

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrotechnologie



## Vliv povrchu DPS na kvalitu lepeného spoje Influence of PCB surface on the quality of the adhesive joint

Bakalářská práce

Autor: Tomáš Hančl

Vedoucí práce: Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Praha 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hančl** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **483447**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vliv povrchu DPS na kvalitu lepeného spoje**

Název bakalářské práce anglicky:

**Influence of PCB surface on the quality of the adhesive joint**

Pokyny pro vypracování:

1. Provedte rešerši o struktuře a vlastnostech elektricky vodivých lepidel. Do rešerše také zahrňte i metody nanášení elektricky vodivých lepidel.
2. Vytvořte vzorky elektricky vodivých lepených spojů na deskách plošných spojů s různou povrchovou úpravou.
3. Změřte a analyzujte elektrické a mechanické parametry těchto elektricky vodivých spojů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J.: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001
- [2] Petrůj, J.: Sledování vybraných vlastností elektricky vodivých lepidel, bakalářská práce, ČVUT, Praha 2018
- [3] Ebnesajjad, S.: Handbook of Adhesives and Surface Preparation – Technology, Applications and Manufacturing, 2011, ISBN: 978-1-4377-4461-33.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **01.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 17. 5. 2022

.....  
podpis autora (jméno a příjmení)

## **Poděkování**

Děkuji paní Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za cenné rady, ochotu a celkové vedení mé bakalářské práce. Dále děkuji také Ing. Petrovi Veselému, Ph.D. za nápomocnost při zpracovávání praktické části práce. V neposlední řadě patří můj dík i všem ostatním přítomným v laboratoři.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá zkoumáním elektrických a mechanických vlastností lepených elektricky vodivých spojů v závislosti na povrchové úpravě desky plošných spojů (DPS). V teoretické části práce bude provedena rešerše zaměřená zejména na strukturu, vlastnosti a metody nanášení elektricky vodivých lepidel.

Praktická část se zabývá zhotovením vzorků elektricky vodivých spojů a dále měřením jejich mechanických a elektrických vlastností s ohledem na povrchovou úpravu DPS. Těmito vlastnostmi jsou myšleny elektrický odpor a mechanická pevnost.

## **Klíčová slova**

Elektricky vodivá lepidla, vodivé lepení, struktura vodivých lepidel, vlastnosti vodivých lepidel, povrchová úprava DPS, vlastnosti lepeného spoje

## **Abstract**

This thesis is focused on electrical and mechanical properties of bonded electrical conductive joints in term of PCB surface finish. The search about structure, properties and methods of application of electrically conductive adhesives will be provided in theoretical part of this thesis.

Experimental part is focused on making samples of electrically conductive bonds and measuring their mechanical and electrical properties considering PCB surface finish. The term of properties is meant by electrical resistance and mechanical strength.

## **Key words**

Electrically conductive adhesives, conductive bonding, structure of conductive adhesives, properties of conductive adhesives, PCB surface finish, properties of bonded joint

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>9</b>
2.1	Struktura elektricky vodivých lepidel .....	9
2.1.1	<b>Vazební složka .....</b>	<b>9</b>
2.1.2	<b>Vodivá složka.....</b>	<b>9</b>
2.2	Dělení lepidel dle vodivosti .....	10
2.2.1	<b>Izotropní lepidla .....</b>	<b>10</b>
2.2.2	<b>Anizotropní lepidla .....</b>	<b>11</b>
2.2.3	<b>Perkolační práh .....</b>	<b>12</b>
2.3	Vlastnosti elektricky vodivých lepidel .....	12
2.3.1	<b>Elektrický odpor .....</b>	<b>13</b>
2.3.2	<b>Mechanické vlastnosti .....</b>	<b>14</b>
2.3.3	<b>Tepelné vlastnosti .....</b>	<b>14</b>
2.4	Porovnání vlastností lepidel a pájek.....	15
2.4.1	<b>Přednosti vodivých lepidel .....</b>	<b>16</b>
2.5	Metody nanášení lepidel.....	16
2.5.1	<b>Šablonový tisk .....</b>	<b>17</b>
2.5.2	<b>Sítotisk .....</b>	<b>17</b>
2.5.3	<b>Dispenzní nanášení.....</b>	<b>18</b>
2.5.4	<b>Nanášení namáčenou jehlou .....</b>	<b>18</b>
2.6	Povrchové úpravy DPS.....	19
<b>3</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>20</b>
3.1	Úvod do experimentu.....	20
3.2	Výroba vzorků.....	20
3.3	Měření elektrických vlastností spojů.....	23
3.3.1	<b>Naměřené hodnoty elektrických parametrů.....</b>	<b>25</b>
3.3.1.1	<i>Odhalení vlivu pocínování součástek na lepidlo ELPOX SC 515 .....</i>	<i>26</i>
3.4	Měření mechanických vlastností spojů .....	29
3.4.1	<b>Zkouška adheze .....</b>	<b>29</b>
3.4.2	<b>Naměřené hodnoty mechanických parametrů .....</b>	<b>30</b>
3.4.2.1	<i>Speciální případy výsledků trhací zkoušky.....</i>	<i>32</i>
3.5	Rozbor vybraných vzorků .....	32
3.5.1	<b>ELPOX SC 515, pozlacené plošky DPS .....</b>	<b>33</b>
3.5.2	<b>ELPOX SC 515, měděné plošky DPS.....</b>	<b>34</b>
3.5.3	<b>ELPOX SC 515, pocínované (HAL) plošky DPS .....</b>	<b>35</b>
3.5.4	<b>ELPOX SC 515, pocínované (chemický cín) plošky DPS .....</b>	<b>36</b>
3.5.5	<b>ELPOX AX 70MN, pozlacené plošky DPS .....</b>	<b>37</b>
3.5.6	<b>ELPOX AX 70MN, měděné plošky DPS .....</b>	<b>38</b>
3.5.7	<b>ELPOX AX 70MN, pocínované (HAL) plošky DPS .....</b>	<b>39</b>
3.5.8	<b>ELPOX AX 70MN, pocínované (chemický cín) plošky DPS.....</b>	<b>40</b>
3.5.9	<b>ELPOX AX 15N, pozlacené plošky DPS.....</b>	<b>41</b>

3.5.10	ELPOX AX 15N, měděné plošky DPS.....	42
3.5.11	ELPOX AX 15N, pocínované (HAL) plošky DPS.....	43
3.5.12	ELPOX AX 15N, pocínované (chemický cín) plošky DPS .....	44
3.6	Mikroskopická a prvková analýza.....	44
3.6.1	Laserový skenovací konfokální mikroskop Keyence VK-X1000.....	46
3.6.2	Skenovací elektronový mikroskop SEM Thermo Scientific Phenom ProX.....	46
3.6.3	Výsledky měření.....	47
3.7	Shrnutí výsledků měření.....	54
4	ZÁVĚR.....	56
	SEZNAM POJMŮ .....	57
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	58
	SEZNAM GRAFŮ.....	59
	SEZNAM TABULEK.....	59
	ZDROJE .....	60
	PŘÍLOHY .....	63

# 1 ÚVOD

Elektricky vodivé spojování neodmyslitelně patří do procesu výroby veškerých elektrických zařízení. Se současnou rychlostí vývoje elektroniky je tedy nutné, aby i používané materiály držely krok s aktuálními trendy. Mezi tyto trendy patří zejména miniaturizace elektrických komponent při stále rostoucích nárocích na přenášený výkon. Při návrhu elektrických zařízení je tedy nutné brát zřetel nejen na samotné součástky a jejich materiály, ale také na spojovací materiály a metody jejich nanášení. Právě metody nanášení jsou jedním z hlavních faktorů ovlivňujících rychlost zhotovování zařízení a ovlivňují tak nejen technický, ale i ekonomický aspekt celé výroby.

Mezi velmi rozšířené a používané spojovací materiály patří pájecí pasty. Je mnoho typů a složení pájecích past pro použití v různých podmínkách. Tato práce je však zaměřena na jejich alternativu, tedy na elektricky vodivá lepidla, proto bude pájecím pastám věnována minimální pozornost, i když se jedná o často využívanou skupinu materiálů.

Elektricky vodivá lepidla (ECA – Electrically Conductive Adhesives) jsou hojně používaná zejména proto, že nabízí použití v aplikacích, kde by spojování pájecími pastami bylo nemyslitelné. Takovou aplikací může být například výroba LCD displejů či spojování součástek s vývody velmi blízko u sebe. Kromě výhod mají vodivá lepidla i spoustu nevýhod ve srovnání s pájecími pastami. Mezi tyto nevýhody patří například nižší mechanická odolnost. Všechny vlastnosti a výhody jsou ale podrobněji zkoumány až v dalších částech práce. [1, 2]



## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Struktura elektricky vodivých lepidel

Elektricky vodivá lepidla jsou složena ze dvou komponent. Jedná se o vazební složku a vodivé plnivo. Pro zajištění pevného spojení materiálů je nutné nechat lepidlo (vazební složku) vytvrdit, tím zároveň dojde i k zafixování vodivé složky, čímž se ustálí vodivost a další elektrické parametry spoje. [3, 4]

#### 2.1.1 Vazební složka

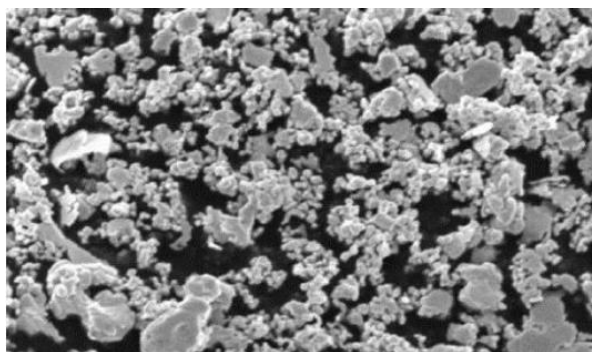
Vazební složka je izolační materiál, který způsobuje samotné přilnutí povrchů, a zároveň zodpovídá za pevnost a mechanickou odolnost spoje. Materiál vazební složky se liší v závislosti na výrobci lepidla. Nejčastěji se lze setkat s reaktoplastickou epoxidovou pryskyřicí, ale objevují se například i silikonové, či polyamidové pryskyřice. Reaktoplasty totiž nabízejí výhodu oproti termoplastům. U reaktoplastů dochází při vytvrzování k přechodu z viskózního do zesíťovaného stavu makromolekul. Tím materiál tvrdne a houževnatí. Po vytvrzení pak není možné další tváření materiálu pomocí zahřívání. Vytvrzený reaktoplast tedy nelze při dalším zvyšování teploty tavit, či rozpustit. [4, 5, 6]

Obecně se lepidla dělí na základě vazební složky na dva typy. Jsou to lepidla s jednosložkovou a dvousložkovou matricí. Existují i lepidla, u kterých se k základnímu materiálu přidává tvrdidlo, čímž je umožněno vytvrzování při pokojové teplotě. Toho je s výhodou využíváno u spojování komponent, které jsou citlivé na vysoké teploty. Značnou nevýhodou takových lepidel je mnohonásobně delší doba vytvrzování, která se může pohybovat v řádu stovek hodin (140 a více hodin). V každém případě je nutné zajistit vhodné podmínky vytvrzení, resp. zajistit optimální teplotu působící po optimální dobu. Pro tyto účely se často používají horkovzdušné pece s nastavenou teplotou typicky v rozmezí 100 – 140 °C po dobu 30 – 120 min v závislosti na konkrétním typu lepidla. [3, 7]

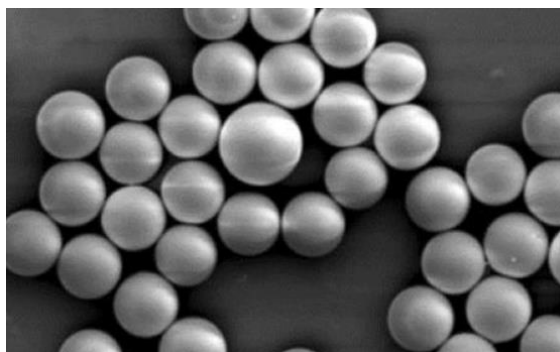
#### 2.1.2 Vodivá složka

Vedle vazební složky je součástí lepidla také vodivá složka, jejíž úkolem je zajištění přenosu elektrické energie. Z tohoto důvodu je složka tvořena částicemi z vodivých materiálů. Nejčastěji používanými materiály pak bývá stříbro, nikl či palladium, ale lze se setkat i s pocínovanými či postříbřenými částicemi z mědi. Mimo materiálu se u vodivé složky objevují i další faktory, na jejichž základě se lepidla odlišují. Jedná se například o tvar vodivých částic (Obr. 1– 4). Nejčastěji se lze setkat s částicemi ve tvaru kuliček, popřípadě lupínků. [8]

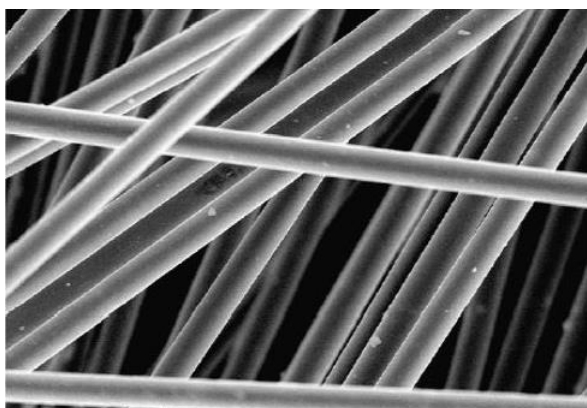
Dalším významným parametrem vodivé složky ECA je koncentrace vodivých částic. Ta ovlivňuje zejména elektrickou vodivost lepidla, resp. závislost vodivosti lepidla na směru (izotropii). Izotropie, resp. anizotropie je významná vlastnost ECA a lepidla jsou podle ní dělena na dva typy – izotropní (ICA) a anizotropní (ACA).



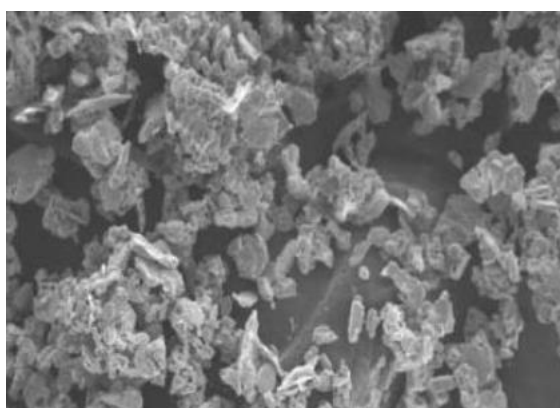
Obr. 1 Stříbrné lupínky (pro ICA) [14]



Obr. 2 Stříbrné kuličky (pro ACA) [14]



Obr. 3 Uhlíková nanovlákna [14]



Obr. 4 Pozlacené lupínky z mědi [14]

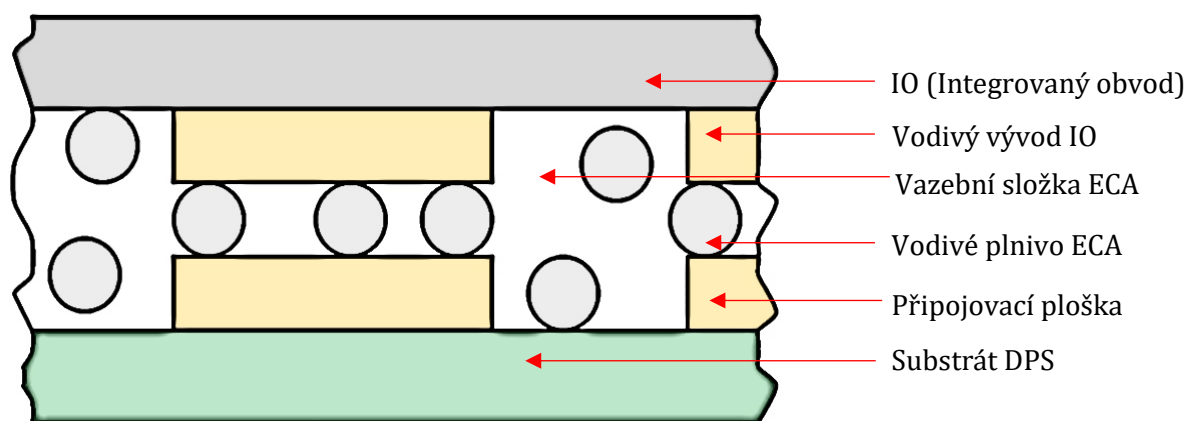
## 2.2 Dělení lepidel dle vodivosti

### 2.2.1 Izotropní lepidla

Izotropní lepidla (ICA – Isotropically Conductive Adhesives) se vyznačují tím, že jejich vodivost je stejná ve všech směrech. Vodivé částice izotropních lepidel často bývají ve tvaru lupínků s rozměry do 15  $\mu\text{m}$ , lze se však setkat i s jinými tvary. Koncentrace vodivých částic musí být větší, než je tomu u anizotropních lepidel, konkrétně se musí pohybovat nad perkolačním prahem, aby lepidlo tvořilo souvislou vodivou strukturu. Koncentrace v ICA bývá v rozmezí 65 – 80 % (hmotnostních). Bližší popis a vysvětlení perkolačního prahu se nachází v dalších částech práce. [6, 9, 10]

## 2.2.2 Anizotropní lepidla

Anizotropní lepidla (ACA – Anisotropically Conductive Adhesives) jsou z technického pohledu zajímavější než izotropní, protože se vyznačují tím, že jejich vodivost není stejná ve všech směrech, jak je nastíněno v níže uvedeném obrázku (Obr. 5). Tato lepidla mají daleko vyšší vodivost ve směru kolmém k lepenému povrchu. Vodorovně s povrchem je vodivost prakticky nulová, lepidlo tedy v tomto směru nevede elektrický proud.



Obr. 5 Ilustrační obrázek struktury ACA ve formě fólie

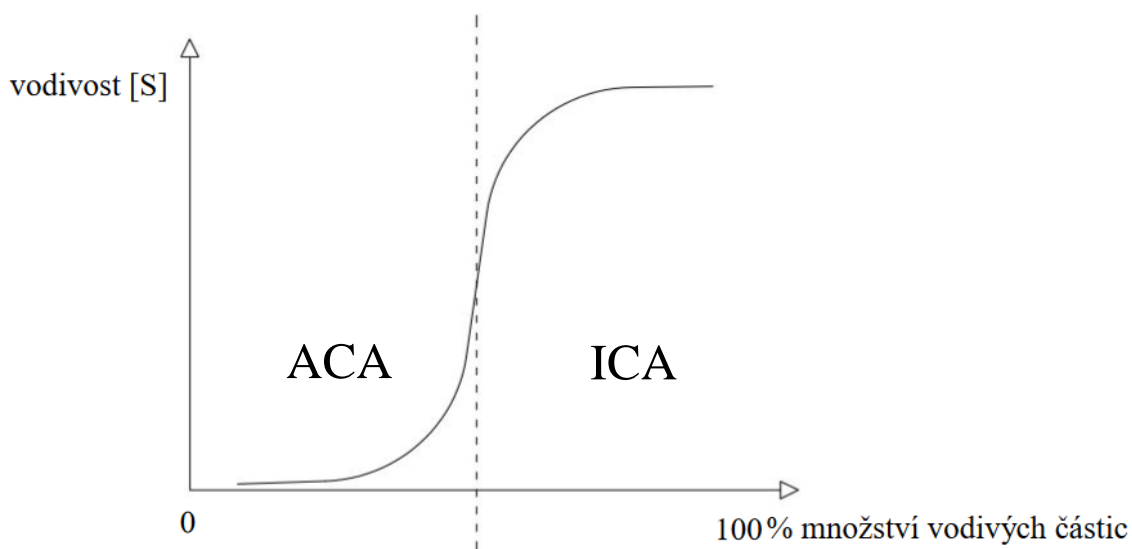
Aby lepidlo vykazovalo anizotropní charakter, musí být koncentrace vodivých částic (kuliček) nízká, resp. pod perkolačním prahem. Jak bylo zmíněno, na anizotropii se do jisté míry podílí i tvar vodivých částic. Obvykle se jedná o tvar kuliček, tvary však mohou být i jiné. Průměr kuliček se nejčastěji pohybuje v rozmezí 5 – 20  $\mu\text{m}$ . Vodivost v ose z je pak způsobena přitlakem spojovaných materiálů, kdy se vodivé částice přitlačí mezi připojované vývody a vytvoří elektricky vodivou cestu. Samotnou vodivost lze vyjádřit pomocí elektrického odporu podle vztahu 1. Elektrický odpor tedy představuje převrácenou hodnotu elektrické vodivosti. Odpor takovýchto lepidel je pak typicky v řádu  $\text{m}\Omega$  ve směru osy z. V ostatních směrech je odpor řádově v  $\text{M}\Omega$ .

$$R = \frac{1}{G} [\Omega; \text{S}] \quad (1)$$

Často se lze setkat i s fóliemi vyrobenými z anizotropních lepidel. Pro jejich aplikaci je ale nutná přítomnost vystouplých – poduškových vývodů na připojované součástce. Mezi takovou součástku a plošku, na kterou má být součástka usazena, se vloží zmíněná fólie. Po přitlaku a vytvrzení lepidla dojde k vodivému spojení. [3, 7, 10]

### 2.2.3 Perkolační práh

Perkolační práh (Obr. 6) je pojem z perkolační teorie a v oboru vodivého spojování představuje určitou míru koncentrace vodivých částic v elektricky vodivém lepidle. Po překročení této koncentrace dojde ke skokovému nárůstu vodivosti lepidla. Tuto koncentraci si lze představit jako určitou mez, nad kterou vodivé částice již vytvoří provázanou vodivou strukturu a s dalším zvyšováním počtu vodivých částic narůstá vodivost spoje jen nepatrně. [8, 9, 11, 12, 13]



Obr. 6 Křivka znázorňující perkolační práh [11] (upraveno)

Perkolační práh lze ovlivnit mnoha způsoby. Nabízí se například tvar vodivých částic, úprava jejich povrchu, popřípadě zmenšení, či zvětšení průměru. V případě částic ve tvaru kuliček pak vede zmenšení průměru ke snížení perkolačního prahu. [6]

Jak již bylo zmíněno v předešlých částech, u izotropních a anizotropních lepidel se koncentrace vodivých částic liší. V případě lepidel s izotropní vodivostí bývá koncentrace vodivých částic 65 – 80 % (hmotnostních). V případě anizotropních lepidel je koncentrace nižší a bývá do 30 %, nejčastěji se však pohybuje v rozmezí 8 – 15 % (hmotnostních). [7, 10, 14]

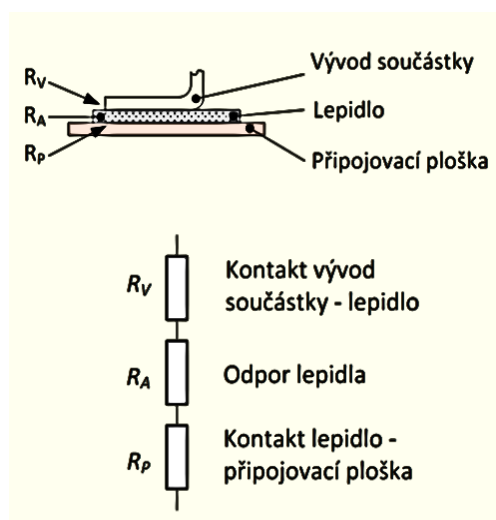
## 2.3 Vlastnosti elektricky vodivých lepidel

Lepidel je celá řada a jejich vlastnosti se od sebe často velmi liší. Tato část je zaměřena na základní, ale velmi významné vlastnosti. Těmi hlavními jsou elektrický odpor a mechanické a tepelné vlastnosti.

### 2.3.1 Elektrický odpor

V případě anizotropních lepidel lze vyjádřit celkový odpor ( $R_C$ ) pomocí tří hodnot. Jedná se o odpor kontaktu součástka – lepidlo ( $R_V$ ), odpor samotného lepidla ( $R_A$ ) a odpor kontaktu lepidlo – připojovací ploška ( $R_P$ ). Vzájemný vztah je pak popsán níže uvedenou rovnicí a obrázkem (Obr. 7). Velmi významnou roli u všech typů lepidel hraje odpor lepidla, resp. odpor vodivých částic, který lze ovlivnit zejména materiálem, velikostí, či drsností povrchu částice. [8]

$$R_C = R_V + R_A + R_P \text{ [}\Omega\text{]} \quad (2)$$

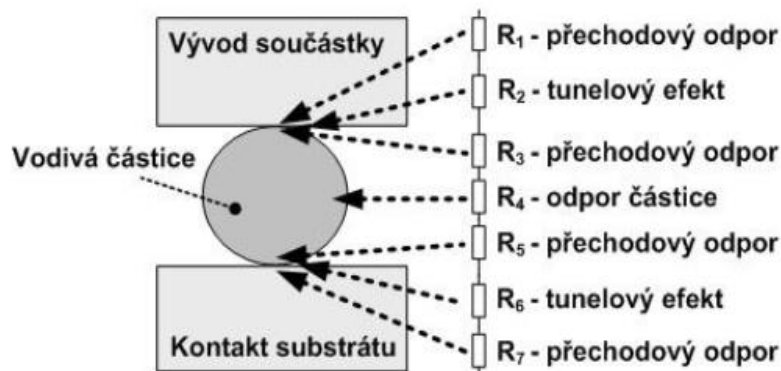


Obr. 7 Celkový odpor spoje vytvořený pomocí ACA [14]

U ACA dochází při kontaktu vodivých kuliček, které bývají jeho typickým plnivem, k výraznému zmenšení styčného povrchu mezi vodivým plnivem ECA a vývody. Díky přítlaku dochází k mírné deformaci kuliček. I přes to jsou však styčné plochy malé, proto zde hraje významnou roli úžinový odpor, který se objevuje právě v místech, kde je plocha kontaktu menší vůči rozměrům spojovaných členů. Samotný vznik je pak způsoben následkem vysoké proudové hustoty, při níž se kontakt ohřeje a tím se odpor zvýší. Závislost elektrického odporu vodivého materiálu na teplotě je přitom dána níže uvedeným vztahem. [14]

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \Delta t) \text{ [}\Omega\text{; } \Omega\text{; K}^{-1}\text{; K]} \quad (3)$$

Podrobnější popis faktorů podílejících se na celkovém odporu spoje, který je tvořen anizotropním lepidlem, je uveden na dalším obrázku (Obr. 8).



Obr. 8 Faktory podílející se na celkovém odporu spoje tvořeného ACA [6]

I v případě izotropních lepidel platí vztah 2 pro celkový odpor. Vodivé plnivo zde bývá ve tvaru šupinek, které poskytují vícečetná propojení a větší kontaktní plochy. Z tohoto důvodu zde převládá tunelový odpor a úžinový odpor se zanedbává. Tento tunelový odpor je svázaný s pojmem tunelový jev, který umožňuje elektrickému proudu překonat tenkou izolační vrstvu, která může být způsobena například vrstvou oxidu na povrchu částice, či vazební složkou lepidla. [8, 14]

### 2.3.2 Mechanické vlastnosti

Vedle elektrických vlastností jsou zde neméně významné mechanické vlastnosti. Pod tímto pojmem se skrývá mnoho dalších parametrů spoje jako například tvrdost, pevnost, houževnatost, křehkost atp. Dva významné pojmy v oblasti lepení jsou pak přilnavost lepidla (adheze) a soudržnost lepidla (koheze), čili schopnost lepidla držet pohromadě. U kapalin je pak míra koheze vyjadřována povrchovým napětím.

Mechanické vlastnosti lepidla je možné měnit jejich složením, konkrétně tedy tvarem, velikostí, či koncentrací částic. Mechanickou pevnost pak lze zvýšit přidáním nanočástic, či uhlíkových vláken. Existují také parametry, jako je například tvrdost a křehkost, které se vzájemně ovlivňují. Zvýšením tvrdosti se zároveň zvýší křehkost a naopak. [8]

### 2.3.3 Tepelné vlastnosti

Tepelné vlastnosti úzce souvisí s elektrickými. Stejně jako se zvyšuje elektrická vodivost při vyšším objemu vodivých částic, tak se zvyšuje i tepelná vodivost. V případě epoxidových lepidel, které nejsou plněny vodivou složkou, je tepelná vodivost nízká a pohybuje se v rozmezí  $0,1 - 0,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Po naplnění lepidla vodivou složkou, kdy koncentrace vodivých částic dosáhne cca 80 % (hmotnostních), dojde až k desetinásobnému zvýšení tepelné vodivosti. [15]

Výborné tepelné vlastnosti vykazují silikonová lepidla. Jedná se o významnou skupinu lepidel zejména pro svou teplotní stabilitu. Silikonová lepidla si udržují své vlastnosti v širokém rozmezí provozních teplot, jejichž spodní hranice se pohybuje okolo - 80 °C a horní hranice přesahuje 300 °C. Při těchto teplotách nedochází k degradaci mechanických ani elektrických vlastností. Tepelnými vlastnostmi tedy převyšují epoxidová lepidla, a proto nacházejí uplatnění v extrémních teplotních podmínkách. [8, 15]

## 2.4 Porovnání vlastností lepidel a pájek

Po přehledu vlastností elektricky vodivých lepidel je vhodné zhodnotit vlastnosti adheziv v porovnání s pájkami po nanesení a vytvrzení. Níže je uvedena tabulka porovnání lepených a pájených spojů.

Tab. 1 Porovnání vlastností pájených a lepených spojů [3] (upraveno)

Vlastnost spoje	SnPb pájka	Elektricky vodivé lepidlo
typ vodivosti	izotropní	izotropní i anizotropní
odpor	nižší	vyšší
šum	nižší	vyšší
cena	nižší	vyšší
adheze	vyšší	nižší
vliv kvality spojovaných povrchů	nižší	vyšší
spolehlivost	vyšší	nižší
životnost	vyšší	nižší

Hlavní elektrické vlastnosti naznačují, že lepené spoje mají vyšší elektrický odpor než pájené spoje, a zároveň vykazují větší šum. Nižší odpor u pájených spojů je dán tím, že pájka je kompaktní kovový materiál, zatímco lepidlo je nehomogenní směs vodivých částic a pojiva. Další ukazatele jako jsou spolehlivost a doba života také nemluví ve prospěch lepených spojů. Z tabulky lze zároveň vyvodit, že lepidla vyžadují vyšší kvalitu spojovaných povrchů a poskytují nižší adhezi. Zároveň je známo, že elektricky vodivá lepidla nezajistí automatické vystředění součástky během procesu vytvrzení, jako je tomu v případě použití pájky. Posledním z tohoto výčtu negativních faktorů je cena lepidla, která je vyšší zejména kvůli obsahu vodivých částic tvořených drahými kovy. Všechny tyto ukazatele mluví ve prospěch pájek, proto jsou v následující podkapitole vyzdvíženy hlavní přednosti elektricky vodivých lepidel. [3]

### **2.4.1 Přednosti vodivých lepidel**

V oblasti vodivého spojování se objevuje významné datum 1. 7. 2006. K tomuto dni bylo legislativně vyžádáno omezení nebezpečných látek v elektrotechnice. Mezi nebezpečné látky se řadí například i olovo, které bylo do té doby nedílnou součástí pájek. Díky tomuto omezení bylo nutné započít vývoj nových pájek, které olovo neobsahují. Zde se projevuje jedna z předností vodivého lepení. Lepidla neobsahují olovo, tedy jsou z ekologického hlediska nezávadná. [16]

Ekologická nezávadnost ale není jedinou výhodou lepidel. Existuje oblast, ve které jsou vodivá lepidla nenahraditelná. Touto oblastí je výroba LCD displejů technologií Chip-on-glass, jak již bylo zmíněno v úvodu práce. U LCD displejů totiž hrozí jejich poškození vlivem vyšších teplot, kterých je dosahováno při pájení. Teploty potřebné pro roztavení pájecích materiálů jsou o poznání vyšší než teploty pro vytvrzování elektricky vodivých lepidel. Typická teplota tavení bezolovnaté pájky se pohybuje okolo 220 °C, kdežto teploty pro vytvrzování lepidel použitých v praktické části této práce nepřekročily 200 °C. Dvousložková elektricky vodivá lepidla zároveň umožňují vytvrzování při pokojových teplotách, čehož u pájení nelze dosáhnout. Pro tyto aplikace bývá často použito anizotropní lepidlo v podobě fólie, která je blíže popsána v části o anizotropních lepidlech. [1, 2, 16]

Další předností elektricky vodivých lepidel je umožnění spojování součástek typu fine-pitch. Jedná se o součástky s velmi malou roztečí vývodů, což u spojování pomocí SnPb pájecí pasty způsobuje komplikace. Těmito komplikacemi jsou míněny zejména nežádoucí propojení (zkratky) mezi sousedními vývody.

V neposlední řadě lepidla na bázi pryskyřic vynikají svou elasticitou v porovnání s pájenými spoji. Na ty působí pnutí vlivem délkových roztažností, které se projevují při změnách teploty. Za zmínku stojí i výhody, které nemusí být na první pohled patrné. Lepené spoje vykazují dobrý poměr pevnost/váha spoje. Elektricky vodivá lepidla zároveň vytváří jemné kontury spojů a tlumí vibrace. [7, 17]

## **2.5 Metody nanášení lepidel**

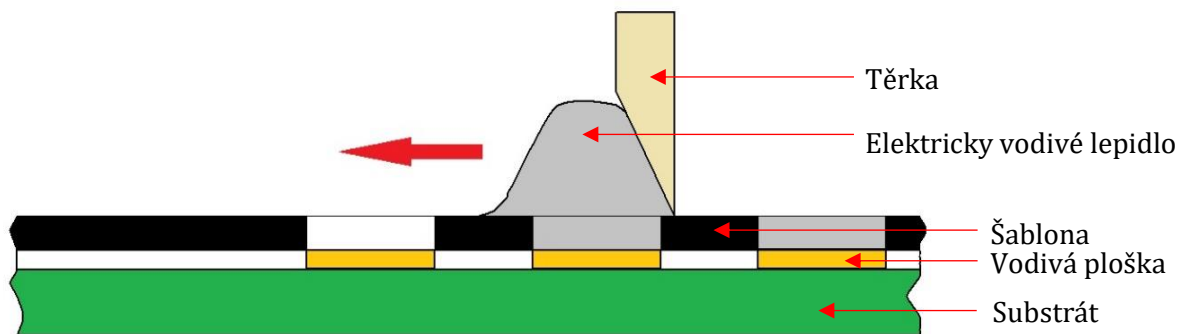
Metoda nanášení lepidla do jisté míry ovlivňuje vlastnosti lepeného spoje. Možných technik nanášení je velké množství a je možné je rozlišovat například na základě preciznosti nanášení, či rychlosti zhotovování spojů. Nejčastěji se však dělí podle rozlohy plochy, na kterou se má lepidlo nanést. Dále budou zkoumány nejvýznamnější, resp. nejčastěji používané způsoby nanášení vodivých lepidel. [7]



### 2.5.1 Šablonový tisk

Jedná se o nejčastěji užívanou techniku. Princip šablonového tisku (Obr. 9) spočívá v nanesení vrstvy lepidla na DPS skrze vhodnou šablonu. Tím je umožněno hromadné nanášení lepidla na větší množství vodivých plošek DPS naráz, v čemž spočívá i hlavní výhoda šablonového tisku. Tato metoda je tedy vhodná spíše pro masovou výrobu nežli pro kusovou. Naprosto nevhodná je pak pro dodatečné doplnění materiálu či nanášení na členitý povrch například v podobě částečně osazené DPS. Jedná se tedy o rychlý a v případě precizního vycentrování šablony i přesný způsob nanášení materiálu. Samotná šablona je tvořena kovovou deskou malé tloušťky (typicky 0,2 mm), do které jsou vyřezány, vypáleny, či vyleptány požadované vzory pro nanášení lepidla. Tloušťka šablony spolu s viskozitou lepidla pak udávají tloušťku vrstvy naneseného lepidla. Tato technologie byla využita při výrobě vzorků v experimentální části této práce, proto je dále rozepsán nástin postupu nanášení. [7, 10, 11, 18]

Při šablonovém tisku se umístí šablona na DPS a důkladně se vystředí vůči vodivým ploškám, na které má být lepidlo nanášeno. Poté se ke kraji matrice nanese vrstva lepidla. Lepidlo se následně rozetře třerkou po šabloně v dopředném a zpětném směru, aby došlo k rovnoměrnému nánosu lepidla na DPS skrze odhalená okénka matrice. V dalším kroku se matrice odstraní, a protože je nanášené lepidlo dostatečně viskózní, nedojde po odstranění šablony k rozlití materiálu po desce. Tím je lepidlo „natisknuto“ pomocí šablony na DPS a celý proces může pokračovat osazením součástek a následným vytvrzením lepidla.

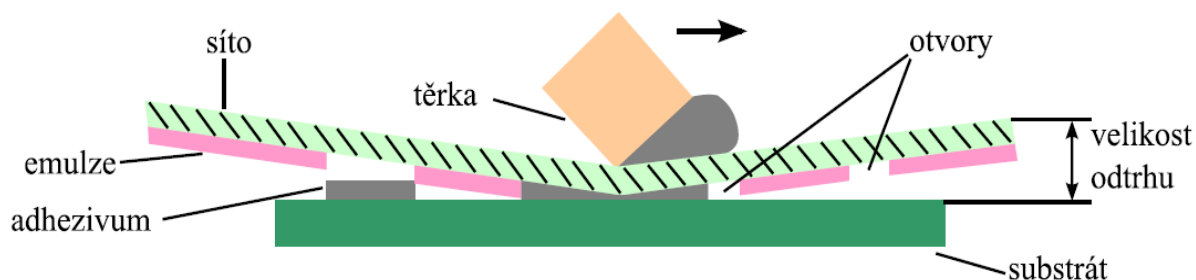


Obr. 9 Průběh šablonového tisku

### 2.5.2 Sítotisk

Sítotisk (Obr. 10) je technologicky velmi podobný šablonovému tisku. Pro správnou funkci musí být síto také vhodným způsobem upraveno, aby protlačované lepidlo vytvářelo požadované vzory na DPS. Zde však motiv není vyřezáván do desky, jako je to v případě šablonového tisku. Nedochozí tedy k ubírání materiálu matrice, ale naopak se materiál přidává, čímž se na sítu vytváří požadovaná maska. K tomuto maskování se používají dvě technologie. Jedná se o přímé a nepřímé maskování.

Přímá technologie vytváří motiv fotocestou. Tedy nanesením fotocitlivé emulze do okének síta, následným osvětlením UV zářením skrze masku s požadovaným vzorem (vytvrzením) a v závěru osprchováním vývojkou dojde k oplachu neozářené emulze tedy zamaskované části síta. Tímto postupem se získá zamýšlený motiv. Nepřímé maskování je pak způsobeno přelepením síta plastovou či kovovou fólií, čímž opět dojde k zamezení průniku lepidla na nevhodných místech síta. [3, 4, 10, 15]



Obr. 10 Ilustrační obrázek sítotisku [10]

### 2.5.3 Dispenzní nanášení

Dispenzní nanášení je také známé pod pojmem vytlačování z duté jehly. Jak tento alternativní název napovídá, lepidlo je dopravováno na DPS ze zásobníku kapilárou pomocí dávkovače. Z této sestavy je adhezivum vytlačováno pomocí tlakového plynu či šroubového systému. Změna dávkování pojivé hmoty je umožněna změnou kapiláry, tedy volbou kapiláry s vhodnějším průměrem, v kombinaci s regulací doby působení tlakového plynu či dobou otáčení šroubového systému.

Jehly bývají nejčastěji celokovové. Tato technologie je vhodná jak pro manuální nanášení, tak pro automatizovanou výrobu. Právě možnost automatizace významně zrychluje a zefektivňuje výrobu, díky čemuž se zároveň zlepšuje ekonomická stránka výrobního procesu. [7, 10, 18]

### 2.5.4 Nanášení namáčenou jehlou

V tomto případě jsou kapičky elektricky vodivého lepidla nanášeny na požadovaná místa díky jehličce či více jehličkám, které bývají typicky z kovu. V případě většího počtu jehliček jsou tyto hroty uspořádány tak, aby odpovídaly měděným ploškám na DPS. Jehličky jsou pak namáčeny do vrstvy lepidla o tloušťce cca 300  $\mu\text{m}$ . Lepidlo je umístěno v mělké nádobě, kdy po namočení zůstává na jehličkách cca 150  $\mu\text{m}$  tloušťky lepidla. Takto namočené jehličky jsou následně přemístěny nad DPS, kde následným dotykem hrotů a měděných plošek dojde k přenesení lepidla do určených míst. V případě použití jedné jehly je princip nanášení podobný. Pohyb jediné jehly je řízen programově, proto je nastavování polohy jednoduché, ale samotný proces je o poznání delší než v případě více jehel. [7, 10, 19]

## 2.6 Povrchové úpravy DPS

Pro zlepšení elektrických a mechanických vlastností spojů bývají vodivé plošky DPS často opatřeny speciální povrchovou úpravou. Ta zároveň chrání povrch DPS před oxidací a dalšími nežádoucími jevy. V případě pájení je dalším významným důvodem pro aplikaci povrchové úpravy smáčivost povrchu, která je povrchovou úpravou výrazně ovlivněna. Mezi nejvýznamnější povrchové úpravy patří níže uvedený výčet. [7, 20]

- **HAL/HASL** (*Hot Air Solder Levelling*), pocínování

Jedná se o oblíbenou a často využívanou povrchovou úpravu, kde je krycí materiál tvořen pájkou. Jedním z mnoha typů a složení může být například slitina Castin® ve složení Sn 93 – 98 %, Ag 1,5 – 3,5 %, Cu 0,7 – 2,2 % a Sb 1,2 – 2 %.

Výroba probíhá ponořením DPS do tekuté pájky. Po vytažení z lázně je přebytečná pájka odstraněna horkovzdušným nožem. [7, 21]

- **ENIG** (*Electroless Nickel Immersion Gold*), pozlacení

Při tomto typu povrchové úpravy se přímo na upravovanou plošku nejprve nanese vrstva niklu o tloušťce 3 – 6 μm. Na nikl se pak nanáší vrstva zlata, která dosahuje tloušťky typicky 0,05 – 0,1 μm. Hlavním úkolem zlata je zejména ochrana niklu před oxidací. Významnou výhodou je v tomto případě dobrá pájitelnost i při použití bezolovnatých pájek či odolnost povrchu vůči opakovanému přetavení. Úskalím této povrchové úpravy je pak nižší stabilita spoje utvořeného pájením. Projevem takovéto nestability pak bývá zčernání části pájecí plošky. [7, 20, 21]

- **IS** (*Immersion Silver*), postříbření

Výhodou této úpravy je smáčivost, odolnost vůči opakovanému přetavení a také dostatečná doba skladování (6 – 12 měsíců). Doporučená tloušťka vrstvy je pak v rozmezí 0,08 – 0,16 μm. Rovinnost povrchu podporuje kontaktování termokompresí či ultrazvukem. [7]

- **OSP** (*Organic Solderability Preservatives*)

Organická vrstva (zpravidla oranžové barvy) se nanáší přímo na měď v tloušťce 0,2 – 0,5 μm. Z pohledu pájení se tato úprava vyznačuje nevhodností pro použití bezolovnatých pájek. Důvodem je nižší teplotní odolnost tohoto povrchu ve srovnání s kovovými povrchy. Nevhodná je i pro termokompresi, či ultrazvukové kontaktování. [7, 20]

## 3 PRAKTICKÁ ČÁST

### 3.1 Úvod do experimentu

Praktická část je zaměřena na hodnocení elektrických a mechanických vlastností lepených spojů v závislosti na povrchové úpravě DPS a typu použitého lepidla. Pro experiment bylo zvoleno dvousložkové lepidlo ELPOX AX 15N a jednosložková lepidla ELPOX SC515 a ELPOX AX 70MN. Poslední uvedené lepidlo je pak staršího data v porovnání s ostatními, které byly před experimentem nové a ještě nepoužité. Pro každý typ lepidla byl vybrán vhodný způsob vytvrzování na základě doporučení z datasheetu. V případě jednosložkového lepidla ELPOX SC515 bylo zvoleno vytvrzování po dobu 15 minut při teplotě 180 °C. U lepidla ELPOX AX 70MN se vytvrzovalo po dobu 10 minut při teplotě 180 °C a pro dvousložkové lepidlo ELPOX AX 15N se pak jeví jako nejvhodnější vytvrzování po dobu 15 minut při teplotě 150 °C. Pro větší přehlednost je níže uvedena tabulka (Tab. 2) s vytvrzovacími podmínkami pro jednotlivé varianty lepidel. [22, 23, 24]

Tab. 2 Parametry použitých lepidel

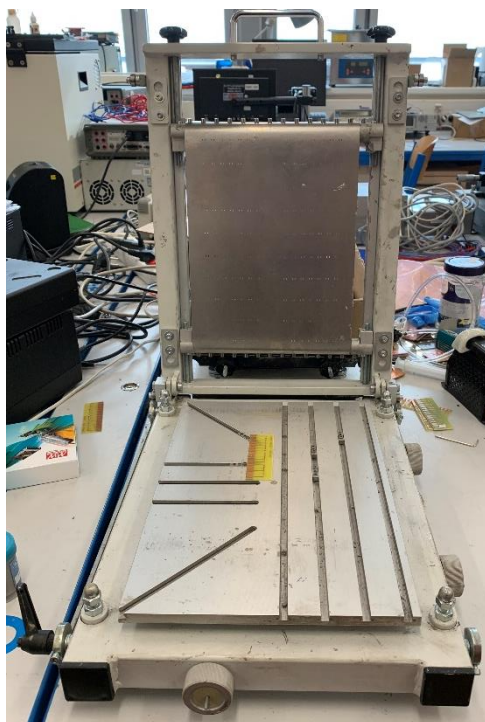
Typ lepidla	Počet složek	Obsah plniva	Podmínky vytvrzování
ELPOX SC 515	jednosložkové	66 ± 2%	180 °C – 15 min.
ELPOX AX 70MN	jednosložkové	70 ± 1%	180 °C – 10 min.
ELPOX AX 15N	dvousložkové	60 ± 1%	150 °C – 15 min.

Pro účely experimentu bylo dohromady zhotoveno 700 vzorků lepených spojů (bez započtení vadné série, o které je zmínka v další části práce). Byly zkoumány 4 povrchové úpravy DPS. Jednalo se konkrétně o pozlacené, pocínované (HAL), pocínované (chemický cín) a měděné plošky. Na každou povrchovou úpravu připadala 3 lepidla. Na jednu povrchovou úpravu a jeden typ lepidla tedy vyšlo 10 plošných spojů, resp. 5 v případě lepidla ELPOX AX 70MN, a každý obsahoval 7 rezistorů.

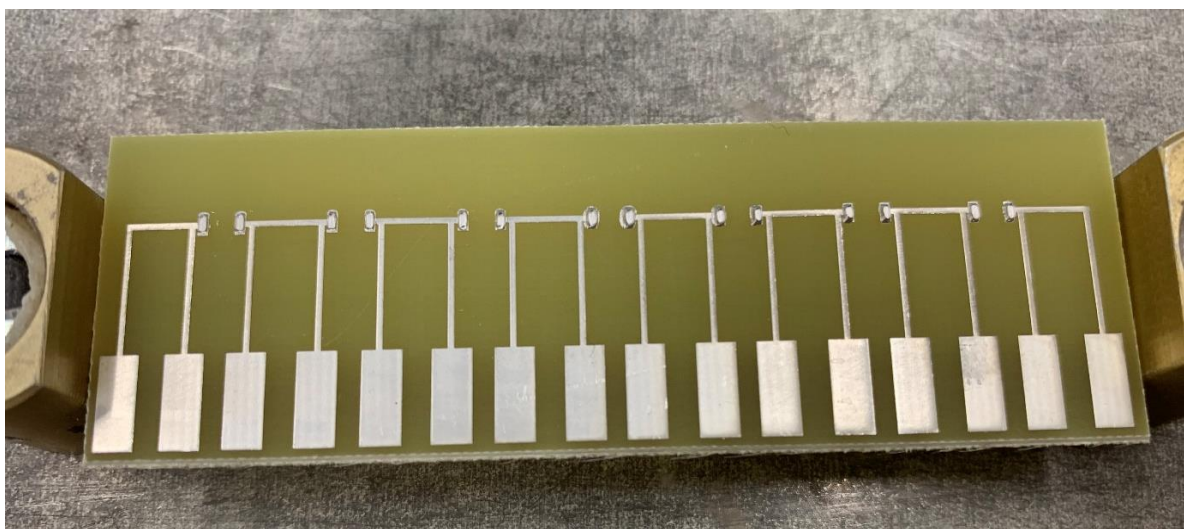
### 3.2 Výroba vzorků

Měřené vzorky byly zhotoveny z DPS se zvolenou povrchovou úpravou, elektricky vodivého lepidla a rezistoru pro povrchovou montáž (SMD) s nulovou ohmickou hodnotou. Použité DPS byly již při výrobě navrženy pro měření čtyřbodovou metodou a opatřeny příslušnou povrchovou úpravou. Návrh a výroba DPS tedy není součástí experimentu.

Z důvodu velkého množství stejných vzorků byla pro nanášení lepidla zvolena technologie šablonového tisku. Tato metoda umožňuje rychlé a při důkladném nastavení šablony i přesné nanášení lepidla, čehož zde bylo s výhodou využito. Na obrázku (Obr. 11) je zachycena šablona s rámem, připravená pro šablonový tisk a na dalším obrázku (Obr. 12) je patrná DPS s již naneseným lepidlem na vodivých ploškách.



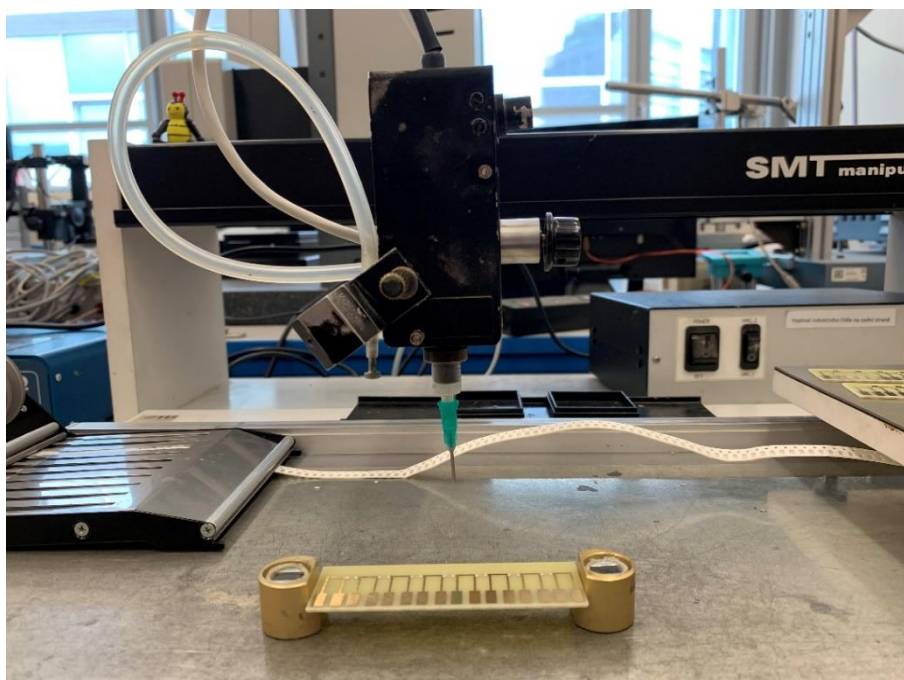
Obr. 11 Šablona upevněná v rámu



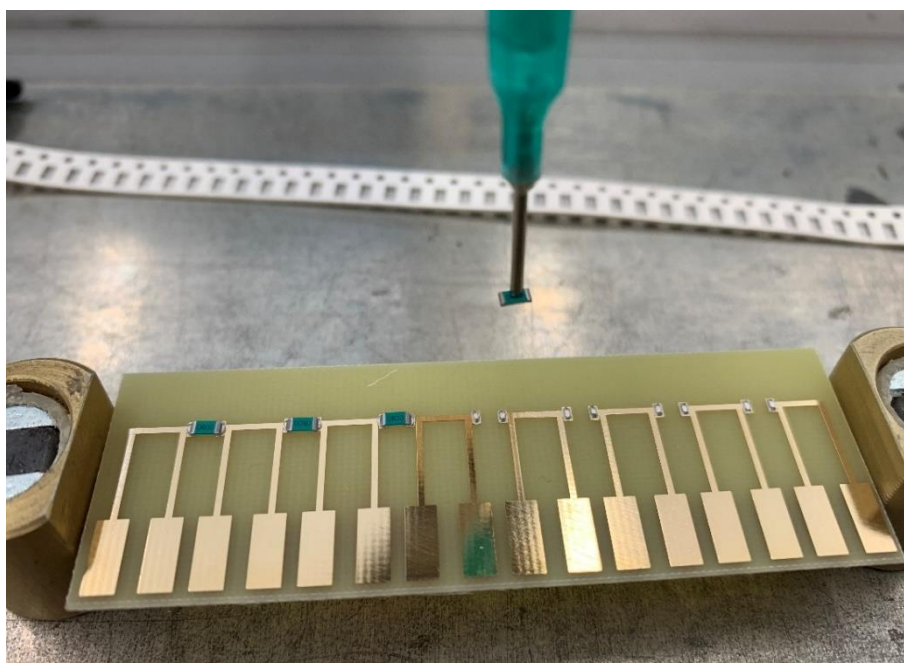
Obr. 12 Pocínovaná DPS s lepidlem naneseným šablonovým tiskem



Po nanesení lepidla následovalo osazení DPS součástkami. K tomu byla využita vakuová pinzeta uvedená na obrázku níže (Obr. 13). Nejprve byl hrot pinzety přiložen k rezistoru s nulovou ohmickou hodnotou (skutečná hodnota se pohybuje kolem  $17\text{ m}\Omega$ ). Tím byla součástka přisáta a po umístění do zamýšlené pozice na DPS byla uvolněna od hrotu a zachycena na požadovaném místě. Průběh osazování je uveden na následujícím obrázku (Obr. 14). Tímto postupem byly osazeny všechny desky.



Obr. 13 Vakuová pinzeta pro osazování DPS součástkami



Obr. 14 Průběh osazování pozlacené DPS

V dalším kroku došlo k vytvrzení lepidla v horkovzdušné peci Horizont SPT 200 (Obr. 15) při doporučených podmínkách vytvrzování.

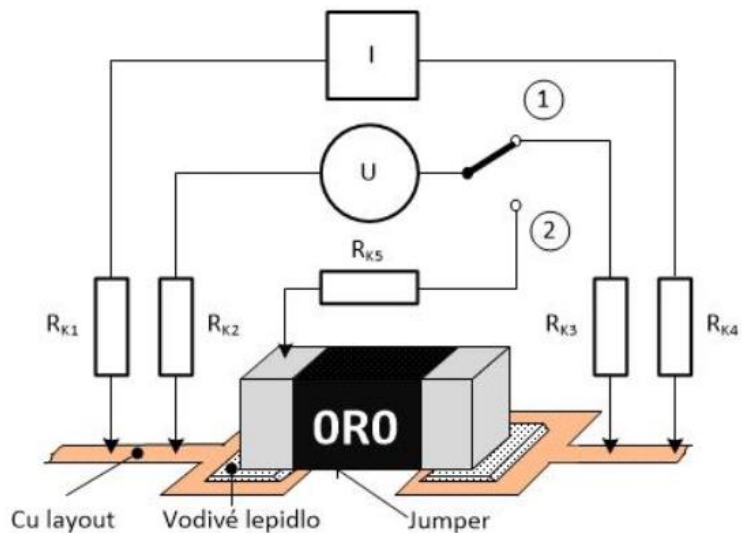


Obr. 15 Horkovzdušná pec při vytvrzování sady vzorků

### 3.3 Měření elektrických vlastností spojů

Po vytvrzení lepidla následovalo měření elektrických vlastností. Elektrické vlastnosti je možné zkoumat z různých hledisek. Nabízí se mnoho měřitelných veličin a faktorů, na jejichž základě lze posoudit kvalitu spoje, například šum či nelinearita VA charakteristiky. Jedním z nejvýznamnějších ukazatelů elektrických vlastností je ale elektrická vodivost. Díky známému vztahu 1, který je uveden v kapitole 2.2.2., lze vodivost spoje snadno zjišťovat pomocí velikosti elektrického odporu.

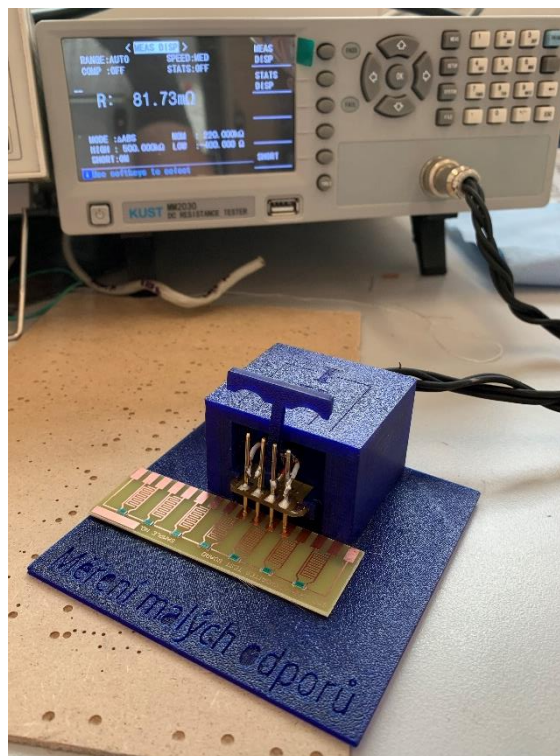
Měření odporu bylo prováděno pomocí čtyřbodové metody s použitím miliohmmetru KUST MM2030 DC RESISTANCE METER. Princip této metody (Obr. 16) je pak založen na dvou párech vývodů – pro měření proudu a napětí. Čelisti měřidla jsou přitisknuty na vhodná místa DPS, která jsou zvolena na základě motivu plošného spoje. Při měření touto metodou je využíváno faktu, že se neuplatní odpor přívodů pro měření proudu, ani jejich přechodový odpor. Prakticky lze zanedbat i odpor přívodů k voltmetru, protože odpor voltmetru mnohonásobně převyšuje odpor měřeného vzorku. Proud voltmetrem je proto velmi malý oproti proudu vzorkem, a tedy lze odpor napěťových přívodů zanedbat. [25]



Zde  $I$  ... zdroj proudu,  $U$  ... voltmetr,  $R_{ki}$  ... kontaktní odpory, ORO ... označení „nulového“ odporu (jumper).  
 V poloze 1 jsou měřeny oba adhezní spoje a v sérii s nimi „nulový“ odpor. V poloze 2 je měřen jen odporu jednoho adhezního spoje.

Obr. 16 Schématický obrázek čtyřbodové metody [14]

Při samotném měření bylo nutné vždy nejprve zkalibrovat měřicí přístroj (Obr. 17) na nulovou hodnotu pomocí přímého spojení měřicích vývodů, aby dále zjišťované hodnoty měly co nejvyšší přesnost.



Obr. 17 Přípravek pro měření čtyřbodovou metodou



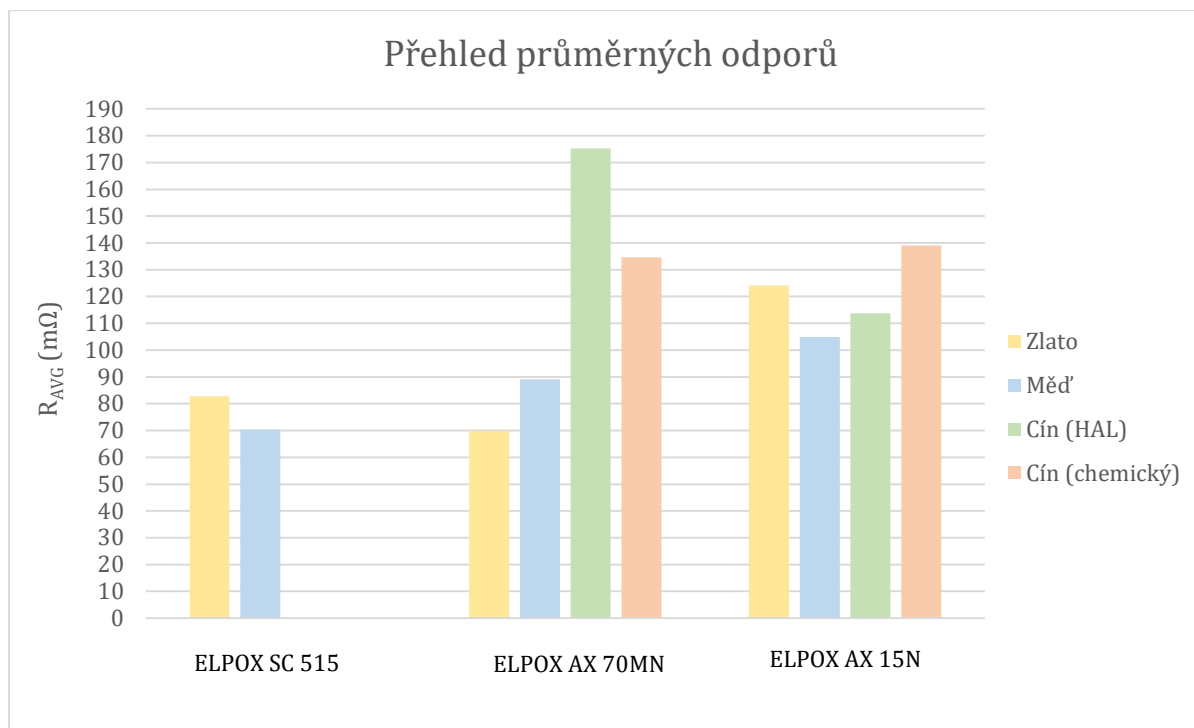
### 3.3.1 Naměřené hodnoty elektrických parametrů

Pro velké množství vzorků a snazší orientaci v naměřených hodnotách je níže uvedená tabulka (Tab. 3) zaměřena pouze na maximální ( $R_{MAX}$ ), minimální ( $R_{MIN}$ ) a průměrné hodnoty ( $R_{AVG}$ ) elektrických odporů, které jsou dále doplněné o medián ( $R_{MED}$ ) a směrodatnou odchylku ( $\sigma$ ).

Tab. 3 Naměřené a vypočtené hodnoty elektrických parametrů

Povrchová úprava DPS	Zkoumané veličiny	Typ lepidla		
		jednosložkové		dvousložkové
		ELPOX SC 515	ELPOX AX 70MN	ELPOX AX 15N
Zlato	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	240,1	107,35	308,3
	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	40,4	30,42	11,41
	$\sigma$ (m $\Omega$ )	27,12	11,94	36,92
	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	74,83	69,86	117,7
	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	82,76	69,75	124,10
Měď	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	106,11	120,67	239,6
	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	60,24	74,1	11,35
	$\sigma$ (m $\Omega$ )	6,89	11,02	31,84
	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	69,56	86,83	108,55
	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	70,42	89,13	104,86
Cín (HAL)	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	1 038 000	342,1	186,36
	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	415,1	103	86,03
	$\sigma$ (m $\Omega$ )	220 834	57,18	16,09
	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	20 619,5	167,96	111,97
	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	128 702,79	175,24	113,78
Cín (chemický)	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	88 210	244,8	253,1
	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	157,1	109,03	91,51
	$\sigma$ (m $\Omega$ )	15 549,8	25,46	32,24
	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	447,55	131,23	111,97
	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	4 948,5	134,61	139,02

Z průměrných hodnot je dále vytvořen graf (Graf 1) znázorňující závislost elektrického odporu spoje na použitém elektricky vodivém lepidle a povrchové úpravě DPS.



Graf 1 Přehled průměrných odporů

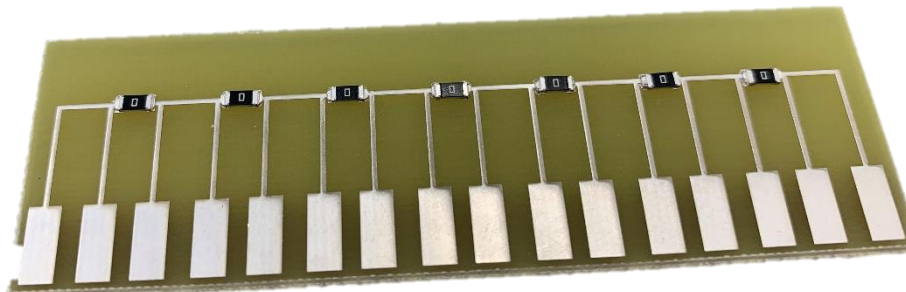
V grafu nejsou u lepidla ELPOX SC 515 uvedeny sloupce pro oba typy pocínování. Je to z toho důvodu, že v této kombinaci lepidla a povrchové úpravy dochází k výraznému nárůstu elektrického odporu. Přidáním těchto sloupců by tedy byly ostatní sloupce nečitelné a graf tak znehodnocen. Z této skutečnosti však vyplývá, že lepidlo ELPOX SC 515 je zcela nevhodné pro aplikaci na pocínované povrchy. Naproti tomu se jako nejvhodnější jeví kombinace lepidla ELPOX AX 70MN a pozlacených plošek DPS. V těsném závěsu se pak pohybuje lepidlo ELPOX SC 515 nanesené na měděné plošky DPS.

Významným poznatkem z měření je tedy fakt, že lepidlo ELPOX SC 515 vykazuje velmi vysoké hodnoty odporu v případě pocínovaných plošek DPS. Ty se pohybují v řádu jednotek až stovek ohmů. K tomuto poznatku však vedla cesta skrze vadnou sérii vzorků, která je popsána v následující podkapitole.

### 3.3.1.1 Odhalení vlivu pocínování součástek na lepidlo ELPOX SC 515

Z výše zmíněného je patrné, že v případě lepidla ELPOX SC 515 hraje povrchová úprava DPS klíčovou roli. Tento fakt však nebyl odhalen u série vzorků, jejichž hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab. 3), ale byl odhalen již dříve. Před touto sérií vzorků s rezistory určenými pro vodivé lepení byla totiž zhotovena série využívající jiné typy SMD rezistorů o stejné ohmické hodnotě, které pro lepení určeny nebyly. Pro jejich vytvrzení byly zvoleny 2 způsoby vytvrzování podle doporučení z datasheetu. Jednalo se o vytvrzení při teplotě 150 °C po dobu 120 minut a při teplotě 200 °C po dobu 5 minut.

Po zhotovení 560 ks vzorků (7 rezistorů na jedné desce, 20 desek, 4 provedení povrchových úprav) a měření jejich elektrických vlastností byly zjištěny hodnoty, které se pohybovaly v řádu jednotek a desítek, občas až stovek ohmů. Příklady naměřených hodnot a fotografie testovacího vzorku jsou uvedeny níže.

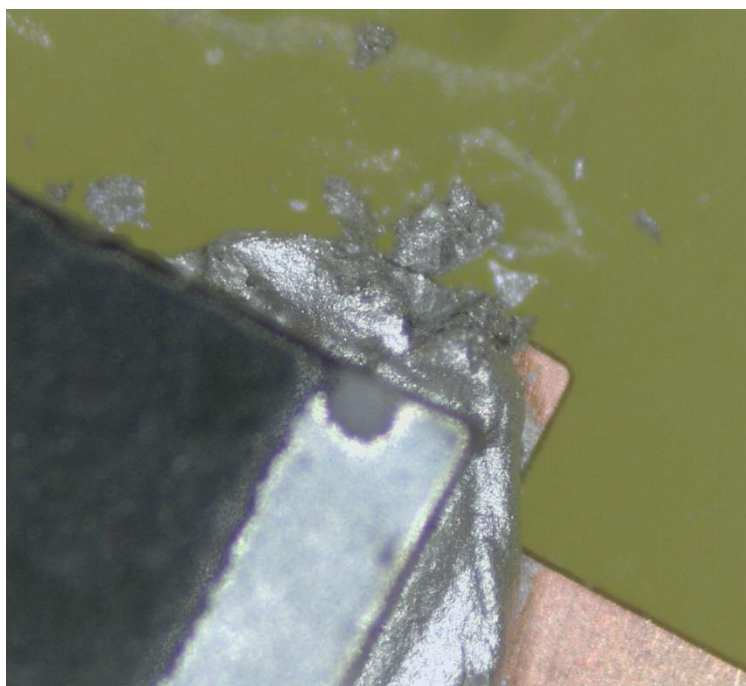


Obr. 18 Vadná série vzorků – lepidlo ELPOX SC 515, cín (chemický)

Tab. 4 Vadná série vzorků – lepidlo ELPOX SC 515

<b>R (<math>\Omega</math>)</b>			
Měděný povrch	Pocínovaný (chemický cín) povrch	Pozlacený povrch	Pocínovaný (HAL) povrch
0,9	1,7	32	54,7
1,5	4,5	740	75,7
12,9	4	10,7	50,8
10,7	8,3	4,9	54,4
4,8	8,7	3,7	102
17,5	57	420	10,9
6,5	6,3	12 000	37,9

I přes pečlivé osazení DPS součástkami a dodržení podmínek vytvrzování byly naměřené hodnoty takto nepřijatelně vysoké. Po zkoumání vybraných spojů pod mikroskopem bylo zjištěno, že lepidlo není příliš vytvrzené, jelikož bylo možné nástrojem spoj deformovat, aniž by k tomu byla vynaložena výrazná mechanická síla. Díky tomuto poznatku bylo přistoupeno k dalšímu vytvrzení při teplotě 150 °C po dobu 15 minut, které ale také nevedlo k výraznému snížení elektrického odporu. Po opětovném zkoumání pod mikroskopem bylo navíc zjištěno, že došlo ke zkřehnutí lepidla, což dokládá i obrázek uvedený dále (Obr. 19).



Obr. 19 Zkřehnuté lepidlo ELPOX SC 515 po opětovném vytvrzení

Postupně pak byly eliminovány další možné příčiny takto vysokých hodnot odporů. Tyto příčiny zahrnovaly například nedostatečné promíchání lepidla, které bylo v době výroby vzorků nové a tedy ještě nepoužité. Postupnými kroky se dospělo až k záměně součástek za jiný typ SMD rezistorů se stejnou ohmickou hodnotou. Poté proběhlo měření odporů spojů s těmito novými rezistory (zelené pouzdro). Měřením bylo zjištěno, že spoje dosahují hodnot v řádu desítek mΩ.

Zpětně tedy bylo odhaleno, že vývody původních rezistorů (černé pouzdro) jsou opatřeny vrstvou cínu, který byl stanoven jako příčina několikanásobného zvětšení elektrického odporu spoje. Tento předpoklad dokládají i výsledky měření s novými typy rezistorů, kde se projevuje výrazný nárůst odporu v případě úpravy povrchu DPS pocínováním. Důsledkem původní série spojů je tedy poznatek, že zmíněné lepidlo ELPOX SC 515 je nevhodné pro aplikaci na pocínované povrchy, protože dochází k významnému nárůstu elektrického odporu spoje. Níže uvedený obrázek (Obr. 20) slouží pro vizuální porovnání rezistoru určeného pro elektricky vodivé lepení (vlevo) a rezistoru pro pájení (vpravo).



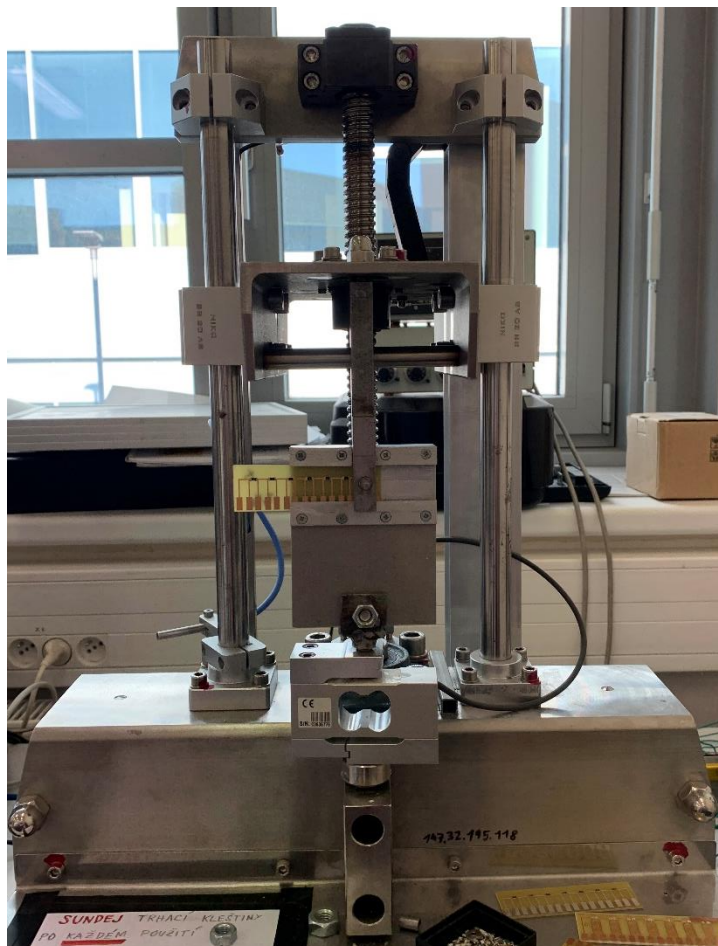
Obr. 20 Vlevo rezistor pro lepení, vpravo rezistor pro pájení

### 3.4 Měření mechanických vlastností spojů

Mechanické vlastnosti, stejně jako ty elektrické, je možné posuzovat z více hledisek. Podle požadovaných kritérií na kvalitu a mechanickou odolnost lze zkoumat například tvrdost, tuhost, houževnatost a další. Dále posuzovanou mechanickou vlastností bude zkouška adheze lepeného spoje, resp. pevnost spoje ve stříhu.

#### 3.4.1 Zkouška adheze

Jak bylo zmíněno, zkouška adheze spojů slouží k odhalení pevnosti spoje ve stříhu. Jedná se o destruktivní zkoušku, při které na přilepenou součástku působí síla ve vodorovném směru vzhledem k povrchu DPS. Tímto testem tedy byla změřena síla, při které došlo k utržení součástky z původního místa. Pro provedení trhací zkoušky byla použita speciální aparatura uvedená na obrázku níže (Obr. 21). Vzorek byl umístěn mezi čelisti trhacího zařízení a průběh stříhu byl řízen programově a automaticky zaznamenán.



Obr. 21 Stroj pro provádění zkoušky adheze spojů

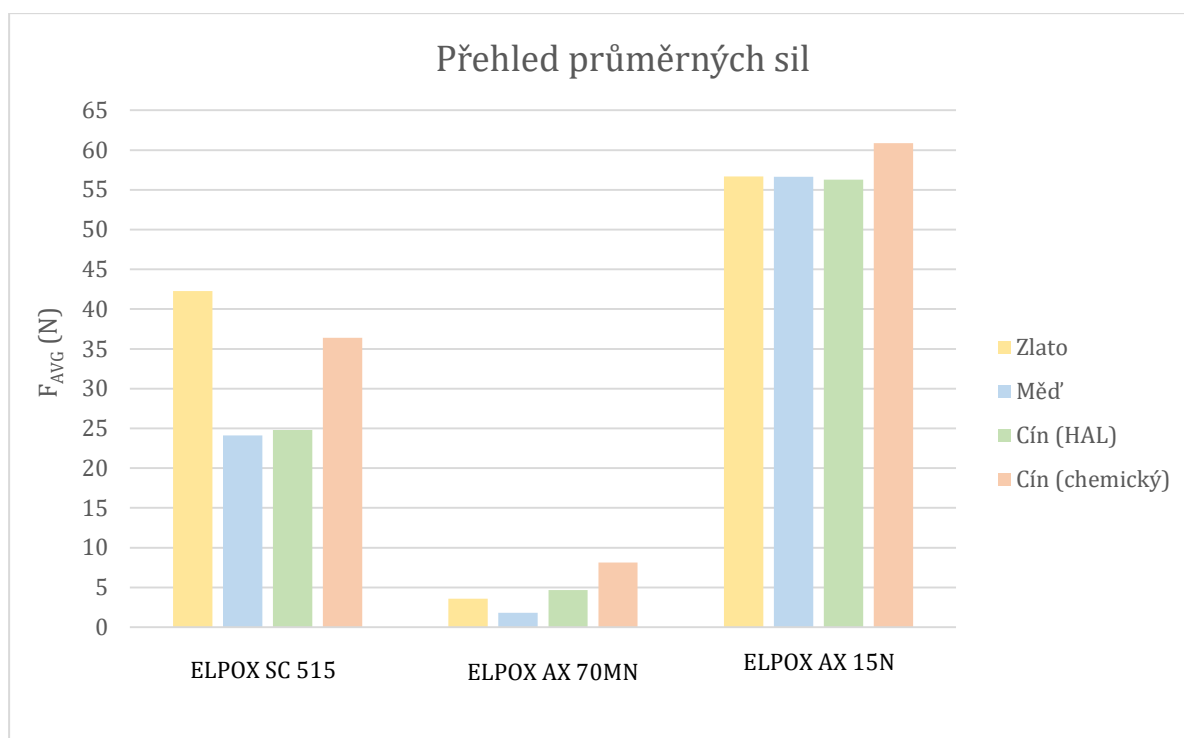
### 3.4.2 Naměřené hodnoty mechanických parametrů

Stejně jako v případě elektrických parametrů spojů jsou i zde u mechanických parametrů vyzdvíženy minimální, maximální a průměrné hodnoty doplněné o medián a směrodatnou odchylku. Koncept níže uvedené tabulky (Tab. 5) je stejný jako v případě tabulky s naměřenými elektrickými parametry (Tab. 3), tedy i použité indexy reprezentují stejné statistické hodnoty.

Tab. 5 Naměřené a vypočtené hodnoty mechanických parametrů

Povrchová úprava DPS	Zkoumané veličiny	Typ lepidla		
		jednosložkové		dvousložkové
		ELPOX SC 515	ELPOX AX 70MN	ELPOX AX 15N
Zlato	$F_{MAX}$ (N)	90,48	11,73	100,56
	$F_{MIN}$ (N)	16,44	1,02	31,54
	$\sigma$ (N)	15,33	2,2	14,3
	$F_{MED}$ (N)	40,97	3,61	55,39
	$F_{AVG}$ (N)	42,27	3,58	56,67
Měď	$F_{MAX}$ (N)	48,31	6,99	103,07
	$F_{MIN}$ (N)	6,53	0,16	18,04
	$\sigma$ (N)	8,27	1,31	18,66
	$F_{MED}$ (N)	23,57	1,53	59,69
	$F_{AVG}$ (N)	24,11	1,80	56,65
Cín (HAL)	$F_{MAX}$ (N)	47,14	9,04	93,48
	$F_{MIN}$ (N)	9,56	2,55	24,96
	$\sigma$ (N)	8,91	1,83	12,05
	$F_{MED}$ (N)	22,96	4,27	55,36
	$F_{AVG}$ (N)	24,80	4,68	56,28
Cín (chemický)	$F_{MAX}$ (N)	74,58	16,02	104,08
	$F_{MIN}$ (N)	15,57	3,03	32,01
	$\sigma$ (N)	13,82	3,71	16,62
	$F_{MED}$ (N)	31,96	8,68	62,81
	$F_{AVG}$ (N)	36,41	8,13	60,87

Graf uvedený dále (Graf 2) pak představuje závislosti průměrných sil vyvinutých pro utržení součástky na použitém lepidle a povrchové úpravě DPS.



Graf 2 Přehled průměrných sil

Z grafu je na první pohled patrné, že nejvyšších průměrných sil vyvinutých při zkoušce adheze bylo dosahováno u dvousložkového lepidla ELPOX AX 15N u něhož se průměrná síla pohybuje okolo 55 N a to prakticky nezávisle na typu povrchové úpravy. Důvodem může být větší objem vazební složky v lepidle. Tento typ lepidla totiž obsahuje méně vodivých částic než ostatní typy, o čemž je možné se přesvědčit z tabulky parametrů lepidel (Tab. 2). Na opačném konci je pak lepidlo ELPOX AX 70MN, kde jsou průměrné síly naopak nejnižší a žádná nepřesáhla 10 N. Takto nízké síly lze zdůvodnit stářím lepidla, kdy vazební složka mohla již do jisté míry zdegradovat, díky čemuž lepidlo částečně přišlo o svou adhezi. Z výše uvedeného grafu lze obecně vyvodit, že plošky upravené chemickým cínem si vedou dobře u všech typů lepidel. Tedy že všechna zkoumaná lepidla po vytvrzení vykazují dobrou pevnost spoje ve stříhu v případě této povrchové úpravy.

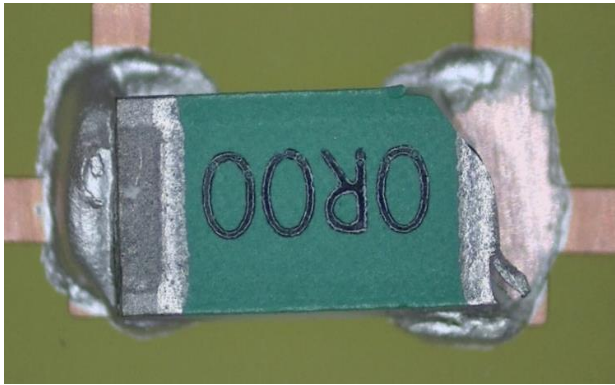
S ohledem na použitá lepidla lze jednoznačně konstatovat, že dvousložkové lepidlo si drží mechanickou pevnost prakticky nezávisle na povrchové úpravě DPS. Jediný drobný výkyv lze pozorovat v případě úpravy chemickým cínem. U ostatních typů lepidel jsou výkyvy výraznější, ale již se neobjevují změny řádu, jako tomu bylo v případě měření elektrických odporů. Lze tedy prohlásit, že pevnost spoje není tolik závislá na povrchové úpravě DPS jako elektrický odpor spoje.



### 3.4.2.1 Speciální případy výsledků trhací zkoušky

Z obrázku (Obr. 22) je patrné, že v tomto případě došlo při trhací zkoušce k destrukci součástky. Pravý horní roh je zcela odlomen od zbytku rezistoru. Fotografie naznačuje, že spoj byl pevnější než samotná součástka. Takovýto výsledek by mohl být očekáván v případě, že by se měření týkalo spojů tvořených pájecí pastou. Při použití pájecí pasty jsou spoje výrazně pevnější a tento jev, při kterém dojde k rozlomení součástky, nastává tedy častěji. V případě zkoumání lepených spojů je tento výsledek neočekávaný.

Další zajímavost je zachycena na obrázku níže (Obr. 23). Zde je patrné netypické odlomení součástky od DPS, kdy i po zkoušce adheze drží rezistor jedním vývodem na původním místě, zatímco druhý vývod součástky je již uvolněn. Zároveň je patrné, že lepidlo vykazuje lepší přilnavost k povrchu součástky než k pocínované plošce na DPS



Obr. 22 Rozlomený rezistor



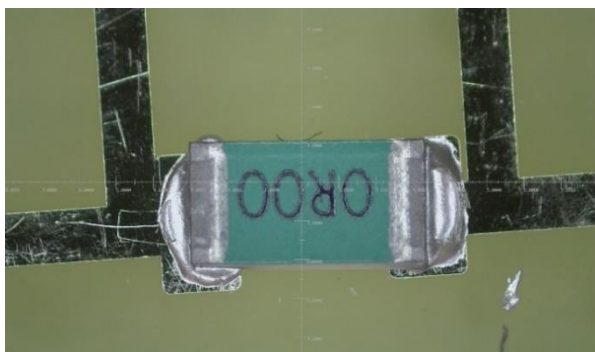
Obr. 23 Rezistor po zkoušce adheze neopustil svou pozici na DPS

## 3.5 Rozbor vybraných vzorků

Pro každou kombinaci ECA a povrchové úpravy byl vybrán jeden reprezentativní vzorek spoje, který bude v následující části blíže rozebrán a popsán s ohledem na jeho elektrické a mechanické vlastnosti. Všechny níže uvedené tabulky pak obsahují hodnoty naměřené na konkrétním vzorku (červeně zvýrazněné) a pro přehlednost i hodnoty vztahující se na celý soubor vzorků, jako je minimální (index MIN), maximální (index MAX) a průměrná hodnota (index AVG) či medián (index MED) a směrodatná odchylka ( $\sigma$ ).



### 3.5.1 ELPOX SC 515, pozlacené plošky DPS

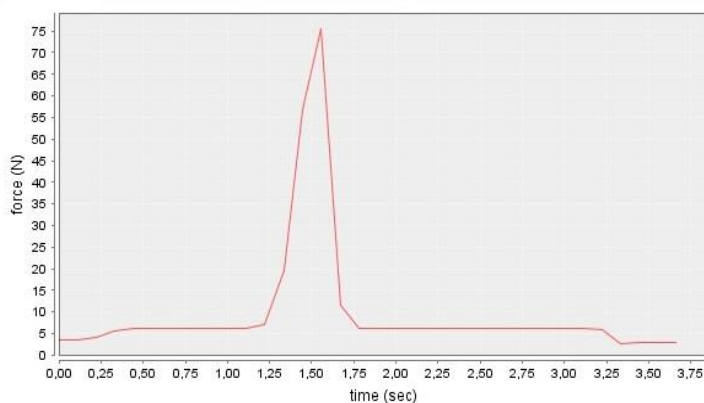


Obr. 24 Umístěný rezistor, ELPOX SC 515, zlato



Obr. 25 Utržený rezistor, ELPOX SC 515, zlato

Tab. 6 Hodnoty, ELPOX SC 515, zlato



Graf 3 Průběh síly, ELPOX SC 515, zlato

<b>ELPOX SC 515, zlato</b>			
<i>vzorek 10, číslo rezistoru 6</i>			
Síly		Elektrické odpory	
$F_{MAX}$ (N)	90,48	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	240,1
$F_{MIN}$ (N)	16,44	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	40,4
$\sigma$ (N)	15,33	$\sigma$ (m $\Omega$ )	27,12
$F_{MED}$ (N)	40,97	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	74,83
$F_{AVG}$ (N)	42,27	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	82,76
<b>F (N)</b>	<b>75,57</b>	<b>R (m<math>\Omega</math>)</b>	<b>80,74</b>

Z obrázku vlevo (Obr. 24) je patrné, že lepidlo bylo naneseno na plošky v celku přesně, tedy že relativně rovnoměrně pokrývá místa určená k nanesení a nepřetéká mimo plošky. Dále lze vypořadovat, že rezistor je na DPS usazen prakticky rovnoběžně s vývody.

Na obrázku vpravo (Obr. 25) je zobrazena DPS po zkoušce adheze spojů. Z obrázku je patrné, že po odtržení rezistoru z DPS se uvolnilo také velké množství lepidla. Na vývodech zbyly pouhé stopy po elektricky vodivém lepení. Z toho plyne, že lepidlo má lepší přilnavost k součástce, než k pozlacenému povrchu.

Průběh síly v grafu (Graf 3) naznačuje, že trhání bylo hladké, tedy že po navýšení silového působení na rezistor došlo během cca 0,25 s k úplnému utržení součástky. Úplným utržením součástky je zde myšlen stav, kdy při dalším pohybu trhacích čelistí již nebyla vyvíjena výrazná síla. Graf také odhaluje maximální dosaženou sílu, která se pohybuje mírně nad hranicí 75 N. To dokládá i naměřená hodnota 75,57 N.

Z tabulky (Tab. 6) je pak patrné, že naměřený odpor se jen velmi málo liší od průměrné hodnoty celého souboru. Rozdíl činí pouhé 2,02 mΩ. Větší rozdíl od průměrné hodnoty je pak zaznamenán v případě síly, při které došlo k utržení. Pro utržení tohoto rezistoru byla vyvinuta o cca polovinu větší síla, resp. o 44%, než jakou uvádí aritmetický průměr celého souboru.

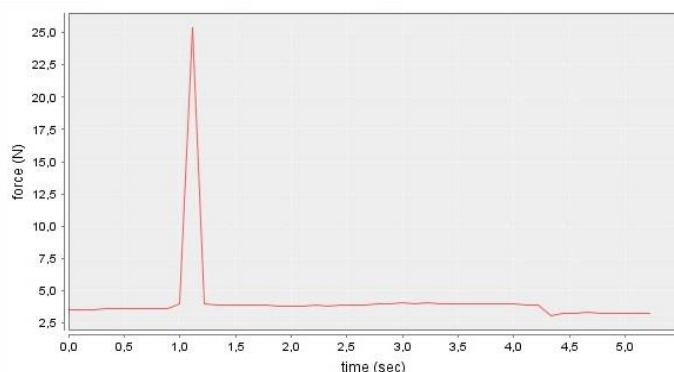
### 3.5.2 ELPOX SC 515, měděné plošky DPS



Obr. 26 Umístěný rezistor, ELPOX SC 515, měď



Obr. 27 Utržený rezistor, ELPOX SC 515, měď



Graf 4 Průběh síly, ELPOX SC 515, měď

Tab. 7 Hodnoty, ELPOX SC 515, měď

<b>ELPOX SC 515, měď</b>			
<i>vzorek 5, číslo rezistoru 2</i>			
Síly		Elektrické odpory	
F <sub>MAX</sub> (N)	48,31	R <sub>MAX</sub> (mΩ)	106,11
F <sub>MIN</sub> (N)	6,53	R <sub>MIN</sub> (mΩ)	60,24
σ (N)	8,27	σ (mΩ)	6,89
F <sub>MED</sub> (N)	23,57	R <sub>MED</sub> (mΩ)	69,56
F <sub>AVG</sub> (N)	24,11	R <sub>AVG</sub> (mΩ)	70,42
<b>F (N)</b>	<b>25,41</b>	<b>R (mΩ)</b>	<b>68,11</b>

Z obrázku vlevo (Obr. 26) lze vypořadovat, že v tomto případě se již nepovedlo nanést lepidlo tak vhodně jako v předchozím případě a že součástka je opět usazena relativně přesně na vodivé plošky. Na obrázku vpravo (Obr. 27) je pak vidět, že v případě pravé vodivé plošky zbyly po utržení pouze stopy po vodivém lepidle, ale na levé vodivé plošce se nachází i zbytky lepidla. Z tohoto pozorování vyplývá, že lepidlo ELPOX SC 515 lépe drží na měděném povrchu než na pozlaceném povrchu.

Síla, při níž došlo k utržení, je zde však nižší než u zlata. To dokládá hodnota síly v tabulce ale i průběh síly v grafu. Z tohoto průběhu je pak zřetelné, že trhání bylo i v tomto případě hladké, tedy že během cca 0,25 s došlo k úplnému utržení součástky.

Průměrné hodnoty (index AVG) v tabulce se pak mírně snížily v porovnání s pozlacenými ploškami, tedy došlo ke zlepšení průměrné vodivosti o cca 15 % ovšem za cenu snížení pevnosti spoje zhruba na polovinu. Trhací síla i elektrický odpor tohoto konkrétního vzorku spoje jsou pak přibližně stejné jako průměrné hodnoty.

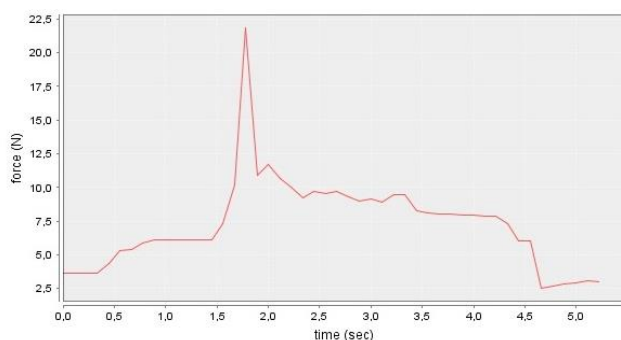
### 3.5.3 ELPOX SC 515, pocínované (HAL) plošky DPS



Obr. 28 Umístěný rezistor, ELPOX SC 515, cín (HAL)



Obr. 29 Utržený rezistor, ELPOX SC 515, cín (HAL)



Graf 5 Průběh síly, ELPOX SC 515, cín (HAL)

Tab. 8 Hodnoty, ELPOX SC 515, cín (HAL)

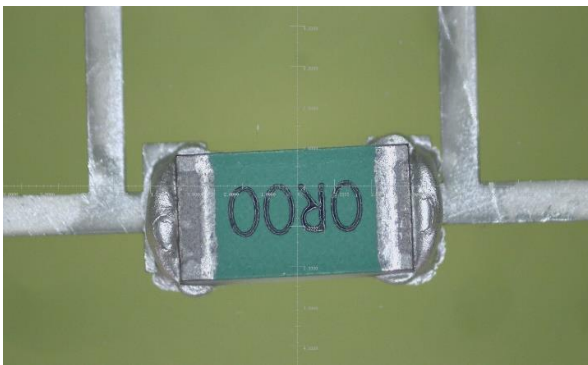
<b>ELPOX SC 515, cín (HAL)</b>			
<i>vzorek 3, číslo rezistoru 2</i>			
Síly		Elektrické odpory	
F <sub>MAX</sub> (N)	47,14	R <sub>MAX</sub> (mΩ)	1 038 000
F <sub>MIN</sub> (N)	9,56	R <sub>MIN</sub> (mΩ)	415,1
σ (N)	8,91	σ (mΩ)	220 834
F <sub>MED</sub> (N)	22,96	R <sub>MED</sub> (mΩ)	20 619,5
F <sub>AVG</sub> (N)	24,80	R <sub>AVG</sub> (mΩ)	128 702,79
<b>F (N)</b>	<b>21,88</b>	<b>R (mΩ)</b>	<b>193 220</b>

V tomto případě bylo lepidlo naneseno přesně a rezistor byl správně vycentrován, jak dokládá obrázek vlevo (Obr. 28). Z obrázku (Obr. 29) je pak vidět, že po přitlačení součástky na místo došlo k vytlačení lepidla mimo vodivé plošky, o čemž je možné se přesvědčit díky skvrnám, které na DPS zbyly po utržení součástky. Tyto skvrny vymezují oblast, kterou dříve zakrývalo lepidlo.

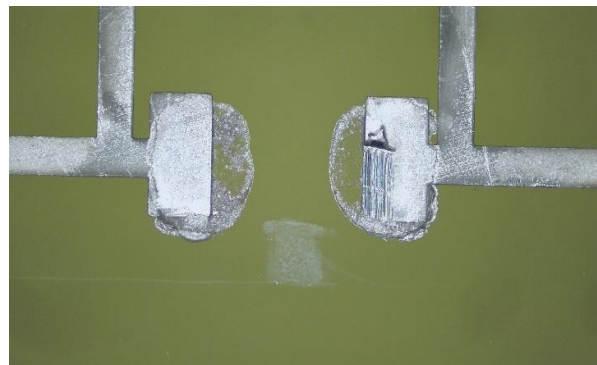
Další zajímavostí, které si lze na obrázku povšimnout je, že na pravém vývodu došlo během trhání k vytvoření drážkované struktury, která je zakončena silnější vrstvou lepidla. Lze předpokládat, že v průběhu trhání tedy došlo k určitému tření mezi čelistí trhačky či součástkou a pocínovaným vývodem na DPS. Tento předpoklad potvrzuje graf, ze kterého je patrné, že i po utržení součástky docházelo k silovému působení trhačky.

Naměřené hodnoty sil pak zhruba odpovídají silám naměřeným u měděných plošek. Zásadní jsou zde však hodnoty odporů. Jak již bylo několikrát zmíněno, u lepidla ELPOX SC 515 velmi záleží na povrchové úpravě. V případě pocínovaných (HAL) ploch odpor vzrůstá nade všechny přípustné meze. U tohoto konkrétního vzorku byl naměřen odpor odpovídající cca 193  $\Omega$ , což je o 3 řády více, než u ostatních spojů tvořených stejným lepidlem, ale při jiné povrchové úpravě.

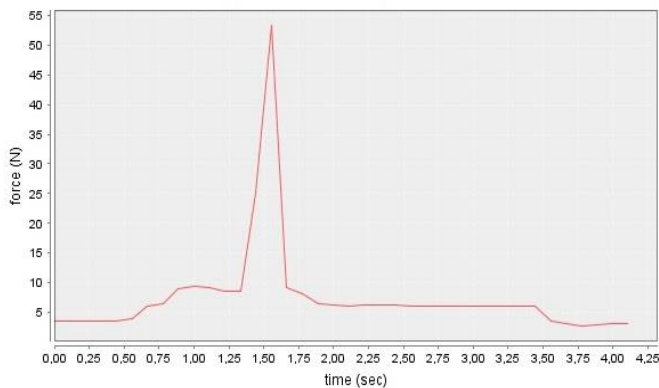
### 3.5.4 ELPOX SC 515, pocínované (chemický cín) plošky DPS



Obr. 30 Umístění rezistor, ELPOX SC 515, cín (chemický)



Obr. 31 Utržený rezistor, ELPOX SC 515, cín (chemický)



Graf 6 Průběh síly, ELPOX SC 515, cín (chemický)

Tab. 9 Hodnoty, ELPOX SC 515, cín (chemický)

<b>ELPOX SC 515, cín (chemický)</b>			
<i>vzorek 8, číslo rezistoru 6</i>			
Síly		Elektrické odpory	
$F_{MAX}$ (N)	74,58	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	88 210
$F_{MIN}$ (N)	15,57	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	157,1
$\sigma$ (N)	13,82	$\sigma$ (m $\Omega$ )	15 549,8
$F_{MED}$ (N)	31,96	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	447,55
$F_{AVG}$ (N)	36,41	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	4 948,5
<b>F (N)</b>	<b>53,38</b>	<b>R (m<math>\Omega</math>)</b>	<b>362,10</b>

Stejně jako v předchozích případech je i zde patrné relativně přesné nanesení lepidla na vodivé plošky DPS a rezistor je také relativně dobře vycentrován, jak je vidět z obrázku vlevo (Obr. 30). Po utržení součástky se na DPS opět objevují pouze skvrny od vodivého lepidla, jak dokládá obrázek vpravo (Obr. 31). To vypovídá o lepším přilnutí lepidla k součástce než k pocínovanému vývodu DPS. Zároveň je zde opět patrná drážka vzniklá třením mezi čelisti trhačky či součástkou a vývodem. Drážka je nyní však na mnohem menší části povrchu, než tomu bylo u pocínovaných (HAL) plošek.

Z grafu i z tabulky lze pak vypočítat, že trhací síla dosahuje hodnoty 53,38 N a její průběh byl opět hladký. Elektrický odpor je i v tomto případě zvýšený. Nedosahuje tak vysokých hodnot jako v případě úpravy cínem (HAL), ale i tak zde průměrná hodnota atakuje hranici 5  $\Omega$ .

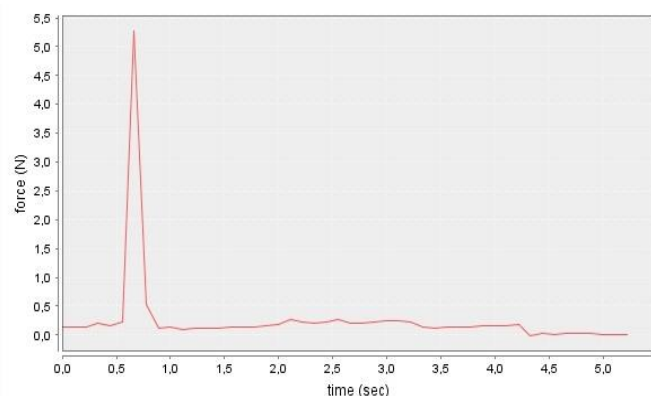
### 3.5.5 ELPOX AX 70MN, pozlacené plošky DPS



Obr. 32 Umístěný rezistor, ELPOX AX 70MN, zlato



Obr. 33 Utržený rezistor, ELPOX AX 70MN, zlato



Graf 7 Průběh síly, ELPOX AX 70MN, zlato

Tab. 10 Hodnoty, ELPOX AX 70MN, zlato

<b>ELPOX AX 70MN, zlato</b>			
<i>vzorek 1, číslo rezistoru 5</i>			
Síly		Elektrické odpory	
$F_{MAX}$ (N)	11,73	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	107,35
$F_{MIN}$ (N)	1,02	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	30,42
$\sigma$ (N)	2,2	$\sigma$ (m $\Omega$ )	11,94
$F_{MED}$ (N)	3,61	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	69,86
$F_{AVG}$ (N)	3,58	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	69,75
<b>F (N)</b>	<b>5,28</b>	<b>R (m<math>\Omega</math>)</b>	<b>77,28</b>

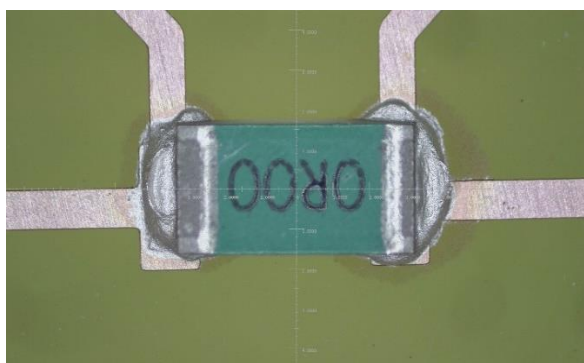
Lepidlo bylo opět na vývody nanášeno přesně a rezistor vhodně umístěn. Po odtržení součástky je zejména na levém vývodu patrný zbytek lepidla, který si zachoval původní tvar. Na základě tohoto poznatku lze tedy prohlásit, že lepidlo ELPOX AX 70MN v tomto případě přilnulo k povrchu DPS lépe, než lepidlo ELPOX SC 515. Neobjevují se zde ani skvrny vymezující původní oblast lepidla, jako tomu bylo v případě lepidla ELPOX SC 515.

Graf zobrazuje průběh síly při trhání. Na první pohled je patrné, že došlo k prakticky dokonale hladkému utržení.



V čase cca 0,6 s od začátku zkoušky došlo k přitisknutí čelistí trhačky k rezistoru, o cca 0,2 s později se rezistor od DPS plně utrhl a od času 0,9 s až do konce zkoušky již není patrný výraznější nárůst síly. I přes ukázkový průběh jsou naměřené hodnoty velmi nízké. Jedná se o pouhých 5,28 N. Elektrický odpor je naproti tomu prakticky stejný jako v případě jednosložkového lepidla ELPOX SC 515 při stejné povrchové úpravě.

### 3.5.6 ELPOX AX 70MN, měděné plošky DPS

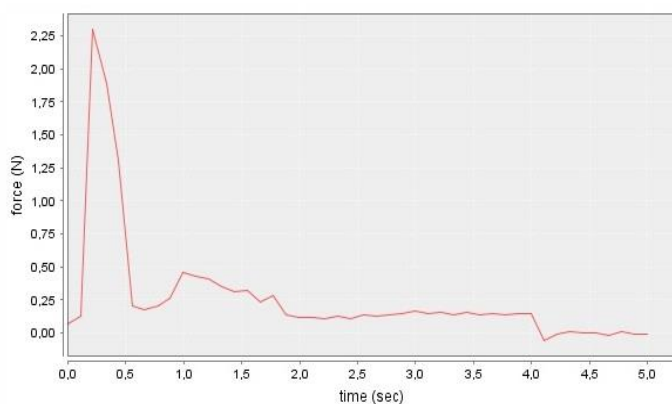


Obr. 34 Umístěný rezistor, ELPOX AX 70MN, měď



Obr. 35 Utržený rezistor, ELPOX AX 70MN, měď

Tab. 11 Hodnoty, ELPOX AX 70MN, měď



Graf 8 Průběh síly, ELPOX AX 70MN, měď

<b>ELPOX AX 70MN, měď</b>			
<i>vzorek 5, číslo rezistoru 3</i>			
Síly		Elektrické odpory	
$F_{MAX}$ (N)	6,99	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	120,67
$F_{MIN}$ (N)	0,16	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	74,1
$\sigma$ (N)	1,31	$\sigma$ (m $\Omega$ )	11,02
$F_{MED}$ (N)	1,53	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	86,83
$F_{AVG}$ (N)	1,80	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	89,13
<b>F (N)</b>	<b>2,3</b>	<b>R (m<math>\Omega</math>)</b>	<b>78,5</b>

I v tomto případě byl rezistor umístěn rovně a lepidlo nanášeno do vhodných míst. Odtržením součástky došlo k vytvoření podobného reliéfu, jaký lze vidět na předchozím obrázku (Obr. 33). Část ECA si i po utržení zachovala svůj tvar. V tomto případě je však daleko patrnější roztečení lepidla mimo vodivé plošky. Průběh trhací síly zde již není tak hladký jako je tomu v předchozím grafu (Graf 7). Velmi významné jsou pak naměřené hodnoty v tabulce (Tab. 11). Nejvýraznějším neduhem je síla, při níž došlo k utržení. Dosahuje pouhých 2,3 N. I tak ale převyšuje průměrnou hodnotu celé sady. Elektrický odpor zde dosahuje přibližně stejné hodnoty, jaká byla naměřena při osazení na pozlacené plošky DPS. Rozdíl tvoří necelý 1 m $\Omega$ .

### 3.5.7 ELPOX AX 70MN, pocínované (HAL) plošky DPS

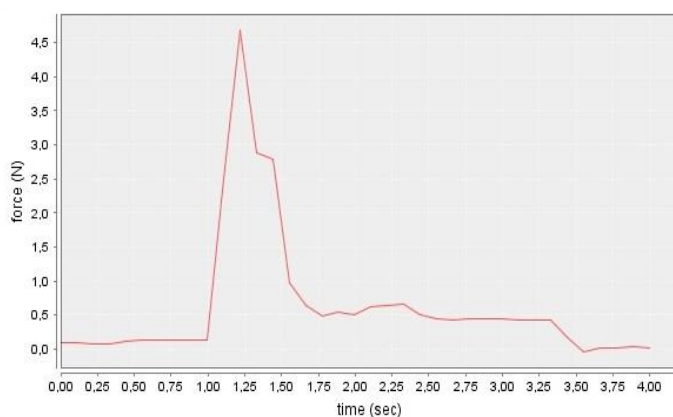


Obr. 36 Umístěný rezistor, ELPOX AX 70MN, cín (HAL)



Obr. 37 Utržený rezistor, ELPOX AX 70MN, cín (HAL)

Tab. 12 Hodnoty, ELPOX AX 70MN, cín (HAL)



Graf 9 Průběh síly, ELPOX AX 70MN, cín (HAL)

<b>ELPOX AX 70MN, cín (HAL)</b>			
<i>vzorek 4, číslo rezistoru 4</i>			
Síly		Elektrické odpory	
$F_{MAX}$ (N)	9,04	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	342,1
$F_{MIN}$ (N)	2,55	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	103
$\sigma$ (N)	1,83	$\sigma$ (m $\Omega$ )	57,18
$F_{MED}$ (N)	4,27	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	167,96
$F_{AVG}$ (N)	4,68	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	175,24
<b>F (N)</b>	<b>4,69</b>	<b>R (m<math>\Omega</math>)</b>	<b>150,11</b>

Z obrázku vlevo (Obr. 36) a obrázku vpravo (Obr. 37) je na první pohled patrné, že po usazení odporu došlo k rozprostření lepidla mimo vodivé plošky DPS. Nebylo to však v takové míře, aby se vodivý materiál pod součástkou propojil, čímž by se vzorek prakticky znehodnotil.

V obrázku po utržení (Obr. 37) jsou na levé plošce opět pozorovány zbytky lepidla v okolí míst, kde byl dříve usazen rezistor. Tyto zbytky si opět zřetelně udržují svůj původní tvar. Graf pak naznačuje, že v průběhu trhání docházelo k plynulému nárůstu síly až do samotného utržení.

Po utržení je pak v grafu zřetelný schod, který udává, že čelistem byl kladen slabý mechanický odpor po relativně krátkou dobu cca 0,1 s. To může naznačovat, že součástka například nebyla odtržena od DPS najednou, ale v čase cca 1,25 s došlo k mechanickému porušení spoje a utržení rezistoru od vodivých plošek DPS a v čase cca 1,30 s se pak součástka plně odlomila a odpadla.

### 3.5.8 ELPOX AX 70MN, pocínované (chemický cín) plošky DPS

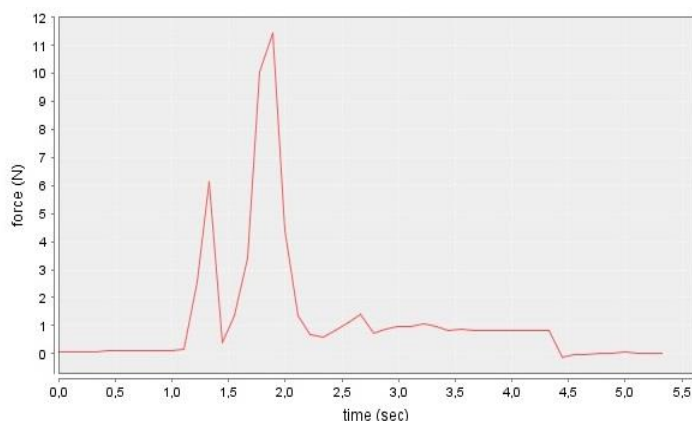


Obr. 38 Umístěný rezistor, ELPOX AX 70MN, cín (chem.)



Obr. 39 Umístěný rezistor, ELPOX AX 70MN, cín (chem.)

Tab. 13 Hodnoty, ELPOX AX 70MN, cín (chem.)



Graf 10 Průběh síly, ELPOX AX 70MN, cín (chemický)

ELPOX AX 70MN, cín (chemický)			
vzorek 4, číslo rezistoru 5			
Síly		Elektrické odpory	
$F_{MAX}$ (N)	16,02	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	244,8
$F_{MIN}$ (N)	3,03	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	109,03
$\sigma$ (N)	3,71	$\sigma$ (m $\Omega$ )	25,46
$F_{MED}$ (N)	8,68	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	131,23
$F_{AVG}$ (N)	8,13	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	134,61
<b>F (N)</b>	<b>11,46</b>	<b>R (m<math>\Omega</math>)</b>	<b>121,19</b>

Přilnavost lepidla k povrchu je v tomto případě relativně vysoká, o čemž je možné se přesvědčit z obrázku (Obr. 39). Lepidlo nanášené v okolí rezistoru i po vytvrzení a utržení součástky drží svůj původní tvar. Na pravé plošce je pak stejně jako v předešlých případech patrná drážka, která je v tomto případě relativně malá.

Průběh síly se zde liší od předešlých vzorků. V tomto případě se totiž objevují dvě výrazné špičky. Ty mohou být způsobeny klouzáním lepidla po povrchu DPS. To by naznačovaly i drážky na pravém kontaktu (Obr. 39). Podobné hrboly u průběhu síly a drážky po klouzání jsou vidět i u jiných vzorků (např. str. 43, nebo str. 44). Součástka nejspíše klouzne po povrchu, zachytí se a až poté dojde k úplnému odlomení. Elektrický odpor byl v tomto případě mírně nižší než průměrný odpor sady, ale i tak platí za vyšší s ohledem na všechny povrchové úpravy v kombinaci s tímto lepidlem.



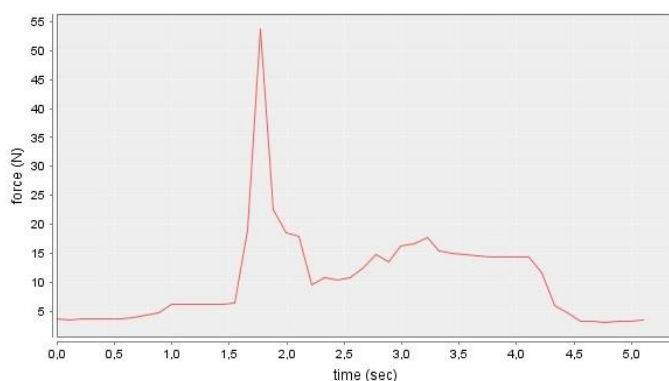
### 3.5.9 ELPOX AX 15N, pozlacené plošky DPS



Obr. 40 Umístěný rezistor, ELPOX AX 15N, zlato



Obr. 41 Utržený rezistor, ELPOX AX 15N, zlato



Graf 11 Průběh síly, ELPOX AX 15N, zlato

Tab. 14 Hodnoty, ELPOX AX 15N, zlato

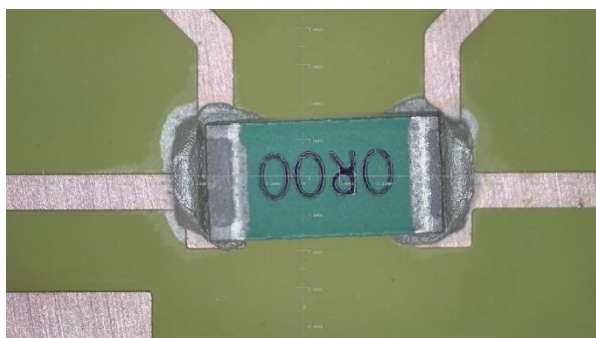
<b>ELPOX AX 15N, zlato</b>			
<i>vzorek 9, číslo rezistoru 6</i>			
Síly		Elektrické odpory	
$F_{MAX}$ (N)	100,56	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	308,3
$F_{MIN}$ (N)	31,54	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	11,41
$\sigma$ (N)	14,3	$\sigma$ (m $\Omega$ )	36,92
$F_{MED}$ (N)	55,39	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	117,7
$F_{AVG}$ (N)	56,67	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	124,10
<b>F (N)</b>	<b>53,81</b>	<b>R (m<math>\Omega</math>)</b>	<b>109,63</b>

Z obrázku vlevo (Obr. 40) lze vypožorovat, že lepidlo nebylo naneseo do nejvhodnějšího místa. Přesto však spoj vykazuje, vzhledem k celému souboru, relativně nízký elektrický odpor a vysokou mechanickou pevnost, kterou dokládají i hodnoty v tabulce a graf.

Ze zmíněného grafu je dále patrné, že po utržení součástky, tedy po dosažení maxima a následném rychlém poklesu, dochází k relativně pozvolnému nárůstu a následnému poklesu síly v rozmezí časů cca 2,25 – 4,5 s. Tento jev naznačuje, že po odtržení součástky je dále bráněno pohybu trhacích čelistí vrstvou elektricky vodivého lepidla.

Z obrázku vpravo (Obr. 41) je zároveň vidět, že lepidlo v relativně velké míře zůstalo po odtržení na svém původním místě a v původním tvaru. Tento typ lepidla tedy nabízí vyšší přilnavost k pozlacenému povrchu (adhezi), než tomu bylo u předešlých vzorků, a zároveň lepší soudržnost (kohezi).

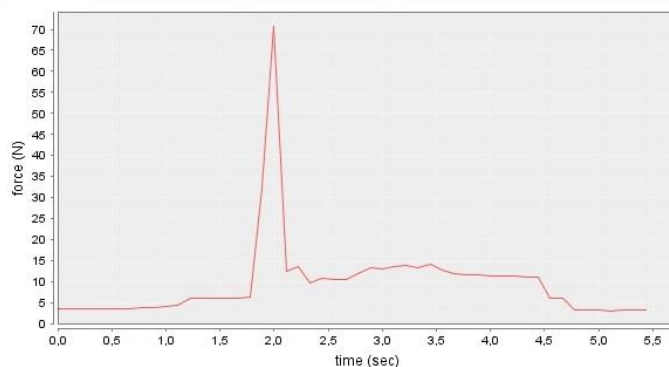
### 3.5.10 ELPOX AX 15N, měděné plošky DPS



Obr. 42 Umístěný rezistor, ELPOX AX 15N, měď



Obr. 43 Utržený rezistor, ELPOX AX 15N, měď



Graf 12 Průběh síly, ELPOX AX 15N, měď

Tab. 15 Hodnoty, ELPOX AX 15N, měď

<b>ELPOX AX 15N, měď</b>			
<i>vzorek 9, číslo rezistoru 2</i>			
Síly		Elektrické odpory	
$F_{MAX}$ (N)	103,07	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	239,6
$F_{MIN}$ (N)	18,04	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	11,35
$\sigma$ (N)	18,66	$\sigma$ (m $\Omega$ )	31,84
$F_{MED}$ (N)	59,69	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	108,55
$F_{AVG}$ (N)	56,65	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	104,86
<b>F (N)</b>	<b>70,79</b>	<b>R (m<math>\Omega</math>)</b>	<b>101,51</b>

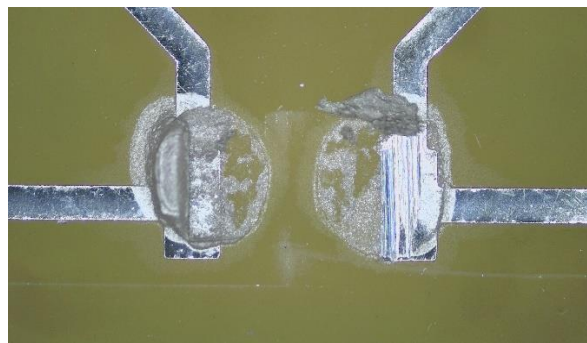
V tomto případě rezistor nebyl usazen na plošky DPS tak přesně jako v předešlých případech, ale lepidlo vcelku přesně naneseno bylo. Průběh trhací síly dokládá, že trhání proběhlo relativně hladce, ale stejně jako v předešlém případě se i zde po utržení objevuje lehký nárůst síly a následný pokles. Ze všech 12 podrobně zkoumaných vzorků se však jedná o druhý nejpevnější spoj s naměřenou silou odpovídající 70,79 N, jak udává výše uvedená tabulka.

Z tabulky je zároveň patrné, že hodnota elektrického odporu je nejnižší a mechanická pevnost nejvyšší ze všech čtyř zkoumaných vzorků o různých povrchových úpravách, na které bylo naneseno dvousložkové lepidlo ELPOX AX 15N.

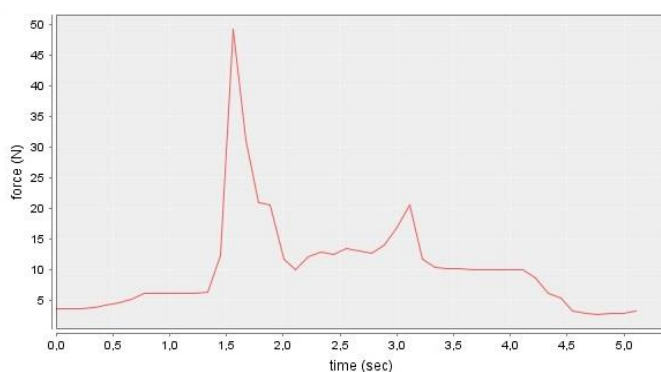
### 3.5.11 ELPOX AX 15N, pocínované (HAL) plošky DPS



Obr. 44 Umístěný rezistor, ELPOX AX 15N, cín (HAL)



Obr. 45 Utržený rezistor, ELPOX AX 15N, cín (HAL)



Graf 13 Průběh síly, ELPOX AX 15N, cín (HAL)

Tab. 16 Hodnoty, ELPOX AX 15N, cín (HAL)

ELPOX AX 15N, cín (HAL)			
vzorek 5, číslo rezistoru 6			
Síly		Elektrické odpory	
$F_{MAX}$ (N)	93,48	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	186,36
$F_{MIN}$ (N)	24,96	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	86,03
$\sigma$ (N)	12,05	$\sigma$ (m $\Omega$ )	16,09
$F_{MED}$ (N)	55,36	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	111,97
$F_{AVG}$ (N)	56,28	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	113,78
<b>F (N)</b>	<b>49,26</b>	<b>R (m<math>\Omega</math>)</b>	<b>116,51</b>

Z výše uvedených obrázků vyplývá, že lepidlo bylo nanášeno s podobnou přesností jako v předešlých případech. Dalším shodným znakem s předchozími vzorky je objem lepidla, který si i po utržení rezistoru od DPS udržuje stále stejný tvar, který vznikl již při osazení součástkou. O tom svědčí obrázek vpravo (Obr. 45), který zároveň upozorňuje na tření mezi čelistí trhačky či samotnou součástkou a ploškou. Důsledkem tohoto tření, či klouzání jsou drážky, které jsou patrné na pravém vývodu na DPS. To dokládá i specifický tvar průběhu síly, resp. část průběhu nacházející se za maximem celého grafu. V horní části pravé plošky je pak vidět nahromaděné lepidlo, které bylo do těchto míst dopraveno při trhání.

Jak již bylo zmíněno, z grafu lze vypočítat kromě síly, při níž došlo k utržení rezistoru, také opakující se tvar průběhu síly. Stejně jako u předešlých dvou povrchových úprav DPS se i v tomto případě po utržení objevuje zvýšená síla vyvíjená při pohybu čelistí. Maximum této části pak upozorňuje na fakt, že v průběhu trhací zkoušky došlo k vynaložení výraznější síly pro utržení lépe přilnutého objemu lepidla. Z tabulky pak vyplývá, že ze všech povrchových úprav, na které byl nanášen tento typ lepidla, je zde nejvyšší elektrický odpor.

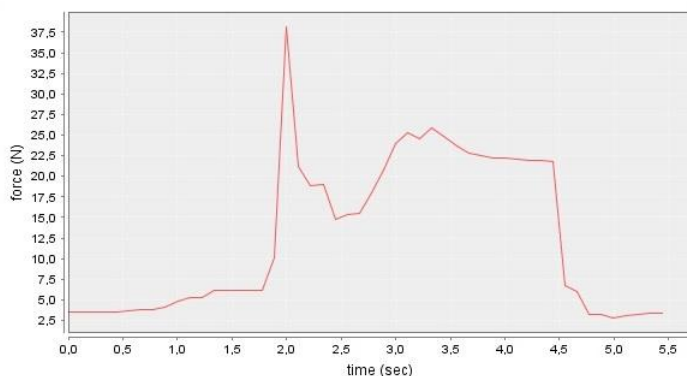
### 3.5.12 ELPOX AX 15N, pocínované (chemický cín) plošky DPS



Obr. 46 Umístěný rezistor, ELPOX AX 15N, cín (chemický)



Obr. 47 Utržený rezistor, ELPOX AX 15N, cín (chemický)



Graf 14 Průběh síly, ELPOX AX 15N, cín (chemický)

Tab. 17 Hodnoty, ELPOX AX 15N, cín (chemický)

ELPOX AX 15N, cín (chemický)			
vzorek 7, číslo rezistoru 6			
Síly		Elektrické odpory	
$F_{MAX}$ (N)	104,08	$R_{MAX}$ (m $\Omega$ )	253,1
$F_{MIN}$ (N)	32,01	$R_{MIN}$ (m $\Omega$ )	91,51
$\sigma$ (N)	16,62	$\sigma$ (m $\Omega$ )	32,24
$F_{MED}$ (N)	62,81	$R_{MED}$ (m $\Omega$ )	111,97
$F_{AVG}$ (N)	60,87	$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )	139,02
<b>F (N)</b>	<b>38,25</b>	<b>R (m<math>\Omega</math>)</b>	<b>110,41</b>

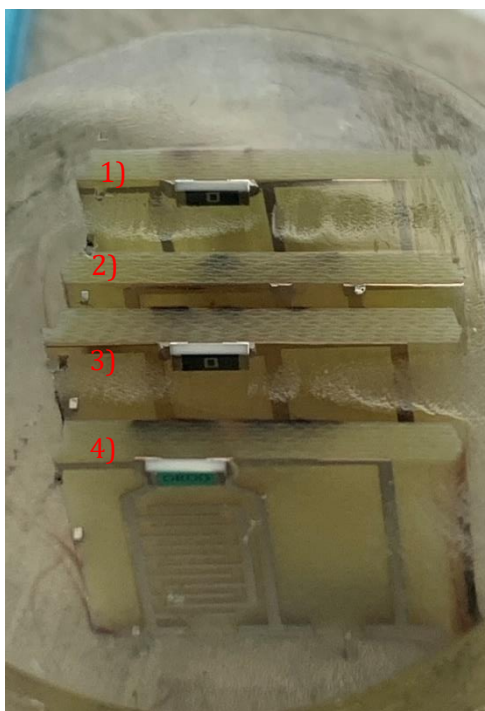
Na poslední zkoumaný vzorek bylo nanášeno lepidlo s nejnižší precizností ze všech 12 vzorků. Je patrné, že ECA bylo nanášeno do horní části vývodu a spodní část je tedy obnažena, což může být důvodem, proč byla u této povrchové úpravy vyvinuta nejnižší síla pro utržení součástky. Při trhání je opět patrná drážka vzniklá klouzáním součástky. Graf pak dokazuje, že po utržení součástky došlo k výraznému nárůstu síly, čímž nejspíše vznikly viditelné rýhy, které jsou patrné na obrázku vpravo (Obr. 47). Jedná se tedy o stále se opakující tvar průběhu síly u tohoto typu lepidla. Hodnota elektrického odporu tohoto vzorku pak dosahuje prakticky stejné velikosti jako v případě pozlacené plošky DPS a lepidla.

### 3.6 Mikroskopická a prvková analýza

K dalšímu rozboru nabádají průměrné hodnoty elektrických odporů u lepených spojů tvořených lepidlem ELPOX SC 515 v kombinaci s úpravou povrchu pocínováním (HAL/chemický cín). U chemického cínu průměrný odpor odpovídá cca 4,9  $\Omega$  a v případě HALu odpovídá 128,7  $\Omega$ .

Zkoumání probíhalo pomocí laserového skenovacího konfokálního mikroskopu Keyence VK - X1000 a skenovacího elektronového mikroskopu SEM Thermo Scientific Phenom ProX, který umožňuje prvkovou analýzu zkoumaného vzorku.

Pro zkoumání byl zhotoven speciální výbrus uvedený na obrázku níže (Obr. 48). Jednalo se o vybrané vzorky rezistorů zalité do pryskyřice, která byla vytvrzena a následně zbrušena. Díky výbrusu bylo možné pod mikroskopy přímo zkoumat struktury spojů.



Obr. 48 Vzorky pro prvkovou analýzu

### Popis zkoumaných rezistorů

Tab. 18 Parametry vzorků pro prvkovou analýzu

Číslo vzorku	Rezistor	Povrchová úprava	Typ lepidla	Odpor spoje
1)	0 $\Omega$ , pro pájení	chemický cín	ELPOX SC 515	215,1 $\Omega$
2)	<b>UTRŽEN PŘI VÝROBĚ VÝBRUSU</b>	zlato	ELPOX AX 70MN	64,67 m $\Omega$
3)	0 $\Omega$ , pro pájení	zlato	ELPOX SC 515	46,2 $\Omega$
4)	0 $\Omega$ , pro lepení	chemický cín	ELPOX AX 15N	253,1 m $\Omega$

Dále je uveden popis mikroskopů a jimi zjištěné výsledky.



### 3.6.1 Laserový skenovací konfokální mikroskop Keyence VK-X1000

Mikroskop je určen pro zkoumání profilů, tloušťky vrstev a dalších. Pro potřeby těchto měření byla použita zvětšení 2,5x, 10x, 20x a 50x, mikroskop však nabízí až 28 800x zvětšení. Zkoumaný vzorek je osvětlován bílým světlem a laserovým paprskem, tím je umožněno měření i takových vzorků, které nemají dobrou odrazivost. [26]



Obr. 49 Laserový skenovací konfokální mikroskop Keyence VK-X1000 [26]

### 3.6.2 Skenovací elektronový mikroskop SEM Thermo Scientific Phenom ProX

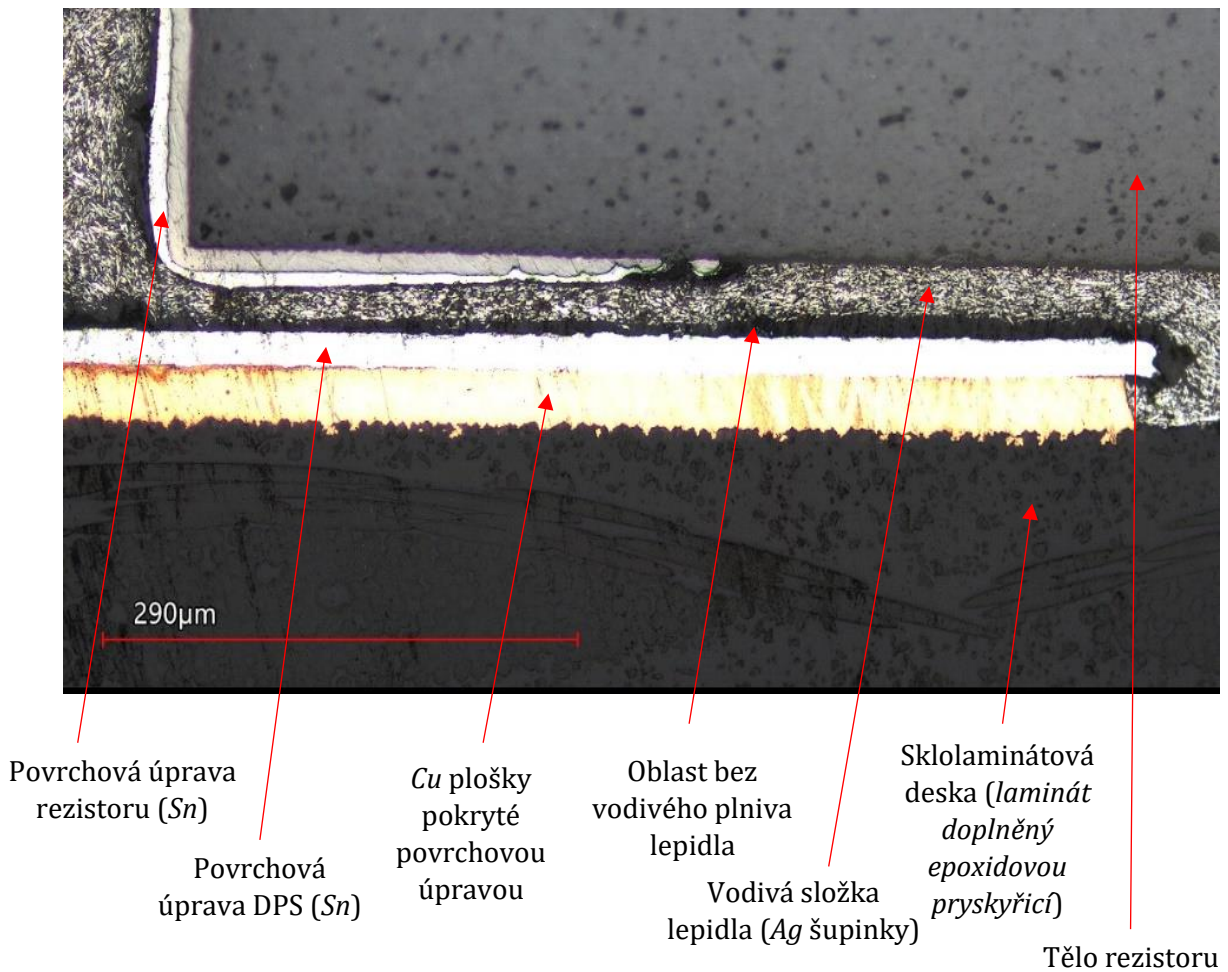
Významnou předností elektronového mikroskopu je možnost zkoumání vodivých i nevodivých materiálů včetně jejich povrchové analýzy. Snímek je zobrazen již po 5 s od vložení vzorku do přístroje a zvětšení SEM může být až 130 000x. Pro analýzu jsou vhodné vzorky do průměru 20 mm, či metalografické vzorky do průměru 30 mm. [26]



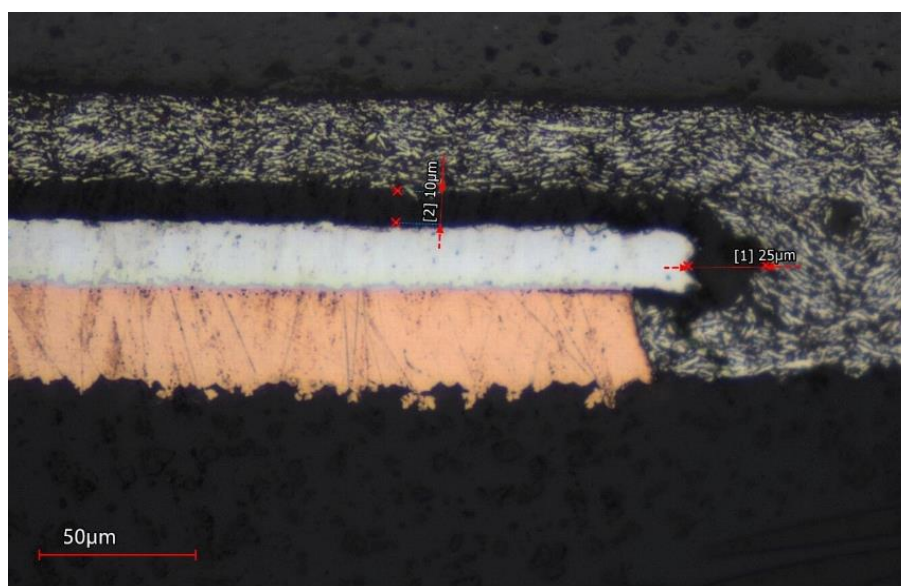
Obr. 50 Skenovací elektronový mikroskop SEM Thermo Scientific Phenom ProX [26]

### 3.6.3 Výsledky měření

- Vzorek 1



Obr. 51 Popis struktury vzorku 1 – přiblížení 20x



Obr. 52 Struktura spoje vzorku 1 – přiblížení 50x

Popis vzorku 1:

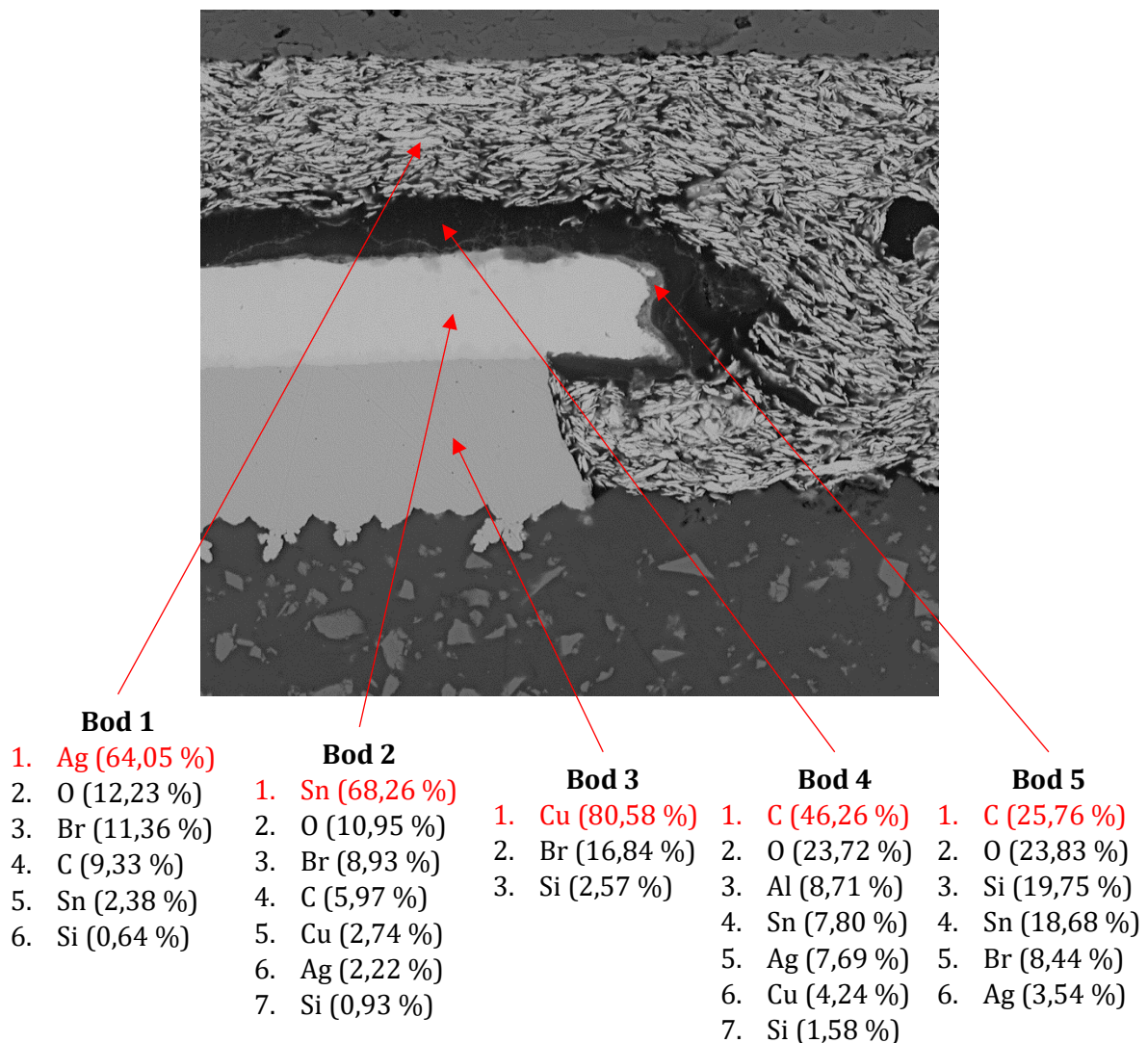
Rezistor: 0  $\Omega$ , pro pájení

Povrchová úprava DPS: chemický cín

Typ lepidla: ELPOX SC 515

Hodnota odporu: 215,1  $\Omega$

Z obrázku (Obr. 51) je patrné, že v okolí pocínovaných plošek DPS se v lepidle objevuje oblast ochuzená o vodivé plnivo (*Ag* šupinky). Lepší náhled poskytuje další obrázek (Obr. 52), který upozorňuje i na tloušťky oblastí bez vodivého materiálu. Lze snadno vypožorovat, že lepidlo se takto chová pouze vůči cínu, protože spodní vrstva kontaktu je tvořena mědí, se kterou jsou vodivé šupinky v těsném kontaktu.



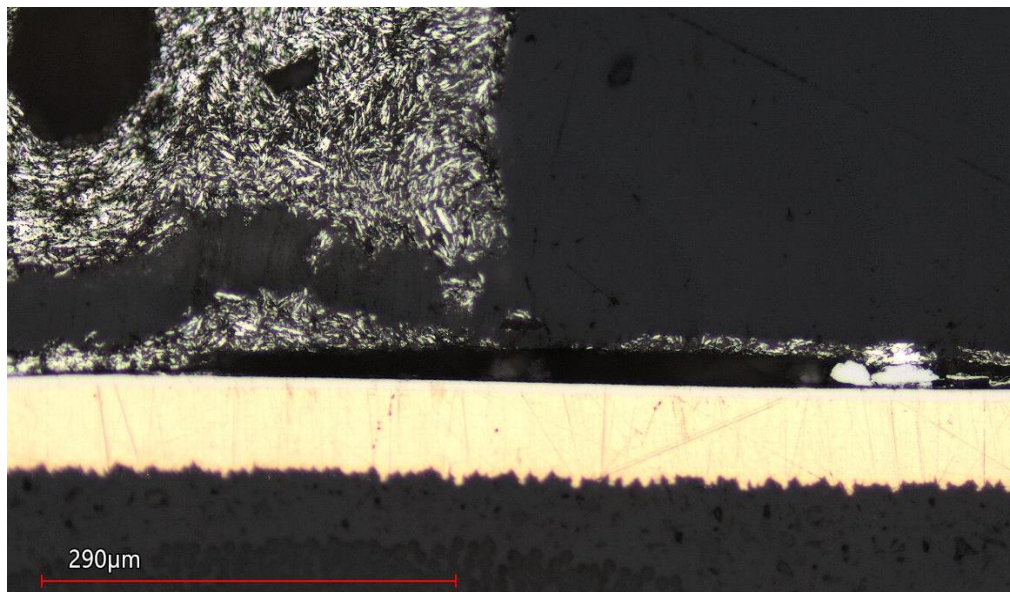
Obr. 53 Prvková analýza vzorku 1



V obrázku výše (Obr. 53) jsou uvedeny výsledky prvkové analýzy vzorku 1. Zastoupení prvků je vyjádřeno v hmotnostních procentech. Body 1, 2 a 3 se shodují s informacemi uváděnými v obrázku popisujícím strukturu spoje (Obr. 51), tedy potvrdily správnost uváděných informací. Body 4 a 5 pak poukazují na izolační vrstvu mezi vodivým plnivem a povrchovou úpravou DPS. Ve vrstvě se sice objevuje zastoupení vodivých materiálů jako je *Ag*, *Sn* apod., ale pouze v omezeném množství, proto lze předpokládat, že tato vrstva je důvodem vysoké ohmické hodnoty spoje.

Zajímavým výsledkem a podnětem pro další zkoumání může být zjišťování důvodu, proč došlo k vytvoření izolační vrstvy mezi stříbrným plnivem a povrchovou úpravou a co se stalo s vodivým plnivem v této oblasti. Možnou odpovědí na druhou zmíněnou otázku je rozpuštění plniva. Tomu napovídá i nalezené malé množství stříbra v okolních vrstvách zobrazeného řezu, tedy v povrchové úpravě (bod 2), ve vrstvě vzniklé na povrchové úpravě (bod 5) i v samotné izolační vrstvě (bod 4).

- **Vzorek 2**



Obr. 54 Struktura spoje vzorku 2 – přiblížení 20x

Popis vzorku 2:

Rezistor: UTRŽEN PŘI VÝROBĚ VÝBRUSU

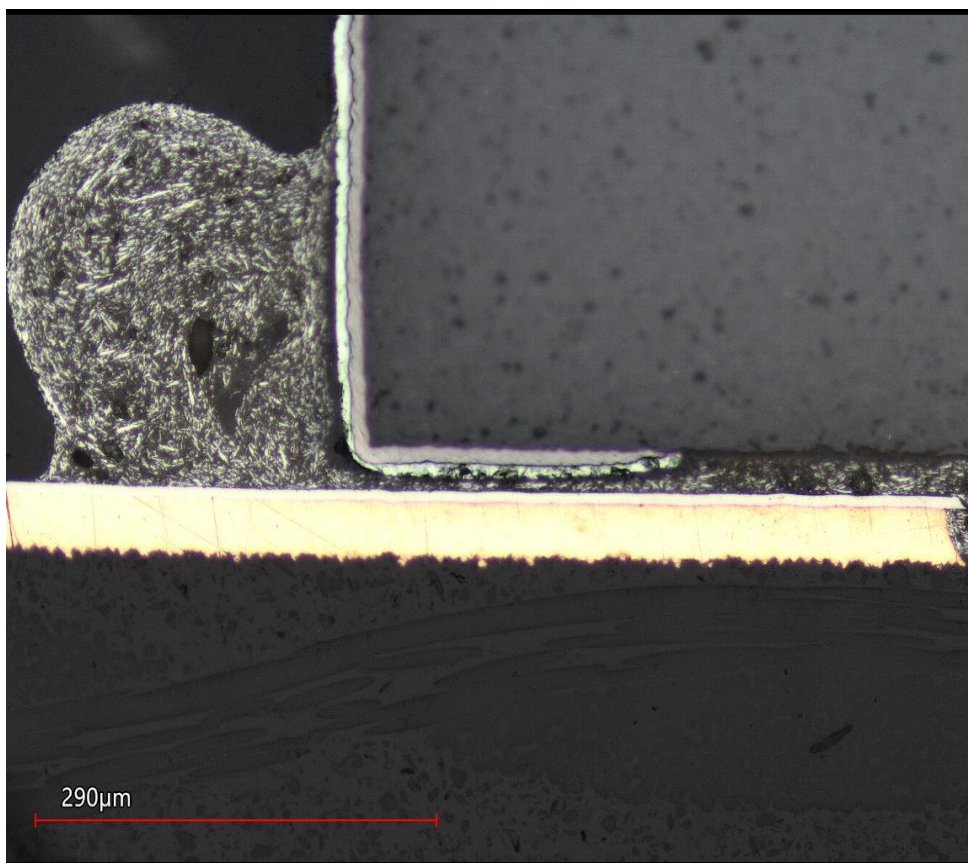
Povrchová úprava DPS: zlato

Typ lepidla: ELPOX AX 70MN

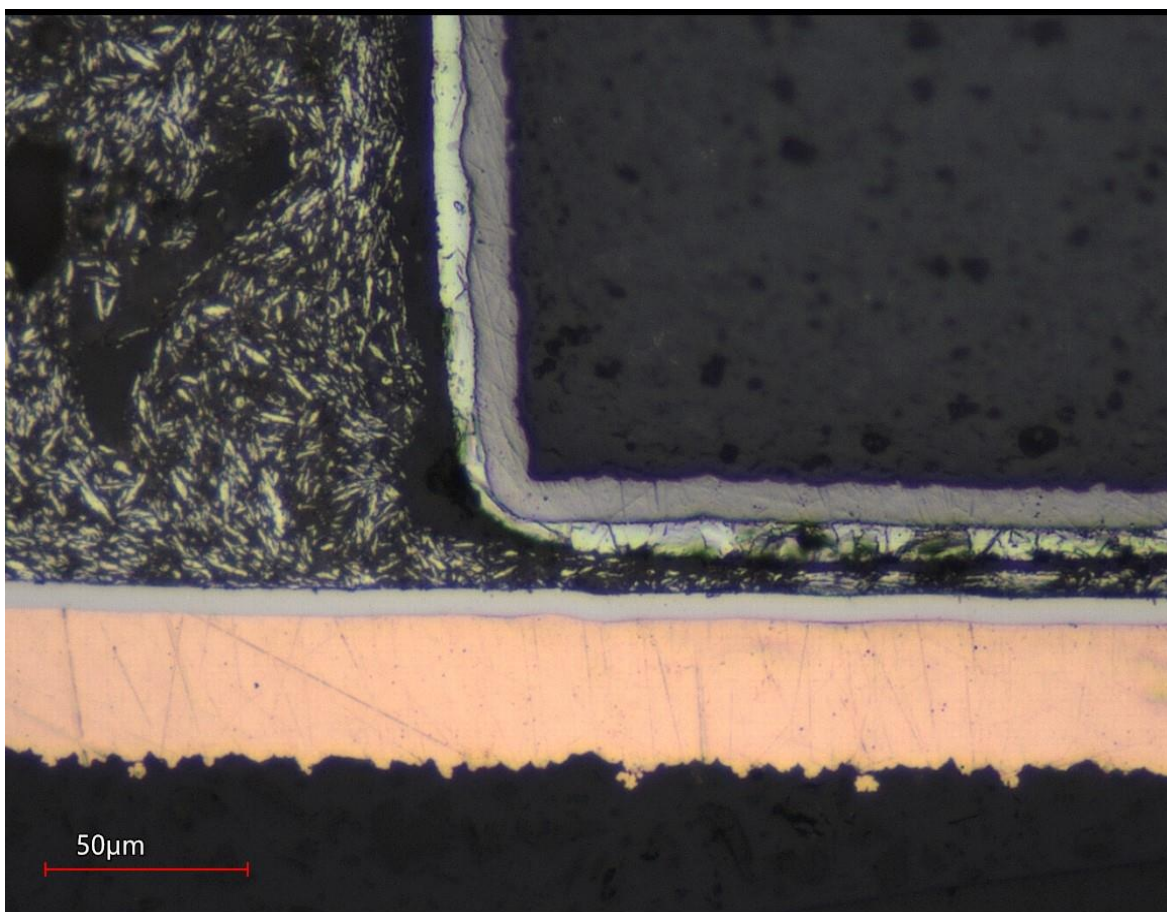
Hodnota odporu: 64,67 mΩ

Na první pohled je z výše uvedeného obrázku (Obr. 54) patrná velká prázdná oblast v pravé části fotografie. Díky svému pravoúhlému tvaru je zřejmé, že se jedná o prostor, kde se nacházel rezistor, který byl při vytváření vzorku odtržen od zbytku destičky. Destrukci 2. vzorku při výrobě výbrusu je možno relativně snadno vysvětlit. Destička, na níž se rezistor nacházel, nebyla vhodně umístěna vůči ostatním deskám. Byl tedy zbroušen větší objem rezistoru než v případě jiných vzorků. Zároveň naměřená průměrná trhací síla v této kombinaci lepidla a povrchové úpravy odpovídá pouhým 3,58 N. Tyto dva faktory mohly být příčinou destrukce vzorku, nebo jí alespoň výrazně podpořily.

- **Vzorek 3**



Obr. 55 Struktura spoje vzorku 3 – přiblížení 20x



Obr. 56 Struktura spoje vzorku 3 – přiblížení 50x

#### Popis vzorku 3:

Rezistor: 0  $\Omega$ , pro pájení

Povrchová úprava DPS: zlato

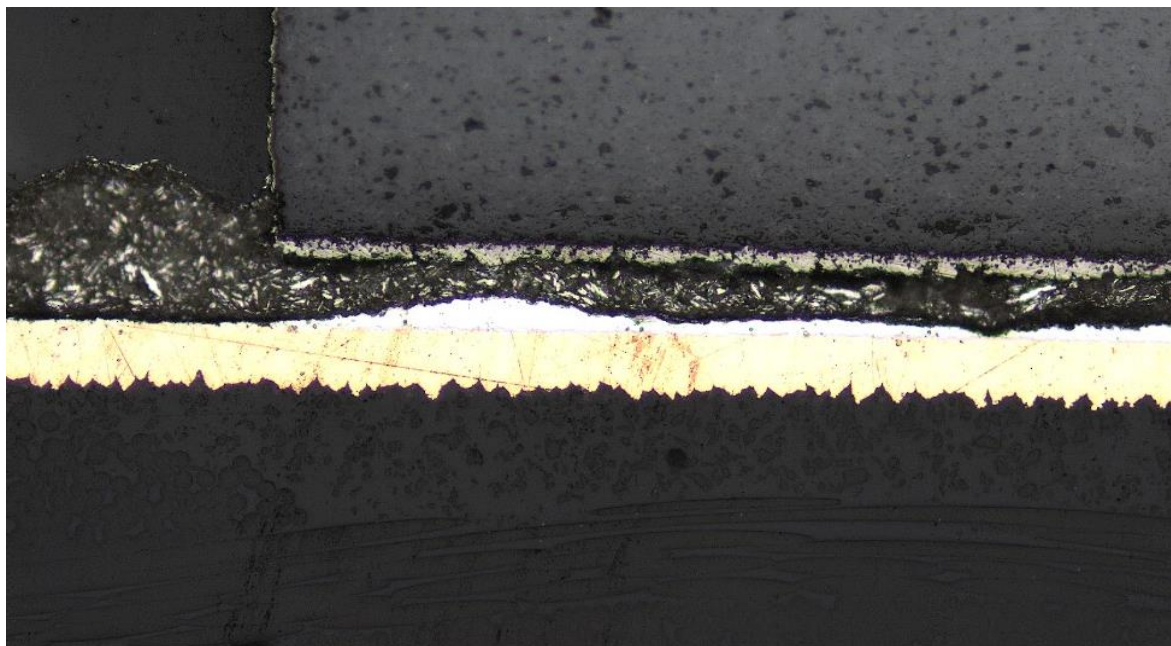
Typ lepidla: ELPOX SC 515

Hodnota odporu: 46,2  $\Omega$

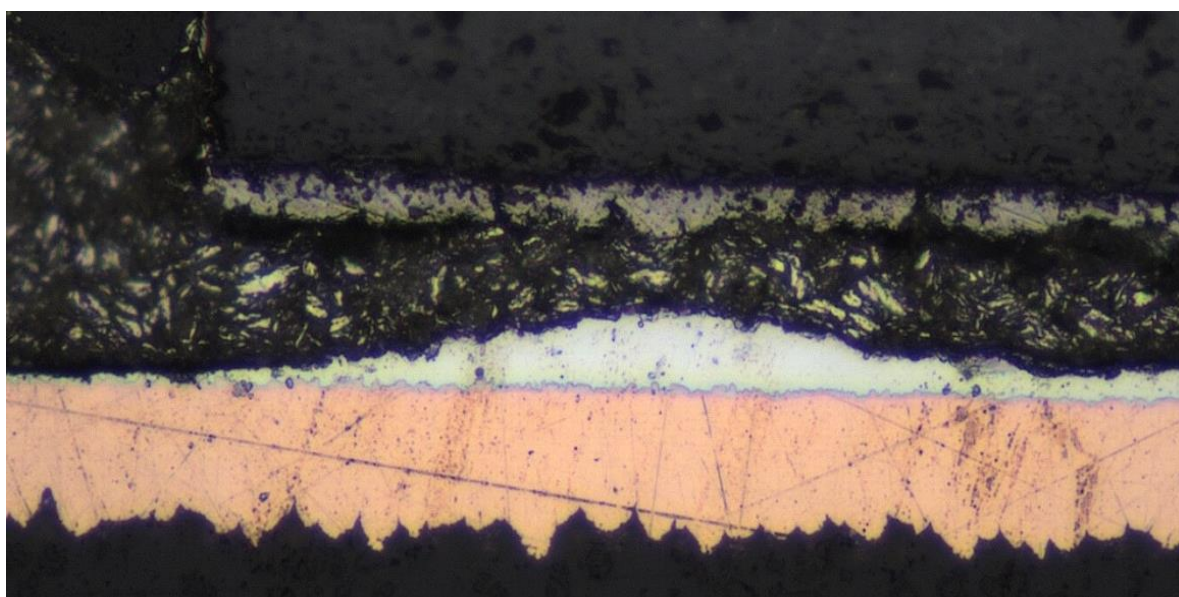
Z obrázku popisujícím strukturu spoje vzorku 3 (Obr. 56) vyplývají stejné závěry, na které bylo upozorněno již u vzorku 1. Tedy že lepidlo ELPOX SC 515 není vhodné pro aplikaci na pocínované povrchy. Okolo rezistoru určeného k pájení je tedy opět patrná oblast, ve které se nenachází vodivé plnivo. Vodivá ploška DPS je v tomto případě upravena vrstvou zlata, která se vůči vodivé složce lepidla chová o poznání lépe než vrstva cínu, tedy dochází k těsnému kontaktu plniva a zlata. Při porovnání s obrázkem vzorku 1 (Obr. 52) zde nejsou známky izolační vrstvy (oblasti bez vodivého plniva) mezi povrchovou úpravou a vodivou složkou lepidla.



- Vzorek 4



Obr. 57 Struktura spoje vzorku 4 – přiblížení 20x



Obr. 58 Struktura spoje vzorku 4 – přiblížení 50x

Popis vzorku 4:

Rezistor: 0  $\Omega$ , pro lepení

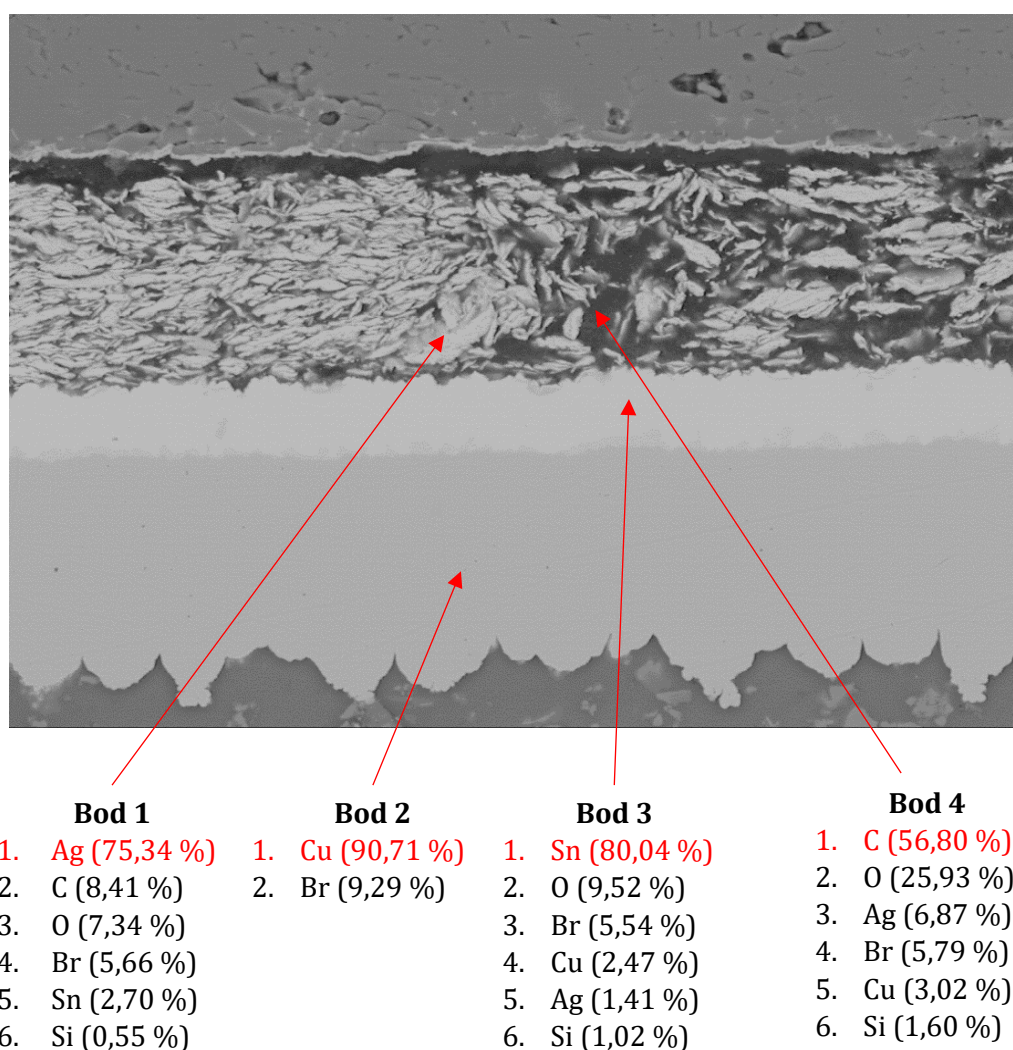
Povrchová úprava DPS: chemický cín

Typ lepidla: ELPOX AX 15N

Hodnota odporu: 253,1 m $\Omega$

V tomto případě je z obou výše uvedených obrázků patrné, že se v lepidle již neobjevuje rozsáhlá oblast ochuzená o vodivé plnivo tak jako v předešlých případech. Při bližším zkoumání je i přesto možné vyzorovat drobné ochuzené oblasti, které jsou ale významně menší a ne po celé délce vyfotografovaného řezu. Tím se vysvětluje velikost elektrického odporu, která je vyšší než je zvykem, ale i tak nedosahuje extrémních hodnot, které byly naměřeny například u vzorku 1. Lze zároveň vyzorovat, že vodivá složka má menší koncentraci vodivých částic než u předešlých vzorků. Tedy stejný objem lepidla obsahuje více vazební složky. Potvrzuje se zde tedy, že pevnost tohoto typu ECA je méně závislá na typu povrchové úpravy DPS než ostatní typy použitých lepidel. To dokládá i graf průměrných sil (Graf 2), uvedený v kapitole 3.4.2.

Níže je uvedena prvková analýza vzorku 4. Body 1, 2 a 3 ověřují, že se jednalo o DPS, která má své měděné vývody upravené vrstvou cínu a dvousložkové elektricky vodivé lepidlo ELPOX AX 15N využívá stejný typ vodivého plniva (stříbrné šupinky) jako lepidlo ELPOX SC 515 použité u vzorku 1.



Obr. 59 Prvková analýza vzorku 4

Oblast lepidla bez vodivé složky (bod 4) vykazuje podobné složení jako u vzorku 1. Oblasti dominuje uhlík a kyslík, malé zastoupení je také stříbra (do 10 %), dále měď (do 5 %) a křemík (do 2 %). V tomto případě se navíc objevuje i brom o koncentraci 5,79 %. Všechna procentuální zastoupení jsou vyjádřena v hmotnostních procentech, stejně jako v případě vzorku 1.

### 3.7 Shrnutí výsledků měření

Tab. 19 Průměrné hodnoty odporů vzorků

$R_{AVG}$ (m $\Omega$ )			
Povrchová úprava DPS	jednosložkové		dvousložkové
	ELPOX SC 515	ELPOX AX 70MN	ELPOX AX 15N
Zlato	82,76	69,75	124,10
Měď	70,42	89,13	104,86
Cín (HAL)	128 702,79	175,24	113,78
Cín (chemický)	4 948,5	134,61	139,02

Z tabulky (Tab. 19) plyne, že z čistě elektrického hlediska je nejlepší kombinací povrchové úpravy a elektricky vodivého lepidla jednosložkové lepidlo ELPOX AX 70MN nanesené na DPS s pozlacenými ploškami, kde průměrný elektrický odpor ( $R_{AVG}$ ) vychází 69,75 m $\Omega$ . Na druhé straně se pak jako nejhorší volba jeví jednosložkové lepidlo ELPOX SC 515 při aplikaci na pocínované (HAL) plošky DPS. V tomto případě průměrná hodnota odpovídá 128,7  $\Omega$ . Z tabulky je tedy patrné, že naměřené hodnoty odporů silně závisí na povrchové úpravě.

Tab. 20 Průměrné hodnoty adhezních sil

$F_{AVG}$ (N)			
Povrchová úprava DPS	jednosložkové		dvousložkové
	ELPOX SC 515	ELPOX AX 70MN	ELPOX AX 15N
Zlato	42,27	3,58	56,67
Měď	24,11	1,80	56,65
Cín (HAL)	24,80	4,68	56,28
Cín (chemický)	36,41	8,13	60,87

Prohlásíme-li, že nejvyšší pevnosti dosahují spoje, pro jejichž destrukci musí být vyvinuta nejvyšší síla, je možné z tabulky vyvodit následující poznatky. Nejvyšší pevnosti dosahuje dvousložkové lepidlo ELPOX AX 15N nanesené na plošky DPS opatřené povrchovou úpravou z chemického cínu. V tomto případě dosahovala průměrná síla potřebná pro utržení součástky ( $F_{AVG}$ ) 60,87 N.

Protikladem, tedy nejhorší kombinací elektricky vodivého lepidla a povrchové úpravy z pohledu mechanické pevnosti, je pak jednosložkové lepidlo ELPOX AX 70MN při aplikaci na měděné plošky DPS. V tomto případě dosáhla průměrná síla pouhých 1,8 N. Takto nízké hodnoty byly předpokládány již před měřením, protože některé rezistory se při manipulaci s DPS uvolnily a odpadly. To naznačují i prázdná místa v tabulkách naměřených hodnot sil v příloze. Důvodem takto nízkých sil je zřejmě stáří lepidla. V porovnání s novými konkurenty ELPOX SC 515 a ELPOX AX 15N, které dosahují solidních hodnot, je starší lepidlo ELPOX AX 70MN ve střihu výrazně slabší.

Pokud vezmeme v úvahu mechanický i elektrický ukazatel kvality spoje, lze konstatovat následující. Lepidlo ELPOX AX 70MN je nevyhovující z důvodu velmi nízké pevnosti. Dále je nežádoucí aplikovat lepidlo ELPOX SC 515 na povrchy upravené pocínováním. Jako rozumný kompromis se jeví jednosložkové lepidlo ELPOX SC 515 nanesené na pozlacené plošky DPS, či dvousložkové lepidlo ELPOX AX 15N aplikované na měděný povrch. V případě dvousložkového lepidla na měděném povrchu je průměrná pevnost vyšší, ale je vykoupena vyšším elektrickým odporem v porovnání s jednosložkovou variantou na zlatém povrchu.

## 4 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá zkoumáním elektrických a mechanických vlastností elektricky vodivých lepidel. Je tedy primárně zaměřena na praktickou část, která ale spolu s teoretickou částí vytváří ucelený základní přehled informací o elektricky vodivých lepidlech, jejich složení, vlastnostech a způsobech nanášení.

Samotná praktická část je pak zaměřena na zkoumání vlivu povrchové úpravy DPS na spoj vzniklý elektricky vodivým lepením. K tomu byly využity 3 typy elektricky vodivých lepidel, rezistory s nulovou ohmickou hodnotou a 4 druhy DPS lišících se povrchovou úpravou.

Významným závěrem práce je, že rezistory výrobcem určené pro pájení jsou zcela nevhodné pro elektricky vodivé lepení jednosložkovým lepidlem ELPOX SC 515. V případě užití nevhodných rezistorů mají spoje nepřijatelně vysokou ohmickou hodnotu bez ohledu na povrchovou úpravu DPS. Dále bylo pozorováno, že stárí lepidla výrazně ovlivňuje mechanickou pevnost spoje. Nová lepidla dosahovala několikanásobně vyšší pevnosti ve stříhu.

Je zřejmé, že velmi záleží na konkrétním typu lepidla, ale při širším pohledu na výsledky experimentu a pro účely hodnocení vlivu povrchových úprav DPS je možné konstatovat následující. Z měření vyplynulo, že v případě měděných a pozlacených plošek DPS vycházely nižší hodnoty odporů než v případě pocínovaných plošek. Toto platí zejména pro použitá jednosložková lepidla. Při zkoumání mechanické pevnosti spojů bylo zjištěno, že nejvyšší pevnosti ve stříhu dosahují spoje, utvořené na ploškách opatřených chemickým cínem či zlatem.

Z pohledu hodnocení elektricky vodivých lepidel lze říci, že nejvíce konzistentní výsledky, tedy výsledky, které se nejméně lišily v závislosti na povrchové úpravě, poskytovalo dvousložkové lepidlo ELPOX AX 15N. Naproti tomu výsledky nejvíce ovlivněné povrchovou úpravou pak byly zjištěny zejména u jednosložkového lepidla ELPOX SC 515.

Závěrem lze konstatovat, že elektricky vodivé lepení a vzniklé lepené spoje jsou výrazně závislé na povrchové úpravě. Povrchová úprava DPS tedy hraje minimálně stejně významnou roli jako typ použitého lepidla.



## SEZNAM POJMŮ

**DPS** – Deska Plošných Spojů

**PCB** – (*Printed Circuit Board*) – Deska plošných spojů

**ECA** – (*Electrically Conductive Adhesive*) – Električky vodivé lepidlo

**LCD** – (*Liquid Crystal Display*) – Displej z tekutých krystalů

**ICA** – (*Isotropic Conductive Adhesive*) – Izotropní vodivé lepidlo

**ACA** – (*Anisotropic Conductive Adhesive*) – Anizotropní vodivé lepidlo

**IO** – Integrovaný obvod

**HAL/HASL** – (*Hot Air Leveling/Hot Air Solder Leveling*) – Povrchová úprava pocínováním

**ENIG** – (*Electroless Nickel Immersion Gold*) – Povrchová úprava pozlacením

**IS** – (*Immersion Silver*) – Povrchová úprava postříbřením

**OSP** – (*Organic Solderability Preservatives*) – Povrchová úprava nanesením organických inhibitorů

**SMD** – (*Surface mount device*) – Součástka pro povrchovou montáž

**SEM** – (*Scanning electron microscope*) – Skenovací elektronový mikroskop

**Sn** – (*Stannum*) – Cín

**Pb** – (*Plumbum*) – Olovo

**Cu** – (*Cuprum*) – Měď

**Ag** – (*Argentum*) – Stříbro

**Au** – (*Aurum*) – Zlato

**O** – (*Oxygenium*) – Kyslík

**Br** – (*Bromum*) – Brom

**C** – (*Carboneum*) – Uhlík

**Si** – (*Silicium*) – Křemík

**Al** – (*Aluminium*) – Hliník

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Stříbrné lupínky (pro ICA) [14].....	10
Obr. 2 Stříbrné kuličky (pro ACA) [14] .....	10
Obr. 3 Uhlíková nanovlákna [14].....	10
Obr. 4 Pozlacené lupínky z mědi [14].....	10
Obr. 5 Ilustrační obrázek struktury ACA ve formě fólie .....	11
Obr. 6 Křivka znázorňující perkolační práh [11] (upraveno).....	12
Obr. 7 Celkový odpor spoje vytvořený pomocí ACA [14].....	13
Obr. 8 Faktory podílející se na celkovém odporu spoje tvořeného ACA [6].....	14
Obr. 9 Průběh šablonového tisku .....	17
Obr. 10 Ilustrační obrázek sítotisku [10].....	18
Obr. 11 Šablona upevněná v rámu.....	21
Obr. 12 Pocínovaná DPS s lepidlem naneseným šablonovým tiskem.....	21
Obr. 13 Vakuová pinzeta pro osazování DPS součástkami.....	22
Obr. 14 Průběh osazování pozlacené DPS .....	22
Obr. 15 Horkovzdušná pec při vytvrzování sady vzorků .....	23
Obr. 16 Schématický obrázek čtyřbodové metody [14].....	24
Obr. 17 Přípravek pro měření čtyřbodovou metodou.....	24
Obr. 18 Vadná série vzorků – lepidlo ELPOX SC 515, cín (chemický).....	27
Obr. 19 Zkřehnuté lepidlo ELPOX SC 515 po opětovném vytvrzení.....	28
Obr. 20 Vlevo rezistor pro lepení, vpravo rezistor pro pájení.....	28
Obr. 21 Stroj pro provádění zkoušky adheze spojů.....	29
Obr. 22 Rozlomený rezistor.....	32
Obr. 23 Rezistor po zkoušce adheze neopustil svou pozici na DPS.....	32
Obr. 24 Umístěný rezistor, ELPOX SC 515, zlato.....	33
Obr. 25 Utržený rezistor, ELPOX SC 515, zlato.....	33
Obr. 26 Umístěný rezistor, ELPOX SC 515, měď .....	34
Obr. 27 Utržený rezistor, ELPOX SC 515, měď.....	34
Obr. 28 Umístěný rezistor, ELPOX SC 515, cín (HAL) .....	35
Obr. 29 Utržený rezistor, ELPOX SC 515, cín (HAL) .....	35
Obr. 30 Umístěný rezistor, ELPOX SC 515, cín (chemický) .....	36
Obr. 31 Utržený rezistor, ELPOX SC 515, cín (chemický).....	36
Obr. 32 Umístěný rezistor, ELPOX AX 70MN, zlato.....	37
Obr. 33 Utržený rezistor, ELPOX AX 70MN, zlato.....	37
Obr. 34 Umístěný rezistor, ELPOX AX 70MN, měď .....	38
Obr. 35 Utržený rezistor, ELPOX AX 70MN, měď .....	38
Obr. 36 Umístěný rezistor, ELPOX AX 70MN, cín (HAL).....	39
Obr. 37 Utržený rezistor, ELPOX AX 70MN, cín (HAL) .....	39
Obr. 38 Umístěný rezistor, ELPOX AX 70MN, cín (chem.).....	40
Obr. 39 Umístěný rezistor, ELPOX AX 70MN, cín (chem.).....	40
Obr. 40 Umístěný rezistor, ELPOX AX 15N, zlato.....	41
Obr. 41 Utržený rezistor, ELPOX AX 15N, zlato.....	41
Obr. 42 Umístěný rezistor, ELPOX AX 15N, měď .....	42
Obr. 43 Utržený rezistor, ELPOX AX 15N, měď .....	42
Obr. 44 Umístěný rezistor, ELPOX AX 15N, cín (HAL).....	43
Obr. 45 Utržený rezistor, ELPOX AX 15N, cín (HAL).....	43
Obr. 46 Umístěný rezistor, ELPOX AX 15N, cín (chemický) .....	44
Obr. 47 Utržený rezistor, ELPOX AX 15N, cín (chemický) .....	44

Obr. 48 Vzorky pro prvkovou analýzu .....	45
Obr. 49 Laserový skenovací konfokální mikroskop Keyence VK-X1000 [26] .....	46
Obr. 50 Skenovací elektronový mikroskop SEM Thermo Scientific Phenom ProX [26].....	46
Obr. 51 Popis struktury vzorku 1 – přiblížení 20x.....	47
Obr. 52 Struktura spoje vzorku 1 – přiblížení 50x.....	47
Obr. 53 Prvková analýza vzorku 1 .....	48
Obr. 54 Struktura spoje vzorku 2 – přiblížení 20x.....	49
Obr. 55 Struktura spoje vzorku 3 – přiblížení 20x.....	50
Obr. 56 Struktura spoje vzorku 3 – přiblížení 50x.....	51
Obr. 57 Struktura spoje vzorku 4 – přiblížení 20x.....	52
Obr. 58 Struktura spoje vzorku 4 – přiblížení 50x.....	52
Obr. 59 Prvková analýza vzorku 4 .....	53

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Přehled průměrných odporů.....	26
Graf 2 Přehled průměrných sil .....	31
Graf 3 Průběh síly, ELPOX SC 515, zlato .....	33
Graf 4 Průběh síly, ELPOX SC 515, měď.....	34
Graf 5 Průběh síly, ELPOX SC 515, cín (HAL) .....	35
Graf 6 Průběh síly, ELPOX SC 515, cín (chemický).....	36
Graf 7 Průběh síly, ELPOX AX 70MN, zlato.....	37
Graf 8 Průběh síly, ELPOX AX 70MN, měď .....	38
Graf 9 Průběh síly, ELPOX AX 70MN, cín (HAL) .....	39
Graf 10 Průběh síly, ELPOX AX 70MN, cín (chemický).....	40
Graf 11 Průběh síly, ELPOX AX 15N, zlato .....	41
Graf 12 Průběh síly, ELPOX AX 15N, měď.....	42
Graf 13 Průběh síly, ELPOX AX 15N, cín (HAL) .....	43
Graf 14 Průběh síly, ELPOX AX 15N, cín (chemický).....	44

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání vlastností pájených a lepených spojů [3] (upraveno).....	15
Tab. 2 Parametry použitých lepidel .....	20
Tab. 3 Naměřené a vypočtené hodnoty elektrických parametrů.....	25
Tab. 4 Vadná série vzorků – lepidlo ELPOX SC 515 .....	27
Tab. 5 Naměřené a vypočtené hodnoty mechanických parametrů.....	30
Tab. 6 Hodnoty, ELPOX SC 515, zlato.....	33
Tab. 7 Hodnoty, ELPOX SC 515, měď.....	34
Tab. 8 Hodnoty, ELPOX SC 515, cín (HAL).....	35
Tab. 9 Hodnoty, ELPOX SC 515, cín (chemický) .....	36
Tab. 10 Hodnoty, ELPOX AX 70MN, zlato.....	37
Tab. 11 Hodnoty, ELPOX AX 70MN, měď .....	38
Tab. 12 Hodnoty, ELPOX AX 70MN, cín (HAL).....	39
Tab. 13 Hodnoty, ELPOX AX 70MN, cín (chem.).....	40
Tab. 14 Hodnoty, ELPOX AX 15N, zlato.....	41

Tab. 15 Hodnoty, ELPOX AX 15N, měď .....	42
Tab. 16 Hodnoty, ELPOX AX 15N, cín (HAL).....	43
Tab. 17 Hodnoty, ELPOX AX 15N, cín (chemický) .....	44
Tab. 18 Parametry vzorků pro prvkovou analýzu.....	45
Tab. 19 Průměrné hodnoty odporů vzorků .....	54
Tab. 20 Průměrné hodnoty adhezních sil .....	54

## ZDROJE

[1] Chip-On-Glass (COG) Displays TFT LCD, the modern solution. *Display industrial solutions visions* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.lcd-module.com/displays/chip-on-glass-displays.html>

[2] *Chip-on-Glass LCD Driver Technology* [online]. 2012 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: [https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/LCD\\_WhitePaper\\_D3.pdf](https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/LCD_WhitePaper_D3.pdf)

[3] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice: pouzdrění aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.

[4] PETRŮJ, Jakub. *Sledování vybraných vlastností elektricky vodivých lepidel* [online]. Praha, 2018 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76721/F3-BP-2018-Petruj-Jakub-bakalarska%20prace%20Petruj%20verze%20do%20KOSU.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Pavel Mach.

[5] Reaktoplasty. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2022-04-27]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/21.html>

[6] MACH, Pavel. Modifikovaná elektricky vodivá lepidla. *Electroscope* [online]. Praha, 2009(2), 4 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/528/1/r3c2c7.pdf>

[7] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno: VUTIU, 2006. ISBN 80-214-3292-6.

[8] ŽALSKÁ, Pavlína. *Stárnutí spojů vytvořených elektricky vodivými lepidly* [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68445/F3-DP-2017-Zalska-Pavlina-Starnuti\\_spoju\\_vytvorenych\\_elektricky\\_vodivymi\\_lepidly.pdf](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68445/F3-DP-2017-Zalska-Pavlina-Starnuti_spoju_vytvorenych_elektricky_vodivymi_lepidly.pdf). Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Pavel Mach.

[9] ZHANG, Rongwei, Josh C. AGAR a C. P. WONG. *2010 12 th Electronics Packaging Technology Conference Recent Advances on Electrically Conductive Adhesives* [online]. 2010, 696 - 702 [cit. 2022-04-25]. ISBN 978-1-4244-8562-8. Dostupné z: [https://www.ocf.berkeley.edu/~jagar/assets/agar\\_ectc\\_2010\\_2.pdf](https://www.ocf.berkeley.edu/~jagar/assets/agar_ectc_2010_2.pdf)

[10] KRČMÁŘ, Ondřej. *Elektricky vodivá adheziva pro flexibilní substráty* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2022-04.-20]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/xmlui/bitstream/handle/11025/18897/DP\\_Krcmar\\_Ondrej.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://otik.uk.zcu.cz/xmlui/bitstream/handle/11025/18897/DP_Krcmar_Ondrej.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Radek Soukup.

[11] POŘÍZEK, Michal. *Elektricky vodivá lepidla* [online]. Zlín, 2016 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/38309/po%C5%99%C3%ADzek\\_2016\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/38309/po%C5%99%C3%ADzek_2016_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Vojtěch Křesálek.

[12] WINKLER, Martin. *Elektrický perkolační práh a dielektrické vlastnosti elastomerních nanokompozitů* [online]. Zlín, 2008 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/6992/winkler\\_2008\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/6992/winkler_2008_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Jarmila Vilčáková.

- [13] BUREŠOVÁ, Pavla. Elektrické vlastnosti: Základní pojmy, elektrická vodivost, elektrostatické chování polymerů. In: *ANZDOC* [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://adoc.pub/elektricke-vlastnosti-zakladni-pojmy-elektricka-vodivost-ele.html>
- [14] Moodle FEL ČVUT: Materiály pro výkonovou elektrotechniku [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=5411&lang=cs>
- [15] LICARI, James J. a Dale W. SWANSON. *Adhesives Technology for Electronic Applications: Materials, Processing, Reliability*. 2. vydání. Elsevier, 2011. ISBN 978-1-4377-7889-2.
- [16] BESHajOVÁ PELIKÁNOVÁ, I. a K. BARTÁK. The Influence of Curing Conditions on Properties of Electrically Conductive Adhesives. *Electroscope* [online]. 2017(2), 5 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/26599/1/Beshajova.pdf>
- [17] EBNESAJJAD, Sina. *Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing*. Oxford: Andrew, 2011. ISBN 978-1-4377-4461-3.
- [18] BOLCEK, Martin. *Aplikace lepidel v mikroelektronických sestavách* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=157982](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=157982). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ivan Szendiuch.
- [19] HOF, Manfred a Tomáš BRAVENÝ. *DPS Elektronika od A do Z: Lepidla a techniky lepení součástek* [online]. 2013 [cit. 2022-04-20]. ISSN 1805-5044. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:2612/lepidla-a-techniky-lepeni-soucastek>
- [20] BELUCZ, Jakub. *DPS Elektronika od A do Z: Povrchové úpravy desek plošných spojů* [online]. 2019 [cit. 2022-04-25]. ISSN 1805-5044. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:59606/z-aktualniho-vydani-povrchove-upravy-desek-plosnych-spojů>

[21] SLAVATA, Jakub. *Elektricky vodivé spoje* [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82830/F3-BP-2019-Slavata-Jakub-Elektricky%20vodive%20spoje.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ivana Beshajová Pelikánová.

[22] *Datasheet k lepidlu ELPOX SC 515* [online]. In: . [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://amepox-mc.pl/wp-content/uploads/2020/12/ELPOXSC515.pdf>

[23] *Datasheet k lepidlu ECO SOLDER AX 70MN* [online]. In: . [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: [https://amepox-mc.pl/wp-content/uploads/2020/12/E-S\\_AX70MN.pdf](https://amepox-mc.pl/wp-content/uploads/2020/12/E-S_AX70MN.pdf)

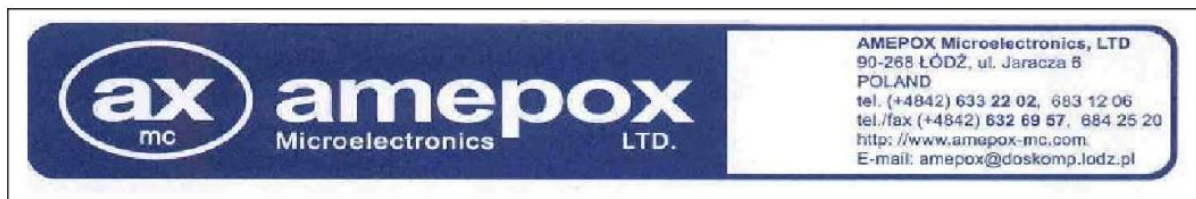
[24] *Datasheet k lepidlu ELPOX AX 15S* [online]. In: . [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://amepox-mc.pl/wp-content/uploads/2020/12/ELPOX AX 15S.pdf>

[25] Elektrická rezistivita. *Katedra fyziky materiálů: Matematicko-fyzikální fakulta Univerzita Karlova* [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.mff.cuni.cz/cs/kfm/experimentalni-vybaveni/elektricka-rezistivita>

[26] Laboratoř diagnostiky materiálů: Přístrojové vybavení. *Katedra elektrotechnologie, ČVUT v Praze, FEL* [online]. 2018 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://technology.fel.cvut.cz/laboratore/laborator-diagnostiky-materialu/>

## PŘÍLOHY

- Datasheety lepidel
- Tabulky naměřených hodnot elektrických a mechanických parametrů



# ELPOX SC 515

ELECTRICALLY CONDUCTIVE SILVER EPOXY

- \* EASY FOR USE
- \* FOR MULTIPURPOSE PROFESSIONAL APPLICATIONS
- \* VERY GOOD ADHESION PROPERTIES

## GENERAL DESCRIPTIONS:

**ELPOX SC 515** is a one component epoxy base and silver filled formulation with electrically conductive properties. This formulation is especially designed for chip bonding in microelectronic and optoelectronic applications. It is very easy to use and fast curing paste in temperature over 150°C.

**ELPOX SC 515** is very soft, smooth and thixotropic paste with an active solvent and very low viscosity value. This system has excellent handling characteristics at room temperature.

## SPECIFICATIONS:

Number of components	One
Consistency	Soft, smooth paste
Color	Bright silver
Percentage of fillers	66 ± 2%
Viscosity*	130 000 - 140 000 cps ( 1 rpm) 45 000 - 55 000 cps ( 5 rpm) 25 000 - 35 000 cps (10 rpm)
Thixotropy index (1/10)	4.7
Recommended curing schedule with air-circulated oven	150°C – 120 min. 180°C – 15 min. 200°C – 5 min.
Curing with IR tunnel oven	Ramp: 20° - 120°C – 2.5 min. Ramp: 120° - 180°C – 5.0 min. Ramp: 180° - 20°C – 3.5 min.
Shelf life	12 months (when storage at 15°C – unopened. Do not refrigerate).

\* Brookfield DVII; SSA#14; 25°



## **TECHNICAL PROPERTIES (\*):**

Specific gravity	2.6 – 2.7 g/cm <sup>3</sup>
Thermal conductivity	3.0 – 3.2 W/mK
Electrical resistivity after curing	0.006 – 0.03 m Ωm
Glass transition temperature (Tg)	90°C (TMS Method)
Max. operating temperature	Continuous - 150°C Intermittent - 190 - 260°C
Lap shear strength (Al-Al)	1.4 – 1.7 kG/mm <sup>2</sup>
Weight loss	0.4% up to 190°C

(\*) - Typical value for number of tests.

## **ATTENTION:**

**ELPOX SC 515** is supplied as a single component material and is available in variety of screw-top jar sizes. Minimum quantity is 100 grams.

1. Mix **ELPOX SC 515** – inside container very thoroughly before use, using wood or plastic spatula only. Mix smoothly from the bottom of the container. Mix carefully - not to whip air into the product.  
**INSURE ELPOX SC 515 IS AT ROOM TEMPERATURE WHEN YOU WILL START WORKING WITH.**
2. Prepare consistency before use according your SPECIFICATION.
3. If you need, use AXMC **TH # 515** thinner. Thinner will change paste mechanical and electrical properties. Pls, do not exceed 1.0% of weight. After first tests pls let us know about your viscosity requirements – we will be able to change it for you.
4. Low mechanical and electrical properties and poor adhesion performance are symptomatic that paste is under curing conditions.
5. Refrigeration during shelf time is not necessary. Keep container with adhesive in temp. not lower 15°C. Before use, increase paste temperature very slowly.
6. Use paste with adequate ventilation.
7. Avoid skin and eye contact. If ingested, wash with soap and water and consult a physician immediately.
8. Tools should be clean by alcohol or other suitable solvents.

This information is based on data and tests believed to be accurate. **AMEPOX MC** makes no warranties ( expressed or implied ) as to its accuracy and assumes no liability in connection with the use or inability to use this product.

(elpoxSC515)



## ECO SOLDER AX 70MN

POLYMER BASE, SOLDER REPLACEMENT PASTE

- \* **ELECTRICALLY CONDUCTIVE**
- \* **HIGH TEMPERATURE RESISTIVE FORMULATION**
- \* **EPOXY-PHENOLIC HYBRIDE TYPE BINDER**
- \* **HARMLESS & SAFE TO USE (NO LEAD; NO CFC; NO VOC)**
- \* **USES REGULAR ON LINE EQUIPMENT**
- \* **STABLE TECHNOLOGICAL PROPERTIES.**

### GENERAL DESCRIPTIONS:

AMEPOX MC product, trade name **ECO-SOLDER™** represents new generation of single component, electrically conductive formulation designed for replacement of traditionally tin-lead solder pastes. Technology with our new **ECO-SOLDER™** materials eliminates all type of solvents used for pre- or post-cleaning, like it is in conventional tin-lead solder technology.

One of the biggest advantages of **ECO-SOLDER™** is, that it contains no lead or any other dangerous ingredients. It may be used with standard dispensing, SMD stenciling (10/20 mil pitches with excellent resolution) or screen printing application. **ECO-SOLDER™** doesn't dry out on open screens or stencils for up to 2 weeks and refrigeration during storage of this material is not necessary.

**ECO-SOLDER™** has extremely short curing time (especially with IR heating tunnel) and quite pleasant odor. This is 100% solids formulation without any volatile thinners so, is no fear about safety conditions for work. CFC solvent's attack ozone layer in the stratosphere is widely known. Aqueous cleaning solvents usually contain alcohol such a methanol, ethanol or isopropyl which are VOC (volatile organic compounds). VOC's are photochemically active and cause smog and ozone in the lower atmosphere. The use of **ECO-SOLDER™** requires no fluxes and therefore no solvent cleaning of the PCB is needed.

**E-S AX 70MN** has high and stable electrical conductivity. This type is mostly for high-speed technological process. It doesn't change viscosity even on open area with thin layer.

### SPECIFICATIONS:

Number of components	One
Consistency	Floable paste
Color	Bright silver
Percentage of silver (inside ready paste)	70 ± 1%
Specific gravity	2.1 – 2.4 g/cm <sup>3</sup>
Viscosity	530 000 – 560 000 cps (*)
Drying time before curing process	Not necessary
Recommended curing schedule with air-circulated oven	180°C – (6 - 10) min. 200°C – (3 - 4) min.
Recommended curing schedule with heating tunnel	200°C in peak – 3 min. total time inside tunnel
Shelf life	6 months (when storage at 10°C – unopened)

(\*) - Brookfield DVII; SSA#14; 1 rpm; 25°C.

## TECHNICAL PROPERTIES (\*):

Electrical resistivity	(1.0 – 2.5) x E(-6) Ωm
Pencil hardness	9H pencil hardness (one day after curing)
Range of service for continuous temperature	(-55)°C - (+200)°C
Max. operating temperature	300°C for ab 1.5 h.

(\*) - Typical value for number of tests.

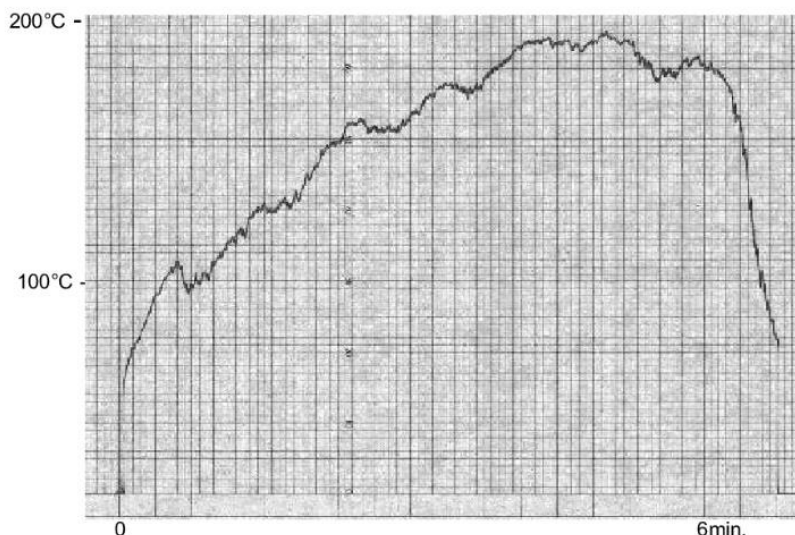


Fig.1. Example of heating tunnel profile for curing E-S AX 70MN

## ATTENTION:

1. Product is ready for use, but should be mixed very thoroughly before use using wood or plastic spatula. Mix smoothly from the bottom of the container. Mix carefully - not to whip air into the product. **INSURE E-S AX 70MN IS AT ROOM TEMPERATURE WHEN YOU WILL START WORKING WITH. Refrigeration during shelf time is not necessary.**
2. Prepare consistency before use according your SPECIFICATION.
3. If you need, use AXMC 70EM thinner. Thinner will change paste resistivity. Pls, do not exceed 1% of weight. After first tests pls let us know about your viscosity requirements – we will be able to change it for you.
4. Low conductivity and poor adhesion performance are symptomatic that paste is under curing conditions.
5. Refrigeration during shelf time not necessary, but useful. Keep container with lacquer in temp. no less 10 C. Before use, increase paste temperature very slowly.
6. Use paste with adequate ventilation.
7. Avoid skin and eye contact. If ingested, consult a physician immediately.
8. Clean by MEK or other suitable solvents. Allow screen to completely dry before using again.
9. Temperature during printing process must be kept between 20°C and 25°C, with relative humidity (RH) between 40% and 65%. This condition reduces static charges on the substrate.
10. When stored – keep container closed.

This information is based on data and tests believed to be accurate. **AMEPOX MC** makes no warranties ( expressed or implied ) as to its accuracy and assumes no liability in connection with the use or inability to use this product. ( es-ax70mn )



# ELPOX AX 15S

ELECTRICALLY CONDUCTIVE, SILVER EPOXY

- \* **TWO COMPONENTS 1:1 MIXING RATIO**
- \* **FOR PROFESSIONAL – ELECTRONIC APPLICATIONS**
- \* **POSSIBLE ROOM TEMPERATURE CURING**
- \* **LOW COST**

## GENERAL DESCRIPTIONS:

**ELPOX AX 15S** is two components, 100% solid (thinners free) high viscosity, epoxy base conductive formulation containing the purest silver flakes as possible. This is especially for service and short production series (manual applications).

**ELPOX AX 15S** has soft paste consistency and it has very good adhesion to many different types of materials - especially glass, quartz, semiconductor chips and oxide covered metals. It is design for bonding of metals and electronic devices like resistors, capacitors, transistors, diodes, etc., even on flexible foil base PCB.

## SPECIFICATIONS:

Number of components	Two.
Mixing ratio A : B (by weight)	1 : 1
Consistency after mixing A+B	Viscosity paste, 100% solids.
Viscosity "A" (*)	25 000 - 28 000 mPa s (cps)
Viscosity "B" (*)	120 000 - 140 000 mPa s (cps)
Viscosity "A+B" (*)	28 000 - 30 000 mPa s (cps)
Thixotropy Index "A+B" (1/10)	4.2 - 5.0
Color	Dark silver.
Percentage of silver	60 ± 1%
Recommended curing schedule	20 C - 24 hours 60 C - 120 min. 80 C - 100 min. 120 C - 30 min. 150 C - 15 min.
Pot life	1.5 hour @ 25 C.
Storage	6 month with closed container @ 25 C.

(\*) Brookfield DVII; SSA#14; 10rpm; 25C

## **PHYSICAL PROPERTIES (\*):**

Specific gravity "A"	2.45 – 2.65 g/ccm
Specific gravity "B"	1.55 – 1.65 g/ccm
Specific gravity "A+B"	1.95 – 2.50 g/ccm
Thermal conductivity	3.0 - 3.5 W/mK
Glass transition temp. ( Tg )	78 C (TMS method).
Hardness (6H pencil)	Passed
Resistivity after curing ( 20 C – 24 h )	0.001– 0.0012 Ωcm
( 60 C – 120 min)	0.0008 – 0.0009 Ωcm
( 150 C – 15 min)	0.00017 – 0.00018 Ωcm
Connection flexibility (**)	Min. Ø = 4 cm diameter – Passed

(\*) – Typical value for number of tests.

(\*\*) – Test: Min. 10 moves on Ø diameter roller.

## **ATTENTION:**

**ELPOX AX 15S** is supplied as a double component material and is available in a variety of screw-top jar sizes. Minimum quantity is 100 grams.

1. Mix **ELPOX AX 15S** – Part "A" and "B" inside containers separately first very thoroughly before use. After adding hardener – Part "B", mix mixture "A+B" very thoroughly before use, using wood or plastic spatula. Mix smoothly from the bottom of the container. Mix carefully - not to whip air into the product. **INSURE ELPOX AX 15S IS AT ROOM TEMPERATURE WHEN YOU WILL START WORKING WITH.**
2. Prepare consistency before use according your SPECIFICATION.
3. If you need, use AXMC TH # 15 thinner. Thinner will change paste resistivity. Pls, do not exceed 1% of weight. After first tests pls let us know about your viscosity requirements – we will be able to change it for you.
4. Low conductivity and poor adhesion performance are symptomatic that **ELPOX AX 15S** is under curing conditions or has been added too much thinner.
5. Refrigeration during shelf time is useful. Keep containers with both parts of silver paste in temp. no less 10 C. Before use, increase paste temperature very slowly.
6. Use silver epoxy paste with adequate ventilation.
7. Avoid skin and eye contact. If ingested, consult a physician immediately.
8. Clean by MEK, alcohol or other suitable solvents.

## **WARNING:**

Be careful on the case contacts with skin. When it occurs, wash immediately with soap and water.

This information is based on data and tests believed to be accurate. **AMEPOX MC** makes no warranties (expressed or implied) as to it's accuracy and assumes no liability in connection with the use or inability to use this product.

(ELPOX AX 15S)



Povrch DPS - ZLATO											
ELPOX SC 515 (180 °C/15 min)				ELPOX AX 70MN (180 °C/10 min)				ELPOX AX 15N (150 °C/15 min)			
vzorek	č. r.	R (mΩ)	F (N)	vzorek	č. r.	R (mΩ)	F (N)	vzorek	č. r.	R (mΩ)	F (N)
1	1	63,37	19,7847	1	1	73,08	3,7817	1	1	130,8	55,1531
	2	74,66	46,7269		2	60,79	1,5906		2	127,3	100,5619
	3	89,37	38,7878		3	76,85	1,7929		3	219,6	48,1034
	4	72,61	25,4224		4	70,27	1,5151		4	102,29	59,2242
	5	70,01	43,3763		5	77,28	5,2803		5	99,63	58,4837
	6	62,7	51,127		6	107,35	4,2161		6	308,3	62,7267
	7	80,14	59,7642		7	70,71	3,4455		7	108,61	38,6263
2	1	76,04	35,0004	2	1	73,42	3,0477	2	1	115,16	68,2844
	2	78,1	26,5945		2	71,75	1,3186		2	148,08	62,1204
	3	167,02	46,8862		3	63,62	2,256		3	142,06	62,7314
	4	69,5	54,8309		4	74,24	2,4398		4	122,85	59,6974
	5	87,44	34,3006		5	40,52	3,7697		5	112,44	60,5186
	6	79,03	50,1445		6	65,77	6,123		6	114,55	42,8278
	7	77,53	56,6976		7	66,7	5,0272		7	148,01	55,384
3	1	86,43	50,2138	3	1	84,75	1,5295	3	1	113,44	72,2095
	2	72,16	40,6513		2	71,3	5,3966		2	107,56	50,7803
	3	69,86	23,6775		3	68,42	2,3973		3	135,36	47,0368
	4	99,4	53,3147		4	70,24	3,8659		4	132,27	43,5935
	5	84,63	44,3683		5	60,14			5	112,23	37,1489
	6	66,59	90,4824		6	67,6	1,0155		6	137,02	54,357
	7	105,72	31,9372		7	80,58	11,7295		7	157,87	45,4053
4	1	124,81	22,9075	4	1	30,42		4	1	144,6	59,3849
	2	65,67	33,4058		2	69,86			2	140,07	64,4657
	3	66,01	47,2928		3	76,88	4,2809		3	152,86	90,1382
	4	77,17	72,9965		4	66,74	3,9802		4	101,91	56,4415
	5	71,22	38,8582		5	64,73	1,8377		5	116,02	82,2173
	6	67,29	32,1319		6	76,28			6	122,3	53,0291
	7	67,59	70,2135		7	64,67			7	146,61	73,2758
5	1	112,09	41,2927	5	1	76,86	1,6307	5	1	109,71	48,2002
	2	78,46	31,2612		2	69,67	5,8645		2	95,62	86,1505
	3	80,03	30,1103		3	68,33	4,4789		3	107,97	78,3012
	4	240,1	57,2353		4	67,23	2,0981		4	95,71	55,2063
	5	62,56	47,6257		5	69,06	5,3135		5	86,01	37,4321
	6	72,42	50,7194		6	78,1	1,1821		6	140,65	70,5604
	7	84,58	45,8646		7	67,14	5,2285		7	115,35	67,8226
6	1	81,06	43,0683					6	1	121,14	94,3244
	2	74,94	32,9986						2	95,26	46,5644
	3	70,97	48,8904						3	178,07	47,1617
	4	83,61	26,9579						4	134,42	83,6537
	5	71,51	31,0036						5	129,6	61,6059
	6	40,4	19,2417						6	130,28	42,2028
	7	119,38	21,4221						7	151,34	64,2969

7	1	84,64	29,1028					7	1	145,16	41,3688
	2	130,06	29,5161						2	157,02	64,9301
	3	74,03	39,7423						3	122,15	47,8083
	4	120,21	34,6512						4	115,14	51,5583
	5	64,35	38,4927						5	78,19	46,3712
	6	73,94	30,6982						6	123,97	51,4548
	7	66,74	44,7592						7	135,83	40,2502
8	1	74,08	30,0866					8	1	74,15	56,3966
	2	73,99	43,2404						2	112,86	59,6395
	3	75	16,4357						3	81,54	34,8417
	4	67,02	56,9677						4	77,05	37,9542
	5	97,61	57,0986						5	82,9	59,4785
	6	109,74	33,9445						6	107,66	55,1745
	7	80,88	24,6709						7	105,81	31,5419
9	1	82,31	41,7717					9	1	124,55	47,8348
	2	71,3	26,6157						2	11,41	61,6028
	3	63,64	46,667						3	112,62	44,6109
	4	77,76	58,5518						4	98,09	66,4818
	5	74,72	55,6975						5	115,5	44,9351
	6	65,2	39,387						6	109,63	53,8104
	7	68,58	53,6288						7	105,32	55,3982
10	1	84	83,4002					10	1	119,37	40,6458
	2	71,23	33,8123						2	165,75	58,5209
	3	67,37	59,2009						3	99,4	41,2814
	4	72,21	17,4365						4	103,24	49,4615
	5	69,23	47,6537						5	157,62	55,5503
	6	80,74	75,5702						6	158,66	64,9707
	7	108,56	40,4543						7	175,28	55,5865

Povrch DPS - MĚĎ											
ELPOX SC 515 (180 °C/15 min)				ELPOX AX 70MN (180 °C/10 min)				ELPOX AX 15N (150 °C/15 min)			
vzorek	č.r.	R (mΩ)	F (N)	vzorek	č.r.	R (mΩ)	F (N)	vzorek	č.r.	R (mΩ)	F (N)
1	1	62,45	48,312	1	1	98,62	0,4204	1	1	32,14	56,7201
	2	64,8	32,7734		2	95,5	0,9367		2	90,42	64,3645
	3	62,25	17,6769		3	77,08	2,353		3	121,96	47,3019
	4	70,86	21,9728		4	84,93	1,2819		4	120,35	40,0192
	5	64,09	46,5224		5	101,71	0,8891		5	115,79	60,3793
	6	106,11	14,0061		6	98,82	0,8928		6	83,67	50,6096
	7	66,83	42,427		7	104,31	0,6809		7	106,33	63,0603
2	1	74,14	29,5375	2	1	100,18	0,157	2	1	91,79	45,0596
	2	67,21	15,6123		2	103,24	1,2381		2	77,93	68,8608
	3	72,5	20,5286		3	95,15	1,5557		3	108,06	69,3789
	4	75,16	30,1217		4	83,51	1,6486		4	153,2	39,7498
	5	79,75	26,518		5	84,68	1,4388		5	102,3	44,5354



	6	72,91	26,0798		6	87,3	1,5368		6	98,9	62,5396
	7	65,4	33,3447		7	82,04	1,4379		7	103,19	65,664
3	1	63,28	23,9291	3	1	96,73	1,1181	3	1	81,14	49,0467
	2	78,31	12,4611		2	79,93	6,9917		2	101,98	52,2109
	3	77,21	20,6367		3	75,5	1,5238		3	86,49	72,7875
	4	84,55	20,8875		4	79,58	1,08		4	82,46	62,3486
	5	73,21	8,9274		5	86,58	2,1806		5	94,79	74,6151
	6	68,77	16,4554		6	87,72	2,6646		6	100,23	60,6132
	7	64,89	13,4522		7	79,38	0,6172		7	80,33	41,7378
4	1	69,99	27,7284	4	1	93,6	2,1374	4	1	90,61	68,82
	2	62,63	32,1839		2	78,91	2,8873		2	112,88	77,6696
	3	67,62	21,8215		3	108,37	2,2164		3	143,3	39,0972
	4	69,28	11,2016		4	74,32	3,4305		4	100,67	22,6511
	5	76,48	35,5717		5	87,55			5	106,09	103,0748
	6	68,34	23,1907		6	98,69	0,9869		6	84,35	62,8405
	7	72,39	22,3222		7	79,71	1,1509		7	98,83	56,3173
5	1	65,83	33,1136	5	1	74,1	0,6713	5	1	11,35	45,4872
	2	68,11	25,4099		2	78,05	2,0181		2	100,04	99,5542
	3	77,46	28,759		3	78,5	2,3015		3	83,17	94,7803
	4	64,51	29,0851		4	86,83	4,1618		4	80,25	88,3823
	5	68,88	26,384		5	91,12	3,8839		5	81,74	61,1119
	6	65,34	10,9433		6	120,67	2,3955		6	102,61	58,9927
	7	64,98	14,3373		7	86,7	2,1113		7	109,75	82,172
6	1	71,73	29,4852					6	1	107,34	54,9025
	2	70,34	15,5908						2	96,92	61,4372
	3	61,42	32,782						3	91,73	43,4175
	4	66,97	22,9431						4	114,5	76,0376
	5	79,87	21,1426						5	112,38	81,3017
	6	64,24	17,9521						6	127,91	61,0246
	7	73,32	16,5877						7	144,56	79,9008
7	1	72	31,2517					7	1	112,63	25,9833
	2	69,78	13,855						2	140,05	23,4248
	3	67,68	32,581						3	75,9	18,0389
	4	72,47	34,1421						4	113,54	34,5609
	5	63,51	29,6934						5	88,24	31,2622
	6	69,09	15,894						6	239,6	24,3182
	7	70,25	12,5943						7	109,82	41,3882
8	1	82,22	18,1258					8	1	90,01	48,9399
	2	70,97	23,4797						2	100,64	46,6713
	3	66,54	34,9828						3	80,61	24,8581
	4	77,22	25,9958						4	114,89	56,5083
	5	69,95	25,5735						5	89,04	51,4542
	6	76,14	29,6436						6	94,66	38,2118
	7	68,91	30,0325						7	76,33	33,1811
9	1	69,33	21,4808					9	1	165,55	42,6916

	2	72,02	27,4975						2	101,51	70,7929
	3	75,23	23,1936						3	85,12	68,463
	4	72,97	18,6347						4	119,29	94,7646
	5	68,84	28,6048						5	221,8	46,5822
	6	70,06	25,6489						6	133,25	51,0407
	7	74,24	21,9579						7	115,78	45,7588
	10	1	61,48	22,4404						10	1
2		71,91	24,3075					2	109,11		62,4032
3		60,24	6,5317					3	94,25		63,9728
4		61,94	23,6623					4	102,57		61,2056
5		66,59	23,9986					5	91,39		60,8452
6		65,51	21,4088					6	129,45		62,4564
7		77,65	19,9365					7	115,55		62,5494

Povrch DPS - CÍN (HAL)											
ELPOX SC 515 (180 °C/15 min)				ELPOX AX 70MN (180 °C/10 min)				ELPOX AX 15N (150 °C/15 min)			
vzorek	č. r.	R (mΩ)	F (N)	vzorek	č. r.	R (mΩ)	F (N)	vzorek	č. r.	R (mΩ)	F (N)
1	1	1 437,50	27,5965	1	1	230	3,4889	1	1	116,29	51,6142
	2	5 018,00	19,4464		2	179,02	2,6938		2	129,71	44,5718
	3	66 990,00	25,9772		3	179,76	5,738		3	127,22	76,2162
	4	24 430,00			4	276,6	7,2163		4	88,46	65,1002
	5	50 330,00	15,6003		5	218	5,5289		5	88,66	53,1084
	6	69 410,00	16,2031		6	148,57	3,1939		6	186,36	65,1846
	7	333 900,00	15,7041		7	255,6	2,5958		7	109,41	48,4708
2	1	275 100,00	36,543	2	1	246,7	2,7557	2	1	111,93	58,7717
	2	465 100,00	22,6119		2	168,52	6,986		2	116,93	63,7972
	3	41 010,00	33,0055		3	153,28	6,5204		3	106,6	53,1674
	4	415,10	24,0506		4	207,2	3,1901		4	93,17	61,0762
	5	48 910,00	23,9277		5	167,96	4,523		5	102,41	43,626
	6	3 640,00	14,9349		6	203,4	5,0113		6	97,77	49,3376
	7	2 040,00	26,2404		7	172,59	4,6897		7	129,71	43,7813
3	1	7 651,00	19,148	3	1	103	9,0438	3	1	101,3	55,2281
	2	193 220,00	21,8805		2	107,48	3,6334		2	128,07	58,1853
	3	282 100,00	35,6037		3	118,97	5,9708		3	115,24	56,7117
	4	16 925,00	18,9393		4	128,36	7,9708		4	117,57	44,0516
	5	122 460,00	22,9556		5	127,18	6,8045		5	128,46	58,3164
	6	8 316,00	19,9618		6	117,63	4,2742		6	113,55	60,745
	7	3 701,00	21,5514		7	201,5	3,4582		7	147,62	45,9753
4	1	6 546,00	21,8183	4	1	182,17	3,2357	4	1	114,97	40,8701
	2	10 143,00	16,8528		2	303,4	3,1997		2	127,44	56,7412
	3	319 500,00	18,9913		3	157,38	5,7173		3	97,7	75,3718
	4	35 260,00	37,0053		4	150,11	4,6873		4	113,45	54,4205
	5	6 452,00	34,223		5	123,38	4,0433		5	98,62	55,499
	6	8 399,00	39,7567		6	182,44	3,1867		6	118,91	41,2503

	7	100 300,00	35,8887		7	179,23	2,5461		7	104,26	48,8005
5	1	13 696,00	28,3166	5	1	125,26	2,6223	5	1	113,2	48,2088
	2	467 000,00	17,7229		2	342,1	5,9717		2	102,64	69,0123
	3	833 900,00	11,752		3	132	2,6897		3	124,9	72,431
	4	642 200,00	13,9915		4	117,19	6,1817		4	145,25	73,8609
	5	531 600,00	19,6101		5	125,76	7,9086		5	119,54	56,2683
	6	723 300,00	18,9232		6	165,92	2,5707		6	116,51	49,2617
	7	324 300,00	14,9312		7	135,69	3,9963		7	97,73	69,6697
6	1	4 061,00	20,7944					6	1	94,55	62,2485
	2	8 922,00	19,2156						2	123,01	53,5216
	3	2 719,00	15,4302						3	115,15	72,4287
	4	2 392,00	9,5568						4	104,87	72,855
	5	87 130,00	15,7204						5	125,98	79,0918
	6	8 087,00	20,7329						6	102,44	93,4829
	7	24 010,00	14,6616						7	97,43	57,2412
7	1	2 573,00	34,8533					7	1	108,45	48,9326
	2	18 689,00	35,5854						2	113,92	61,8343
	3	51 410,00	39,1976						3	135,24	50,6315
	4	27 820,00	40,1272						4	102,8	58,3518
	5	477 400,00	27,8267						5	98,46	66,2922
	6	3 195,00	38,8961						6	112,01	39,5659
	7	1 395,00	36,6326						7	111,24	44,9434
8	1	7 751,00	36,0437					8	1	99,86	51,2411
	2	10 691,00	35,6645						2	128,41	34,338
	3	60 700,00	29,2819						3	86,03	36,1371
	4	22 550,00	47,1366						4	119,43	55,0876
	5	52 630,00	22,1757						5	128,89	52,4214
	6	265 100,00	22,6952						6	139,91	24,9626
	7	1,04E+06	29,5337						7	103,26	69,6584
9	1	161 710,00	30,9244					9	1	123,63	50,152
	2	2 084,00	27,4427						2	108,92	54,4418
	3	8 691,00	34,0352						3	133,96	56,2318
	4	11 810,00	14,6406						4	108,22	72,4528
	5	5 041,00	25,2107						5	104,18	48,6931
	6	1 681,50	19,1973						6	106,91	38,9954
	7	26 510,00	31,1859						7	124,19	59,3979
10	1	3 340,00	32,4024					10	1	111,56	50,94
	2	10 341,00	10,7313						2	97,85	55,8385
	3	3 751,00	38,3604						3	104,99	74,8257
	4	1 910,00	26,1265						4	106,4	62,6766
	5	110 840,00	32,5868						5	107,44	64,3726
	6	432 400,00	14,5291						6	123,38	41,5577
	7	7 161,00	15,0025						7	100,41	54,9215

Povrch DPS - CÍN (CHEMICKÝ)											
ELPOX SC 515 (180 °C/15 min)				ELPOX AX 70MN (180 °C/10 min)				ELPOX AX 15N (150 °C/15 min)			
vzorek	č. r.	R (mΩ)	F (N)	vzorek	č. r.	R (mΩ)	F (N)	vzorek	č. r.	R (mΩ)	F (N)
1	1	551,70	48,6164	1	1	137,06	11,6532	1	1	113,61	86,3928
	2	265,40	37,6773		2	114,43	11,0694		2	113,53	56,744
	3	4 010,00	27,4351		3	136,24	14,0046		3	119,8	35,6208
	4	692,10	38,7506		4	138,02	9,1688		4	92,71	64,5428
	5	651,10	20,3031		5	182,14	8,9449		5	112,37	51,6815
	6	265,90	38,3377		6	134,62	10,0855		6	95,62	54,0687
	7	305,30	21,8188		7	244,8	12,6511		7	148,41	40,7747
2	1	213,30	59,8736	2	1	115,14	7,8813	2	1	193	51,8946
	2	339,90	26,4583		2	143,82	6,7637		2	104,03	52,962
	3	621,80	45,8309		3	159,96	8,4088		3	123,31	80,6189
	4	231,90	41,2281		4	126,77	5,0197		4	102,57	73,3699
	5	81 710,00	24,0783		5	110,07	5,8963		5	137,01	82,2845
	6	511,10	34,8497		6	115,75	3,3742		6	103,14	81,9013
	7	386,70	59,3111		7	140,9			7	118,87	65,6576
3	1	24 020,00	56,3379	3	1	139,39	4,9269	3	1	137,93	43,1752
	2	10 217,00	24,9462		2	148,81			2	131,05	53,5196
	3	418,20	16,9964		3	131,23	6,3863		3	98,93	38,8852
	4	88 210,00	28,7617		4	113,45	6,6164		4	103,23	53,1792
	5	29 010,00	15,5731		5	163,12	3,1056		5	124,57	41,0894
	6	228,30	23,1708		6	133,25	5,5935		6	102,36	38,2241
	7	586,90	36,1237		7	135,04	6,6492		7	91,51	59,234
4	1	581,20	21,1649	4	1	146,87	16,0157	4	1	126,32	73,52
	2	338,30	28,0452		2	152,36	9,08		2	102,2	69,9911
	3	437,60	30,0166		3	138	7,7542		3	107,88	45,2994
	4	345,10	61,0425		4	123,17	12,0073		4	160,22	82,1531
	5	240,80	34,9282		5	121,19	11,4608		5	102,49	69,9389
	6	339,50	65,0203		6	121,7	6,9926		6	100,25	62,4195
	7	429,90	29,0121		7	124	3,0282		7	106,84	53,0388
5	1	1 087,90	32,0972	5	1	122,99	5,3995	5	1	139,73	68,0882
	2	44 610,00	21,012		2	113,68	14,3372		2	158,12	69,647
	3	840,10	29,0271		3	109,03	13,7552		3	202,5	81,4124
	4	734,10	25,1022		4	130,89	12,645		4	113,27	93,5623
	5	268,00	27,2531		5	117,93			5	118,61	74,0987
	6	1 163,10	38,806		6	110,34	14,3448		6	129,94	101,1961
	7	377,00	29,857		7	115,21	9,5997		7	118,92	96,5261
6	1	357,00	26,8993					6	1	154,36	
	2	1 055,40	31,0202						2	184,26	52,3399
	3	439,70	30,601						3	160,44	81,2057
	4	561,80	29,0838						4	175,84	104,0826
	5	266,90	57,8381						5	165,65	72,9603
	6	220,50	66,2138						6	253,1	

	7	186,61	74,5798						7	137,46	32,0144	
7	1	295,80	47,3496						7	1	184,36	66,2615
	2	326,80	26,8295							2	132,13	51,1857
	3	265,90	20,8515							3	177,93	47,6751
	4	250,30	32,878							4	138,01	70,1084
	5	817,50	40,949							5	162,12	69,8409
	6	178,70	62,465							6	110,41	38,2495
	7	157,10	29,3363							7	149,61	54,4405
8	1	196,00	34,7774						8	1	101,49	78,8032
	2	13 210,00	47,3621							2	160,51	70,5126
	3	250,60	56,9704							3	164,31	55,3526
	4	232,70	42,8349							4	160,88	60,2476
	5	481,00	59,0265							5	138,32	65,8752
	6	362,10	53,3818							6	177,43	75,8892
	7	241,80	34,4086							7	165,42	60,3
9	1	4 177,00	32,0667						9	1	132,73	65,4627
	2	409,90	28,894							2	139,41	59,0633
	3	557,10	35,1871							3	135,94	73,4455
	4	328,90	16,4798							4	139,04	80,0496
	5	2 201,00	31,814							5	161,99	63,1972
	6	1 201,00	31,0335							6	151,9	46,7274
	7	13 645,00	26,6698							7	124,01	49,1603
10	1	501,10	30,7205						10	1	145,52	33,8475
	2	1 300,10	36,7534							2	197,77	71,5733
	3	2 349,00	22,2575							3	151,66	42,6331
	4	646,10	31,8513							4	138,55	65,7952
	5	2 520,00	21,6531							5	123,21	45,6919
	6	455,40	48,8584							6	185,17	55,1832
	7	510,20	50,1533							7	195,68	55,0033