenle Discharge lamp, 320-390nm)

Intensity [mW/cm ²]*	Layer thickness [mm]	Time [sec]
60	0.1	5

*measured by Hoenle UV-Meter 3.0 / UV-A F0

LED-curing (Hoenle LED Spot 100, 365nm)

Intensity [mW/cm ² **	Layer thickness [mm]	Time [sec]
300	0.5	2

LED-curing (Hoenle LED Spot 100, 405nm)

Intensity [mW/cm ² **	Layer thickness [mm]	Time [sec]
500	0.2	2

**measured by Hoenle UV-Meter 3.0 / LED F2

To obtain full cure at least one substrate must be transparent to the recommended wavelength. The curing speed depends on the wavelength spectrum of the light source, the intensity of light, the distance to the light source, the component geometry and the amount of adhesive. The final strength is reached after 12 hours.