

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Propojování vodivých textilních prvků metodou
odporového svařování**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin ČECHURA**
Osobní číslo: **E19N0002P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Propojování vodivých textilních prvků metodou odporového svařování**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s metodami a postupy používanými pro propojování vodivých textilních prvků v oblasti e-textilii.
2. Vyhledejte vhodné testovací postupy pro stanovení klíčových elektrických a mechanických parametrů a odolnosti propojovacích textilních struktur.
3. Navrhněte a realizujte vzorky textilních propojovacích struktur.
4. Na realizovaných vzorcích prakticky ověřte proces propojování metodou odporového svařování.
5. Proveďte měření vytvořených textilních propojení s důrazem na jejich elektrické parametry a mechanickou odolnost, získané výsledky kriticky zhodnoťte.



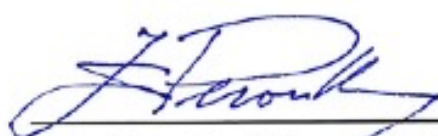
Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Zhou, Y. (2008) *Microjoining and Nanojoining – 16. Resistance-microwelding*, Woodhead Publishing, ISBN 978-1-84569-179-0
2. Kirstei, T. (2013) *Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers – 10. Joining technologies for smart textiles*, Woodhead Publishing Limited, DOI: 10.1533/9780857093530.2.285, ISBN: 9780857093530
3. Elektronické informační zdroje (Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Wiley Online Library, AIP Scitation, Google Scholar, ResearchGate, Mendeley ...)

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

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**


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




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

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá popisem aktuálních metod propojování vodivých textilních prvků a speciálně se zabývá propojováním pomocí odporového svařování. Pro porovnání byly vybrány čtyři představitelé odporového svařování, kterými jsou Paralelní svařování, Protilehlé svařování a dvě termokompresní metody TCB a Hotbar nazývané také jako teplem vyhřívaná elektroda. Tyto čtyři metody odporového svařování byly využity pro realizaci nerozebíratelného elektricky vodivého spojení vzorků pružných vodivých stuh.

V práci je detailně popsána konstrukce vodivých stuh, jejich popis, dostupní výrobci a potřebné postupy pro vznik kontaktu. Vytvořené vzorky byly prověřeny řadou testovacích postupů, mezi které patří vlhké konstantní teplo, suché konstantní teplo, chlad, šoková změna teploty, zkouška cyklickým napínáním, prací testy a trhací zkouška. Práce se mimo jiné zabývá výběrem vhodných testovacích metod pro ověření kvality svařených spojů dle platných norem, popisem parametrů a způsobu testování. Porovnání jednotlivých svařovacích metod odporového svařování bylo hodnoceno čtyřbodovým měřením elektrického odporu odporově svařených vodivých stuh. Závěr diplomové práce je o kritickém zhodnocení naměřených parametrů jednotlivých kontaktovacích metod v závislosti na testovací metodě. Paralelní a Protilehlá svařovací metoda vytváří metalurgické spojení mikrodrátků ve stuze. Tento spoj je odolný vůči klimatickému působení, zatímco na mechanické namáhání již není tak stabilní. TCB a Hotbar metody metalurgické spojení nevytváří, ale dochází pouze k mechanickému spojení mikrodrátků, přičemž jednotlivé mikrodrátky jsou ve svých pozicích trvale fixovány pomocí termoplastického polymerního materiálu pocházejícího z roztavené oblasti textilní vodivé stuh. Svary realizované pomocí termokompresních metod jsou obecně mechanicky odolnější, ale během klimatického testování stabilitu kontaktního odporu mírně ztrácí.

Klíčová slova: Inteligentní textilie, e-textilie, chytré textilie, kontaktování, textilní připojení, Odporové svařování, Termokompresní kontaktování, Hotbar

Abstract

This diploma thesis deals with the description of current methods of interconnection of conductive textile elements and especially deals with interconnection by means of resistance welding. For comparison of resistance welding were selected four methods so called Parallel welding, Opposite welding and two thermocompression methods known as TCB and Hotbar. These four resistance welding methods were used to realize a non-detachable electrically conductive connection of samples of flexible conductive ribbons.

This work describes in detail the construction of conductive ribbons, their description, available manufacturers and the necessary procedures for contacting. The formed samples were tested by a lot of test procedures, including wet constant heat, dry constant heat, cold, shock temperature change, cyclic tension test, wash tests and pull-off test. The work deals with the selection of suitable test methods for the quality verifying of welded joints according to applicable standards and a description of the parameters and method of testing. The comparison of individual welding methods of resistance welding was evaluated by four-wire measurement of the electrical resistance of resistance-welded conductive ribbons. The conclusion of the diploma thesis deal with the critical evaluation of the measured parameters of individual contacting methods depending on the test method. The parallel and Opposite welding methods create a metallurgical connection of microwires in a ribbon. This connection is climate-resistant, but it is no longer so stable to mechanical stress. TCB and Hotbar methods do not create a metallurgical connection, but only a mechanical connection of microwires. In mechanical contact with each other, the individual microwires being permanently fixed in position by a thermoplastic polymeric material coming from the textile conductive ribbon. The interconnection of ribbons made by thermocompression methods are more mechanically resistant and only slightly lose contact resistance stability during climatic testing.

Key words: Smart textiles, e-textiles, contacting, textile connections, Resistance welding, Thermocompression contacting, Hotbar

Prohlášení

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

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

.....Čechura.....
podpis

V Plzni dne 25.5.2021

Bc. Martin Čechura

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Řebounovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, trpělivost, připomínky a konstruktivní kritiku. Rád bych poděkoval Ing. Kateřině Moučkové a Ing. Stanislavu Suchému za spolupráci při realizaci a testování vzorků. Poděkování patří i mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
1 METODY A POSTUPY V PROPOJOVÁNÍ VODIVÝCH TEXTILNÍCH PRVKŮ	11
1.1 METODY PROPOJENÍ VODIVÝCH TEXTILNÍCH PRVKŮ	11
1.2 STUHY	13
2 TESTOVACÍ POSTUPY	15
2.1 VLHKÉ TEPLLO KONSTANTNÍ	15
2.2 SUCHÉ TEPLLO KONSTANTNÍ	15
2.3 CHLAD	16
2.4 ZMĚNA TEPLoty	16
2.5 ZKOUŠKA CYKlickÝM NAPÍNÁNÍM	16
2.6 PRACÍ TESTY	16
2.7 OPTICKÉ POZOROVÁNÍ	17
2.8 TRHACÍ ZKOUŠKY	17
3 NÁVRH A REALIZACE VZORKŮ	18
3.1 SPECIFIKACE PRUŽNÉ STUHY	18
3.2 PROCES PROPOJOVÁNÍ METODOU ODPOROVÉHO SVAŘOVÁNÍ	19
3.3 PARALELNÍ SVAŘOVÁNÍ	25
3.4 PROTILEHLÉ SVAŘOVÁNÍ	27
3.5 TCB SVAŘOVÁNÍ	29
3.6 SVAŘOVÁNÍ VYHŘÍVANOU ELEKTRODOU	32
3.7 POROVNÁNÍ ODPORŮ VZORKŮ PRO TESTOVÁNÍ	34
4 MĚŘENÍ VZORKŮ TEXTILNÍCH PROPOJENÍ	36
4.1 DVOUBODOVÉ MĚŘENÍ	36
4.2 ČTYŘBODOVÉ MĚŘENÍ	36
4.3 ČTYŘBODOVÉ MĚŘENÍ SE ZAPOJENÍM ZA SEBOU	37
4.4 NÁVRH MĚŘÍCÍHO PŘÍPRAVKU	37
5 APLIKACE TESTOVACÍCH METOD	39
5.1 ŠOKOVÁ ZMĚNA TEPLoty	39
5.2 VLHKÉ TEPLLO KONSTANTNÍ	40
5.3 TESTOVÁNÍ SUCHÝM KONSTANTNÍM TEPLEM	41
5.4 ZKOUŠKA CHLADEM	42
5.5 TRHACÍ ZKOUŠKA	42
5.6 ZKOUŠKA CYKlickÝM NAPÍNÁNÍM	45
5.7 ZKOUŠKA PRANÍM	46
ZÁVĚR	48
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	52
PŘÍLOHY	I

Úvod

Smart textilie zahrnují celou řadu textilních postupů, materiálů a technologií, které umožňují začlenění nových funkcionalit do textilních produktů. Dnešní smart textilie většinou obsahují navzájem propojené funkční bloky umístěné na textilií. Tato textilie, nazývána také jako e-textilie má oproti klasické textilií přidanou elektrickou funkcionalitu. Tato funkcionalita může být řešena například vyšíváním, kdy se vodivými mikro-drátky o typickém průměru 20-40 μm vytvoří vodivá cesta. Funkčním blokem může být baterie, řídicí modul či senzory a do bloků se umísťují proto, že tyto elektrické součásti není v současné době ještě možné integrovat do struktury nitě, textilie a dalších materiálů. Propojení bloků je možné tvořit pomocí vpletených, vetkaných či vyšitých vodivých cest, které nesou řadu nevýhod, jako je nízká variabilita směru vodivé cesty na oděvu (při tkaní a pletení), či problematika přechodů v oblasti švů (při tkaní, pletení i vyšívání). Proto se v současné době spíše používá možnost propojování elektronických bloků pomocí textilních vodivých stuh, případně i v pružném provedení. Začátek a konec textilní vodivé cesty je nutné propojit s elektronickými moduly. Tento proces se nazývá kontaktování a lze ho řešit několika způsoby např. pájením, textilním krimpováním či odporovým nebo ultrazvukovým svařováním. V současné době se k nerozebíratelnému kontaktování využívá především pájení. Pájení je časově náročné, není zatím možnost, jak tuto metodu plně automatizovat, je to proces zdoluhavý, ale patří stále mezi nejčastější komerčně využívané metody kontaktování.

Tato práce je zaměřena na využití nové kontaktovací metody nazývané odporové svařování, kterou je možné automatizovat, je rychlejší a vyniká vysokou spolehlivostí. Odporové svařování je metoda kontaktování založena na bázi průchodu elektrické proudu elektrodami přiloženými na dané místo pro vznik stabilního nerozebíratelného kontaktu. Tato metoda má výhodu v nepotřebě dodávat další spojovací materiál v podobě pájky jako u metody pájením či prořezávacích nožů u krimpovacích metod.

Tato diplomová práce se zabývá propojováním vodivých textilních prvků metodou odporového svařování čtyřmi různými metodami a zahrnuje i komplexní testování 100 realizovaných svarů pro každou ze čtyř svařovacích metod, a to osmi vybranými testovacími postupy.

Seznam symbolů a zkratk

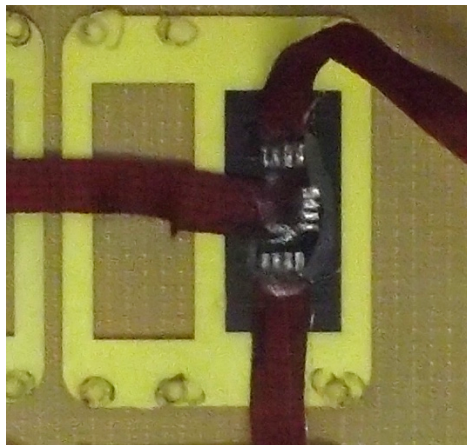
3D	.....	Trojdimenzionální
°C	.....	Stupeň Celsia
Ag	.....	Stříbro
Cu	.....	Měď
CT	.....	Výpočetní tomografie/Computer Tomograph
DPS	.....	Deska plošných spojů
F	.....	Síla [N]
Obr.	.....	Obrázek
PCB	.....	Deska plošných spojů/Printed Circuit Board
PCM	.....	Materiál uchovávající energii/Phase Exchange Material
PES	.....	Polyester
PUR	.....	Polyuretan
R	.....	Odpor [Ω]
RH	.....	Relativní vlhkost/Relative humidity
RTG	.....	Rentgen
SEM	.....	Rastrovací elektronový mikroskop/Scanning electron microscope
Tab.	.....	Tabulka
TCB	.....	Termokompresní lepení/Thermocompression bonding
U	.....	Napětí [V]

1 Metody a postupy v propojování vodivých textilních prvků

K vytvoření propojení v oblasti vodivých textilních prvků, tj. vodivých stuh, vodivých pružných stuh a hybridních vodivých nití lze využít několik metod. Mezi metody propojení vodivých textilních prvků patří odporové svařování, ultrazvukové svařování, kontaktování pájením, kontaktování přešitím, textilní zařezávací krimpy nebo vodivé inkousty či vodivá lepidla. Každá z těchto uvedených metod kontaktování je vhodná pro specifickou skupinu vyšitého materiálu [1].

1.1 Metody propojení vodivých textilních prvků

V současnosti se pájením propojují zejména vodivé stuh, které mohou být i pružné, ale i vodivé textilie, kde jsou vodivé cesty realizovány například tkaním nebo všíáním vodivé hybridní nitě. V případě stuh se k jejich vzájemnému propojení či rozbočení používají speciální desky plošných spojů (DPS), ke kterým se stuhy pájí. Většina DPS (Obr. 1) slouží pouze jako přechod mezi stuhou a elektrickým modulem, ale některé mohou sloužit i pro připojení součástek, senzorů či například baterií.



Obr. 1 Znárodnění propojení stuh k DPS.

Ultrazvukové svařování podobně jako odporové svařování představuje kontaktování bez nutnosti přidání spojovacího materiálu [2] [3]. Výhodou ultrazvukového svařování je možnost použití na spojování na řadu materiálů, po spojení nevzniká na povrchu nevzhledný spoj a neposlední výhodou je rychlost spojování. Ultrazvukové svařování patří k nejrychlejší metodě svařování, kterou je zároveň možné automatizovat. Nevýhodou ultrazvukového svařování jsou vyšší pořizovací náklady na svařovací stroj a nutné působení silou během procesu svařování. [4][5]

Kontaktování pájením je metoda cenově již dražší z důvodu dodávání spojovacího materiálu – pájky. Tato metoda vykazuje vyšší náročnost na funkční kontakt a vykazuje

poměrně vysoké procento zmetkovitosti. Tato metodu není v současné době v oblasti e-textilií možné automatizovat [6].

Přešití je proces, kdy se neizolovanou vodivou nití přešije další neizolovaný prvek. Značnou nevýhodou tohoto procesu je nutné využití jen neizolovaných částí a zároveň nutnost zafixování (enkapsulace) místa spojení [7] [8]. Kontaktování přešitím z hlediska dlouhodobé spolehlivosti není příliš vhodnou metodou kontaktování, neboť při užívání a údržbě textilie dochází k postupnému rozvolňování kontaktu a zhoršování vlastností.

Textilní zařezávací krimpy jsou poměrně moderní metoda kontaktování u textilních prvků převzatá od kontaktování flexibilních plošných spojů, kde je již hojně využívána. Procento úspěšného vyhotovení vodivého spojení se odvíjí od směru vyšitého motivu. Nevýhodou může být to, že je nutné dodávat další propojovací materiál – zařezávací krimpy. Výhodou je, že tuto metodu lze využít na izolované i neizolované vodivé nitě, ovšem v případě izolovaných se snižuje procento úspěšného vzniku vodivého spojení touto metodou [9].

Odporové svařování představuje další možnost kontaktování. Princip je založen na působení mechanického tlaku na kontaktovanou oblast za současného průchodu elektrického proudu touto oblastí po určitou dobu. Mezi výhody tohoto kontaktování patří nízké náklady na spoj, protože tato metoda nevyžaduje další spojovací materiál. Elektrody, kterými prochází proud jsou obvykle vyrobené ze slitin na bázi mědi, případně na bázi vysokotavitelných kovů jako je molybden či wolfram z důvodu jejich vysoké teplotní odolnosti a vynikajícím vodivým vlastnostem. Odporové svařování nachází uplatnění pro širokou škálu automobilových, leteckých a průmyslových aplikací. Výhoda odporového svařování je krátký potřebný čas na vytvoření kontaktu, nízké náklady na spoj a díky automatizaci je činnost odporových svářecích strojů vysoce řízená a opakovatelná. Nevýhodou odporového svařování je nemožnost kontaktovat izolované vodivé prvky v základním uspořádání. Odporové svařování se v současné době v textilním průmyslu nepoužívá. [10] [11] [12]

V současné době existuje řada konstrukcí vodivých textilních prvků. Jednou variantou jsou tkaniny nebo pleteniny, které mají přímo vetkané vodivé dráhy, kdy obě varianty jsou málo univerzální, neboť dráhy jsou vedeny pouze tak, jak to umožňuje struktura textilie, proto je výhodnější vodivé dráhy vyšít. Tyto vodivé dráhy se realizují pomocí vodivých nití s pokovenými vlákny, nebo použitím speciální tzv. hybridní nitě [13]. Běžný elektrický kabel není možné integrovat do textilu z důvodu častého ohýbání látky, což by kabel nevydržel a došlo by tak po krátkém čase k jeho přerušení, proto existují vodivé stuhy, které

tyto nedostatky částečně omezují. Stuhy jsou tkané, obsahují jednu či více vodivých drah a jsou složeny ze svazkových vodičů, které mají co nejmenší průměr, aby byla zaručena ohebnost a odolnost vodivé stuhy. Typickým příkladem je stuha od společnosti Ohmatex, označení stuhy je OHM-R74L-1–10m, které jsou vyrobeny ze 100% Polyesteru, ve kterém jsou čtyři vodivé dráhy, které jsou tvořeny vodiči s PUR povlakem zamezujícím nechtěnému zkratu.

Standardní proces kontakování vodivých stuh metodou pájení je poměrně komplikovaný, zdoluhavý a především ho nelze automatizovat, což má za následek vyšší náklady na celkovou výrobu. Z vodivé stuhy se nejprve musí odstranit působením horkého vzduchu samotný izolační materiál stuhy, tedy PES, ze kterého je stuha utkána. Po tomto kroku se odhalí jednotlivé vodivé drátky, kterých může být pět i více kusů v jedné vodivé dráze [14], na kterých v případě izolovaných drátů je izolace PUR – termosetový polyuretan. Ten se následně odstraňuje z odhalených svazkových vodičů ponořením od roztavené pájky. Izolace PUR je na drátkách z důvodu zamezení vzniku zkratu na námi nechtěném místě. Díky roztavené pájce dojde ke spojení jednotlivých drátků a vznikne tím jeden svazek. Po této přípravě stuhy je možné drátky ručně připájet. Z důvodu mechanické ochrany kontaktu je nutné takovýto spoj ještě enkapsulovat.

1.2 Stuhy

Na trhu je v současné době celá řada výrobců textilních stuh s vodivými drahami. Mezi tyto výrobce například patří Tibtech, Adafruit, Textile Metalizing LLC, WireKinetics LiTex Koolon Bally Ribbon Mills, Ohmatex, Imbut, Texe s.r.l., Mitsufuji, Micro-coax, OTEX Specialty Narrow Fabrics®, Ronda Industry, Creafibres, Haarländer, SATAB, WEEL Technologies, ELAS Industry, Asiatic fiber corporation, Shindo a Textronics.

Pro porovnání byly vybrány tyto dva zástupci výrobců Ohmatex a Interactive wear.

Výrobcem prvního příkladu stuhy je společnost Ohmatex, název stuhy je OHM-e-12-L-2. Materiál pro tento typ stuhy 100% PES + 4x 0,36 mm. Drát s polyamidovým jádrem + PUR povlak. Stuha má 4 vodiče, je široká 12 mm a tloušťka je 1,5 mm. Odpor je 0,4 Ω /m [15].

Výrobcem druhého příkladu stuhy je společnost Interactive-wear, název stuhy je 6B10-TWC3005. Materiál pro tento typ stuhy je Polyester, dráty jsou jednovlášňové s 30 prameny, které mají odpor 0,30 Ω /m a prameny jsou tvořeny mědí potaženou stříbrem, PES izolací, průměr drátků je 0,050 mm, průměr potaženého drátku 0,060 mm [16].



Obr. 2 Pružná stuha Interactive-wear - označení 6B10-TWC3005 (převzato z [17]).

Pružné stuhy jsou nejčastěji vyrobeny z PES vláken, přírodní pryže zajišťující výslednou pružnost stuhy a vodivých nití či přízí, které jsou založeny na pokovených polyamidových vláknech či speciálních nití kombinujících polymerní vlákna a kovové mikrodrátky - tzv. hybridní vodivé nitě [18].

2 Testovací postupy

Pro určení elektrických a mechanických parametrů kvality spojení dvou vzorků stuh je nutné využít celou řadu vhodných testovacích postupů. Jednotlivé testovací postupy jsou zpravidla definovány normami. Jen v případě dodržení všech postupů včetně nastavení hodnot měření je možné stanovit zařízení nebo v tomto případě textilní struktury jako splňující danou normu. Testování je důležité pro vytvoření přehledu, jak se daný spoj chová během zkoušky. Pokud by se daná metoda dostala až do výroby a poté do společnosti například v oblečení, tak se budou propojené stuhy uvnitř oděvů prát, sušit, žehlit, vystavovat náhlým změnám teploty jako je přechod z teplého prostředí do prostředí s teplotou hluboko pod bodem mrazu, anebo budou dlouhodobě vystaveny pouze mrazu. Pro testování parametrů a odolnosti textilních struktur jsou nejdůležitější následující metody:

2.1 Vlhké teplo konstantní

Označení uvedené normy je ČSN EN60068-2-78. Při této zkoušce se vzorek umístí do komory, přičemž jak vzorek, tak komora mají teplotu laboratoře. Podmínky v komoře se nastaví dle normy a udržují se po předepsanou dobu, ta může být 12 h, 16 h, 24 h nebo až 56 dní. Zkušební podmínky jsou od 30 °C a vlhkostí 93 % do teploty 85 °C s vlhkostí 85 %. [19] Reálným příkladem tohoto zatížení v životě produktu je využití textilu ve vlhkém venkovním prostředí. Díky této zkoušce se projeví zrychlená oxidace materiálu. Testování bude prováděno pro 40 °C s vlhkostí 93 % po dobu 1000 hodin.

2.2 Suché teplo konstantní

Norma zabývající se zkouškou suchým teplem konstantním se zabývá norma ČSN EN 60068-2-2. Postup zkoušky suchého konstantního tepla je takový, že se vzorek vloží do komory s teplotou laboratoře. Následně se teplota uvnitř komory zvýší na teplotu dle specifikace a vzorek se vystaví této teplotě po dobu stanovenou normou.

Maximální zkušební teplota je 1000 °C, ta klesá až k minimální hodnotě 50 °C. Doba trvání, po kterou probíhá testování je v rozmezí od 2 hodin až po 1000 hodin. [20] Tato zkušební metoda byla pro měření vybrána pro zkoušku reakce působení suchého tepla po určitou dobu a sledování relaxace polymeru v pružné stuze, díky které může dojít k uvolnění fixace a tím pádem uvolnění kontaktu. V praxi se s působením suchého konstantního tepla můžeme setkat při sušení v sušičce. Pro zkoušky vzorků se testuje v peci vyhřáté na 85 °C po dobu 1000 hodin, kde se na vzorcích měří odpor vždy po cca 200 hodinách.

2.3 Chlad

Norma pro zkoušku na chlad má označení ČSN EN 60068-2-1. Při této zkoušce se vzorek vloží do komory s teplotou laboratoře, komora se uzavře a nastaví se zkouška na požadovanou dobu a teplotu danou touto normou. Norma udává čas pro zkoušku od +5 °C do -60 °C na dobu 2, 16, 72 a 96 hodin. [21] Testování na chlad je důležité pro zaručení vlastností pružných stuh i pro nízké teploty. V komerčním světě se pružné stuhy využité na oblečení nebo v automobilech mohou vyskytnout i v teplotách atakujících -20 °C. Pro testování se vzorky vloží do mrazáku s teplotou -20 °C po dobu 1000 hodin.

2.4 Změna teploty

Norma změna teploty je ČSN EN 60063-2-14 ed. 2. Tato zkouška stanovuje vliv změn teplot na vzorek. Neslouží k prokázání působení vysoké nebo pouze nízké teploty.

Pro tento typ zkoušky se využívá jedna nebo dvě komory, ale v případě testování ve dvou komorách je nutné dodržet maximální dobu přenosu vzorku z jedné komory do druhé. Samotné přemístění je možné buď ručně nebo automaticky. Doby a teploty jsou dané v této normě. Daná zkouška je důležitá pro ověření funkčnosti vzorků v situacích, kdy se oděv vybavený pružnou stuhou přenáší z chladného prostoru do teplého a naopak. [22] Testování probíhá pro teploty -25 °C/+85 °C, kdy změna teploty je vždy do 10 s a setrvání na jedné teplotě je minimálně 15 minut. Celkem je provedeno 1000 cyklů.

2.5 Zkouška cyklickým napínáním

Zkouška natažením patří mezi další možnosti zkoušky materiálů, případně zkoušky vzorků. Zkouška spočívá v cyklickém natahování vzorků o definované procentuální prodloužení. Zkouška je důležitá pro sledování změn vlastností materiálů. Ve skutečnosti tomuto zatěžování dochází téměř ve všech odvětvích. Příkladem může být využití pružných stuh v oděvech. Pro testování se definuje prodloužení o 30 %. [23]

2.6 Prací testy

Tato norma označena ČSN EN ISO 6330 popisuje zkoušky materiálů pomocí pracích testů. Na začátku normy je nutné říct, jaký typ pračky, sušičky a referenčního detergentu se bude v průběhu testování využívat a podle toho se testuje dle příslušné kategorie. Princip testování je takový, že se vzorky vloží do pračky spolu s doplňkovým textilem, aby byla dodržena celková hmotnost obsahu pračky 2 kg, přidají se detergenty a zapne se proces praní.

Po vyprání se vzorky opatrně vyjmou z pračky a suší se. Norma rozděluje, jestli se vzorky suší v sušičce, či v závěsu, ale pracuje i s verzí tzv. odkapáním, kdy se nevyužívá sušičky a proces praní je ukončen bez ždímání. [24]

Praní je naprosto základní požadavek na všechny materiály využívané v oblečení. Pro toto testování bude využíváno praní v pračce plněné zepředu s teplotou vody 40 °C nastavené při ždímání na 400 otáček za minutu, s následným sušením v závěsu vždy po definovaném počtu pracích cyklů.

2.7 Optické pozorování

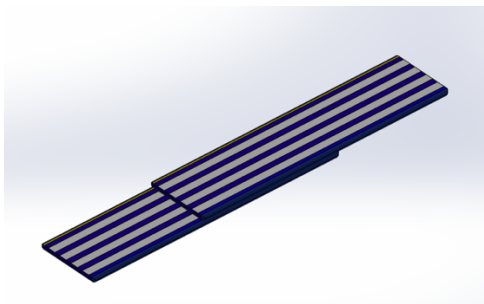
Optické pozorování není testovací norma, nicméně je to důležitá část hodnocení zkušebních vzorků materiálů. Díky technologiím RTG a CT se sleduje vnitřní struktura materiálů. Účelem tohoto testování je především získat fotografie spojení textilních pružných stuh. Na základě fotografií je možné hodnotit kvalitu kontaktu a případně stanovit, k jakým degračním mechanismům dochází.

2.8 Trhací zkoušky

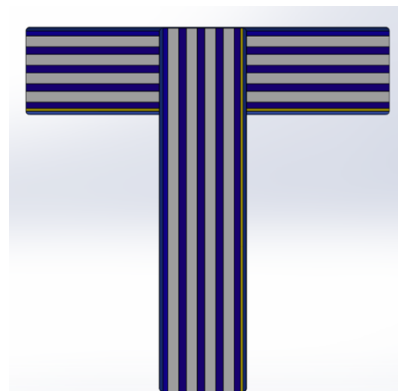
Trhací zkouška je zástupcem destruktivní zkoušky, během které se testovací vzorek upne do testovacího zařízení a sleduje se při jakém natažení vzorku došlo k jeho přetržení [25].

3 Návrh a realizace vzorků

Vzorky, které lze navrhnout pro měření elektrických a mechanických vlastností mohou mít řadu podob. Pro tuto diplomovou práci bylo vybráno spojení dvou přes sebe jdoucích stuh (Obr. 3). Další možností je například zapojení do tvaru písmena T (Obr. 4).



Obr. 3 Schematické znázornění přes sebe jdoucích stuh.



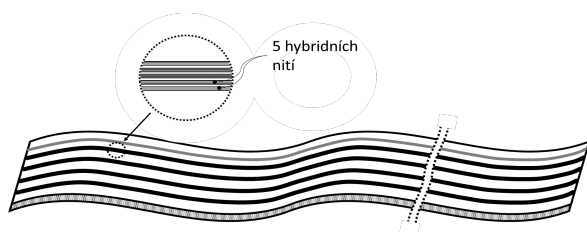
Obr. 4 Zapojení do tvaru písmena "T".

Vzorky byly vytvořeny pomocí elektricky vodivých stuh. Tyto stuhy jsou flexibilní a strečové. Využitelnost těchto vodivých stuh je například u oblečení, kde je tímto flexibilním materiálem je tvořena sběrnice, tedy propojení elektrických modulů či funkčních bloků v textilu.

3.1 Specifikace pružné stuhy

Tab. 1 Technické specifikace pružné stuhy využité pro testování.

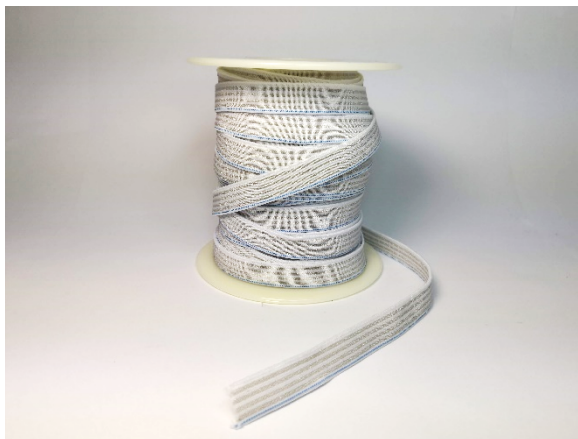
Oboustranná pružná vodivá stuha 700 682 121	
Šířka stuhy	12 mm
Rozteč vodivých drah	2,52 mm
Materiál vodivých drah	5 hybridních vodivých nití s 8 Cu/Ag mikrodrátky
Lineární odpor	< 1 Ω /m
Výrobce	Společnost Clevertex



Obr. 5 Topologie pružné vodivé stuhy (převzato z: [26]).



Obr. 6 Detail vodivé dráhy ve stuze.

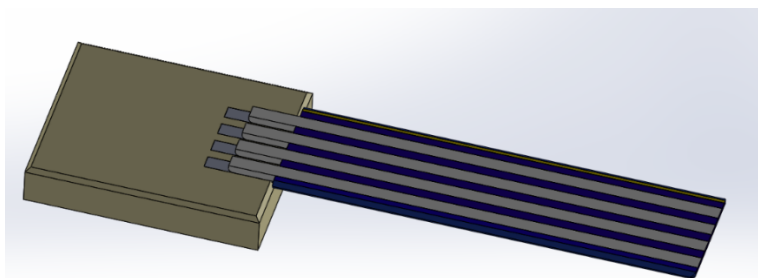


Obr. 7 Fotografie vodivé pružné stuhy.

3.2 Proces propojování metodou odporového svařování

Průmyslově zavedený proces kontaktování vodivých stuh je relativně zdoluhavý proces, který je podrobně popsán v kapitole 1.1, který začíná odstraněním materiálu zajišťující pevnost a rozměry stuhy, následuje odstranění izolace vodivých vláken a následuje připájení k DPS. Ilustrační znázornění hotového spojení je na Obr. 8. Po zapájení je z důvodu mechanické ochrany nutná enkapsulace. Tento proces je časově a finančně náročný, proto je důležité najít jinou alternativní metodu kontaktování, které odstraní nevýhody metod předchozích.

Tento problém řeší odporové svařování, který v jednom kroku odstraní (roztaví) polyesterová vlákna stuhy, odstraní případnou izolaci vodivých mikrodrátků ve stuze a dojde k vytvoření kontaktu. Po opětovném zatuhnutí polyesteru dojde zároveň k zafixování a částečné enkapsulaci místa svaru.



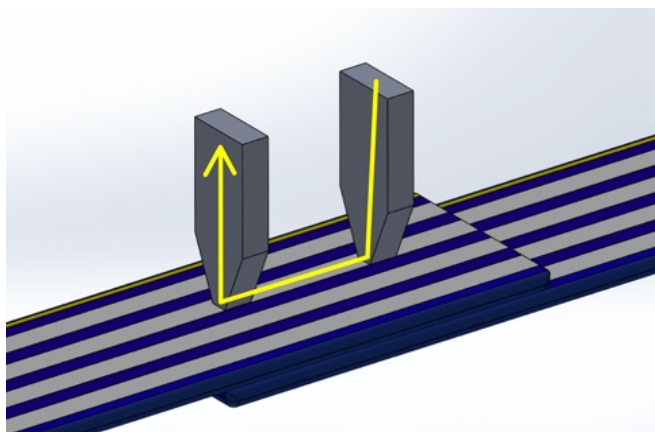
Obr. 8 Schématické znázornění kontaktování pružné stuhy na DPS.

Metodou odporového svařování se spojí dohromady 200 stuh s parametry uvedené v *Tab. 1*, které mají délku vždy 4 cm a vždy se vůči sobě překrývají o 10 mm. Tím vznikne 100 vzorků.

Cílem je nakontaktovat všechny 4 dráhy s co nejnižším kontaktním odporem, a zároveň tak, aby vznikl kontakt s dostatečnou mechanickou odolností. Možností, jak kontaktovat vodivou pružnou stuhu metodou odporového svařování existuje několik. Byly vybrány tyto čtyři metody propojení:

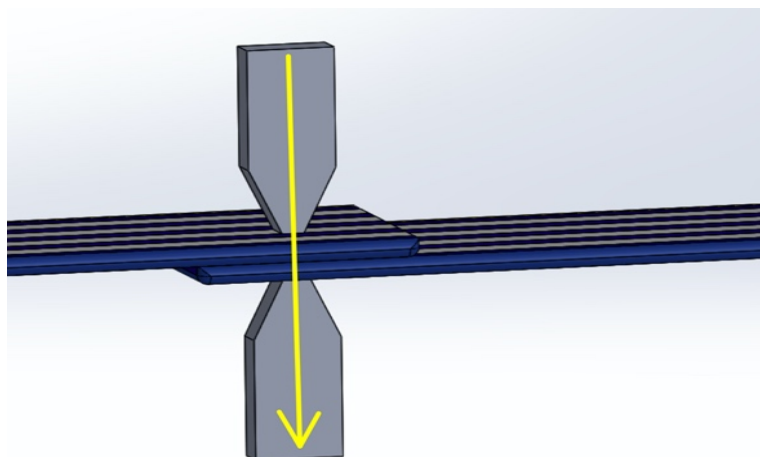
- Paralelní svařování
- Protilehlé svařování
- TCB
- Hotbar

Paralelní způsob odporového svařování je možný pouze u neizolovaných vodivých vláken. V opačném případě nemůže procházet proud skrze vodiče, a tedy není možnost propojování. Na Obr. 9 je znázorněn žlutou šipkou směr průchodu elektrického proudu elektrodami a mikrodrátky v hybridní niti. U tohoto způsobu kontaktování může dojít k vytvoření metalurgického spoje.



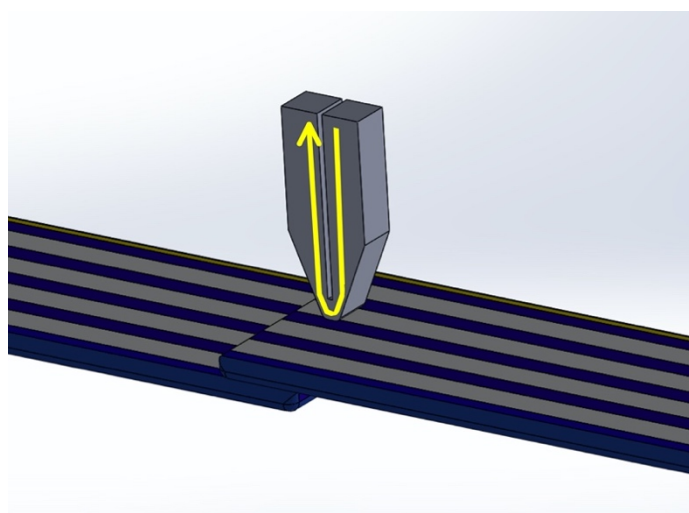
Obr. 9 Schématické znázornění paralelního svařování.

Druhým využitým procesem je protilehlé svařování (Obr. 10). To je stejně, jako svařování paralelní, možné provádět jen na neizolovaných vodivých mikrodrátkách ve stuzce. Žlutá šipka znázorňuje směr procházejícího proudu. Je tedy vidět, že cesta procházejícího proudu je oproti paralelnímu kratší, tudíž dochází pouze k lokálnímu ohřevu materiálu. Kontaktování protilehlým svařováním se může vytvořit metalurgický spoj.



Obr. 10 Schématické znázornění protilehlého svařování.

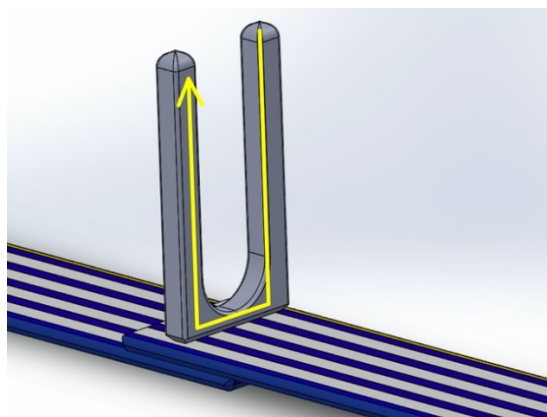
TCB je zkratka pro Thermocompression bonding (schématické znázornění je na Obr. 11). Tato metoda může teoreticky vytvořit i metalurgický spoj, ale v případě kontaktování stuh dojde pouze k fixaci mikrodrátků k sobě pomocí taveniny polyesteru. Během kontaktování touto metodou dojde k lokální prohlubni v místě přiložení elektrody. [27]



Obr. 11 Schématické znázornění TCB.

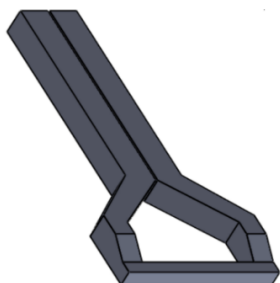
Vyhřívaná elektroda – termoda v anglických člancích nazývaná jako Hotbar. Tato elektroda se využívá u selektivního pájení flexi PCB materiálů. Tento princip ovšem lze použít i pro svařování textilních stuh, kdy se elektroda zahřeje proudem procházejícím elektrodou na dostatečně vysokou teplotu, při které se roztaví PES vlákna stuhy a za současného působení mechanického přtlaku dojde ke spojení jednotlivých mikrodrátků, které jsou po ztuhnutí polyesteru fixovány ve vzájemném kontaktu. V tomto případě ovšem nedochází k metalurgickému spojení mikrodrátků. Proces vytvoření kontaktu je velmi rychlý je v řádu stovek milisekund. Důležitým faktorem pro kontaktování je působící tlak, který působí při každém cyklu svařování. Výhodou tohoto svařování je možnost vytvořit

několik paralelních spojů současně v jednom svařovacím procesu. Díky tomu dojde k vysoké úspoře času, a tedy i celkových nákladů na výrobu. [28] [29] Na Obr. 12 je žlutou šipkou znázorněný proud procházející elektrodou. Je tedy zřejmé, že tato metoda je využitelná pro kontaktování izolovaných i neizolovaných vodivých nití, protože proud prochází pouze přes elektrodu a na stuhu působí pouze silou a teplotou.



Obr. 12 Svařování teplotní elektrodou.

Pro ověření této metody svařování byla navržena a realizována vlastní svařovací elektroda. Elektroda byla vytvořena v programu SolidWorks na základě podobnosti s elektrodami (Thermodes), které se využívají pro pájení flexibilních plošných spojů (například společností A.I.T. [30]). Model elektrody z programu SolidWorks je na Obr. 13.

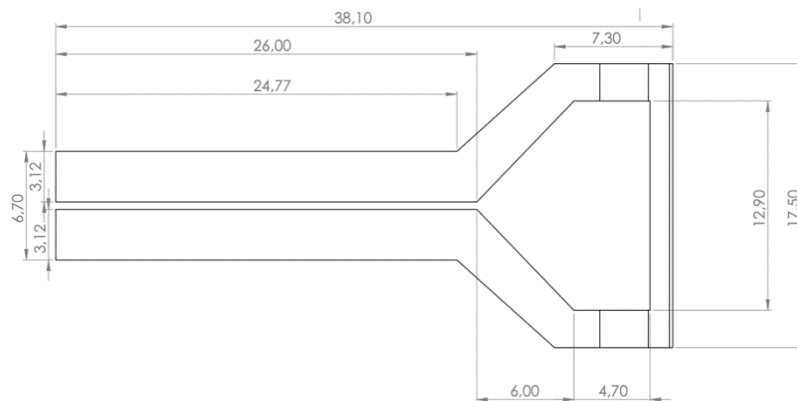


Obr. 13 Návrh Hotbar elektrody v programu SolidWorks.

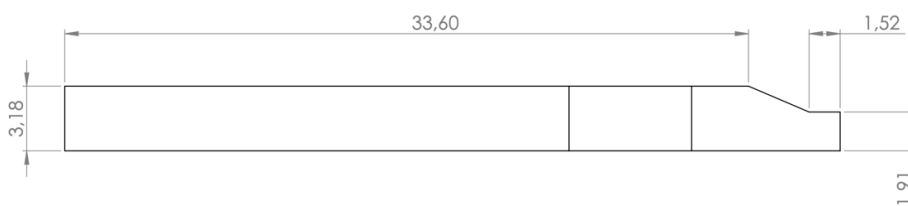


Obr. 14 Vyrobené teplotní elektrody.

Teplotní elektroda byla vyrobena ve společnosti Navel s.r.o. Předpokladem zvoleného materiálu na výrobu byla elektrická vodivost a vysoká teplotní odolnost. Materiál elektrody je slinutý karbid složený z tvrdého materiálu, karbidu wolframu a jako pojivo je kobalt. Označení materiálu je CTS20D. Jedná se o univerzální materiál pro obrábění legovaných a nelegovaných ocelí, slitin titanu a slitin na bázi niklu.



Obr. 15 Rozměry Hotbar elektrody.



Obr. 16 Rozměry Hotbar elektrody – bokorys.

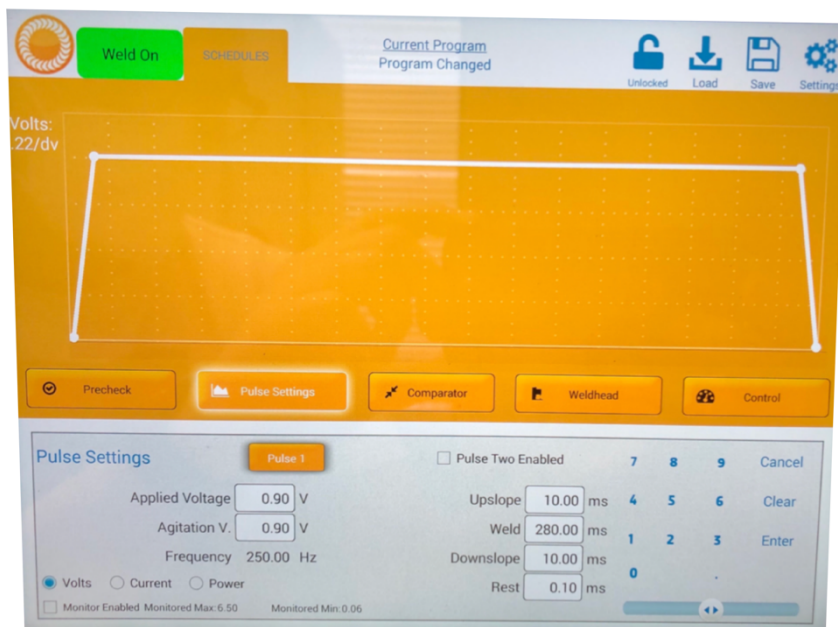
Vytváření testovacích vzorků

Metodou odporového svařování se testuje celkem 100 vzorků stuh, které vznikly spojením vždy dvou 4 cm vzorků stuh, které se překrývají o 10 mm. Snaha je vytvořit vodivého propojení dvojice stuh a zároveň vytvořit dostatečně silné mechanické propojení. Proces výroby začíná nastříháním vzorků na délku 4 cm, následně je na odštířené konce vzorků přibližně dvě sekundy působeno horkým vzduchem o teplotě 400 °C, což způsobí částečné natavení PUR. Natavení PUR má především výhodu v tom, že se zamezí rozplétání stuh v průběhu další manipulace se vzorky a konec stuhy se tak zacelí.

Výběr měřících parametrů

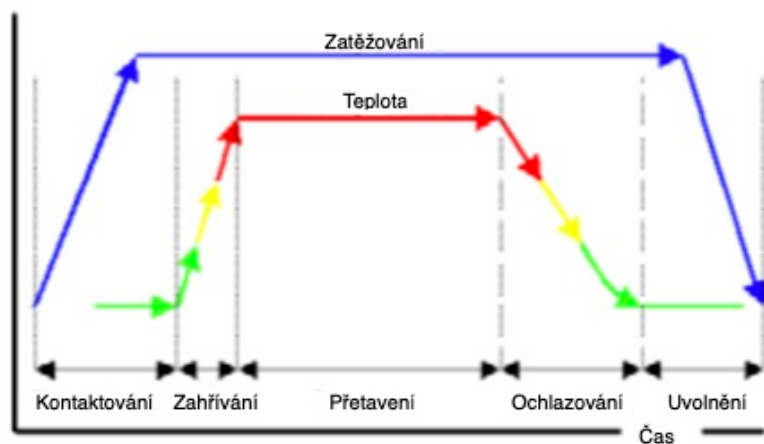
Každá metoda kontaktování odporovým svařováním vyžaduje rozdílné nastavení parametrů odporového svařování, zejména pak proudu, který prochází svařovací elektrodou. Volba těchto parametrů představuje proces testování několika parametrů a hledání těch ideálních. Označení ideálních parametrů je částečně subjektivní. Jde především o vizuální pohled. Důležité je, aby mikrodrátky v hybridní niti nebyly přerušeny, naopak ale musí dojít ke svaru, tedy spojení spodní a horní vodivé pružné stuhy, respektive mikrodrátků uvnitř jejich vodivých drah.

Výběr parametřů byl prováděn pro přítlak elektrod 500 g, 1000 g a 2000 g a velikost napětí bylo nastaveno na hodnotu od 0,6 až do 3,5 V. Svařování bylo prováděno vždy při konstantním čase 280 ms. Na Obr. 17 je vidět, že proud má 10 ms nástupnou a 10 ms sestupnou hranu. Toho bylo využito pro zamezení skokového namáhání elektrod i pružných stuh.



Obr. 17 Nastavení a průběh napětí pro odporové svařování.

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 18) je znázorněn vývoj teploty a přítlaku v čase. Je zřejmé, že zátěží je nutno působit před i po aktivaci svařovacího proudového pulzu. Působením před aktivací se zamezí nechtěného jiskření, které může způsobit přepálení vodivých mikrodrátků a působení silou po aktivaci procházejícího proudu má za úkol držet realizovaný svar až do úplného zchladnutí místa svaru.



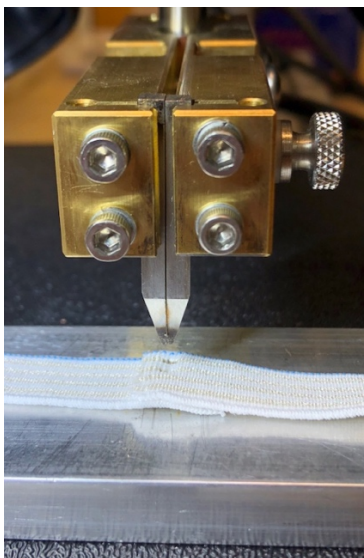
Obr. 18 Průběh teploty a zátěže při odporovém svařování (převzato z: [29]).

3.3 Paralelní svařování

Paralelní metoda svařování využívá dvojici vzájemně elektricky oddělených elektrod. Elektrody jsou definovaným přitlakem umístěny na překrývající se dvojici stuh v místě vodivých drah, které mají být svařeny. Během procesu svařování prochází proud vodivou drahou mezi elektrodami, čímž je generováno teplo, které způsobí roztavení PES vláken v místě spoje. Vzhledem ke skutečnosti, že celý svařovací proud je přenášen pomocí mikrodrátků ve vodivé dráze stuhy, umožňuje tato metoda svařování i roztavení mikrodrátků a vznik metalurgického spoje. U této metody ovšem existuje i riziko přepálení mikrodrátků při působení příliš vysoké hodnoty proudu, nebo při nedostatečném kontaktu mikrodrátků a svařovacích elektrod. Po ukončení procesu svařovaná je nutné vytrhnout elektrody z místa svaru, neboť jsou elektrody částečně fixovány zatuhnutou vrstvou polyesteru. U této metody není možné použít pro uvolnění elektrod dodatečný proudový impuls (již bez přídržné síly), neboť by při oddalování elektrod došlo ke vzniku jiskření a poškození mikrodrátků v místě svaru. Tato metoda ze svého principu neumožňuje kontaktování izolovaných mikrodrátků, ani kontaktování více vodivých drah současně.

Tab. 2 Parametry paralelního svařování.

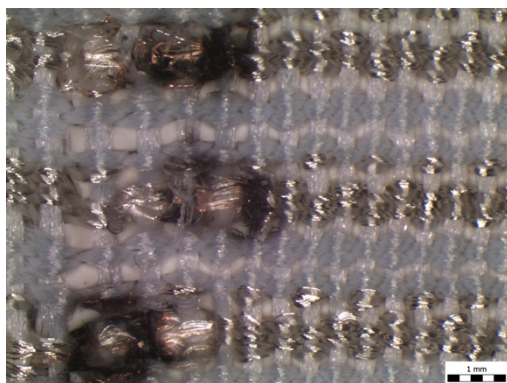
<i>Napětí</i>	<i>0,75 V</i>
<i>Čas</i>	<i>280 ms</i>
<i>Zátěž</i>	<i>1000 g</i>



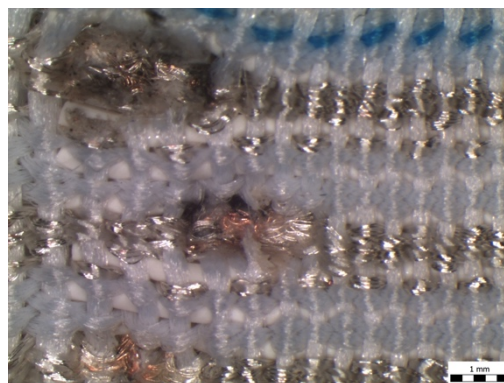
Obr. 19 Paralelní svařování.

Podle snímku z mikroskopu je možné vizuálně hodnotit kvalitu spojení. Na Obr. 20 je pro nízkou zátěž – pouze 0,5 kg a napětí nastavené na 1 V zřejmé, že nedošlo ke spojení se spodní stuhou, ale došlo pouze k odstranění PUR v místě přiložené elektrody.

Vzorek na Obr. 21 je vytvořený při zátěži 1 kg a napětí 0,8 V a představuje ideální vzhled kontaktu především proto, že nejsou zřejmé přerušené mikrodrátky ve stuze. Vzorek na Obr. 22 již přerušené mikrodrátky ve stuze má, takže nastavení napětí a zátěže při výrobě vzorku je už příliš vysoké.



Obr. 20 Paralelní metoda 0,5 kg a 1 V.

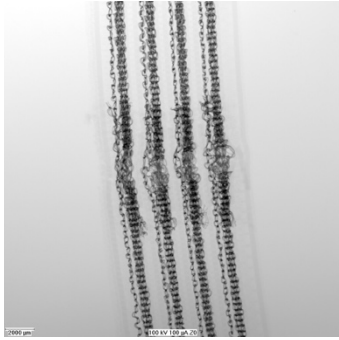


Obr. 21 Paralelní metoda 1 kg a 0,8 V.

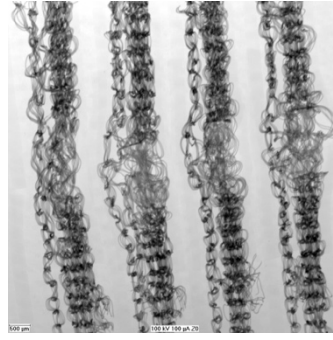


Obr. 22 Paralelní metoda 1 kg a 1 V.

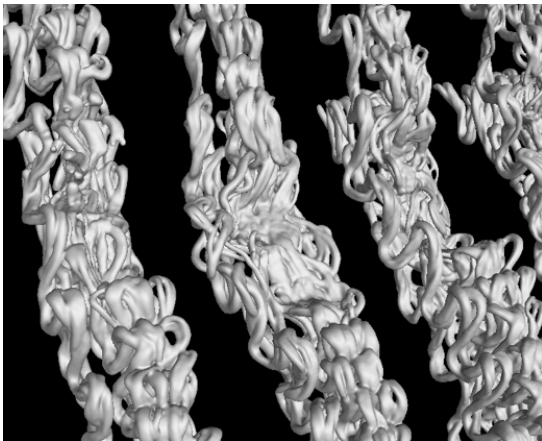
Hodnocení kvality svaru a vliv nastavení přtlaku a napětí bylo provedeno vytvořením mikroskopických fotografií pomocí stereomikroskopu Olympus SZX10 při zvětšení 15 a 24 krát. Na Obr. 23 až Obr. 25 jsou RTG a CT snímky vzorku vytvořeného parametry uvedenými v Tab. 2. Snímky znázorňují rozložení mikrodrátků ve stuze a podle CT snímků lze vidět, že v místě svaru došlo k metalurgickému spojení obou stuh. Na Obr. 26 je snímek z elektronového mikroskopu. Snímek potvrzuje vznik metalurgického spojení mikrodrátků.



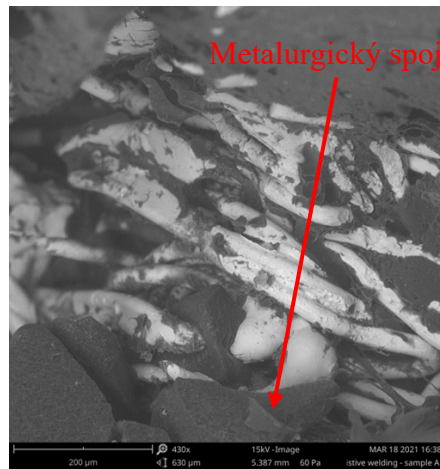
Obr. 23 RTG snímek - Paralelní metoda.



Obr. 24 RTG snímek - Paralelní metoda.



Obr. 25 CT snímek - Paralelní metoda.



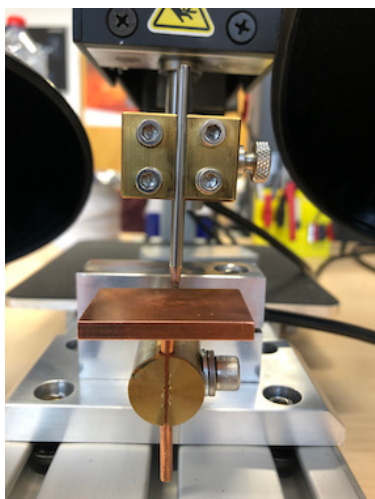
Obr. 26 SEM snímek vzorku paralelní metody.

3.4 Protilehlé svařování

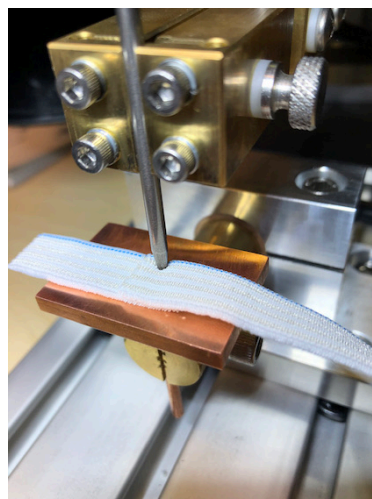
Protilehlé odporové svařování díky umístění elektrod proti sobě určuje krátkou vzdálenost, kterou musí procházet elektrický proud od jedné elektrody ke druhé. U protilehlého svařování je nutné, aby byly svařovány pouze neizolované vodivé nitě. V opačném případě by nedošlo ke spojení. Místo uložení dvou elektrod proti sobě je možné využít i uložení elektrody a měděné svařovací uzemňovací rovinové elektrody (Obr. 44). Tento způsob je výhodnější z hlediska položení stuhu na desku a eliminace případného sklouznutí mimo vodivou cestu. Pro tento typ svařování byly experimentálně stanoveny jako nejvhodnější parametry uvedené v Tab. 3.

Tab. 3 Parametry protilehlého svařování.

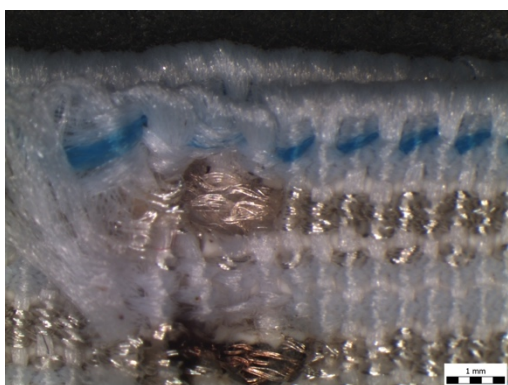
Napětí	0,9 V
Čas	280 ms
Zátěž	1250 g



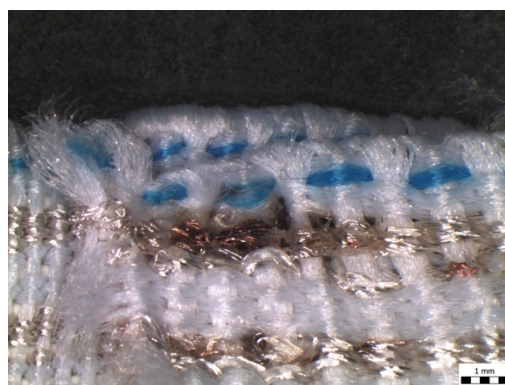
Obr. 27 Protilehlé svařování – uspořádání elektrod.



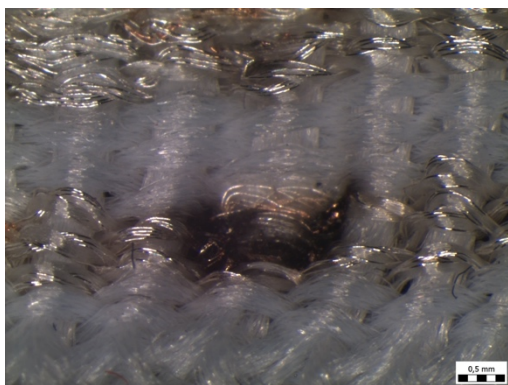
Obr. 28 Protilehlé svařování.



Obr. 29 Protilehlé 0,5 kg a 0,6 V.



Obr. 30 Protilehlé 1 kg a 0,6 V.

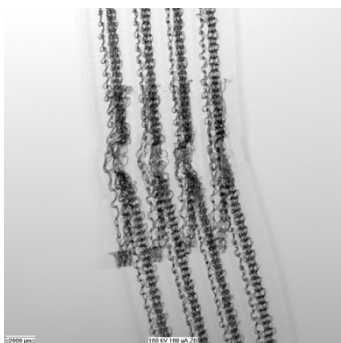


Obr. 31 Protilehlé 1 kg a 1,2V.

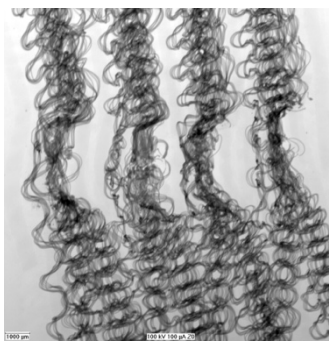
Na Obr. 29 je zachycen výsledek testování parametrů protilehlého svařování. Tento vzorek je vytvořen při zátěži 0,5 kg a napětí 0,6 V a podle snímku je spoj nedostatečný. Na rozdíl od toho je na Obr. 30 vzorek už vyhovující. Na snímku Obr. 31 je díky zátěži 1 kg a napětí 1,2 V vidět už spálená oblast v místě přiložení elektrod, což není také správné.

Na Obr. 32 až Obr. 34 jsou RTG a CT snímky vzorku vytvořeného parametry uvedenými v Tab. 3.

Na snímcích je především vidět místo spojení stuh, protože mikrodrátky jsou v tomto místě stlačené. CT snímek ukazuje metalurgické spojení mikrodrátků. Na Obr. 35 je zaznamenané metalurgické propojení mikrodrátků ve stuze, který je zachycený elektronovým mikroskopem.



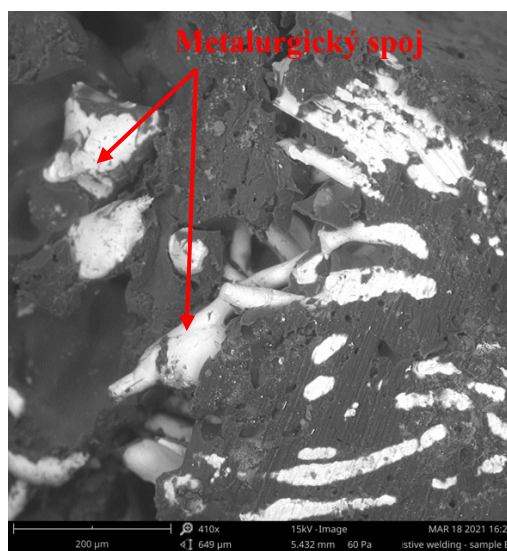
Obr. 32 RTG snímek Protilehlá metoda.



Obr. 33 RTG snímek Protilehlá metoda.



Obr. 34 CT snímek Protilehlá metoda.



Obr. 35 SEM snímek vzorku protilehlé metody.

3.5 TCB svařování

TCB svařování umožňuje díky jeho principu, kdy je působením procházejícího proudu zahřívána zejména špička elektrody přitlačovaná silou na svařované vzorky, možné svařovat i stuhy s izolovanými vodivými mikrodrátky. Z důvodu minimalizace možného poškození mikrodrátků v místě spoje byl použit dvoufázový postup přípravy, kdy v první fázi vznikne samotný svar a v druhé fázi kontaktování je aplikován druhý svařovací impuls, ale již bez

působení přitlačné síly. Tím dojde k uvolnění přitavené TCB elektrody z místa svaru, aniž by bylo nutné ji mechanicky z místa svaru odtrhávat. Tím se eliminuje riziko poškození mikrodrátků ve svaru. Tento způsob dvojího působení svařovacím impulsem není možné u předchozích metod využít, neboť by došlo k nežádoucímu jiskření při vzdálení elektrod z místa svaru.

Tab. 4 Parametry TCB svařování.

<i>Napětí</i>	<i>0,85 V</i>
<i>Čas</i>	<i>280 ms</i>
<i>Zátěž</i>	<i>1000 g</i>

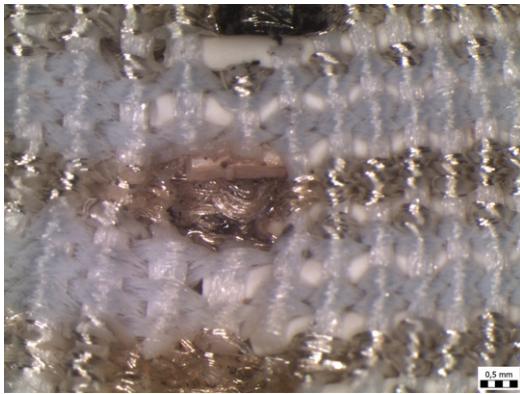


Obr. 36 Detail TCB elektrody.

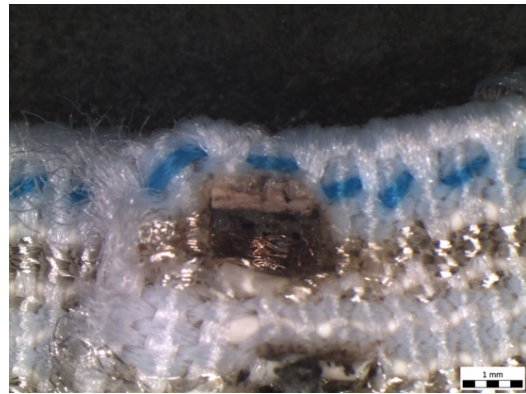
Při nastavení parametrů vytvoření vzorku při zátěži 0,5 kg a napětí 0,9 V je podle Obr. 37 zřejmé, že nedošlo ke spálení polyesteru v místě kontaktu, ale nedošlo ani ke spojení dvou stuh, tudíž se jedná o nevhodnou kombinaci nastavených parametrů výroby.

Na Obr. 38 je vidět, že při zátěži 2 kg a napětí 1 V dojde nejen ke spojení, ale zároveň už i k významnému spálení polyesteru v místě roztavení, takže tato kombinace napětí a zátěže je nevhodná.

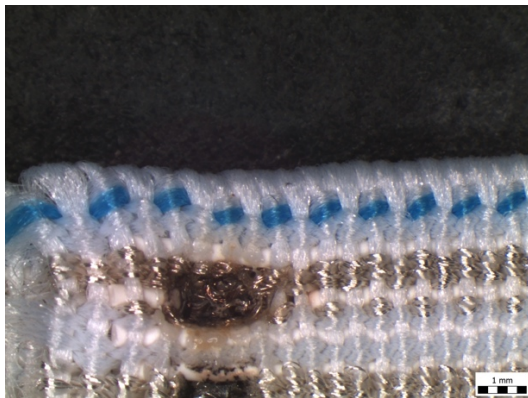
Na snímku Obr. 39 je vidět, že došlo ke spojení horní i spodní vrstvy stuh, ale nedošlo ještě ke spálení polyesteru. Nastavení zátěže 0,5 kg a napětí 1 V je tedy možné uplatnit pro vytváření vzorků.



Obr. 37 TCB zátěž 0,5 kg a $U = 0,9$ V.

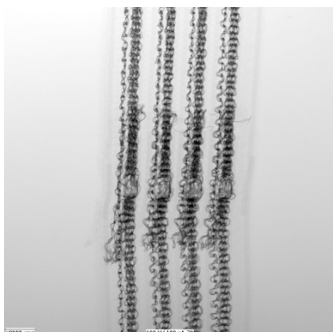


Obr. 38 TCB zátěž 2 kg a $U = 1$ V.

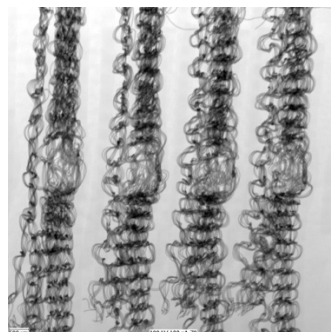


Obr. 39 TCB zátěž 0,5 kg a $U = 1$ V.

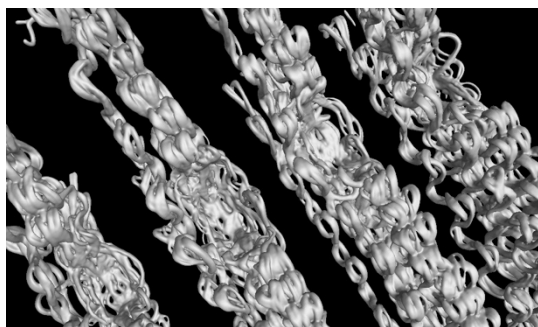
Na Obr. 40 až Obr. 42 jsou RTG a CT snímky vzorku vytvořeného parametry uvedenými v Tab. 4. Podle snímků je viditelné rozložení mikrodrátků ve stuze a podle CT snímků se nevytvoří při TCB metodě metalurgické spojení stuh a dojde jen k mechanickému spojení. Snímek z elektronového mikroskopu na Obr. 43 zachycuje mechanické spojení mikrodrátků, aniž by došlo k metalurgickému spojení.



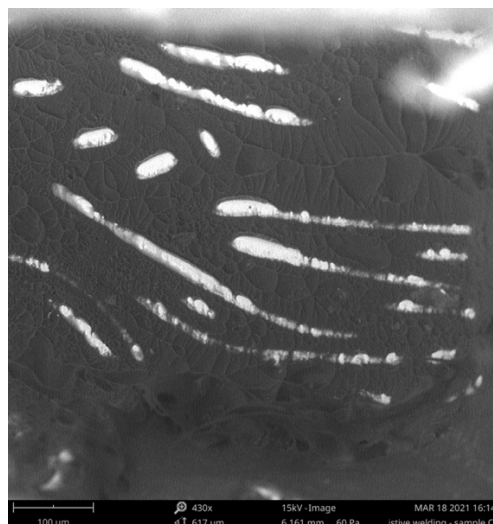
Obr. 40 RTG snímek TCB metoda.



Obr. 41 RTG snímek TCB metoda – detail.



Obr. 42 CT snímek TCB metoda.



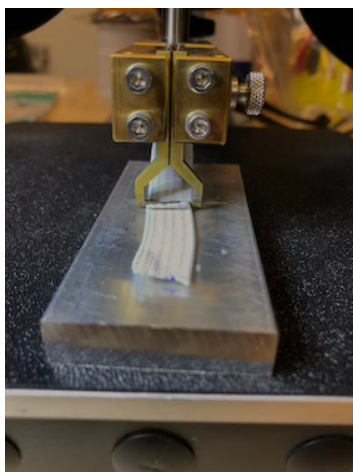
Obr. 43 SEM snímek vzorku TCB metody.

3.6 Svařování vyhřívanou elektrodou

Svařování vyhřívanou elektrodou principiálně vychází z principu TCB, který je postaven na průchodu proudu úzkou částí elektrody, čímž dojde k zahřátí elektrody na vysokou teplotu a za působení zátěže dojde k roztavení PUR. Díky tomu dojde ke spojení vodivých drátků uvnitř hybridní nitě ve vodivé dráze pružné stuhy. Tento typ svařování má oproti svařování TCB výhodu v tom, že se roztavuje stuha v celé své šířce (podle rozměrů elektrody) a díky tomu se pevnost celého svaru zvyšuje spojením PUR i mimo vyšité vodivé dráhy. Další výhodou je, že dochází ke svaření všech vodivých drah ve stuzě současně, kdežto u TCB je nutné selektivně svařovat každou vodivou dráhu individuálně. Svařování vyžaduje působení proudu ve dvou fázích. Při první dojde ke svaření stuh, čímž dojde mimo jiné i k roztavení PUR, která se přilepí na elektrodu, a proto je nutné přidat druhý proudový impuls, při kterém dojde k uvolnění elektrody od stuhy bez působení síly. Druhá fáze již nevyžaduje tak vysokou hodnotu napětí (v Tab. 5 označeno jako Napětí 2) impulsu, aby byla zachována životnost elektrody. Parametry, za kterých bylo prováděno svařování jsou uvedeny v Tab. 5.

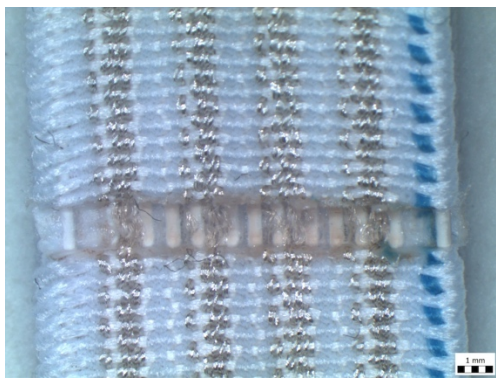
Tab. 5 Parametry svařování teplotní elektrodou.

Napětí 1	1,25 V
Napětí 2	1 V
Čas	280 ms
Zátěž	1000 g



Obr. 44 Svařování teplotní elektrodou.

Na Obr. 45 je znázorněn vzorek vytvořený nastavení napětí 1 V a zátěži nastavené na 1 kilogram. Při těchto parametrech nedošlo ke spojení horní a spodní stuhy. Jedná se tedy o nevhodnou kombinaci nastavených parametrů. Při napětí 1,25 V a zátěži 1 kg (vzorek je zobrazen na Obr. 46) došlo ke spojení obou stuh a nedošlo ke spálení polyesteru ani mikrodrátků, tudíž tyto parametry jsou vhodné pro vytváření testovacích vzorků, na rozdíl od vzorku, který je na Obr. 47 a je vytvořen při napětí 1,5 V a zátěži 1 kg už vhodný není, protože došlo ke spálení polyesteru v místě roztavení.



Obr. 45 Hotbar zátěž 1 kg a $U = 1$ V.

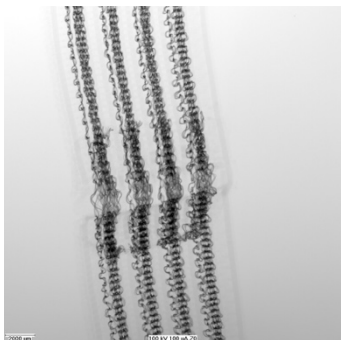


Obr. 46 Hotbar zátěž 1 kg a $U = 1,25$ V.

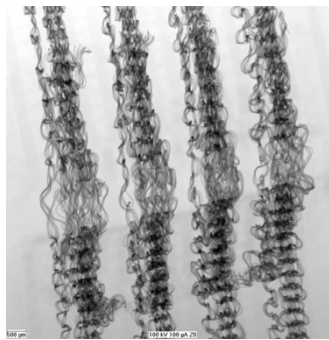


Obr. 47 Hotbar zátěž 1 kg a $U = 1,5$ V.

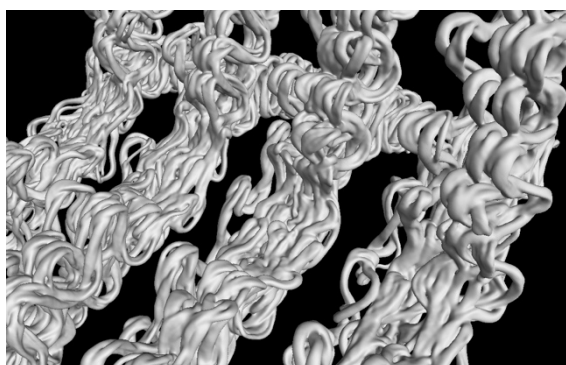
Na Obr. 48 až Obr. 50 jsou pomocí snímků RTG a CT vzorků, které byly vytvořeny podle parametrů v Tab. 5. Snímky potvrzují, že během svařování touto metodou nedochází k metalurgickému spojení mikrodrátků. Fotografie na Obr. 51 zachycuje pouze mechanický kontakt mikrodrátků ve stuze. Fotografie potvrzuje, že nedochází k metalurgickému spojení.



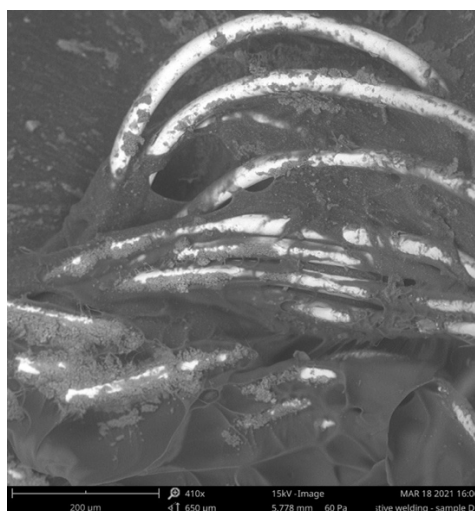
Obr. 48 RTG snímek Hotbar vzorku.



Obr. 49 RTG snímek Hotbar vzorku – detail.



Obr. 50 CT snímek Hotbar vzorku.

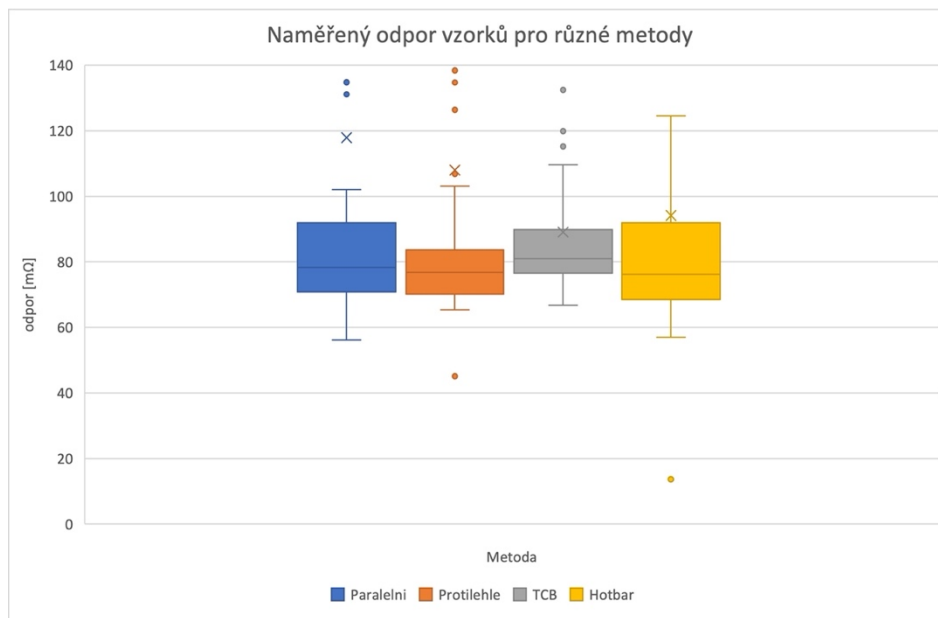


Obr. 51 SEM snímek vzorku Hotbar metody.

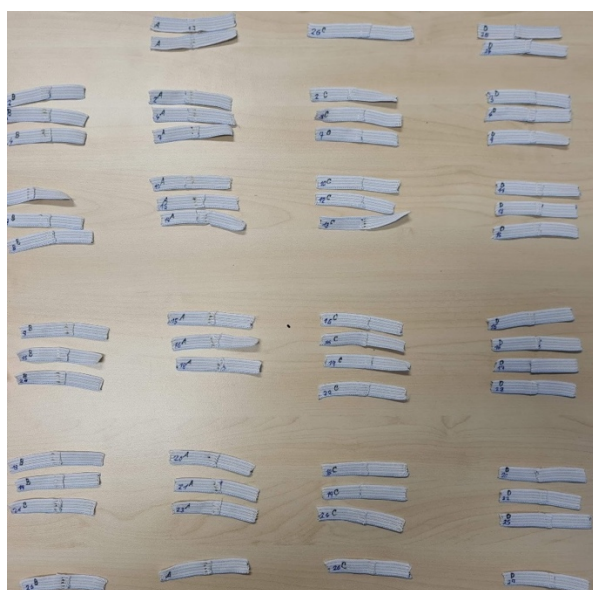
3.7 Porovnání odporů vzorků pro testování

Celkově bylo pro testování spojeno 200 kusů stuh, díky čemuž vzniklo celkem 100 testovacích vzorků, což odpovídá 25 vzorků na jednu testovací metodu. Na jednom vzorku byly provedeny 4 svary. Všechny vzorky byly podrobeny měření odporu vzniklého kontaktu. Podle grafu na Obr. 52 je vidět, že v průměru pro všech 100 svarů na 25 vzorcích stuh má nejnižší průměrný odpor metoda TCB, který má hodnotu 89 mΩ, hned za touto metodou je vyhřívaná elektroda (Hotbar), který má průměrnou hodnotu odporu 94 mΩ, potom je Protilehlá metoda s průměrnou hodnotou odporu 107 mΩ a nejvyšší průměrný

odpor vykazuje Paralelní svařování s odporem 117 mΩ. Metoda svařování Hotbar a metoda TCB má oproti paralelnímu a protilehlému svařování poloviční počet odlehlých hodnot odporu, kdy u Hotbaru a TCB to je asi 5 odlehlých hodnot, zatímco u zbylých dvou je to 10 hodnot. Tečky na grafu znázorňují vnější body a křížek označuje střední hodnotu.



Obr. 52 Porovnání naměřených odporů vzorků pro různé metody.



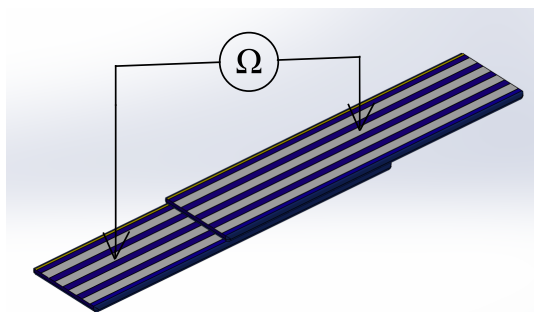
Obr. 53 Část vytvořených vzorků připravených na testování.

4 Měření vzorků textilních propojení

Měření je prováděno za účelem získání elektrických a mechanických vlastností měřených vzorků pružné stuhy. Při volbě měřicí metody je několik možností, jak dané vzorky elektricky měřit.

4.1 Dvoubodové měření

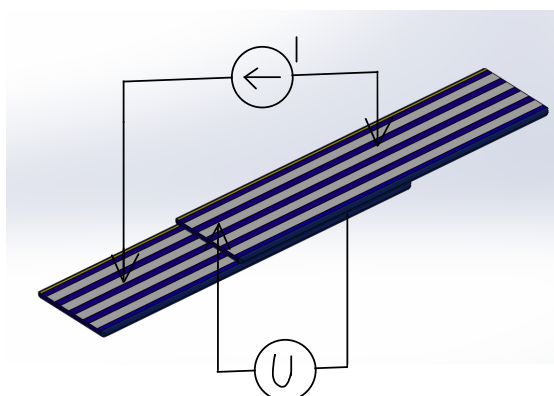
Tato měřicí metoda při měření elektrického odporu započítává do celkové hodnoty odporu odpor kontaktu, ale i vodivé cesty. Odpor kontaktu se však často mění (mění se při tlaku při opakovaných měřeních, mění se kontaktní plocha, oxidací ploch atd.) a to má významný vliv na celkový naměřený odpor. Nevýhoda tohoto měření je i odpor kabelu měřicího přístroje, který se započítává do hodnoty celkového odporu.



Obr. 54 Znárodnění dvoubodového měření odporu.

4.2 Čtyřbodové měření

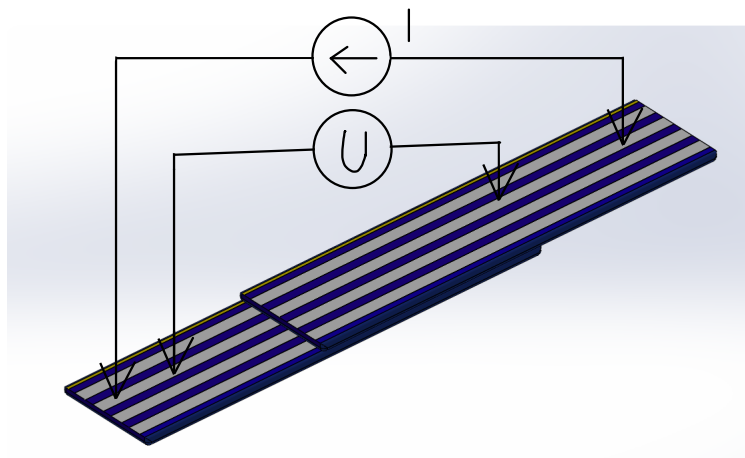
Tato měřicí metoda eliminuje odpory všech kontaktů, odporu kabelu i odpor stuhy a umožňuje změřit samotný kontaktní odpor svařeného spoje. Nevýhodou tohoto způsobu měření je ale způsob kontaktování stuhy, která je umístěna pod vrchní stuhou. Vyžaduje tedy přístup z obou stran spoje, což komplikuje realizaci kontaktních přípravků.



Obr. 55 Čtyřbodové měření elektrického odporu.

4.3 Čtyřbodové měření se zapojením za sebou

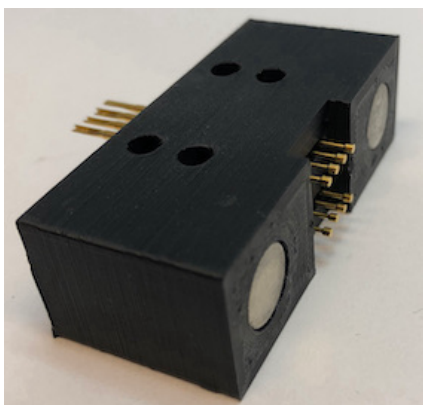
Jedná se o kompromis spojující výhody obou předchozích metod. Tato metoda také eliminuje odpory přívodních vodičů kabelů měřících přístrojů, proměnných kontaktních odporů měřících sond připojených na stuhu a zároveň řeší problémy s nakontaktováním spodní stuhu, ale neeliminuje samotný odpor stuh. Tento fakt z důvodu elektrického měření před zkouškou a po zkoušce měření neovlivňuje, protože se odpor stuhu během zkoušky významně nemění, ale dochází pouze ke změně kontaktního odporu. Pro zajištění opakovatelnosti měření je nezbytné měřit na stále stejně dlouhém úseku stuhu, což znamená realizaci měřícího přípravku s pevnou vzdáleností měřících sond.



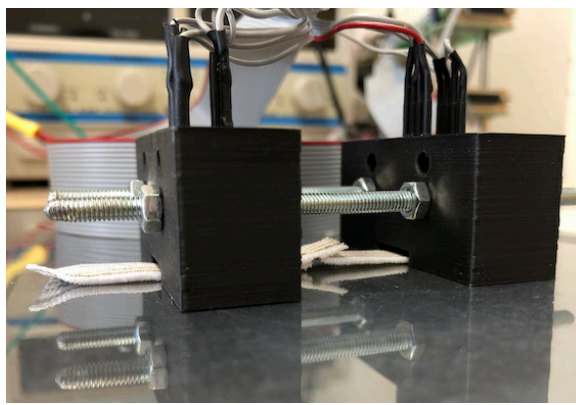
Obr. 56 Měření elektrického odporu čtyřbodovou metodou se zapojením svorek za sebe.

4.4 Návrh měřícího přípravku

Měření odporu svařených kontaktů je prováděno čtyřbodovou metodou viz obrázek (Obr. 56). Pro zachování konstantních vzdáleností měřících elektrod byl vytvořen měřící přípravek, kde bylo využito pružných jehel od společnosti Feinmetall - Contact Technologies. Konkrétně jde o typ F07517B120G130 umístěné v dutinkách H075LA/2.0 od stejného výrobce. Vzdálenost středu měřících jehel je 40 mm. Na jehly jsou připájeny vodiče, které vedou do měřícího přístroje DMM Keithley 2700. Měřící přípravek je navržen v programu Solidworks a je vytisknutý na 3D tiskárně. Přípravek má v dolní části otvor, který slouží pro vycentrování stuhu na střed. Na Obr. 57 jsou vidět v dolní části i dva magnety, které zajišťují stálou fixaci přípravku k izolované ocelové desce umístěné na stole. Dva měřící přípravky jsou spojeny zavítou tyčí velikosti M4 a tím je zajištěna konstantní vzdálenost.



Obr. 57 Měřící přípravek.

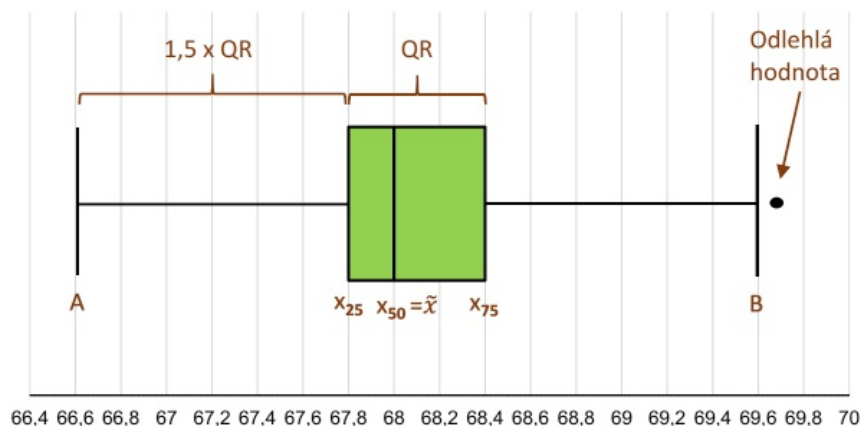


Obr. 58 Měřící přípravek během měření.

5 Aplikace testovacích metod

Realizované vzorky byly testovány šokovou změnou teploty, vlhkým konstantním teplem, suchým konstantním teplem, chladem, trhací zkouškou, zkouškou cyklickým napínáním a praním.

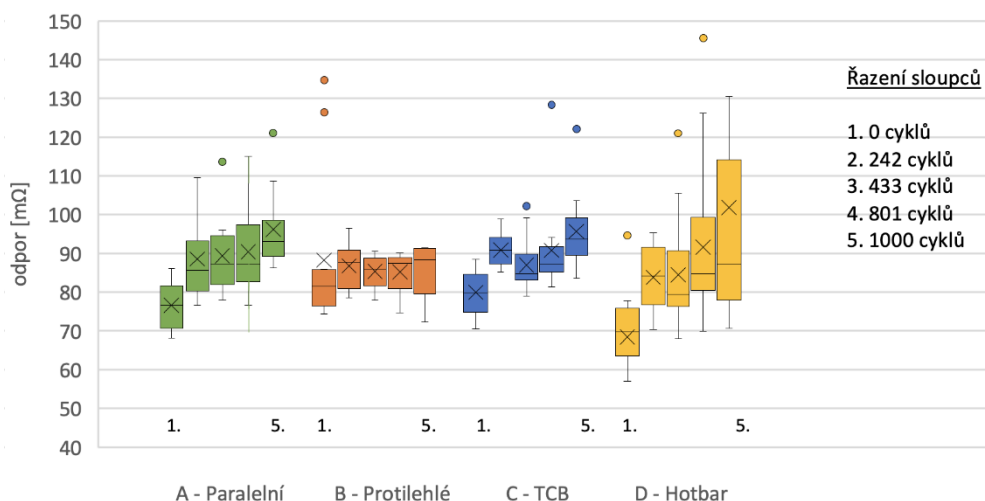
Během testování byl sledován vývoj odporu, který je znázorněn grafem typu Box-plot, jehož vysvětlení je na Obr. 59. Ve všech grafech je navíc křížkem vyznačena i střední hodnota. Pro přehlednost jsou v grafu zobrazené pouze vnější (odlehlé) hodnoty.



Obr. 59 Vyhodnocování naměřených dat (převzato z [31]).

5.1 Šoková změna teploty

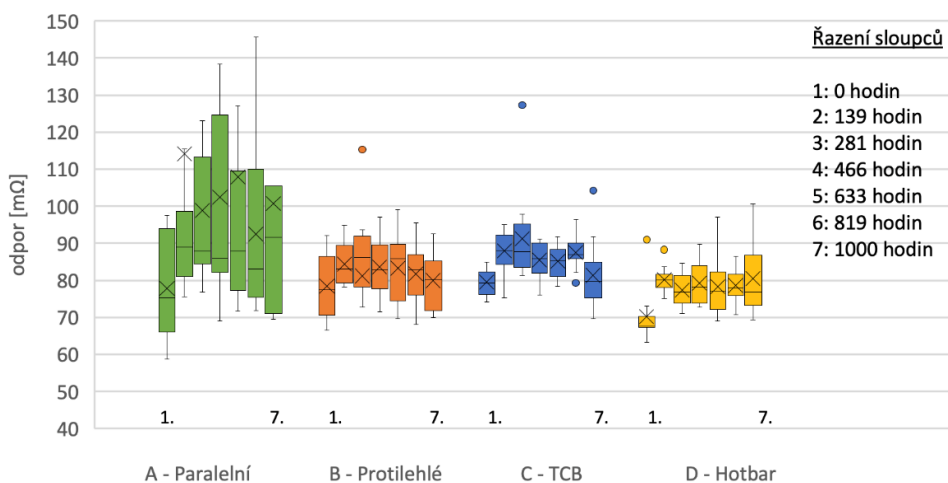
Šokovou změnou teploty byly testovány vždy tři vzorky stuh od každé metody svařování, tedy dohromady 48 svarů při teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C} / 85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vývoj odporu, který se měnil během testování byl sledován v pěti fázích. První měření odporu stuhy, které je v grafu pojmenované jako 0 cyklů, probíhalo před vložením do testovací komory. Další testování bylo po 242 cyklech (139 h), 433 cyklech (281 h), 801 cyklech (466 h) a poslední měření bylo po 1000 cyklech (633 h). Na Obr. 60 je zobrazen graf znázorňující vliv počtu testovacích cyklů podle svařovacích metod, které jsou barevně rozlišeny, na odporu kontaktu v $\text{m}\Omega$. Testováním lze vyvodit závěr, že pro žádnou svařovací metodu nemá šoková změna teploty destruktivní vliv. S rostoucím počtem cyklů zpravidla rostl odpor, nicméně nepřilíš významně. Nejvíce stabilní hodnota odporu byla protilehlá metody svařování, kdy se v celém měření nezměnil odpor o více než $10\text{ m}\Omega$, zatímco při Hotbar metodě byl na počátku průměrný naměřený odpor $69,8\text{ m}\Omega$ a při posledním měření průměrný odpor již byl $101,8\text{ m}\Omega$.



Obr. 60 Vývoj odporu při šokové zkoušce $-20\text{ }^{\circ}\text{C}/85\text{ }^{\circ}\text{C}$ podle metod.

5.2 Vlhké teplo konstantní

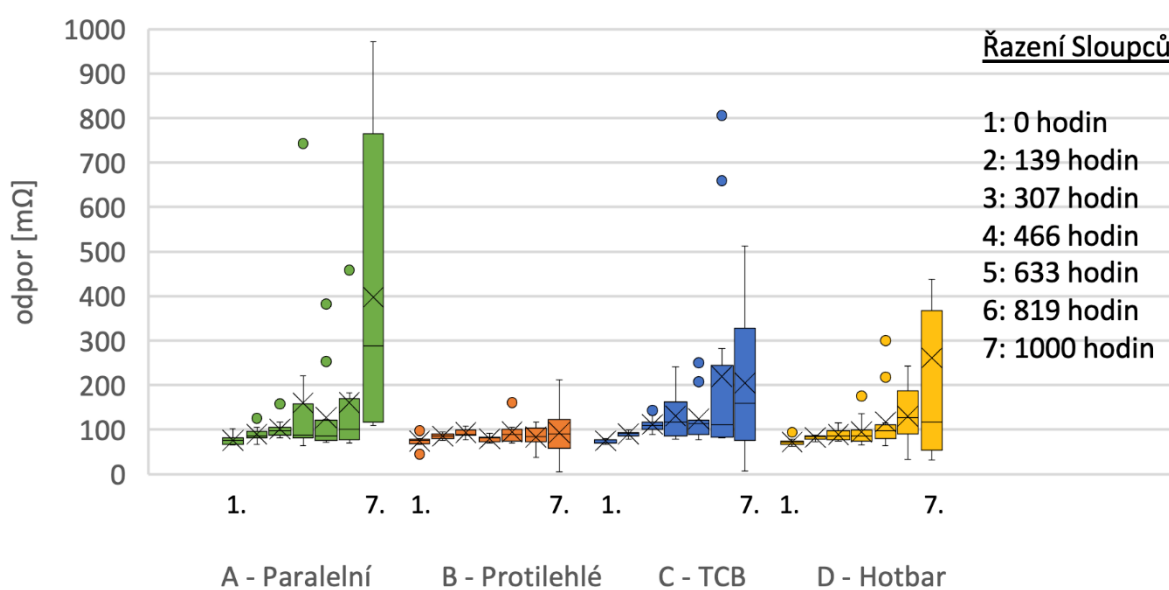
Celkem 12 vzorků, tedy 3 vzorky od každé metody byly testovány v komoře s konstantním vlhkým teplem. Vzorky byly podrobeny testování po dobu celkem 1000 hodin. Kontrolní měření odporů bylo prováděno na začátku ještě před vložením do komory, kdy tento moment je v grafu na Obr. 61 označený jako 0 hodin. První změny odporů byly zachyceny po 139 hodinách testování vzorků v komoře. Měření se provádělo po 281 h, 466 h, 633 h, 819 h a poslední měření odporů bylo provedeno po 1000 hodinách vystavení vzorků klimatickým podmínkám komory, které byly 93 % RH a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podle grafů lze určit paralelní metodu jako jedinou metodu, při které se naměřené odpory všech drah měnily v rozsahu větším než $20\text{ m}\Omega$. Nejmenší fluktuací odporu během testování měly vzorky realizované metodou Hotbar, které zároveň vykazují v celém měření i nejnižší naměřený odpor.



Obr. 61 Vývoj odporu vzorků testování vlhkého konstantního tepla.

5.3 Testování suchým konstantním teplem

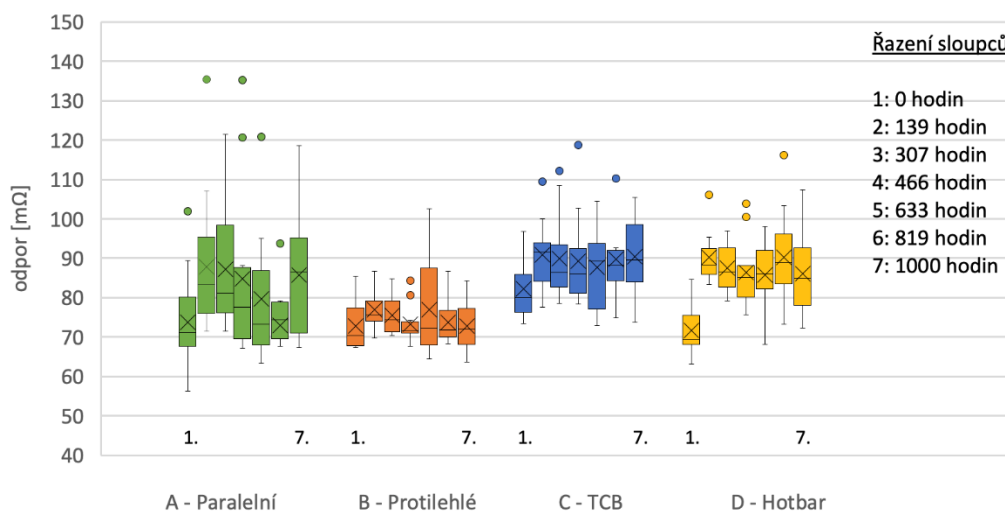
Testování bylo provedeno podle normy uvedené v kapitole 2.2. Teplota komory byla nastavena na 85 °C a vzorky do komory byly vloženy na 1000 hodin. Kontrolní měření odporu stuhu, které je zaznamenané grafem je na obrázku Obr. 62 bylo prováděno před vložení do komory, kdy toto měření je nazýváno testováním po 0 hodinách a další měření probíhalo po 139 h, 307 h, 466 h, 633 h, 819 h a poslední měření bylo po 1000 hodinách umístění vzorků v komoře. Pořadí testování odpovídá i pořadí řazení sloupců v grafu za sebou. Do komory byly vloženy vždy 3 vzorky vytvořené jednotlivými metodami. Zkouška měla prokázat, zda u metody TCB a Hotbar vliv zvýšené teploty způsobí ztrátu fixace spoje, protože u obou těchto metod nevzniká metalurgické spojení mikrodrátků a mikrodrátky jsou spojené pouze zatuhnutím polymeru. Díky tomu působení tepla by mělo za následek uvolnění polymeru a tím nárůst odporu. Podle zpracovaných grafů je zřejmé, že k této úvaze nedošlo a spoje držely zafixovaně i po 1000 hodinovém testování. U všech metod byl při posledním měření zaznamenán vyšší rozptyl naměřených hodnot odporů drah. Největší fluktuace byla po 1000 hodinách testování u paralelní metody.



Obr. 62 Testování suchým konstantním teplem.

5.4 Zkouška chladem

Zkouška chladem probíhala podle normy uvedené v kapitole 2.3. Do komory s teplotou $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ byly vloženy vždy tři vzorky od každé svařovací metody. Odpor vzorků se měřil pomocí měřicího přípravku před vložením do komory, v grafu je to označeno časem 0 hodin a následně v časech 139 h, 307 h, 466 h, 633 h, 819 h a poslední měření odporu proběhlo po 1000 hodinách od vložení vzorků do komory. Sloupce v grafu na Obr. 63 odpovídají pořadí měření odporu. Měřením se ověřilo, že chlad na vzorky nemá významný vliv. Všechny vzorky a všechny svary vydržely 1000 hodin testování. U všech vzorků můžeme sledovat malou fluktuaci odporu. Nejvyšší byla u Paralelní metody, která měla hodnotu $20\text{ m}\Omega$. Stabilně nejnižší odpor měla Protilehlá svařovací metoda, u které se průměrná hodnota odporu nedostala nad $80\text{ m}\Omega$.



Obr. 63 Vývoj odporu vzorků v chladu.

5.5 Trhací zkouška

Pevnost odporově svařených stuh je jedním z klíčových ukazatelů kvality spoje a určuje odolnost spoje při mechanickém působení během provozu a údržby. Trhací zkouškou je podrobena 10 vzorků od každé ze čtyř svařovacích metod. Vzorky pro testovací metody vyžadují svary na vzorku v jedné řadě, aby odtrh probíhal rovnoměrně v celé šířce vzorku.

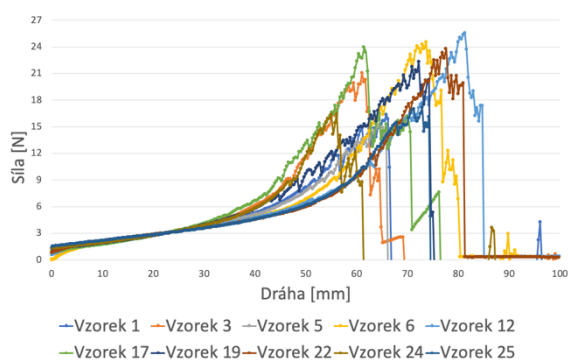
Obr. 64 až Obr. 67 znázorňují růst síly během natažení stuh pro jednotlivé vzorky a metody. Podle grafů lze označit metodu Hotbar jako nejpevnější, protože k přetržení docházelo až při síle 30 N , a to pro natažení od 65 do 100 mm .

Zbylé tři metody se přetrhly při síle přibližně 25 N . Důvodem, proč je Hotbar nejpevnějším spojením je to, že tato metoda kromě spojení vodivých drah spojuje stuhy v celé své její šířce, tedy i mimo vodivé dráhy. Nejmenší natažení, kdy došlo k přetržení

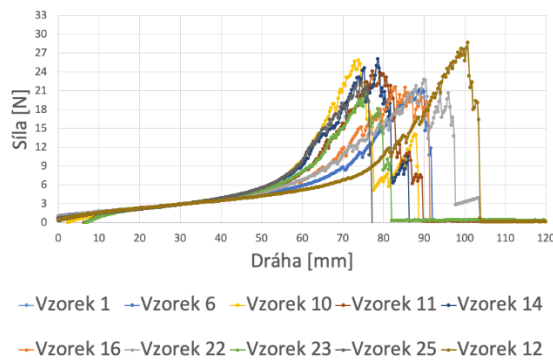
bylo u paralelním svařování vytvořených vzorků a to v rozmezí 55 až 85 mm. Vzorky vytvořené metodou TCB se přetrhávaly při natažení 65 až 95 mm a vzorky vytvořené protilehlou metodou se přetrhly při natažení od 80 do 100 mm. V Tab. 6 je v procentech vyjádřeno o kolik se stuha natáhla, než došlo k jejím přetržení.

Tab. 6 Velikost natažení stuhu v procentech při jejím přetržení podle metod.

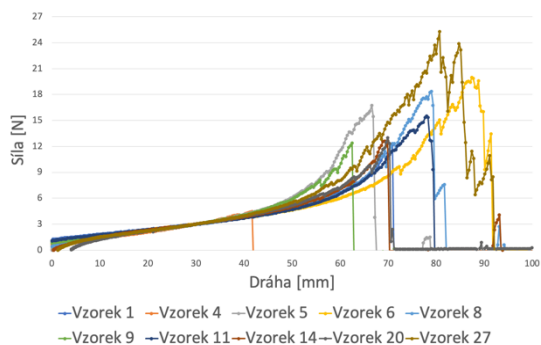
Metoda	Natažení stuhu při přetržení [%]
Paralelní	122 - 162
Protilehlá	148 - 200
TCB	180 - 280
Hotbar	242 - 286



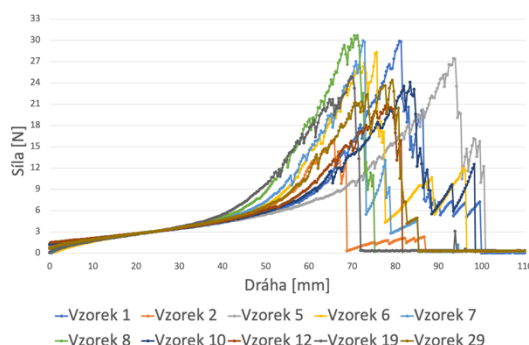
Obr. 64 Závislost síly na dráze natažení pro paralelní metodu.



Obr. 65 Závislost síly na dráze natažení pro protilehlou metodu.



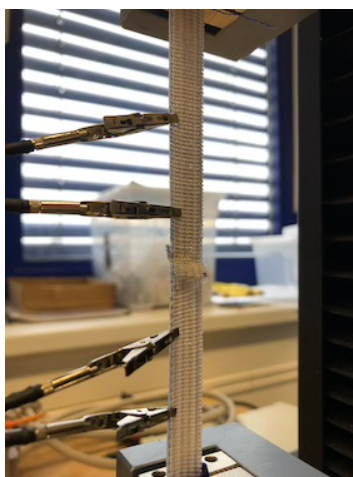
Obr. 66 Závislost síly na dráze natažení pro TCB metodu.



Obr. 67 Závislost síly na dráze natažení pro Hotbar metodu.

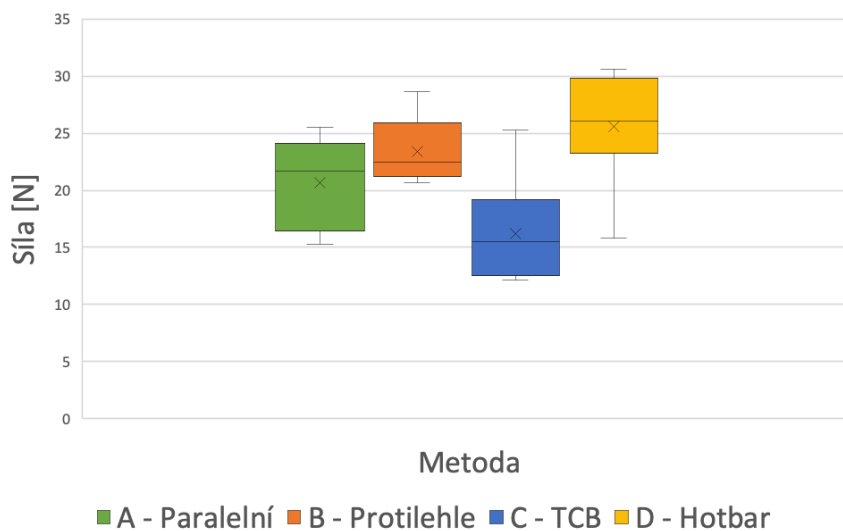
Tři vzorky z každé metody byly v průběhu testování zároveň měřeny čtyřvodičovou metodou měření odporu pro sledování jeho vývoje. Odpor roste s rostoucí silou a délkou natažení až do samotného přetržení vzorku, kdy se odpor skokově zvýší. Testování probíhalo online metodou. Testovací zařízení sledující reakci vzorku na natažení měřilo hodnotu síly, dráhy a času s periodou odečtu hodnot, které bylo každé 0,02 sekundy. Čtyřvodičové měření odporu se provádělo pomocí připnutých kroko-svorek k napínajícímu

se vzorku (Obr. 68) s periodou záznamu hodnot 0,47 sekundy. Grafy znázorňující růst odporu s natažením a s rostoucí silou jsou obsahem přílohy, a to na Obr. 76 až Obr. 87. Růst odporu s natažením je způsobeno natahováním hybridních nití, ze kterých jsou vodivé cesty stuhy. V niti jsou vodivé drátky mezi sebou propojeny a tím je výsledný odpor v nenataženém stavu nižší. Během natahování se zkratky v niti vytráčí a roste s tím odpor až do okamžiku přetržení všech vodivých nitek, kdy dojde ke skokové změně odporu rozpojením. Nejstabilnější a nejpevnější kontaktovací metodou je Hotbar, u které až do samotného přetržení docházelo k nejmenším změnám odporu.



Obr. 68 Umístění kroko-svorek na stuhu během online měření.

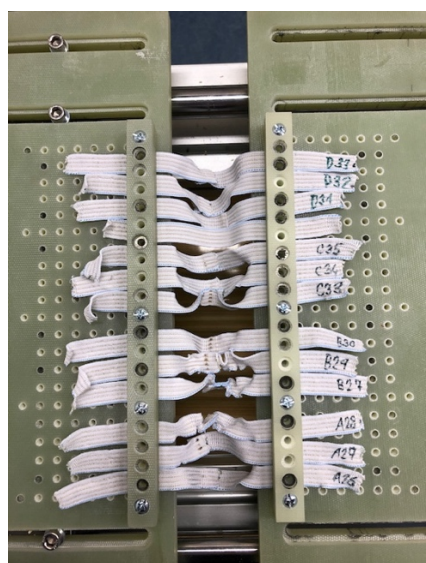
Na Obr. 69 je pro každou metodu znázorněna velikost síly, při které došlo k přetržení stuhy. Na grafu je vidět, že svařovací metoda Hotbar potřebuje nejvyšší působení síly ze všech čtyř metod, aby došlo k přetržení.



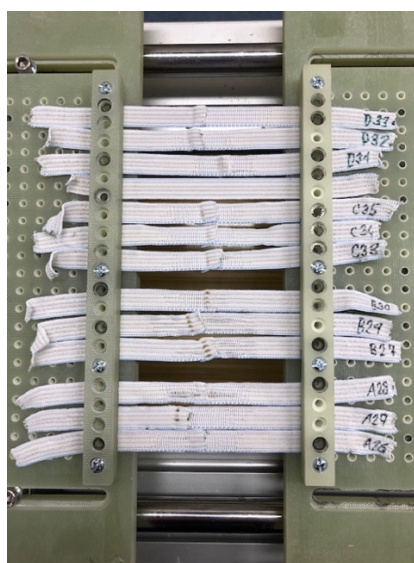
Obr. 69 Síla před odtrhem.

5.6 Zkouška cyklickým napínáním

Zkouškou cyklického napínání vzorků, kdy vzorky byly natahovány na 130 % své původní délky při rychlosti 1000 cyklů za 22 minut. Testováním byly podrobeny 3 vzorky od každé metody a jedna nesvařená stuha, která byla v jednom kuse a sloužila během testování jako referenční. Na referenční stuze bylo možné sledovat, jestli změny odporů vzorků jsou způsobeny kontaktem, tedy spojením dvou stuh, anebo stuhou samotnou. Tato stuha je v grafech (Obr. 72 a Obr. 73) nazývána jako referenční. Pro tuto testovací metodu byly vytvořeny vzorky délky 18 cm.



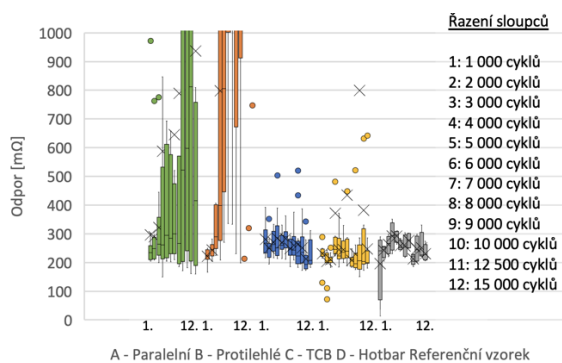
Obr. 70 Uvolněný stav.



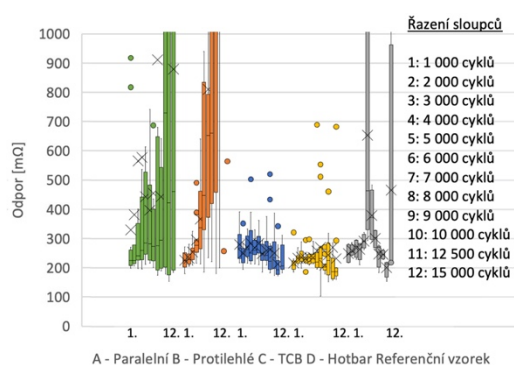
Obr. 71 Napnutý stav.

Grafy na Obr. 72 a Obr. 73 popisují vývoj odporu s rostoucím počtem cyklů. Sloupce jsou v pořadí uvedené na snímcích. První sloupec u každé metody představuje odpor po 1000 cyklech napínání, následuje sloupec s hodnotami odporu po 2000 cyklech, až k poslednímu sloupci, který zaznamenává odpor naměřený po 15000 cyklech napínání. Z grafů je zřejmé, že v napnutém stavu je odpor stuh vyšší. To je způsobeno kvůli mechanickému působení na místo svaru. Díky tomu dochází k postupnému (únavovému) namáhání mikrodrátků v místě svaru a ke vzniku trhlin ve svařených drátcích. Z grafů je vidět, že mikrodrátky spojené metalurgicky se poruší snadněji, oproti těm, které jsou spojeny jen mechanickým zalisováním a zafixováním pomocí utuženého polyesteru. Nejlépe tuto zátěžovou zkoušku zvládly vzorky vytvořené Hotbar metodou společně s metodou TCB, protože u nich můžeme sledovat stabilní hodnotu odporu v celém spektru testování. Vzorky realizované Hotbar metodou v nataženém stavu mají vyšší průměrnou hodnotu odporu (v grafu zobrazeno křížkem). To je způsobeno vždy jednou odlehlou hodnotou. Medián u těchto vzorků je

stabilní a na nižší úrovni. Nejhorší metoda z hlediska testování napínáním je Protilehlá metoda svařování, kde od 9000 cyklů přestaly být vodivé skoro všechny dráhy v nataženém stavu. Druhá nejhorší je metoda Paralelní, u které se část vodivých drah stala nevodivými a u části došlo k prudkému nárůstu odporu. Pro grafické vyhodnocení testu byl u drah, u kterých bylo zjištěno jejich přerušení, zvolen odpor řádově vyšší (3300 mΩ) než u funkčních spojení. Vyřazením těchto přerušovaných drah resp. naměřených odporů by v grafu jinak nebylo zřetelné. Veškeré vzorky snesly všech 15000 napínání a žádná stuha se nepřetrhla.



Obr. 72 Vývoj odporu v nataženém stavu při testování cyklickým napínáním.



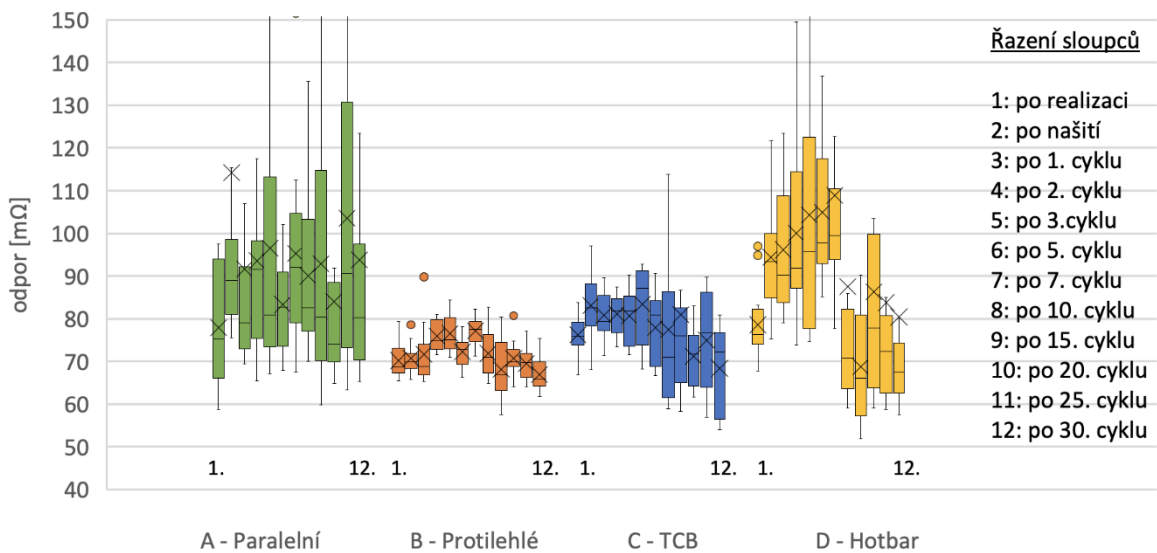
Obr. 73 Vývoj odporu v uvolněném stavu při testování cyklickým napínáním.

5.7 Zkouška praním

Tomuto testování byly podrobeny vždy tři vzorky z každé metody kontaktování. Vzorky byly přišity k textilií a před praním vloženy do sáčku. Textilie se vzorky se k sáčku ještě zafixovala pro zamezení pohybu textilie. Přišití vzorků bylo provedeno především proto, aby vzorky byly rovnoměrně rozloženy a nedocházelo ke kontaktu s dalším subjekty v pračce a proto, aby bylo pohodlnější měření odporu měřícím přípravkem, protože testováním v pračce má za následek zkroucení vzorků stuh. Vývoj odporu je znázorněn grafem na Obr. 75. Měření odporů bylo prováděno po realizaci vzorků, po našití vzorků na nosnou textilií a po 1., 2., 3., 5., 7., 10., 15., 20., 25. a 30. cyklu praní. Řazení sloupců v grafu odpovídá pořadí měření.



Obr. 74 Přišité vzorky k textilií v sáčku před vložením do pračky.



Obr. 75 Vývoj odporu vzorku v rostoucím počtem cyklů v pračce.

Nejmenší změny odporu během testování má Protilehlá metoda svařování. Zároveň tato metoda vykazuje i nejmenší rozpětí naměřený kontaktní odpor pro všech 12 svarů. Po Protilehlé metodě má metoda TCB také nízkou fluktuaci odporu, který má navíc také klesající trend. Zajímavý stav nastal u Hotbar metody, kdy u 10. cyklu došlo ke skokové změně odporu a v dalších cyklech už se na původní hodnotu odporu nedostala. Pravděpodobně došlo během praní k pohybu hybridní nitě uvnitř vodivé dráhy, tím došlo ke spojení mikro drátků v ní a jejich zkratem se odpor stabilně snížil.

Závěr

Cílem práce bylo ověření možnosti využití odporového svařování jako další potenciální náhrady za konvenční možnost kontaktování chytrých textilií, kterou je pájení. Najít náhradu za pájení je vhodné především proto, že pájení v oblasti kontaktování vodivých stuh není možné snadno automatizovat, výroba je pracnější, a proto i dražší. Během manuálního procesu pájení rovněž hrozí poměrně značné riziko vzniku chyby. Pro ověření funkčnosti a chování odporově svařeného kontaktu byly vybrány 4 metody, kterými jsou Paralelní svařování, Protilehlé svařování a dvě termokompresní metody svařování, kterými jsou metoda TCB a použití vyhřívané elektrody nazývané též jako Hotbar. Svařovaným textilním prvkem byla pružná stuha se čtyřmi vodivými drahami, které jsou realizované pomocí tzv. hybridních vodivých nití. Celkem bylo vytvořeno více než 100 vzorků, které byly rovnoměrně rozděleny mezi čtyři metody. Vzniklo více než 400 svarů.

Vzorky s realizovanými svary byly testovány řadou testovacích metod, mezi které patří trhací zkouška, zkouška cyklickým napínáním, zkouška automatickým cyklickým praním, suché konstantní teplo, vlhké konstantní teplo, šoková změna teploty a chlad. Vývoj a reakce vzorků na testování byla sledována a hodnocena změnou kontaktního odporu. Pro zajištění opakovatelného měření odporu svařených vodivých stuh byl navržen a pomocí 3D tisku vyroben měřicí přípravek. Měření tak probíhalo vždy pro konstantní vzdálenost měřících elektrod a s konstantním přtlakem kontaktních jehel. Měření bylo prováděno čtyřvodičovou metodou. Sledování odporu svařených vodivých stuh bylo prováděno vždy před testováním, v průběhu testování v pravidelných intervalech a po ukončení testování bylo provedeno konečné měření kontaktního odporu.

Vyhodnocení změny odporu bylo provedeno formou grafů, kde typ grafu je zvolen tzv. krabicový graf nazýván také jako Box-plot. Tento typ grafu přináší maximální možné informace o chování kontaktního odporu pro daný počet svarů.

Vzorky vytvořené paralelní metodou svařování se na trhací zkoušce trhaly při natažení v rozmezí 148 až 200 % a síla na odtrh byla potřeba v rozmezí 17 N až 23 N. Šoková zkouška na tyto vzorky neměla významný vliv. Průměrný odpor narostl z původní hodnoty 75 mΩ při 0. cyklu na hodnotu 105 mΩ při posledním, 1000. cyklu. Vlhké teplo již vliv mělo. Po celou dobu měření vzorky vykazovaly odpor s výrazným rozptylem. To se v grafu projevilo dlouhými sloupci. Odpor měl od 633 hodin testování klesající trend. Během testování natažením na 130 % původní délky vzorku začalo po 9000 cyklech docházet k poruchám elektrického kontaktu, ale žádný vzorek se během 15 000 cyklů nepřetrhl. Testováním

suchým konstantním teplem na vzorky nemělo významný vliv do cca 800 hodin testování. Po 1000 hodinách je zřejmý dramatický nárůst odporu téměř čtyřnásobně, oproti měřením předešlým. Během prací zkoušky měly vzorky hodnoty odporů rozptýlené (hodnoty jsou v rozsahu od 65 do 130 mΩ). Zkouška chladem na vzorky neměla významný vliv. Rozptyl hodnot byl maximálně 20 mΩ a všechny vzorky testování vydržely.

Svařování vzorků protilehlou metodou vykazuje u trhací zkoušky natažení v rozmezí 148 – 200 % a působení cca 20 – 25 N, aby došlo k destrukci vzorků. Při šokové zkoušce vzorky při všech 1000 cyklech držely téměř konstantní odpor, a tak tato zkouška na vzorky, respektive svary neměla vliv, stejně jako při testování vlhkým konstantním teplem. Zde také nedošlo k žádným významným poklesům či nárůstu odporu. Během cyklického natahování vzorků na 130 % své délky však již při 9000. cyklech natažení většina svarů ztratila elektrický kontakt, ale po celé testování nedošlo k mechanickému přetržení stuhy v místě svaru. U suchého konstantního tepla se naměřené odpory téměř neměnily a jejich průměrná hodnota včetně rozpětí odporů bylo ze všech metod nejnižší a stejně jako u pracího testování byly odpory na nejnižší hodnotě. Vystavení vzorků 1000 hodinám testování v chladu nemělo na vzorky žádný vliv. Vzorky vykazovaly během celého měření s porovnáním s ostatními metodami nejnižší průměrnou hodnotu odporu, která nebyla vyšší než 80 mΩ.

Termokompresní metodou TCB vytvořené vzorky se při trhací zkoušce přetrhávaly při natažení 180 až 280 % a to při síle 13 až 23 N. Tato síla je nejnižší potřebná k přetržení vzorku ve srovnání se všemi metodami. U šokové zkoušky vzorky vytvořené touto metodou měly rostoucí trend odporu od cca 80 mΩ na konečných 95 mΩ při 1000 cyklech, naopak při testování vlhkým konstantním teplem se odpor snižoval. Při cyklickém natahování na 130 % původní délky vzorku byl odpor vzorků stabilní a téměř se neměnil, a to v uvolněném i napnutém stavu. Suché teplo zvýšilo odpor svarů po 1000 hodinách o cca 100 mΩ. Během praní se odpor snížil jen nepatrně (5 mΩ). Během testování chladem se odpor vzorků téměř neměnil. Hodnota odporu je vždy okolo 90 mΩ.

Vyhřívanou elektrodou, v této práci nazývanou též jako metoda Hotbar, byly vzorky testovány řadou testovacích metod. Během trhací zkoušky se ověřilo, že tento svar je nejpevnější. K přetržení došlo při natažení v rozmezí od 242 % do 286 % oproti své původní délce. K přetržení vytvořeného vzorku je nutné působení síly minimálně 23 N. Během šokové zkoušky se odpor kontaktu postupně mírně zvyšoval, a to od hodnoty cca 70 mΩ na hodnotu 100 mΩ po 1000 cyklech. Při testování vlhkým konstantním teplem se odpor kontaktu výrazně neměnil, a to ani rozptyl všech odporů naměřených svarů. Testováním

natahování vzorků na 130 % původní jejich délky měly vzorky nejnižší průměrné hodnoty odporu po celé testování a u žádného svaru nedošlo k přetržení cesty. Během testování suchým teplem měl odpor rostoucí trend a rozsah naměřených hodnot se postupně zvyšoval. Praní na vzorky nemělo výrazný vliv. Zajímavým stavem je skokové snížení odporu během 10. cyklu praní. Testování chladem mělo na vzorky největší vliv během prvních 139 hodinách testování, kdy se odpor vzorků zvýšil o cca 20 mΩ. Během následujícího testování se odpor nezměnil o více než 5 mΩ.

Metody vytvářející metalurgický spoj (Paralelní a Protilehlá svařovací metoda) vykazují lepší chování v klimatických testech, oproti mechanickému testování (zejména zkouška cyklickým napínáním). Zatímco termokompresně vzniklé vzorky to mají naopak. V klimatických testech jsou horší a méně stabilní, než během testování mechanického. Metalurgické spoje nemají vliv na klimatické podmínky, ale problémy se objevují při mechanickém testování, protože tento spoj je křehčí, a tedy hůře spoj odolává mechanickému působení. Během testování praním se to zcela nepotvrdilo, protože místo svaru bylo dodatečně fixováno přišitím stuhy na nosnou textilií. Vznik metalurgického spoje potvrzují a vyvracejí především snímky z SEM.

Testováním bylo zjištěno, že nejstabilnější metodou je metoda Hotbar, a to i díky tomu, že u této metody nevzniká metalurgické spojení vodivých mikro drátků v hybridní niti, ze které je také vytvořena vodivá dráha pružné stuhy. Kvalita této metody je zřejmá zaprvé díky tomu, že hodnota odporu se v rámci testování tolik nemění a zároveň je na nízkých hodnotách. Druhou metodou, která řadou testovacích postupů měla velice kvalitní výsledky je metoda TCB, která také neměla velké výkyvy ve změně odporu a hladiny odporu byly taktéž na nízkých hodnotách.

Z hlediska realizovatelnosti a využití metody v praxi má největší smysl využití metody Hotbar, kdy touto metodou lze spolehlivě svařovat i více spojů v jednom kroku a tím zkrátit čas a výrazně uspořit náklady při výrobě tzv. chytrých textilií.

V Tab. 7 jsou uvedeny klíčové vlastnosti metod odporového svařování, podle kterých lze rozhodnout, pro jakou metodu svařování je dobré se přiklonit podle našich potřeb.

Tab. 7 Klíčové vlastnosti metod odporového svařování.

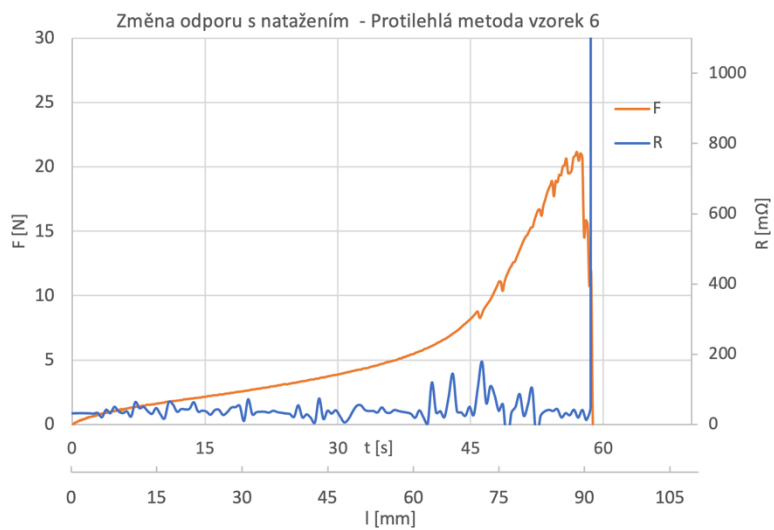
	Paralelní	Protilehlá	TCB	Hotbar
Spojování více drah současně	✗	✗	✗	✓
Přichytávání elektrod ke stuze během výroby	✗	✗	✓	✓
Vytvoření metalurgického spoje	✓	✓	✗	✗
Mechanická odolnost	✗	✗	✓	✓
Klimatická odolnost	✓	✓	✓	✓
Opakovatelnost výroby	✗	✗	✓	✓

Seznam literatury a informačních zdrojů

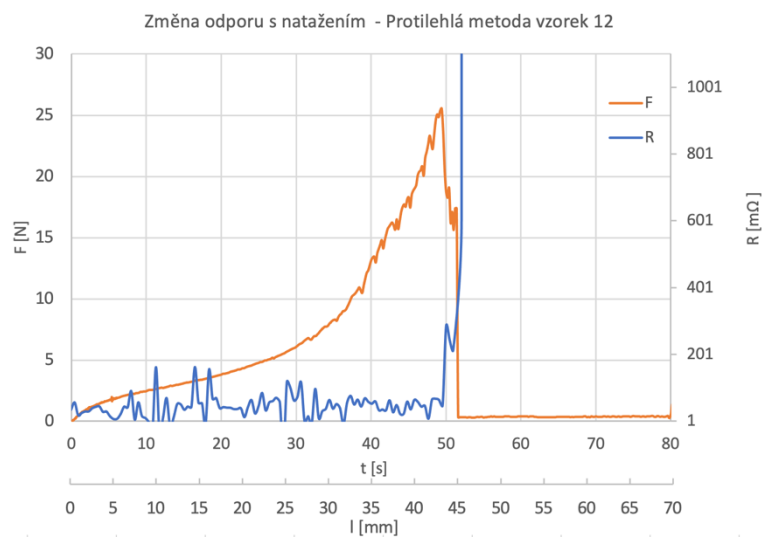
- [1] L. M. Castano and A. B. Flatau, “Smart fabric sensors and e-textile technologies: A review,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 5, 2014, doi: 10.1088/0964-1726/23/5/053001.
- [2] Tandi Holifield, “What is Ultrasonic Welding and is it Right for Me?,” *revpart.com*, 2017. [Online]. Available: <https://revpart.com/ultrasonic-welding-right/>.
- [3] G. Bagyinszki and E. Bitay, “Application Features of Ultrasonic Welding,” *Műszaki Tudományos Közlemények*, vol. 9, no. 1, pp. 31–34, 2019, doi: 10.33894/mtk-2018.09.03.
- [4] Andrzej Adamek, “3 Advantages & Disadvantages Of Ultrasonic Welding You Need To Learn Today!,” *xfurth.com*, 2018. [Online]. Available: <https://blog.xfurth.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-ultrasonic-welding>.
- [5] HEBA SOFFAR, “Ultrasonic welding process uses, advantages and disadvantages,” 2016. [Online]. Available: <https://www.online-sciences.com/industries/ultrasonic-welding-process-uses-advantages-and-disadvantages/>.
- [6] M. Cechura, “Kontaktování chytrých textilií,” ZAPADOCESKA UNIVERZITA V PLZNI, 2019.
- [7] “Sewing with Conductive Thread,” *sparkfun.com*. [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/sewing-with-conductive-thread>.
- [8] “Hard/soft connections.” [Online]. Available: <https://www.kobakant.at/DIY/?p=1272>. [Accessed: 02-May-2019].
- [9] “FCI Clincher Connector,” *sparkfun.com*. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/14195>.
- [10] Dr. Dmitri Kopeliovich, “Resistance Welding (RW),” *substech.com*. [Online]. Available: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_rw.
- [11] “Resistance Welding : Principle, Types, Application, Advantages and Disadvantages,” *mech4study.com*, 2017. [Online]. Available: <https://www.mech4study.com/2017/04/resistance-welding-principle-types-application-advantages-and-disadvantages.html>.
- [12] “What is Resistance Welding,” *aws.org*, 2020. [Online]. Available: <https://www.aws.org/rwma/page/resistance-welding>.
- [13] “Elektricky vodivé hybridní nitě.” [Online]. Available: <http://www.clevertex.cz/vodive-nite/elektricky-vodive-hybridni-nite-detail-761>. [Accessed: 16-Mar-2019].
- [14] B. Tomas, “Conductive Hybrid Threads and Their Applications,” 2019.
- [15] “Products,” *ohmatex.dk*. [Online]. Available: https://www.ohmatex.dk/products_textile_cables_connectors/.
- [16] “CHARACTERISTICS,” *interactive-wear.de*. [Online]. Available: <http://www.interactive-wear.de/solutions/10-textile-wires/45-textile-cables>.
- [17] “TEXTILE CABLE TYPES.” [Online]. Available: <http://www.interactive-wear.com/solutions/10-textile-wires/45-textile-cables>.

- [18] “Conductive Ribbon Cable,” *www.wirekinetics.com*. [Online]. Available: https://www.wirekinetics.com/en/proList.php?class_sn=2&sub_sn=29.
- [19] “ČSN EN 60068-2-78 ED.2 - Vlhké teplo konstantní,” *technicke-normy-csn.cz*. [Online]. Available: http://www.technicke-normy-csn.cz/345791-csn-en-60068-2-78-ed-2_4_93747.html.
- [20] “ČSN EN 60068-2-2 - Suché teplo,” *technicke-normy-csn.cz*. [Online]. Available: http://www.technicke-normy-csn.cz/345791-csn-en-60068-2-2_4_80777.html.
- [21] “ČSN EN 60068-2-1 ED.2 - Chlad,” *technicke-normy-csn.cz*. [Online]. Available: http://www.technicke-normy-csn.cz/345791-csn-en-60068-2-1-ed-2_4_79774.html.
- [22] “ČSN EN 60068-2-14 ED.2 - Změna teploty,” *technicke-normy-csn.cz*. [Online]. Available: http://www.technicke-normy-csn.cz/345791-csn-en-60068-2-14-ed-2_4_85310.html.
- [23] M. I. Kiron, “Fabric Stiffness Testing | Determination of Fabric Stiffness by Shirley Stiffness Tester,” *textilelearner.blogspot.com*. [Online]. Available: <https://textilelearner.blogspot.com/2012/02/fabric-stiffness-testing-determination.html>.
- [24] “ČSN EN ISO 6330 (800821) - Postupy domácího praní a sušení pro zkoušení textilií,” *technicke-normy-csn.cz*. [Online]. Available: http://www.technicke-normy-csn.cz/800821-csn-en-iso-6330_4_62480.html.
- [25] P. John, “Textile Ribbon Tensile Breaking Strength Test,” *onlyblackandwhite.wordpress.com*, 2010. [Online]. Available: <https://onlyblackandwhite.wordpress.com/2010/10/12/textile-ribbon-tensile-breaking-strength-test/>.
- [26] Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, “Vodivá pružná tkaná textilie, zejména vodivá pružná tkaná stuha,” 2019.
- [27] “Thermocompression bonding,” *palomartechnologies.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.palomartechnologies.com/processes/die-bonding/thermocompression>.
- [28] “Hot Bar Reflow Soldering,” *amadaweldtech.eu*. [Online]. Available: <https://www.amadaweldtech.eu/knowledge-base/hot-bar-reflow-soldering>.
- [29] Rs-online.com, “PULSED-HEAT HOT-BARREFLOW SOLDERING.” [Online]. Available: <https://docs.rs-online.com/ae58/0900766b809bceae.pdf>.
- [30] “REFLOW SOLDERING THERMODES,” 2021. [Online]. Available: <https://www.a-i-t.com/reflow-soldering-thermodes>.
- [31] D. Martin, “Box-Plot neboli Krabicový graf,” 2017. [Online]. Available: <http://kvalita-jednoduse.cz/box-plot/>.

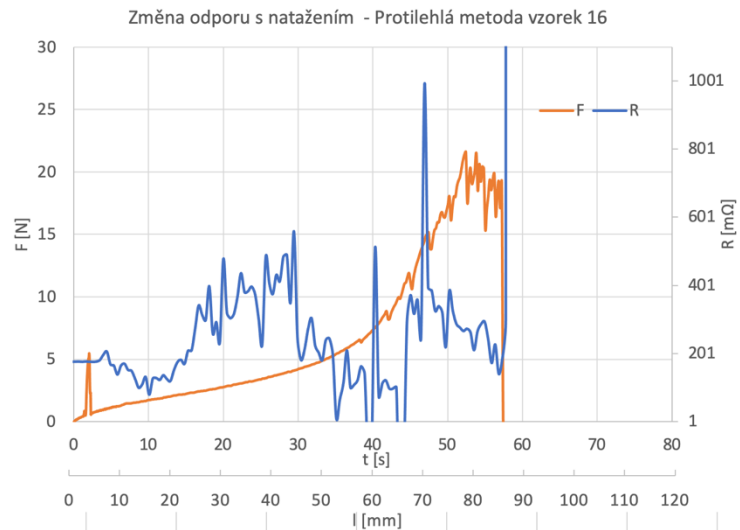
Přílohy



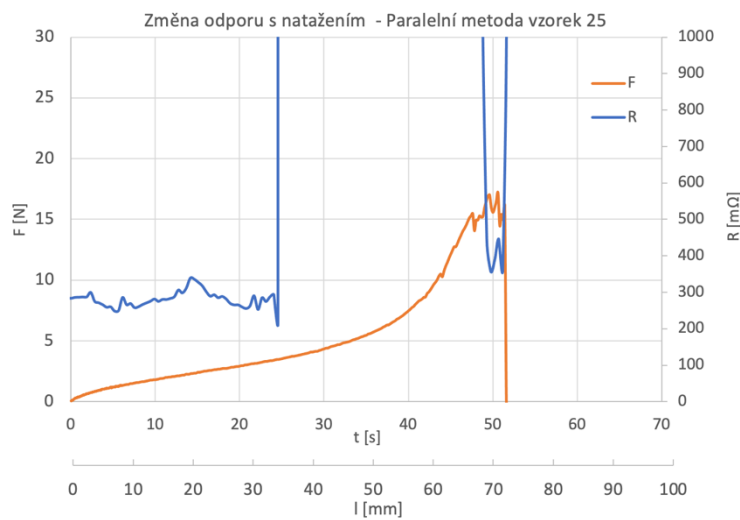
Obr. 76 Graf změny odporu s natažením a velikostí síly - Protilehlá metoda vzorek 6.



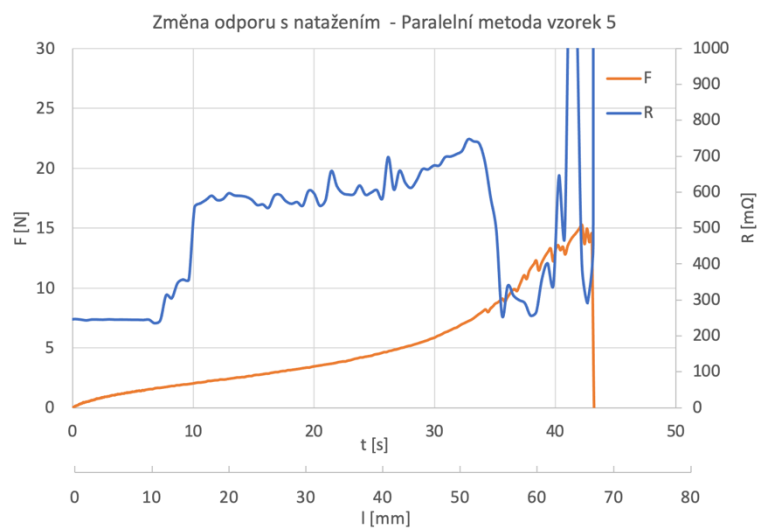
Obr. 77 Graf změny odporu s natažením a velikostí síly - Protilehlá metoda vzorek 12.



Obr. 78 Graf změny odporu s natažením a velikostí síly - Protilehlá metoda vzorek 16.



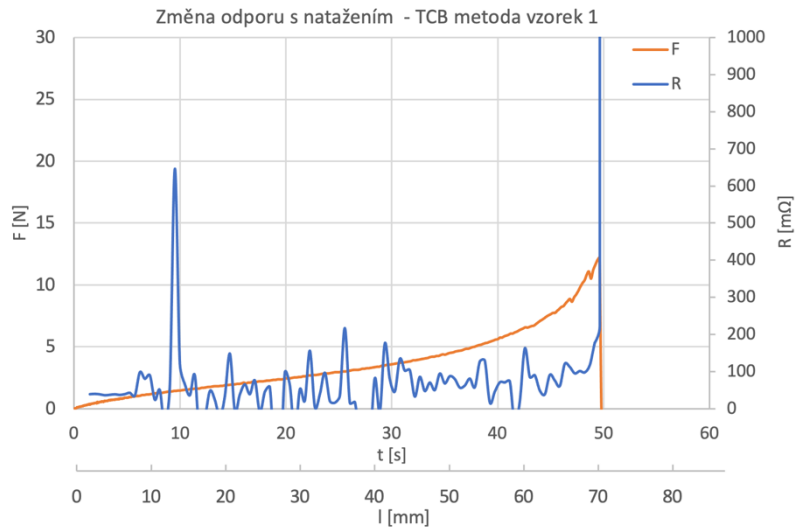
Obr. 79 Graf změny odporu s natažením a velikostí síly - Paralelní metoda vzorek 25.



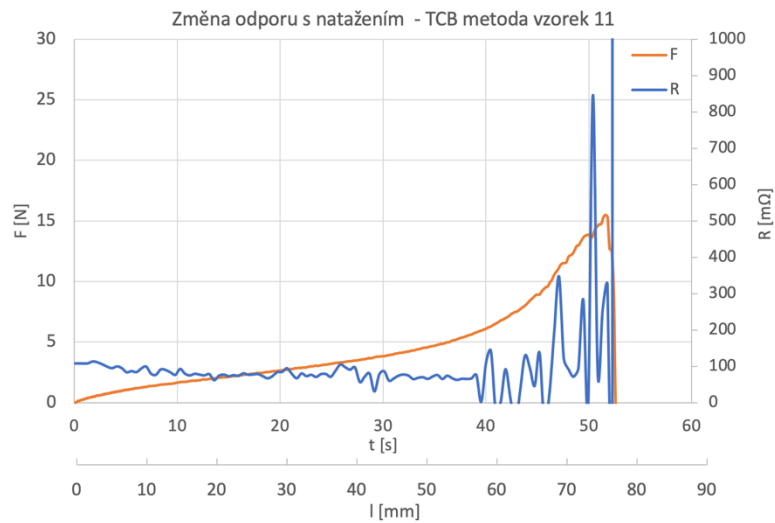
Obr. 80 Graf změny odporu s natažením a velikostí síly - Paralelní metoda vzorek 5.



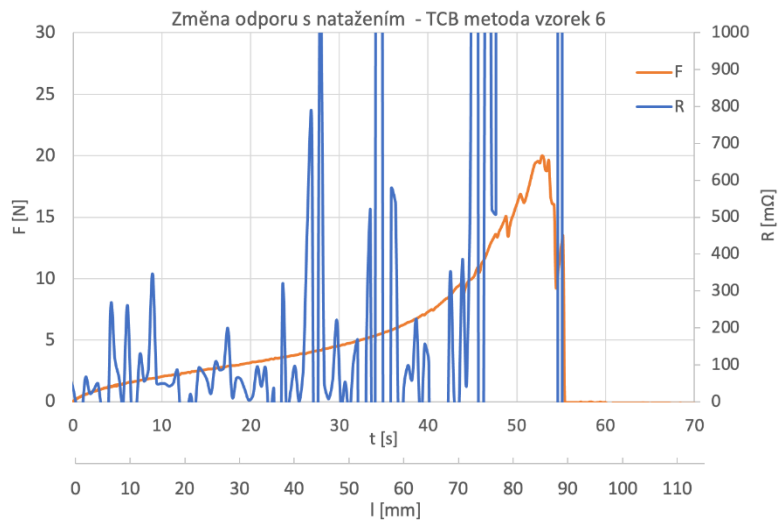
Obr. 81 Graf změny odporu s natažením a velikostí síly - Paralelní metoda vzorek 12.



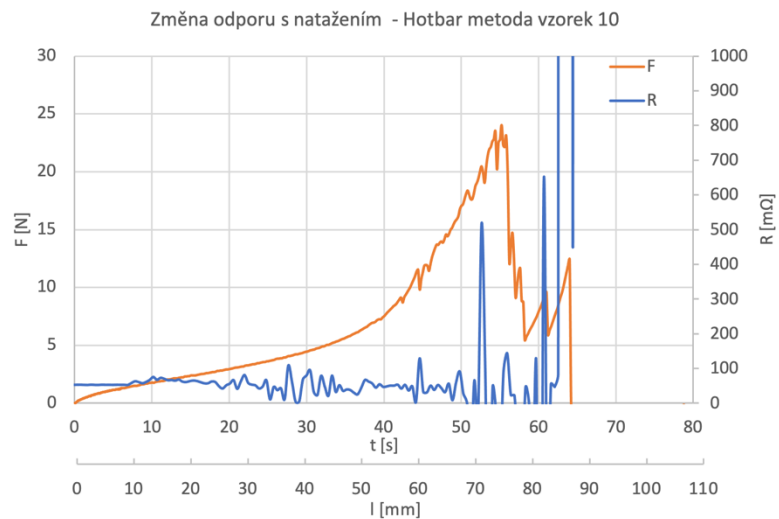
Obr. 82 Graf změny odporu s natažením a velikostí síly - metoda TCB vzorek 1.



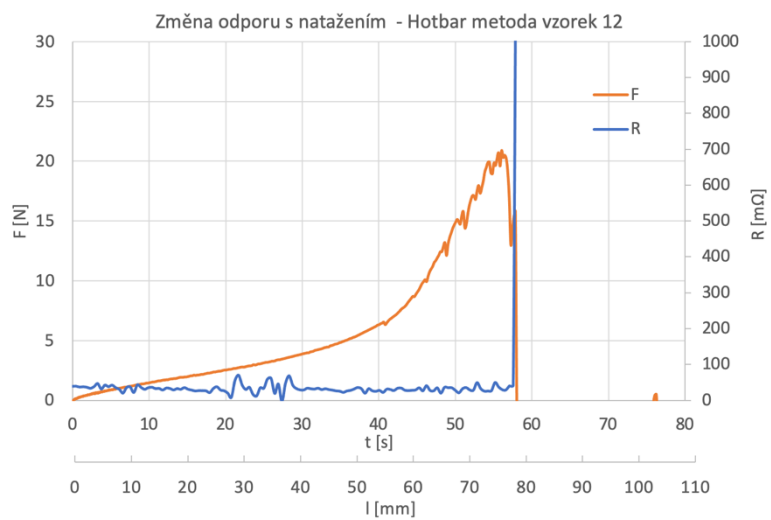
Obr. 83 Graf změny odporu s natažením a velikostí síly - metoda TCB vzorek 11.



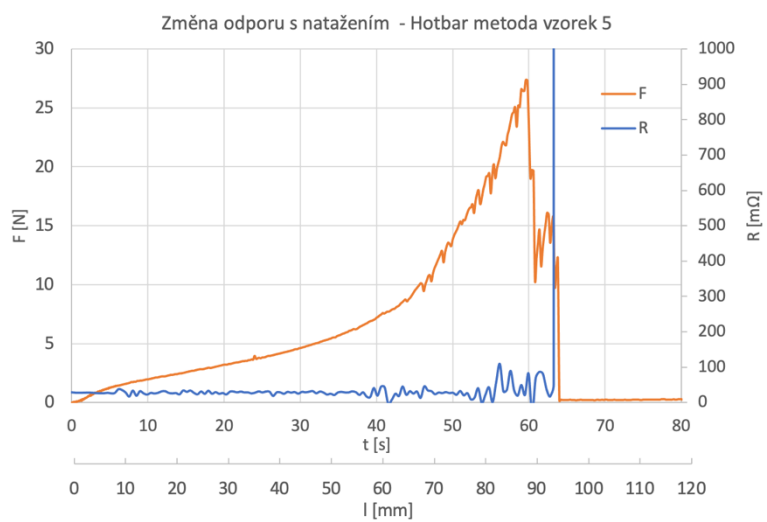
Obr. 84 Graf změny odporu s natažením a velikostí síly - metoda TCB vzorek 6.



Obr. 85 Graf změny odporu s natažením a velikostí síly - metoda Hotbar vzorek 10.



Obr. 86 Graf změny odporu s natažením a velikostí síly - metoda Hotbar vzorek 12.



Obr. 87 Graf změny odporu s natažením a velikostí síly - metoda Hotbar vzorek 5.