

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kontaktní struktury na textilních substrátech

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David MICHAL**
Osobní číslo: **E16N0018P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Kontaktní struktury na textilních substrátech**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Seznamte se s metodami a postupy používanými pro vytváření kontaktů na textilních substrátech s důrazem na aplikace ve smart textiliích.
2. Vyhledejte vhodné testovací postupy pro stanovení klíčových elektrických a mechanických parametrů a odolnosti kontaktních struktur na textilních substrátech.
3. Navrhněte a realizujte testovací vzorky a nezbytné přípravky pro měření vybraných parametrů kontaktních struktur.
4. Na sérii vzorků prakticky realizujte navržené postupy, proveďte měření a získané výsledky zhodnoťte.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. M. Stoppa, A. Chiolerio: *Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review*, *Sensors* 2014, 14(7), 11957-11992; doi:10.3390/s140711957
2. D. Marulescu: *Electronic Textiles: A Platform for Pervasive Computing*, proceedings of the IEEE, Vol. 91, No. 12, 2003
3. R. Schueller: *Connector Design for Wearables*, SMTA Proceedings, 2015
4. Elektronické informační zdroje (Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Wiley Online Library, AIP Scitation, Google Scholar, ResearchGate, Mendeley ...)


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

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**


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




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

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na kontaktní struktury na textilních substrátech. Je zde popsán vývoj z historie do současnosti. Dopodrobna jsou zde rozebrány materiály vodivých vláken a tkanin používaných v tomto odvětví, společně s jejich parametry, vlastnostmi a způsoby výroby. V této části lze také nalézt zákonitosti a metody tvorby kontaktních struktur. Závěr teoretické části se věnuje testování kontaktních struktur. Aplikační část je věnována tvorbě kontaktních struktur na reálných vzorcích. Nejdříve je zde popsán návrh, realizace a testování zkušebních vzorků. Po nalezení ideálních parametrů jsou tyto poznatky aplikovány na testovací vzorky. Po jejich realizaci jsou tyto vzorky otestovány, vyhodnoceny a vyvozeny závěry.

Klíčová slova

Kontaktní struktura, smart textilie, textilie, substrát, vodivé vlákno, tkaniny, vodič, zátěžové testy

Abstract

The diploma thesis is focused on the contact structures on textile substrates. The development from history to present state is described. The materials of conductive fibres and fabrics used in this industry are thoroughly researched, including its parameters, properties and methods of production. In this part, standards and methods of contact structures creation can also be found. The end of the theoretical part is focused on the testing of the contact structures. The application part is dedicated to the creation of the contact structures on real samples. First, the designing, implementing and testing process of test samples is described. After finding the ideal parameters, these findings are then applied to the test specimens. These test specimens are then created, tested, evaluated and conclusions are drawn.

Key words

Contact structure, smart textile, textile, substrate, conductive fiber, fabrics, conductor, stress tests

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 23.5.2018

David Michal

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Řebounovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Zároveň za lidský přístup, ochotu, vstřícnost a zájem.

Obsah

ÚVOD	1
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	2
1 SMART TEXTILIE	3
1.1 HISTORIE A VÝVOJ.....	3
1.2 ROZDĚLENÍ SMART TEXTILIÍ.....	4
1.3 SOUČASNÉ TRENDY A POUŽITÍ.....	4
1.3.1 Zdravotnictví.....	4
1.3.2 Sport	5
1.3.3 Extrémní podmínky.....	5
2 VODIVÁ VLÁKNA, TKANINY A KONTAKTNÍ STRUKTURY	6
2.1 MATERIÁLY VODIVÝCH VLÁKEN	6
2.1.1 Přirozeně vodivá kovová vlákna.....	6
2.1.2 Modifikovaná vodivá kovová vlákna.....	8
2.1.3 Uhlíková nanovlákna.....	8
2.1.4 Vodivé polymery	9
2.2 VÝROBA VODIVÝCH TKANIN	10
2.2.1 Zpracování příze s vodivým vláknem.....	11
2.2.2 Nanášení vodivé vrstvy	12
2.2.3 Tisk	13
2.3 VÝROBA KONTAKTNÍCH STRUKTUR	15
2.3.1 Mechanické spojení	16
2.3.2 Odporové svařování	16
2.3.3 Ultrazvukové svařování	17
2.3.4 Nevodivé lepidlo	18
3 TESTOVÁNÍ PARAMETRŮ KONTAKTNÍCH STRUKTUR.....	19
3.1 MĚŘENÍ STEJNOSMĚRNÉHO ODPORU KONTAKTU	19
3.2 ZÁTĚŽOVÉ TESTY	21
4 PRAKTICKÁ REALIZACE A ZKOUŠKY KONTAKTNÍCH STRUKTUR.....	23
4.1 NÁVRH PRVOTNÍCH MOTIVŮ.....	23
4.2 PŘÍPRAVKY PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ	23
4.3 VÝROBA PRVOTNÍCH MOTIVŮ	24
4.4 REALIZACE KONTAKTNÍCH STRUKTUR NA PRVOTNÍCH MOTIVECH	25
4.5 NÁVRH OBVODŮ PRO TESTOVACÍ VZORKY	31
4.6 REALIZACE OBVODŮ TESTOVACÍCH VZORKŮ	32
4.7 REALIZACE SVAŘOVANÝCH SPOJŮ VZORKŮ TESTOVACÍHO MOTIVU	32
4.7.1 Vzorky s malou ploškou	32
4.7.2 Vzorky s velkou ploškou.....	34
4.7.3 Vzorky pro přivaření vnějšího vodiče	35
4.8 PARAMETRY TESTOVACÍCH VZORKŮ	38
4.9 ZÁTĚŽOVÉ TESTY	41
4.10 VÝSLEDKY TESTŮ A VYHODNOCENÍ	41
4.10.1 Teplotní komora.....	41
4.10.2 Šoková komora	47
4.10.3 Prací testy.....	52
4.11 ZHODNOCENÍ.....	57
5 ZÁVĚR.....	58
6 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	60

7 PŘÍLOHY64

Úvod

V době, jako je ta současná, kdy jsme neustále v obklopení elektronikou, se stále zkoumají nové způsoby jak zaručit, aby s námi byla na každém kroku a to doslova. Elektronika v oblečení je koncept již několik let starý, avšak dalo by se říci, že je stále ve svých počátcích. Se stále se zvyšujícími požadavky uživatelů, začíná docházet k narážení na materiálové limity současné doby. Proto je velké množství energie a prostředků investováno směrem smart textilií, aby bylo možné tyto nároky naplnit.

První část této práce je věnována historii a vývoji smart textilií, jejich potenciálnímu užití a i odvětví, kde se již používají.

Druhá kapitola je nejrozsáhlejší a zabývá se vodivými vlákny, tkaninami a kontaktními strukturami. Jsou zde rozebrány jednotlivé materiály, se kterými je možné se v tomto odvětví setkat. Jejich vlastnosti a parametry, silné i slabé stránky, společně se způsoby a náročnosti jejich výroby. V této části jsou rozebrány i některé způsoby vytváření kontaktních struktur, včetně metody odporového svaření, použitého v aplikační části této práce.

V další kapitole jsou rozebrány funkční testy pro zkoušky kontaktních struktur, použitelných pro tuto práci.

Finální část práce se zabývá aplikací získaných teoretických poznatků na reálné příklady. Cílem bylo vytvoření vzorků kontaktních struktur, použitelných pro potencionální skutečné aplikace. Jsou zde ukázány návrhy prvotních motivů, jejich následná realizace užitím odporového svařování a testování. S daty získanými z těchto vzorků byly poté vytvořeny vzorky testovací, na kterých byly provedeny zátěžové testy a kontrolní měření. Dle zvolených kritérií byly poté vzorky vyhodnoceny a určena vhodnost užitých parametrů pro reálnou aplikaci.

Seznam symbolů a zkratek

<i>CIJ</i>	<i>Continuous Ink Jet</i>
<i>CNT</i>	<i>Carbon nanotube (Uhlíková nanotrubička)</i>
<i>DOD</i>	<i>Dot on demand</i>
<i>PANI</i>	<i>Polyaniline</i>
<i>PEDOT</i>	<i>Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)</i>
<i>PPy</i>	<i>Polypyrrol</i>
<i>TPU</i>	<i>Termoplastický polyuretan</i>

1 Smart textilie

Pojem „Smart Textilie“, „módní elektronika“, „chytré oděvy“ nebo zkráceně „e-textilie“. Všechna tato vyjádření mají ve své podstatě stejný význam. Lze říci, že se jedná o široké spektrum studií a produktů, které rozšiřují funkčnost a užitečnost běžných tkanin. Je-li použita definice, jsou to textilní výrobky, jako jsou vlákna, příze a pletené nebo ne/tkané struktury, které mnohou interagovat s prostředím či uživatelem. Toto spojení textilií a elektroniky je důležité pro celkový vývoj tzv. chytrých materiálů. Ty umožňují dosáhnout mnoha funkcí a vlastností, jež je v současné době schopna poskytovat pouze stacionární a neflexibilní elektronika. [1, 2]

1.1 Historie a vývoj

Materiály potřebné pro výrobu e-textilií, jako jsou vodivá vlákna a tkaniny, jsou na světě již kolem 1000 let. Nevědomě se o to zasloužili řemeslníci, jež po staletí omotávali vlákna tkanin do převážně zlatých a stříbrných, tenkých kovových folií, jakožto ozdobný prvek. Jak si postupně lidé na konci 19. století zvykali na elektrické spotřebiče, inženýři společně s designéry začali kombinovat oblečení i šperky s elektronikou. Proto bylo možné se koncem 80. let setkat s napájenými svítícími náhrdelníky, klobouky nebo brožemi. [3]

Jak šel vývoj dále, v průběhu 20. století vznikla v Institutu Technologií v Georgii, Atlantě první nositelná základní deska, ke které bylo možné připojit klasický počítačový hardware. Tento směr vývoje dal za vznik paradigmatu tzv. „látka JE počítač“. V následujících letech byl stejným týmem vyvinut systém, kterým byly detekovány průstřeily pomocí optických vláken. Užitím speciálních spojení a senzorů bylo také možné snímat životní funkce. Poprvé tak bylo možné mít přehled o zdraví člověka méně nápadným způsobem, což našlo využití převážně ve zdravotnictví. Jednalo se o velký průlom, avšak největším problémem byla mobilita, životnost a snadná opravitelnost. Tento faktor, společně s nátlakem společnosti o zpřístupnění těchto nových objevů široké veřejnosti způsobil, koncentrování vývoje do flexibility a mechanické odolnosti. Pro vyřešení problémů s flexibilitou bylo nutné vyřešit spolehlivé metody kontaktování a zajistit vyšší stupeň integrace elektroniky do běžného oblečení. [3, 4]

1.2 Rozdělení smart textilií

Dle [1] a [3] lze rozdělit smart textilie do tří kategorií na základě úrovně vývoje:

- Pasivní smart textilie – první generace smart textilií, jež umožňuje pouze snímat okolní prostředí,
- Aktivní smart textilie - druhá generace, schopna kromě snímání okolí i na něj reagovat, avšak stále stejně,
- Velmi chytré smart textilie – poslední generace, která dokáže snímat okolí, reagovat na něj a upravovat svoje chování na základě okolností.

Senzory jsou základem pro pasivní smart textilie. Esenciální funkcí sensorů je, že převádějí jeden druh signálu na jiný. Existuje mnoho různých materiálů a struktur schopných převádět signál, např. teplotní sensor detekuje změny teploty a následně je převádí na elektrický signál, chemický sensor je schopen detekovat přítomnost a koncentrace chemikálií, apod. Aktuátory neboli akční členy jsou rozhodující změnou při přesunu do druhé generace. Ty zajišťují, že na snímaná data bude prvek reagovat, tj. změni barvu, tvar, apod. Třetí generace je definována tím, že zařízení obsahuje rozhodovací jednotku, která na základě snímaných dat určí, jak bude reagovat. [5]

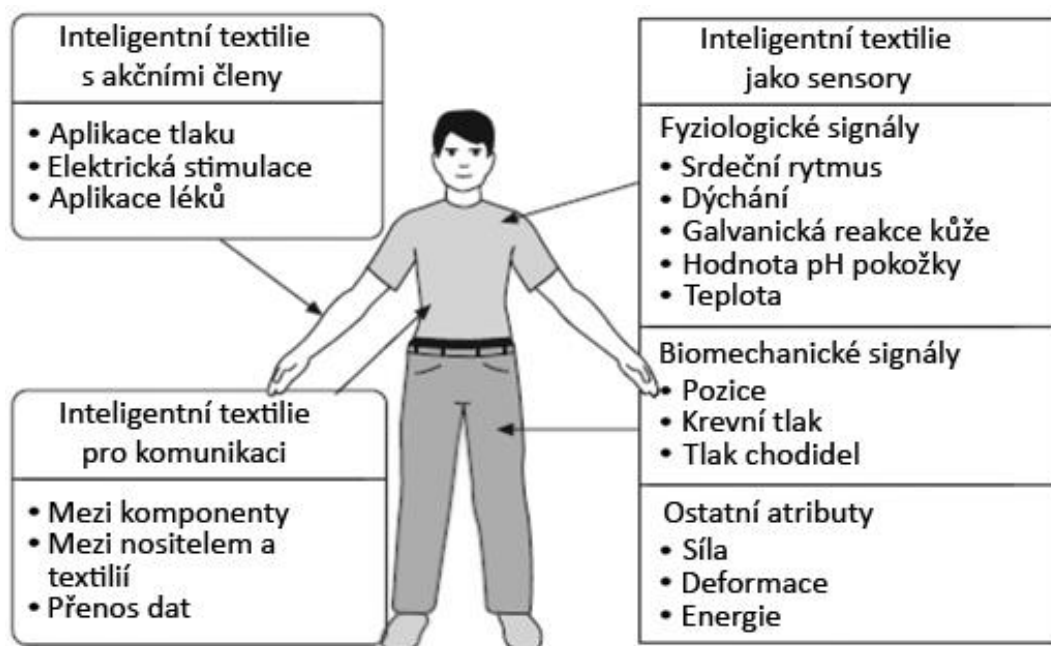
1.3 Současné trendy a použití

Trh s chytrými tkaninami a smart textiliemi rapidně vzrůstá s průměrným růstem 20% za poslední dekádu. V roce 2013 měl hodnotu 600 milionů dolarů a je očekáváno, že v roce 2020 tato hodnota přesáhne hranici 30 miliard dolarů. [6]

1.3.1 Zdravotnictví

Tlak rostoucí populace a dosahování dlouhověkosti podpořila směr vývoje smart textilií ke specifickým zdravotnickým činnostem, jako je monitoring, diagnóza, aplikace léků nebo rehabilitace pacientů. Neustálý monitoring umožní sledovat stav pacienta při každodenních aktivitách, namísto jen krátkého časového okamžiku, kdy se on sám dostaví na lékařskou prohlídku. Současně umožňuje domácí léčbu, jelikož lékař má neustálý přehled o stavu pacienta. Nynější „chytrá trička“ dokáží monitorovat nejen tep, EKG, dýchání, teplotu, ale i biochemické parametry nositele. V případě detekce ohrožení zdraví pacienta, je možné

okamžité upozornění lékaře. Na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** vidíme obecně různá užití smart textilií ve zdravotnictví. [3, 5, 6]



Obr. 1.1 Intelligentní textilie ve zdravotnictví a monitorování (přeloženo z [6]).

1.3.2 Sport

Podobně jako ve zdravotnictví, i ve sportu jsou smart textilie zaměřené hlavně na monitoring tělesných funkcí. Nejdůležitějšími parametry jsou dýchání a tepová frekvence. Senzory těchto vitálních funkcí mohou být zabudovány do funkčních triček, spodního prádla nebo tílek. Požadavky na pratečnost a odolnost musí zůstat zachovány stejně jako možnost příjmu dat do například chytrého telefonu nebo hodinek. Poslední prototypy triček pro měření dechu i tepu, využívajících optických vláken, dosahují chyby <1 % v porovnání se stacionárními přístroji. Dalším využitím ve sportu jsou prvky pomáhající při návratu ke sportu po zranění. Tím je například vesta s vyhřívanými plochami na místech ledvin nebo „chytrý návlek“ na koleno, který jej zahřívá. [6, 7]

1.3.3 Extrémní podmínky

Extrémními podmínkami se rozumí armáda a složky Integrovaného záchranného systému. Voják v současné době u sebe nosí kromě zbraně a vesty také GPS, vysílačku, soupravu na noční vidění a mnohem více. Řešením energetické náročnosti se ukázal systém energetické vesty. Ta umožňuje napájení všech externích periférií skrze konektory

umístěných dle zákazníka. Vodiče vedené z baterie umístěné na zádech jsou vytvořeny přímo v tkanině, takže uživateli nepřekáží žádné kabely. [8]

Další, kdo je vystaven extrémním podmínkám je hasič. Ten musí čelit nejenom extrémním teplotám, ale i přítomnosti toxických plynů nebo nutnosti orientace v místě zásahu. Současné chytré hasičské obleky jsou vybaveny senzory, aktivním osvětlením a řídicí jednotkou. Díky této výstroji je nepřetržitě sledováno a vyhodnocováno prostředí, ve kterém se hasič vyskytuje. Je měřena vnitřní i vnější teplota a vlhkost, toxické plyny v okolí a užitím akcelerometru, gyroskopu a magnetometru i pozice hasiče v místech mimo dosahu GPS. Oblek komunikuje bezdrátově s chytrým zařízením, kde jsou všechny snímané parametry monitorovány a zaznamenávány v reálném čase. V případě, že by došlo k přerušení spojení, je všechna data možné stáhnout a analyzovat dodatečně. [9]

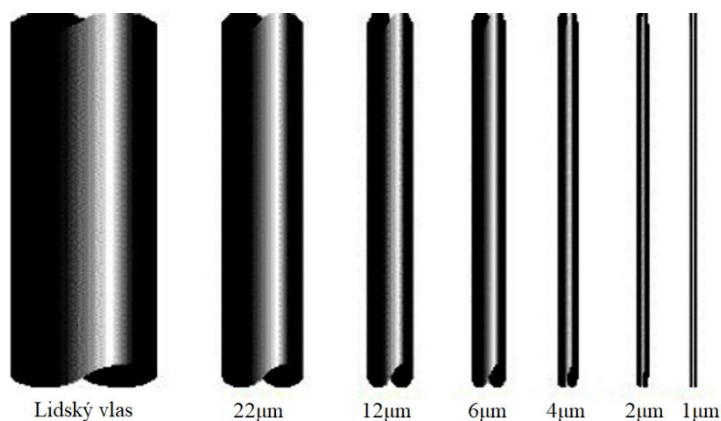
2 Vodivá vlákna, tkaniny a kontaktní struktury

Při výrobě vodivých textilií existuje spousta překážek. Aby mohly být použity pro oblečení, musí být flexibilní a elastické, jinak není možné zajištění pohodlí při nošení. Musí být snadno ohybatelné, stříhatelné a formovatelné. Čím více jsou upnuté, tím více flexibilní musí být. Proto by vlákna měla být velmi jemná (<1 Tex) a lehká (obvykle $<300\text{g/m}^2$). [10]

2.1 Materiály vodivých vláken

2.1.1 Přirozeně vodivá kovová vlákna

Mezi materiály používané pro výrobu vodivých vláken patří stříbro, nikl, nerezová ocel, titan, hliník nebo měď. Kovové nitě jsou vytvořeny z velmi jemných kovových vláken. Kovová vlákna jsou velmi tenké tzv. filamenty. Filament lze obecně definovat jako vlákno neomezené délky. Je-li samostatné, nazývá se monofil, v případě svazku většího množství pak multifil. Na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je porovnání tloušťky mezi kovovými vlákny a lidským vlasem, jehož tloušťka se pohybuje mezi 70 až 100 μm . [3, 6, 11]



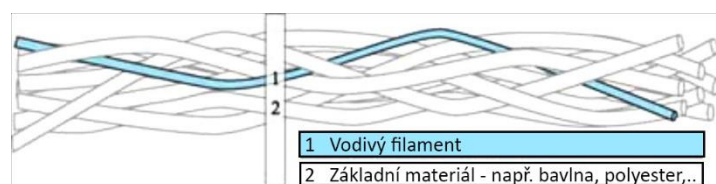
Obr. 2.1 Průměry kovových vláken v porovnání s lidským vlasem (převzato [6]).

Jednou z metod pro jejich výrobu je upravený proces tažení. Principem této metody je vložení svazku drátků do kovové trubičky a následné několikanásobné zmenšování průměru tažením. Další z metod je odřezávání proužků z kovové fólie. V Tab. 1 jsou vlastnosti monofilních kovových vláken v závislosti na materiálu, v tomto případě několika druhů vyráběných firmou Elektrisola Feindraht AG. V nabídce najdeme například měď (Cu), postříbřenou měď (Cu/Ag), mosaz (Ms) nebo postříbřenou mosaz (AgCu). [1, 12]

Tab. 1 Elektrické vlastnosti monofilních kovových vláken (převzato [12])

Materiál	Vodivost [$S \cdot m/mm^2$]	Odpor [$\Omega \cdot mm^2/m$]
Cu	58.5	0.0171
Cu/Ag	58.5	0.0171
Ag 99%	62.5	0.0160
Ms 70	16	0.0625
Ms/Ag	16	0.0625
AgCU	57.5	0.0174
Bronz	7.5	0.1333
Ocel 304	1.4	0.7300
Ocel 316L	1.3	0.7500

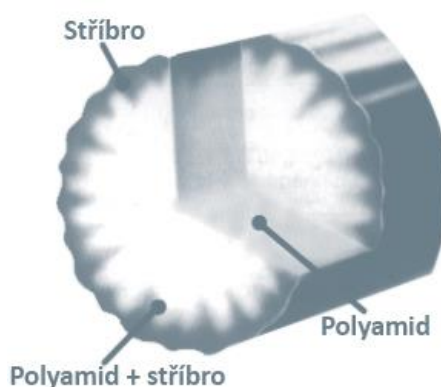
Tato vlákna poté mohou být do tkanin například zapletena nebo zatkána. Na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je znázorněna typická vodivá nit, se základní tkaninou, do které je začleněné monofilní vodivé vlákno. V tomto případě vyráběné firmou Swiss-Shield® zabývající se výrobou přízí pro stínění elektromagnetické radiace. [13]



Obr. 2.2 Model začleněného vodivého vlákna do běžného (přeloženo z [13]).

2.1.2 Modifikovaná vodivá kovová vlákna

Jednou z nejpoužívanějších metod je pokovení polymerních vláken stříbrem nebo mědí. V případě vláken SilveR.STAT[®] se jedná o polyamid pokovený stříbrem. Díky vysoké čistotě stříbra jsou tato vlákna nejen antistatická, antibakteriální a vysoko vodivostní ($1 \cdot 10^4 \Omega/\text{cm}$), ale zároveň si uchovávají textilní vlastnosti. Těmito parametry a dlouhou životností nacházejí uplatnění v ochranném nebo nemocničním oblečení, kobercích či do vybavení čistých místností. [14]



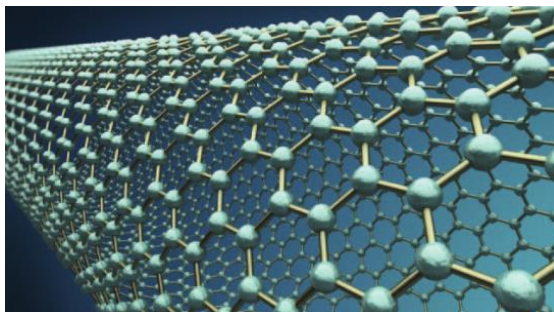
Obr. 2.3 Vlákně SilveR.STAT[®] (přeloženo z [14]).

Vodivá vlákna lze též vyrobit plněním polymerních vláken kovovými nebo uhlíkovými částicemi při jejich výrobě. V tomto způsobu je však nutné vyzkoumat procentuální množství částic, aby se dosáhlo vodivého stavu. Dalším způsobem je nanášení vrstvy vodivé kovové soli, jako jsou jodid měďnatý a sulfid měďnatý. [6, 10]

2.1.3 Uhlíková nanovlákna

Některé nevýhody kovových vláken, jako je jejich křehkost, opotřebenost strojů při jejich výrobě nebo jejich vyšší cena, daly za vznik myšlenky použít uhlíkové nanotrubičky, orig. Carbon nanotube (CNT). Ty se ukázaly jako vhodná alternativa v nespočtu aplikací, včetně superkapacitorů nebo aktuátorů. Od jejich vzniku před téměř třiceti lety byly zkoumány pro skvělé fyzikální a mechanické vlastnosti. Dosahují elektrické vodivosti 10^2 - $10^5 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$, čímž se mohou téměř srovnávat s kovovými vlákny. Tato vodivost je velmi závislá na molekulární struktuře CNT. Ta může být jednoděnná nebo vícevěnná (několik srolovaných uhlíkových listů k sobě). Nanotrubičky se dají syntetizovat několika metodami, např. chemickým vypařováním, laserovým vypařováním nebo elektrolýzou. Tyto trubičky se dají zakomponovat do příze a dále pak zaplést, zatkat nebo zašít do látky. Pokusy ukázaly, že tyto nitě, jedno i vícevěnné,

dosáhly větší gravimetrické (v poměru na jednotku hmotnosti) stejnosměrné vodivosti než měděný drát. Nicméně, mechanické vlastnosti (pevnost, prateľnost, flexibilita) těchto nití zatím nedosahují takové úrovně, aby jejich nošení bylo pocitově příjemné a srovnatelné s běžnými textiliemi. [6, 15]



Obr. 2.4 3D model CNT (převzato [15]).

2.1.4 Vodivé polymery

V současné době se používá více než 25 různých druhů vodivých polymerů. Spojují výhody kovů a běžných polymerů, takže mají skvělé elektrické i optické vlastnosti, a to při zachování flexibility. Prvním krokem ve vývoji těchto materiálů byl objev, kdy se užitím jodové páry mnohonásobně zvýšila vodivost polyacetyleny. Tento proces se nyní nazývá dopování jódem a je fundamentální pro výrobu vodivých polymerů. Ačkoliv tyto polymery dosahují vyšších vodivostí, stále se nedají srovnávat s kovovými nebo pokovenými vlákny. V Tab. 2 lze vidět hodnoty vodivostí nejpoužívanějších představitelů. [16]

Tab. 2 Přehled vodivostí vodivých polymerů (převzato z [16])

Polymer	Vodivost ($S \cdot cm^{-1}$)
Polypyrrole	$10^2-75 \times 10^3$
Polyaniline	30-200
Polythiophene	$10-10^3$
Polyacetylene	$10^3-1,7 \times 10^5$
Poly(p-phenylene)	10^2-10^3
Poly(p-phenylenevinylene)	$3-5 \times 10^3$

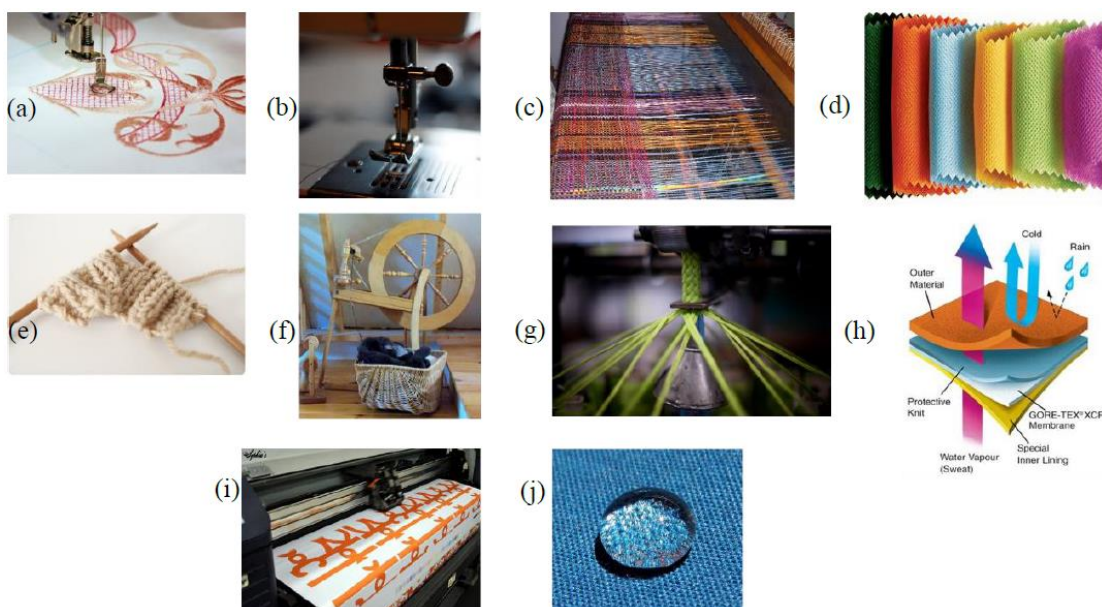
Dle [16] jsou nejzajímavější vodivé polymery pro smart textile tyto:

- Polypyrrol (PPy) – skvělá biokompatibilita v laboratorních i reálných podmínkách, dobrá chemická stabilita na vzduchu i ve vodě a dostatečná vodivost; snadno se syntetizuje ve velkém množství, za pokojové teploty, v různých velikostech i s různou pórovitostí, po syntéze jsou další úpravy velmi náročné; užití například v biosenzorech, systémech podání léků, mikro nástrojích pro operace, neuronových sondách.

- Polyaniline (PANI) – existuje v mnoha formách dle úrovně oxidace, nejlepší vodivost a stabilitu má částečně zoxidovaná emeraldinová báze; další výhody jsou snadná syntéza, nízká cena, dobrá stabilita v prostředí a schopnost elektricky přepnout mezi vodivým a odporovým stavem; není biologicky rozložitelný a hůře zpracovatelný; užití jako biosensory, neuronové sondy, řízené podání léků.
- Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) – velmi dobrá elektrická, chemická stabilita v prostředí a lepší vodivost a tepelná stabilita než PPy; používá se u nervových sond, nervových štěpů a náplastí srdečních svalů, při nanesení na textilie funguje jako ochrana proti UV záření a elektromagnetickému stínění. [16]

2.2 Výroba vodivých tkanin

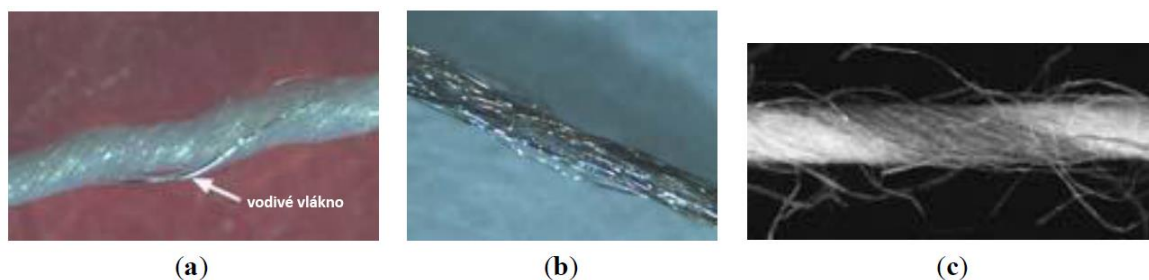
Při výrobě smart textilií je prvním krokem studie dostupných chytrých materiálů. Druhým je výběr ideálního způsobu, jak dostat tyto chytré materiály do textilního nosiče. K tomu je možné použít celou řadu technologií. Mezi ty patří a) vyšívání, b) šití, c) tkaní, d) netkané textilie, e) pletení, f) předení, g) splétání, h) nanášení vodivé vrstvy, i) tisk, j) chemická úprava. Všechny zmíněné technologie lze vidět na *Obr. 2.5* [1]



Obr. 2.5 Různé způsoby výroby a úprav textilních materiálů. (převzato[1]).

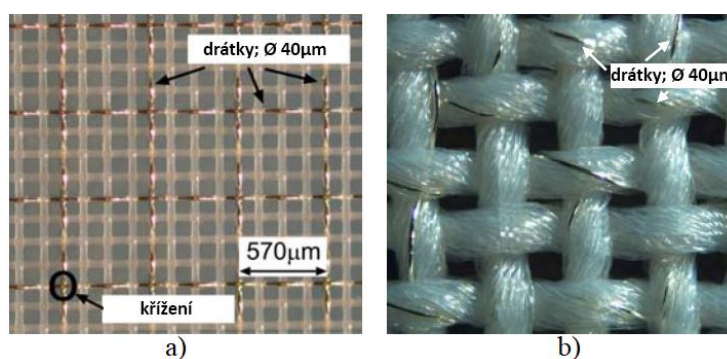
2.2.1 Zpracování přize s vodivým vláknem

Většina z výše zmíněných technologií (ad a-g) má společný základ a tím je zpracování nití, ve které je zakomponováno vodivé vlákno. Ta musí být navržena tak, aby měla dostatečné vodivé vlastnosti, ale zároveň byla pohodlná k nošení. Těchto parametrů lze obecně dosáhnout užitím několika druhů nití, viz. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** [1]



Obr. 2.6 a) Navinuté vodivé vlákno na nit; b) Pokovená nit; c) Nit s kovovým multifilem (převzato [1]).

Tyto nitě pak společně mohou ve tkanině tvořit komplexní sítě, chovající se jako celé elektrické obvody. Mohou být tvořeny několika vrstvami, vzájemně izolovanými, aby nedocházelo ke zkratu a simulovat chování součástek. Výsledkem tak může být měděný drátek s průměrem $40\ \mu\text{m}$ izolovaný polyesterimidem, navinutý na polyesterovou přízi, tvořící kus tkaniny. Vědci ze Spolkové vysoké technické školy v Curychu dovedli tento standartní design ještě dále. Na obrázku níže lze vidět hybridní tkaninu nazvanou PETEX. Je tvořena tkanou polyesterovou přízí (PET) o průměru $42\ \mu\text{m}$ a měděným drátkem o průměru $40 \pm 8\ \mu\text{m}$. Každé z těchto měděných vláken je odizolované vrstvou polyurethanu a mají vzájemné rozestupy $570\ \mu\text{m}$. Tento unikátní vzor umožňuje vytvářet jakýkoli vodivý obvod a to v několika krocích. Nejdříve odstranění izolace drátku na požadovaném křížení laserem, poté uříznutí přebytečných drátků, zakápnutí křížení vodivým adhesivem a nakonec také ochranou pryskyřicí. [3, 17]

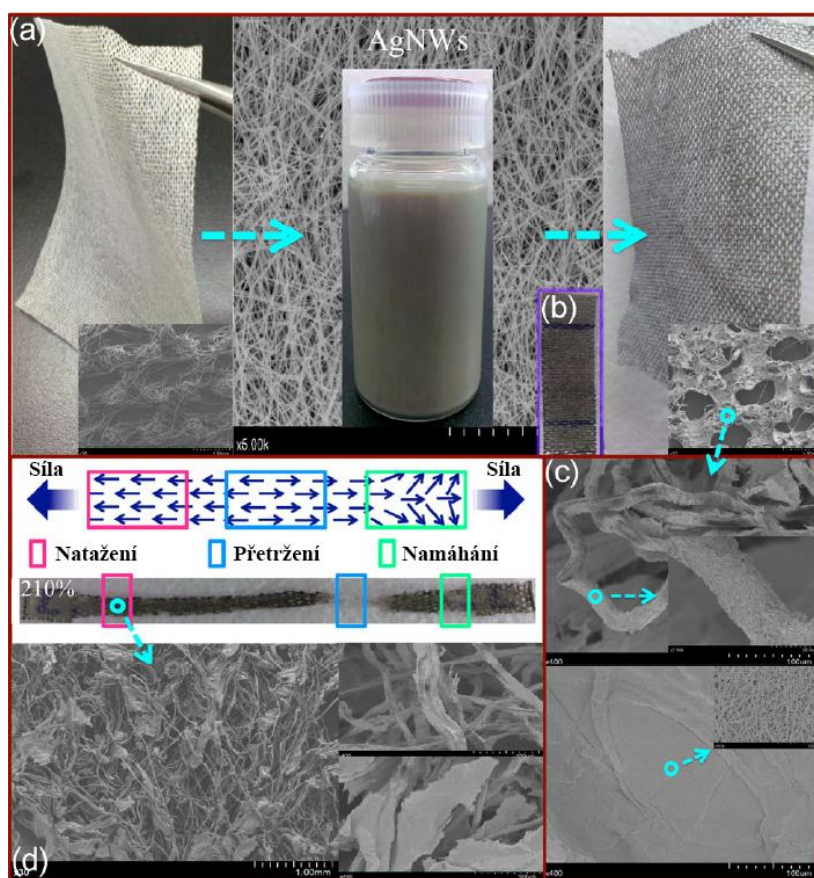


Obr. 2.7 a) PETEX b) Měděný drátek na polyesterové přízi (převzato [17]).

2.2.2 Nanášení vodivé vrstvy

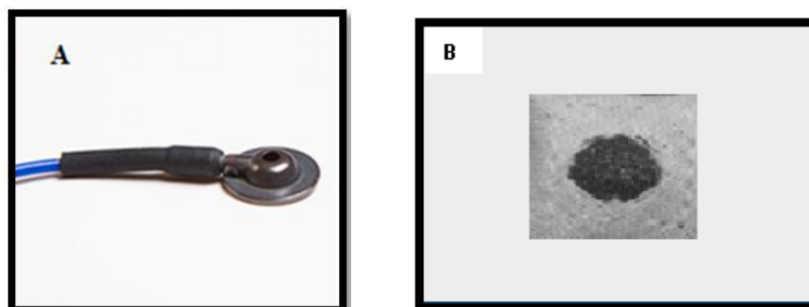
Vodivá vrstva může být nanášena, jak již bylo zmíněno, na samotná vlákna nebo nitě, nicméně tato možnost je i na celé tkaniny. Tento způsob je vhodný pro velké množství typů tkanin a vytváří poměrně dobré vodivostní parametry. Zároveň však nijak výrazně nemění parametry původního substrátu, jako jsou jemnost nebo flexibilita. [18]

Nejznámější metodou je tzv. Dip & Dry, kdy je do suspenze ponořen substrát, po určité době vyjmut a poté usušen. V případě vědců z University v Ósace, Japonsku, šlo o namáčení celulózni látky BEMCOT™ do suspenze nanovláken stříbra s etanolem. Vzorky látky byly na dvě hodiny ponořeny do suspenze a poté úplně vysušeny při pokojové teplotě, aby došlo k úplnému odpaření etanolu. Výsledkem byla vysoce pružná vodivá textilie, jež dosahovala téměř konstantních hodnot odporů i při velkém napnutí. Při 0% napnutí $0,0047 \Omega$, s velmi pomalým nárůstem odporu do 190% napnutí kdy se zvýšil na $0,0091 \Omega$. Přehled výrobního i testovacího procesu je na obrázku níže. [19]



Obr. 2.8 a) Substrát před/po ponoření do suspenze b) vzorek již pokovené látky c) snímky z elektronového mikroskopu vodivých vláken a sítě, jež mezi sebou vytvářejí d) vyznačené zóny natažení, přetržení a namáhání při 210% natažení, včetně znázornění směru síly (převzato [19]).

Další z metod je galvanické pokovování. Tento způsob je založen na principu ponoření původního substrátu do roztoku, ve kterém se pohybují elektrickým polem ionty kovu, aby se na něj přichytily a vytvořily tak vodivý povlak. Tato metoda byla použita pro výrobu textilní elektrody pro měření EEG, kdy byla polyesterová látka pokovena mědí. Výsledná elektroda poté na elektronovém mikroskopu i rentgenu ukázala, že pokovením nedošlo k narušení krystalické formy substrátu a došlo k vytvoření souvislé měděné vrstvy. Signály změřené elektrodou dosahovaly srovnatelných parametrů jako u běžně dostupných elektrod. [20]



Obr. 2.9 a) Standardní elektroda; b) Textilní elektroda (převzato [20]).

Vakuová depozice tenkých vrstev je další z možností. Tento způsob zahrnuje vakuovou komoru do které je umístěna tkanina a substrát je tak držen na místě. Nanášený kov je poté vypařen do komory a tkanina je tak vystavena kovovým částicím, jež na ní kondenzují a vytvářejí tak vodivý povlak. Takto se dá vytvořit velmi tenký a zároveň vysoce vodivý (odpor $100 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$) povlak, ale výsledná styčná plocha mezi substrátem a povlakem není ideální. Tato technologie umožňuje nejenom celoplošné povlaky, ale i cílené vytváření vzorů. [6, 21]



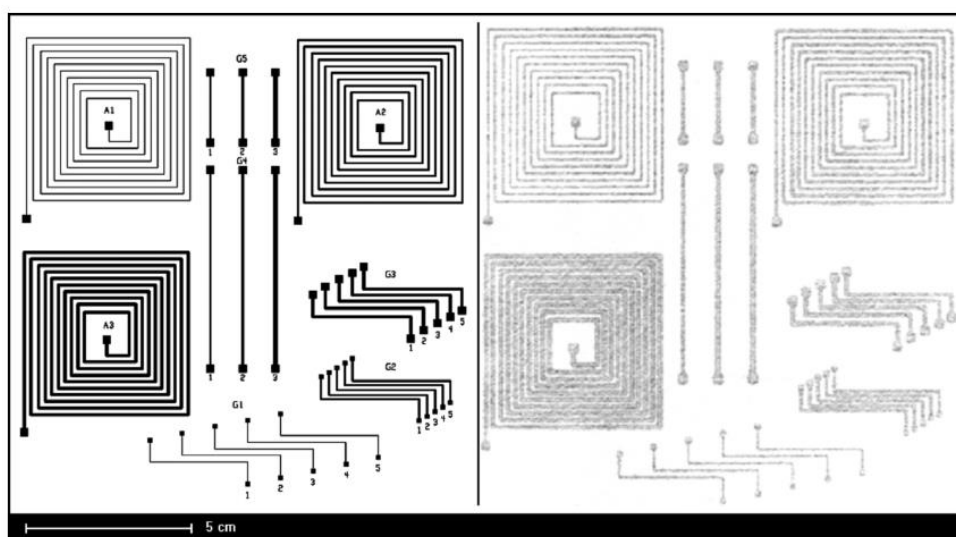
Obr. 2.10 Ukázka depozice obrazce (převzato [21]).

2.2.3 Tisk

Pro nanášení vodivé vrstvy ve formě přesných motivů je nejvhodnější tisk vodivým inkoustem. Ten musí nejenom obsahovat dostatečné množství vodivých částic (Ag, Cu, ...), ale zároveň také rozpouštědlo. Tím je u většiny inkoustů voda, ta musí být co nejčistější, aby nedošlo ke kontaminaci nečistotami. Celkové vlastnosti inkoustu (viskozita, povrchové

napětí) musí odpovídat materiálu, na který bude nanášen a použit. Stříbro, jakožto skvělý vodič, navíc s antibakteriálními vlastnostmi, se ukázalo velmi dobrou volbou při výrobě vodivého inkoustu. Obzvláště stříbrné nanočástice, při neustálé miniaturizaci elektronických součástek. Existuje několik metod pro tisk vodivých inkoustů. Pro nízko objemové, ale vysoce precizní depozice je ideální sítotisk a speciální inkoustové tiskárny. [1, 22]

Sítotisk je již tradiční metoda pro přenášení obrazce na substrát, kdy se stěrkou tlačenu na sítko protlačuje pasta. V současné době je možné tento proces řídit strojově a tak je dosahováno velmi vysoké přesnosti. Podle hustoty mřížky sítky se dá ovlivnit množství inkoustu, a tloušťka natištěné vrstvy na substrátu. V případě husté mřížky lze dosáhnout vysokého rozlišení obrazce, při řídké naopak větší tloušťky vrstvy. Vyšší tloušťka vrstvy je obecně vhodnější, co se týče vodivostních vlastností, ale naopak bývá náchylnější k mechanickému poškození. Do současné chvíle bylo provedeno několik pokusů sítotisku na textilie. Od základních elektrických součástek jako jsou odpory a kapacitory, až po nositelné antény. Pokusy se shodují na tom, že výslednou kvalitu určuje několik faktorů, nejenom ty působící stěrkou. Dle [22], jež se soustředili na tisk obvodů a embedded systémů na netkané substráty, to byly následující: viskozita pasty a úhel mezi stěrkou a sítkem. Tyto parametry určují celkovou distribuci pasty na substrátu. Ta souvisí zároveň s pórovitostí a rozměry jednotlivých vláken, na kterých je závislá hloubka vniku pasty do substrátu. [6, 22]



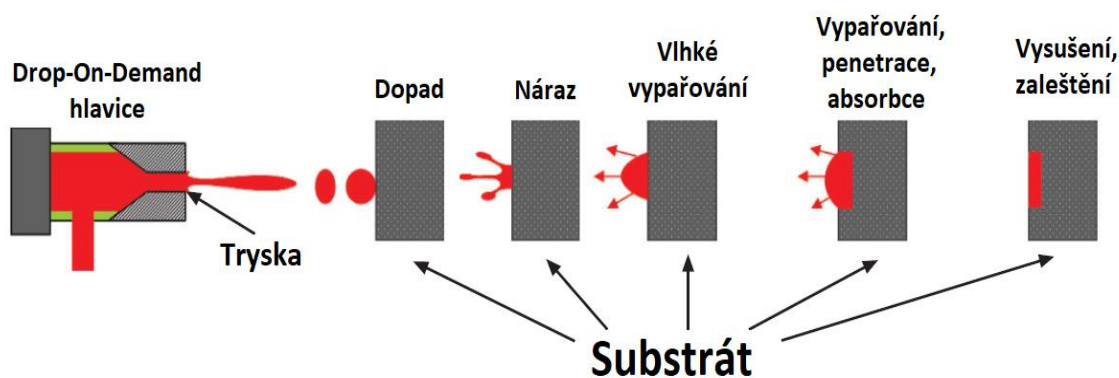
Obr. 2.11 Návrh obrazce a jeho vytisknutá podoba (převzato [22]).

Ink jet printing je jedna z potenciálně velmi vhodných technik, při které by obvod i s komponenty byly na substrát nanášeny v jednom kroku. Směr vývoje se ubírá ke snížení

času a nákladů na tisk, při udržení přívětivosti k životnímu prostředí. Dle [6] se nejvíce využívají tři základní mechanismy pro tuto metodu:

- Dot on demand (DOD) – v současné době nejčastější, jak je z názvu patrné, hlavice dodává jednotlivé kapky inkoustu na požadované místo na substrátu,
- Continuous Ink Jet (CIJ) – z trysky vychází kontinuální proud kapek za velmi krátký čas,
- Pulsed Ink Jet Heads – kombinace obou předchozích technik, proud kapek vycházející ve zvolených pulsech.

Pro vytvoření vodivých vzorců na substrátu, je nutný proces sintrování. Ten lze obecně definovat jako proces spojování částic při vysokých teplotách, avšak nižších, než je jejich teplota tání. Existuje několik způsobů sintrování, jako je mikrovlnné, termální nebo fotonické. Pro užití v e-textiliích je však nutné dávat pozor na to, aby nedošlo k poškození substrátu. Pro ty se nejlepším způsobem ukázalo sintrování chemickým činidlem za pokojové teploty, kdy bylo dosaženo vodivých vzorců na teplotně citlivých materiálech, jako jsou polymery nebo dokonce papír. [23]



Obr. 2.12 Technologie Drop-On-Demand (přeloženo z [23]).

2.3 Výroba kontaktních struktur

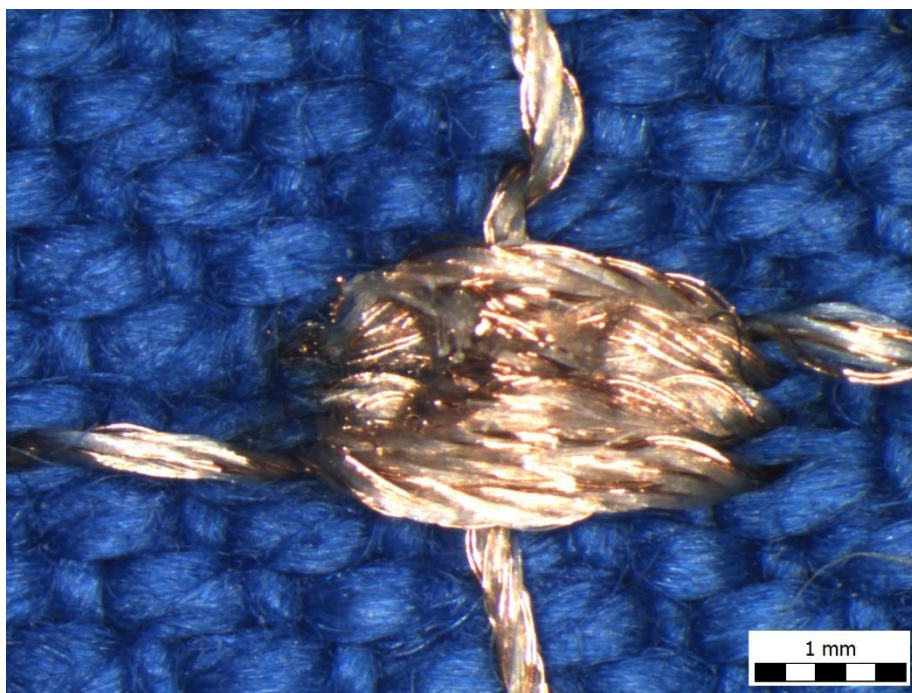
V této podkapitole jsou popsány metody a technologie pro vytváření kontaktních struktur, nevznikajících při samotném zpracování/vytváření vodivých přízí, vzorů, apod.

Při vytváření vodivých spojení ve smart textiliích je důležité, aby jednotlivé vodivé cesty byly od sebe vzájemně izolované, pro zamezení vzniku zkratu ohybem nebo například vlhkostí. Způsobů pro vytváření vodivých spojení je celá řada, některé vycházejí přímo

z technologií vyvinutých pro masovou výrobu mikroelektroniky, naopak některé jsou vytvořené specificky pro textilie. [24]

2.3.1 Mechanické spojení

Do této oblasti spadají všechny způsoby mechanického spojení, jako je sešití nebo krimpování. Obecně by se dalo říci, že se jedná o všechny spojovací metody, při kterých nedojde k roztavení materiálu. Nejsnazší způsob vytvoření vodivého spojení dvou vodivých cest je jednoduché přešití. V případě nitě se zapředeným mikro drátkem malého průměru je tento způsob velmi nespolehlivý. Nedojde-li k přímému kontaktu drátků přesně v bodě křížení, nenastane žádné spojení. Dojde-li ke kontaktu, výsledný spoj má zpravidla velký odpor, při sebemenším pohybu dojde k rozpojení a je tak nepoužitelný. Tento způsob spoje lze vylepšit vícenásobným přešitím, kterým se zvýší šance na přímý kontakt a zlepší se i mechanická odolnost, avšak ani s tímto vylepšením nelze spoj považovat za spolehlivý. [24, 25]



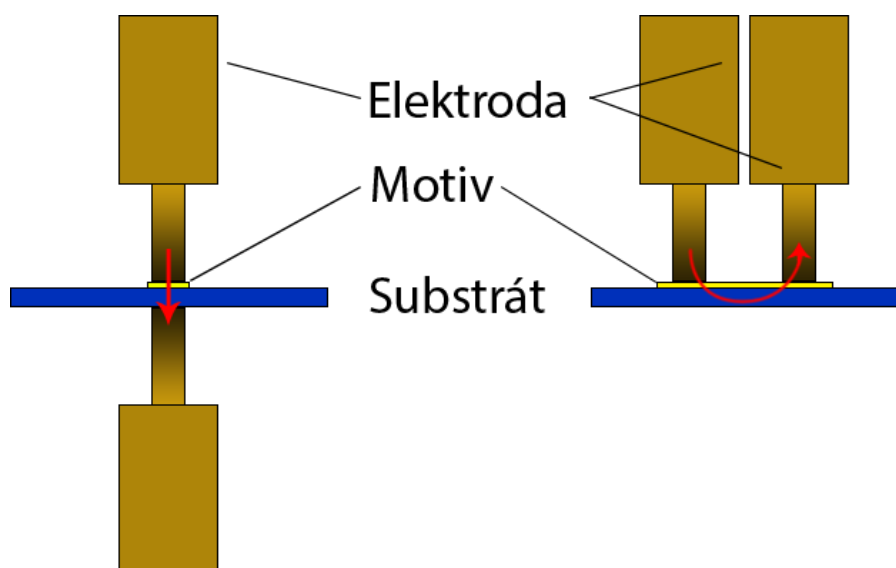
Obr. 2.13 Spoj vytvoření vícenásobným přešitím.

2.3.2 Odporové svařování

Metoda odporového svařování funguje na principu vzniku tepla průchodem proudu skrze komponenty. Pro vznik svaru musí být proud přiložen po určitý čas a elektrody musí být odpovídající silou přitlačeny na místo, kde požadujeme vznik spoje. Množství tepla

generované touto metodou je funkcí přivedeného proudu I , elektrického odporu R v místě spoje a teplotní konstanty M . Ta je funkcí vodivosti vlákna, přitlačné síly a doby průchodu proudu. [26]

Existují dva základní typy odporového svaření, lišící se způsobem přiložení elektrod. Prvním je přímé svařování, kdy je každá elektroda přiložena z jedné strany, vzájemně proti sobě. Proud tímto způsobem prochází z jedné elektrody do druhé skrze látku a dojde tak k zahřátí a následnému svaření vodivých vláken v místě doteku. V případě nepřímého svařování je proud přiveden dvěma paralelními elektrodami z jedné strany látky. Svařovací proud tak prochází z jedné elektrody skrze vodivá vlákna do druhé. Odporové svařování je metodou principiálně jednoduchou, rychlou a ekonomickou. [26]

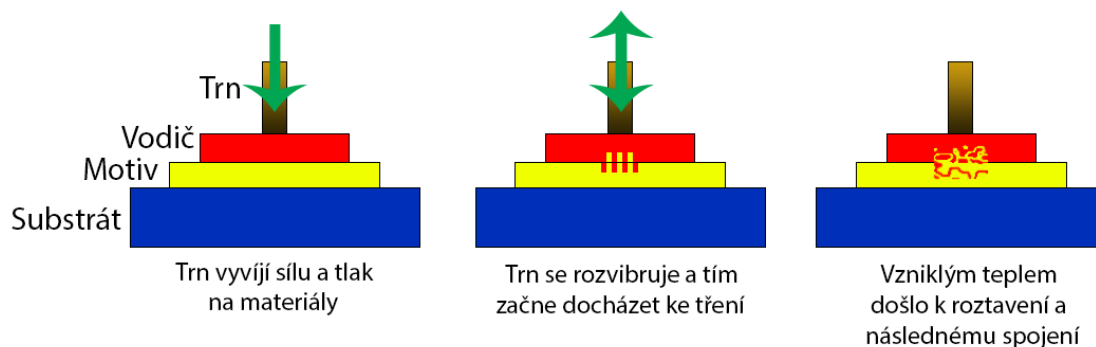


Obr. 2.14 Znáznornění přímé a nepřímé metody odporového svařování; šipka znázorňuje průchod proudu.

2.3.3 Ultrazvukové svařování

Ultrazvukové svařování je pokročilou technologií pro spojování syntetických materiálů a směsí nerozebíratelným spojením. Látka může být 100% syntetická (termoplast) nebo složena ze směsi s až 40% přírodního vlákna. V případě, že tak není, je možné vložit mezi materiály tepelně citlivý materiál, který se následně roztaví a spojí požadované místo. Princip je založen na vložení materiálu mezi vibrující trn, působící konstantní silou a statický protikus (nebo pohybující se kolečko). Vysokofrekvenčním kmitáním (20-40 kHz) trnu dochází v materiálu ke vzniku tepla třením a tím dojde k roztavení a následnému spojení materiálů. Jelikož teplo nutné pro spojení vzniká přímo v bodě styku, je procedura velmi

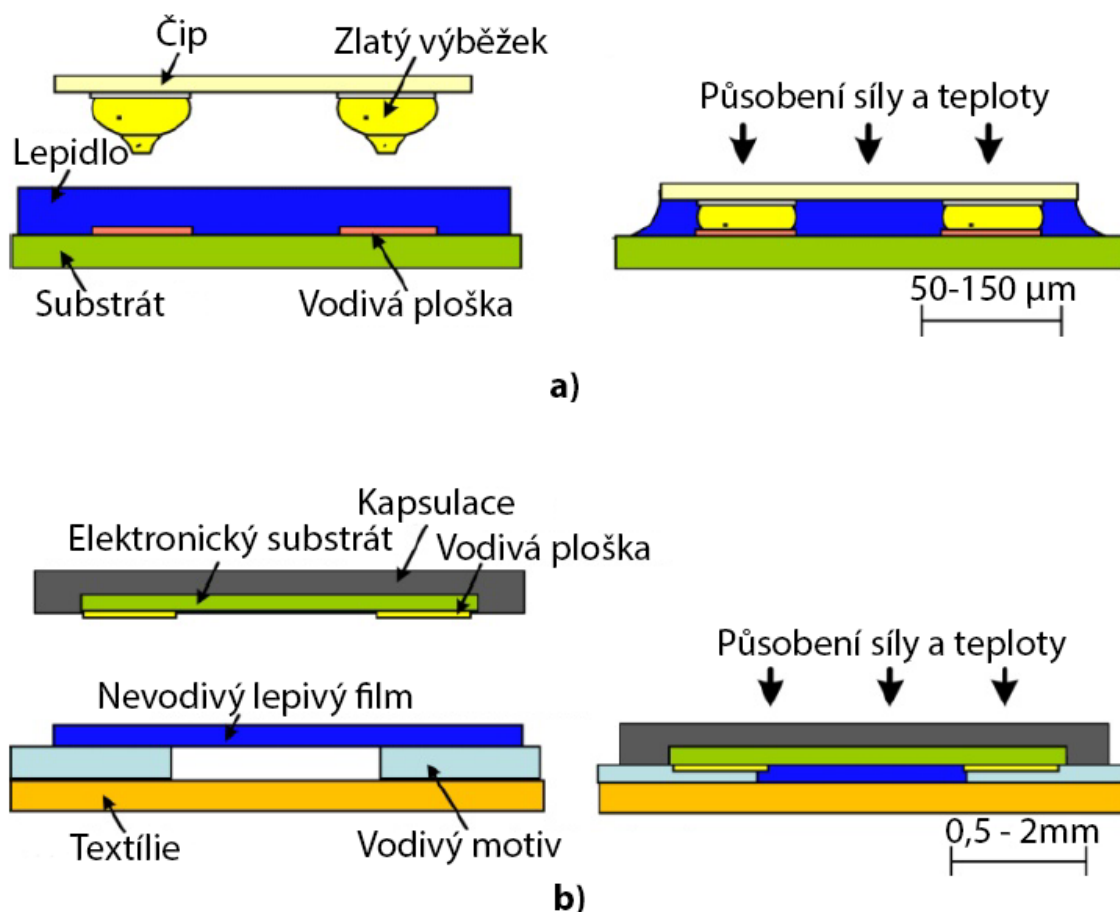
dobře říditelná. Nejčastěji je celý proces řízen počítačem, od přítlačné síly až po dobu a frekvenci vibrací. Tyto parametry se odvíjejí od materiálů, jež jsou požadovány spojit a jejich aplikace. Jedná se o velmi rychlý, čistý a ekonomický způsob svařování. Proces je znázorněn na následujícím obrázku. [27]



Obr. 2.15 Proces ultrazvukového svařování motivu na substrátu s vodičem.

2.3.4 Nevodivé lepidlo

Využití nevodivého lepidla pro vytvoření elektrického spojení není novinkou. Ve větší míře se však zatím využíval tento způsob pouze pro tzv. „flip-chip“ lepení. To probíhá tak, že čip bez krytu má na sobě malé výběžky ze zlata a je silou natlačen proti plošnému obvodu. Na tom je vrstva nevodivého lepidla, skrze které prostoupí tyto výběžky a dojde tak k vodivému kontaktu. Po vytvrzení pak toho adhesivum (obvykle na epoxidové nebo akrylové bázi) drží čip na místě. Proces vytvrzování obvykle probíhá 30 – 90 s při teplotě okolo 180 °C. V případě aplikace této metody na textilie vzniká několik problémů. Před vytvrzením mají adhesiva velmi nízkou viskozitu a nasáknou tak do tkaniny. Po vytvrzení ztvrdnou, což v oblasti přechodu mezi látkou a vodivou částí způsobuje problémy se spolehlivostí vodivého kontaktu v případě ohýbání, praní, apod. Řešením se ukázalo použití měkkých polymerů, jako je termoplastický polyuretan (TPU). Ten se totiž nemusí vytvrzovat, při teplotě vyšší než teplota tání se rozteče a po ochlazení opět ztuhne. To ovšem nutně mění proces lepení, protože před tím, než je možné přestat působit silou proti spoji, lepidlo musí plně zchladnout. Další komplikací je tak i riziko vystavení lepidla vyšší teplotě než je teplota tání, ve většině aplikací však tyto teploty nehrozí, nejedná-li se o extrémní podmínky. Opětovné roztavení lze brát ale také jako výhodu v případech, kdy je nutné spoj opravit nebo upravit. Na obrázku níže je znázorněno již zmíněné flip-chip lepení v porovnání s upravenou metodou pro lepení kontaktů na textiliích. [28]



Obr. 2.16 a) Flip-chip lepení b) Upravený proces pro textilie (přeloženo z [28]).

3 Testování parametrů kontaktních struktur

Hlavním důvodem svařování je snížení stejnosměrného odporu v místě spoje a dosažení jeho dlouhodobé stability. Jeho velikost se odvíjí od materiálu a správné metody vytvoření kontaktu. Proto je velmi důležité, aby bylo toto měření velmi přesné a opakovatelné. [26]

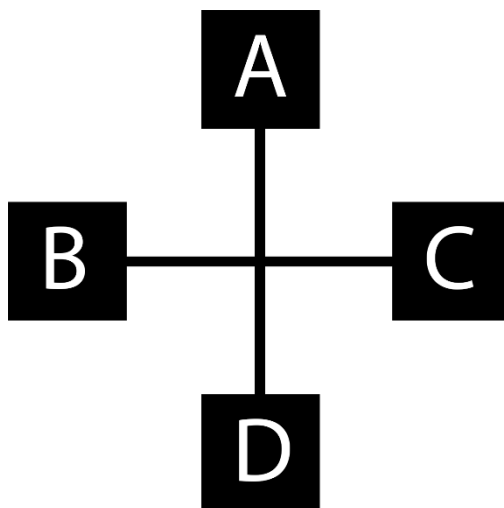
3.1 Měření stejnosměrného odporu kontaktu

Obecně lze měřit odpor jednotlivých vláken, více vláken ve svazku apod. Kontaktní odpor vzniká v místě kontaktu, ale také v místě kontaktu měřícího aparátu. Při jeho měření může dojít několika způsoby k jeho navýšení. Povrch kontaktu nemusí být vždy plochý a hladký, není vždy úplně čistý (oxidace a ostatní nečistoty), při jeho měření velmi záleží na přítlačné síle. Všechny tyto možné nepřesnosti celkově snižují opakovatelnost a přesnost měření. Faktory ovlivňující kontaktní odpor lze obecně popsat rovnicí.

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{nP}} \quad (3.1)$$

Kde ρ ($\Omega \cdot m$) je měrný elektrický odpor, H (N/m^2) tvrdost materiálu, n počet kontaktních bodů a P (N) je síla mezi měřicím přípravkem a materiálem. Měrný elektrický odpor společně s tvrdostí jsou konstanty, jejichž velikost závisí na vlastnostech materiálu. Velikost kontaktního odporu je tak nepřímo úměrná množství kontaktních bodů a síle mezi přípravkem a materiálem. Pro měření odporu existuje mnoho způsobů, mimo můstkových metod, také 2-vodičová a 4-vodičová metoda. Výhodou 2-vodičové metody je jednoduchost, avšak není vždy spolehlivá. Do výsledné změřené hodnoty se totiž promítne odpor přírodních kabelů, materiálu nebo samotného měřicího vybavení. To je při měření velmi malých odporů, jako jsou ty v kontaktech, nepřijatelné a proto je tato metoda vhodná spíše pro orientační měření. [29]

Všechny tyto nevýhody odstraňuje 4-vodičová metoda (orig. Greek cross), jež se pro měření velmi malých odporů používá ve všech odvětvích. Typická struktura je znázorněna na Obr. 3.1. Hodnota odporu je získána přímo ze středu kříže s dosažitelnou přesností $>0,1\%$. [30]



Obr. 3.1 Základní schéma 4-vodičové metody pro měření malých odporů (překresleno z [30]).

Odpor je určen průchodem proudu mezi ploškami A a B a změřením rozdílu potenciálu mezi C a D. Směr proudu je poté obrácen, potenciál UDC změřen a získána prvotní hodnota odporu dána vztahem:

$$R_{0^\circ} = \frac{U_{DC} - U_{CD}}{I_{AB} - I_{BA}} \quad (3.2)$$

proud poté prochází mezi B a C a celý proces se opakuje, popsáno vztahem:

$$R_{90^\circ} = \frac{U_{AD} - U_{DA}}{I_{BC} - I_{CB}} \quad (3.3)$$

výsledná hodnota odporu je poté vypočtena průměrem z těchto dvou změřených hodnot

$$R = \frac{R_{0^\circ} - R_{90^\circ}}{2}. \quad (3.4)$$

Tato konečná hodnota je tak odpor pouze samotného kontaktu, bez přívodních vodičů a dalších elementů, jež by mohly způsobit nepřesnost. [30]

3.2 Zátěžové testy

Obecně lze říci, že pro testování elektroniky v textiliích neexistují žádné standardizované testy na spolehlivost. Je to z důvodu velké různorodosti zátěže, odvíjející se z aplikace (móda, zdravotnictví, extrémní podmínky,...). Pro některé aplikace je vhodnější testování praním, pro jiné natahováním či nošením. I přes tuto nemožnou generalizaci existuje však několik postupů z jiných odvětví, doporučených pro testování těchto struktur. [17, 31]

Jedním ze základních testů je praní. To se řídí dle mezinárodně uznávané normy ISO 6330 Textilie - Postupy domácího praní a sušení pro zkoušení textilií. Tento standard stanovuje postupy vhodné nejenom pro oděvy, ale také plošné textilie a další textilní výrobky, které jsou podrobovány domácímu praní a sušení. Ustanovuje pracovní postupy dle referenčních praček několika typů (A,B,C), podle teplot (30 °C – 90 °C) v závislosti na aplikaci a také sušení. [31, 32]

Další velmi často používaný test, jsou teplotní cykly. Ty se v odvětví elektroniky vyskytují běžně, obvykle pod standardem od společnosti JEDEC®. Tyto normy se prokázaly jako aplikovatelné i v odvětví smart textilií. V institutu pro spolehlivost a mikrointegraci ve Fraunhoferu byl pro testování elektroniky v textiliích použit JESD22-A104-C. Tento

standard obsahuje několik různých teplotních rozmezí dle aplikace. Pro spotřebitelskou elektroniku bylo použito nastavení N, jež obsahuje testování při teplotách $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy každá teplota trvá po dobu 15 minut, s celkovým počtem cyklů 1000. [31, 33]

Na universitě v Ghentu v Centru pro mikrosystémy byly provedeny zátěžové vlhkostní testy za konstantní teploty, jež se řídily opět standardem od společnosti JEDEC[®], přesněji JESD22-A101-B. Ten doporučuje teplotu $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 85% relativní vlhkost, po dobu 1000 hodin. Další z možných alternativ byly standardy ISO a to ISO 105 a ISO4892-3:2006. [31–33]

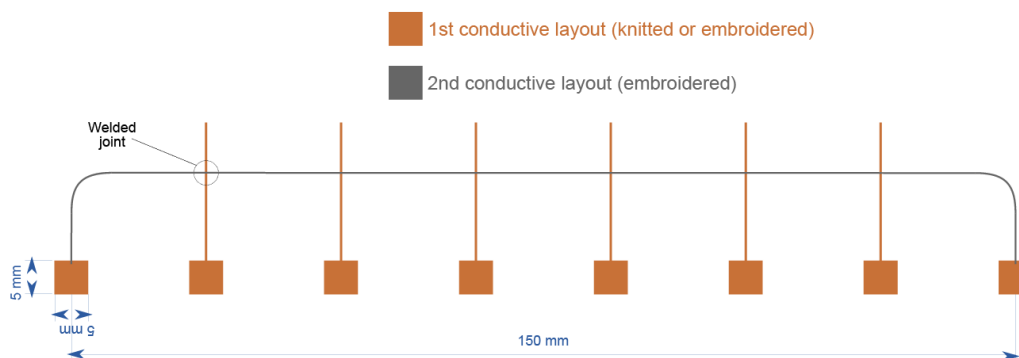
Na zmíněném institutu ve Fraunhoferu byly také provedeny testy spolehlivosti elektroniky proti pocení, dle normy EN ISO 105 – E04, která je původně určena pro testy na stálobarevnost. Na universitě v Ghentu proběhly také zkoušky na zmačkání, dle standardu ISO7854:1995, metoda C. Nizozemská organizace pro aplikovaný vědecký výzkum TNO dala návrh na testy natahováním dle standardu ISO13934-1:1999 a také pro testy oděrem tzv. Martindale test (ISO 12947-2:2002). Je tedy zřejmé, že i přes neexistenci testů přímo určených pro smart textilie, resp. elektroniku na textiliích, lze použít celou řadu standardizovaných testů z podobných odvětví. [31, 32]

4 Praktická realizace a zkoušky kontaktních struktur

V této části práce je proveden návrh a realizace prvotních vzorků společně s vhodnými přípravky pro měření vybraných parametrů kontaktních struktur. Po vytvoření, měření a komplexní analýze těchto prvotních vzorků je poté vytvořena série testovacích vzorků s parametry, vhodnými pro zátěžové testy a získání výsledků.

4.1 Návrh prvotních motivů

Obecně pro všechny testovací motivy je důležitá universálnost. Jak pro snazší výrobu a realizaci, tak i pro jednoduché a přesné opětovné měření zvolených parametrů a následné testování. Softwarem vhodným pro vytvoření motivu byl zvolen Inkscape. Jedná se o open source multiplatformní vektorový grafický editor. Prvotní návrh motivu lze vidět na *Obr. 4.1*. Obsahuje dostatečné množství křížení pro otestování správného umístění elektrod, přítlačné síly i velikosti proudu. Zároveň má několik vyšitých širokých plošek, vhodných pro testování přivařování vnějších drátů a drátků. Pro úvodní seznámení s odporovým svářením a vodivými nitěmi, tedy naprosto ideální. Při návrhu museli být brány v potaz i možnosti přípravků pro měření zvolených parametrů.



Obr. 4.1 Prvotní motiv.

4.2 Přípravky pro měření parametrů

Nejdůležitější parametr při vytváření kontaktních struktur je odpor kontaktu samotného. Ten se pohybuje ve velmi malých hodnotách <1 Ohm. Na měření takto malých odporů je nejvhodnější tzv. 4-vodičová metoda pro měření malých odporů, blíže popsána v kapitole 3.1. Návrh měřicího přípravku pochází od Ing. Silvana Pretla Ph.D., který se touto

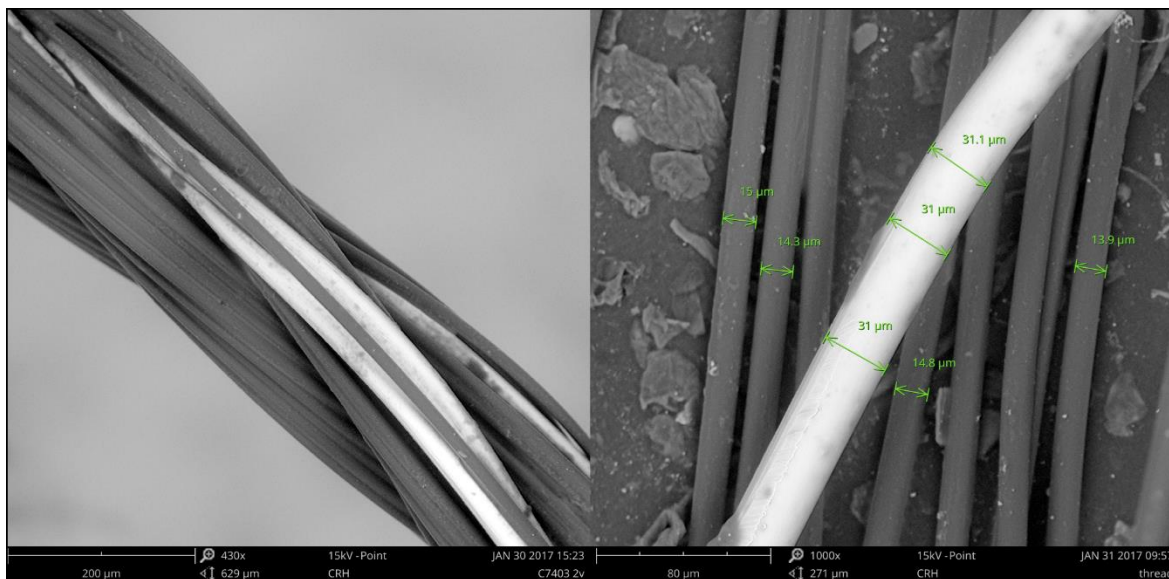
problematikou také zabývá. Jak lze vidět na *Obr. 4.2*, měřící přípravek (dále měřící sonda), je tvořen dvěma pružnými jehlami, plastovým tělem a samariovým magnetem. Ten dostal přednost před neodymovým, protože je odolný vůči vysokým teplotám a lze ho tak použít pro testy stárnutí za zvýšených teplot. Princip měření je velmi jednoduchý, použije se kovová podložka, na ní vrstva izolantu a na tu se umístí měřený vzorek. Rozpětí elektrod, které jsou připojené do měřicího přístroje, odpovídá velikosti motivu a magnet poslouží k rychlé a pevné fixaci celého přípravku. O konstantní přitlačnou sílu se starají zmíněné pružné jehly. Tyto měřící sondy zároveň umožňují nejenom 4-vodičovou metodu pro měření odporů, ale také 2-vodičovou pro případ, kdy není nutná taková přesnost výsledků (testování, orientační měření).



Obr. 4.2 Měřící sonda.

4.3 Výroba prvotních motivů

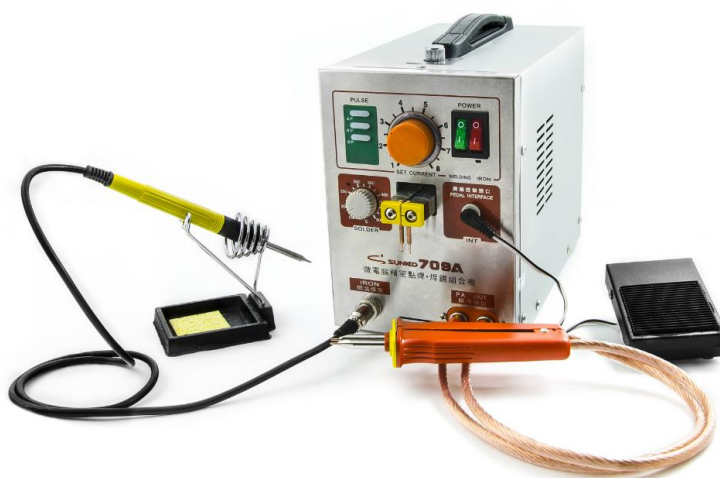
Fyzická realizace prvotních vzorků probíhala pod dohledem Ing. Daniely Moravcové, Ph.D., užitím přístroje značky Bernina s modelovým označením QE750. Materiál substrátu je 100% polyester, vodivé motivy jsou realizovány vodivou hybridní šicí nití, která se skládá z polyesterových vláken a osmi mosazných mikrodrátků s průměrem 30 μm . Tato hybridní niť nese označení 25a.



Obr. 4.3 SEM snímky použité hybridní nitě.

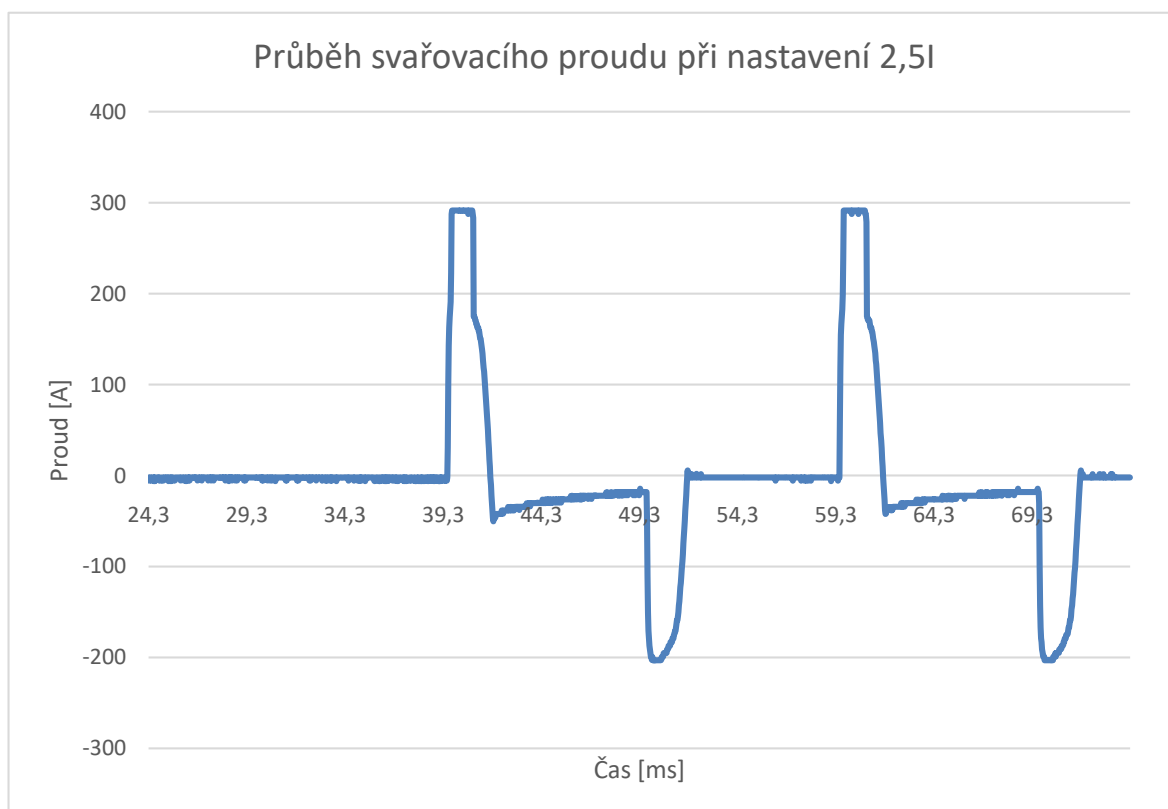
4.4 Realizace kontaktních struktur na prvotních motivech

Technologií pro tvorbu kontaktních struktur bylo zvoleno odporové sváření. Bližší informace o odporovém sváření lze nalézt v kapitole 2.3.2. Použitá odporová svářečka je značky Sunko, model 709a. Umožňuje sváření pomocí elektrod umístěných na těle svářečky anebo použitím přiložených ručních elektrod, umožňujících přímé i nepřímé sváření. Obsahuje tlačítka pro nastavení množství svařovacích pulsů (2, 4, 6, 8) a otočný regulátor svařovacího proudu na stupnici 1-8. Dle parametrů uváděných výrobcem umožňuje tato svářečka svařovací proudy v rozsahu 50 – 500 A.



Obr. 4.4 Odporová svářečka Sunko 709a.

Pro analýzu průběhu proudu používaného ke sváření byla použita měřicí proudová sonda od společnosti Keysight, modelové označení 1146A, jež se připojila k osciloskopu a bylo tak možné v reálném čase zaznamenat skutečný průběh pulsu. Toto měření bylo provedeno pro různá nastavení velikosti proudu při základním nastavení počtu pulsů, tedy 2. Data z osciloskopu byla poté vyextrahována do formátu .csv, aby s nimi bylo možné pracovat v Excelu.



Obr. 4.5 Graf průběhu proudu generovaného svářičkou.

Graf výše znázorňuje typický průběh svařovacího proudu při nastavení 2,5 stupně. Každý z pulsů je složen z kladné a záporné půl-vlny, trvající pouze několik milisekund. Špičkové hodnoty proudů dosahují v kladné půlvlně 288 A a v záporné -202 A. Jak již bylo zmíněno v kapitole o odporovém sváření, svár vzniká vytvořeným teplem v místě spoje, toto teplo je závislé na velikosti proudu, odporu vodivých vláken, teplotní konstantě a času.

Pro potřeby této práce bude energie potřebná pro vytvoření určitého sváru vyjádřena nábojem, jenž lze popsat vztahem $Q = I \cdot t$. Kde I je velikost přivedeného proudu a t je doba jeho trvání. Celková velikost tohoto náboje je ekvivalentní ploše pod křivkou daného průběhu. Za běžných podmínek je tato plocha spočítána užitím určitých integrálů, Excel však

tuto funkci neobsahuje. Alternativním řešením s dostatečně velkou přesností je rozdělení průběhu na fragmenty, vypočtení plochy každého z nich a jejich výsledné sečtení. Lze říci, že se jedná o stejný princip jako u vzorkování signálu. V praxi lze tento proces popsat vztahem

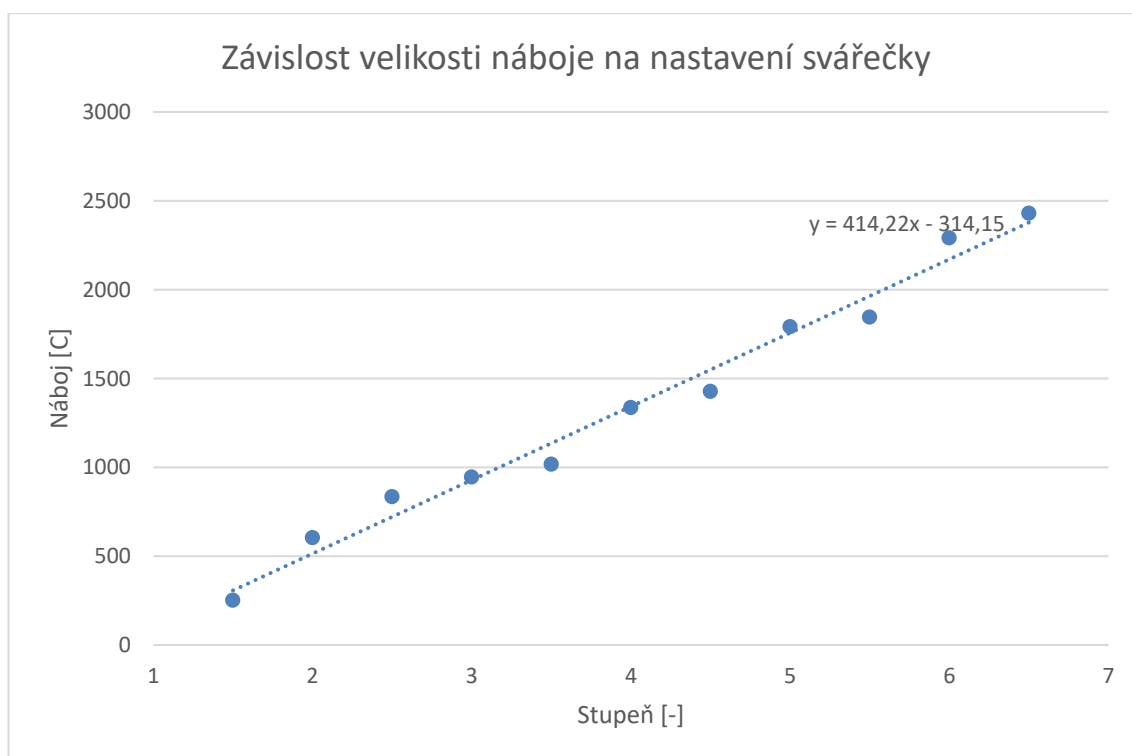
$$Q = \frac{I_1+I_2}{2} * \Delta t + \frac{I_2+I_3}{2} * \Delta t \dots \frac{I_n+I_{n+1}}{2} * \Delta t \quad (4.1)$$

Kde I_1 a I_2 jsou hodnoty proudu ohraničující daný segment a Δt je jeho šířka definována časem. První částí tohoto vztahu se určí průměrná hodnota, čímž se zvýší přesnost tohoto výpočtu. Velikost Δt , lze říci délka kroku vzorkování, byla zvolena 0,01 ms, která zaručuje dostatečnou přesnost pro výpočet. Tento proces byl proveden pro všechny změřené průběhy a výsledkem je převodní tabulka.

Tab. 4.1 Převodní tabulka pro užitou odporovou svářečku

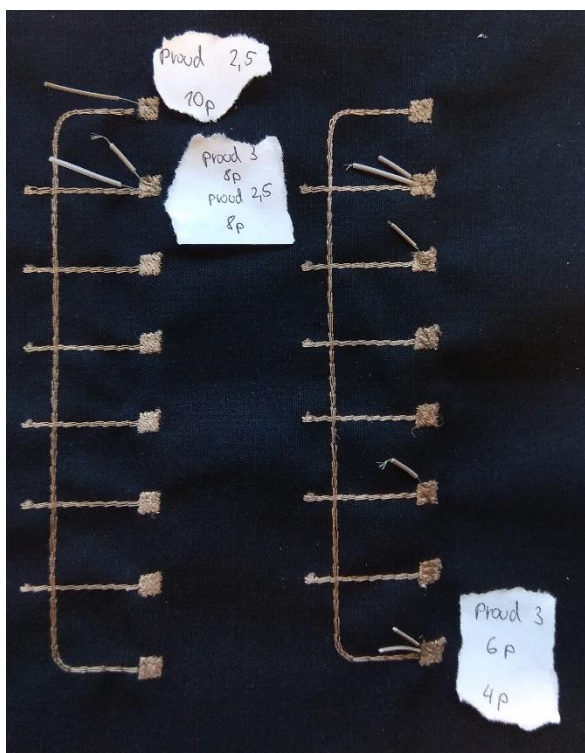
Stupeň	Q [C]	Imin [A]	Imax [A]	t celk [ms]
1,5	251	-187	26	2,9
2	603	-4	291	6,2
2,5	834	-202	288	25,1
3	945	-202	288	26,35
3,5	1017	-218	291	27,18
4	1336	-219	291	28,5
4,5	1427	-219	291	28,8
5	1791	-219	291	28,9
5,5	1845	-219	291	29
6	2291	-219	291	30,2
6,5	2430	-219	291	41,25

V tabulce je znázorněna velikost energie ve formě náboje dodávaná do svařovaného spoje v závislosti na nastavení odporové svářečky. Dále také hodnoty proudových špiček pulsů jak v kladné, tak i záporné části průběhu. Posledním údajem je samotná délka pulsů vyjádřena v milisekundách. I přes podobné délky těchto pulsů, od stupně 3 a dále, je poté nárůst energie způsoben samotným průběhem, kdy se místo jedné proudové špičky v pulsu objeví ještě další částečný. Takový průběh lze najít v příloze A1. Jak lze vidět v následujícím grafu, závislost nastavení stupně na velikosti dodávaného náboje je takřka lineární, což odpovídá teoretickému předpokladu.



Obr. 4.6 Znárodnění linearitý mezi stupněm nastavení a velikostí náboje.

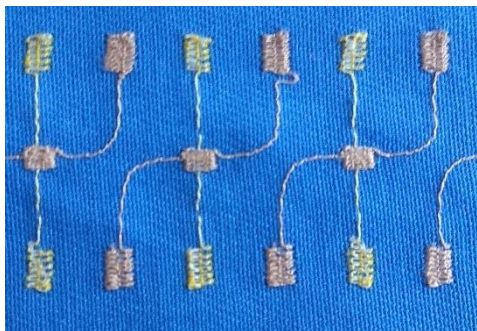
Samotné vytváření kontaktů na prvotních vzorcích probíhalo následovně. Jako první byly vybrány elektrody pro nepřímé sváření, protože práce s nimi je velmi jednoduchá a intuitivní. Po provedení každého spoje následovalo jeho vizuální prozkoumání pod mikroskopem a změření kontaktního odporu. K měření byl použit stolní multimetr od firmy Keithley, model 2701, ke kterému byly připojeny již zmíněné měřicí sondy. Pro ověření přesnosti a opakovatelnosti měření bylo měření odporu prvních vytvořených spojů provedeno vícekrát. Sonda byla přiložena, po ustálení se odečetla hodnota, poté byla sonda odejmuta a opět přiložena. Tento proces byl proveden desetkrát u celkově dvaceti spojů. Při statistickém vyhodnocení těchto naměřených hodnot byla zjištěna směrodatná odchylka hodnot $< 0,001 \Omega$. Na základě tohoto faktu byla všechna další měření provedena pouze jednou, s předpokladem dostatečné přesnosti. Jak lze vidět na Obr. 4.7 na těchto prvotních vzorcích byly také vyzkoušeny vhodné parametry pro přivařování vnějších drátků na vyšité motivy.



Obr. 4.7 Prvotní vzorek.

Tyto prvotní vzorky dostatečně posloužily pro první seznámení s odporovým svářením, chováním materiálů a správnou manipulací s odporovou svářečkou. Byly získány parametrické předpoklady pro vhodné velikosti proudů pro tvorbu kontaktů s dostatečně malým odporem pro správnou funkčnost. Vodivé cesty těchto vzorků byly však trojitě šité, což nebylo plánované pro vzorky testovací. Ideální parametry pro tvorbu kontaktů se tak mohly lišit a bylo tedy nutné je otestovat na vzorcích, které odpovídají vlastnostmi vzorkům testovacím.

V rámci seznamování s odporovým svářením a vlastnostmi užitých materiálů, bylo provedeno ještě několik pokusů. Jedním z nich bylo vytvoření kontaktu na stejném motivu jako testovací vzorky, ale jeden z motivů v křížení byl vytvořen jinou nití, značenou 7a, užívanou většinou jako liniový senzor. Ta byla tvořena 99 vlákny polyesteru a jedním mikrodrátkem o průměru 20 μm z nerezové chromniklové oceli.



Obr. 4.8 Motiv tvořen z různých nití 25a a 7a.

Největším problémem této kombinace nebyla samotná tvorba kontaktů, ale jejich následné vyhodnocení. Tím, že v niti 7a je pouze jeden vodič, bylo téměř nemožné uchytit měřící sondu na plošku tak, aby došlo ke stálému spojení a tedy ke spolehlivému změření odporu. Tento fakt byl dále zkomplikován tím, že zpočátku nebylo jasné, zdali nedošlo k přetavení vodiče již v místě kontaktu anebo pouze k jeho nespojení s měřící sondou. Částečným řešením se ukázalo zakápnutí plošky, na kterou se připojovala měřící sonda pastou, obsahující stříbrné částice. Ty vyplnily mezery mezi vlákny a kontakt s měřící sondou se zlepšil. Bylo zjištěno, že vhodnější pro tvorbu kontaktů jsou vyšší hodnoty dodávané energie do spoje (nastavení svářečky na 6I), ale s malým množstvím pulsů. Daly se tak vytvořit spoje s nízkou hodnotou odporu, avšak z důvodu jednoho samostatného vodiče v niti 7a, bylo téměř nemožné dosáhnout reprodukovatelnosti spojů s dobrými vlastnostmi. Tento fakt vyloučil užití tohoto upraveného motivu pro testovací vzorky.

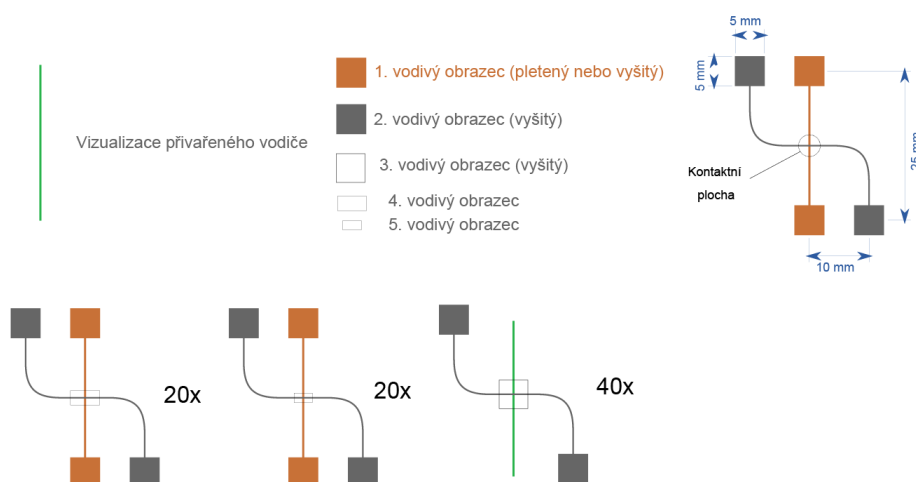
Dalším pokusem bylo svařování pokovených tkanin. Ty pocházely od firmy Shieldex[®], zabývající se výrobou vodivých tkanin různých druhů. Byla testována svařitelnost látek na sebe samotné, ve formě dvou proužků tvořících jednoduché křížení. Zjištěné poznatky jsou shrnuty v následující tabulce. Na fotce je vždy ukázka materiálu a příslušný název látky, jejíž přesné parametry je možné dohledat na stránkách výrobce. Obecně pro všechny testované vzorky lze říci, že pro lepší kvalitu spoje i jeho mechanické vlastnosti jsou vhodnější vyšší hodnoty dodané energie.

Tab. 4.2 Vlastnosti svařovaných pokovených tkanin

Typ	Hodnota odporu a metoda svařování			Vlastnosti
	↓↓I3,5;8p	↓↓I4,5;8p	↓↑I4,5;8p	
# 12 Shieldex Kassel RS	0,0046	0,0048	0,0042	Dobrý odpor, ale mechanicky velmi křehké, stačí velmi malá síla k odtržení, důvodem je pravděpodobně spojení pouze několika málo vláken.
# 10 Shieldex Bonn	0,005	0,027	0,0027	Při užití ↓↓ elektrod velmi mechanicky neodolné, při užití většího náboje dojde spíše než ke zvýšení mechanické odolnosti spoje k přepálení. Při užití ↓↑ o poznání lepší spoj, avšak stále poměrně křehký.
# 11 Shieldex Kiel + 30	0,004	0,0045	0,0041	Velmi dobře svařitelné použitím větší energie, nedochází k přepálení a mechanicky jsou spoje velmi odolné. Lze užit oba druhy elektrod, při větší tloušťce proužku látky lepší ↓↑.
# 14 Cu-plated Tafetta fabric	nespojeno	0,0081	0,0041	Při použití nižšího náboje ↓↓ nedošlo ke spojení a nebo ano, ale velmi slabému, kdy při jakékoliv manipulaci došlo k rozpadnutí. Při užití většího náboje došlo většinou k přepálení. Při použití ↓↑ stačil menší náboj pro spojení, ale i tak, velmi slabé spojení.

4.5 Návrh obvodů pro testovací vzorky

Důležitým faktorem zjištěným na prvotních vzorcích bylo, že pro zvýšení spolehlivosti a parametrů spoje, i pro snazší tvorbu kontaktu samotného, je výhodné plochu spoje rozšířit. Tento fakt byl brán na zřetel při navrhování testovacích vzorků. Pro maximální přesnost měření byl motiv navržen tak, aby byl přizpůsoben pro měření 4-vodičovou metodou. Zároveň, aby stále splňoval rozměry pro měřicí sondy a umožňoval současné připojení sond ke všem deseti vzorkům v řadě. Pro kredibilitu výsledků bylo nutné vytvořit dostatečné množství ideálně identických spojů, a to pro každou variantu motivu.



Obr. 4.9 Ukázka typů motivů pro testovací vzorky.

Jak lze vidět v návrhu motivů, jeden typ je tvořen křížením, avšak v místě samotného křížení je několikanásobné přešití vodivou hybridní nití, tvořící plošku o rozměrech 2,5x5 mm. Motivů tohoto typu bylo vyrobeno 20 kusů, pro zajištění dostatečného množství vzorků pro následné testy. Další typ motivu je podobného typu, avšak několikanásobné přešití, tvořící plošku v místě křížení, je o ploše 5 mm². Opět bylo vytvořeno 20 kusů testovacích vzorků pro testování. Poslední variantou motivu je vyšitá pouze jedna vodivá cesta ve tvaru písmene „S“, bez křížení. Ve středu vodivé cesty (místě, kde u ostatních vzorů dochází ke křížení), je přešitím vytvořena velká ploška, připravena pro přivaření vnějšího vodiče. Vodivá cesta společně s velkou ploškou, jsou vytvořeny v rámci jednoho vyšívacího cyklu bez přerušení. Tohoto typu motivu bylo vytvořeno 40 kusů testovacích vzorků, protože budou testovány dva druhy vodiče.


4.6 Realizace obvodů testovacích vzorků

Fyzická realizace testovacích vzorků opět probíhala pod dohledem Ing. Daniely Moravcové, Ph.D., užitím přístroje značky Bernina s modelovým označením QE750. Materiálem substrátu zůstal 100% polyester, vodivé motivy byly realizovány stejnou vodivou hybridní šicí nití, která se skládá z polyesterových vláken a osmi mosazných mikrodrátků s průměrem 30 μm, označení 25a. Hlavním rozdílem oproti prvotním vzorkům je ten, že všechny vodivé cesty jsou realizovány pouze jednou nití.

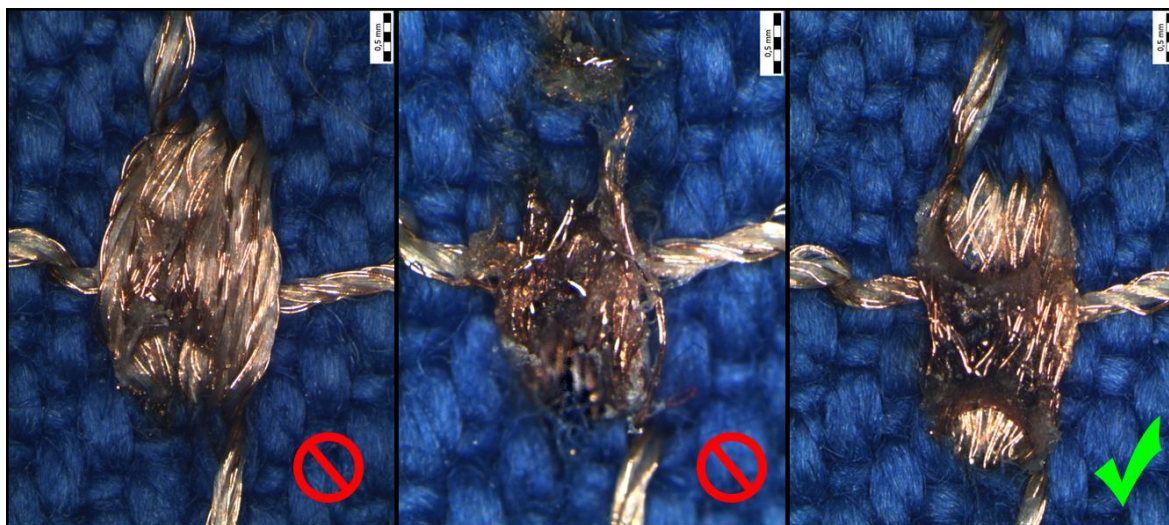
4.7 Realizace svařovaných spojů vzorků testovacího motivu

Z důvodu zmíněné odlišnosti testovacích vzorků oproti prvotním bylo nutné provést úpravu ideálních svařovacích parametrů pro vytvoření co nejkvalitnějších kontaktů. Díky znalostem získaných z prvotních vzorků byl tento proces značně zjednodušen, zabral méně času a způsobil menší množství nekvalitních kusů.

4.7.1 Vzorky s malou ploškou

Prvním typem vzorků pro ověření ideálních parametrů bylo křížení s malou ploškou přešití uprostřed, která má plochu 5 mm². Ten byl primárně určen pro použití elektrod nepřímé metody svařování (dále ↓↓) s jejich umístěním, na plošce křížení takto . Dle předpokladů bylo možné touto metodou dosáhnout velmi dobrých výsledků, dodrželo-li se několik zásad. Velikost dodané energie musela být adekvátní, umístění elektrod správné a

přítlačná síla dostatečná. Jak lze vidět na Obr. 4.10, výsledný kontakt poté odpovídá jedné ze tří variant v závislosti na tom, jaké parametry se porušily a jaké dodržely.




Obr. 4.10 Kontaktní struktura vytvořená nepřímým svařováním.

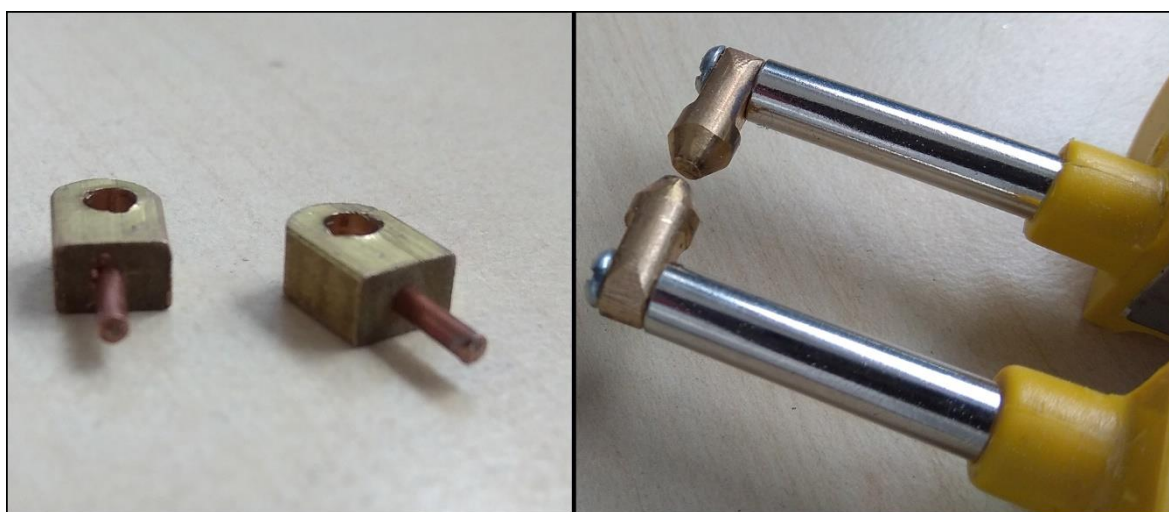
První část obrázku ukazuje kontakt, při jehož vytváření nebyl použit dostatečně velký proud (1,5I;8p), podobně vypadá kontakt i v případě použití správného proudu, ale s malou přítlačnou silou. Je patrné lehké ztmavení polyesterových nití, avšak nedošlo k žádnému spojení vodivých mikrodrátků. Co se týče změřeného odporu tohoto kontaktu, ten se jen velmi málo liší od kontaktu pouze přešitého ($\sim 10 \Omega$).

Druhá část obrázku reprezentuje kontakt v případě použití příliš vysokého nastavení svářečky (3,5I;4p). Jak je na první pohled patrné, došlo k výraznému poškození polyesterových nití a i při případném vytvoření metalurgického spoje vodičů v místě plošky je tento kontakt absolutně nepoužitelný.

Poslední část obrázku znázorňuje kontakt, při jehož vytváření byly dodrženy všechny parametry. Elektrody byly přiloženy na správná místa s dostatečnou silou, velikost proudu byla adekvátní. V místě spoje jsou patrné znaky metalurgického spoje mikrodrátků, zároveň došlo k natavení polyesterových vláken, což zajišťuje další mechanické zpevnění. Takto provedený kontakt dosahuje hodnoty odporu v řádech desítek miliohmů.

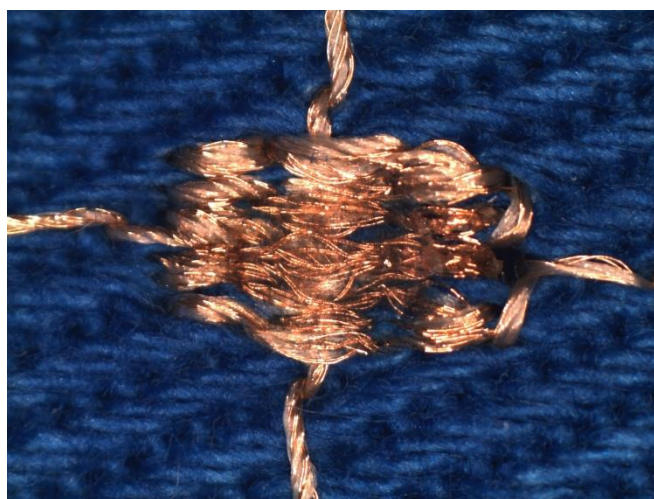
4.7.2 Vzorky s velkou ploškou

Tento typ vzorků, kde se v křížení vyskytuje velká přešitá ploška o velikosti 12,5 mm², byl původně určen opět pro svařování elektrodami $\downarrow\downarrow$, avšak s jejich umístěním takto . Při otestování tohoto způsobu vytváření kontaktů se však došlo k závěru, že není vhodný. Ve většině případů bylo dosaženo horších výsledků než při prvním způsobu umístěných elektrod a hlavně mnohem horší reprodukovatelnosti výsledků. Alternativou se tak ukázalo užití elektrod pro přímé svařování ($\downarrow\uparrow$), avšak ani zde to nebylo bez komplikací. Při pokusech o vytváření kontaktů touto metodou bylo velmi obtížné přiložit hroty elektrod přesně na potřebné místo. Průměr hrotu konvenčních elektrod je totiž pouze 1,6mm a konstrukce elektrod samotných dělá tento proces velmi obtížný. Obsahují totiž plíšek, který drží hroty v konstantní vzdálenosti, ale zároveň tak neumožňuje vložení většího množství materiálu substrátu mezi elektrody. Je tak téměř nemožné hroty přiložit na správné místo. V případě odstranění plíšku je možné materiál mezi elektrody vložit, avšak hroty samotné jsou velmi na volno a proces přiložení hrotu na správné místo je tak ještě obtížnější. Tyto faktory způsobily absolutní nereprodukovatelnost kontaktů, které by dosahovaly alespoň přibližně stejných parametrů. Pro zachování možnosti $\downarrow\uparrow$ svařování tak bylo nutné vymyslet způsob, jak tento problém vyřešit. Nejsnazší variantou se ukázala výroba vlastních elektrod s větší styčnou plochou, které je možné do současných kleštin. Materiálem pro jejich výrobu byla zvolena mosaz. Výsledkem tak byly hroty, přesně pasující do upínacího systému současných elektrod, s průměrem hrotu 3 mm.



Obr. 4.11 Porovnání originálních a vyrobených elektrod pro přímé svařování.

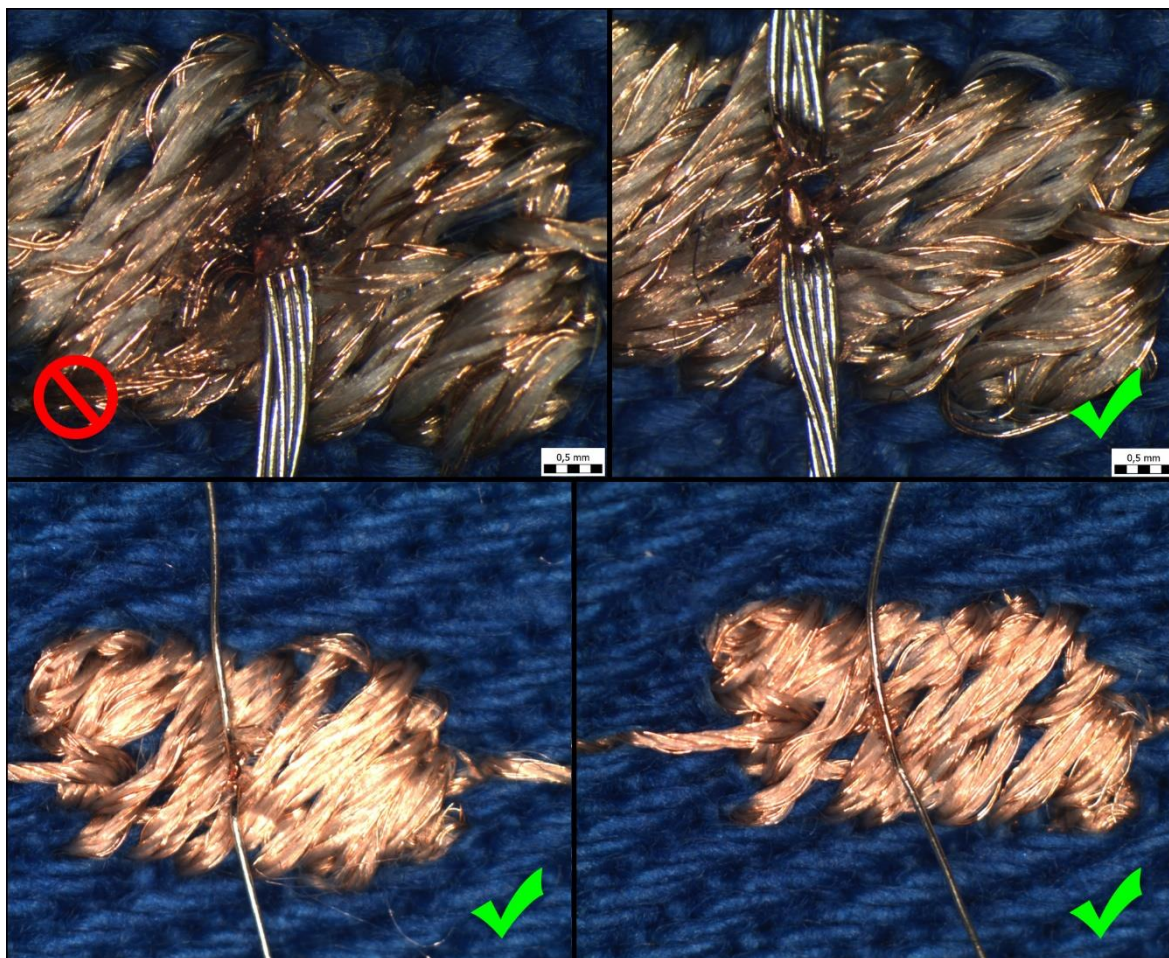
Tyto nové upravené elektrody se ukázaly jako velmi efektivní. Díky jejich ploše bylo možné vyjmout plíšek, jenž drží hroty u sebe. Materiál substrátu se tak dal snáze vložit mezi elektrody a hroty tak jednoduše přiložit na požadované místo. U tohoto druhu sváření se velmi snadno generuje konstantní přitlačná síla a tím, že velikost hrotů je menší než velikost plošky, je snadná i reprodukovatelnost. Vzhledem k větší ploše elektrod je nutné během svařování dodat do svaru větší množství energie. Výsledkem jsou realizované kontakty bez větších známek fyzického poškození nebo ztmavení, které dosahují odporu v řádu miliohmů.



Obr. 4.12 Kontakt vytvořený přímou metodou svařování (4I; 8p).

4.7.3 Vzorky pro přivaření vnějšího vodiče

Posledním typem vzorků byl vyšitý motiv bez křížení, s vyšitou ploškou na středu, jež je určena pro přivaření vnějšího vodiče. Přivaření bylo provedeno pomocí $\downarrow\downarrow$ elektrod. Selekcce nejvhodnějšího vodiče proběhla z pěti adeptů. Vybrán byl svazek sedmi drátků, každý z nich s průměrem 120 μm a poté samostatně jeden vodič z tohoto svazku. Problémem u těchto vodičů bylo najít vhodné množství dodané energie, aby došlo k přivaření vodiče k plošce, ale zároveň aby nedošlo k jeho přílišnému roztavení, které by ovlivnilo mechanické vlastnosti celého spoje. U svazku se dle teoretických předpokladů velikost dodané energie ve formě náboje vhodného pro vytvoření kontaktu pohybovala ve vyšších hodnotách. V případě přetavení vodiče a vytvoření metalurgického spoje s vodiči v plošce bylo dosaženo skvělé hodnoty odporu a i mechanické odolnosti. Po nalezení ideální velikosti dodané energie, pozice elektrod a přitlačné síly, vznikly kontakty s velmi dobrou hodnotou odporu (desítky miliohmů) a solidní mechanickou odolností. Nutno podotknout, že svazek má již ze své podstaty větší mechanickou odolnost, než samostatný vodič.

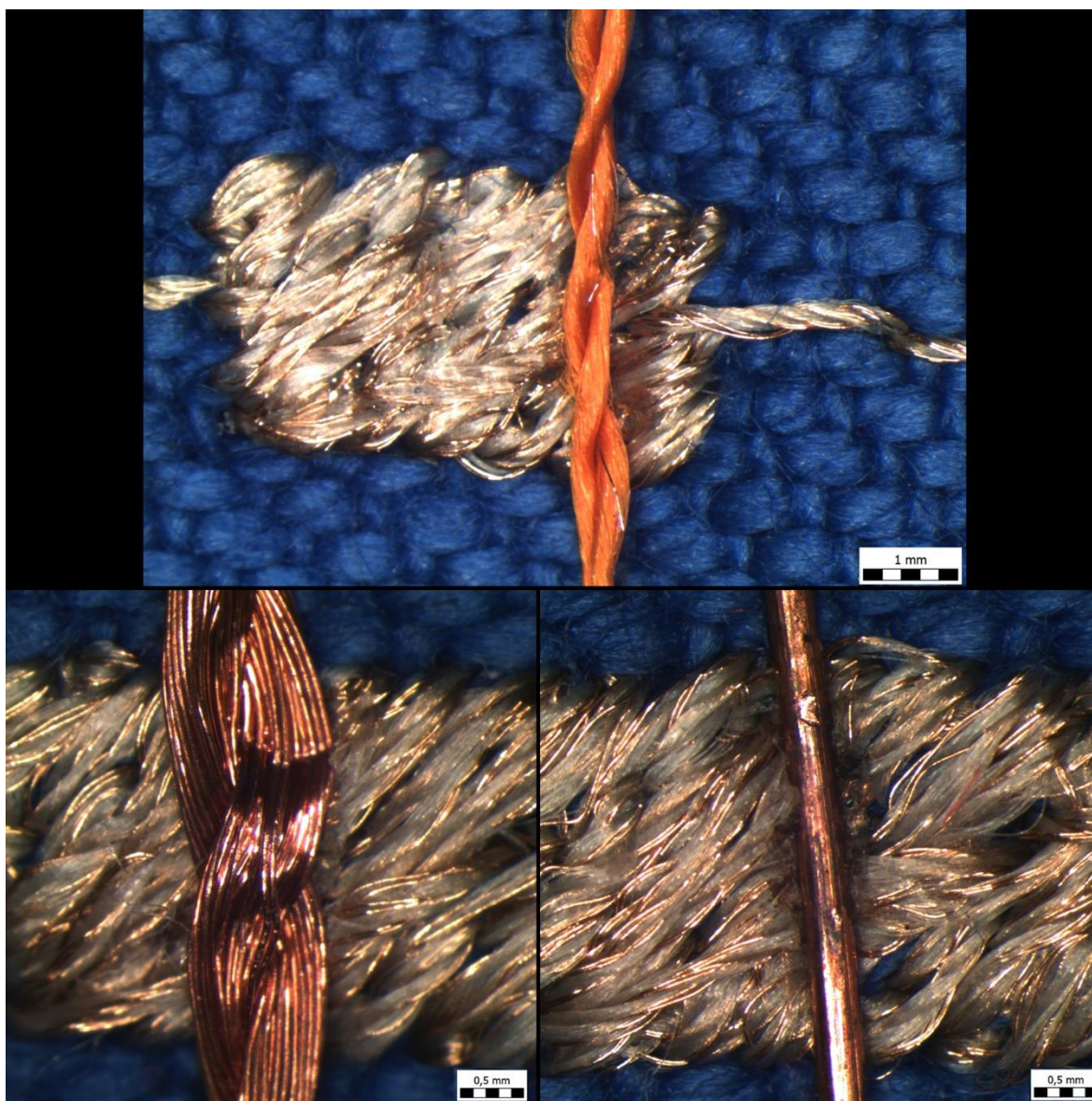


Obr. 4.13 Kontaktní struktury vybraných vodičů pro testovací vzorky.

První část obrázku znázorňuje svazek při nastavení příliš vysokého stupně svařování (4I; 4p). Svazek je velmi jasně přerušen a jeho druhá polovina odpadla při zanedbatelné síle, čímž se tento kontakt stává nepoužitelným. Druhá část představuje opět svazek, ale při použití menšího množství energie (3I; 8p). Došlo také k přerušení, ale pouze malému a na obrázku je jasně viditelné metalurgické spojení s vodiči z vyšité plošky. Spoj, jako je tento, dosahuje skvělé hodnoty odporu i mechanické pevnosti. V případě svazku nepřerušeno, avšak s dostačující hodnotou odporu i mechanické odolnosti, lze předpokládat, že došlo k metalurgickému sváru na spodní straně svazku.

Následující části obrázku zobrazují samostatný drátek ze svazku, v obou případech kvalitní spoj (1,5I; 4p). V prvním je patrný náznak přetavení, avšak stále s dobrou hodnotou odporu i mechanických vlastností. Druhý případ znázorňuje vodič nepřetavený, kde je patrné pouze ztmavení vodiče samotného a lze předpokládat metalurgické spojení s ploškou, na spodní straně vodiče.

Následující typy vodičů nebyly vybrány pro testovací vzorky, protože nesplňovaly buďto mechanické nebo elektrické parametry potřebné pro další zkoušky.



Obr. 4.14 Kontaktní struktury vodičů, nepoužitých pro testovací vzorky.

Na prvním obrázku je nehořlavé aramidové vlákno. Jak je z obrázku patrné, vodivá část nitě je tvořena pouze jedním mikrodrátkem. Z tohoto důvodu nebylo možné vytvořit spolehlivý kontakt. V případě dodání většího množství energie došlo k přetavení vodiče. Při použití jakéhokoli nastavení velikosti svařování však nedošlo k mechanickému spojení samotné nitě, neboť u aramidového vlákna nedošlo k jeho natavení.

Následující obrázek je měděné lanko spletené z mnoha drátků, každý o průměru 60 μm . Pro jeho přivaření bylo nutné používat velmi vysoké proudy, ale vzhledem k mohutnosti

drátku samotného, byla většina energie pohlcena do něj a nedocházelo ke kvalitnímu propojení. I přes dobré hodnoty odporu, tento vodič nebyl vhodný kvůli svým mechanickým vlastnostem.

Posledním kandidátem byl samostatný měděný drát o průměru 390 μm . Podobně jako předchozí lanko, díky svému velkému průřezu vyžadoval vysoké proudy pro přivaření, čímž se velmi zatěžovala vyšitá ploška. Bylo možné dosáhnout slušných hodnot odporu, avšak mechanicky byl realizovaný spoj nedostatečný.

4.8 Parametry testovacích vzorků

Po nalezení optimálních svařovacích parametrů pro motivy testovacích vzorků proběhla výroba 80ks vzorků za dodržení zjištěných parametrů svařování. Užitím 4-vodičové metody pro měření odporů probrané v kapitole 3.1 a měřicího přístroje Keithley 2701, byly naměřeny níže uvedené hodnoty odporů pro jednotlivé vzorky. V pravém rohu tabulky je vždy uvedeno použité nastavení svářečky, zvolený stupeň a počet pulsů a použitý typ elektrod.

Tab. 4.3 Změřené hodnoty odporů motivu s ploškou 5 mm²

										2,5I; 8p; ↓↓	
Č.vz.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Odpor[Ω]	0,6369	0,0367	0,0069	0,0151	0,0285	0,0901	0,0235	0,0151	0,001	0,0012	
Č.vz.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Odpor[Ω]	0,0006	0,002	0,1581	0,1029	0,001	0,0551	0,0141	0,88	0,001	0,0062	

Tab. 4.4 Změřené hodnoty odporů motivu s ploškou 12,5 mm²

										4I; 8p; ↓↑	
Č.vz.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Odpor[Ω]	0,0053	0,0314	0,0085	0,0014	0,0073	0,0067	0,002	0,00299	0,001	0,0021	
Č.vz.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Odpor[Ω]	0,0041	0,0009	0,0025	0,0098	0,0022	0,0022	0,0024	0,0025	0,002	0,0009	

Tab. 4.5 Změřené hodnoty odporů motivu se svazkem vodičů

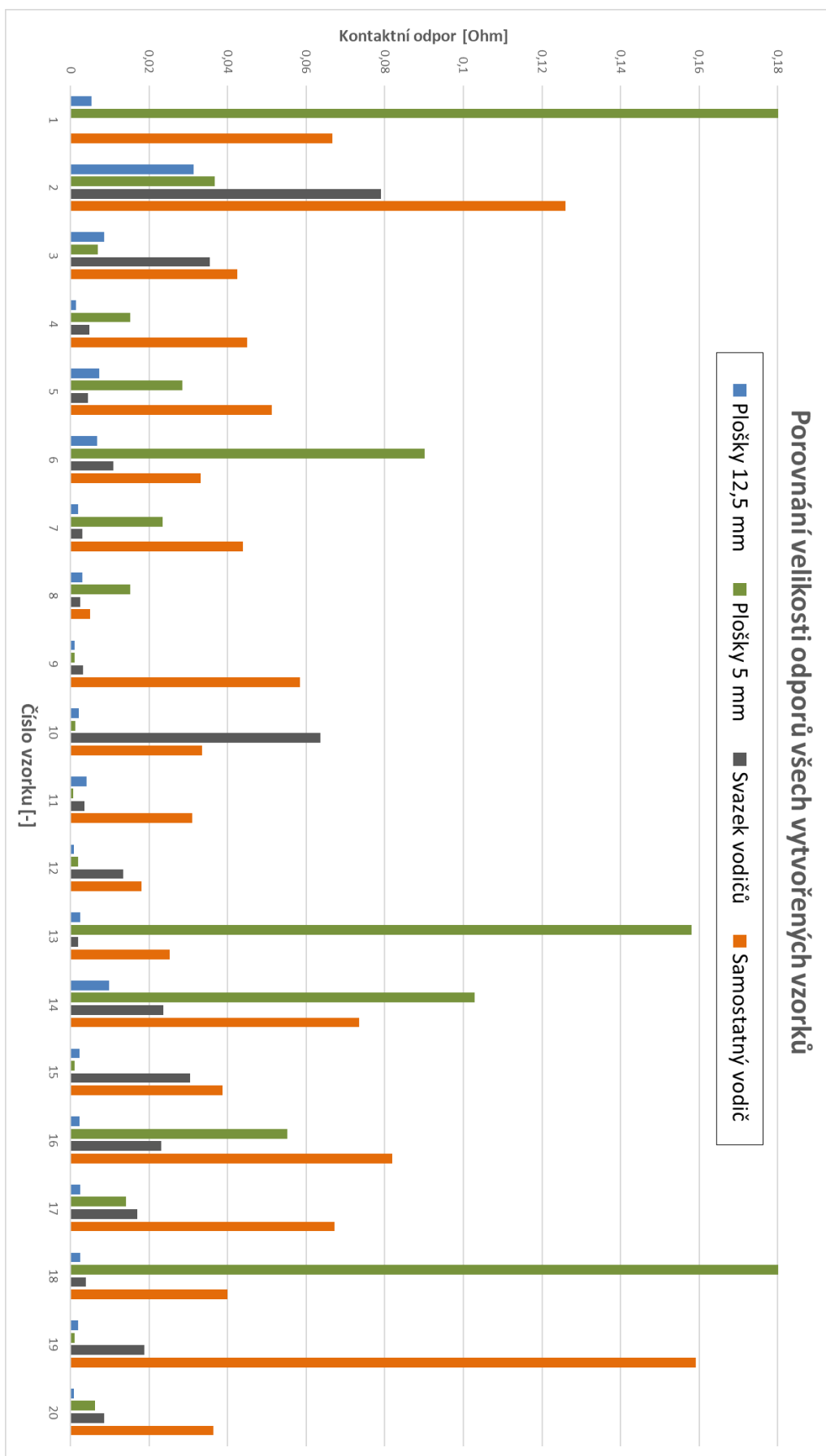
										2,8I; 8p; ↓↓	
Č.vz.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Odpor[Ω]	X	0,079	0,0355	0,0047	0,0044	0,0108	0,0029	0,0024	0,0031	0,0636	
Č.vz.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Odpor[Ω]	0,0036	0,0134	0,002	0,0236	0,0304	0,0231	0,017	0,0039	0,0188	0,0085	

Tab. 4.6 Změřené hodnoty odporů motivu s jedním vodičem

										1,5l; 4p; ↓↓
Č.vz.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Odpor[Ω]	0,0666	0,126	0,0425	0,045	0,0512	0,0331	0,0438	0,00502	0,0584	0,0334
Č.vz.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Odpor[Ω]	0,0309	0,0181	0,0252	0,0734	0,0386	0,0819	0,0672	0,0399	0,1591	0,0364

Všechny vzorky dosahují hodnoty menší než zvolená krajní mez, tj. 1 Ω. Většina vzorků se pohybuje v řádu setin miliohmů, až na několik výjimek, které dosahují desetin ohmů. Takové vzorky se převážně vyskytují mezi motivy s přivařeným jedním externím vodičem. Jeden ze vzorků se svazkem byl poškozen při jeho vytváření z důvodu nedodržení pracovního postupu. Z důvodu vyšší obtížnosti provedení sváru u motivů s externím vodičem bylo vytvořeno 5ks testovacích vzorků navíc od každého typu. Z tohoto důvodu lze jeden špatný vzorek vynechat a pro testování lze vybrat vzorky s nejlepšími parametry a ostatní ponechat jako rezervní.

Na následující stránce jsou všechny vytvořené vzorky porovnány v souhrnném sloupcovém grafu na Obr. 4.15. Vzorky č. 1 a č. 18 typu 5 mm² plošky jsou z grafu oříznuté, jelikož jejich hodnota je sice < 1 Ω, avšak v porovnání s ostatními vzorky je stále mnohem vyšší. Pro přehlednost je v grafu zachováno barevné rozdělení jednotlivých typů vzorků, jako je v tabulkách.



Obr. 4.15 Porovnání velikostí odporů vzorků

4.9 Zátěžové testy

Při výběru vhodných zátěžových testů byl brán zřetel na potencionální aplikaci těchto typů kontaktů. Ta zahrnuje kromě běžného nošení i vystavení náročným podmínkám (vysoké a nízké teploty). Vzorky proto absolvovaly testy v komoře při zvýšených konstantních teplotách, v komoře šokové a pro ověření mechanické odolnosti i testy prací.

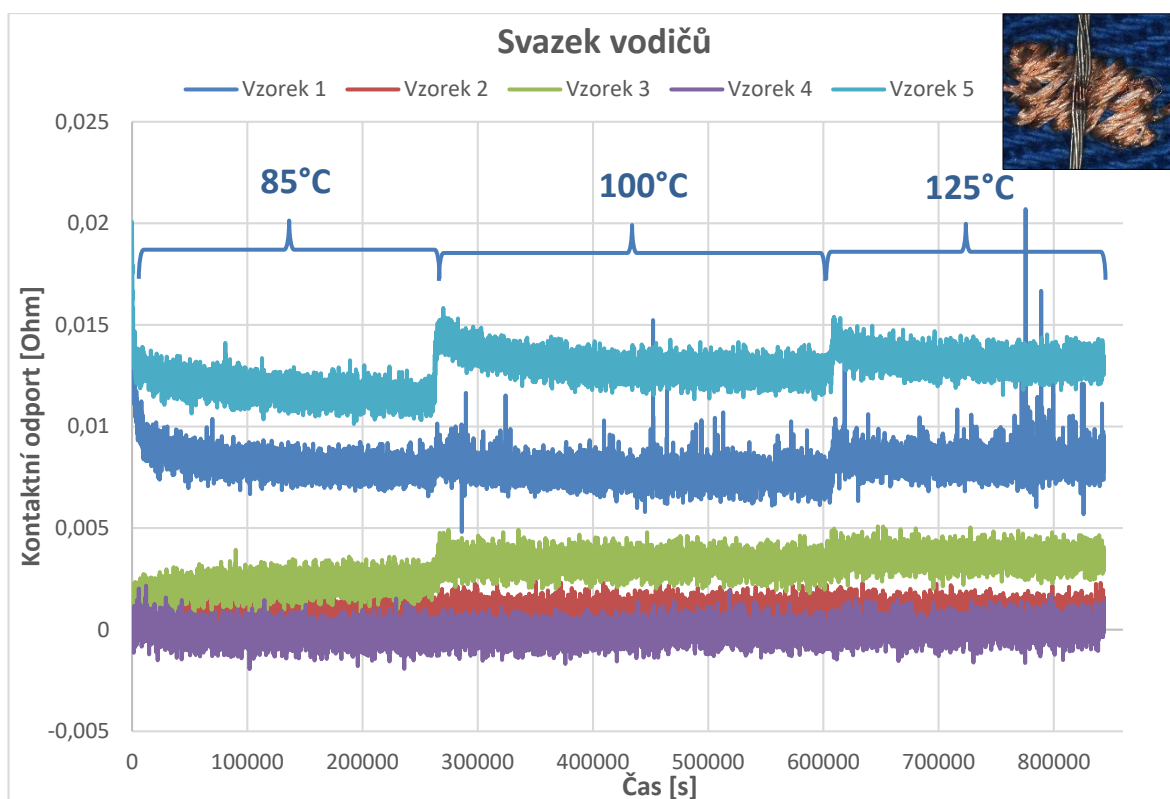
Testy v komorách jsou dlouhodobé, a proto bylo nutné vymyslet ideální způsob umožňující kontinuální a navíc dostatečně přesně měření odporů se zaznamenáním všech hodnot pro další zpracování. Řešením se ukázalo použití měřicího přístroje Keihley model 2701. Ten totiž obsahuje ethernet port a je tedy možné jej spojit s měřícím notebookem. Použitím vícekanálového multiplexoru, model 7702, se dala měřit hodnota všech deseti připojených vzorků a v průběhu celého testu. Užitým softwarem pro měření byl program Kickstart. Ten umožňuje vícekanálové měření a zobrazení všech změřených dat v reálném čase, takže i v průběhu testu je možné kontrolovat prozatímní výsledky. Po ukončení testu je možná kompletní extrakce veškerých změřených dat. V následující části budou ukázány všechny provedené testy a náležitě okomentovány zjištěné poznatky. Testy vždy probíhaly po deseti vzorcích současně s tím, že bylo měřeno vždy pět vzorků od každého typu.

4.10 Výsledky testů a vyhodnocení

K vyhodnocení testů byla použita data získána z programu Kickstart. Z nich vytvořené grafy zobrazené na následujících stránkách byly poté analyzovány a vyvozeny závěry.

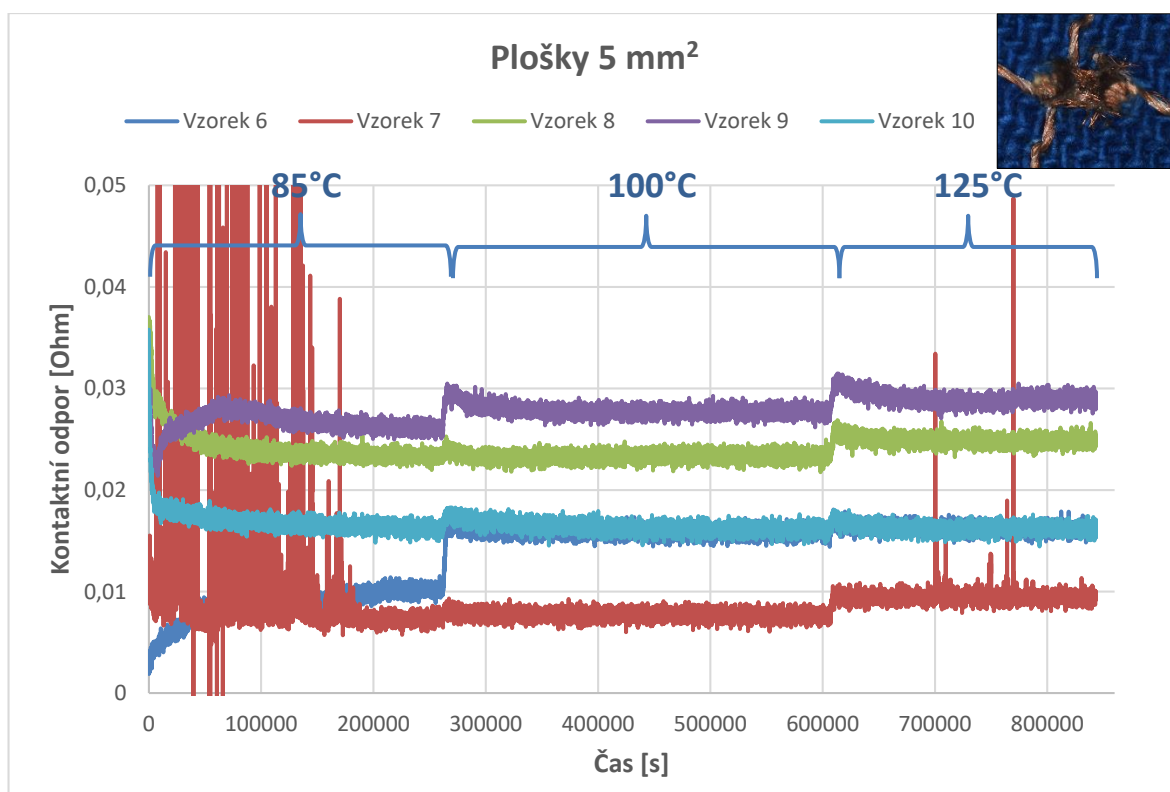
4.10.1 Teplotní komora

Tyto testy simulují okolní podmínky, kterým může být daný vzorek vystaven a zároveň simuluje urychlený proces stárnutí. Vystavení těmto podmínkám může způsobit rozvolnění vytvořených spojů, což by ovlivnilo elektrické a i mechanické parametry těchto vzorků. Provedené testy se řídily dle normy ČSN EN 60068-2-2 pro zkoušení vlivů prostředí, zkouška B: Suché teplo. Vzorky byly vystaveny dlouhodobému konstantnímu teplu různých teplot. Použitá teplotní komora byla od firmy Ecocell®.



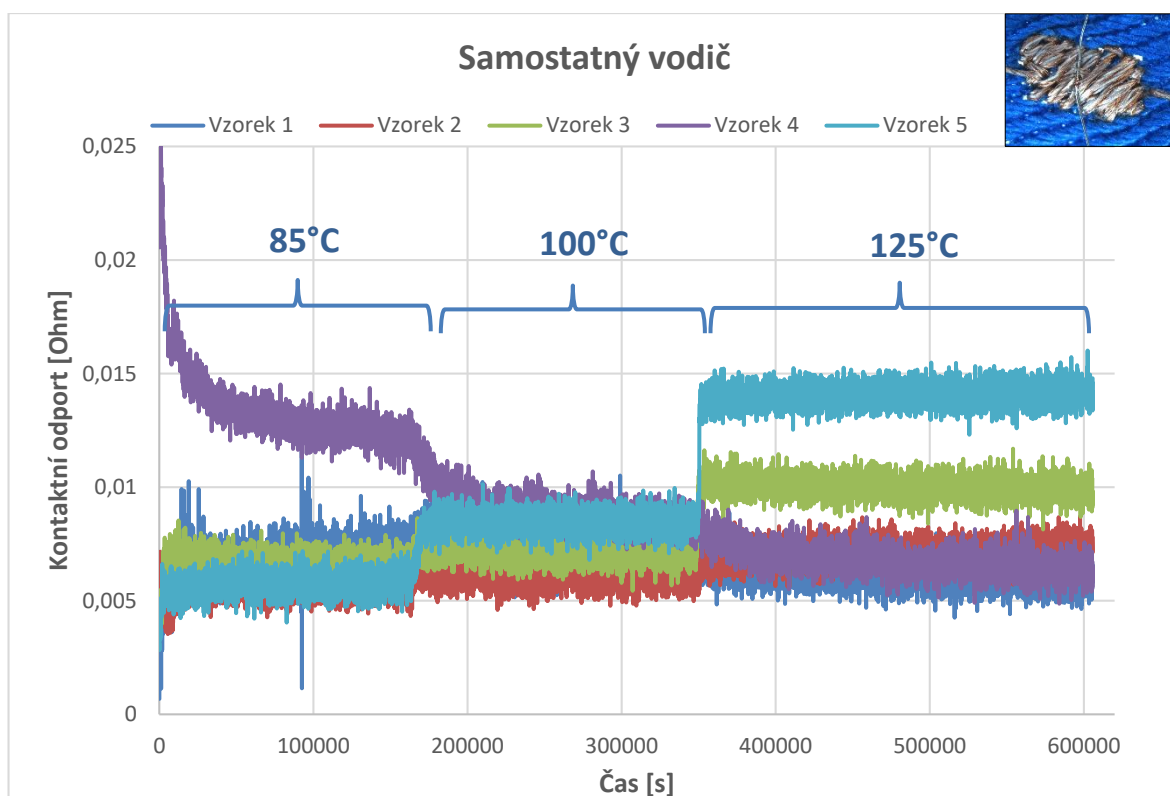
Obr. 4.16 Průběh velikosti odporu vzorků s přivařeným svazkem (suché teplo měnící se v čase).

Graf na Obr. 4.16 ukazuje záznam z měření v teplotní komoře vzorků s přivařeným svazkem drátků k plošce. Celková doba tohoto testu byla 9 dní a 18 hodin, počáteční testovací teplota byla zvolena 85 °C. Je patrné, že po ustálení si vzorky držely konstantní hodnoty odporu, nejkvalitnější v rámci tisícín ohmu a ty méně kvalitní maximálně do dvou desetín ohmu. Jelikož si vzorky držely tuto kvalitu, po 3 dnech byla zvýšena teplota na 100 °C. Po opětovném ustálení došlo pouze u několika vzorků ke zvýšení odporu, ale téměř zanedbatelnému (v rámci tisícín ohmu), u ostatních vzorků k žádné změně nedošlo. Po dalších čtyřech dnech byla teplota opět zvýšena, nyní na 125 °C. Stejně jako po předchozím zvýšení teploty, si vzorky udržely předchozí úroveň kvality. Všechny testované vzorky si udržely velmi vysokou kvalitu i po absolvování celého tohoto dlouhodobého testu. Hodnoty odporů vzorků byly velmi nízké a mechanicky se jejich parametry po testu také nezměnily, pouze došlo k lehkému ztmavení polyesterových nití. Před a po každém testu byla provedena optická kontrola na stereomikroskopu. Ukázka zmíněného ztmavení vyskytujícího se u všech vzorků, které absolvovaly teplotní komoru, lze nalézt v příloze A2.



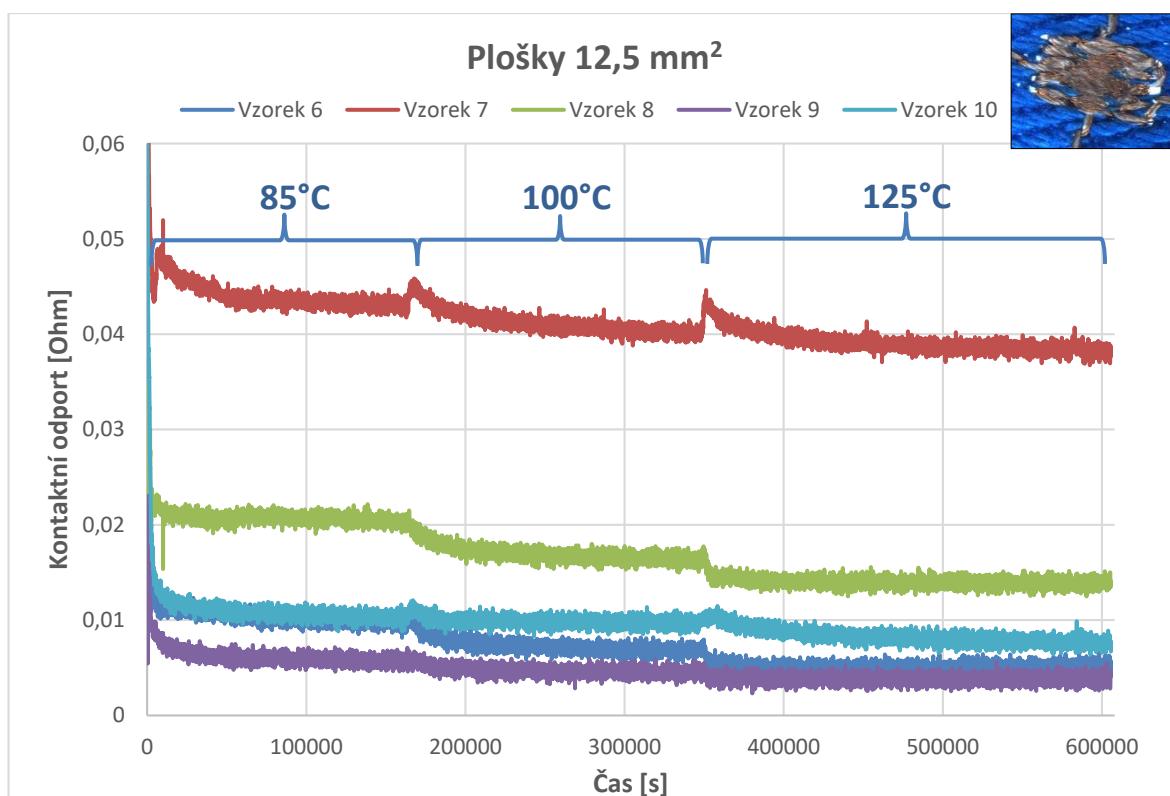
Obr. 4.17 Průběh velikosti odporu vzorků s ploškou 5 mm² (suché teplo měnící se v čase).

Graf na Obr. 4.17 zobrazuje záznam z měření v teplotní komoře vzorků s ploškou 5 mm². Jelikož tyto vzorky byly v komoře společně se vzorky přivařeného svazku, všechny časové milníky se shodují. Na první pohled tyto vzorky mají o něco málo vyšší hodnoty odporů, avšak stále v rámci setin ohmů, což je znak kvalitního spoje. Jeden ze vzorků měl na počátku testu problém s ustálením, avšak nutně to nemuselo být způsobeno spojením samotným, nýbrž některým spojením v měřicího přípravku. Zvyšování teploty nemělo v průběhu testu žádná velká vliv na kvalitu spojů, v případě že došlo ke zvýšení odporu, tak jen velmi mírnému. Mechanicky i parametrově si spoje svoji kvalitu opět udržely a došlo jen k vizuální změně, lehkému ztmavení polyesterových nití.



Obr. 4.18 Průběh velikosti odporu vzorků s přivařeným samostatným vodičem (suché teplo měnící se v čase).

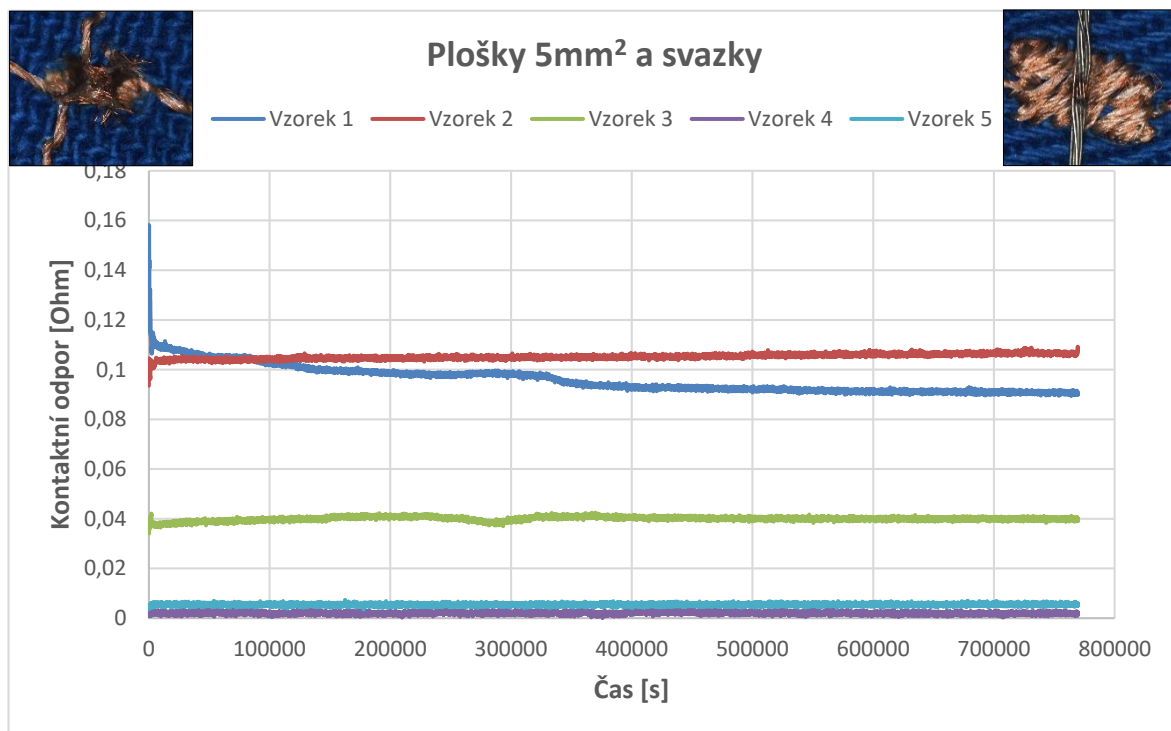
V grafu na Obr. 4.18 lze vidět průběh velikosti odporu v průběhu testu další pěti vzorků s přivařeným samostatným vodičem na plošku. Test trval týden, za stejných parametrů jako u předchozí sady vzorků, tedy s počáteční teplotou 85 °C. Díky trvale nízkým hodnotám odporů následovalo opět zvýšení na 100 °C a to po téměř dvou dnech, následně pak opět na 125 °C. Jeden ze vzorků měl zpočátku vyšší hodnotu odporu, která se ale v průběhu celého testu zmenšovala i během zvyšující se teploty. Tento fakt mohl být způsoben mechanickým rozvolněním v počátku testu, například manipulací. Ostatní vzorky si držely hodnoty odporu podobné počátečním. U vzorku 3 a 5 došlo při každém zvýšení teploty k mírnému nárůstu, avšak pouze v rámci tisícín ohmu. To mohlo být způsobeno slabým rozvolňováním z důvodu nedostatečného metalurgického spoje. Vzorky zůstaly po proběhnutí testu s podobnými hodnoty odporů, se stejnými mechanickými vlastnostmi, opět pouze s lehkým ztmavením polyesterové nitě.



Obr. 4.19 Průběh velikosti odporu vzorků s ploškou 12,5 mm² (suché teplo měnící se v čase).

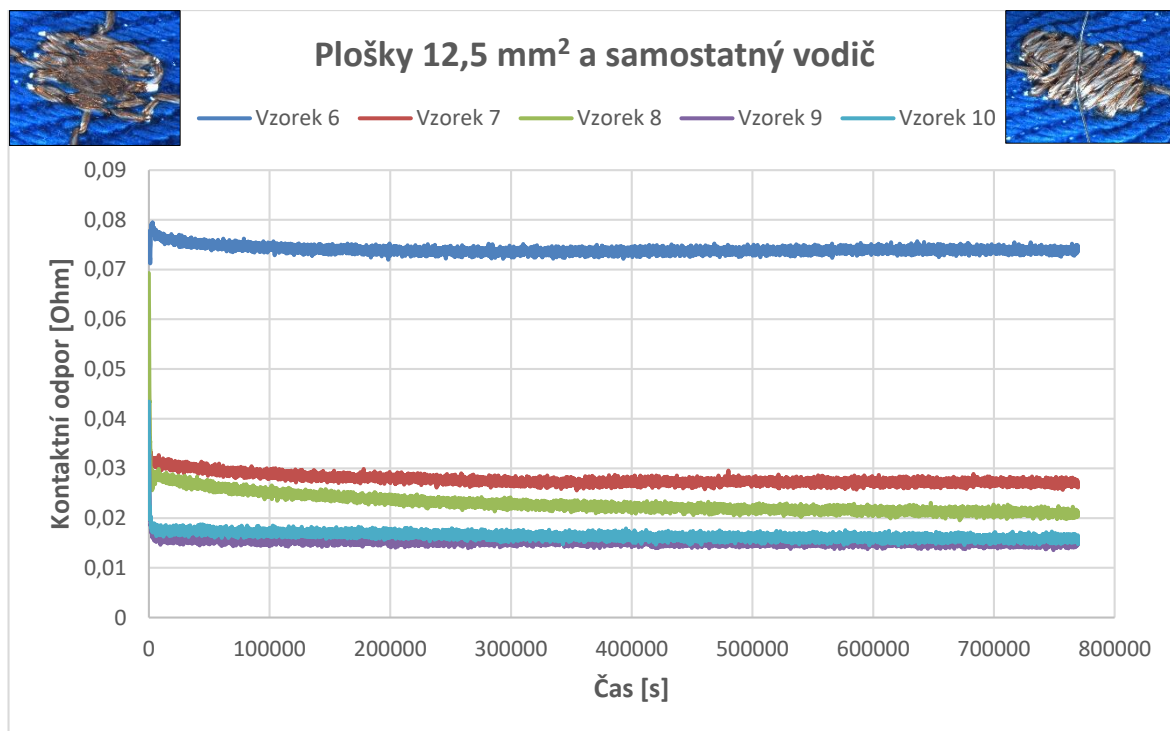
Výše znázorněný průběh na Obr. 4.19 ukazuje, jak se měnila hodnota odporu v čase u vzorků s ploškami 12,5 mm². Tato sada vzorků byla v komoře společně se vzorky s přivařeným samostatným vodičem. Veškeré časové údaje se tak opět shodují. Po ustálení byla hodnota odporu vcelku konstantní u všech vzorků. Zajímavý zvrat ale nastal po každém navýšení teploty, kdy po ustálení došlo ke snížení odporu u všech vzorků. Tento jev pravděpodobně nastal tím, že v důsledku zvýšení došlo k dodatečnému mechanickému zpevnění polyesterových nití v místě kontaktu. To způsobilo mírné zkvalitnění již pevného metalurgického spoje. Vzorky po testu, stejně jako před ním, vykazovaly velmi dobré mechanické i parametrické vlastnosti. Opět došlo pouze k lehkému ztmavení polyesterových nití jako u ostatních vzorků.

Po absolvování testu všech vzorků v teplotní komoře, byly v rámci dalšího experimentování vybrány exempláře, jež komoru již absolvovaly a zároveň si zachovaly nejlepší parametry. Jednalo se o tři vzorky motivu s ploškami 5 mm² (vzorky 1-3), dva vzorky motivu se svazkem vodičů (vzorky 4,5), tři zástupci vzorků s ploškami 12,5 mm² (vzorky 6-8) a nakonec dva vzorky s jedním samostatným vodičem (vzorky 9,10). Tyto vzorky byly podrobeny dalšímu teplotnímu namáhání při teplotě 125 °C.



Obr. 4.20 Průběh velikosti odporu vzorků s ploškami 5 mm² a svazky (suché teplo konstantní, 125 °C).

Graf na Obr. 4.20 znázorňující velikost odporu vybraných vzorků neobsahuje žádné změny teplot. Vzorky byly brány jako odolné a se stabilními parametry a tak celý test trvající necelých 9 dní probíhal již od počátku při teplotě 125 °C. Vzorky s ploškami 5 mm² (1-3) měly již od počátku o poznání větší odpor, který se však pohyboval kolem jedné desetiny ohmu maximálně, což je stále velmi kvalitní spoj. Tento odpor byl téměř konstantní po celou dobu testu, pouze u jednoho vzorku (1) klesl o několik setin ohmu. Vzorky s přivařeným svazkem vodičů (4,5) měly po celou dobu testu odpor v rámci tisícín ohmu. Vzniklé spoje jsou tak velmi vysoké kvality a dokazují, že i dlouhodobé působení konstantní vysoké teploty nezpůsobuje žádný velký nárůst odporu. I po mechanické stránce jsou vzorky stále velmi kvalitní a opět došlo pouze k lehkému ztmavení polyesterových nití.

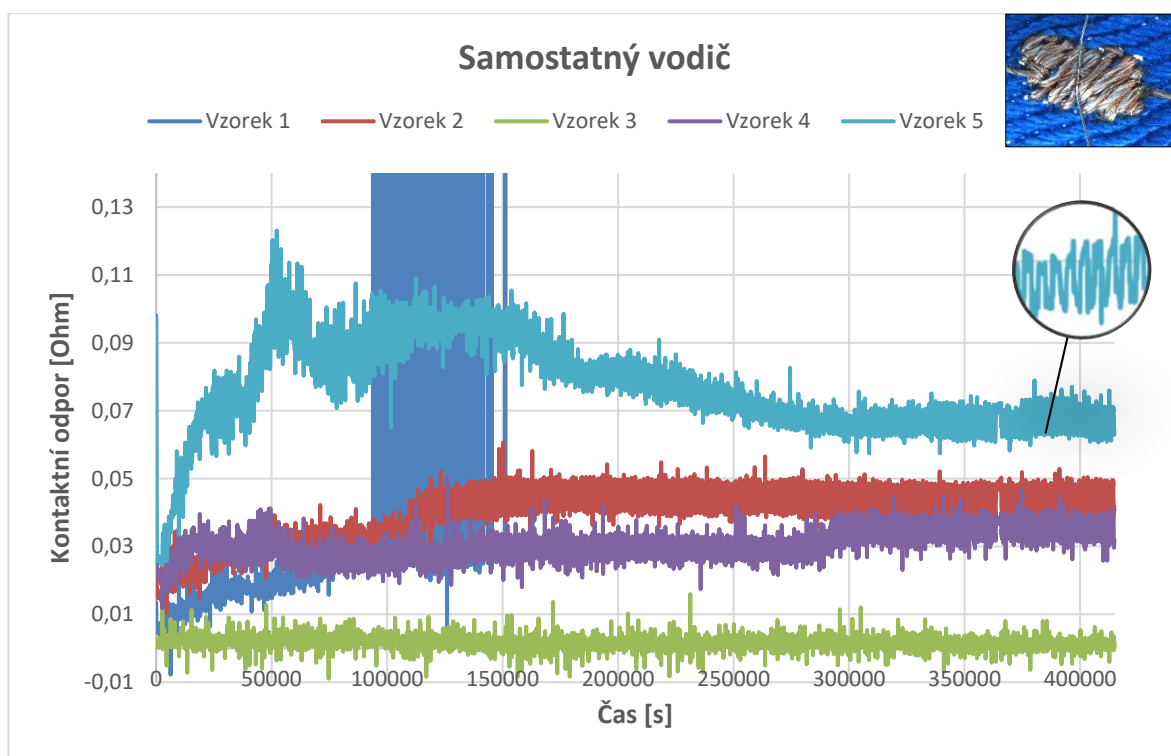


Obr. 4.21 Průběh velikosti odporu vzorků s ploškami 12,5 mm² a samostatným vodičem (suché teplo konstantní, 125 °C).

Sada vybraných vzorků znázorněných v grafu na Obr. 4.21 byla v komoře po stejnou dobu, společně s první pěticí vzorků odlišných motivů. Vzorky s ploškou 12,5 mm² (6-8) měly o něco málo větší odpor, ale stále v rámci setin ohmů. Stabilizace na téměř konstantní hodnotě jim však trvala přes dva dny. Vzorky samostatného vodiče (9,10) měly téměř od počátku testu hodnotu odporu skoro absolutně konstantní a navíc okolo 0,15 ohmu. Ukázalo se, že i vzorky těchto motivů nejsou nijak výrazně ovlivněny dlouhodobou konstantní vysokou teplotou. Oba typy si zachovaly předchozí elektrické i mechanické vlastnosti a jedinou změnou tak byla opět pouze vizuální a to ztmavení polyesterových nití.

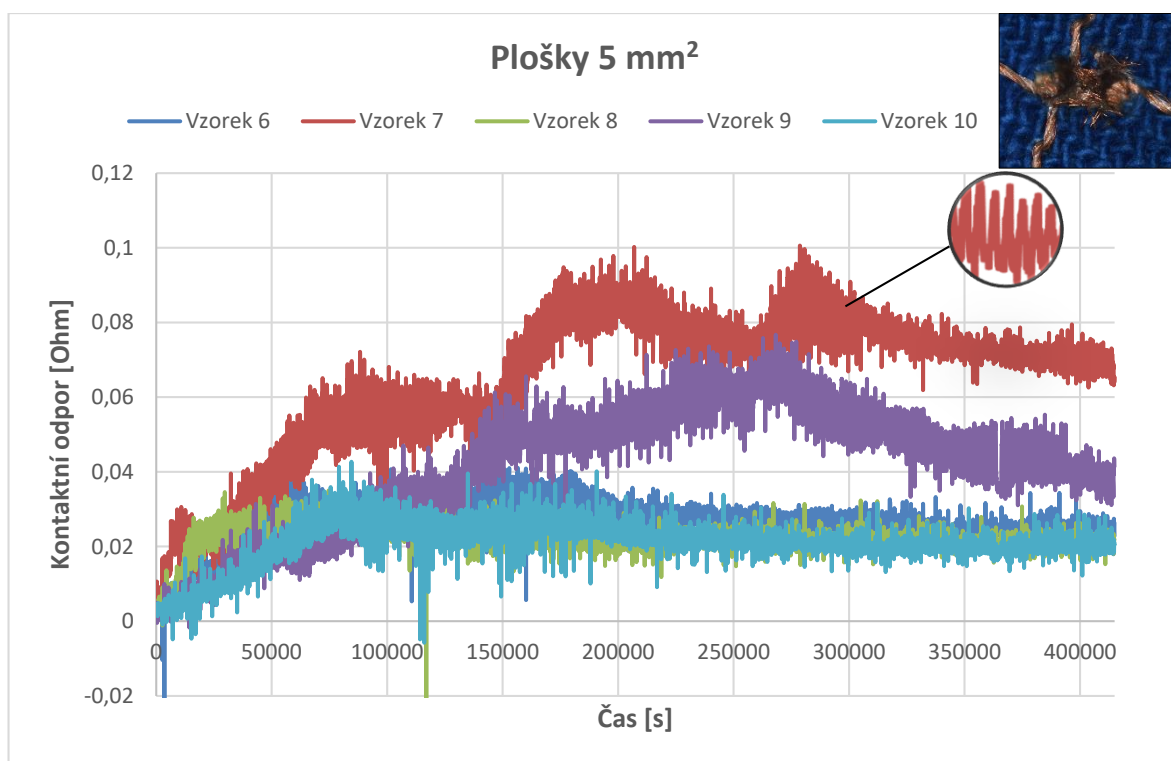
4.10.2 Šoková komora

Testy prováděné v šokových komorách simulují velké skokové změny teplot. Ty totiž mohou způsobit rozvolnění, zkrhnutí nebo snížení vodivosti materiálu. Kdyby došlo k těmto defektům v reálné aplikaci (hasičský/vojenský oblek), může dojít k ohrožení života nositele. Proto je nutné zajistit odolnost proti tomuto druhu zátěže.



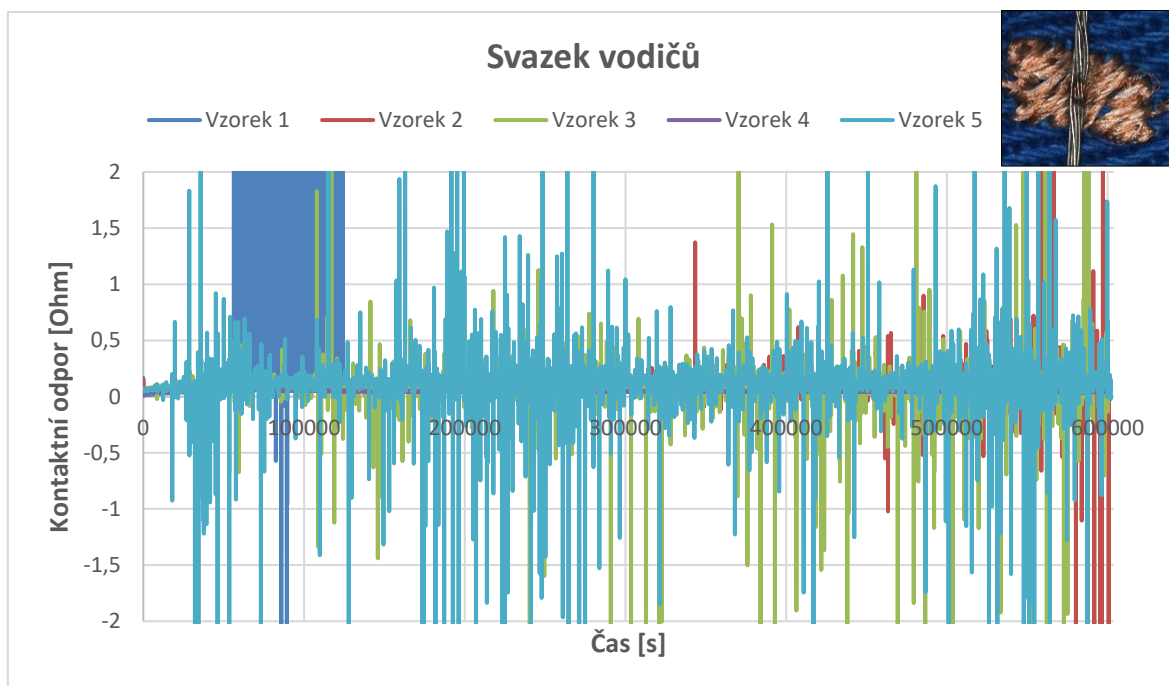
Obr. 4.22 Průběh velikosti odporu vzorků s přivařeným samostatným vodičem (teplotní šoky, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Test v šokové komoře první sady vzorků znázorněný na Obr. 4.22 trval celkově 4 dny a 19 hodin. V patnácti minutových intervalech vždy docházelo ke změně okolní teploty mezi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Šoková komora vytváří tyto skokové změny teplot tím, že vzorky mechanicky přesouvá mezi chladicí a ohřívací částí. Jak lze vidět v detailu průběhu, každý vrchol odpovídá změně odporu při působení extrémní teploty z opačné strany stupnice (horní vrchol vysoká teplota; dolní vrchol nízká teplota). Změna se tak u každého vzorku pohybuje pouze v řádu maximálně tisícín ohmu. Tento opakovaný proces změn však může způsobit zkrhnutí nebo totální zničení kontaktu. U této sady vzorků však k ničemu takovému nedošlo. Vzorek 3 si od počátku do konce udržel téměř konstantní odpor, měnící se pouze v rámci změn teplot. Vzorky 2 a 4 zpočátku kolísaly a lehce vzrostly, ale dále pak již držely hodnoty odporů mezi $0,03$ a $0,05\ \Omega$. Vzorku 5 na začátku testu začal odpor rapidně vzrůstat až k jedné desetíně ohmu, poté se však ustálil na $0,07\ \Omega$. Vzorek 1 měl zpočátku velmi mírný stoupající trend, poté však docházelo k pravidelným výpadkům, které vyústily v absolutní odpojení. Podezření na poškození vytvořeného kontaktu se však vyvrátilo při měření po skončení testu, kdy dosahoval stále dobré velikosti odporu. Při hledání příčiny bylo zjištěno, že mechanickým přesouváním vzorků v komoře v rámci změn teplot došlo k postupnému rozvolnění kontaktu na části měřicího přípravku.



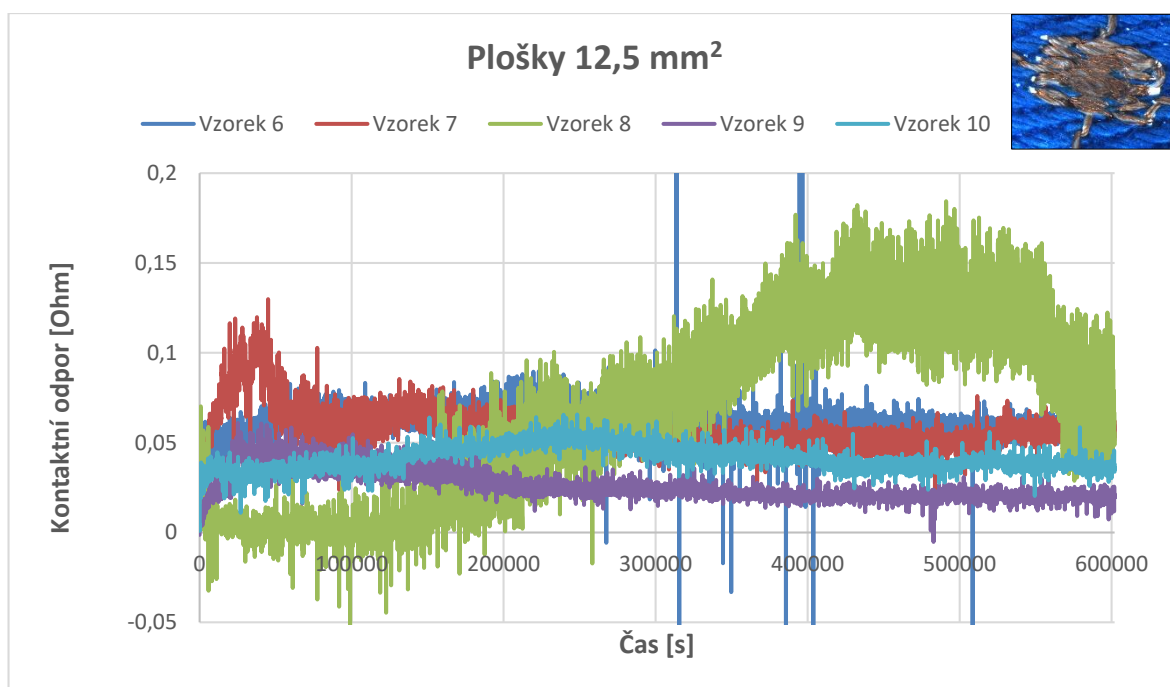
Obr. 4.23 Průběh velikosti odporu vzorků s ploškami 5 mm² (teplotní šoky, -40 °C / + 80 °C).

Tato sada vzorků na Obr. 4.23 byla v šokové komoře společně se vzorky s přivařeným samostatným vodičem, všechny časové a teplotní parametry se tak shodují. Oproti zmíněným vzorkům jsou však markantnější jednotlivé vrcholky, znázorňující změny odporu při střídání teplot. Jejich velikosti se pohybují v rámci jedné až dvou setin ohmu, což je však stále velmi malá hodnota. U všech vzorků tohoto typu došlo v úvodu k nárůstu odporu, u vzorků 6, 8 a 10 se tato hodnota ustálila na 0,02 Ω a kromě lehkých výkyvů a změn v rámci teplotních šoků, byla konstantní až do konce testu. Vzorek 9 vykazoval lineární nárůst, který se ale po zhruba polovině testovací doby obrátil a odpor začal opět klesat. Vzorek 7 vykazoval největší závislost na jednotlivých teplotních cyklech. Zároveň se jeho hodnota odporu zvýšila nejvíce ze všech vzorků. Tento fakt byl pravděpodobně způsoben nedokonalým metalurgickým spojem v místě kontaktu. Výkyvy teplot tak způsobovaly postupné rozvolňování a opětovné zpevnění kontaktu, jež způsobovalo nárůst odporu. Po skončení testu se však hodnota kontaktu pohybovala na původních hodnotách. Je však patrné, že v případě nedokonalého sváru, je tento druh testu velmi náročný a při opravdu dlouhodobých aplikacích může způsobovat problémy.



Obr. 4.24 Průběh velikosti odporu vzorků s přivařeným svazkem vodičů (teplotní šoky, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Graf na Obr. 4.24 znázorňuje chování vzorků s přivařeným svazkem, testovaných v šokové komoře po dobu jednoho týdne. Parametry testu samotného byly zachovány, v šokové komoře docházelo tedy ke skokovým změnám teploty mezi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ v patnáctiminutových intervalech. U vzorku 1 bylo podezření na stejný defekt jako při předchozí sadě vzorků. V průběhu testu nejspíše došlo k mechanickému rozvolnění kontaktu na měřícím přípravku a to i přes úpravu tohoto nedostatku po prvním testu. Tento fakt byl potvrzen měřením tohoto vzorku po skončení testu, kdy dosahoval hodnoty odporu jen lehce zvýšené, než na jeho začátku. Ostatní vzorky vykazují téměř identické chování. Velké reakce na jednotlivé teplotní šoky, kdy se hodnoty odporů dostávají až k hranici dvou ohmů, ale střední hodnota odporu se stále pohybuje v rámci setin ohmů. Tento fenomén je pravděpodobně způsoben samotnou fyzickou stavbou svazku. I v případě kvalitního metalurgického sváru v místě kontaktu, nemá tento svár identické kvality pro všechny jednotlivé vodiče ve svazku. Působením extrémních teplot tak dochází k rozvolňování a opětovnému zpevnování celého kontaktu, což způsobuje velké výkyvy odporu. Všechny vzorky po skončení testu však dosahují hodnot odporů jen lehce zvýšených, oproti stavu před testem.



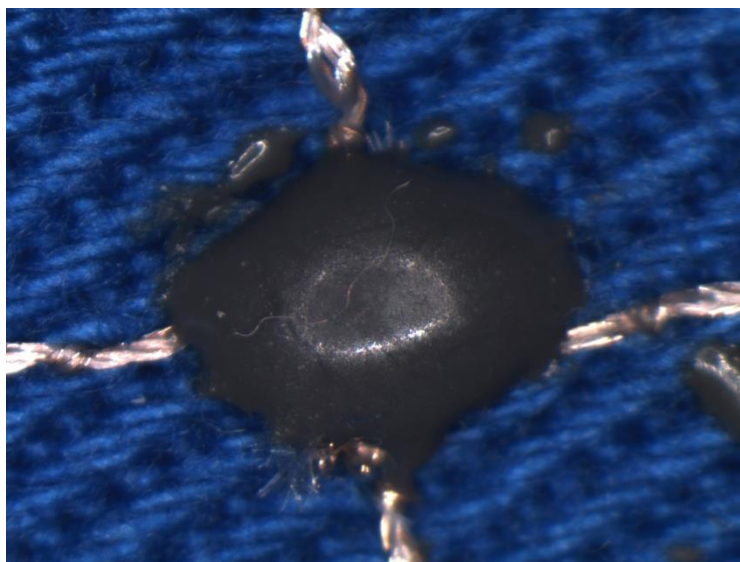
Obr. 4.25 Průběh velikosti odporu vzorků s ploškami 12,5 mm² (teplotní šoky, -40 °C / + 80 °C).

Vzorky s ploškami 12,5 mm², jejichž průběh odporu je znázorněn v grafu na Obr. 4.25 výše, absolvovaly test společně se vzorky s přivařeným svazkem. Časové a parametrické údaje o testu jsou tak společné. Vzorky 6,9,10 mají po celou dobu testu vcelku konstantní odpor, při jednotlivých teplotních šocích odpor kmitá v rámci setin ohmu. U vzorku 7 v počátku testu hodnota odporu velmi rychle stoupla až k hranici 0,1 Ohmu, ale po krátkém čase se ustálil zpět na hodnotě o polovinu nižší a ta vydržela až do konce testu. Vzorek 8 byl po zhruba třetinu testu vzorek s nejnižším odporem. Po zhruba dvou dnech testu se však jeho odpor začal téměř lineárně zvyšovat až na hodnotu 0,15 Ohmu. Ke konci testu je však patrný klesající trend. Tento vzorek zároveň vykazuje největší závislost na jednotlivých teplotních cyklech, kdy se hodnota odporu mění až o půl desetiny ohmu. Po skončení testu všechny vzorky vykazují hodnoty odporu totožné s počátečními nebo pouze lehce zvýšenými.

4.10.3 Prací testy

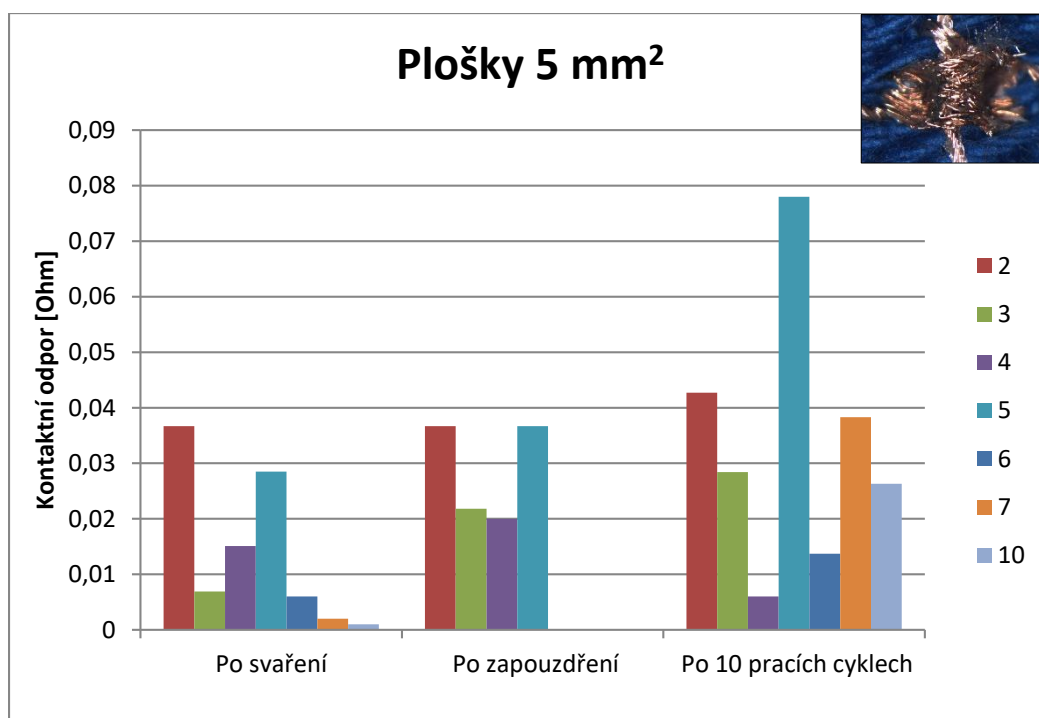
Pro ověření mechanické odolnosti vzorků, byly vybrány prací testy dle ISO 6330 – Postupy domácího praní a sušení. Přesné parametry praní byly 40 °C, 600 otáček, prací prášek Bonux a sušení ve volném stavu na podložce (postup 4N). Všechny tyto testy byly provedeny společností VÚB a.s. sídlící v Ústí nad Orlicí.

V případě vzorků s malými i velkými ploškami, bylo vybráno od každého typu 5 vzorků, jež absolvují test praním ničím nechráněné a dalších 5, které budou zapouzdřeny. K tomu byl použit jednosložkový fixační tmel Plast 2000 na bázi silikonové pryže od výrobce Spinner.



Obr. 4.26 Ukázka zapouzdřeného vzorku.

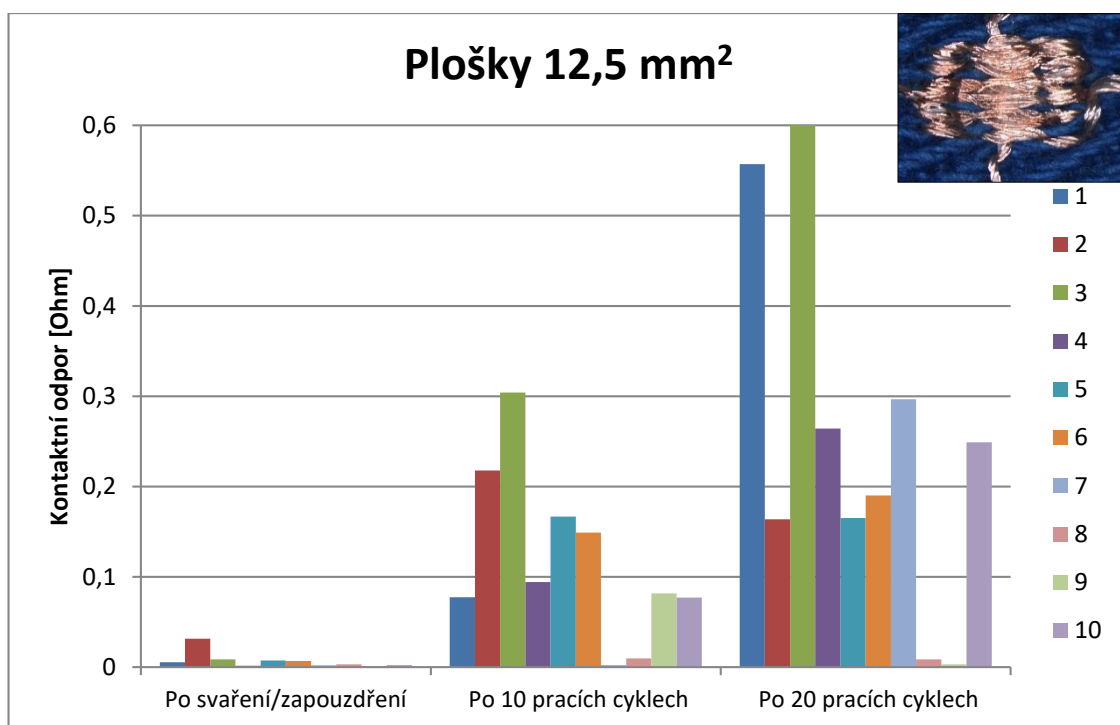
U motivů s ploškami 5 mm² došlo k tomu, že již po samotném zapouzdření se u některých vzorků lehce zvýšil odpor, u vzorků s ploškami 12,5 mm² se tento jev neobjevil. Druhé zmíněné vzorky si udržely po praní velmi dobré parametry, a proto tento test absolvovaly ještě jednou, aby bylo možné stanovit vývoj změny odporu při větším počtu pracích cyklů. Pro přehlednost výsledků, jsou hodnoty odporů těchto vzorků vyneseny do grafů a náležitě okomentovány.



Obr. 4.27 Změny velikosti odporu při pracích testech u motivu plošek 5 mm².

Graf na Obr. 4.27 ukazuje změny odporu při pracích testech motivu plošek 5 mm². Vzorky 1-5 byly před praním zapouzdřeny, vzorky 6-10 ne. Na ose x je vždy napsaný stav, kdy byla hodnota odporu měřena. Ve stavu po zapouzdření jsou tak znázorněny pouze zapouzdřené vzorky.

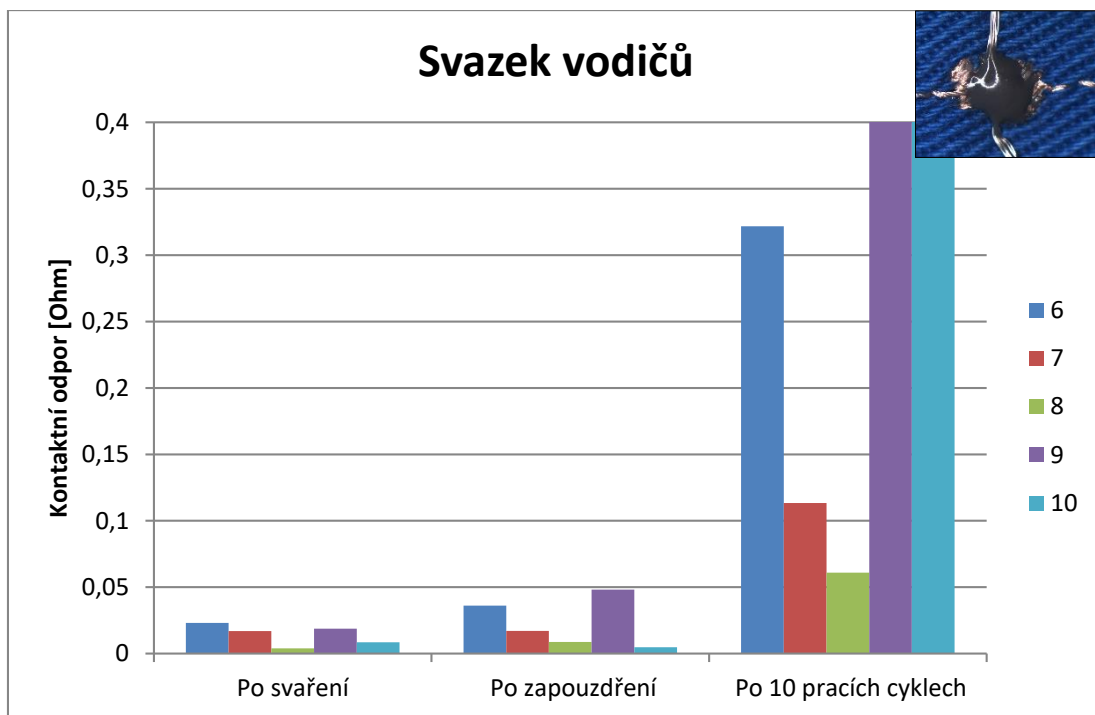
V případě, že spoj nebyl nejvyšší kvality již na začátku, zapouzdření způsobilo další zvýšení odporu. Takový případ byl vzorek 1, který v grafu není zahrnut, aby nezkresloval výsledky. Jeho hodnota odporu byla původně 0,6369 Ω, což bylo způsobeno nedodržením ideálních parametrů při jeho vytvoření. Po jeho zapouzdření došlo ke zvýšení do stovek ohmů. Vzorky 8 a 9 v grafu také nejsou zahrnuty, ze stejného důvodu jako vzorek 1. Jejich kvalita nebyla ideální již před testováním a po praní se hodnota odporu přiblížila desítkám ohmů. V případě, že vzorek byl kvalitní v počátku, zapouzdření odpor nezvýšila nebo pouze minimálně. Z grafu je patrné, že u takovýchto vzorků zapouzdření omezila nárůst odporu po absolvování praní, oproti vzorkům nechráněným. V případě vytvoření velmi kvalitního metalurgického sváru se, i v případě jeho nechránění, po praní odpor téměř nezvýší, jak lze vidět u vzorku 6.



Obr. 4.28 Změny velikosti odporu při pracích testech u motivu plošek 12,5 mm².

Graf na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** ukazuje změny velikosti odporu u vzorků s motivem plošek velikosti 12,5 mm². U těch nedošlo zapouzdřením ke znatelné změně odporu, proto jsou v tomto grafu stavové milníky odlišné. Zároveň jejich výsledky po prvních deseti pracích cyklech byly velmi dobré, proto absolvovaly dalších deset. Vzorky 1-5 zůstaly nechráněné, vzorky 6-10 byly zapouzdřeny.

Všechny testované vzorky měly v počátku velmi podobné hodnoty odporu, v setinách ohmu, takže je lze považovat za velmi kvalitní spoje. Pouze hodnota u vzorku 3 dosáhla po obou pracích cyklech nad přípustnou hodnotu 1 Ω, proto je mimo přehledné měřítko ostatních vzorků. Jak je z grafu patrné, většině nechráněných vzorků se po prvních deseti pracích cyklech zvýšil odpor o něco více, než zapouzdřeným, rozdíl však nebyl tak markantní. Větší rozdíl však nastal po druhé sérii pracích cyklů, kde nechráněné vzorky zaznamenaly mnohem větší nárůst odporu. Lze tedy říci, že tento typ vzorků zvládá praní velice dobře i nechráněný, avšak při větším množství opakování může dojít ke zvýšení odporu. Naopak zapouzdření se u těchto vzorků ukázala jako velmi efektivní způsob ochrany kontaktu.



Obr. 4.29 Změny velikosti odporu při pracích testech u přivařeného svazku vodičů.

Z důvodu mechanických vlastností tohoto typu motivu bylo rozhodnuto, že všechny testované vzorky podstoupí zapouzdření. Na ose x je napsaný stav, kdy byla hodnota odporu měřena. Vzorky jsou značeny 6-10, protože absolvovaly práci test společně se vzorky se samotným přivařeným vodičem.

Jak lze vidět v grafu na Obr. 4.29, všechny vzorky měly srovnatelně vysokou kvalitu na začátku testu. Po jejich zapouzdření nenastalo žádné rapidní navýšení odporu. Po samotném vyprání se však vzorky 9 a 10 dostaly svými parametry daleko za přípustné hodnoty. Z důvodu zapouzdření není možné vizuálně zjistit přesnou příčinu tohoto nárůstu. Možnou příčinou je nedokonale provedeno zapouzdření, po které zůstala část místa spoje fyzicky odhalena. Kombinace fyzického namáhání a vody pak tímto místem mohla penetrovat a rozvolnit vytvořený kontakt. U zbytku vzorků došlo také k nárůstu odporu, pouze však v rámci maximálně desetin ohmu.

Posledním typem testovaných vzorků byl samostatný přivařený vodič. Jelikož byl tento typ mechanicky nejméně odolný na fyzické poškození, jedinou možností bylo zapouzdření všech pěti vzorků plánovaných na prací test. Vyhodnocení tohoto typu nebylo provedeno do grafu, protože po praní žádný z vzorků nespĺňoval limitní odpor. Tři vzorky nebylo ani možné změřit, protože došlo k fyzickému přetržení drátku. To i přesto, že pro zvýšení mechanické odolnosti byl drátek připevněn silikonovým tmelem na každé straně od místa kontaktu, jak lze vidět na Obr. 4.30. Ostatní dva vzorky, které bylo možné změřit, dosahovaly hodnoty odporu v rámci desítek ohmů. V tabulce níže je přehled vývoje velikosti odporu tohoto motivu.

Tab. 4.7 Vývoj velikosti odporu vzorků se samostatným přivařeným vodičem

Č.vz.	1	2	3	4	5
Odpor[Ω]	0,0819	0,0672	0,0399	0,1591	0,0364
Po zapouzdření					
	0,3761	0,1755	0,0668	0,2213	0,0478
Po pracím cyklu					
	50	X	X	X	29

I přes původně dobré hodnoty odporu není spojení dostatečné, protože i samotný proces zapouzdření, jež kontakt chrání, znatelně zvýší odpor spoje. Samotný prací cyklus je pro tento typ vzorku absolutně zničující, kdy i přes ochranu kontaktu samotného je velká šance fyzického poškození vodiče.



Obr. 4.30 Fyzicky porušený vzorek samostatného přivařeného vodiče

4.11 Zhodnocení

Všechny provedené testy ukazují, že je-li provedena dostatečná příprava, je možné dosáhnout kvalitních kontaktních struktur s vysokou reprodukovatelností. Základem je takový návrh motivů, aby bylo možné během krátkého časového intervalu vyzkoušet velké množství kombinací a parametrů svařování. Tento způsob testování umožní zjistit ideální parametry všech užitých materiálů a nástrojů a při jejich následném dodržení v průběhu vytváření spojů samotných je vysoká šance na vytvoření kvalitního spojení. Odporové sváření se ukázalo jako vhodný nástroj pro výrobu elektricky vodivých spojů na textilních substrátech, protože se jedná o principiálně velmi jednoduchý způsob, snadný na regulaci a kontrolu. Všechny vytvořené vzorky dosahovaly velmi dobrých hodnot odporu a to i po absolvování zátěžových testů formou konstantního dlouhodobého tepla a šokové komory. Problémem se ukázalo silné mechanické namáhání a to formou testů pratelnosti. V případě vzorků neobsahujících žádné externí vodiče a kvalitně vytvořeného spoje, není tento druh testu zničující. Pro další zvýšení odolnosti je navíc možné využít možnosti pouzdření kontaktu. Tento způsob umožňuje i opakovatelné praní, za udržení slušných hodnot odporu. Pro vzorky, kde je kontakt tvořen spojením s vnějším vodičem, je tento test o poznání náročnější. Zapouzdření kontaktu je zde téměř nutností, ale i při jejím užití není zaručen úspěch. Tyto spoje nejsou sami o sobě příliš odolné na silné mechanické namáhání, jež působí v průběhu pracího cyklu. Zde pak stojí za zvážení alternativního způsobu ochrany anebo jiné připojení daného vodiče, které by bylo schopné vydržet takovou zátěž.

5 Závěr

Cílem této práce byla analýza a rozbor metod pro vytváření kontaktních struktur na textilních substrátech, s následnou realizací na skutečných vzorcích. Nejdříve byla obecně rozebrána problematika využití elektroniky v textiliích z pohledu historie i budoucnosti. Největší prostor byl dán rozboru různých používaných materiálů v tomto odvětví, včetně jejich parametrů a silných i slabých stránek. Přestože v tomto směru bylo provedeno mnoho výzkumných aktivit, hranice objevů ještě zdaleka nebylo dosaženo. Podrobně zkoumány byly také různé techniky vytváření kontaktních struktur. Přes poměrně široké spektrum způsobů, byla nakonec použita metoda odporového sváření, díky své jednoduchosti a všestrannosti. Závěr teoretické části je pak věnován různým způsobům testování a vyhodnocování kvality kontaktních struktur. Pro tzv. smart textilie nejsou v současné době dostupné žádné normy. Byly proto hledány normy z jiných oblastí, které sice nejsou určeny přímo pro textilie, ale jsou pro daný účel přínosné a velmi dobře aplikovatelné.

V aplikační části této práce, byly pak využity získané poznatky. Byla vytvořena série vzorků určená pro odladění a následnou optimalizaci parametrů odporového sváření 4 typů vodivých prvků na textilních substrátech. Následovalo vytvoření série testovacích vzorků, které dosahovaly parametrů splňující nastavená kritéria. Ty poté podstoupily řadu testů, které určily, zda byly vytvořeny kvalitně, použitím správných metod a materiálů.

Vybrané způsoby pro vytváření kontaktních struktur na textilních substrátech, užití měřicí přípravky i výsledky testů. Vše indikuje využití vhodných parametrů a správného přístupu, protože získané výsledky dosáhly teoretické předpoklady a v některých ohledech je i předčily. Technikou odporového svařování je možné realizovat kontaktní struktury na textilních substrátech vysoké kvality. Přes jednoduchost této metody se vyskytla komplikace, kdy bylo nutné vytvořit novou sadu elektrod pro nepřímé svařování. Nutností je tak důkladná příprava a testování, aby se tyto komplikace daly vyřešit. Přes série vzorků určených pro zkoumání, po úpravy a výrobu měřících přípravků schopných změřit velké množství vzorků s velkou přesností. Bylo ověřeno, že kromě vodivých prvků přímo na textilií, je tato metoda vhodná i pro připojení konvenčních vodičů (drátků či lanek) na kontaktní plošky na textilním substrátu. Přípustná hranice pro kontaktní odpor spoje byla stanovena na 1Ω . Celkově bylo vytvořeno 80 ks testovacích vzorků, všechny kromě jednoho, jež se mechanicky poškodil, byly v tomto limitu. 90% z nich mělo odpor do $0,1 \Omega$,

ty se dají považovat velmi kvalitní spoje. Celkově byly provedeny 3 série testů v teplotní komoře (celkem 30ks vzorků), 2 série testů v šokové komoře (celkem 20ks vzorků), 4 série pracích testů (celkem 30ks vzorků). Po absolvování všech těchto zátěžových zkoušek, 65 vzorků stále splňuje limit jednoho ohmu, většina z nich se však pohybuje hluboko pod touto hranicí v řádech několika desetín nebo setín ohmu. Pro kvalitní vyhodnocení je ideální přehledné vizuální zpracování, kde jsou na první pohled jasné zákonitosti a trendy. Pouze v případě dodržení všech těchto patřičností, lze dosáhnout kvalitních výsledků.

6 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] STOPPA, Matteo a Alessandro CHIOLERIO. Wearable electronics and smart textiles: A critical review. *Sensors (Switzerland)* [online]. 2014, **14**(7), 11957–11992. ISSN 14248220. [cit. 16.10.2017] [Dostupné z: doi:10.3390/s140711957]
- [2] FERRARO, Venere. Smart Textiles and Wearable Technologies for Sportswear: A Design approach. *Proceedings of 2nd International Electronic Conference on Sensors and Applications* [online]. 2015, (November 2015), S3005. [cit. 16.10.2017] Dostupné z: doi:10.3390/ecsa-2-S3005
- [3] SARIF ULLAH PATWARY, Md Syduzzaman. Smart Textiles and Nano-Technology: A General Overview. *Journal of Textile Science & Engineering* [online]. 2015, **5**(1), 1–7. ISSN 21658064. [cit. 16.10.2017] Dostupné z: doi:10.4172/2165-8064.1000181
- [4] MARCULESCU, Diana, Radu MARCULESCU, Nicholas H. ZAMORA, Phillip STANLEY-MARBELL, Pradeep K. KHOSLA, Sungmee PARK, Sundaresan JAYARAMAN, Stefan JUNG, Christl LAUTERBACH, Werner WEBER, Tünde KIRSTEIN, Didier COTTET, Janusz GRZYB, Gerhard TRÖSTER, Mark JONES, Tom MARTIN a Zahi NAKAD. Electronic textiles: A platform for pervasive computing. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2003, **91**(12), 1995–2016. ISSN 00189219. [cit. 16.10.2017] Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2003.819612
- [5] BERGLIN, Lena. Smart Textiles and Wearable Technology. *BalticFashion* [online]. 2013, 1–33. [cit. 16.10.2017] Dostupné z: http://www.hb.se/Global/THS/BalticFashion_rapport_Smarttextiles.pdf
- [6] GHAHREMANI HONARVAR, Mozhdeh a Masoud LATIFI. Overview of wearable electronics and smart textiles. *Journal of the Textile Institute* [online]. 2017, **108**(4), 631–652. ISSN 17542340. [cit. 21.10.2017] Dostupné z: doi:10.1080/00405000.2016.1177870
- [7] PRESTI, Daniela Lo, Carlo MASSARONI, Domenico FORMICA, Paola SACCOMANDI, Francesco GIURAZZA, Michele Arturo CAPONERO a Emiliano SCHENA. Smart Textile Based on 12 Fiber Bragg Gratings Array for Vital Signs Monitoring. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2017, **17**(18), 6037–6043. ISSN 1530437X. [cit. 21.10.2017] Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2017.2731788
- [8] *BAESystems* [online]. 2017. [cit. 21.10.2017] Dostupné z: <http://www.baesystems.com>
- [9] KVASNIČKOVÁ, Kateřina. *Chytrý oblek pro hasiče* [online]. [cit. 21.10.2017]

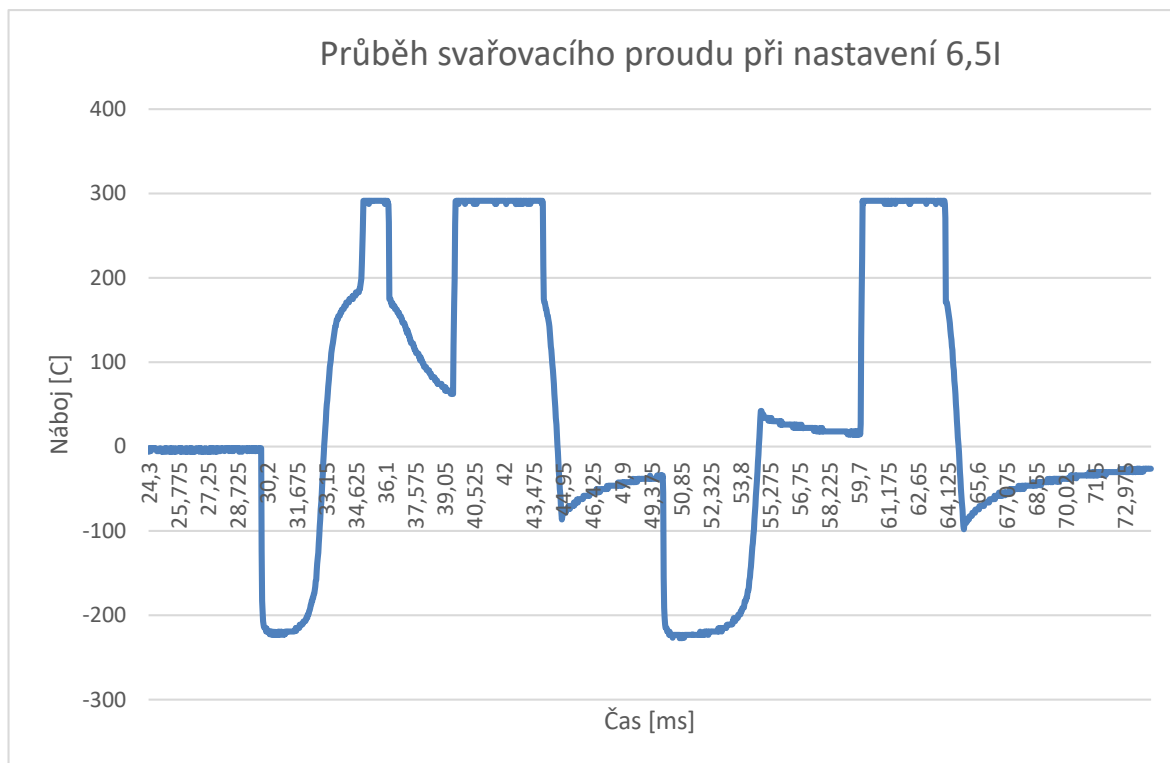
- Dostupné z: <https://info.zcu.cz/clanek.jsp?id=275>
- [10] COTTET, Didier, Janusz GRZYB, Tünde KIRSTEIN a Gerhard TRÖSTER. Electrical Characterization of Textile Transmission Lines. *IEEE Transactions on Advanced Packaging* [online]. 2003, **26**(2), 182–190. ISSN 15213323. [cit. 22.11.2017] Dostupné z: doi:10.1109/TADVP.2003.817329
- [11] *TEXSITE.info* [online]. [cit. 22.11.2017] Dostupné z: <http://www.texsite.info/>
- [12] *Elektrisola Feindraht AG* [online]. [cit. 22.11.2017] Dostupné z: <https://www.elektrisola.com/en/conductor-materials/comparison-of-metals.html>
- [13] *Spoerry & Co AG, Swiss Shield* [online]. [cit. 22.11.2017] Dostupné z: <http://www.swiss-shield.ch>
- [14] *R.STAT* [online]. [cit. 04.12.2017] Dostupné z: <http://www.r-stat.fr/uk/silveRstat-fibre.php>
- [15] FOROUGH, Javad, Teodor MITEW, Philip OGUNBONA, Raad RAAD a Farzad SAFAEI. Smart Fabrics and Networked Clothing: Recent developments in CNT-based fibers and their continual refinement. *IEEE Consumer Electronics Magazine* [online]. 2016, **5**(4), 105–111. ISSN 21622256. [cit. 04.12.2017] Dostupné z: doi:10.1109/MCE.2016.2590220
- [16] BALINT, Richard, Nigel J. CASSIDY a Sarah H. CARTMELL. Conductive polymers: Towards a smart biomaterial for tissue engineering. *Acta Biomaterialia* [online]. 2014, **10**(6), 2341–2353. ISSN 18787568. [cit. 04.12.2017] Dostupné z: doi:10.1016/j.actbio.2014.02.015
- [17] LOCHER, Ivo, T KIRSTEIN a G TRÖSTER. Routing methods adapted to e-textiles. *Proceedings of 37th international ...* [online]. 2004. [cit. 04.12.2017] Dostupné z: http://www.wearable.ethz.ch/research/groups/textiles/ConductiveTextiles/imaps04_locher.pdf
- [18] MEOLI, Dina. Interactive Electronic Textiles: Technologies, Applications, Opportunities, and Market Potential. *Audio* [online]. 2002, 129. [cit. 04.12.2017] Dostupné z: doi:<http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/1216>
- [19] CUI, Hui Wang, Katsuaki SUGANUMA a Hiroshi UCHIDA. Highly stretchable, electrically conductive textiles fabricated from silver nanowires and cupro fabrics using a simple dipping-drying method. *Nano Research* [online]. 2015, **8**(5), 1604–1614. ISSN 19980000. [cit. 11.01.2018] Dostupné z: doi:10.1007/s12274-014-0649-y

- [20] MUTHU KUMAR, N. a G. THILAGAVATHI. Design and development of textile electrodes for EEG measurement using copper plated polyester fabrics. [cit. 11.01.2018] *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*. 2014, **8**(4). ISSN 15330915.
- [21] STEMPIEN, Zbigniew, Ryszard PAWLAK a Ewa KORZENIEWSKA. Thin conductive structures on coated textiles. *2016 Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics, WZEE 2016* [online]. 2016, 8–13. [cit. 11.01.2018] [cit. 11.01.2018] Dostupné z: doi:10.1109/WZEE.2016.7800248
- [22] KARAGUZEL, B., C. R. MERRITT, T. KANG, J. M. WILSON, H. T. NAGLE, E. GRANT a B. POURDEYHIMI. Utility of nonwovens in the production of integrated electrical circuits via printing conductive inks. *Journal of the Textile Institute* [online]. 2008, **99**(1), 37–45. ISSN 00405000. [cit. 11.01.2018] Dostupné z: doi:10.1080/00405000701547748
- [23] KAMYSHNY, Alexander. Metal-based Inkjet Inks for Printed Electronics. *The Open Applied Physics Journal* [online]. 2011, **4**(1), 19–36. ISSN 18741835. [cit. 11.01.2018] Dostupné z: doi:10.2174/1874183501104010019
- [24] READ, Most. News & Events Novel joining methods applicable to textiles and smart garments. [cit. 11.01.2018] 2015, (September 2005), 1–10.
- [25] ŘEBOUN, Jan. Konzultace. In: . Plzeň. 2018.
- [26] MUTH, John F. Woven Fabric-Based Electrical Circuits. *Textile Research Journal* [online]. 2004, **74**(10), 913–919. ISSN 0040-5175. [cit. 14.01.2018] Dostupné z: doi:10.1177/004051750407401103
- [27] SHI, W a T LITTLE. Mechanisms of ultrasonic joining of textile materials. *International Journal of Clothing Science and Technology* [online]. 2000, **12**(5), 331–350. ISSN 09556222. [cit. 14.01.2018] Dostupné z: doi:doi:10.1108/09556220010377869
- [28] LINZ, Torsten, Malte VON KRSHIWOBLOZKI a Hans WALTER. Novel packaging technology for body sensor networks based on adhesive bonding: A low cost, mass producible and high reliability solution. *2010 International Conference on Body Sensor Networks, BSN 2010* [online]. 2010, 308–314. [cit. 14.01.2018] Dostupné z: doi:10.1109/BSN.2010.56
- [29] ŠAFÁŘOVA, Veronika, Luboš HES a Jiří MILITKÝ. An approach to electrical resistance measurement eliminating contact resistance problem. *International Conference on Applied Electronics* [online]. 2015, **2015–Janua**(January), 259–262.

- ISSN 18037232. [cit. 03.02.2018] Dostupné z: doi:10.1109/AE.2014.7011715
- [30] MITKOVÁZ, M, M N KOZICKI, A J WALTONL a V A O VDA. Suspended Greek. *Test.* [cit. 03.02.2018] 2005, **18**(April), 1–4.
- [31] LINZ, Torsten, René VIEROTH, Christian DILS, Mathias KOCH, Tanja BRAUN, Karl Friedrich BECKER, Christine KALLMAYER a Soon Min HONG. Embroidered Interconnections and Encapsulation for Electronics in Textiles for Wearable Electronics Applications. *Advances in Science and Technology* [online]. 2008, **60**, 85–94. ISSN 1662-0356. [cit. 03.02.2018] Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AST.60.85
- [32] *www.iso.org* [online]. 2018. [cit. 03.02.2018]D ostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:6330:ed-3:v1:en>
- [33] *JEDEC* [online]. [cit. 03.02.2018] Dostupné z: <https://www.jedec.org/>

7 Přílohy

Příloha A1: Průběh svařovacího proudu při nastavení 6,5I



Příloha A2: Ukázka ztmavení způsobeného teplotní komorou

