

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Kontaktování vodičů na tlustovrstvých substrátech pro  
vysokoteplotní aplikace**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš PANGRÁC**  
Osobní číslo: **E20N0019P**  
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**  
Téma práce: **Kontaktování vodičů na tlustvrstevných substrátech pro vysokoteplotní aplikace**  
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

## Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši metod a postupů používaných pro kontaktování vývodů elektronických modulů na keramických substrátech.
2. Porovnejte vlastnosti a parametry jednotlivých nalezených kontaktovacích metod zejména s ohledem na mechanickou a teplotní odolnost.
3. Vyhledejte vhodné vodiče pro kontaktování vodivých plošek na keramických substrátech metodou odporového svařování a vhodné dielektrické materiály pro jejich upevnění.
4. Navrhněte a realizujte testovací vzorky a nezbytné přípravy pro ověření metody odporového svařování kontaktů na keramických substrátech.
5. Proveďte elektrickou a mechanickou charakterizaci realizovaných kontaktů včetně testování jejich odolnosti vůči zvýšeným teplotám. Dosažené výsledky kriticky zhodnoťte.

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

Seznam doporučené literatury:

Zhou, Y., Microjoining and Nanojoining –16. Resistance-microwelding, Woodhead Publishing, 2008, ISBN 978-1-84569-179-0  
Fred D. Barlow, III, Aicha Elshabini Ceramic Interconnect Technology Handbook, CRC Press, 2007, ISBN 978-0-8493-3557-0  
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: **8. října 2021**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**


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

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

V Plzni dne 8. října 2021

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku spojů s vysokou teplotní odolností. V úvodu práce je rešerše kontaktovacích metod, jejich omezení, principy a výhody. Dále je tam rešerše materiálů pro desky plošných spojů, vodivé cesty a vodiče samotné. V dalších kapitolách je experimentální návrh, příprava, realizace a testování reálných spojů společně s vyhodnocenými výsledky. Závěr pak obsahuje celkové zhodnocení jednotlivých experimentů, doporučení které z nich vyplývá a reálnou použitelnost.

## **Klíčová slova**

Kontaktování, keramika, vysoké teploty, měděné vodiče

## **Abstract**

The presented diploma thesis is focused on the issue of connections with high temperature resistance. The introduction is a search of contact methods, their limitations, principles and benefits. There is also a search for materials for printed circuit boards, conductive paths and the conductors themselves. In the next chapters is the experimental design, preparation, implementation and testing of real connections together with the evaluated results. The conclusion then contains an overall evaluation of individual experiments, the recommendations that follow from them and the real applicability.

## **Key words**

Contacting, ceramics, high temperatures, copper conductors

## **Prohlášení**

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

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



.....  
.....  
podpis

V Plzni dne 23.5.2022

Tomáš Pangrác

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Řebounovi, Ph.D. za cenné a profesionální rady, připomínky, pomoc a metodické vedení práce. Dále pak jeho vedení konzultací a celkovému doзору nad touto prací.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 SUBSTRÁTY PRO VYSOKOTEPLTNÍ APLIKACE</b> .....	<b>13</b>
1.1 VLASTNOSTI ELEKTROIZOLAČNÍCH PODLOŽEK.....	13
1.1.1 <i>Mechanické vlastnosti</i> .....	13
1.1.2 <i>Tepelné vlastnosti</i> .....	14
1.1.3 <i>Elektrické vlastnosti</i> .....	14
1.2 SLOŽENÍ DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ.....	15
1.2.1 <i>Organické podložky</i> .....	16
1.2.2 <i>Anorganické podložky</i> .....	16
1.3 KERAMICKÉ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ .....	16
1.3.1 <i>Nitrid křemičitý</i> .....	17
1.3.2 <i>ZTA keramika</i> .....	17
<b>2 TECHNOLOGIE POKOVENÍ</b> .....	<b>18</b>
2.1 TECHNOLOGIE TENKÝCH VRSTEV .....	18
2.1.1 <i>Napařování</i> .....	18
2.1.2 <i>Naprašování</i> .....	18
2.1.3 <i>Chemická depozice</i> .....	19
2.2 TECHNOLOGIE TLUSTÝCH VRSTEV.....	19
2.3 TECHNOLOGIE DBC (DIRECT BONDED COPPER).....	20
2.4 TECHNOLOGIE AMB (ACTIVE METAL BRAZING).....	20
2.5 KOVY PRO VODIVÉ CESTY NA DPS .....	21
<b>3 TECHNOLOGIE PRO VYTVÁŘENÍ SPOJŮ S VYSOKOU TEPELNOU ODOLNOSTÍ</b> .....	<b>22</b>
3.1 ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	22
3.2 ODPOROVÉ MIKRO SVAŘOVÁNÍ .....	23
3.3 SVAŘOVÁNÍ TCB .....	24
3.4 SVAŘOVÁNÍ TIG (TUNGSTEN INERT GAS) .....	25
3.5 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ .....	26
3.6 ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	27
<b>4 VODIČE PRO VYSOKOTEPLTNÍ APLIKACE</b> .....	<b>28</b>
4.1 MĚDĚNÉ VODIČE .....	28
4.2 STRÍBRNÉ VODIČE .....	28
4.3 NIKLOVÉ VODIČE .....	28
<b>5 VYSOKOTEPLTNÍ IZOLAČNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>29</b>
5.1 POLYIMID (KAPTON <sup>TM</sup> ) .....	29
5.2 PTFE (TEFLON) .....	29



---

5.3	SILIKON.....	29
5.4	SKLO.....	29
5.5	KERAMICKÁ ADHESIVA.....	30
5.5.1	<i>Resbond<sup>TM</sup></i> .....	30
5.5.2	<i>FiberPlast</i> .....	30
<b>6</b>	<b>NÁVRH TESTOVACÍCH MOTIVŮ PRO PŘÍPRAVU SPOJŮ S VYSOKOU TEPELNOU ODOLNOSTÍ.....</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ PŘÍPRAVA SPOJŮ S VYSOKOU TEPELNOU ODOLNOSTÍ.....</b>	<b>33</b>
7.1	VOLBA A PŘÍPRAVA VODIČŮ.....	33
7.2	SVÁŘECÍ SOUSTAVA THE SUNSTONE <sup>TM</sup> .....	33
7.3	OMEZENÍ SVÁŘENÍ.....	35
7.4	PŘÍPRAVA VZORKŮ S KERAMICKÝM KRYTÍM.....	36
<b>8</b>	<b>SPECIFIKACE TESTOVACÍCH PROCEDUR SPOJŮ S VYSOKOU TEPELNOU ODOLNOSTÍ.....</b>	<b>38</b>
8.1	MĚŘENÍ ČTYŘVODIČOVOU METODOU.....	38
8.2	MECHANICKÁ ZKOUŠKA.....	38
8.3	TESTOVÁNÍ POMOCÍ TEPLOTNÍCH ŠOKŮ.....	39
8.4	TESTOVÁNÍ ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT.....	40
8.5	PROBLEMATIKA PRASKLIN.....	40
8.6	VÝSLEDKY TESTŮ.....	42
8.6.1	<i>Výsledky – elektrický odpor</i> .....	42
8.6.2	<i>Výsledky – mechanická odolnost</i> .....	46
<b>9</b>	<b>CHARAKTERIZACE REALIZOVANÝCH SPOJŮ S VYSOKOU TEPELNOU ODOLNOSTÍ.....</b>	<b>52</b>
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>55</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ.....</b>	<b>57</b>

## **Úvod**

Problematiku, kterou tato diplomová práce řeší je, jakým způsobem vytvářet kvalitní vysokoteplotní vodivé spoje s ohledem na dostupnost a cenu. Vzhledem k rozvíjejícím se nárokům jednotlivých aplikací na teplotní odolnost začínají být konvenční propojovací metody dosti omezené. Aplikací, která je toho jasným příkladem je Tokamak, ve kterém se vytváří toroidní magnetické pole pro uchování vysokoteplotního plazmatu. V tomto zařízení obvykle teplota dosahuje několika stovek až tisíc stupňů celsia, a proto je nutné k propojení vodičů se zařízeními použít metody s vysokou teplotní odolností. Přímo pro tuto aplikaci by se navíc perfektně hodily měděné vodiče vzhledem k vysoké vodivosti, odolnosti vůči radiaci a neutronovému toku. Je ale nezbytné zajistit pro tyto vodiče provoz v bezkyslíkaté atmosféře či ve vakuu pro eliminaci oxidace, což právě fúzní reaktory (Tokamak) jsou schopné zajistit.

Dalšími možnostmi pro využití vysokoteplotních kontaktních spojů mohou být vysokoteplotní pece, například pro zavedení senzorů teploty. Dále si dokáží představit využití třeba v letectví či kosmonautice, kde jsou nároky na teplotní odolnost v oblasti motorů.

Otázkou je, zda jsou toho některé dostupné metody kontaktování a propojování vůbec schopné a jaká je pak jejich mechanická a elektrická odolnost. S tímto ohledem je začátek této práce věnován rešerši dostupných metod a materiálů. Hlavním cílem mé diplomové práce je ale i praktické ověření těch nejdostupnějších metod.

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na kontaktování vodičů na tlustovrstvých substrátech pro vysokoteplotní aplikace. Text je rozdělen do několika částí od základních rešerší, experimentálního testování až po vytvoření reálných spojů a jejich vyhodnocení. Finálně tato práce hodnotí vytvořené spoje a přikládá subjektivní poznatky získané během experimentů.

## **Seznam symbolů a zkratk**

AMB	Active Metal Brazing
CAD	Computer aided design
CVD	Chemical Vapor Deposition
DBA	Direct Bonded Aluminium
DBC	Direct Bonded Copper
DPS	Deska plošných spojů
$E_p$	Elektrická pevnost
Hz	Hertz
I	Elektrický proud
J	Joul
K	Kelvin
m	Metr
m	Metr
mm	Milimetr
$mm^2$	Milimetr čtvereční
N	Newton
Pa	Pascal
PCW	Polykrystalická mullitová vlna
PVD	Physical Vapour Deposition
Q	Teplo
R	Elektrický odpor
t	Čas
TCB	Thermocompression bonding
$T_g$	Teplota skelného
TIG	Tungsten Inert Gas
tzv	Takzvaně
UV	Ultrafialové záření
W	Watt
ZTA	Zirconia-toughened alumina
$\rho_p$	Povrchová rezistivita
$\rho_v$	Vnitřní rezistivita
$\Omega$	Ohm

$V$	Volt
$\varepsilon$	Absolutní permitivita
$\varepsilon_0$	Permitivita vakua,
$\varepsilon_r$	Relativní permitivita,
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň Celsia

## **1 Substráty pro vysokoteplotní aplikace**

Substrátem je v případě plošných spojů označována elektroizolační podložka obsahující vodivé motivy v jedné či více vrstvách. Ta primárně nese součástky a propojuje je mezi sebou pomocí vodivé cesty, dále pak slouží k odvodu zbytkového tepla ze součástek [1]. Na substrátu závisí některé důležité parametry desky plošných spojů, také svými vlastnostmi a chováním ovlivňuje celkovou spolehlivost systému. Nejčastějším materiálem pro výrobu substrátů bývá tuhé dielektrikum, na kterém je následně nanесena vodivá vrstva [1].

### **1.1 Vlastnosti elektroizolačních podložek**

V dnešní době rozlišujeme velké množství vlastností elektroizolačních podložek, ty lze rozdělit do několika hlavních skupin. Příkladem mohou být mechanické, tepelné, elektrické či chemické vlastnosti [2]. Požadavky na jednotlivé z nich se liší podle požadavku aplikace.

#### **1.1.1 Mechanické vlastnosti**

Jednou z důležitých skupin vlastností elektroizolačních podložek pro desky plošných spojů jsou mechanické vlastnosti. Ty zejména udávají odolnost vůči výrobním a provozním podmínkám. Mechanická pevnost je v případě desek plošných spojů charakterizována mezi pevností v ohybu [1]. Při ohybu desky plošných spojů může dojít k jejímu porušení, zlomení, nebo k poškození natištěného motivu. Další mechanickou vlastností substrátu je koeficient teplotní roztažnosti. Ten souvisí s rozměrovou stabilitou substrátu, protože vlivem změny teplot vzniká v desce vnitřní pnutí. Dochází k tomu díky rozdílnému koeficientu teplotní roztažnosti jednotlivých materiálů a jeho vlivem se deska může zkroutit nebo prohnut. Deska je tak při změně teplot termomechanicky namáhána. Pro zmenšení tohoto namáhání je proto dobré volit materiály substrátů ale i součástek s co nejbližšími koeficienty teplotní roztažnosti [3]. Jedním z podstatných mechanických parametrů substrátů je nasákavost vodou. Tento parametr velmi ovlivňuje použití substrátů na desky plošných spojů, protože zvýšená přítomnost vody zhoršuje elektrické vlastnosti, zejména pak elektrickou pevnost a izolační odpor [1]. Jednou z posledních mechanických vlastností, kterou je určitě dobré zmínit je pružnost substrátu. Ta se neuplatňuje jen v případě ohebných tzv. flexibilních desek plošných spojů, ale i v případě normálních, protože zlepšuje mechanickou odolnost a snižuje křehkost substrátu [1].

### **1.1.2 Tepelné vlastnosti**

Tepelné vlastnosti patří mezi další velmi důležitou skupinu vlastností substrátů. Můžeme zde najít kupříkladu tepelnou odolnost, která udává, jak moc můžeme substrát tepelně namáhat, aniž bychom ho poškodili [4]. Tato vlastnost je důležitá hlavně z hlediska aplikace a technologie, jakou budeme desku vyrábět, osazovat a používat a jakých teplot při tom budeme dosahovat. Další vlastností je pak tepelná vodivost substrátu, ta udává schopnost dané látky vést teplo [1], [4]. Požadavkem na substráty desek plošných spojů je samozřejmě, aby tepelná vodivost byla co nejvyšší a osazené součástky měly tak dostatečný odvod tepla a řádně se chladily, čehož se ne vždy dá dosáhnout [1]. Na tepelnou vodivost pak navazuje hořlavost, která je důležitá hlavně z bezpečnostního hlediska, protože udává schopnost odolávat zapálení substrátu [1]. K tomu může dojít například přehřátím elektronické součástky nebo vystavením ohni v některých případech. Nejdůležitější teplotou je nejspíše teplota skelného přechodu označována  $T_g$ . Při této teplotě totiž dochází k velkým změnám vlastností daného materiálu a ten se mění z elastického do plastického a naopak [5].

### **1.1.3 Elektrické vlastnosti**

Elektrické vlastnosti jsou nejspíše tou nejpodstatnější skupinou ze souboru požadovaných parametrů na vlastnosti substrátu pro desky plošných spojů. Patří sem např. vnitřní a povrchová rezistivita, relativní permitivita, ztrátový činitel a elektrická pevnost [1]. První jmenovaný, tedy vnitřní a povrchová rezistivita, je asi nejdůležitější, protože pomocí nich lze hodnotit izolační vlastnosti substrátu. Vnitřní rezistivita, značena  $\rho_v$ , je rovna poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty uvnitř substrátu [1]. Povrchová rezistivita, značena  $\rho_p$  naproti tomu je rovna poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty na povrchu substrátu [6]. Relativní permitivita je další důležitou elektrickou vlastností daného substrátu. Vyjadřuje míru polarizace substrátu, která je vyvolána silovým působením elektrického pole na vázané náboje uvnitř dielektrika. Průběh je ovlivněn polárností dané látky. V případě nepolárních látek polarizace probíhá na úrovni atomů a dipóly vznikají působením vnějšího elektrického pole tak, že se kladný náboj posune ve směru pole, a naopak elektronový obal se vychýlí v opačném směru proti směru působení vnějšího pole [1], [7]. U polárních látek dipóly naopak existují i v případě, že na látku vnější elektrické pole nepůsobí, jsou ovšem náhodně natočeny a to tak, že se jejich účinek navzájem ruší a látka je tak navenek neutrální [1], [7]. Při vložení takové látky do vnějšího elektrického pole dojde v závislosti na směru a velikosti tohoto pole k natočení těchto dipólů [1], [7]. Díky tomu, že jsou dipóly, jak polární tak i nepolární látky, při vložení do vnějšího elektrického

pole orientovány stejným směrem, jako u vnějšího pole, dojde uvnitř látky k vybuzení elektrického pole [1]. Toto pole má pak opačný směr než pole vnější a působí tak proti [1]. Velikost relativní permitivity tedy vyjadřuje, kolikrát se v látkovém prostředí zmenší intenzita elektrického pole oproti velikosti intenzity elektrického pole ve vakuu [8]. Relativní permitivitu nám pak udává vztah:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad [-] \quad [1]$$

Kde:  $\varepsilon_r$  je relativní permitivita,

$\varepsilon_0$  je permitivita vakua,

$\varepsilon$  je absolutní permitivita

Hodnota permitivity je závislá na frekvenci, teplotě a vlhkosti [8]. Na relativní permitivitu navazuje veličina zvaná ztrátový činitel, ten také souvisí s jevem polarizace a vyjadřuje míru dielektrických ztrát. Ty jsou tvořeny vodivostními, ionizačními a polarizačními ztrátami [9]. Vodivostní jsou přítomné v každém dielektriku a vznikají v důsledku srážek volných nosičů náboje s částicemi, které tvoří strukturu dielektrika. Ionizační ztráty nejsou přítomny u všech dielektrik, ale pouze u těch, v jejichž struktuře se nachází částice plynu. Polarizační ztráty pak vznikají vlivem změn polarit u střídavého vnějšího elektrického pole, a to důsledkem neustálého natáčení dipólů. Tyto ztráty jsou závislé na frekvenci vnějšího elektrického pole, teplotě a druhu dielektrika [9]. Poslední elektrickou veličinou, kterou u substrátů sledujeme je elektrická pevnost. Ta udává kritickou hodnotu vnějšího elektrického pole, při němž ztratí substrát izolační schopnost a dojde u něj k průrazu. Tento průraz může být způsoben vlivem přílišného ohřátí, které má vliv na strukturu a tím na snížení elektrické pevnosti [10]. V tomto případě hovoříme o tepelném průrazu. Čistě elektrický průraz je způsoben uvolněním elektronů vázaných v látce [10]. V běžné praxi se vyskytuje spíše kombinace obou z nich. Elektrická pevnost se označuje  $E_p$  a obvykle se udává v  $\frac{kV}{mm}$  [10].

## **1.2 Složení desek plošných spojů**

Jednotlivé druhy desek plošných spojů jsou vyráběny z odlišných materiálů. Elektroizolační podložky jsou vybírány na základě jejich elektrických, mechanických, tepelných a chemických vlastností (viz 1.1 Vlastnosti substrátů) a v neposlední řadě také na základě cenové dostupnosti.

### **1.2.1 Organické podložky**

Organické substráty se skládají z organické pryskyřice a v případě tuhých ještě jedné nebo několika vrstev výztuže [1]. Jako pryskyřice se nejčastěji používají epoxidové či fenolické, můžeme se ale také setkat se silikonovými, melaminovými, polyesterovými nebo polyimidovými. Výztuž se pak nejčastěji používá ve formě skelné tkaniny. Dalšími materiály pak jsou bavlněný nebo buničitý papír, rohož a nebo různé typy vláken (skelné, uhlíkové, křemenné, aramidové) [1]. Velkou výhodou organických substrátů je jejich malé rozměrové omezení při výrobě, hmotnost a dielektrické vlastnosti [1]. Nevýhodou je pak malá tepelná vodivost, velký součinitel teplotní roztažnosti a u některých typů navlhavost.

### **1.2.2 Anorganické podložky**

Anorganické substráty jsou spojovány spíše s technologií tenkých a tlustých vrstev než s klasickou výrobou desek plošných spojů [1]. Oproti organickým substrátům jsou anorganické substráty lépe tepelně odolné, mají nižší koeficient teplotní roztažnosti a jsou vysoce chemicky odolné [1]. Nevýhodami naopak jsou vyšší hmotnost a cena, křehkost, rozměrové omezení při jejich výrobě a toxicita některých typů [1].

## **1.3 Keramické desky plošných spojů**

Keramické substráty se většinou nepoužívají na konvenční typy desek plošných spojů, ale nejčastěji se s nimi setkáme v případě technologie tlustých vrstev [11]. Dokáží odolat vysokým teplotám při výpalu a díky tomu jsou pro tuto technologii ideální, zároveň jsou chemicky odolné a působení mnoha látek na ně nemá vliv. Jediná jejich nevýhoda je křehkost, vysoká hmotnost a cena [1]. Podle relativní permitivity rozlišujeme dva typy elektrotechnické keramiky. Keramika s hodnotou relativní permitivity vyšší než 12 se používá pro kondenzátorová dielektrika, ta s menší permitivitou pro substráty [1].

Jedním z nejčastějších keramických substrátů je korundová keramika, ta se získává z oxidu hlinitého, který se nazývá také Alumina. Připravuje se z jemného prášku  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , v kombinaci s malým množstvím oxidů kovů a skla, pomocí lití nebo válcování. Obsah oxidu hlinitého v korundové keramice bývá obvykle mezi 91 a 99,6 % [1], [11]. V průmyslu se nejčastěji využívá keramika s koncentrací 96 %, ta poskytuje dobrý kompromis mezi teplotou výpalu a dalšími vlastnostmi. Korundová keramika disponuje celkem vysokou tepelnou vodivostí, která činí přibližně  $25 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ , dobrou mechanickou odolností, tepelnou



stabilitou, vhodnými dielektrickými vlastnostmi a poskytuje dobrou adhezi pro většinu past pro tlusté vrstvy [1], [11].

Dalším keramickým substrátem pro výrobu desky plošných spojů je beryliový substrát. Ten se vyrábí z oxidu berylnatého a mezi největší přednosti patří velmi vysoká tepelná vodivost asi  $250 \frac{W}{m \cdot K}$ , proto se využívá pro výkonové aplikace [1]. Negativem tohoto substrátu ale je jeho toxicita při výrobě, vysoká cena a nižší pevnost než v případě korundové keramiky.

Jako náhradou beryliového substrátu byla vyvinuta Aluminium-nitridová keramika (AlN). Její tepelná vodivost je opět vyšší, než v případě korundové keramiky a pohybuje se okolo  $170 \frac{W}{m \cdot K}$ , je tedy srovnatelná s kovy [1]. Dalšími vlastnostmi AlN keramiky je nízký koeficient teplotní roztažnosti, dobré elektrické a mechanické vlastnosti, nižší cena než beryliová a především není při výrobě toxická jako beryliová keramika [1].

### **1.3.1 Nitrid křemičitý**

Substráty na bázi nitridu křemíku ( $Si_3N_4$ ) se vyznačují nejlepší kombinací elektrických, tepelných a mechanických vlastností ze všech keramických materiálů [12]. Jeho tepelná vodivost je  $12 - 29 \frac{W}{m \cdot K}$  a lineární tepelná roztažnost je  $3 - 3,3 \cdot 10^{-6} K$ , ta je velice podobná tepelné roztažnosti polovodičových materiálů, která je  $4,2 \cdot 10^{-6} K$  v případě křemíku [13], [14]. To je poměrně výhodné právě pro aplikace s polovodičovými komponenty. Používají se hlavně v aplikacích, kde je mechanické namáhání nebo tepelné šoky natolik intenzivní, že to jiný typ keramiky nezvládne [12]. Můžeme se s ní setkat v systémech pro správu baterií pro elektrická hnací ústrojí, jako substrát pro velmi výkonné LED chipy, či různých senzorech pro hlubinné a průmyslové aplikace.

### **1.3.2 ZTA keramika**

ZTA keramika nebo tedy kompozity z oxidu hlinitého, který je tvrzený oxidem zirkoničitým, jsou zaměřeny na nahrazení keramiky z oxidu hlinitého pro aplikace, kde je vyžadována vyšší odolnost proti lomu [15]. Tyto materiály se sestávají z matice oxidu hlinitého, do které jsou vloženy částice oxidu zirkoničitého. Právě přidaná druhá fáze v podobě částic oxidu zirkoničitého má za následek zvýšení pevnosti v ohybu, lomové houževnatosti a odolnosti proti stresové únavě materiálu a opotřebení [15]. Nejvíce se s ní dá v současnosti setkat ve zdravotnictví v podobě ortopedických implantátů [16]. Postupně

se začíná objevovat i v elektrotechnice a to hlavně ve speciálních aplikacích, kde se využije jejích vlastností.

## **2 Technologie pokovení**

### **2.1 Technologie tenkých vrstev**

Technologie tenkých vrstev je založena na nanášení materiálu na DPS o tloušťce od několika desítek nanometrů až po několik mikrometrů [17]. Princip ve vzniku tenké vrstvy spočívá v depozici jednotlivých atomů nebo molekul. Tento proces začíná vytvořením náhodných zárodků vrstvy [18]. Následuje tvoření dalších obdobných zárodků, či růstem již vytvořených [18]. Proces lze ovlivnit pomocí podmínek, při kterých je vrstva tvořena. Celkové vlastnosti dané vrstvy jsou pak dány hlavně její tloušťkou [17], [18].

Dvěma nejčastějšími způsoby výroby tenkých vrstev jsou chemická (CVD) a fyzikální depozice (PVD) [18]. Mezi fyzikální depozici řadíme napařování a naprašování, které se dále dělí podle technologie, jakou při výrobě používáme.

#### **2.1.1 Napařování**

Základ metody napařování je v ohřátí nanášeného materiálu na takovou teplotu, že vznikne jeho tavenina a následně dojde ke změně skupenství do plynné formy [17], [18]. Tento uvolněný materiál ve formě páry následně zkondenzuje na podložce [17], [18]. Proces probíhá ve vakuu při tlaku  $10^{-4} - 10^{-6}$  Pa. Snížení tlaku má za následek zvětšení střední volné dráhy molekul nanášeného materiálu, která musí být mnohonásobně větší, než je vzdálenost odpařovaného materiálu a substrátu [18]. Jednotlivé typy technologie pro napařování se liší pouze ve způsobu, jakým se materiál zahřívá a odpařuje. Nejčastěji je v dnešní době používán odporový ohřev, který pracuje na principu zahřátí topného tělesa vlivem protékajícího elektrického proudu a následného předání tepla zahřivanému materiálu, který se odpaří [18]. Topná tělesa jsou vyrobena z elektricky vodivého materiálu, který musí mít vyšší bod tání, než je bod tání materiálu, který má být odpařován. Těmito materiály bývá Wolfram, Molybden, Tantal, kde se teplota tání pohybuje kolem 3000 °C, ty nejsou chemicky reaktivní, což je dalším požadavkem na topný materiál [18].

#### **2.1.2 Naprašování**

Naprašování probíhá v komoře, ve které je určitý druh plynu (nejčastěji argon), ten se neúčastní chemické reakce. Částicím tohoto plynu je zapotřebí dodat nezbytnou energii a tzv. plyn ionizovat, aby vznikla plynná plazma [18]. Díky ionizaci plynu vznikají kladně

nabitě ionty, ty vznikají ve chvíli, kdy volný elektron vyrazí z neutrálního atomu jeho elektron a z částice bez náboje se tak stává právě kladný iont. Tento kladně nabitý iont je následně přitahován ke katodě, kde vyrazí částici naprašovaného materiálu a další elektron [17], [18]. Nově vyražený elektron zvyšuje ionizaci plynu a zároveň se setkává s již vytvořenými ionty plynu za opětovného vznikání neutrální částice a za současného vzniku fotonu, což je důvodem, proč plazma vyzařuje světlo [18]. Pokud je ionizace plynu dostatečně velká, zažehne se doutnavý výboj, který zajišťuje trvalou ionizaci [18]. Vyražená částice se poté usazuje na substrátu.

### **2.1.3 Chemická depozice**

V případě chemické depozice (CVD) jde o proces, který probíhá při vysokých teplotách (přibližně 1000 °C) [18]. Při těchto podmínkách je materiál přichycen k povrchu podložky, kde se právě díky vysoké teplotě rozkládá a reaguje s částicemi povrchu [17], [18]. Nutnost dosažení vysoké teploty je hlavní nevýhodou této metody, protože její dosažení je energeticky náročné a vylučuje použití některých druhů podložek. Výhodou je naopak vcelku dobrá cena vytvořených vrstev a jejich vysoká odolnost.

## **2.2 Technologie tlustých vrstev**

Technologie tlustých vrstev je nejpoužívanější a nejefektivnější technologie pro hybridní elektronické obvody, která pokrývá širokou oblast aplikací a je vhodná i pro výrobu výkonových hybridních elektronických obvodů [19]. Tato technologie je zařazena mezi vrstevové technologie, jejichž tloušťka je v rozmezí jednotek mikrometrů až desítek mikrometrů [20]. Je to nevakuový depoziční proces založený především na nanášení pasty na podložku přes síto, šablonu, či pomoci dispenzeru a jejím následným výpalem [21]. Díky tomu je tento proces výrazně levnější a časově nenáročnější než v případě tenkých vrstev. Tlustovrstvá technologie je dále zařazena mezi aditivní technologie, která může nahradit současně nejpoužívanější metodu výroby DPS, kterou je fotolitografický proces [21]. Jednotlivé pasty pro technologii tlustých vrstev se sestávají ze tří hlavních složek. Těmi jsou funkční, které dávají pastě potřebné elektrické vlastnosti (vodivé, dielektrické, odporové), dále složka pojící, ta vytváří základní matici vrstvy (skleněná frit, polymer) a nakonec složka technologická, která umožňuje vytvoření pasty, což se jejího promíchání, hustoty a viskozity týče (zpravidla olej) [20]. Při výpalu tlustých vrstev se skleněnou maticí se technologická složka vypálí (přibližně při 200 °C), výpal pasty obecně probíhá, podle druhu pasty, při teplotách až 900 °C po dobu několika desítek minut [20].

### **2.3 Technologie DBC (Direct Bonded Copper)**

Technologie DBC je založena na eutektické reakci plyn-kov a používá se ke spojení měděné fólie a keramické izolační podložky [22]. Princip spočívá ve využití tenké oxidační vrstvy ( $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ ), která vzniká při reakci mědi s kyslíkem (0,4% hmotnostního kyslíku v atmosféře) a vytváří se na povrchu celé měděné fólie [22]. Teplota tání tohoto eutektika je  $1065\text{ }^\circ\text{C}$ , což je o  $18\text{ }^\circ\text{C}$  méně než teplota tání čisté mědi ( $1083\text{ }^\circ\text{C}$ ) [22]. V tomto stavu se eutektikum používá jako lepidlo pro spojení pevné měděné fólie s keramikou, aniž by měděná část ztratila svůj tvar. Měděné motivy se pak vyznačují silnou adhezí na substrátech z korundové keramiky nebo na substrátech vyrobených z aluminium-nitridu. Pro kvalitní propojení není jediným požadavkem tvorba kapalně povrchové vrstvy [22]. Další požadavek je kladen na nízké povrchové napětí mezi keramikou a  $\text{Cu}_2\text{O}$  [22]. Povrchové napětí se rychle snižuje díky malému množství kyslíku, který je zodpovědný za tvorbu  $\text{Cu}_2\text{O}$  a následného eutektika [22]. Tato technologie lze použít k výrobě keramických podkladů s maximální tloušťkou měděné vrstvy kolem  $0,7\text{ mm}$ , což je velmi obtížné dosáhnout jinými metodami [22]. Tyto substráty poskytují vynikající tepelnou a elektrickou vodivost a mohou pracovat v teplotním rozsahu od  $-100\text{ }^\circ\text{C}$  do  $250\text{ }^\circ\text{C}$  [22]. Výsledný motiv je finálně vytvořen leptáním měděné vrstvy. Dále je tu i technologie DBA (Direct Bonded Aluminium), která je obdobná jako DBC technologie, pouze měděná fólie je nahrazena hliníkovou.

### **2.4 Technologie AMB (Active Metal Brazing)**

Technologie AMB umožňuje spojení kovů (např. měď, titan, molybden atd.) s keramikou pomocí tvrdého pájení. AMB substráty představují jistou alternativu k technologii DBC [19]. Jejich předností je vyšší adheze kovové vrstvy a nižší potřebná teplota při výrobě pro vytvoření dobrého spojení s keramikou. Nejčastěji používanou keramickou podložkou pro technologii AMB je nitrid křemičitý ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), případně mohou být použity i nitrid hlinitý ( $\text{AlN}$ ), oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) nebo karbid křemíku ( $\text{SiC}$ ) [19]. Nejčastěji připojovaným kovem bývá měď ve formě fólie nebo plechu o tloušťce až  $0,8\text{ mm}$  [19]. Spoj mezi mědí a keramikou je tvořen pájecí slitinou ve formě preformy (pájecí slitina ve formě tenkého plechu), pasty nebo prášku. V případě připojování měděné fólie nebo plechu se nejčastěji používají slitiny mědi, stříbra a titanu. Díky obsahu titanu v pájecí slitině, který představuje aktivní prvek, se zvyšuje reaktivita a zlepšuje smáčivost pájecí slitiny na povrchu keramické podložky [19]. Titan nadále během pájení difunduje do keramické podložky i měděné vrstvy a je nejčastěji používaným aktivním prvkem v pájecích slitinách používaných pro

technologie AMB, případně může být použit i jiný prvek ze IV. B skupiny periodické tabulky prvků (zirkon, hafnium) [19].

## **2.5 Kovy pro vodivé cesty na DPS**

Desky plošných spojů jsou osazeny tenkou vodivou vrstvou, díky ní jsou jednotlivé součástky vodivě spojeny. To, jaký materiál se pro tuto kovou vrstvu použije, je závislé na volbě aplikace a jejích elektrických, chemických a mechanických požadavcích. Dalším důležitým kritériem pro volbu materiálu je typ samotného substrátu. Je důležité, aby jak vodivá vrstva, tak substrát spolu dobře přilnuly, a proto se ne každá kombinace materiálů hodí.

Nejčastějším vodivým materiálem je měď tloušťky 9 až 70 mikrometrů, vzniklá laminováním nebo elektrochemicky a galvanicky [23]. Měděné obrazce desky plošných spojů se dále často povrchově upravují stříbrem nebo zlacením a cínováním (zejména v místech pájení) a doplňují nepájivou maskou, která je chrání před znečištěním a korozí [23]. Dalšími vodivými materiály často používanými jsou hliník (DBA technologie) a stříbro pro tlustovrstvý tisk.

### **3 Technologie pro vytváření spojů s vysokou tepelnou odolností**

V dnešní době se pro kontaktování DPS nejvíce používají různé metody pájení, lze je dobře automatizovat a spoje mají dobré mechanické i elektrické vlastnosti. Další možností je pak využití elektricky vodivých lepidel, která sice nedosahují takové mechanické odolnosti jako v případě pájených spojů, ale dovolují kontaktovat za výrazně nižších teplot než v případě pájení. Díky těmto vlastnostem se hodí pro kontaktování na podložky, které vyšší teploty při pájení nesou. Třetí často používanou možností je využití nevodivých lepidel, které nevyžadují k vytvrzení skoro žádnou zvýšenou teplotu (UV vytvrzování) a jejich vlastnosti jsou velice podobné vodivým lepidlům. Problém s běžnými metodami ale nastává v případě použití vysokoteplotní techniky, kde teploty mohou dosahovat přes 400 °C. V takových podmínkách nemají běžné metody dostatečnou teplotní odolnost a nevydrží, proto je nutné použít alternativy popsané níže.

#### **3.1 Odporové svařování**

Odporové svařování je v principu jednoduchá a zároveň velmi účinná metoda trvalého spojení dvou materiálů. Svařování elektrickým proudem patří mezi svařování za současného působení tepla a tlaku. Zdrojem tepla je přechodový elektrický odpor v místě spojení mezi dvěma vodivými materiály, kterými prochází elektrický proud [24]. Během této metody nejsou do místa svaru přidávány žádné další materiály. Spojení tak finálně tvoří pouze základní materiál. Odporové svařování dělíme na dva základní módy - měkký a tvrdý [24]. Během měkkého módu se používají nižší proudy po delší čas. Zároveň dochází k pozvolnému tavení styčného místa, vytvoření velké tloušťky taveniny, tepelnému ovlivnění větší oblasti, větší deformaci a napětí na svařovacích spojích. Opakem těchto vlastností je tvrdý mód, ten využívá velké proudy po kratší dobu, díky čemuž dojde k rychlému roztavení styčného místa. Spoje pak mají minimální deformaci s výrazně nižším mechanickým napětím a jejich okolí je méně tepelně ovlivněné. Teplo potřebné k vytvoření dobrého svaru je popsáno rovnicí:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \text{ [J]} \quad [2]$$

Kde: Q je teplo, které potřebuje materiál, aby se mohl svařit,  
R je přechodový odpor mezi dvěma základními materiály,  
I je proud, který materiálem protéká,  
t je čas po který proces probíhá.

Odporové svařování je dále rozděleno do několika režimů podle typu a rozměrů svařovaných ploch. Příkladem je stykové svařování, švové svařování, výstupkové nebo bodové [24]. Pro naši problematiku, tedy svařování kontaktů, bude nejvhodnější metodou bodové svařování, které je také rozděleno do několika režimů.

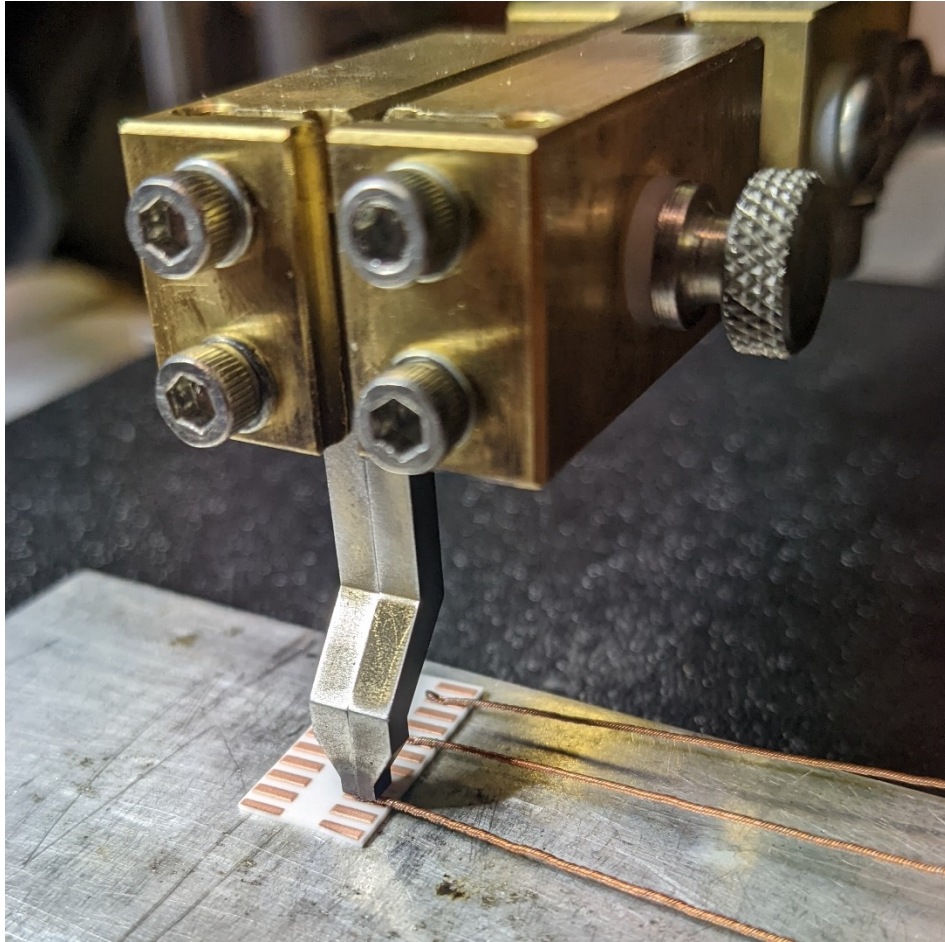
Nezákladnějším režimem je protilehlé svařování. Při tomto režimu je dvojice elektrod umístěna proti sobě. Tlak je vyvíjen z obou stran symetricky a svařované jednotlivé díly musí být v kontaktu s elektrodami [24]. Důležitým kritériem, které musí být splněno je, že všechny části musí být elektricky vodivé.

Dalším režimem je paralelní svařování, při něm jsou obě elektrody na stejné straně svaru a tlačí kolmo na svařované díly [24]. Tento typ vytváří dvě kontaktní místa s elektrodami a dvě oblasti svaru. Výhodou je především, že nosný substrát nemusí být elektricky vodivý.

Posledním režimem je krokové svařování, to je velice podobné paralelnímu. Obě elektrody jsou opět na jedné straně svařovaného dílu. Tento režim vytváří silnější svary než paralelní a hlavně vytváří pouze jedno svarové místo [24]. Opět nemusí být nosný substrát elektricky vodivý.

### **3.2 Odporové mikrosvařování**

Odporové mikrosvařování vychází z klasického odporového svařování. Jeho vývoj stál hlavně za následkem celkové miniaturizace jednotlivých zařízení, jejich komponentů a tím i požadavku na stále menší kontakty a jejich propojování [25]. Jednotlivé režimy zde vycházejí z klasického odporového svařování. Rozdíl je hlavně ve velikosti svarů, vhodných svařovaných materiálů, přítlačné síle a protékajícím proudem [25]. Klasické odporové svařování je spíše koncipováno pro oceli nebo slitiny ocelí. Mikrosvařování je pak vhodné pro neželezné materiály, příkladem může být měď, hliník, nikl, mosaz, platina nebo slitiny niklu a mědi [25]. Navíc většina materiálů pro kontakty v dnešní době jsou pro zlepšení vlastností povrchově upraveny a z toho důvodu pro ně není tolik vhodné klasické odporové svařování. Výhodou i nevýhodou mikrosvařování je velikost elektrod. Díky nim můžeme vytvářet menší a přesnější svary, ale velikost elektrod nedovoluje vodní chlazení a hrozí přivaření elektrod k základnímu materiálu [25].



**Obrázek 1: Odporová svařovací hlava.**

### **3.3 Svařování TCB**

Termo-kompresní svařování je svařování, při kterém je využíváno teplo uvolněné při průtoku proudu přes dvojici vzájemně spojených elektrod. Svar pak vzniká kombinací rychlého ohřevu za současného působení přítlaku na svařované součásti. Při této technologii je veliký požadavek na materiál elektrod. Zpravidla se tedy používá wolfram díky jeho vysoké tepelné odolnosti a tvrdosti. TCB technologie je nejčastěji používána pro přivařování mikrodrátků. Díky procházejícímu proudu pouze přes elektrody, lze svařovat i nevodivé materiály, proto se tato technologie používá pro svařování drátků i s izolací. Často se tato technologie používá ke svařování přírodních vodičů k bateriím.

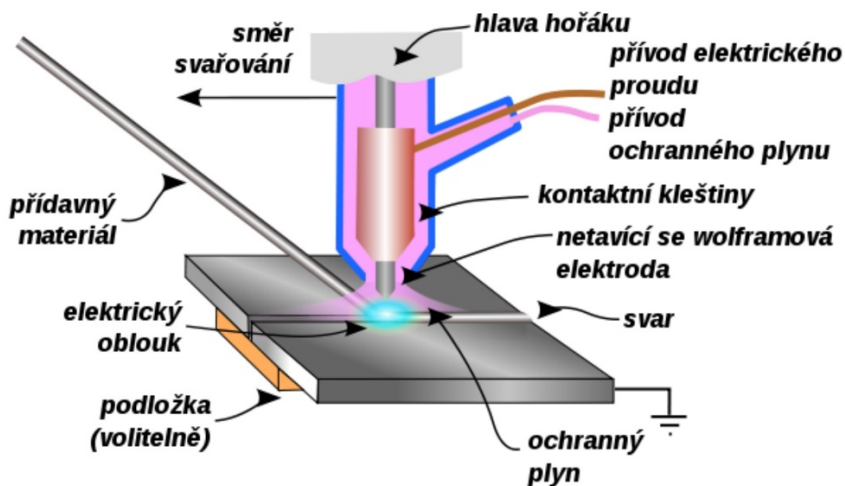




**Obrázek 2: Zahřátá termokompresní hlava při svařování [26].**

### **3.4 Svařování TIG (Tungsten Inert Gas)**

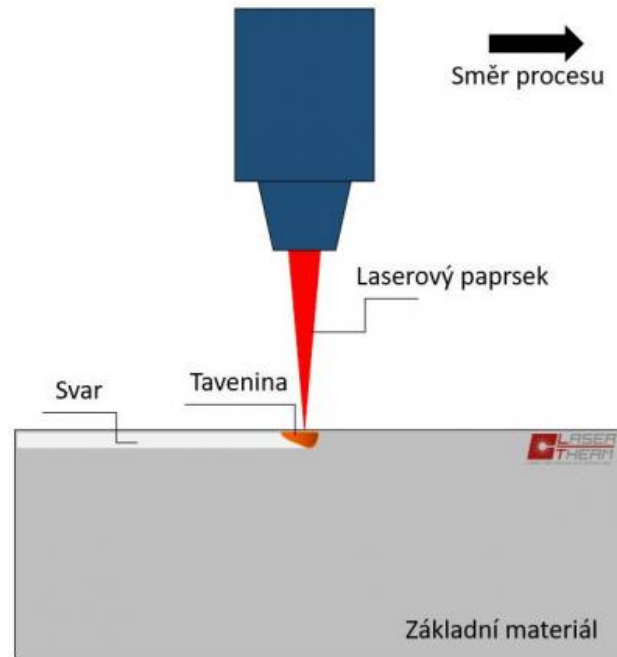
TIG je mezinárodní zkratka pro označení metody svařování elektrickým obloukem za pomoci netavící se elektrody a současného působení ochranné atmosféry inertního (netečného) plynu. Během tohoto typu svařování hoří elektrický oblouk mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Elektroda musí být vyrobena z velmi tepelně odolného materiálu [27]. V opačném případě se začne tavit což je nepříjemné. Nejběžněji se jako materiál používá wolfram, který právě vysokou tepelnou odolnost má [27]. Tato wolframová elektroda je v hlavici TIG hořáku upnuta pomocí kleštiny, kterou je do elektrody přiváděn elektrický proud [27]. Hořák je nadále opatřen keramickou hubicí, kterou ven proudí plyn a vytváří tím kolem místa svaru inertní ochrannou atmosféru [27]. Plynem, který se nejběžněji používá je argon v různých procentech čistoty [27]. Inertní ochranná atmosféra má dvě funkce, jednak chrání svar před přístupem vzduchu díky čemuž nedochází tolik k oxidaci a zároveň usnadňuje zapálení oblouku. Svařování TIG technologií může probíhat jak s přídavným materiálem tak bez něj [27]. Největší výhodou technologie TIG je výborná kontrola nad vytvářeným svarem a díky tomu vytvoření opravdu dobrého spoje. Nevýhodou této technologie je pak velká náročnost na techniku, díky čemuž roste i cena svarů vyrobených touto technologií a poměrně nižší produktivita [27].



**Obrázek 3: Procesní schéma svařování TIG [28].**

### **3.5 Laserové svařování**

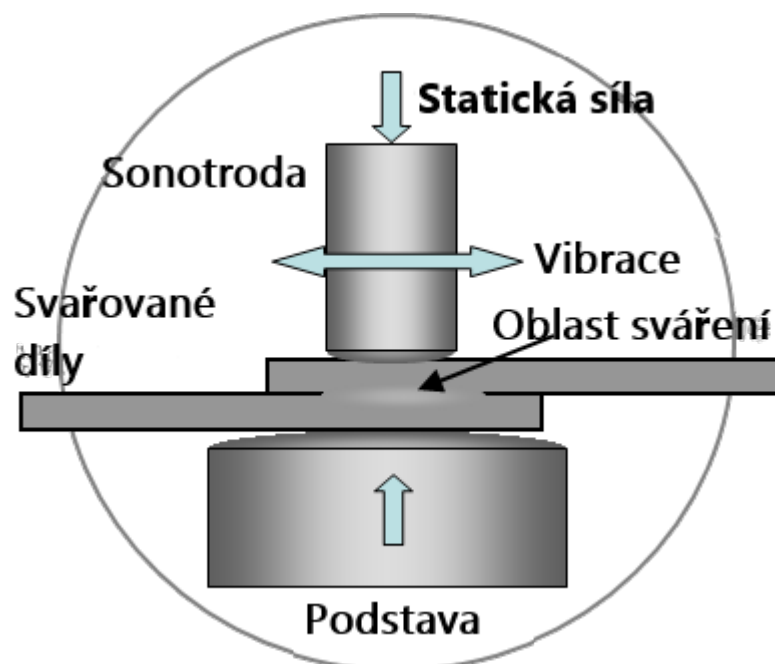
Laserové svařování je technologie, pomocí které lze dosáhnout nerozebíratelného spojení dvou materiálů (v našem případě kovů). S první teorií, že by bylo možné stimulovat emisi fotonů, přišel Albert Einstein v roce 1917 a dal tak předzvěst dnešním laserům. Princip laserového svařování, kdy je materiál taven pomocí koherentního světelného paprsku, spočívá v roztavení materiálů, jejich následného promísení v tavné lázni a opětovného ztuhnutí v podobě svaru. Při laserovém svařování není do svaru přidáván dodatečný materiál a svařovat lze jak v normální, tak v ochranné atmosféře, která často svarům dodává lepší kvalitu [29],[30]. Z důvodu vysoké hustoty energie obsažené v laserovém paprsku je zóna ovlivněná teplem svaru obvykle malá [30]. Tepelně ovlivněná okolní zóna svaru obsahuje struktury kovových zrn, které jsou přechodem od struktury zrna sypkého materiálu ke struktuře zrna svarové lázně. Větší hranice zrn jsou vytvořeny působením zvýšené teploty vedené do okolního materiálu během procesu svařování [30]. Díky rychlému procesu svařování je pak vytváření těchto oblastí velmi malé. Svařovat lze konstrukční oceli, korozivzdorné oceli, hliník a jeho slitiny, měď, titan, plasty a dokonce i některé textilie [29]. Laserovým svařováním jsou především spojovány díly s vysokým důrazem na svařovací rychlosti, přesný a kvalitní svar bez trhlin, nečistot a pórů [31]. Kladem jsou i nízké hladiny vneseného tepla ovlivňující deformaci svařence [31].



Obrázek 4: Procesní schéma laserového svařování [32].

### 3.6 Ultrazvukové svařování

Ultrazvuková technologie svařování spočívá v převedení energie do vysokofrekvenčního mechanického pohybu (vibrací). Tento mechanický pohyb dále se silou působící na svařovaný materiál vytváří v místě kontaktu teplo [33]. Díky tomu se materiál v kontaktním bodě začne tavit a po opětovném ochlazení vytvoří pevné molekulární spojení. Frekvence při kterých se svařuje se obvykle pohybují mezi 10 – 100 kHz [34].



Obrázek 5: Procesní schéma ultrazvukového svařování [35].

## **4 Vodiče pro vysokoteplotní aplikace**

Následující dvě kapitoly se zabývají výběrem vhodných typů vodiče a jejich izolace pro vysokoteplotní aplikaci. Předem byla vyřazena hliníková lanka kvůli jejich menší vodivosti (vyššímu měrnému odporu  $\rho = 0,0285 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ), teplotní odolnosti, horší mechanické odolnosti [36]. Vzhledem k velikosti kontaktních ploch, jejich tloušťce a technologii sváření, které mohou být požity, bylo nutné omezit se na kruhová, nejlépe splétaná jádra.

### **4.1 Měděné vodiče**

Měděné vodiče vynikají malým měrným odporem  $\rho = 0,0178 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$  (dobrá vodivost), příznivou cenou a dostupností [37]. Na jádra se používá především tzv. měkká měď (pevnost v tahu 190 – 240 MPa) [38]. Nevýhodou mědi je, že oxiduje na vzduchu za normální teploty tenkou vrstvou na povrchu [38]. Za zvýšených teplot pak ale v celém objemu. Disponuje dále vynikající tepelnou vodivostí. Při prvních pokusech přivařit měděný drát k měděnému kontaktu bylo zjištěno, že bude třeba omezit se na průměr jádra do 0,3 mm, protože při přivaření jádra 0,5 mm již kontakt nebyl dostatečně odolný a svar špatný. Při vyšších teplotách se měď dá používat pouze v inertní netečné atmosféře nebo ve vakuu, v opačném případě rychle oxiduje.

### **4.2 Stříbrné vodiče**

Stříbro obecně je ušlechtilý, měkký, tvárný kov. Na vodiče se používá, protože má nejlepší elektrickou a tepelnou vodivost. Jeho měrný elektrický odpor činí pouze  $\rho = 0,0163 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$  [37]. Používá se také k postříbření různých kovů, často mědi, do pájek, pro kontakty, jako bimetal, nebo ve slitinách. Má výborné chemické vlastnosti a na vzduchu je stálý i za zvýšených teplot.

### **4.3 Niklové vodiče**

Nikl je bílý, feromagnetický, kujný a tažný kov. Slouží jako součást různých slitin a k povrchové ochraně jiných kovů před korozí [39]. Jelikož se jedná o toxický kov je v praxi jeho využití omežováno. V elektrotechnice se spíše používají slitiny niklu a jiného prvku. Zvláštní slitina niklu a stříbra slouží často jako materiál pro výrobu elektrických kontaktů v silně namáhaných silnoproudých spínačích, které musí vykazovat vysokou úroveň spolehlivosti [39]. K dalším významným slitinám niklu patří konstantan, což je slitina 40 % niklu a 60 % mědi, která má konstantně velký elektrický odpor [39]. Měrný elektrický odpor niklu činí  $\rho = 0,1 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$  [40].

## **5 Vysokoteplotní izolační materiály**

Pro vysokoteplotní aplikace jako je v našem případě např. tokamak jsou zapotřebí ne zcela konvenční izolační materiály. Potřebnými parametry jsou například teplotní odolnost alespoň 500 °C, schopnost pracovat ve vakuu, izolovat i vyšší frekvence napětí a vyšší hodnoty proudu.

### **5.1 Polyimid (Kapton™)**

Polyimid, obchodně kapton™, je syntetický polymer, který se na trhu objevil již před padesáti lety, kdy jej uvedla americká firma DuPont. Tento polymer je ceněn pro své vynikající elektrické izolační i mechanické vlastnosti a pro svou teplotní odolnost [41]. Dále odolává rozpouštědlům, olejům i kyselinám [41]. Zůstává stabilní v širokém rozmezí teplot od -269 do +400 °C [42].

### **5.2 PTFE (Teflon)**

Polytetrafluorethylen je fluorovaný polymer ze skupiny perfluorovaných sloučenin. Odolný je zhruba do teploty 260 °C, kdy se začínají měnit jeho vlastnosti a teplota tání je okolo 327 °C [43]. Disponuje vynikajícími elektroizolačními vlastnostmi i při vyšších teplotách a vyšších frekvencích [44].

### **5.3 Silikon**

Silikony disponují velmi dobrou tepelnou stabilitou v rozmezí teplot od – 60 °C do + 200 °C a krátkodobě odolávají až 350 °C [45]. Silikony dále málo degradují a jsou odolné vůči vodě a olejům [45]. Nevýhodou je pak jejich vyšší cena a nižší mechanická odolnost, ale ta je odstraňována různými plnivými.

### **5.4 Sklo**

Skelný opletek je alternativou všech výše zmíněných izolačních systémů, protože jako jediný dokáže odolat 500 °C a více. První patenty na výrobu skleněných vláken se objevily koncem 19. století a průmyslově se začaly vyrábět kolem roku 1930 [46]. Obecně je sklo odolné proti ohni, mnoha chemikáliím, má celkem vysokou pevnost v tahu a nízký modul pružnosti, ale má malou pevnost proti oděru [46]. Běžně je používán jako tepelná ochrana pro vodiče, kabely a hadice zejména tedy v automobilu. Tepelná vodivost skelných vláken se pohybuje kolem 0,6 – 1 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> [47],[48]. V případě elektrické pevnosti na tom nejsou skelná vlákna vůbec špatně a hodnoty se pohybují v rozmezí 60 – 100 kV/mm [49],[48]. Problém

ovšem je, že ve většině případech izolace se skelnými vlákny plně nevyplní prostor mezi vodičem a samotnou izolací a vznikají zde tak vzduchové bublinky. V nich následně mohou vznikat elektrické výboje a ty tak degradovat izolaci i samotný vodič.

## **5.5 Keramická adhesiva**

### **5.5.1 Resbond™**

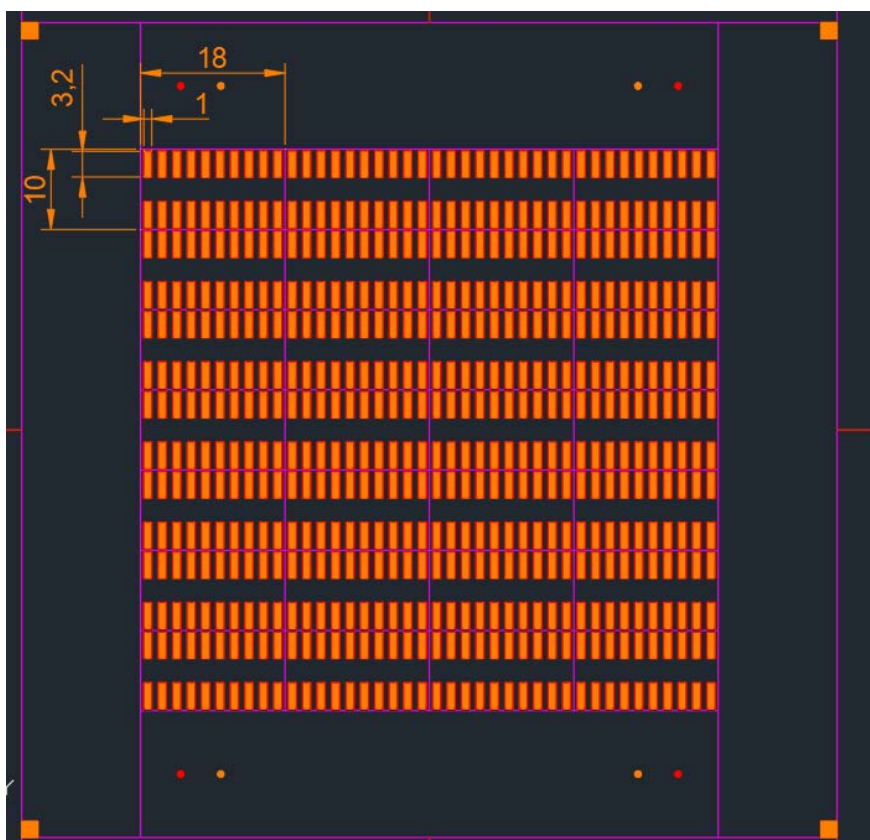
Keramická adhesiva, s obchodním názvem Resbond™, jsou zalévací hmoty na bázi keramických pojiv a vybraných zpevňujících plniv, které se používají v aplikacích s vysokým tepelným požadavkem [50]. Disponují výbornou přilnavostí ke keramice, kovům, sklu a plastům, dále jsou teplotně stabilní, a to i vůči teplotním šokům, nebo dielektricky pevné [50]. Jsou odolné vůči roztaveným kovům, oxidační a redukční atmosféře, většině chemikálií a rozpouštědel [50]. Jejich hlavním úkolem je izolovat a chránit před mechanickým a tepelným namáháním důležité části.

### **5.5.2 FiberPlast**

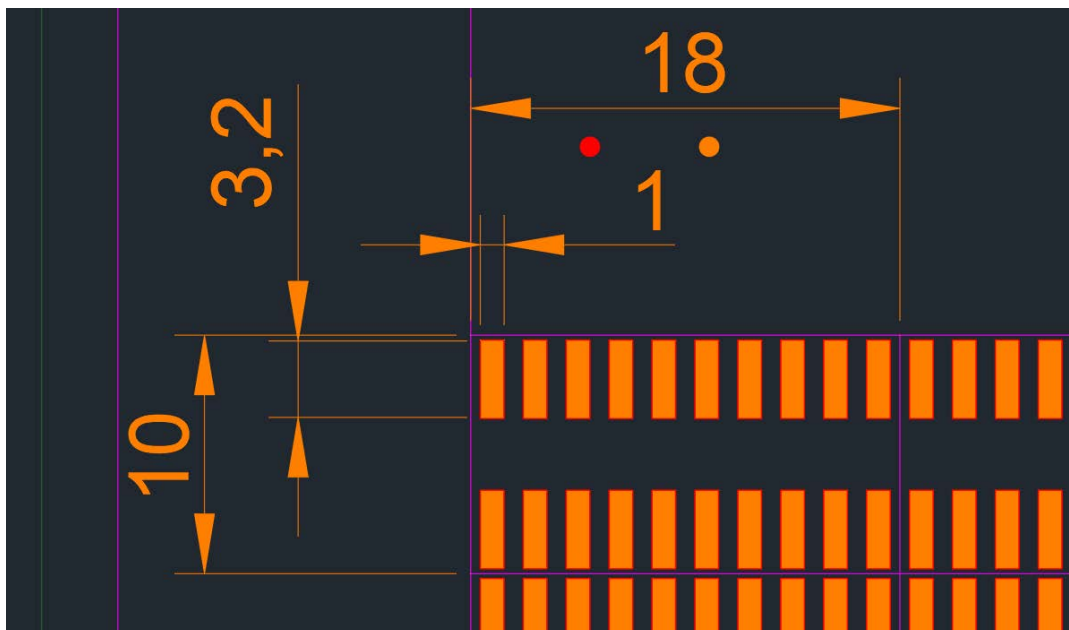
FiberPlast C 1800 D může být alternativou ke keramickému adhesivu Resbond™ pro vysokoteplotní aplikace. Umožňuje spolehlivé lepení a povlakování keramických materiálů na bázi vláken. Díky jednosložkovému lepidlu je jednoduché zpracování a odolnost by měla být až do 1750 °C [51]. Toto adhezivum je na bázi PCW (polykrystalická mullitová vlna) s přidanými anorganickými pojivy a přísadami [51].

## **6 Návrh testovacích motivů pro přípravu spojů s vysokou tepelnou odolností**

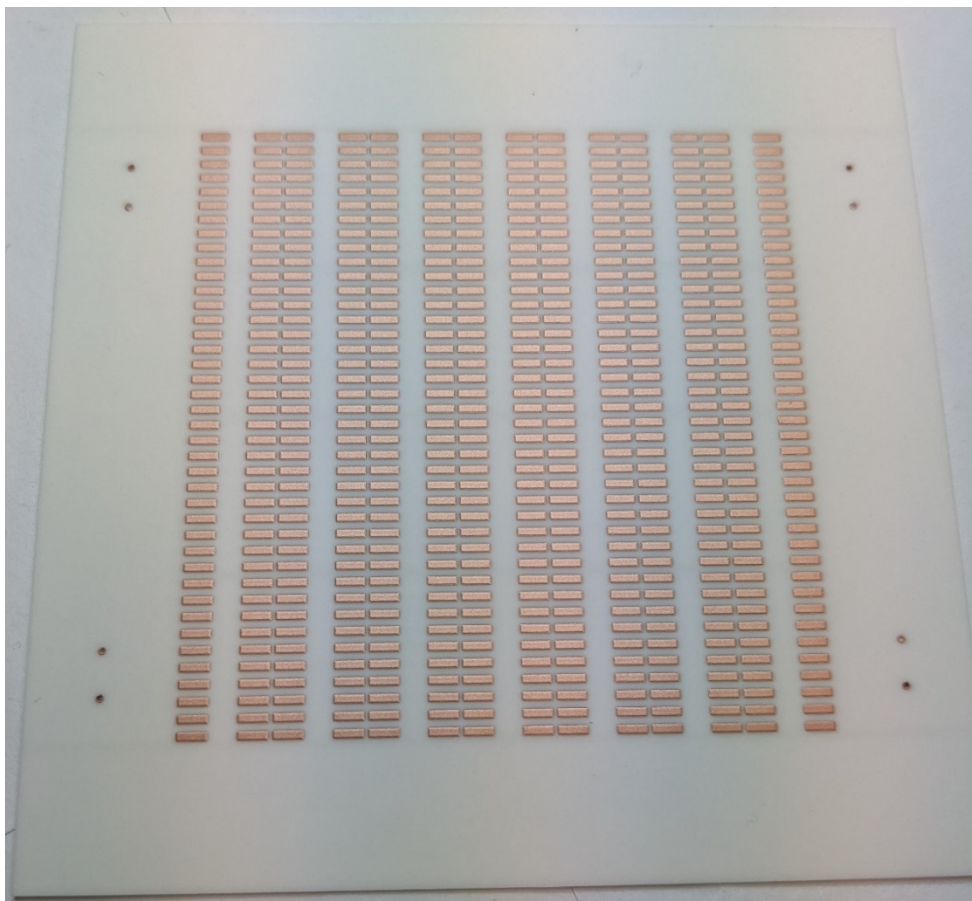
Pro reálné otestování spojů pro vysokoteplotní aplikace bylo zapotřebí nejprve nechat vyrobit keramické desky s měděnými kontakty. Rozměry těchto kontaktů jsou voleny podle požadavků finální aplikace. Dalším kritériem bylo i jisté ekonomické hledisko. Z toho důvodu je na jedné destičce více kontaktních plošek. Stejně tak jako v prvním případě i toto se může objevit v reálné aplikaci. Testovací motivy byly navrženy v CAD programu a jejich reálný návrh je vidět na Obrázku 6, 7. Takto vyrobené keramické desky s měděným tlustvrstevným potiskem jsem pak následně využil pro vytváření reálných kontaktů.



**Obrázek 6: Návrh keramické desky sestávající se z více menších destiček v programu CAD.**



**Obrázek 7: Reálné rozměry testovacího motivu.**



**Obrázek 8: Reálně vytvořený testovací motiv na keramickém substrátu**



## **7 Experimentální příprava spojů s vysokou tepelnou odolností**

Pro reálné ověření teoretických předpokladů ohledně kontaktů pro vysokoteplotní aplikace bylo zapotřebí vyrobit několik kusů vzorků na kterých bych zjistil reálné možnosti a vlastnosti kontaktů.

### **7.1 Volba a příprava vodičů**

Primárně jsme s vedoucím práce omezili výběr materiálu vodičů a vodivého motivu pouze na měď, protože zkoumání dalších kombinací by byl nad rámec práce. Dalším důvodem byla výhoda samotné mědi ve finální aplikaci vzhledem ke svým vlastnostem a ceně. Prvním problémem, se kterým jsem se setkal, bylo sehnání vhodných vodičů pro samotné kontaktování. Vzhledem k tomu, že v této problematice jde o mikrosvařování, nebylo vůbec snadné dohledat vodiče o průměru menším než 500  $\mu\text{m}$ . Prvotně se nabízely vodiče pro vinutí transformátorů, které by průměr splňovaly, ale nenašel jsem výrobce, který by je poskytoval bez izolačního a ochranného laku. Dále jsem zkoušel výrobce spletených vodičů, ale ani ti nenabízejí tak malé průměry, které jsem pro tuto práci potřeboval. Nakonec se podařilo sehnat kabel ETHERLINE® 4 pair - CAT.5e (Obrázek 9), který má sice LSZH plášť a PVC izolaci kolem jednotlivých vodičů, ale jádra jsou z požadované mědi složena ze sedmi lanek o celkovém průměru 26 AWG. Dalším vodičem pro otestování teorie jsem vzal jednotlivá lanka z napájecího kabelu pro síťových 230 V, které byly také měděné 32 AWG.



**Obrázek 9: ETHERLINE® 4 pair: CAT.5e; flexible [52]**

Před samotným procesem svařování bylo nutné si vodiče připravit, zejména pak lankové vodiče z kabelu ETHERLINE® 4 pair - CAT.5e. Ty bylo nutné zbavit izolace a více je slanit, aby se při přitlaku svářecí sondou jednotlivá lanka nerozbíhala. Podobné to bylo i u měděných vodičů 32 AWG, které jsme musel pouze zbavit izolace. Dále bylo nutné nalámat keramickou desku na menší segmenty jejichž rozměry jsou vidět na obrázku 7.

### **7.2 Svářecí soustava The Sunstone™**

Znalostí, kterou bylo zapotřebí také získat, byla práce s odporovou svářecí stanicí The Sunstone™ Linear DC (viz Obrázek 10). Vzhledem k topologii vodivé cesty, keramické desky a měděného vodiče jsem byl omezen na technologii sváření TCB a paralelní odporové svařování. Nejprve jsem se seznámil s obecnou obsluhou svářečky a následně jsem začal

produkovat několik testovacích svarů. Na těchto svarech jsem experimentálně hledal optimální nastavení parametrů sváření tak, abych dosáhl co nejlepší mechanické pevnosti svarů. Tyto svary jsem testoval na manuální trhačce, která mi dávala informaci o síle při odtržení kontaktu.



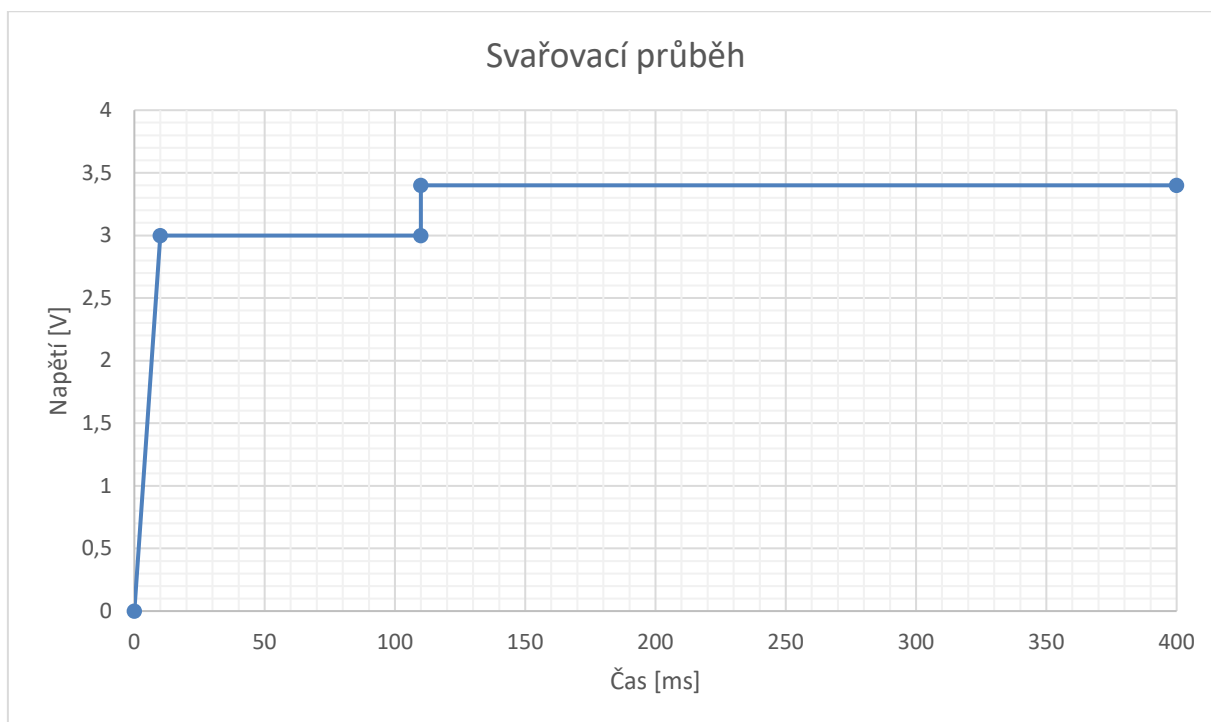
**Obrázek 10: The Sunstone™ Linear DC [53]**

Parametry, které jsem na svářecí jednotce nastavoval byla velikost stejnosměrného napětí, jeho náběh, doba trvání a případně i doběh. Z tohoto parametru pak svářecí jednotka vycházela při velikosti elektrického proudu, který do svářecí hlavy reálně tekla, aby se vytvořilo dostatečně velké teplo a tím i svar (viz vztah 2 v kapitole 3.1). Ze stejného vztahu vyplývá, že dalším parametrem musela být doba svařování. Po několika experimentálních svarech jsem zjistil, že lepší mechanickou odolnost získám, když je tato doba nejdelší, co svářecí program dovoluje. Tedy 400 ms. Posledním parametrem byla velikost přitlačné síly svářecí hlavy. Díky ní bylo možné použít menší napětí, respektive proud, ale zase hrozilo vytvoření krčku a menší mechanická pevnost samotného drátu v místě svaru. Najít optimální nastavení, aby byl synergický účinek co největší bylo velmi náročné.

Průběžným testováním jsem nakonec došel k parametrům pro jednotlivé typy vodičů a svařovacích hlav, aby síla při odtržení byla co největší a zároveň v místě spojení. Tedy aby docházelo k odtrhu kontaktu namísto přetržení drátku, například v krčku, který se během svařování vytváří. Tyto parametry jsou následně uvedeny v Tabulce 1 a svařovací průběh nastavený na svářečce je vidět na Grafu 1.

Svařovací režim	Průměr svař. Lanka [ $\mu\text{m}$ ]	Přítlačná síla [N]	Napětí prvního pulzu [V]	Napětí druhého pulzu [V]	Síla při odtrhu [N]
Paralelní odporové	220	3000	2,3	2,9	9
	440	3000	3	3,4	16
TCB	220	1000	2,3	2,8	10
	440	2000	2,5	2,9	22

Tabulka 1: Nejlepší dosažené svařecí parametry a síly odtrhu.



Graf 1: Svařovací průběh (paralelní odporové, 440  $\mu\text{m}$ )

### 7.3 Omezení sváření

Velikosti parametrů nastavovaných na svařecí soustavě měla svá fyzikální omezení. Jejich překročením hrozilo tepelné zničení svařecích elektrod v případě režimu TCB. Elektrický přeskok mezi elektrodami nebo přepálení svařovaného drátu vlivem příliš velkého proudu dále hrozí v režimu paralelního odporového svařování. Bylo třeba dávat velký pozor při experimentálním hledání nejlepších parametrů a ze začátku testování začínat na nižších hodnotách a ty postupně zvyšovat. V režimu TCB jsem používal svařovací elektrodu MEL TCB U od firmy The Sunstone<sup>TM</sup> a v režimu paralelního odporového to byly elektrody typu MEL-AMO od stejného výrobce. Přesné mezní hodnoty se mi bohužel nepovedlo dohledat, protože je výrobce svařovacích elektrod nespecifikuje.

## **7.4 Příprava vzorků s keramickým krytím**

Pro ověření hypotézy, že keramická adhesiva kterými se dá zakrýt kontakt, zlepšují mechanickou odolnost, bylo také zapotřebí vytvořit nezbytné množství vzorků. Vzhledem k již tak velkému množství vzorků a omezenějším prostorům komor jsem zúžil testování pouze na lanko 440  $\mu\text{m}$  přivařené metodou TCB, která v experimentech naskýtala nejlepší odolnost. Testoval jsem je následně pouze v klimatické komoře, protože teplotní neměla dostatečnou kapacitu, abych do ní přidal další vzorky s keramickými adhezivy. Příprava záležela především na typu adheziva. Já jsem pro testy zvolil tři typy adheziv od firmy RESBOND™.

Prvním bylo dvousložkové adhezivum RESBOND® 940HT. U tohoto adheziva bylo třeba nejprve smíchat prášek s aktivátorem v poměru, který uvádí výrobce a dobře jej promísit. Následně jsem danou hmotu nanášel pomocí hrotu přímo na kontakty. Problém u této hmoty byl, že v řádu jednotek minut začínala tuhnout, což zhoršovalo její smáčení. Abych předešel ovlivnění a rozdílným parametrům mezi jednotlivými kontakty, musel jsem hmotu připravit ještě jednou. Toto adhezivum se následně vytvrzovalo pouze na vzduchu při pokojové teplotě dvacet čtyři hodin.

Druhé adhezivum RESBOND™ 989 bylo jednosložkové, a vyžadovalo před nanášením důkladné promíchání. Bylo problematické zejména v jeho rychlém usazování některých částí u dna. Z toho důvodu jsem toto adhezivum promíchal průběžně, opakovaně a skoro vždy před nanášením na kontakt. Na kontakt jsem jej nanášel také pomocí hrotu. Tohle adhezivum mělo pak za mě nejlepší poměr smáčivosti a roztékavosti. I tuto hmotu jsem nechával vytvrdit dvacet čtyři hodin na vzduchu při pokojové teplotě. Výrobce uvádí, že je možné tento proces případně urychlit a vytvrzovat v peci. Také uvádí, že je dobré hmotu dotvrdit při teplotě 200 °C po dobu dvou hodin. Toto doporučení však nemohlo být provedeno, aby nedošlo k nežádoucí oxidaci měděných vodičů.

Třetím a posledním testovaným adhezivem bylo RESBOND® 903HP. Toto jednosložkové adhezivum bylo na přípravu nejjednodušší a předběžně bych jej volil při sériové výrobě. Nanášel jsem jej stejně jako předešlé pomocí hrotu. Tato hmota měla velmi dobrou smáčivost, ale vcelku více se roztékala. Vytvrzení pak probíhalo v peci při 120 °C během čtyř hodin. Výrobce zde doporučuje vytvrzovat při 120 °C minimálně dvě hodiny a následně dovytvrdit na 370 °C. Tento proces jsme pozměnili opět z obav ze vzniku oxidace na měděných vodičích.

Všechny tři hmoty měly po vytvrzení velmi dobrou strukturu (viz Obrázky 11 - 13 ), snad jen první, tedy RESBOND® 940HT, byla více poréznější. Dále všechny tři vydrží teplotu minimálně 1500 °C, což je více než vydrží měděné vodiče.



**Obrázek 11: Kontakt s adhezivem  
RESBOND® 940HT**



**Obrázek 12: Kontakt s adhezivem  
RESBOND™ 989**



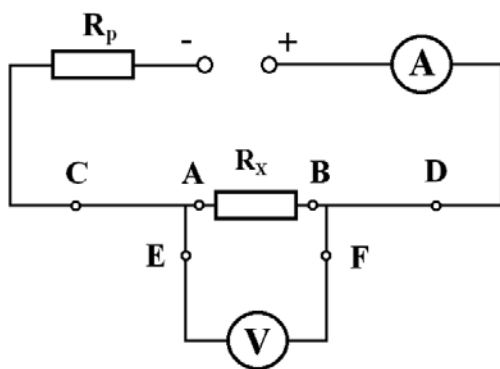
**Obrázek 13: Kontakt s adhezivem RESBOND® 903HP**

## 8 Specifikace testovacích procedur spojů s vysokou tepelnou odolností

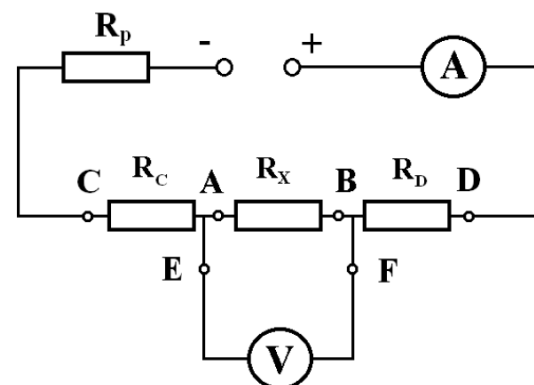
### 8.1 Měření čtyřvodičovou metodou

Pro měření kontaktů je velice vhodná čtyřvodičová metoda měření odporu. Díky této metodě lze měřit malé nebo dokonce velmi malé odpory, kdy nám do měření nezasahuje samotný odpor přívodních kabelů. Toho nelze dosáhnout běžnými dvouvodičovými metodami (přímé metody, substituční, můstkové), tam je hodnota ovlivněna přechodovým odporem, odporem přívodních vodičů a termoelektrickým napětím [54]. V případě velmi malých odporů (menší než  $1 \Omega$ ) mohou systematické chyby dosahovat stejného nebo i vyššího řádu, jako měřená hodnota [54]. Přechodový odpor se vyskytuje u každého rozebíratelného spojení dvou vodičů. Jeho velikost závisí na čistotě a kvalitě opracování styčných ploch, na velikosti tlaku působícího na spojení a dalších faktorech [54]. Abychom tomuto předešli, měřený vzorek do obvodu připojíme pomocí čtyř svorek podle Obrázek 14. Na Obrázek 15 je schéma zapojení doplněno o přechodové odpory  $R_c$  a  $R_d$  na svorkách C a D [54]. Body A a B jsou konci měřeného rezistoru  $R_x$ . Symbol  $R_p$  představuje předřadný ochranný rezistor [54].

Svorky C a D se nazývají proudovými svorkami. Elektrický proud procházející obvodem vytváří na svorkách C a D úbytky napětí  $U_c$  a  $U_d$  [54].



Obrázek 14: Měření čtyřvodičovou metodou [54].



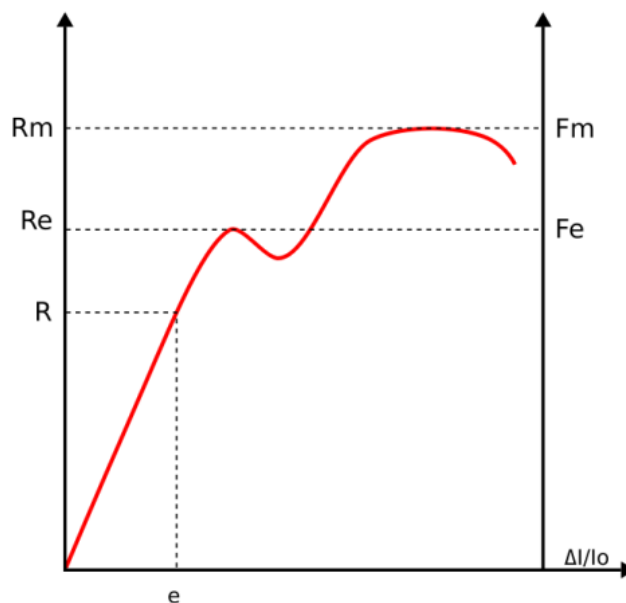
Obrázek 15: Schéma zapojení doplněné o přechodový odpor [54].

Touto metodou jde tedy dobře ověřit vytvořený kontaktní spoj z hlediska jeho vodivosti, tedy čím menší odpor tím lepší spoj.

### 8.2 Mechanická zkouška

Pro ověření, zda je kontakt dostatečně mechanicky odolný, je vhodná mechanická zkouška tahem. Pomocí této zkoušky jsou určovány základní mechanické charakteristiky používané k hodnocení materiálu [55]. Jedná se o statickou zkoušku jejíchž výsledků lze použít při

konstrukčních návrzích apod. [56]. Vzorek se zkouší na trhacím zařízení, dle potřeby, často až do roztržení. Stroj během zkoušení zaznamenává a vyhodnocuje celou řadu veličin a výsledkem je tzv. tahový diagram (příklad Obrázek 16), tedy závislost zatěžovacího napětí na prodloužení vzorku [55]. Vyhodnocujícími veličinami jsou mez pevnosti v tahu ( $R_m$ ), mez kluzu v tahu ( $R_e$ ), tažnost ( $A$ ) a kontrakce ( $Z$ ) [56].



**Obrázek 16: Příklad tahové charakteristiky [57].**

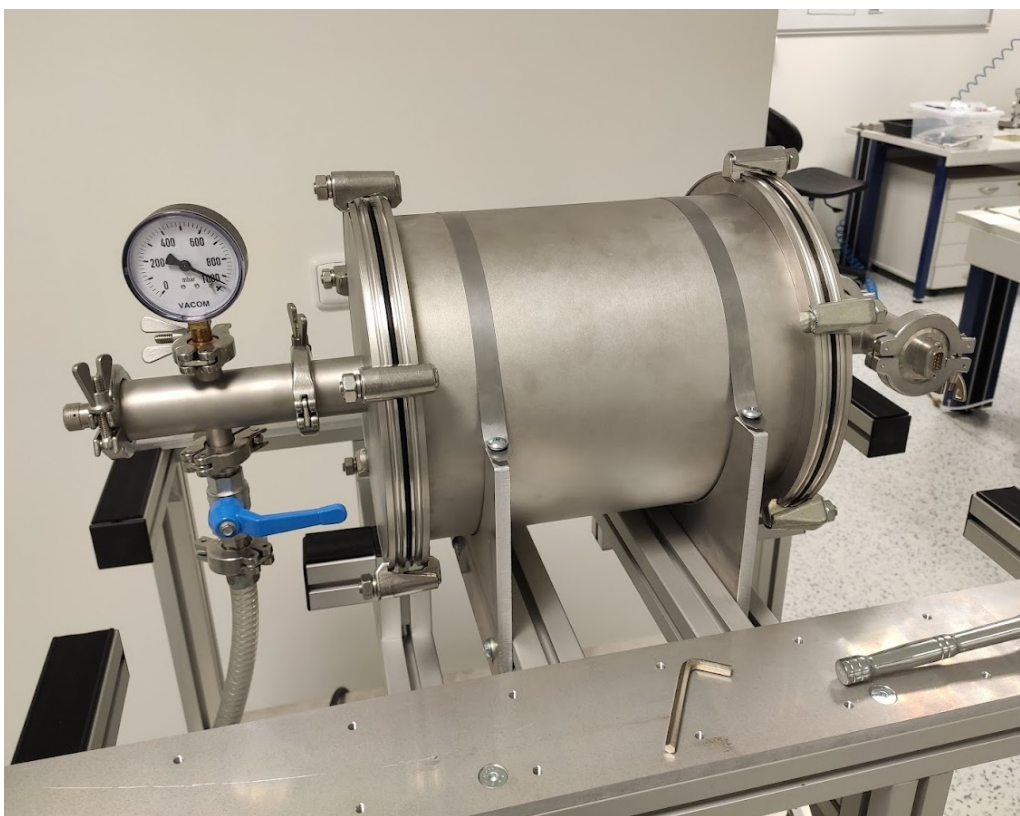
Nás bude během mechanické zkoušky zajímat zejména síla odtrhu kontaktu, tedy síla  $F_m$ . Dále bude nutné se zaměřit hlavně na svařovaný spoj. Je možné, že během zkoušky například nevydrží přírodní drátek nebo vodivá vrstva kontaktu, zatímco spoj bude stále v pořádku.

### **8.3 Testování pomocí teplotních šoků**

Pro skutečné potvrzení teoretických předpokladů bylo zapotřebí zrealizovat i skutečné testy jednotlivých kontaktů. Jedním z těchto testů bylo testování pomocí teplotních šoků a simulovat tak proces zrychleného stárnutí. Pro tento proces bylo vyrobeno sto dvacet kontaktů na mechanické testování a dalších čtyřicet pro elektrické testování. Testování samotné probíhalo tak, že vzorky cyklovaly mezi dvěma teplotními komorami. Jedna komora byla vyhřátá na  $150\text{ }^\circ\text{C}$  a druhá byla naopak vychlazená na  $-55\text{ }^\circ\text{C}$ . V každé komoře vždy vzorek strávil deset minut. Vzorky takto cyklovaly 100, 200, 300, 500 a 1000 cyklů. Při každé dokončené sérii cyklů byla část vzorků odebrána pro mechanické namáhání a část pro měření elektrického odporu. Vzorky, u kterých se měřil elektrický odpor, byly po změření do komory vráceny a pokračovalo se v testování.

#### **8.4 Testování za zvýšených teplot**

Dalším zátěžovým experimentem bylo testování za zvýšených teplot v teplotní komoře. Při tomto typu testování byly jednotlivé keramické desky s kontakty vloženy do teplotní komory (Obrázek 17), ve které bylo vytvořeno vakuum 8 mbar a která byla poté zahřáta na 520 °C. Teplotní náběh na konečnou teplotu 520 °C trval vždy dvě hodiny. Následovalo sto hodin při této teplotě, pak vypnutí komory, postupné ochlazení a odebrání části vzorků pro mechanické a elektrické testy. Vakuum bylo v komoře vytvořeno, aby se zamezilo oxidaci prostředím a vzorky tak neoxidovaly přítomností vzduchu. V této komoře pak bylo otestováno přes sto kontaktních spojů a spoje byly odebírány vždy po sto hodinách, přičemž poslední vzorky byly odebrány po pětistech hodinách.



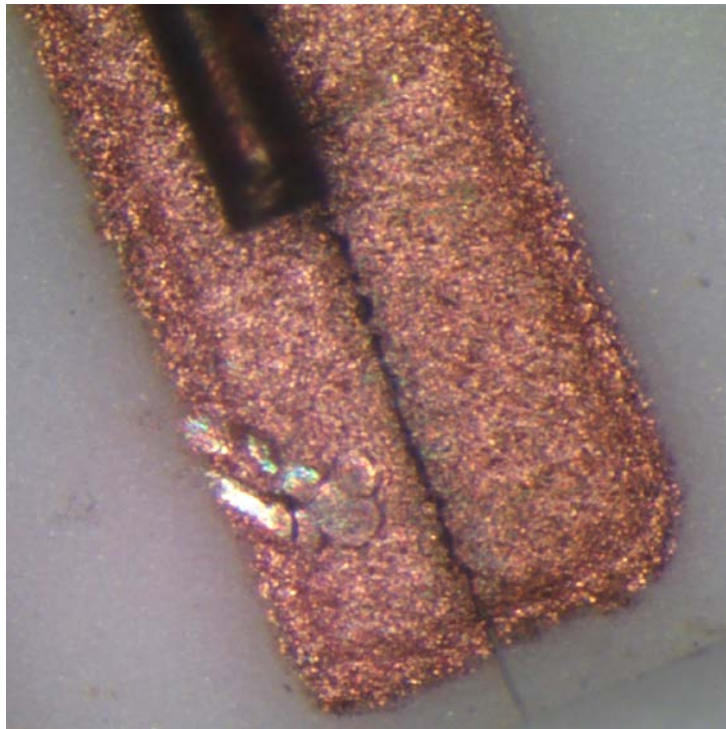
**Obrázek 17: Teplotní komora.**

#### **8.5 Problematika prasklin**

Během testování v teplotní komoře se objevil problém v podobě prasklin keramické desky (viz Obrázek 18). Bohužel se tento jev nepodařilo objevit dříve, protože praskliny vznikaly v objemu keramiky a na povrch prvotně neprostoupily. Vlivem vysoké teploty v teplotní komoře a rozdílné roztažnosti keramiky a mědi praskliny prostoupily až k povrchu desky. Tento jev je velice problematický, protože ve většině případech se nedá odhalit v průběhu svařovacího procesu a během reálného používání v různých aplikacích by pravděpodobně



způsobil nefunkčnost zařízení a mohl by i znečistit případné prostředí čistých komor. Tato problematika byla důvodem, proč se nepodařilo změřit změnu elektrického odporu v celém rozsahu testů teplotní komorou a mám tedy hodnoty pouze do dvou set hodin testování. Poté co se problém podařilo identifikovat jsem provedl několik experimentů na jeho odstranění.



**Obrázek 18: Prasklina keramické desky po 200 cyklech v teplotní komoře**

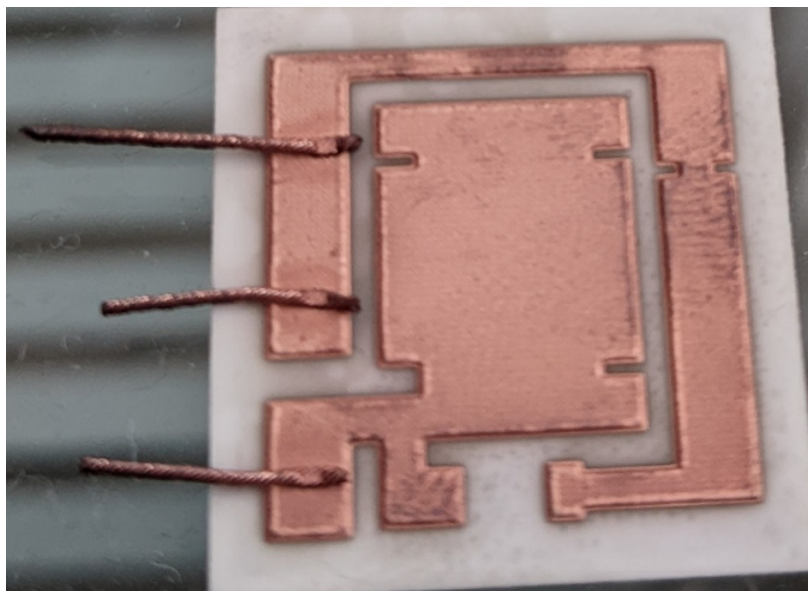
Problematiku jsem viděl zejména ve velkém gradientu teplot během svařování. Pokusil jsem se upravit svařovací průběhy, změnit hodnoty svařovacích veličin, použít jiné podložky pod keramickým substrátem a vyzkoušel jsem jiné topologie vodivých cest na keramice z jiného projektu. Zkoušel jsem přihřev, kdy jsem desky svařoval na elektrické plotně a také jsem vyzkoušel, jak bude deska reagovat v případě ubrání počtu svarů na desku.

V případě změny svařovacích průběhů a veličin jsem nezaznamenal přínosy a desky stále praskaly. Během použití různých podložek, jsem vypořezoval určité změny. Použité byly podložky ze slitiny hliníku, keramiky a kaptonová izolace. Podložky ze slitiny hliníku a keramiky se chovaly celkem podobně a při jejich použití se kontaktovaná deska sice zahřála, ale celkem brzy teplo opět ztratila. Opakem tomu bylo u kaptonové podložky, která teplo velmi zadržela. Nicméně ani jedna z těchto podložek nebyla východiskem a praskliny se stále objevovaly. Co se ukázalo velice přínosné byl přihřev za pomoci elektrické plotny. Zkoušel jsem tři parametry přihřevu a to 50, 100 a 150 °C. Nejúčinnější byla teplota přihřevu 150 °C, při které se praskliny téměř vytratily. Vyšší teplotu jsem kvůli riziku zvýšené

oxidace mědi nemohl aplikovat. Věřím, že v případě, kdy by se svary prováděly v ochranné inertní atmosféře by se dala použít teplota ještě vyšší.

Dalším aspektem, který praskliny odstranil, bylo zvětšení povrchu kontaktu vodivé cesty na keramické desce (viz Obrázek 19). Zde jsem zkoušel kontaktovat jak s přihřevem, tak bez něj a dokonce i více kontaktů na jedné desce a ani v jednom z uvedených případů se praskliny neobjevily. Stálo by tedy za další probádání, jak minimálně velká vodivá plocha je potřeba, aby se praskliny neobjevily. K minimalizaci prasklin došlo i tehdy, když se minimalizoval počet kontaktů na jednu desku. Primárně to nejspíše způsobilo nepropojení prasklin uvnitř desky, ale i to může být přínosem v této problematice.

Z mého hlediska bych doporučil používat všechny tři přístupy, které vznik prasklin minimalizují. Tedy přihřev, větší plochu kontaktu a minimalizovat počet kontaktů na jedné desce.



**Obrázek 19: Zvětšený povrch kontaktu vodivé cesty.**

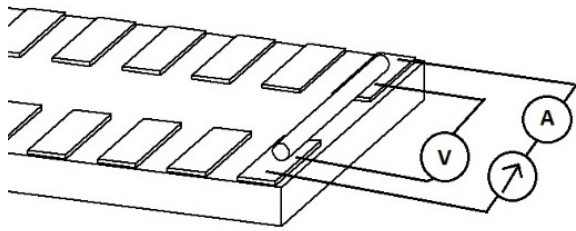
## **8.6 Výsledky testů**

V následujících podkapitolách se zabývám zpracováním dat z jednotlivých testů po zátěžových zkouškách v tepelné a klimatické komoře. Také jsou zde zhodnoceny vizuální poznatky.

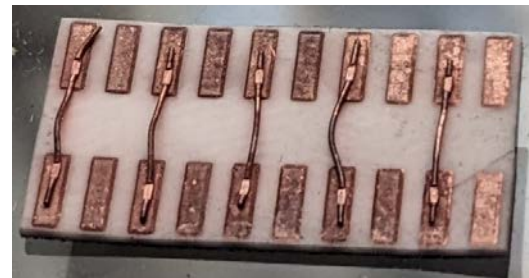
### **8.6.1 Výsledky – elektrický odpor**

Hodnoty elektrického odporu kontaktů, které jsem získával čtyřvodičovou metodou, jsem měřil na multimetru Keithley Model 2700 Multimeter/Switch System. Ten má měřicí rozsah 0 – 120 M $\Omega$  s přesností 7 digitů. Pro každý průměr drátu, či lanka, bylo vytvořeno deset

vzorků kontaktů. Aby bylo možné čtyřvodičovou metodou kontaktní odpory měřit, bylo potřeba vždy propojit dva protilehlé kontakty (viz obrázek 20, 21).



**Obrázek 20: Reálné propojení pro měření odporu s naznačením měřicí sestavy.**



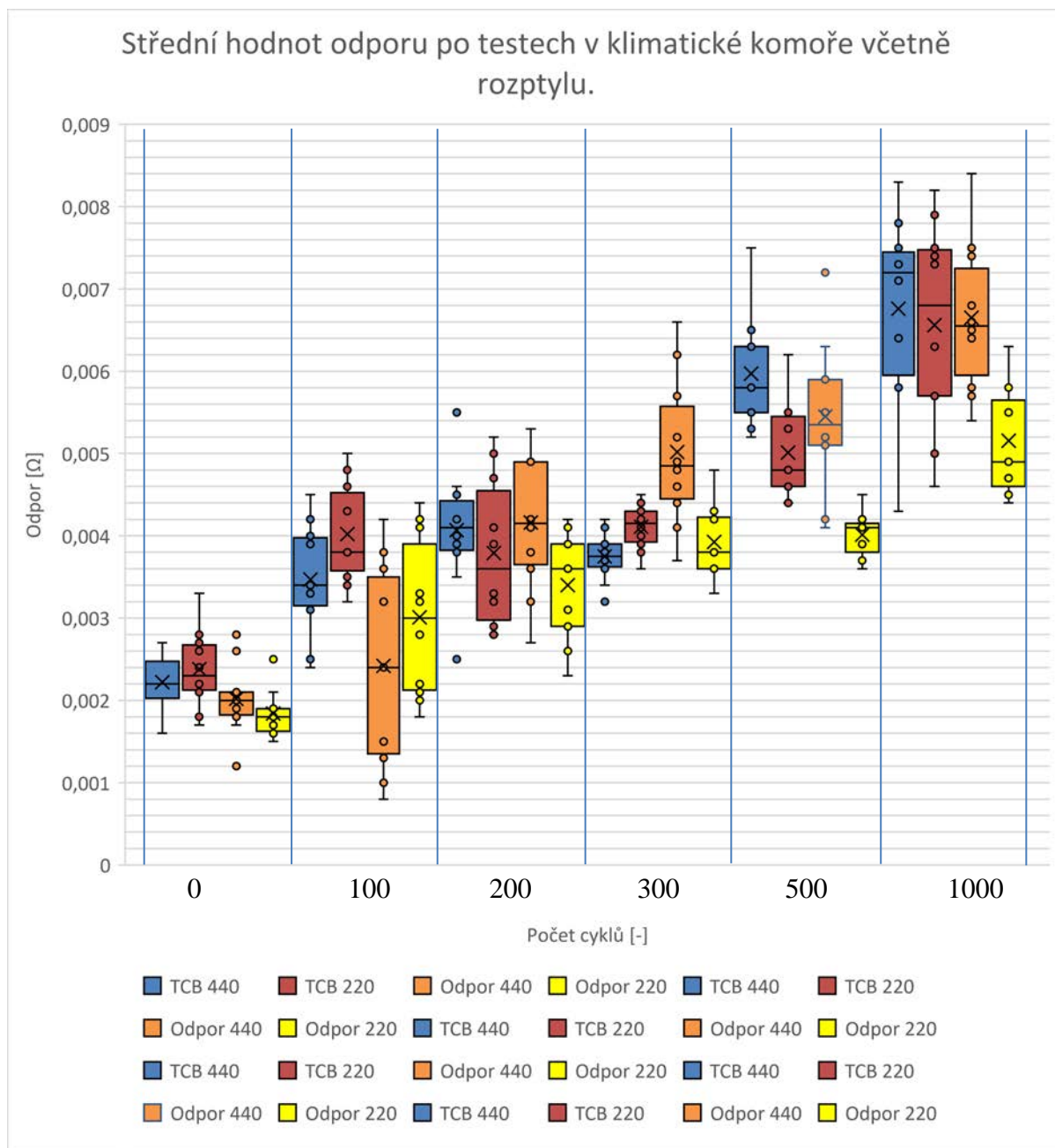
**Obrázek 21: Série navařených spojů pro měření odporu.**

Tento proces byl nezbytný, ale je nutné počítat s tím, že změřené výsledky jsou pak teoreticky dvojnásobné. Dále je zapotřebí vzít v potaz samotný odpor vodičů, který se do výsledků také promítne. Mně tyto odpory vyšly ze vztahu 3, 0,002 ohmu pro vodič o průměru 220  $\mu\text{m}$  a 0,001 ohmu pro 440  $\mu\text{m}$ . Tyto hodnoty se mohou lehce lišit oproti realitě, protože není zcela přesně známá hodnota měrného elektrického odporu použitých vodičů. Tyto hodnoty jsem mohl získat měřením, ale vzhledem k oxidování vodičů během testů by se stejně tato hodnota měnila a byla irelevantní.

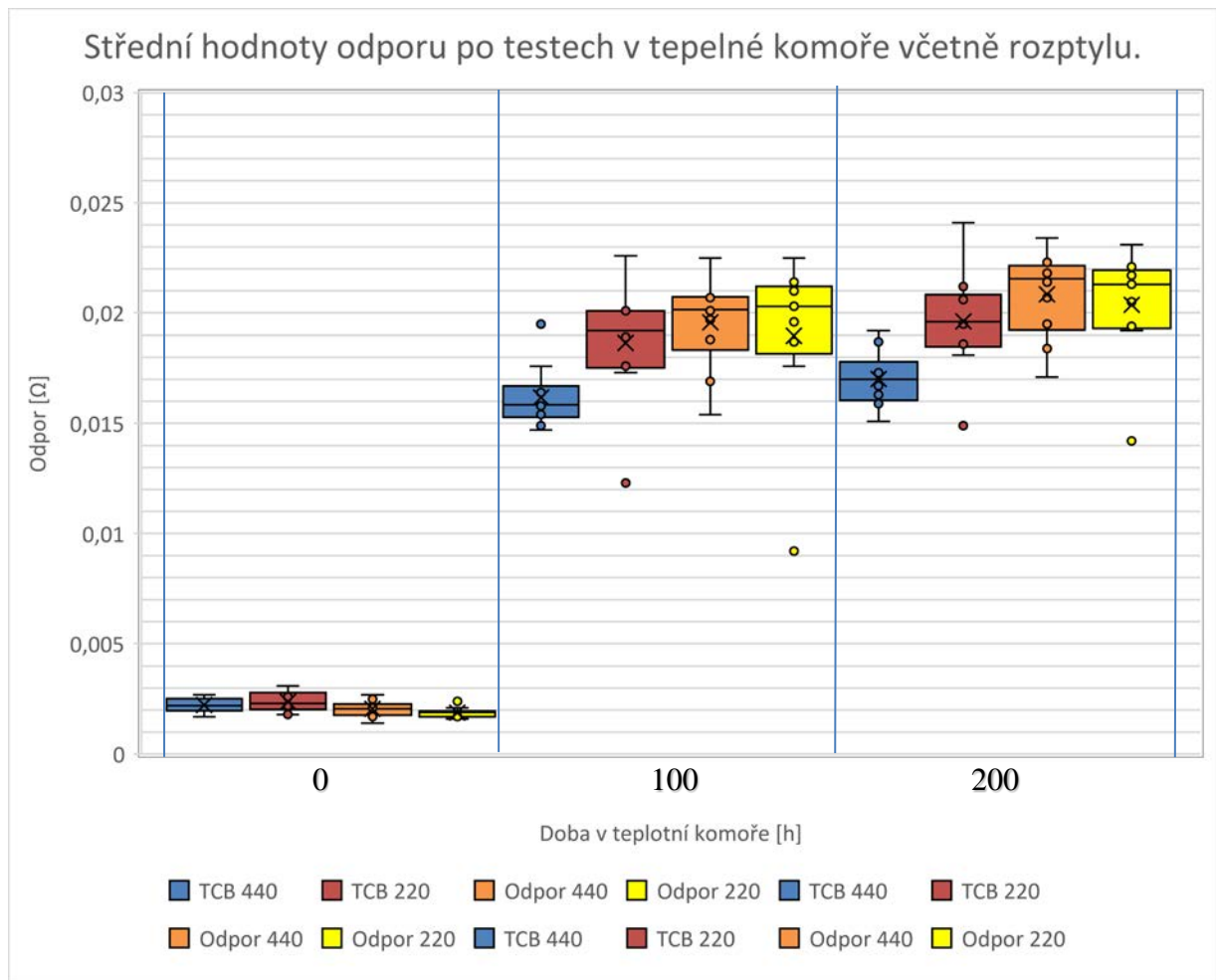
$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [3]$$

Kde: R je elektrický odpor vodiče,  
 $\rho$  je měrný elektrický odpor vodiče (měď 0,018  $\mu\Omega \cdot m$ ),  
l je délka vodiče (7 mm),  
S je plocha průřezu vodiče.

Díky větší koncentraci kontaktů na jednu desku zde také více vznikaly praskliny (více viz Kapitola 8.5). To hlavně odhalila teplotní komora, po jejichž testech některé vzorky nevydržely. Z toho důvodu u vzorků z teplotní komory nemám výsledky ze všech cyklů. Obecně jsou pak výsledky zpracované přehledně do grafů 2, 3 a podrobné výsledky jsou obsaženy v přílohách.



**Graf 2: Střední hodnoty elektrického odporu v jednotlivých cyklech testování klimatickou komorou, včetně rozptylu hodnot.**

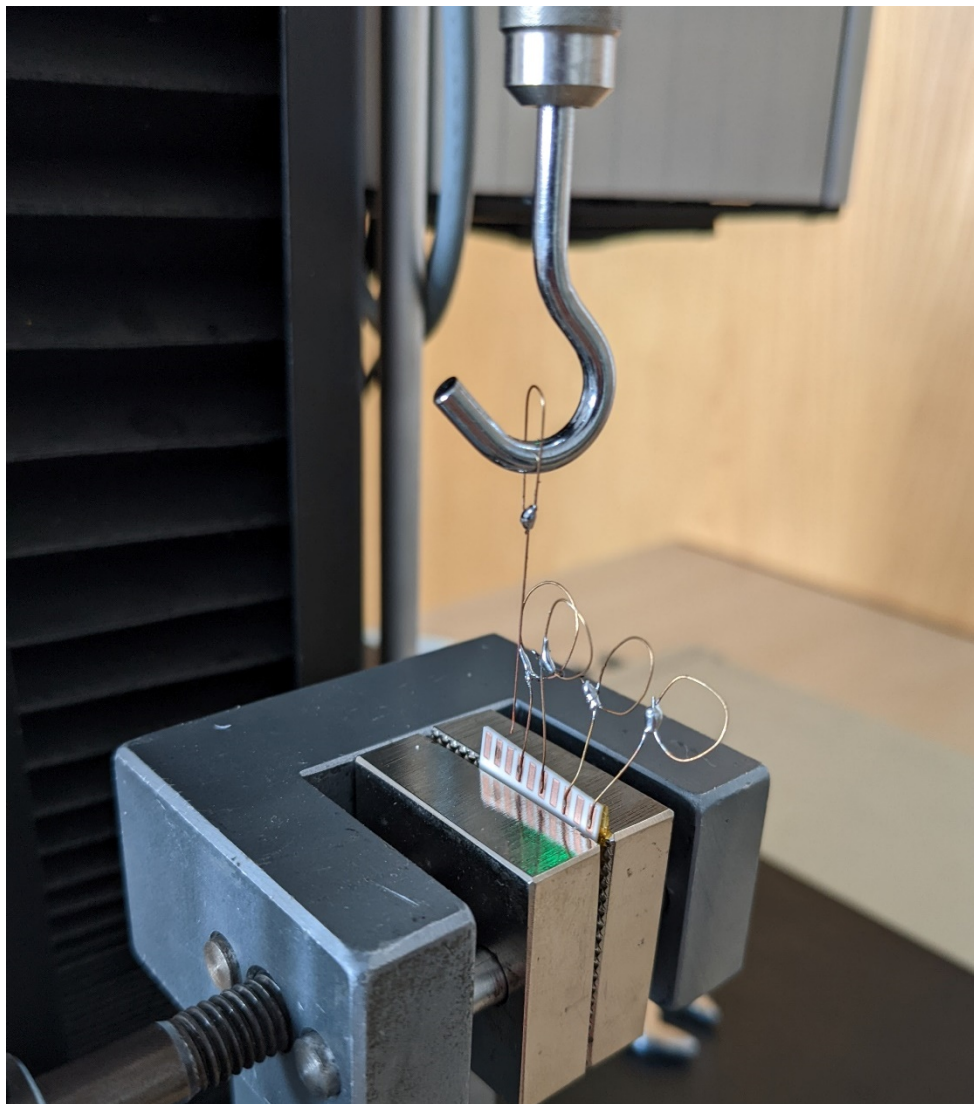


**Graf 3: Střední hodnoty elektrického odporu včetně rozptylu v jednotlivých cyklech testování tepelnou komorou.**

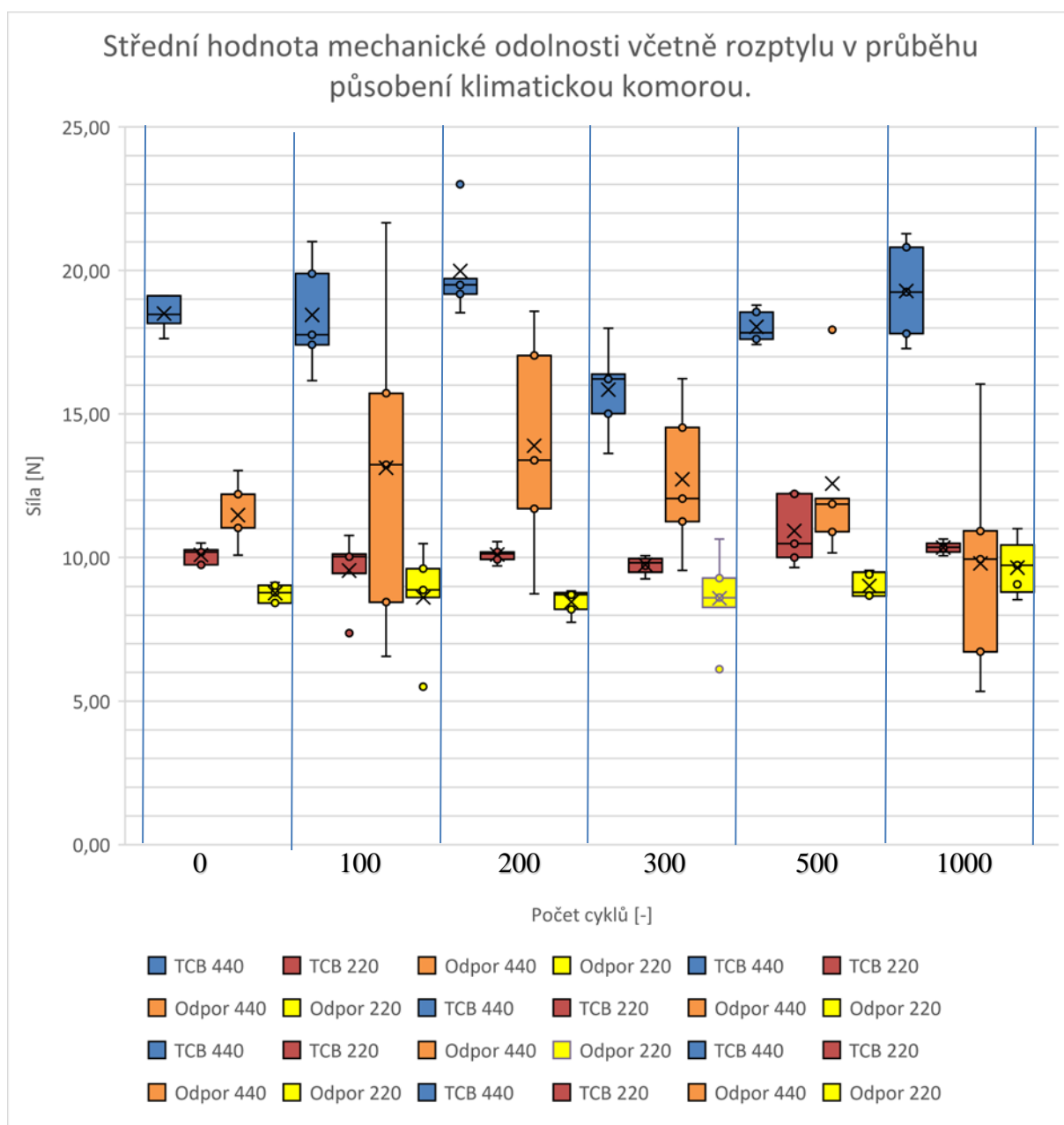
Z grafů je patrné, že jak v klimatické komoře, tak v tepelné se postupem testů elektrický odpor kontaktů zvyšoval. Tento jev byl předpokládán a byl způsobený především oxidací mědi, která obecně zhoršovala vodivost. Zároveň při přikládání měřicích elektrod na kontakty měla oxidační vrstva na měření také vliv. Při bližším pohledu na hodnoty je pak vidět, že před testováním se na velikosti odporu kontaktů podílel značně také odpor samotného vodiče. Hodnoty odporu se pak pohybovaly od 0,002 Ω do 0,008 Ω v závislosti na počtu cyklů v klimatické komoře. Je zde vidět celkem značný rozptyl hodnot zejména pro kontakty vytvořené paralelní odporovou metodou. Vysvětlují si tento jev rozdílnou prooxidovaností vodičů, která vznikala během svarů. Tento rozdíl pak znamenal, že v klimatické komoře se vodiče mezi sebou stabilizovaly po různých počtech cyklů. V teplotní komoře se pak hodnoty pohybovaly od 0,002 Ω do 0,02 Ω. Na tuto hodnotu se hodnoty odporů dostaly hned po prvních sto hodinách testů v teplotní komoře a bylo to způsobeno hlavně celkovou oxidací vodičů a kontaktních ploch, která v teplotní komoře vznikla působením zbytkové atmosféry.

### **8.6.2 Výsledky – mechanická odolnost**

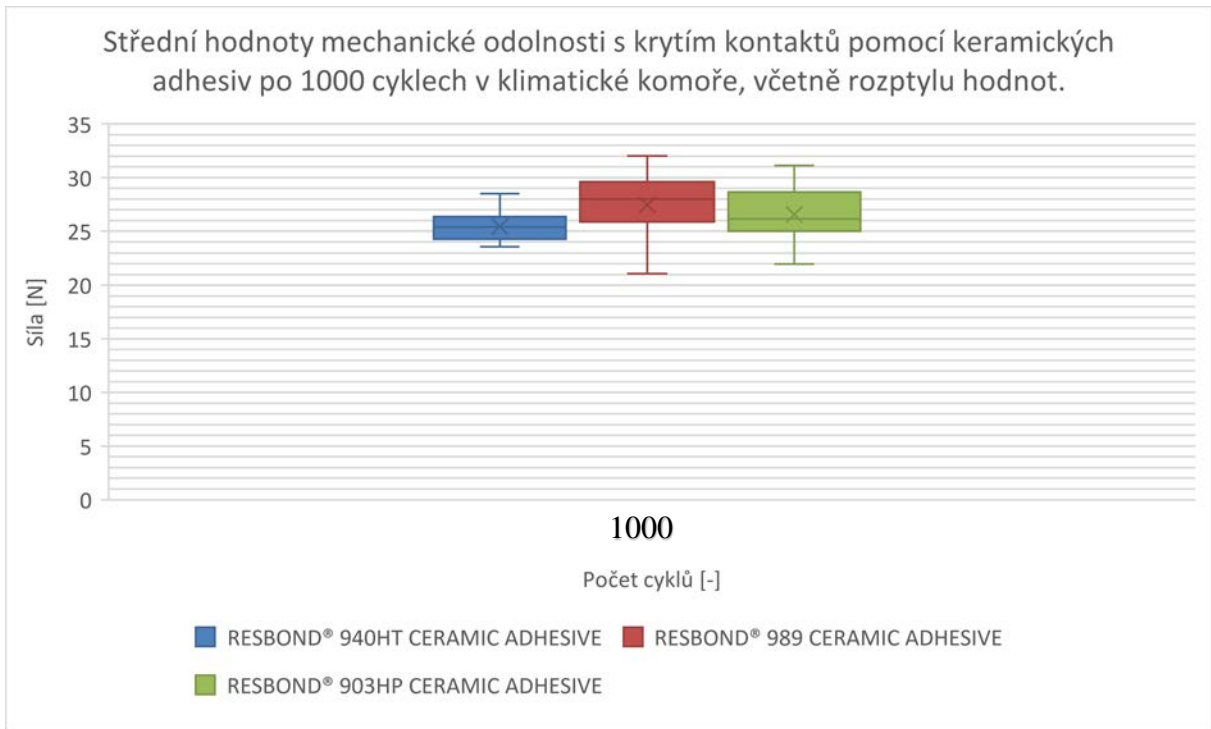
Hodnoty pro mechanickou odolnost vytvořených kontaktů jsem získal z trhacího systému LabTest (Obrázek 22). Pro tyto testy bylo zapotřebí vždy vytvořit smyčku na přikontaktovaném lanku. Já jsem tuto smyčku vytvářel pájením, což se ukázalo velmi vhodné, protože smyčka pak byla dostatečně pevná na trhací testy. Výsledky z těchto testů jsou opět zpracovány graficky (Graf 4 - 6) a jejich podrobné hodnoty jsou uvedeny v přílohách.



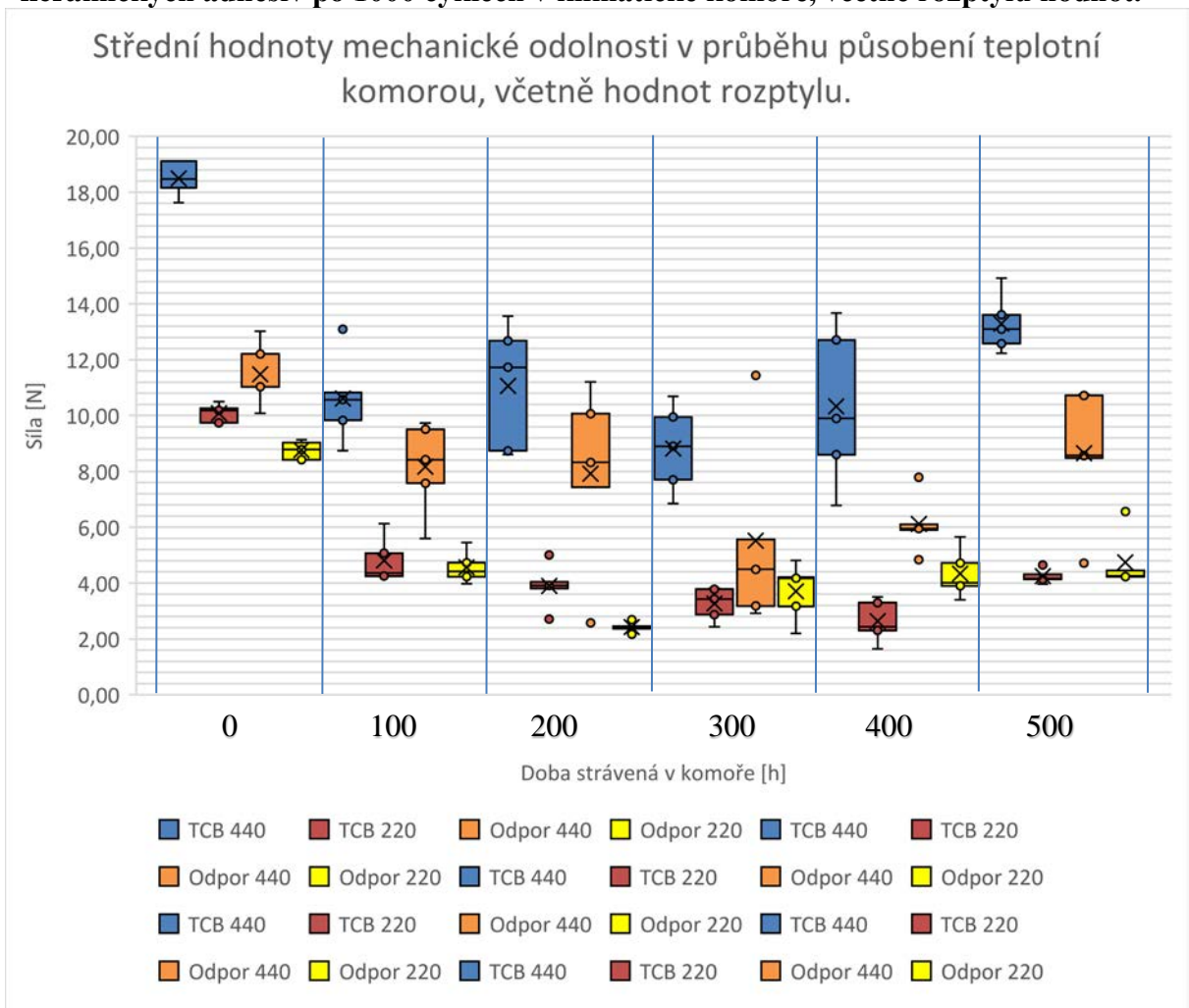
**Obrázek 22: Vzorok při trhací zkoušce.**



**Graf 4: Střední hodnota mechanické odolnosti včetně rozptylu v průběhu působení klimatickou komorou**



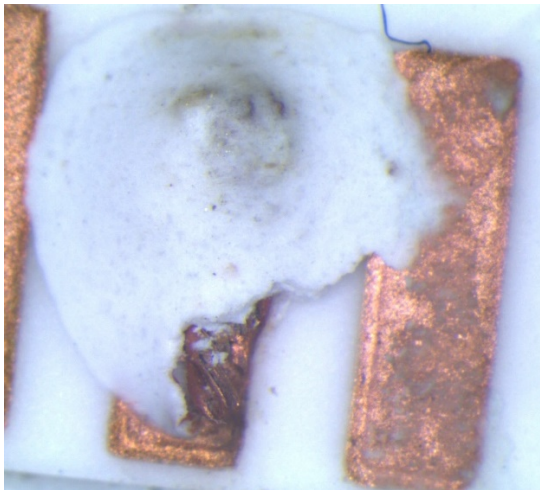
**Graf 5: Střední hodnoty mechanické odolnosti s krytím kontaktů pomocí keramických adheziv po 1000 cyklech v klimatické komoře, včetně rozptylu hodnot.**



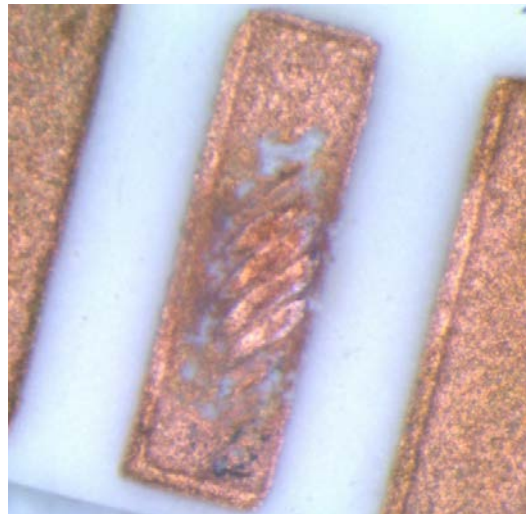
**Graf 6: Střední hodnoty mechanické odolnosti v průběhu působení teplotní komorou.**



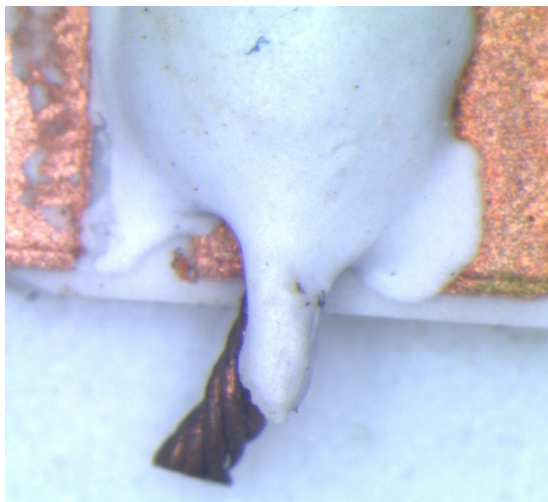
Z grafu 4 je patrné, že se v průběhu testů pomocí klimatické komory mechanická odolnost vůbec nezhoršila a je přibližně stejná jako před testem. Tento poznatek je velmi pozitivní, protože potvrzuje kvalitu vytvořených spojů. Pouze pro spoje vytvořené paralelní odporovou metodou tento poznatek tolik neplatí vzhledem k velkému rozptylu hodnot. Tento rozptyl nám dokazuje pouze poznatek, že paralelní odporové svařování není vzhledem k mechanické odolnosti úplně vhodné pro větší průměry vodičů. Z grafu 5 pak plyne ještě pozitivnější poznatek a to ten, že se dá mechanická odolnost vylepšit použitím keramických adheziv, která jsem testoval na lanku 440  $\mu\text{m}$  vytvořených metodou TCB. Toto vylepšení je s ohledem na adhezivum 5 – 7 N. Dále toto krytí chrání kontakt před okolním prostředím. Bohužel jsem test adheziv nemohl provést i v tepelné komoře kvůli její kapacitě a časové náročnosti, ale podle informací výrobce si myslím, že by i zde obstály. U adheziv RESBOND® 940HT a RESBOND™ 989 docházelo jak k přetržení lanka, tak k odtrhu z kontaktní plochy společně s adhezivem. Tohle neplatilo u adheziva RESBOND® 903HP, kde se lanka trhala pouze z kontaktní plochy společně s odtrhem adheziva. Tak či tak mají spoje s adhezivy skoro stejné mechanické odolnosti, které se pohybují mezi 25 – 30 N. Detaily odtrhů jsou pak na obrázcích 23 – 27.



**Obrázek 23: Přetržení lanka krytého adhezivem RESBOND® 940HT.**



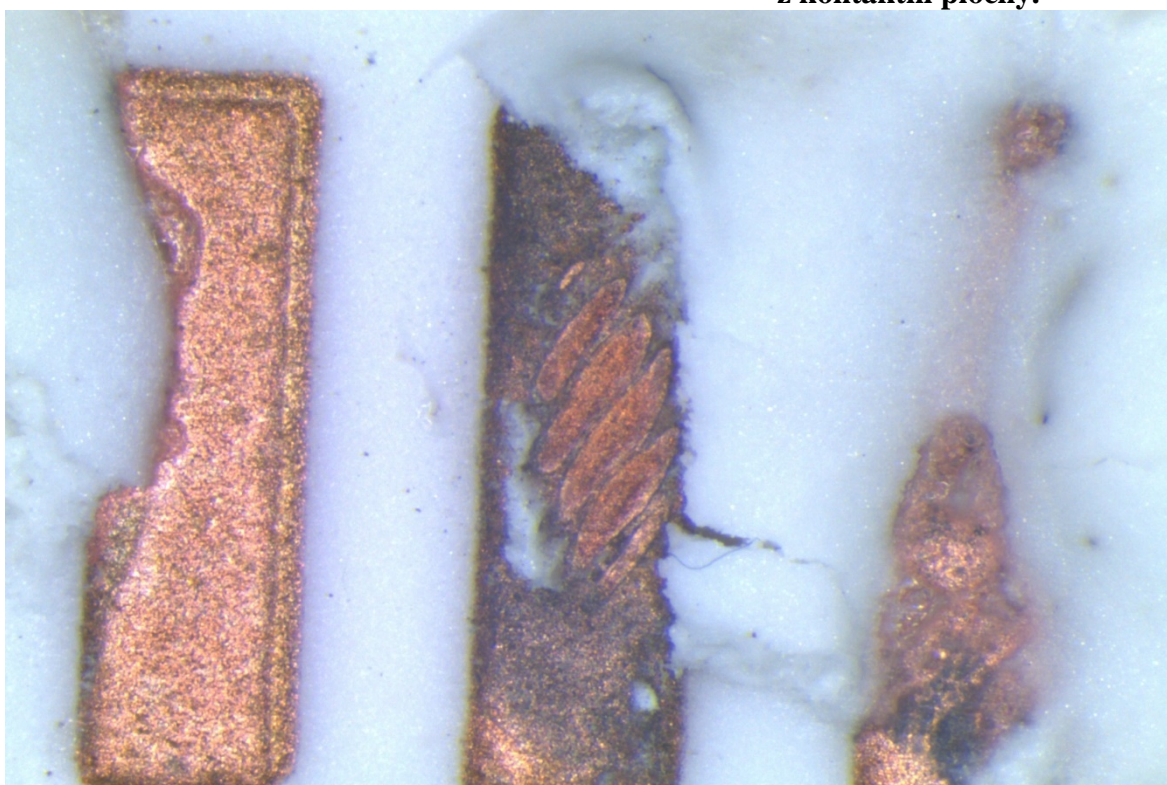
**Obrázek 24: Odtrh lanka krytého adhezivem RESBOND® 940HT z kontaktní plochy.**



**Obrázek 25: Přetržení lanka krytého adhezivem RESBOND™ 989.**



**Obrázek 26: Odtrh lanka krytého adhezivem RESBOND™ 989 z kontaktní plochy.**



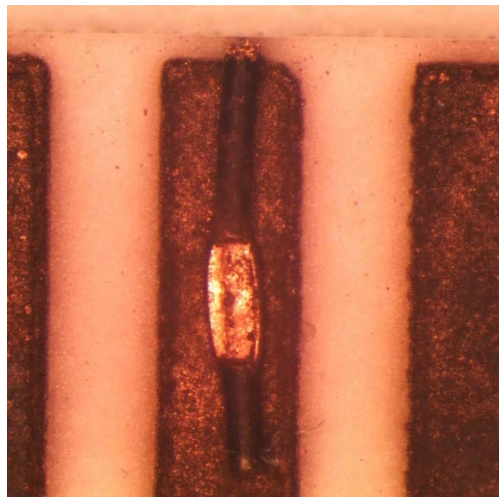
**Obrázek 27: Odtrh lanka krytého adhezivem RESBOND® 903HP z kontaktní plochy.**

V grafu 6 je vidět, že se mechanická odolnost kontaktů po testech v teplotní komoře výrazně zhoršila. Bohužel je tato skutečnost způsobená prooxidováním vodičů vlivem velké teploty. Ve většině případech totiž nejde o mez napětí kontaktu nýbrž vodiče. Právě vodič se totiž při trhacích zkouškách nejčastěji přetrhl (Obrázek 28, 29). Tento jev je způsoben prooxidovaností vodiče vlivem působení zbytkové atmosféry v teplotní komoře během testů. Vyplývá z toho jasné doporučení, že by se kontakty měly vytvářet v inertní atmosféře pro

omezení oxidace během sváření a následně je i testovat v inertní atmosféře, aby se tomuto jevu zamezilo. Na druhou stranu z těchto testů víme, který jev může nastat a jaké má následky. Obecně jsou pak tedy tyto výsledky lehce zkreslené, protože spíše ukazují odolnost zoxidovaného vodiče než samotného zkoumaného kontaktu. Dá se tedy předpokládat, že odolnost kontaktu je v řádu desetin až jednotek newtonů lepší.



**Obrázek 28: Přetržené lanko 440  $\mu\text{m}$   
po mechanické zkoušce a testech  
v teplotní komoře.**

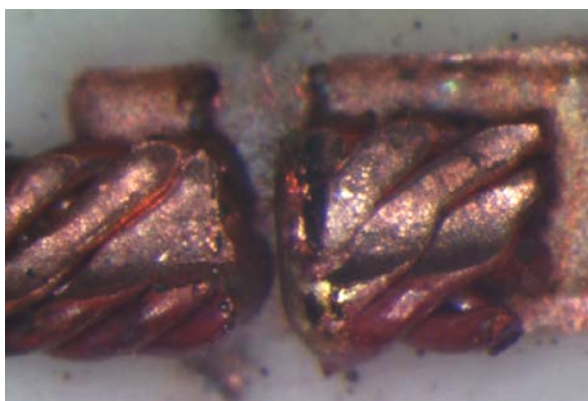


**Obrázek 29: Přetržený vodič 220  $\mu\text{m}$   
po mechanické zkoušce a testech  
v teplotní komoře.**

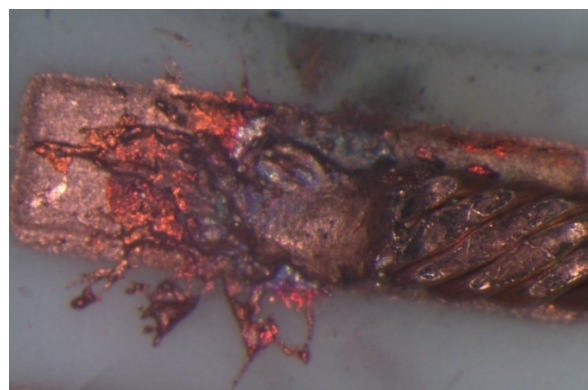
## **9 Charakterizace realizovaných spojů s vysokou tepelnou odolností**

V kapitole charakterizace realizovaných spojů s vysokou tepelnou odolností se snažím vyhodnotit poznatky, které se nedají úplně kvantifikovat. Obecně se zde pokusím spoje ohodnotit na základě podkladů, které jsem doposud získal.

Pro realizaci spojů jsem zvolil technologii svařování pomocí elektrického proudu. Tato metoda se ukázala jako vhodná, řekl bych že i velice dostupná a levnější než jiné přípustné metody. Jak mechanická odolnost, tak elektrická vodivost kontaktů jsou velmi dobré. Režim svařování TCB se ukázal mnohem lepší než odporový režim, protože u něj lze jemněji ladit parametry. V případě odporového režimu navíc velmi závisí na vzdálenosti elektrod a průměru vodiče což je často problematické. Tyto parametry pak omezují velikost proudu, kterým lze při sváření kontaktovat. Při odporové metodě dále většina proudu protékala spíše samotným vodičem než vodivou plochou, kterou bylo potřeba kontaktovat. Tento jev způsoboval, že měděné lanko proudový ráz nevydrželo a přepálilo se. Zároveň při této metodě docházelo častěji k přeskokům výboje mezi elektrodami, což velmi degradovalo lanka i keramickou desku. Tyto poznatky jsou lépe vidět na obrázku 30, 31.

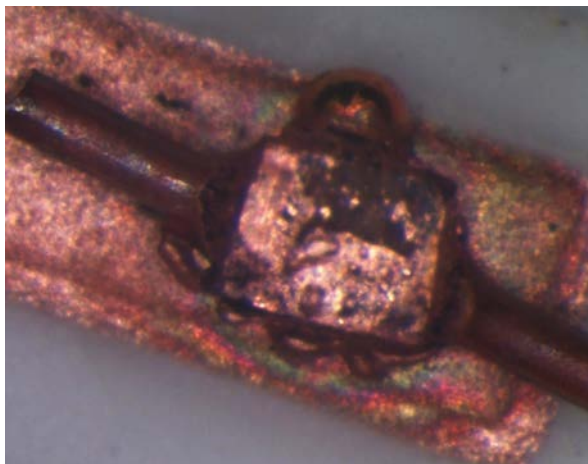


**Obrázek 30: Špatný svar vlivem přeskoků výboje pro lanko 440  $\mu\text{m}$ .**



**Obrázek 31: Rozstřík lanka 440  $\mu\text{m}$  vlivem výboje a kontaminace okolí.**

V případě metody TCB, bylo potřeba nejvíce hlídat parametry napětí, respektive proudu, aby nedošlo k poškození elektrody, dále pak hodnoty přítláčné síly. Velikost těchto parametrů přímo ovlivňovala vznik krčků lanka u místa svaru a snižovala tak mechanickou odolnost. Jeden z těchto příliš velkých krčků je vidět na obrázku 32. Další problematikou bylo svary správně umístit na celý kontakt. Vzhledem k rozměrům lanek či drátků a velikosti vodivé vrstvy na keramické desce s tím byla trochu obtíž (Obrázek 33).

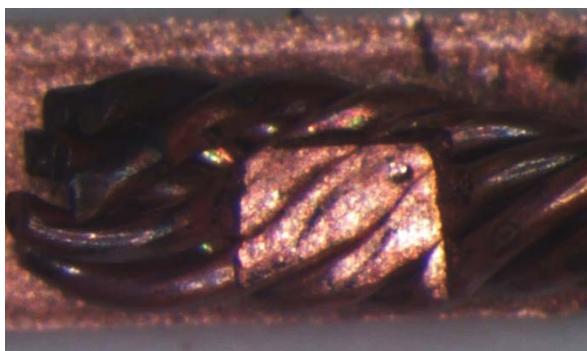


**Obrázek 32: Velká teplota a přítlak, při metodě TCB, drátek 220 μm.**

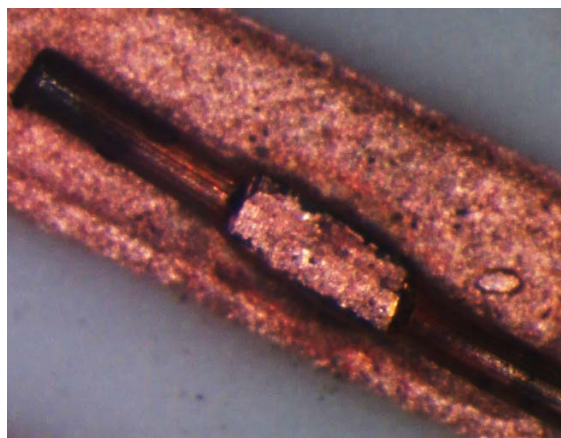


**Obrázek 33: Špatně navařený drátek 220 μm.**

Celkově si ale myslím, že po zajištění toho, aby k těmto jevům nedocházelo šlo vytvářet dobré svary, a to i ve velké produkci, jak jsem dokázal (Obrázek 39). Příklady kvalitních svarů jsou pak vidět na obrázcích 34 – 37.



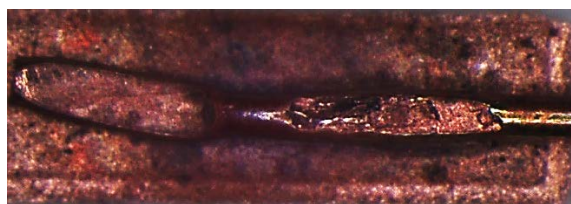
**Obrázek 34: Správný kontakt 440 μm metodou TCB.**



**Obrázek 36: Správný kontakt 220 μm metodou TCB**

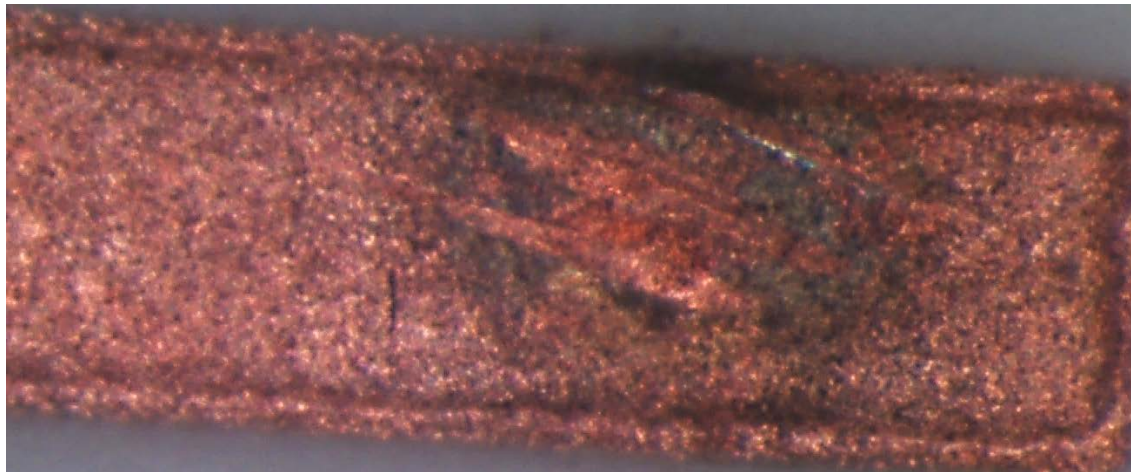


**Obrázek 35: Správný kontakt 440 μm odporovou metodou.**

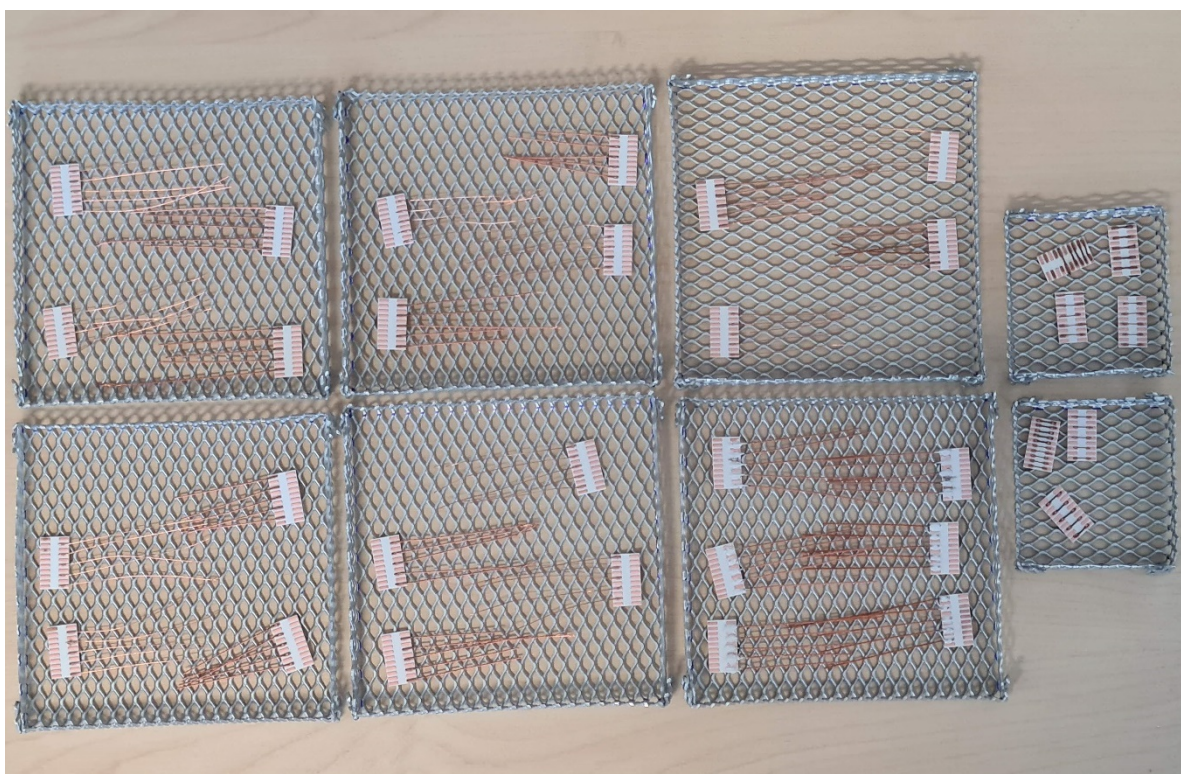


**Obrázek 37: Správný kontakt 220 μm odporovou metodou**

Dalším důkazem dobrého svaru byla i strukturální stopa po odtrhu, která je vidět na obrázku 38. Největší riziko, které tedy vodiče a kontakty degraduje je oxidace. To nejvíce ukázala teplotní komora a další výzkum by se tedy měl zabírat jejím zamezení či úplnému odstranění.



**Obrázek 38: Strukturální změna kontaktní plochy po odtrhu lanka.**



**Obrázek 39: Vzorčky pro klimatickou komoru.**

## **Závěr**

Podstatou této diplomové práce bylo najít způsob, jakým spolehlivě a kvalitně kontaktovat keramické substráty s měděnými vodivými motivy pro vysokoteplotní aplikace a následně vytvořit a otestovat reálné spoje z hlediska jejich dlouhodobé stability. Během rešerše kontaktovacích způsobů jsem zúžil výběr na ty nejdostupnější a z mého hlediska i nejreálnější metody kontaktování, které se v praxi používají. Těmi byly odporové svařovací metody v režimu TCB nebo režimu odporového paralelního svařování. S oběma režimy jsem se musel nejprve naučit zacházet a bylo zapotřebí najít optimální nastavení pro vytvoření kvalitních svarů. Parametry jsem hledal pro lanko složené ze sedmi měděných vodičů o průměru 440  $\mu\text{m}$  a pro měděný vodič průměru 220  $\mu\text{m}$ .

Po nalezení optimálních parametrů jsem vytvořil sérii vzorků pro různé zátěžové testování. Sledovanými parametry byl zejména elektrický odpor kontaktů a jejich mechanická odolnost. Vzorky jsem testoval v klimatické a teplotní komoře. Tyto testy měly především ukázat ovlivnění vzorků zátěží reálné aplikace a také simulovaly proces stárnutí.

Výsledky a vizuální zhodnocení po těchto testech jsou podrobně popsány v kapitolách 8, 9. Jsou zpracovány jak tabulkově, tak i graficky. Obecně lze ale tyto výsledky shrnout do několika poznatků. Základní, který musím zmínit je, že svařovací režim TCB se dá mnohem jemněji nastavovat na požadavky svarů než režim paralelního odporového svařování. Celkově pak tyto svary disponovaly lepší mechanickou odolností při podobném odporu v porovnání se spoji paralelně odporově svařenými. Největší problém, který spoje degraduje, vidím v oxidaci. Ta má za následek křehnutí samotných vodičů, které mají pak menší mechanickou odolnost než samotné kontakty a také značně roste elektrický odpor těchto spojů. Co se týče dlouhodobých testů, pak proces zrychleného stárnutí ukázal, že spoje jsou kvalitní a stále i po tisíci cyklech. Teplotní komora pak jen potvrdila problematiku oxidace, která zde vznikla zbytkovou přítomností kyslíku. Vysoká teplota pak jen umocnila proces oxidace a vodiče zkřehly natolik, že byly méně odolné než samotné kontakty.

Velice přínosné se ukázalo krytí kontaktů keramickými adhezivy. Tyto spoje se jevily především mechanicky odolnější. Disponovaly větší odolností vůči trhání a věřím, že díky krytí jsou tyto spoje i odolnější vůči oxidaci.

Další problematikou, se kterou jsem se setkal, byl vznik prasklin při procesu svařování. Tento jev byl způsoben příliš velkým gradientem teploty působícím na malou část vzorku a rozdílnou teplotní roztažností vodivé cesty a keramického substrátu. Sérií pokusů jsem našel způsoby, jak toto riziko omezit nebo dokonce odstranit. Nejvíce pomohl předehřev substrátu

pomocí elektrické plotýnky během procesu svařování. Dále se ukázalo jako účinné zvětšení kontaktní plochy na substrátu a v poslední řadě praskliny omezilo zmenšení počtu spojů na jedné keramické desce.

Na úplný závěr mohu říct, že je možné vcelku ekonomicky vytvářet kvalitní kontakty pro vysokoteplotní aplikace s dobrou mechanickou odolností dosahující v extréměch až 30 N a nízkým kontaktním odporem dosahující hodnot maximálně do 0,025  $\Omega$ . Práce by mohla pokračovat studií jak účinně zamezit oxidaci, či jaké minimální rozměry kontaktů jsou potřeba, aby nedocházelo ke vzniku prasklin.



## **Seznam použité literatury a zdrojů**

- [1] R. T. Sataloff, M. M. Johns, and K. M. Kost, “Technologie pro výrobu desek plošných spojů,” ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, 2018.
- [2] M. Mynářčík, “Konstrukce zařízení pro recyklaci PC desek,” Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009.
- [3] “Teplotní roztažnost – Wikipedie.” [https://cs.wikipedia.org/wiki/Teplotní\\_roztažnost](https://cs.wikipedia.org/wiki/Teplotní_roztažnost) (accessed Mar. 25, 2021).
- [4] P. Kohoutová, “Substráty pro výkonové elektronické aplikace,” 2013. Accessed: Mar. 25, 2021. [Online]. Available: [https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/8264/1/BP\\_Kohoutova\\_Petra.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/8264/1/BP_Kohoutova_Petra.pdf).
- [5] R. T. Sataloff, M. M. Johns, and K. M. Kost, “Termické chování polymer.” [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-978-80-7080-662-3/pdf/049.pdf](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-978-80-7080-662-3/pdf/049.pdf) (accessed Mar. 26, 2021).
- [6] “Elektrické vlastnosti polymerů.” <https://publi.cz/books/180/14.html> (accessed Mar. 26, 2021).
- [7] “Dielektrikum – Wikipedie.” <https://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum> (accessed Mar. 26, 2021).
- [8] “Relativní permitivita – Wikipedie.” [https://cs.wikipedia.org/wiki/Relativní\\_permitivita](https://cs.wikipedia.org/wiki/Relativní_permitivita) (accessed Mar. 26, 2021).
- [9] “Izolanty a dielektrika.” <https://publi.cz/books/353/06.html> (accessed Mar. 26, 2021).
- [10] “Elektrická pevnost — ElektriKa.cz, reportážní portál instalační elektrotechniky, vyhlášky, schémata zapojení.” <https://elektrika.cz/terminolog/eterminolog2definition.2006-04-22.5895106704> (accessed Mar. 26, 2021).
- [11] P. Myška, “Tlustovrstvé struktury připravené z polymerních sítotiskových past,” ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ, 2017.
- [12] “Silicon Nitride (Si3N4) substrates - CERcuits - Online ceramic PCB & substrates.” <https://ceramic-pcb.com/product/silicon-nitride-si3n4-substrates/> (accessed Apr. 16, 2021).
- [13] “KERAMICKÉ A KOMPOZITNÍ MATERIÁLY.” Accessed: May 02, 2021. [Online]. Available: <https://dSPACE.tul.cz/bitstream/handle/15240/49431/%5B49%5D.pdf?sequence=22&isAllowed=y>.

- [14] “Polovodivé materiály.” <https://publi.cz/books/353/05.html> (accessed May 02, 2021).
- [15] “Fracture toughness of alumina and ZTA ceramics: microstructural coarsening effects,” 2003. Accessed: Apr. 16, 2021. [Online]. Available: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0924013603003960?token=1A69005C87139C0AB057455CD70A0BA43300CB599B50F22796773F70F4749C1ED1C608642B171B3741EFBD919C058D6E&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210416124754>.
- [16] D. Práce, “SYNTÉZA A SLINOVÁNÍ KERAMIKY NA BÁZI ZRO<sub>2</sub> PRO BIOMEDICÍNSKÉ APLIKACE,” VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2017.
- [17] “Tenké vrstvy-aplikace-metody přípravy-hodnocení vlastností.” Accessed: Apr. 08, 2021. [Online]. Available: [https://www.opi.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf).
- [18] P. Kourek, “Vrstvové technologie v elektronice,” ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ, Praha, 2018.
- [19] I. Š. Potocký, “Substráty pro výkonovou elektroniku realizované technologií tlustých vrstev,” 2006. Accessed: Apr. 09, 2021. [Online]. Available: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/42223/1/DISERTACE\\_Hlina\\_finalni\\_verze.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/42223/1/DISERTACE_Hlina_finalni_verze.pdf).
- [20] “Tlusté vrstvy a tlustovrstvé technologie.” [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/1626/mod\\_resource/content/1/Tluste\\_vrstvy.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/1626/mod_resource/content/1/Tluste_vrstvy.pdf) (accessed Apr. 09, 2021).
- [21] J. Kaltmeyer, “Technologie pro výrobu desek plošných spojů,” 2018.
- [22] K. Hromadka, J. Stulik, J. Reboun, and A. Hamacek, “DBC technology for low cost power electronic substrate manufacturing,” in *Procedia Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 1180–1183, doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.107.
- [23] “Využijme vlastností desek plošných spojů na maximum!” <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:7778/vyuzijme-vlastnosti-desek-plosnych-spoju-na-maximum-> (accessed Apr. 16, 2021).
- [24] J. Kosinka, “BODOVÉ ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ,” VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2016.
- [25] S. Fukumoto, Y. Zhou, and W. Tan, “Resistance microwelding,” *Microjoining and Nanojoining*, pp. 473–499, 2008, doi: 10.1533/9781845694043.2.473.
- [26] “Svařovací hlava.” <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSFJnJNnPXbiJr8b3nbP2CbRLhLqypq6EXyZw&usqp=CAU> (accessed Dec. 12, 2021).

- [27] “Co je metoda TIG? Základní seznámení | SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ.”  
<https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>  
(accessed Apr. 16, 2021).
- [28] “Co je metoda TIG? Základní seznámení | SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ.”  
<https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>  
(accessed May 22, 2022).
- [29] “Laserové svařování – Wikipedie.” [https://cs.wikipedia.org/wiki/Laserové\\_svařování](https://cs.wikipedia.org/wiki/Laserové_svařování)  
(accessed Oct. 13, 2021).
- [30] “Sunstone Welders - Micro Welding Science.”  
<https://sunstonewelders.com/resources/the-science-of-micro-welding/> (accessed Oct. 17, 2021).
- [31] “Laserové svařování - LaserTherm.”  
<https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu> (accessed Oct. 13, 2021).
- [32] “Laserové svařování - LaserTherm.”  
<https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu> (accessed May 22, 2022).
- [33] “DUKANE IAS // Ultrazvukové svařování plastů // Svařování plastů ultrazvukem.”  
<http://www.dukane.eu/cz/ultrazvukove-svarovani-plastu> (accessed Oct. 17, 2021).
- [34] “Svařování ultrazvukem.”  
[https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_svarovani\\_ultrazvukem\\_mrna.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_ultrazvukem_mrna.pdf) (accessed Oct. 17, 2021).
- [35] “ULTRASONIC METAL WELDING FOR LITHIUM-ION BATTERY CELLS,”  
2021. <https://buffalomanufacturingworks.com/ultrasonic-metal-welding-for-lithium-ion-battery-cells/> (accessed Oct. 18, 2021).
- [36] “Kabely a vodiče.” <https://publi.cz/books/353/08.html> (accessed Oct. 18, 2021).
- [37] “Kabely a vodiče.” <https://publi.cz/books/353/08.html> (accessed Nov. 12, 2021).
- [38] “Elektricky vodivé materiály.” <https://publi.cz/books/353/04.html#14> (accessed Nov. 12, 2021).
- [39] “Nikl – Wikipedie.” <https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl> (accessed Dec. 13, 2021).
- [40] “Elektricky vodivé materiály.” <https://publi.cz/books/353/04.html> (accessed Dec. 13, 2021).
- [41] “Kaptonová páska | GES-ELECTRONICS.” <https://www.ges.cz/cz/pajeni-plosne-spoje/kaptonova-paska/SLT.html> (accessed Oct. 29, 2021).

- [42] “Kapton.” <https://cs.wikiube.net/wiki/Kapton> (accessed Oct. 29, 2021).
- [43] “Polytetrafluorethylen – Wikipedie.” <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluorethylen> (accessed Oct. 29, 2021).
- [44] “Tribon - PTFE | Polytetrafluorethylen | Teflon | Technický plast.” <https://www.technicke-plasty-tribon.cz/prodej-plastu/materialy-polotovaru/ptfe> (accessed Oct. 29, 2021).
- [45] R. Štegbauer, “ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE DIPLOMOVÁ PRÁCE Silikony v elektrotechnice vedoucí práce: Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc. 2013 autor: Bc. Radek Štegbauer,” ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, 2013.
- [46] “Skleněná textilní vlákna – Wikipedie.” [https://cs.wikipedia.org/wiki/Skleněná\\_textilní\\_vlákna](https://cs.wikipedia.org/wiki/Skleněná_textilní_vlákna) (accessed Nov. 08, 2021).
- [47] “Tepelná vodivost – Wikipedie.” [https://cs.wikipedia.org/wiki/Tepelná\\_vodivost](https://cs.wikipedia.org/wiki/Tepelná_vodivost) (accessed Dec. 13, 2021).
- [48] “E-glass vlákno: špičková kvalita HENNLICH.” <https://tesneni.hennlich.cz/produkty/ostatni-sortiment-termoizolacni-tesneni-2710/e-glass-vlakno.html> (accessed Dec. 13, 2021).
- [49] “Izolanty a dielektrika.” <https://publi.cz/books/353/06.html> (accessed Dec. 13, 2021).
- [50] “High temperature ceramic adhesive.” <https://www.final-materials.com/gb/232-high-temperature-ceramic-adhesive> (accessed Nov. 14, 2021).
- [51] “Schupp Ceramics - FiberPlast C 1800 D.” <https://www.schupp-ceramics.com/en/keramisches-kleben/fiberplast-c-1800d-keramischer-kleber-fuer-hochtemperatur-anwendungen.html> (accessed Dec. 14, 2021).
- [52] “2170299 - Lapp Usa - NETWORKING CABLE, CAT5E, 125V.” [https://cz.farnell.com/lapp-usa/2170299/networking-cable-cat5e-125v-500ft/dp/3638858?gclid=CjwKCAjwx46TBhBhEiwArA\\_DjKncWdCXrS5ACG5o7sKR3SweOAUI-fTSQmaH7KNLXXWEoNCtL3\\_4RoC4EsQAvD\\_BwE&mckv=s\\_dc%257Cpcriid%257C497108428540%257Ckword%257C%257Cmatch%257C%257Cplid%257C%257Cslid%25](https://cz.farnell.com/lapp-usa/2170299/networking-cable-cat5e-125v-500ft/dp/3638858?gclid=CjwKCAjwx46TBhBhEiwArA_DjKncWdCXrS5ACG5o7sKR3SweOAUI-fTSQmaH7KNLXXWEoNCtL3_4RoC4EsQAvD_BwE&mckv=s_dc%257Cpcriid%257C497108428540%257Ckword%257C%257Cmatch%257C%257Cplid%257C%257Cslid%25) (accessed Apr. 24, 2022).
- [53] “Sunstone Welders > DC Welders > Linear DC.” <https://sunstonewelders.com/linear-dc> (accessed Apr. 28, 2022).
- [54] K. fyziky ZČU, “Měření malých odporů čtyřvodičovou metodou,” vol. 3, no. 3, pp.

- 1–2, 2013, [Online]. Available:  
<https://nanoed.tul.cz/mod/resource/view.php?id=1907>.
- [55] “Zkouška tahem,” *ELUC*. <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1566> (accessed Apr. 18, 2021).
- [56] “Zkouška tahem – Wikipedie.” [https://cs.wikipedia.org/wiki/Zkouška\\_tahem](https://cs.wikipedia.org/wiki/Zkouška_tahem) (accessed Apr. 18, 2021).
- [57] A. Smetanová, “Statická zkouška tahem.” [http://www.zamekkurim.cz/security/Dum-Digitalni-ucebni-materialy/13\\_Sada\\_Materialy\\_2/VY\\_32\\_INOVACE\\_13\\_05\\_Staticka\\_zkouska\\_tahem.pdf](http://www.zamekkurim.cz/security/Dum-Digitalni-ucebni-materialy/13_Sada_Materialy_2/VY_32_INOVACE_13_05_Staticka_zkouska_tahem.pdf) (accessed Apr. 18, 2021).

## **Seznam příloh**

- Příloha 1 Hodnoty odporu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v klimatické komoře.
- Příloha 2 Hodnoty odporu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v klimatické komoře.
- Příloha 3 Hodnoty odporu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v klimatické komoře.
- Příloha 4 Hodnoty odporu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v klimatické komoře.
- Příloha 5 Hodnoty odporu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v teplotní komoře.
- Příloha 6 Hodnoty odporu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v teplotní komoře.
- Příloha 7 Hodnoty odporu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v teplotní komoře.
- Příloha 8 Hodnoty odporu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v teplotní komoře.
- Příloha 9 Hodnoty síly odtrhu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v klimatické komoře.
- Příloha 10 Hodnoty síly odtrhu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v klimatické komoře.
- Příloha 11 Hodnoty síly odtrhu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v klimatické komoře.
- Příloha 12 Hodnoty síly odtrhu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v klimatické komoře.
- Příloha 13 Hodnoty síly odtrhu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v klimatické komoře a kryté keramickými adhezivy.
- Příloha 14 Hodnoty síly odtrhu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v teplotní komoře.
- Příloha 15 Hodnoty síly odtrhu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v teplotní komoře.
- Příloha 16 Hodnoty síly odtrhu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v teplotní komoře.

Příloha 17 Hodnoty síly odtrhu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v teplotní komoře.

## Přílohy

TCB 440 $\mu\text{m}$						
	Odpor [ $\Omega$ ]					
Cykly	0	100	200	300	500	1000
č.vzorku						
1	0,0026	0,0024	0,0045	0,0039	0,0052	0,0058
2	0,0024	0,0034	0,0055	0,0032	0,0075	0,0073
3	0,0027	0,004	0,0046	0,0034	0,0053	0,0075
4	0,0025	0,0042	0,004	0,0037	0,0055	0,0043
5	0,0022	0,0031	0,0039	0,0036	0,0063	0,0058
6	0,0016	0,0039	0,0025	0,0042	0,0065	0,0083
7	0,0019	0,0045	0,0035	0,0037	0,0058	0,0073
8	0,002	0,0025	0,0038	0,0038	0,0055	0,0064
9	0,0022	0,0034	0,0042	0,0041	0,0058	0,0071
10	0,0021	0,0033	0,0042	0,0039	0,0063	0,0078
<b>Střední hodnota</b>	0,00222	0,00347	0,00407	0,00375	0,00597	0,00676
<b>Medián</b>	0,0022	0,0034	0,0041	0,00375	0,0058	0,0072
<b>Rozptyl</b>	0,00000010	0,00000043	0,00000054	0,00000008	0,00000044	0,00000127

**Příloha 18: Hodnoty odporu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v klimatické komoře.**

TCB 220 $\mu\text{m}$						
	Odpor [ $\Omega$ ]					
Cykly	0	100	200	300	500	1000
č.vzorku						
1	0,0022	0,0046	0,0052	0,0038	0,0055	0,0079
2	0,0022	0,0038	0,005	0,0041	0,0044	0,0046
3	0,0018	0,0038	0,0039	0,0036	0,0048	0,0057
4	0,0024	0,0032	0,0032	0,0043	0,0046	0,0057
5	0,0026	0,0035	0,0028	0,0039	0,0046	0,0075
6	0,0021	0,0043	0,0033	0,0042	0,0044	0,0073
7	0,0017	0,0034	0,0028	0,0044	0,0048	0,005
8	0,0033	0,0038	0,0029	0,004	0,0062	0,0063
9	0,0027	0,0048	0,0041	0,0043	0,0055	0,0082
10	0,0028	0,005	0,0047	0,0045	0,0053	0,0074
<b>Střední hodnota</b>	0,00238	0,00402	0,00379	0,00411	0,00501	0,00656
<b>Medián</b>	0,0023	0,0038	0,0036	0,00415	0,0048	0,0068
<b>Rozptyl</b>	0,00000021	0,00000035	0,00000077	0,00000007	0,00000031	0,00000144

**Příloha 19: Hodnoty odporu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v klimatické komoře.**



Paralelní odporové 440 $\mu\text{m}$						
	Odpor [ $\Omega$ ]					
Cykly	0	100	200	300	500	1000
č.vzorku						
1	0,0026	0,0042	0,0041	0,0048	0,0055	0,0064
2	0,0028	0,0038	0,0027	0,0037	0,0041	0,0058
3	0,002	0,0036	0,0049	0,0044	0,0051	0,0057
4	0,0018	0,0032	0,0053	0,0046	0,0042	0,0075
5	0,0019	0,0024	0,0049	0,0052	0,0059	0,0068
6	0,0021	0,0024	0,0038	0,0041	0,0063	0,0054
7	0,002	0,0015	0,0032	0,0057	0,0052	0,0066
8	0,0021	0,001	0,0042	0,0049	0,0059	0,0074
9	0,0017	0,0008	0,0036	0,0066	0,0051	0,0065
10	0,0012	0,0013	0,0049	0,0062	0,0072	0,0084
<b>Střední hodnota</b>	0,00202	0,00242	0,00416	0,00502	0,00545	0,00665
<b>Medián</b>	0,002	0,0024	0,00415	0,00485	0,00535	0,00655
<b>Rozptyl</b>	0,00000018	0,00000138	0,00000064	0,00000076	0,00000079	0,00000076

**Příloha 20: Hodnoty odporu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v klimatické komoře.**

Paralelní odporové 220 $\mu\text{m}$						
	Odpor [ $\Omega$ ]					
Cykly	0	100	200	300	500	1000
č.vzorku						
1	0,0016	0,0021	0,0029	0,0042	0,0041	0,0045
2	0,0018	0,002	0,0023	0,0036	0,0039	0,0047
3	0,0021	0,0022	0,0026	0,0033	0,0037	0,0044
4	0,0015	0,0018	0,0036	0,0043	-	-
5	0,0019	0,0033	0,0031	-	-	-
6	0,0016	0,0028	-	0,0038	0,0036	0,0058
7	0,0017	0,0044	0,0039	0,0036	0,0041	0,0063
8	0,0019	0,0041	0,0042	0,0048	0,0045	0,0049
9	0,0018	0,0032	0,0041	-	-	-
10	0,0025	0,0042	0,0039	0,0038	0,0042	0,0055
<b>Střední hodnota</b>	0,00184	0,00301	0,0034	0,003925	0,004014286	0,005157143
<b>Medián</b>	0,0018	0,003	0,0036	0,0038	0,0041	0,0049
<b>Rozptyl</b>	0,00000008	0,00000087	0,00000043	0,00000020	0,00000008	0,00000045

**Příloha 21: Hodnoty odporu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v klimatické komoře.**

TCB 440 $\mu\text{m}$			
	Odpor [ $\Omega$ ]		
Hodiny	0	100	200
č.vzorku			
1	0,0026	0,0164	0,0174
2	0,0025	0,0158	0,0163
3	0,0027	0,0154	0,0161
4	0,0024	0,0149	0,0167
5	0,0021	0,0159	0,0175
6	0,0017	0,0159	0,0173
7	0,0019	0,0147	0,0151
8	0,002	0,0157	0,0159
9	0,0021	0,0195	0,0187
10	0,0023	0,0176	0,0192
<b>Střední hodnota</b>	0,00223	0,01618	0,01702
<b>Medián</b>	0,0022	0,01585	0,017
<b>Rozptyl</b>	0,00000009	0,00000181	0,00000144

**Příloha 22: Hodnoty odporu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v teplotní komoře.**

TCB 220 $\mu\text{m}$			
	Odpor [ $\Omega$ ]		
Hodiny	0	100	200
č.vzorku			
1	0,0024	0,0192	0,0195
2	0,0022	0,0173	0,0181
3	0,0018	0,0192	0,0187
4	0,0021	0,0189	0,0197
5	0,0026	0,0176	0,0186
6	0,0022	0,0201	0,0212
7	0,0018	0,0192	0,0206
8	0,0031	0,0201	0,0207
9	0,0028	0,0123	0,0149
10	0,0028	0,0226	0,0241
<b>Střední hodnota</b>	0,00238	0,01865	0,01961
<b>Medián</b>	0,0023	0,0192	0,0196
<b>Rozptyl</b>	0,00000017	0,00000640	0,00000512

**Příloha 23: Hodnoty odporu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v teplotní komoře.**

Paralelní odporové 440 $\mu\text{m}$			
	Odpor [ $\Omega$ ]		
Hodiny	0	100	200
č.vzorku			
1	0,0027	0,0208	0,0223
2	0,0025	0,0188	0,0195
3	0,002	0,0225	0,0234
4	0,0021	0,0207	0,0221
5	0,0018	0,0207	0,0218
6	0,0022	0,0202	0,0214
7	0,002	0,0197	0,0207
8	0,0021	0,0201	0,0217
9	0,0017	0,0154	0,0171
10	0,0014	0,0169	0,0184
<b>Střední hodnota</b>	0,00205	0,01958	0,02084
<b>Medián</b>	0,00205	0,02015	0,02155
<b>Rozptyl</b>	0,00000013	0,00000385	0,00000340

**Příloha 24: Hodnoty odporu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v teplotní komoře.**

Paralelní odporové 220 $\mu\text{m}$			
	Odpor [ $\Omega$ ]		
Hodiny	0	100	200
č.vzorku			
1	0,0019	0,0204	0,0213
2	0,0016	0,0196	0,0205
3	0,0021	0,0176	0,0192
4	0,0017	0,0187	0,0194
5	0,0019	0,021	0,0217
6	0,0018	0,0092	0,0142
7	0,0017		
8	0,0019	0,0214	0,0221
9	0,0019	0,0225	0,0231
10	0,0024	0,0203	0,0218
<b>Střední hodnota</b>	0,00189	0,01707	0,01833
<b>Medián</b>	0,0019	0,0203	0,0213
<b>Rozptyl</b>	0,00000005	0,00001379	0,00000617

**Příloha 25: Hodnoty odporu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v teplotní komoře.**

TCB 440 $\mu\text{m}$						
	Síla [N]					
Cykly	0	100	200	300	500	1000
č.vzorku						
1	19,12	19,89	23	13,63	18,55	17,28
2	18,47	21,01	19,5	16,39	17,42	21,28
3	19,12	17,76	19,72	15,01	17,83	17,8
4	17,62	17,41	18,53	17,99	17,61	19,25
5	18,16	16,16	19,18	16,22	18,79	20,81
<b>Střední hodnota</b>	18,50	18,45	19,99	15,85	18,04	19,28
<b>Medián</b>	18,47	17,76	19,50	16,22	17,83	19,25
<b>Rozptyl</b>	0,33080544	3,08578400	2,43214400	2,12841600	0,28720000	2,50642400

**Příloha 26: Hodnoty síly odtrhu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v klimatické komoře.**

TCB 220 $\mu\text{m}$						
	Síla [N]					
Cykly	0	100	200	300	500	1000
č.vzorku						
1	9,74	10,12	9,93	9,87	12,25	10,32
2	10,50	10,03	9,71	9,26	9,65	10,06
3	9,74	10,77	10,13	10,06	10	10,35
4	10,26	9,45	10,55	9,81	10,48	10,64
5	10,19	7,37	10,19	9,71	12,22	10,35
<b>Střední hodnota</b>	10,09	9,55	10,10	9,74	10,92	10,34
<b>Medián</b>	10,19	10,03	10,13	9,81	10,48	10,35
<b>Rozptyl</b>	0,08947840	1,36121600	0,07849600	0,07109600	1,22236000	0,03378400

**Příloha 27: Hodnoty síly odtrhu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v klimatické komoře.**

Paralelní odporové 440 $\mu\text{m}$						
	Síla [N]					
Cykly	0	100	200	300	500	1000
č.vzorku						
1	11,03	6,56	11,7	12,05	10,16	9,94
2	10,08	8,45	18,58	9,55	11,86	6,72
3	11,03	13,23	8,74	16,23	10,89	16,04
4	13,03	15,72	13,39	14,53	12,05	5,34
5	12,21	21,66	17,04	11,25	17,93	10,92
<b>Střední hodnota</b>	11,48	13,12	13,89	12,72	12,58	9,79
<b>Medián</b>	11,03	13,23	13,39	12,05	11,86	9,94
<b>Rozptyl</b>	1,05458144	28,90922400	12,69744000	5,65097600	7,62685600	13,91785600

**Příloha 28: Hodnoty síly odtrhu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v klimatické komoře.**

Paralelní odporové 220 μm						
	Síla [N]					
Cykly	0	100	200	300	500	1000
č.vzorku						
1	8,42	9,61	7,75	9,29	8,65	9,87
2	9,03	5,51	8,2	10,64	8,68	9,07
3	8,42	8,62	8,78	6,11	9,42	11
4	8,79	10,48	8,84	8,27	9,55	8,54
5	9,14	8,88	8,71	8,61	8,79	9,73
<b>Střední hodnota</b>	8,76	8,62	8,46	8,58	9,02	9,64
<b>Medián</b>	8,79	8,88	8,71	8,61	8,79	9,73
<b>Rozptyl</b>	0,08966496	2,83588000	0,17618400	2,18910400	0,14925600	0,68909600

**Příloha 29: Hodnoty síly odtrhu pro vodič 220 μm, vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v klimatické komoře.**

TCB 440 μm			
	Síla [N]		
Adhezivum	RESBOND® 940HT CERAMIC ADHESIVE	RESBOND® 989 CERAMIC ADHESIVE	RESBOND® 903HP CERAMIC ADHESIVE
č.vzorku	1000 Cyklů		
1	26,77	21,08	28,98
2	24,2	25,64	26,16
3	27,76	31,42	31,14
4	24,32	29,85	25,58
5	24,38	29,02	28,31
6	28,5	22,08	21,98
7	25,39	27,99	25,93
8	23,62	26,09	29,46
9	23,55	29,37	24,42
10	25,96	32,02	23,62
<b>Střední hodnota</b>	25,45	27,46	26,56
<b>Medián</b>	24,89	28,51	26,05
<b>Rozptyl</b>	2,75876500	12,33878400	7,40221600

**Příloha 30: Hodnoty síly odtrhu pro lanko 440 μm, vyrobených TCB režimem, testovaných v klimatické komoře a kryté keramickými adhezivy.**

TCB 440 $\mu\text{m}$						
	Síla [N]					
Hodiny	0	100	200	300	400	500
č.vzorku						
1	19,12	17,76	19,72	15,01	17,83	17,8
2	17,62	17,41	18,53	17,99	17,61	19,25
3	18,16	16,16	19,18	16,22	18,79	20,81
4	18,50	18,45	19,99	15,85	18,04	19,28
5	18,47	17,76	19,50	16,22	17,83	19,25
<b>Střední hodnota</b>	0,33080544	3,08578400	2,43214400	2,12841600	0,28720000	2,50642400
<b>Medián</b>	19,12	19,89	23	13,63	18,55	17,28
<b>Rozptyl</b>	18,47	21,01	19,5	16,39	17,42	21,28

**Příloha 31: Hodnoty síly odtrhu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v teplotní komoře.**

TCB 220 $\mu\text{m}$						
	Síla [N]					
Hodiny	0	100	200	300	400	500
č.vzorku						
1	9,74	6,13	5,01	2,43	1,64	4,16
2	10,50	4,25	3,91	3,82	3,3	3,97
3	9,74	5,07	4,04	3,43	3,5	4,32
4	10,26	4,36	3,81	3,78	2,3	4,65
5	10,19	4,25	2,71	2,87	2,43	4,13
<b>Střední hodnota</b>	10,09	4,81	3,90	3,27	2,63	4,25
<b>Medián</b>	10,19	4,36	3,91	3,43	2,43	4,16
<b>Rozptyl</b>	0,08947840	0,52793600	0,53518400	0,29074400	0,46694400	0,05314400

**Příloha 32: Hodnoty síly odtrhu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených TCB režimem, testovaných v teplotní komoře.**

Paralelní odporové 440 $\mu\text{m}$						
	Síla [N]					
Hodiny	0	100	200	300	400	500
č.vzorku						
1	11,03	9,51	11,21	2,92	7,79	8,48
2	10,08	7,58	10,07	3,18	5,9	8,57
3	11,03	5,6	7,43	4,49	6,11	10,72
4	13,03	9,73	8,32	11,44	4,84	4,71
5	12,21	8,42	2,58	5,56	5,95	10,76
<b>Střední hodnota</b>	11,48	8,17	7,92	5,52	6,12	8,65
<b>Medián</b>	11,03	8,42	8,32	4,49	5,95	8,57
<b>Rozptyl</b>	1,05458144	2,24893600	8,87245600	9,66889600	0,90093600	4,85917600

**Příloha 33: Hodnoty síly odtrhu pro lanko 440  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v teplotní komoře.**

Paralelní odporové 220 $\mu\text{m}$						
	Síla [N]					
Hodiny	0	100	200	300	400	500
č.vzorku						
1	8,42	4,23	2,42	3,17	3,9	4,22
2	9,03	5,45	2,17	4,81	3,4	4,45
3	8,42	4,73	2,46	4,17	4,01	4,26
4	8,79	4,42	2,69	4,21	4,72	6,56
5	9,14	3,98	2,37	2,2	5,65	4,23
Střední hodnota	8,76	4,56	2,42	3,71	4,34	4,74
Medián	8,79	4,42	2,42	4,17	4,01	4,26
Rozptyl	0,08966496	0,25717600	0,02789600	0,84865600	0,60930400	0,83146400

**Příloha 34: Hodnoty síly odtrhu pro vodič 220  $\mu\text{m}$ , vyrobených paralelním odporovým režimem, testovaných v teplotní komoře.**