

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Testování vodivě lepených spojů pro flexibilní elektroniku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Robert ZELENKA**
Osobní číslo: **E15N0048P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Testování vodivě lepených spojů pro flexibilní elektroniku**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Zpracujte přehled vodivých lepidel vhodných pro tištěnou flexibilní elektroniku.
2. Popište metody charakterizace vodivě lepených spojů v elektronice.
3. Realizujte vzorky vodivě lepených spojů s vybranými druhy lepidel.
4. Charakterizujte kvalitu vodivě lepených spojů (za konstantních, zvýšených, snížených teplot a při klimatickém cyklování teploty a vlhkosti).

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Elektronické informační zdroje.
2. Datasheet výrobců elektricky vodivých lepidel
3. Mach P., Modifikovaná elektricky vodivá lepidla, Electroscope, 2009

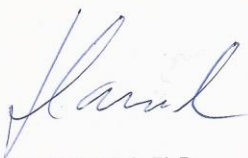
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Džugan, Ph.D.**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


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




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

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na atraktivní směr v elektronice, kterým je flexibilní elektronika. V rámci práce je vypracována řešení komerčně dostupných elektricky vodivých lepidel. Diplomová práce se v praktické části zabývá charakterizací a testováním vodivě lepených spojů v odlišných klimatických podmínkách simulujících akcelerované stárnutí a dále je testována mechanická pevnost spojů ve smyku. Na základě testů je vyhodnocena kvalita realizovaných elektricky vodivých lepených spojů.

Klíčová slova

flexibilní elektronika, elektricky vodivá lepidla, elektricky vodivá lepidla izotropní, elektricky vodivá lepidla anizotropní, elektricky vodivé lepené spoje, testování vodivě lepených spojů, klimatické testy akcelerovaného stárnutí, mechanická pevnost ve smyku

Abstract

This diploma thesis is focused on the attractive trend in electronics, which is flexible electronics. Within this work, a research of commercially available electrically conductive adhesives is made. The diploma thesis deals with the characterization and testing of conductive adhesive bonded joints exposed to different climatic conditions that simulates accelerated aging and additionally the mechanical strength of the shear joints is tested. Based on the tests results, the quality of the realized electrically conductive bonded joints is evaluated.

Key words

Flexible Electronics, Electrically Conductive Adhesives, Isotropic Electrically Conductive Adhesives, Anisotropic Electrically Conductive Adhesives, Electrically Conductive Adhesive Joints, Climatic Tests of Accelerated Aging, Mechanical Shear Strength

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 5. 5. 2017

Bc. Robert Zelenka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Džuganovi, Ph.D za velmi cenné profesní rady a za metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKA	12
1.1 TIŠTĚNÁ ELEKTRONIKA	13
1.2 HYBRIDNÍ ELEKTRONIKA	14
1.3 MATERIÁLY, STRUKTURA A SUBSTRÁTY	15
2 ELEKTRICKY VODIVÁ LEPIDLA	17
2.1 VYTVRZOVÁNÍ LEPIDEL	19
2.2 DĚLENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH LEPIDEL	19
2.2.1 <i>Lepidla s izotropní elektrickou vodivostí</i>	20
2.2.2 <i>Lepidla s anizotropní elektrickou vodivostí</i>	20
3 PŘEHLED KOMERČNĚ DOSTUPNÝCH VODIVÝCH LEPIDEL PRO FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKU	23
3.1 HENKEL AG & Co. KGAA	23
3.2 HERAEUS HOLDING GMBH	24
3.3 PANACOL AG	25
3.4 EPOXY TECHNOLOGY, INC	26
3.5 CREATIVE MATERIALS	27
3.6 ENGINEERED MATERIALS SYSTEMS, INC	29
3.7 MASTER BOND INC.	29
3.8 POLYTEC PT GMBH	30
3.9 FERRO ELECTRONIC MATERIALS	30
3.10 CHOMERICS	30
3.11 PROTAVIC AMERICA, INC.	31
3.12 DELO INDUSTRIE KLEBSTOFFE GMBH & Co. KGAA	31
4 ELEKTRICKY VODIVÉ LEPENÉ SPOJE - VLASTNOSTI A CHARAKTERIZACE	32
4.1 SPOLEHLIVOSTNÍ ASPEKTY A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI VODIVĚ LEPENÝCH SPOJŮ	32
4.1.1 <i>Elektrický odpor a příčiny jeho vzniku</i>	32
4.1.2 <i>Mechanické aspekty spolehlivosti</i>	34
4.2 METODY PRO TESTOVÁNÍ A MĚŘENÍ VODIVĚ LEPENÝCH SPOJŮ	35
4.2.1 <i>Měření elektrických veličin</i>	36
4.2.2 <i>Mechanické testování</i>	38
4.2.3 <i>Akcelerované klimatické testování</i>	38
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – PŘÍPRAVA VZORKŮ	40
5.1 FLEXIBILNÍ SUBSTRÁTY	40
5.2 VÝBĚR LEPIDEL A JEJICH CHARAKTERISTIKA	42
5.2.1 <i>Lepidlo Heraeus PC3201 – L1</i>	43
5.2.2 <i>Lepidlo MG Chemicals 8331S – L2</i>	43
5.2.3 <i>Panacol Elecolit® 3661 – L3</i>	43
5.3 POSTUP DEPOZICE LEPIDEL A VYTVÁŘENÍ LEPENÝCH SPOJŮ	43
5.4 SESTAVA PRO MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU	46
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – TESTOVÁNÍ VODIVĚ LEPENÝCH SPOJŮ	47
6.1 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI REALIZOVANÝCH VZORKŮ MĚŘENÍM ELEKTRICKÉHO ODPORU	47
6.2 AKCELEROVANÉ STÁRNUTÍ VZORKŮ – KLIMATICKÉ TESTOVÁNÍ	48

6.2.1	<i>Klimatické testování – suché teplo</i>	48
6.2.2	<i>Klimatické testování – chladné prostředí</i>	51
6.2.3	<i>Klimatické testování – vlhké teplo</i>	54
6.2.4	<i>Klimatické testování – teplotní změny</i>	56
6.3	MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ – PEVNOST SOUČÁSTEK VE SMYKU	57
7	ROZBOR ECA SPOJŮ NA ZÁKLADĚ MIKROSKOPICKÉHO POHLEDU	61
8	ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU A DISKUZE VÝSLEDKŮ	64
	ZÁVĚR	66
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	68
	PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

ACA	Anizotropní elektricky vodivé lepidlo (<i>Anisotropic Conductive Adhesive</i>)
ACAs	Anizotropní elektricky vodivá lepidla (<i>Anisotropic Conductive Adhesives</i>)
CTE	Koeficient tepelné roztažnosti [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
DMM	Digitální multimetr
ECA	Elektricky vodivé lepidlo (<i>Electrically Conductive Adhesive</i>)
ECAs	Elektricky vodivá lepidla (<i>Electrically Conductive Adhesives</i>)
ECA spoje	Elektricky vodivé lepené spoje
FPC	Flexibilní tištěný obvod (<i>Flexible Printed Circuit</i>)
KET	Katedra technologií a měření
L1	Lepidlo Heraeus PC 3201
L2	Lepidlo MG Chemicals 8331S
L3	Lepidlo Panacol Elecolit [®] 3661
LCD	Displej z tekutých krystalů (<i>Liquid Crystal Display</i>)
OLED	Organické světlo emitující diody (<i>Organic Light-Emitting Diode</i>)
PAR	Polyakrylát
PC	Polykarbonát
PEN	Polyetylnaftalát
PES	Polyester
PET	Polyetylentereftalát
PI	Polyimid
RFID	Identifikace na radiové frekvenci (<i>Radio Frequency Identification</i>)
RICE	Regionální inovační centrum elektrotechniky
SMD	Součástka pro povrchovou montáž (<i>Surface Mount Device</i>)
UV	Ultrafialový (<i>Ultra Violet</i>)
R	Elektrický odpor [Ω]

Úvod

Elektricky vodivá lepidla se dostala do popředí zájmu vzhledem k tendencím nalézat bezolovnaté alternativy pájky. Konstrukce elektricky vodivých spojů realizovaných elektricky vodivými lepidly však obnáší zásadní rozdíly oproti tradiční technologii pájení. Pájené spoje dosahují daleko vyšší vodivosti (o dva až tři řády), jsou odolnější vůči vlhkosti a v neposlední řadě cena pájky je oproti ceně elektricky vodivých lepidel neporovnatelně nižší [1].

S rozvojem flexibilní elektroniky vznikají specifické požadavky na vlastnosti elektrického propojování v těchto nových zařízeních. I přes nižší elektrickou vodivost elektricky vodivých lepených spojů jsou typické vlastnosti elektricky vodivých lepidel příhodné pro využívání ve flexibilní elektronice. Nejčastěji je vyzdvižována nízká teplota vytvrzování lepidel (v porovnání s procesem pájení) a schopnost dosahovat flexibility bez porušení elektrických a mechanických vlastností.

S konjunkturou flexibilní elektroniky je nezbytné poznat chování elektricky vodivých lepených spojů v klimatických zátěžových testech a na základě zjištěného chování těchto spojů pak definovat limity jejich použití.

V diplomové práci je zpracován teoretický úvod do problematiky flexibilní elektroniky, rešerše komerčně dostupných elektricky vodivých lepidel, na níž navazuje charakteristika elektricky vodivých lepidel a především pak charakterizace elektricky vodivých lepených spojů.

V praktické části jsou popsány postupy realizace elektricky vodivých lepených spojů, jejich testování a zpracování výsledků. Na základě naměřených dat jsou diskutovány výsledné závěry i obtíže, které nastaly při praktických experimentech.

Kvalita testovaných vzorků je evaluována z pohledu elektrického a z pohledu mechanického. V závěrečné pasáži jsou měřené vzorky podrobeny mikroskopickému pohledu a rozboru destruktivních mechanismů zkoušených spojů.

1 Flexibilní elektronika

Většina objektů v našem světě není staticky pevná, nýbrž pružná, pohyblivá, poddajná, ohebná, tvárná, přizpůsobivá, adaptibilní, ... zkrátka **flexibilní**. Integrace elektronické funkcionality do běžných a lidstvem každodenně používaných objektů přináší mnoho možností, výhod a benefitů.

Flexibilní elektronika je označení pro elektronická zařízení, která jsou buď částečně, nebo zcela flexibilní [2].

Z potenciálu využití flexibilní elektroniky, tedy elektronických zařízení, jejichž nosná a konstrukční část není konvenčně pevná ale flexibilní, lze těžit například v zobrazovací technice ve smyslu vytváření flexibilně přizpůsobivých obrazovek nebo displejů.

Široké možnosti využití nabízí také měřicí a sensorová technika. Tenké a ohebné senzory mohou významně zlepšit a obohatit své vyhodnocovací schopnosti v zařízeních určených pro snímání hodnot určitých tělesných funkcí, čehož se dá velmi výhodně využívat ve zdravotnictví, ale i vrcholovém sportu.

Nelze také opomenout výhodnost tenkých a flexibilních solárních článků. Právě tenkost spolu s flexibilitou se stala klíčovým aspektem ke snížení ceny jejich výroby a snadnější implementaci na nejrůznější zařízení [2].

Hybné síly ženoucí vývoj flexibilní elektroniky kupředu vycházející z požadavků současného trhu jsou [3]:

- **nové funkcionality stávajících zařízení**
 - adaptibilní natáčivé OLED světlomety (automobilový průmysl)
 - *energy harvesting*¹ (fotovoltaické články)
 - mechanická odolnost OLED displejů (smartphony, tablety)
- **vytváření zcela nových zařízení**
 - nositelná elektronika (aplikace flexibilních obvodů do textilií)

¹ Energy Harvesting je označení pro generování elektrické energie z „alternativních“ zdrojů nacházejících se v bezprostřední blízkosti napájených nízkopříkonových aplikací s využitím okolní teploty, vibrací nebo rázů. Pojem Energy Harvesting se do češtiny nepřekládá [4].

- **využití velkoplošných možností tisku flexibilních obvodů a redukovat ceny**
 - metoda roll-to-roll je ekonomicky velmi výhodná pro tisk rozsáhlých (opakujících se) motivů a je velmi vhodná pro využití i v tištěné flexibilní elektronice [5].

1.1 Tištěná elektronika

Tištěná elektronika zahrnuje elektronická zařízení vytvořená za pomoci aditivních tiskových procesů včetně pasivních i aktivních částí (tenkovrstvé rezistory, tranzistory a další) [6].

Možnost velmi levně a velkoplošně tisknout více či méně složitá elektronická zařízení, je předmětem velkého zájmu. Výhody těchto moderních technologií jsou možnosti integrace vzájemně nekompatibilních materiálů na jeden substrát, stejně tak disponovat více funkčními prvky na jednom substrátu (anténa, displej, pasivní a aktivní součástky) a to vše ve velmi lehkém a odolném funkčním celku při výrobě za nízkých teplot a s méně chemickým odpadem [7].

Postupy k výrobě tištěné elektroniky vycházejí ze známých principů, jako jsou: sítotisk, flexotisk, hlubotisk, ofset nebo inkjet. V elektrotechnice se jedná o standardní a levné metody a jejich využití pro flexibilní elektroniku je tudíž velmi příhodné [2], [5], [7].

V tištěné elektronice se využívají materiály zahrnující organické i anorganické polovodiče, kovové vodiče, nanočástice apod. Nanášení funkčních materiálů bývá v drtivé většině na bázi roztoků nebo disperzí. S pojmem tištěná elektronika úzce souvisí i termíny jako „organická elektronika“ nebo „plastová elektronika“, jelikož k vytvoření aktivních částí se může využívat i sloučenin uhlíku [6].

Limitujícími faktory tištěné elektroniky jsou obecně nízké spínací rychlosti tranzistorů. Nízký dostupný výpočetní výkon je překážkou pro výrobu plně tištěných a svým výkonem adekvátních flexibilních zařízení, které by konkurovaly současným možnostem klasických křemíkových řídicích obvodů, a zároveň by mohly být levně tisknutelné ve velkých plochách, proto je důležité v přístupu k tištěné elektronice přemýšlet nad vhodným způsobem využití a navrhovat taková zařízení, u nichž nebudou tyto negativní vlastnosti zásadní překážkou [8].

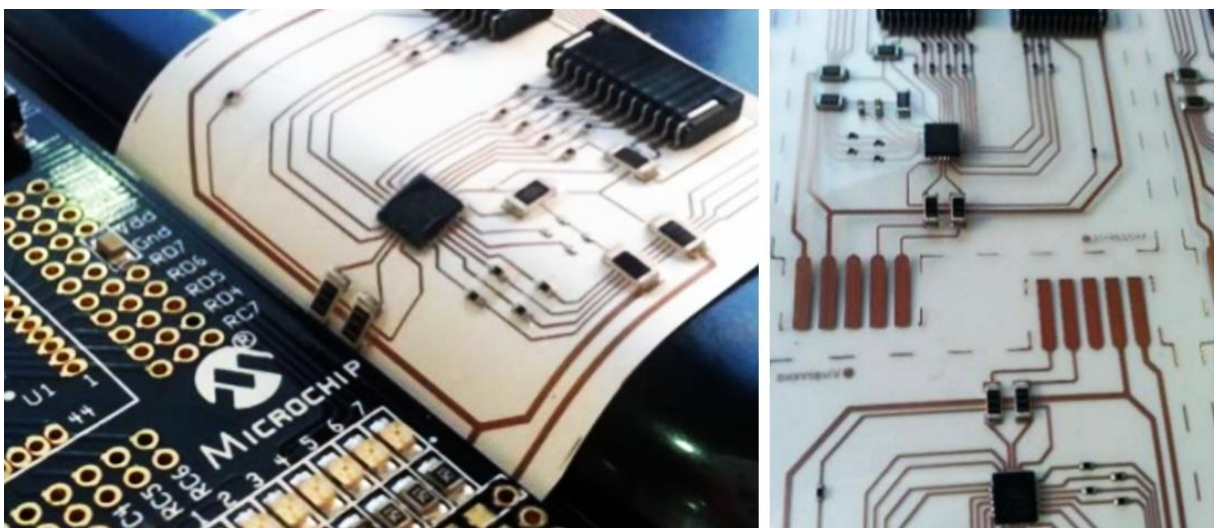
1.2 Hybridní elektronika

Hybridní elektronika (v angličtině *Hybrid Electronics*, ale také jako polymerní elektronika z výrazu *Polytronics* odvozeného z „*Polymer Electronics*“) je kombinací klasické křemíkové elektroniky a tištěné flexibilní elektroniky [7].

Globální zájem o hybridní řešení tkví v doposud nepřekonaných možnostech současné křemíkové technologie a zároveň v benefitech tištěné elektroniky, které by v kombinaci mohly přispět k uskutečnění technologických vizí nejrůznějších smart systémů, hlubší implementace „internetu věcí“ apod. [9].

Konfigurace hybridní elektroniky je samozřejmě závislá na konkrétní aplikaci, nicméně obecně bývá sestavena z křemíkových integrovaných obvodů de facto vyrobených klasickými způsoby, ty jsou dále umístěny na flexibilních substrátech vytvořených pomocí tištěných metod a spolu s nimi jsou zde také například tištěné senzory nebo organická fotovoltaika apod.

Španělská firma Vivainnova, specializující se na tištěnou elektroniku, přišla na trh s technologií ultra flexibilních tištěných obvodů (*Ultra Flexible Printed Circuits - UFPC*). UFPC obvody jsou vytvářeny natištěním měděných vodivých cest na flexibilní plastové substráty, jejichž udávaná tloušťka je 30 až 200 μm . Tyto obvody lze osazovat SMD součástkami a vzniká tak hybridní systém [10].



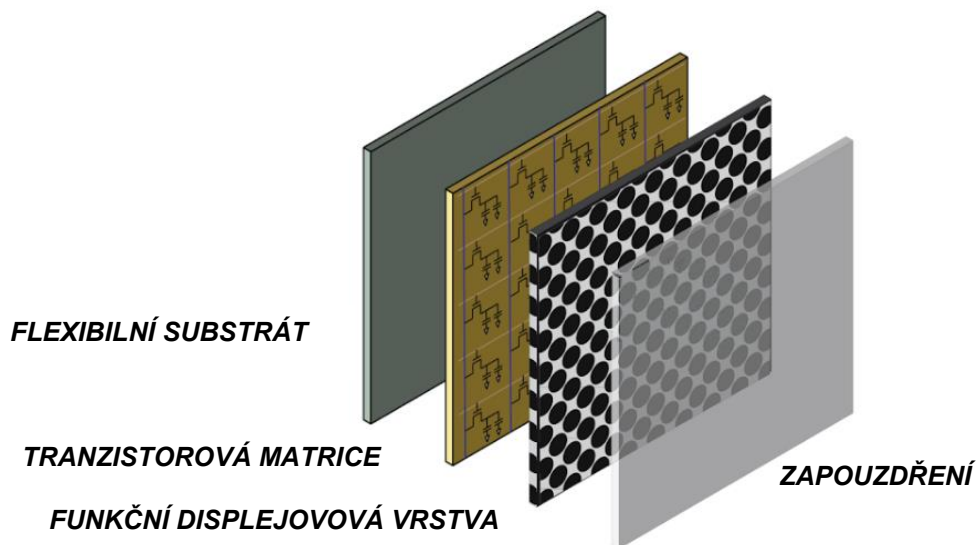
Obrázek 1.1 - Ukázka „Ultra Flexible Printed Circuits“ od firmy Vivainnova [10]

Hybridní systémy můžeme považovat za zajímavou alternativu k tištěné flexibilní elektronice, ale i ke klasické rigidní elektronice.

1.3 Materiály, struktura a substráty

Struktura klasických elektronických zařízení sestává ze substrátu, zadní řídicí části obsahující tranzistorovou matici (*backplane*), svrchní části nejčastěji s ovládacími prvky, elektrodami či displejem apod. (*frontplane*), a zapouzdření. Nejinak je tomu i v případě flexibilní elektroniky. Aby byla celá struktura flexibilní, všechny tyto vrstvy musí samy o sobě mít schopnost ohybu do určitého stupně flexibility a to samozřejmě bez ztráty funkčnosti [3], [11], [12].

Flexibilní substráty mají nejvýznamnější vliv na vlastnosti flexibilního zařízení, a proto jsou vyvíjeny a voleny vždy s nejvyššími ohledy na požadavky konkrétního zařízení. Flexibilní substráty lze řadit do čtyř základních skupin: tenká skla, tenké plastové filmy, kovové folie a vlákenné materiály (textilie nebo papír).



Obrázek 1.2 - Struktura typického rozložení flexibilních displejů [12]

- **skleněné substráty**

Tenké skleněné substráty se používají v zobrazovací technice. Tloušťka těchto skel je řádově v desítkách až stovkách nanometrů. Jedině takto tenké skleněné substráty mohou být flexibilní. Výhody skleněných substrátů jsou vynikající optická propustnost, hladkost povrchu, vysoká odolnost vůči teplotám, teplotní stabilita, rozměrová stabilita, odolnost vůči chemickým vlivům, nepropustnost vody nebo oxidů, odolnost vůči škrábancům a další.

Nevýhodou je křehkost a obtížné zpracování. Ke zlepšení mechanických vlastností lze kombinovat skleněný substrát s tenkou plastovou folií [3].

- ***plastové substráty***

Plastové folie patří k nejpoužívanějším substrátům pro flexibilní elektroniku. Jejich vlastnosti se do jisté míry různí v závislosti na konkrétním užití. Shodné charakteristiky lze shledat v obecně nízké ceně a nízké hmotnosti, což je obzvlášť výhodné pro velkoplošně tisknutelnou tištěnou elektroniku. Nelze však očekávat, že by plastové substráty mohly nabídnout chemickou, teplotní a rozměrovou stabilitu srovnatelnou se skleněnými substráty. Konkrétní plastové filmy jsou vytvářeny z polyetylentereftalátu (PET), polyetylnaftalátu (PEN), polykarbonátu (PC), polyétersulfonu (PES), polyimidu (PI) nebo polyakrylátu (PAR) [3], [13].

- ***kovové substráty***

Kovové folie nacházejí svá uplatnění pro zařízení, kde je zapotřebí při výrobě pracovat s vysokými teplotami. Oproti ostatním materiálům lze u kovových folií hovořit o odolnosti vůči teplotám. Kovové folie nabízejí také velmi dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. Další výhodou je odolnost vůči difúzi oxidů, odolnost vůči vodě a rovněž i vůči rozpouštědlům. Nejčastějším zástupcem je nerezová ocel, uplatnění nacházejí i měděné nebo titanové folie [13].

- ***papírové substráty***

Vzhledem k extrémně nízkým cenám papíru je i tento materiál v hledáčku vývojových týmů specializujících se na flexibilní elektroniku. V neprospěch tohoto materiálu hovoří přirozeně evidentní negativní vlastnosti pro elektroniku, jako jsou absorpce vody a dalších rozpouštědel nebo drsnost povrchu. Tato negativa lze více či méně eliminovat za pomoci chemických aditiv, tím však dochází k navyšování ceny, čímž se popírá vedle nízké hmotnosti nejvýznamnější výhoda tohoto substrátu [13].

2 Elektricky vodivá lepidla

Elektronická zařízení vždy vyžadují určité možnosti integrace s dalšími elektronickými systémy a subsystémy, ať už se jedná o napájecí zdroje, přídavné logické obvody nebo možnosti vzájemného propojení. Dle slov Katsuaki Suganoma z publikace „*Introduction to Printed Electronics*“ z roku 2014 [14] jsou vodivá lepidla v současnosti nejslibnější volbou pro elektrické propojování v tištěné elektronice.

Složení elektricky vodivých lepidel (anglicky *Electrically Conductive Adhesive* – ECA, v textu dále také jako *Electrically Conductive Adhesives* - ECAs) sestává ze dvou základních složek – vazební a vodivé. Funkce vazební části jsou zabezpečení mechanických vlastností spoje (pevnost, houževnatost, adheze), zajištění chemické stability v různých prostředích a také zajištění nosné matrice pro plnivo [14].

Plnivo je tvořeno elektricky vodivými částicemi (kuličky nebo lupínky). Nejčastěji se používají lupínky ze stříbra. Další využívané materiály jsou nikl, zlato nebo měď. Jejich úkolem je zabezpečit elektricky vodivé spojení [14].

Nevodivá vazební polymerní matrice elektricky vodivých lepidel bývá nejčastěji hmota na bázi reaktoplastu. Je-li tato hmota vystavena zvýšené teplotě (která závisí vždy na konfiguraci daného materiálu), v polymeru nastane chemická reakce, na jejímž konci je pak vytvořena zesíťovaná pevná struktura. Tento proces se nazývá vytvrzování. Původně tekutá hmota po vytvrzení nemůže být zvyšující se teplotou transformována zpět do tekutého stavu [15], [16].

V případě ECAs jsou nejfrekventovanějším zástupcem vazebních částí epoxidy. Epoxidová ECAs jsou dále členěna do dvou skupin – jednosložková a dvousložková [17].

Dvousložková epoxidová ECAs obsahují v části „A“ samotný epoxidový polymer a vodivé částice plniva. Část „B“ pak obsahuje zejména tvrdidla (někdy však obsahuje jak tvrdidla, tak i vodivé částice), která následným promícháním s částí „A“ zajistí započetí chemické reakce nutné k vytvrzení lepidla. Tato chemická reakce je akcelerována působením zvýšené teploty [15].

Jednosložková epoxidová ECAs jsou již promíchána s chemickými aditivy a opět platí, že chemická reakce k vytvoření zesíťované struktury je urychlována působením zvýšené teploty [15].

Konkrétní parametry vytvrzování jsou vždy určeny konkrétním složením vazební složky lepidla. Epoxidové matrice vyžadují k vytvrzování teplotu okolo 150 °C. Existují však i lepidla s nižší požadovanou teplotou vytvrzování. Obecně však platí, že čím je zapotřebí nižší teplota pro vytvrzování, tím je nižší také pevnost lepeného spoje. Současně s obecně nižšími teplotami vytvrzování platí i požadavek na delší dobu vytvrzování, což může být kritickým faktorem pro rychlé tisknutelné metody, jako je roll-to-roll [14].

Vzhledem k výše zmíněným důvodům je stále tendence hledat nová řešení pro nízko-odporová lepidla s co možná nejkratší dobou tvrzení a samozřejmě s co nejlepšími mechanickými vlastnostmi [14].

Vazební části mohou být tvořeny také termoplastickými hmotami. Jejich forma je před dosažením teploty skelného přechodu pevná. Po překročení této teploty se termoplasty stávají tekutou plastickou hmotou. Ze skupiny termoplastických ECAs je nejběžněji používána polyimidová pryskyřice [15].

Tabulka 2.1 - Porovnání frekventovaných materiálů tvořících vazební část lepidel [16]

Materiál	Výhody	Nevýhody
Epoxidy	vysoké teplotní rozsahy použití, dobrá chemická a absorpční odolnost, vysoká čistota, nízké odplyňování	delší vytvrzovací cykly, při vyšším množství v případě přítomnosti aminových činidel nastává exotermická reakce
Silikony	nejvyšší čistota, absorpce mechanického napětí, teplotní stabilita	nízká povrchová energie, migrace
Polyuretany	dobrá flexibilita při nízkých teplotách, absorpce mechanického napětí	nižší teplotní stabilita než u epoxidů, pouze průměrná pevnost spojů
Polyimidy	vyšší teplotní stabilita než u epoxidů, vysoká čistota	rozpuštědla mohou při vyšších teplotách způsobovat dutiny, nutnost více stupňového vytvrzování k odpaření rozpuštědel, mohou absorbovat vlhkost
Estery	vysoká adhezni síla, vysoká teplotní stabilita, vysoký bod teploty skelného přechodu	vysoká absorpce vlhkosti

Výhoda termoplastických lepidel je možnost snadné zpracovatelnosti i případné opravy. Jejich nevýhoda je degradace adheze při vysokých teplotách. Další nevýhodou je fakt, že tyto lepidla obsahují rozpouštědla, která se při zvýšených teplotách mohou odpařovat, což vede k nežádoucímu vzniku dutin [15].

Elektricky vodivá lepidla nabízejí tu výhodu, že mechanické požadavky a elektrické požadavky jsou zajištěny různými komponentami [14].

2.1 Vytvrzování lepidel

Vytvrzovací proces je nezbytný pro správnou adhezní i vodivostní funkci. Nejčastější způsob vytvrzování lepidel je působení zvýšené teploty po určitý časový úsek. Existují však i jiné metody, jako je například vytvrzování UV zářením nebo působení mikrovln, které může být podle [18] dvakrát a dokonce i až desetkrát rychlejší než běžnější teplotní vytvrzování.

Teplotní vytvrzování je nejen nejčastější, ale i nejméně náročná metoda. Aplikace teploty probíhá ve speciálních pecích. Teplota je dána vždy konkrétním lepidlem, resp. vazební matricí. Lepidlo musí být vystaveno takové teplotě, při které ve vazební matrici započne chemická reakce zvaná polymerace. Teplotní expozice lepidla je časově dána dobou, kdy proces polymerace skončí [18].

Na tomto procesu závisí důležité charakteristické vlastnosti lepidla, jako je elektrická vodivost, mechanická pevnost a přilnavost. Experimentálně lze dobu i teplotu vytvrzování různým způsobem upravovat a zároveň proměřovat charakteristické parametry následného lepeného spoje. Pro konkrétní aplikaci vodivého lepidla je možné experimentálně nastavit parametry tak, aby požadovaná preferovaná vlastnost byla co nejlepší, je třeba však počítat s tím, že to zcela jistě bude na úkor jiných charakteristických vlastností lepidla [18].

2.2 Dělení elektricky vodivých lepidel

Elektricky vodivá lepidla dělíme na izotropní a anizotropní. Izotropní lepidla mají stejnou vodivost ve všech směrech (tak jako například pájka), kdežto anizotropní lepidla vykazují elektrickou vodivost jen v jednom směru. Anizotropní i izotropní lepidla jsou k dostání buď ve formě pasty, nebo ve formě vodivého filmu (pásky) [13].

2.2.1 Lepidla s izotropní elektrickou vodivostí

Lepidla s izotropní elektrickou vodivostí jsou využívána jako náhrada bezolovnatých pájek zejména při výrobě teplotně citlivých zařízení, kde by mohlo docházet ke znehodnocení komponent vlivem vysokých teplot při pájení. Výhodné využití těchto lepidel proto nalézáme i pro účely flexibilních elektroniky [17].

Plnivo je tvořeno vodivými částicemi, které v případě izotropních lepidel mohou být ve formě kuliček nebo lupínek a to nejčastěji z řad kovů, ale také například i z nanotrubiček uhlíku (viz [19]). K zajištění dobré elektrické vodivosti je zapotřebí, aby strukturu lepidla tvořily částice plniva v množství 25 až 30 %, hmotnostní zastoupení pak odpovídá zhruba 60 – 80 % z celku. Větší množství vodivých částic na úkor nevodivé matrice by zapříčinilo špatné mechanické vlastnosti [2].

V porovnání s pájenými spoji mají vodivá lepidla asi desetkrát vyšší měrný odpor, lepidla jsou tedy elektricky horšími vodiči. Tepelná vodivost je zhruba desetkrát nižší a tak odvod ztrátového tepla je u lepidel obtížnější. Další orientační vlastnosti jsou v tabulce 2.2, převzaté z [17].

Izotropní vodivá lepidla jsou aplikována například v membránových spínačích nebo RFID anténách, typicky za použití sítotisku na PET substrátech [14].

Tabulka 2.2 – Porovnání některých typických vlastností pájek a izotropních vodivých lepidel [17]

Materiál	Sn-Pb pájka	Bezolovnatá pájka	Izotropní vodivé lepidlo (Ag)
Měrný elektrický odpor [Ωm]	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$ až $5 \cdot 10^{-6}$
Teplotní vodivost [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	30	30	3,5
Teplota vytvrzení [$^{\circ}\text{C}$]	180	> 200	> 125
Pracovní teploty [$^{\circ}\text{C}$]	< 120	< 150	< 180

2.2.2 Lepidla s anizotropní elektrickou vodivostí

Anizotropní lepidla jsou vyráběna ve formě vodivé pasty nebo vodivého filmu. Své využití našly např. v LCD aplikacích a to především díky možnosti propojení součástek s velmi nízkou roztečí vývodů [14].

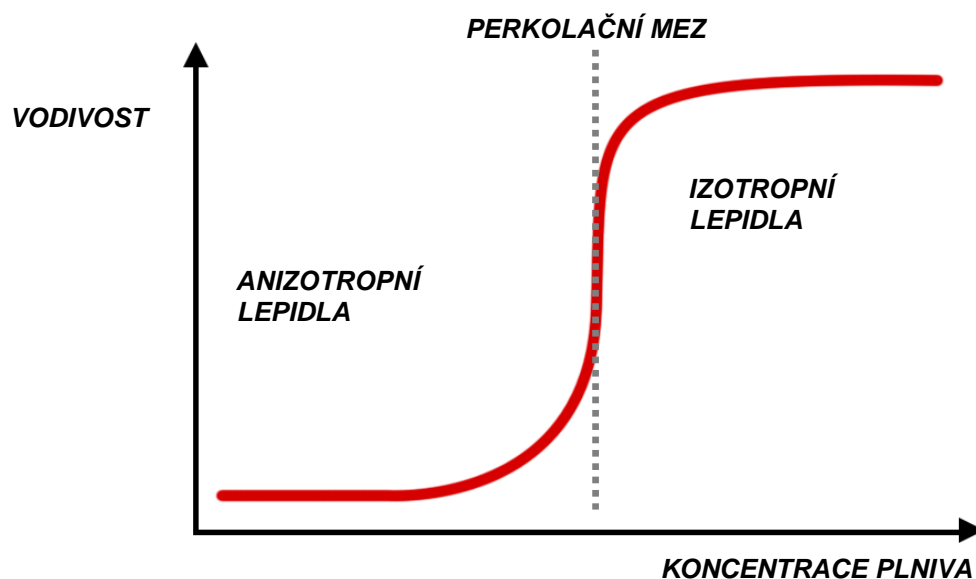
Plnivo je tvořeno výhradně vodivými kuličkami (například Ni s tenkým povlakem z Au nebo Ag, ale i bez). Množství vodivých částic (plniva) velmi závisí na jejich velikosti (průměr kuliček se pohybuje v rozmezí 5 – 15 μm). Obvykle v anizotropních lepidlech bývá vodivé

složky mezi 7 až 15 % hmotnosti z celku [2]. Toto množství je vždy pod tzv. perkolační mezí [14].

Perkolační teorie definuje rozdíl mezi lepidly anizotropními a izotropními, s čímž přímo souvisí pohled na vodivost lepidla. Je-li určité množství vodivé složky náhodně rozmístěné v nevodivé matrici (tak, jak je tomu u vodivých lepidel), na celkovém charakteru vodivosti celé substance závisí poloha tzv. perkolační meze [20].

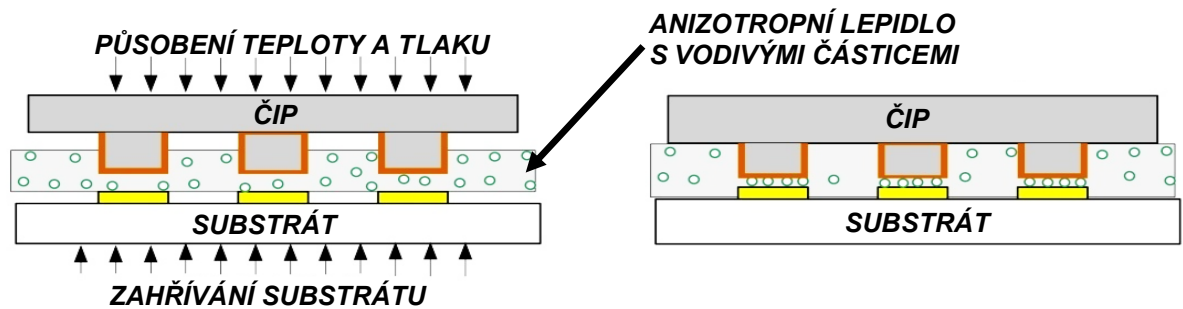
S rostoucím množstvím vodivé složky látka postupně dosahuje perkolační meze, kdy prudce poklesne elektrický odpor látky a ta je elektricky vodivá v celém objemu a ve všech směrech trojdimenzionálního prostoru (tj. případ izotropních lepidel). Tato závislost je zobrazena na obrázku 2.1 [21].

Anizotropní elektricky vodivá lepidla (anglicky *Anisotropic conductive adhesives* - ACAs) jsou tedy dle obrázku 2.1 zdánlivě elektricky špatně vodivou látkou. Je však nutné si uvědomit, že perkolační teorie bere v potaz elektrickou vodivost ve všech směrech 3D prostoru. Princip anizotropních lepidel, která jsou vyráběna ve formě folií nebo past, spočívá v zajištění elektrické vodivosti pouze ve směru z, k čemuž postačuje výrazně menší množství plniva, než je tomu u izotropních lepidel.



Obrázek 2.1 - Rozdělení vodivých lepidel na základě perkolační hranice [22]

Vodivé folie i pasty jsou aplikovány za pomoci zvýšené teploty a tlaku. Při zvýšené teplotě se matrice lepidla transformuje na nízko-viskózní tekutinu, při aplikaci pak lepidlo přeteče na kontaktní místa, kde dochází k fyzickému vyplnění prostor lepidlem a díky vodivým částicím vzniká v místě stlačení vodivé propojení - pouze ve směru z, ve směrech x a y je hmota nevodivá – viz obrázek 2.2, znázorňující typickou aplikaci při upevňování čipu na substrát pomocí ACA [20].



Obrázek 2.2 – Ilustrace použití anizotropního lepidla k umístění a propojení čipu na substrát [23]

Nevýhoda při propojování s anizotropními lepidly je obecně nižší proudová zatížitelnost těchto spojů. Kovové kuličky mohou také kvůli své tvrdosti způsobit poškození zařízení při vyšším mechanickém stlačení [14].

3 Přehled komerčně dostupných vodivých lepidel pro flexibilní elektroniku

Celosvětový trh s lepidly využívanými pro elektroniku by dle reportu *Growth Opportunities for Adhesives in the Global Electronics Industry 2016-2021* měl v roce 2021 dosáhnout hodnoty 3,8 mld. dolarů, přičemž jedním z hlavních trendů tohoto oboru jsou elektricky vodivá adhesiva [24].

V této kapitole jsou stručně charakterizováni lídři světové produkce vodivých lepidel a jejich produkty včetně důležitých charakteristických parametrů. Důraz je kladen na producenty, jejichž lepidla jsou vhodná k užití pro tištěnou flexibilní elektroniku. Následující výčet klíčových společností oboru je sestaven na základě publikace *Electrically Conductive Adhesives 2016-2026* a její definice aktuálně nejdůležitějších světových firem tohoto odvětví [25].

Je nutné podotknout, že různé společnosti udávají u svých produktů nezdědky kdy různé charakteristické parametry a to jak v porovnání s jinými společnostmi, tak také u svých produktů. Proto jsou některé položky tabulek 3.1 až 3.12 nevyplněny.

3.1 Henkel AG & Co. KGaA

Společnost Henkel byla založena v roce 1876 v Německu. Jedním ze tří hlavních oborů činnosti této firmy je výroba adheziv - Henkel AG & Co. KGaA patří k největším světovým výrobcům adheziv.



Obrázek 3.1 – Logo společnosti Henkel [26]

V současné době firma na svém oficiálním webu nabízí 63 typů elektricky vodivých lepidel, z nichž sedm modelů vykazuje dle datových listů flexibilní vlastnosti nebo jsou vyloženě určeny pro flexibilní substráty [26].



Obrázek 3.2 – Lepidla společnosti Henkel jsou prodávána také pod značkou Loctite

Tabulka 3.1 - Aktuální nabídka lepidel pro flexibilní elektroniku firmy Henkel AG & Co. KGaA [26]

Název	Materiál (plnivo / pojivo)	Vytvrzování		Viskozita [Pa.s]	Rezistivita [Ω .cm]	Skladovatelnost	Zpracovatelnost
ABLESTIK ICP 4001	stříbro / silikon	35 min.	140 °C	40	$4 \cdot 10^{-4}$	-40 °C, 4 měs.	25 °C, 24 hod.
LOCTITE ABLESTIK 3880	stříbro / epoxid	10 min.	125 °C	50 – 150	$8 \cdot 10^{-4}$	-10 až 0 °C	7 dní
		6 min.	150 °C				
		3 min.	175 °C				
LOCTITE ABLESTIK CA 3556HF	stříbro / akrylát	120 sek.	110 °C	31,5	$25 \cdot 10^{-4}$	-25 až -18 °C	< 48 hod.
		< 15 sek.	130 °C				
		< 10 sek.	150 °C				
LOCTITE SI 5421	. / silikon	72 hod.	25 °C	.	$1 \cdot 10^{-2}$	-20 °C	< 72 hod.
LOCTITE ABLESTIK CE 3520-3	nikl / epoxid	60 min.	120 °C	73	$2 \cdot 10^{-2}$	-25 až -18 °C, 6 měs.	18 až 25 °C, 3 dny
		30 min.	150 °C				
ELECTRO DAG 5915	stříbro / epoxid	15 min.	130 °C	120	$5 \cdot 10^{-4}$	-20 °C, 12 měs.	.
		10 min.	177 °C				
LOCTITE ABLESTIK ECF 561E	stříbro / epoxid	60 min.	150 °C	.	$1 \cdot 10^{-3}$	-40 °C, 12 měs.	.
		120 min.	125 °C				
LOCTITE ABLESTIK CF 3350	stříbro / epoxid	10 min.	175 °C	.	$2 \cdot 10^{-4}$	5 °C, 9 měs.	25 °C, 3 měs.
		30 min.	150 °C				
		50 min.	137 °C				
		120 min.	125 °C				
LOCTITE ABLESTIK CE 8500	stříbro / epoxid	90 min.	120 °C	120 – 140	$2 \cdot 10^{-4}$	-25 až -18 °C, 4 měs.	.
		40 min.	150 °C				
		15 min.	175 °C				

3.2 Heraeus Holding GmbH

Německá společnost Heraeus Holding GmbH působí na trh více než 160 let. Produkce firmy Heraeus Holding GmbH pokrývá potřeby elektrotechnického, automobilového, chemického nebo farmaceutického průmyslu. Heraeus je také významnou firmou v oblasti výroby vodivých adheziv určených pro flexibilní substráty - aktuální nabídka čítá devět typů adheziv řady PC [27].



Obrázek 3.3 – Logo společnosti Heraeus [27]

Tabulka 3.2 - Nabídka vodivých lepidel pro flexibilní elektroniku Heraeus Holding GmbH [27]

Název	Materiál (plnivo / pojivo)	Vytvrzování		Rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Skladovatelnost	Zpracovatelnost
PC 3000	stříbro / epoxid	10 min.	150 °C	$2 \cdot 10^{-4}$	-40 °C	32 hod.
		20 min.	120 °C			
PC 3001	stříbro / epoxid	10 min.	150 °C	$3 \cdot 10^{-4}$	-40 °C	20 hod.
		20 min.	120 °C			
PC 3002	stříbro / epoxid	10 min.	150 °C	$3 \cdot 10^{-4}$	-40 °C	32 hod.
		20 min.	120 °C			
PC 3201	stříbro / epoxid	60 sek.	180 °C	$3 \cdot 10^{-4}$	-20 °C, 12 měs.	5 dní
		180 sek.	130 °C			
PC 3231	stříbro / epoxid	120 sek.	180 °C	$3 \cdot 10^{-4}$	-20 °C, 12 měs.	5 dní
		180 sek.	150 °C			
PC 3431	stříbro / epoxid	10 min.	150 °C	$3 \cdot 10^{-4}$	-40 °C	20 hod.
		20 min.	120 °C			
PC 3601	stříbro / epoxid	3 min.	90 °C	$3 \cdot 10^{-4}$	-20 °C	24 hod.
		5 min.	80 °C			
PC 4000	stříbro / epoxid	10 min.	150 °C	$3 \cdot 10^{-4}$	-40 °C	8 hod.
		20 min.	120 °C			
PC 4001	stříbro / epoxid	10 min.	150 °C	$3 \cdot 10^{-4}$	-40 °C	8 hod.
		20 min.	120 °C			

3.3 Panacol AG

Panacol AG je švýcarská společnost spadající pod německou skupinu Hönle Group. Produkce pod hlavičkou Panacol sestává výhradně z průmyslových lepidel a lepidel užívaných ve zdravotnictví [28].



Obrázek 3.4 – Logo společnosti Panacol [28]

Elektricky vodivá lepidla společnosti Panacol jsou řazena do čtyřech oblastí: lepidla aplikovatelná v elektronice (jako náhrada pájky), lepidla pro elektricky vodivé spoje na deskách plošných spojů, lepidla pro montáž čipů a lepidla určená pro ochranu proti elektrostatickým výbojům. Lepidla vhodná k užití ve flexibilní elektronice jsou řazena do prvních třech oblastí. Jejich nejdůležitější vlastnosti shrnuje tabulka 3.3 [28].

Tabulka 3.3 - Nabídka vodivých lepidel pro flexibilní elektroniku Panacol [28]

Název	Materiál (plnivo / pojivo)	Vytvrzování		Viskozita [Pa.s]	Rezistivita [Ω .cm]	Skladovatelnost	Zpracovatelnost
Elecolit® 3661	stříbro / epoxid	360 min.	80 °C	20 až 40	$5 \cdot 10^{-3}$	0 až 10 °C, 2 až 4 měs.	14 dní
		45 min.	110 °C				
		30 min.	120 °C				
		15 min.	130 °C				
		10 min.	150 °C				
Elecolit® 3063	pozlacené částice / akrylát	UV záření		150 až 190	.	0 až 10 °C, 3 až 6 měs.	.
		viditelné záření					
Elecolit® 414	stříbro / polyester	16 min.	70 °C	20 až 25	$5 \cdot 10^{-5}$	0 až 10 °C, 6 až 12 měs.	.
		8 min.	125 °C				
		5 min.	150 °C				
Elecolit® 3036	stříbro / epoxid	16 hod.	25 °C	30	$1 \cdot 10^{-1}$	0 až 10 °C, 3 až 6 měs.	2 až 3 hod.
		2 hod.	50 °C				
		30 min.	100 °C				
		15 min.	120 °C				
		5 min.	150 °C				
Elecolit® 3653	stříbro / epoxid	15 hod.	80 °C	8 až 13	$5 \cdot 10^{-3}$	-20 až 0 °C, 6 až 12 měsíců	.
		20 min.	100 °C				
		10 min.	120 °C				
		5 min.	150 °C				
Elecolit® 3064	. / akrylát	UV záření		.	.	0 až 10 °C, 3 až 6 měsíců	.
		viditelné záření					
Elecolit® 3065	pozlacené částice / akrylát	UV záření		.	1	0 až 10 °C, 3 až 6 měsíců	.
		viditelné záření					
		10 min.	100 °C				

3.4 Epoxy Technology, Inc

Americká společnost Epoxy Technology, Inc produkuje adhesiva pro elektrotechnický průmysl, letectví, zdravotnictví nebo automobilový či vojenský průmysl. Firma byla založena v roce 1966. Komerční názvy lepidel nesou označení EPO-TEK. Elektricky vodivá lepidla EPO-TEK jsou výhradně tvořena stříbrným plnivem a pojivem z epoxidové pryskyřice [29].



Obrázek 3.5 – Logo společnosti Epoxy Technology

Tabulka 3.4 - Nabídka vodivých lepidel pro flexibilní elektroniku Epoxy Technology [29]

Název	Vytvrzování		Viskozita [Pa.s]	Rezistivita [Ω .cm]	Skladovatelnost	Zpracovatelnost
EPO-TEK [®] EV2002	15 min.	120 °C	24 až 46	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	25 °C, 12 měsíců	4 hod.
EPO-TEK [®] EV2118-1	10 min.	150 °C	2,009	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	25 °C, 12 měsíců	72 hod.
	20 min.	120 °C				
	60 min.	100 °C				
EPO-TEK [®] H 20E	45 sek.	175 °C	2,2 až 3,2	$\leq 4 \cdot 10^{-4}$	23 °C, 12 měsíců	60 hod.
	5 min.	150 °C				
	15 min.	120 °C				
	120 min.	100 °C				
	180 min.	80 °C				
EPO-TEK [®] H20E-MP	5 min.	150 °C	2,2 až 3,2	$\leq 4 \cdot 10^{-4}$	23 °C, 6 měsíců	48 hod.
EPO-TEK [®] H20S	45 sek.	175 °C	1,8 až 2,8	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	20 až 25 °C, 12 měsíců	72 hod.
	5 min.	150 °C				
	15 min.	120 °C				
	45 min.	100 °C				
	90 min.	80 °C				
EPO-TEK [®] H27D	60 min.	150 °C	2,5 až 4,0	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	20 až 25 °C, 12 měsíců	8 hod.
EPO-TEK [®] EJ2108	120 min.	80 °C	11,8	$4 \cdot 10^{-4}$ až $9 \cdot 10^{-5}$	20 až 25 °C, 6 měsíců	1 hod.

3.5 Creative Materials

Americká společnost Creative Materials byla založena v roce 1987. Specializací společnosti Creative Materials je vývoj elektricky vodivých inkoustů na bázi stříbra, zlata nebo uhlíku. Další důležitou součástí produkce tvoří elektricky vodivá lepidla, teplotně vodivá lepidla nebo různé zalévací hmoty na epoxidové bázi [30].

Tabulka 3.5 - Nabídka vodivých lepidel pro flexibilní elektroniku Creative Materials [30]

Název	Materiál (plnivo / pojivo)	Vytvrzování		Viskozita [Pa.s]	Rezistivita [Ω .cm]	Skladovatelnost	Zpracovatelnost
124-08 A/B	stříbro / epoxid	90 min.	80 °C	.	$2 \cdot 10^{-4}$ až $4 \cdot 10^{-4}$	25 °C, 12 měs.	< 4 dny
		15 min.	120 °C				
		5 min.	150 °C				
		45 sek.	175 °C				
GPC 251	stříbro / epoxid	24 hod.	25 °C	.	$2 \cdot 10^{-4}$ až $5 \cdot 10^{-3}$	12 měs.	60 min.
		60 min.	65 °C				
		5 min.	120 °C				
102-32	stříbro / silikon	5 až 10 min.	160 °C	2,5 až 4,0	$1 \cdot 10^{-4}$	-10 °C, 12 měs. nebo 25 °C, 6 měs.	24 až 36 hod.
102-32D	stříbro / silikon	5 až 10 min.	160 °C	11,8	$1 \cdot 10^{-4}$	-10 °C, 12 měs.	24 až 36 hod.

Významnější část produkce Creative Materials tvoří anizotropní lepidla. Pro přehlednost jsou zobrazena v samostatné tabulce.

Tabulka 3.6 - Nabídka anizotropních lepidel Creative Materials [30]

Název	Materiál (plnivo / pojivo)	Vytvrzování		Viskozita a [Pa.s]	Rezistivita [Ω .cm]	Skladovatelnost	Zpracovatelnost
124-20	.	15 min.	200 °C	.	$1 \cdot 10^{-4}$	25 °C, 2 měs. nebo -10 °C, 6 měs.	.
		30 min.	175 °C				
		60 min.	150 °C				
124-21	.	30 min.	175 °C	8 až 10	$1 \cdot 10^{-4}$	25 °C, 2 měs. nebo -10 °C, 6 měs.	.
		45 min.	165 °C				
		60 min.	150 °C				
124-22C	.	20 min.	125 °C	.	$1 \cdot 10^{-4}$	-10 °C, 12 měsíců	4 dny
		60 min.	100 °C				
		4 hod.	80 °C				
124-22A/B 119-44	.	20 min.	125 °C	.	$1 \cdot 10^{-4}$	25 °C, 12 měs.	4 dny
		60 min.	100 °C				
		4 hod.	80 °C				
121-23	stříbro / epoxid	60 min.	175 °C	35 až 40	$1 \cdot 10^{-3}$	-10 °C, 12 měs.	.
		30 min.	150 °C				
121-24	stříbro / polymer	30 min.	175 °C	.	$1 \cdot 10^{-3}$	-40 °C, 12 měs.	.
		60 min.	150 °C				
111-28	./ silikon	5 až 10 min.	160 °C	.	$1 \cdot 10^{-4}$	-10 °C, 9 měs. nebo 25 °C, 2 měs.	.
108-15	./ silikon	10 až 20 min.	160 °C	.	$1 \cdot 10^{-4}$	-10 °C, 9 měs. nebo 25 °C, 2 měs.	.
122-44	./ silikon	5 až 10 min.	160 °C	.	$1 \cdot 10^{-4}$	-10 °C, 12 měs. nebo 25 °C, 2 měs.	.
		UV zářením					
124-24	.	UV zářením		.	$1 \cdot 10^{-4}$	5 °C, 6 měs. nebo 25 °C, 3 měs.	.
117-36	.	UV zářením		.	$1 \cdot 10^{-4}$	25 °C, 6 měs.	.
124-23	./ polyester	jednotky minut	50 až 150 °C	20	$1 \cdot 10^{-4}$	-10 °C, 12 měs. nebo 25 °C, 6 měs.	.
111-29	.	5 až 10 min.	120 °C	.	$1 \cdot 10^{-4}$	-10 °C, 9 měs. nebo 25 °C, 2 měs.	.
112-05	.	20 až 25 min.	20 až 25 °C	.	$1 \cdot 10^{-4}$	-10 °C, 9 měs. nebo 25 °C, 2 měs.	.
		1 až 3 min.	120 °C				
111-05	.	5 až 10 min.	120 °C	.	$1 \cdot 10^{-4}$	-10 °C, 9 měs. nebo 25 °C, 2 měs.	.
111-21	.	5 až 10 sek.	140 °C	.	$1 \cdot 10^{-4}$	-10 °C, 9 měs. nebo 25 °C, 2 měs.	.
122-12	.	5 až 10 min.	120 °C	.	$1 \cdot 10^{-4}$	-10 °C, 9 měs. nebo 25 °C, 2 měs.	.

3.6 Engineered Materials Systems, Inc

Americká společnost Engineered Materials Systems, Inc více než dvacet let zásobuje globální trh adhezivy. Produkce je zaměřena na automobilový trh, zdravotnictví, fotovoltaiiku nebo mikroelektroniku a tištěnou elektroniku [31].

Tabulka 3.7 - Nabídka vodivých lepidel pro flexibilní elektroniku Engineered Materials Systems [31]

Název	Vytvrzování		Viskozita [Pa.s]	Rezistivita [Ω .cm]	Doporučená aplikace
CA-141	.		20	$2 \cdot 10^{-4}$	Dispensing
CA-148	.		10	$4 \cdot 10^{-4}$	Dispensing
CA-180	15 min.	80 °C	12	$6 \cdot 10^{-5}$	Dispensing
DB-1501	6 min.	140 °C	12	$4 \cdot 10^{-4}$	Šablonový tisk
DB-1538-2	2 min.	180 °C	11	$2 \cdot 10^{-4}$	Dispensing
DB-1541	100 °C		33	$1 \cdot 10^{-4}$	Šablonový tisk
DB-1541-S	.		11	$2 \cdot 10^{-4}$	Dispensing
DB-1541-S3	.		10	$1 \cdot 10^{-4}$	Dispensing
DB-1588	.		30	$4 \cdot 10^{-4}$	Šablonový tisk
DB-1588-1	.		30	$4 \cdot 10^{-4}$	Šablonový tisk
DB-1588-2	.		30	$4 \cdot 10^{-4}$	Šablonový tisk
DB-1588-3	.		20	$2 \cdot 10^{-4}$	Dispensing
DB-1588-4	.		35	$2 \cdot 10^{-4}$	Dispensing
DB-1590	.		20	$2 \cdot 10^{-4}$	Dispensing

3.7 Master Bond Inc.

Americká firma Master Bond Inc. se výrobě chemických produktů a adheziv věnuje od roku 1976. Mezi portfolio společnosti patří výroba epoxidů, silikonů, polyuretanů nebo polysulfidových hmot. V současné době Master Bond Inc. nabízí elektricky vodivá lepidla na bázi grafitů, stříbrných částic, niklových částic nebo postříbřených niklových částic. Lepidla vhodná pro flexibilní elektroniku jsou následující [32].

Tabulka 3.8 - Nabídka vodivých lepidel pro flexibilní elektroniku Master Bond, Inc

Název	Materiál (plnivo / pojivo)	Vytvrzování		Rezistivita [Ω .cm]	Skladovatelnost	Zpracovatelnost
EP21TD CSFL	stříbro / epoxid	2 až 3 hod.	65,6 °C	$\leq 1 \cdot 10^{-3}$	3 měs.	75 až 90 min., 50 g
		24 až 48 hod.	23,9 °C			
EP79FL	postříbřený nikl / epoxid	2 až 3 hod.	65,6 °C	$\leq 1 \cdot 10^{-2}$	3 měs.	60 až 75 min., 100 g
		24 až 48 hod.	23,9 °C		6 měs.	75 až 90 min., 50 g
EP21TD CNFL	nikl / epoxid	18 až 24 hod.	23,9 °C	5 až 10	23,9 °C, 3 až 6 měs.	60 až 75 min., 200 g
						75 až 90 min., 100 g

3.8 Polytec PT GmbH

Německá firma Polytec PT GmbH se zaměřuje na výrobu speciálních adhesiv užívaných v elektrotechnickém průmyslu. V současnosti lze na oficiálním webu najít deset typů elektricky vodivých lepidel, přičemž dva modely jsou doporučeny k užití i pro flexibilní elektroniku [33].

Tabulka 3.9 - Nabídka vodivých lepidel pro flexibilní elektroniku Polytec PT GmbH

Název	Materiál (<i>plnivo / pojivo</i>)	Vytvrzování		Viskozita [Pa.s]	Rezistivita [Ω .cm]	Skladovatelnost	Zpracovatelnost
Polytec PU 1000	stříbro / polyuretan	30 až 240 min.	23 °C	12	$2 \cdot 10^{-4}$ až $4 \cdot 10^{-4}$	5 až 8 °C, 6 měs.	23 °C, 30 až 240 min.
		5 až 10 min.	100 °C				
		2 sek.	180 °C				
Polytec EC 201	stříbro / epoxid	25 až 30 min.	100 °C	6	$2 \cdot 10^{-4}$ až $5 \cdot 10^{-4}$	23 °C, 12 měs.	23 °C, 45 min.
		15 až 20 min.	120 °C				
		10 min.	150 °C				

3.9 Ferro Electronic Materials

Americká firma Ferro Electronic Materials vznikla v roce 1919. Významnou část produkce firmy tvoří materiály pro pouzdření elektronických součástek, výroba elektronických a technických skel a také výroba adheziv [34].

Ferro Electronic Materials dle aktuálně platného katalogu nabízí sedm typů elektricky vodivých lepidel na bázi stříbra, z nichž dva modely jsou určeny pro použití ve flexibilní elektronice [34].

Tabulka 3.10 - Nabídka vodivých lepidel pro flexibilní elektroniku Ferro Electronic Materials

Název	Materiál (<i>plnivo / pojivo</i>)	Vytvrzování		Viskozita [Pa.s]	Rezistivita [Ω .cm]	Skladovatelnost	Zpracovatelnost
PS4110	stříbro / polymer	30 min	20 až 25 °C	200	$< 6 \cdot 10^{-3}$	10 až 25 °C, 6 měs.	24 hod.
62101014	stříbro / polymer	120 min.	60 °C	$15 \pm 2,2$	$\leq 6 \cdot 10^{-2}$	10 až 25 °C, 6 měs.	.
		60 min.	120 °C				

3.10 Chomerics

Chomerics je divizí skupiny Parker Seal - celosvětového producenta elastomerů. Divize Chomerics se zabývá vývojem materiálů ke stínění elektromagnetické interference, ale také zpracováním plastů nebo optickými produkty. V neposlední řadě patří do portfolia této firmy

výroba adhesiv. Elektricky vodivá adheziva jsou v zastoupení v devíti produktových řadách, přičemž dvě z nich lze aplikovat i pro potřeby flexibilní elektroniky [35].

Tabulka 3.11 - Nabídka vodivých lepidel pro flexibilní elektroniku Chomerics

Název	Materiál (<i>plnivo / pojivo</i>)	Vytvrzování		Rezistivita [Ω .cm]	Skladovatel nost	Zpracovatel nost
CHO- BOND [®] 1029	postříbřené měděné částice / silikon	30 min.	121 °C	$6 \cdot 10^{-2}$	25 °C, 6 měs.	2 hod.
		1 týden	20 až 25 °C			
CHO- BOND [®] 1030	postříbřené měděné částice / silikon	1 týden	20 až 25 °C	$5 \cdot 10^{-2}$	25 °C, 6 měs.	30 min.

3.11 Protavic America, Inc.

Protavic America, Inc. je dceřinou firmou francouzské společnosti Protex International. Vznik společnosti Protavic America, Inc. se datuje do roku 1932. Od počátku svého působení se firma profiluje jako specialista v chemickém a biochemickém průmyslu a v dalších příbuzných odvětvích. Nabídka elektricky vodivých lepidel s flexi vlastnostmi je aktuálně omezena pouze na dva dostupné typy [36].

Tabulka 3.12 - Nabídka vodivých lepidel pro flexibilní elektroniku Protavic America, Inc.

Název	Materiál (<i>plnivo / pojivo</i>)	Vytvrzování		Rezistivita [Ω .cm]	Viskozita a [Pa.s]	Zpracovatel nost	Skladov atelnost
ACH 20120	stříbro / epoxid	30 min.	175 °C	$3 \cdot 10^{-5}$	$9 \pm 1,5$	20 ± 2 °C, 24 hod.	-20 °C, 12 měs.
		2 min.	230 °C				
CLN-658	stříbro / epoxid	4 hod.	65 °C	$9 \cdot 10^{-3}$.	20 až 25 °C, 4 hod.	0 °C
		48 hod.	25 °C				

3.12 DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA

Německá firma DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA byla založena v roce 1961. Společnost se věnuje především výrobě průmyslových adhesiv. Aktuálně společnost DELO nabízí šest typů anizotropních vodivých lepidel, u nichž nejsou informace o použitelnosti pro flexibilní tištěnou elektroniku a tři typy izotropních vodivých lepidel, z nichž pouze model DELO DUALBOND[®] IC343 je dle data listů doporučen k užití i pro flexibilní substráty [37].

Tabulka 3.13 - Nabídka vodivých lepidel pro flexibilní elektroniku DELO

Název	Materiál (<i>plnivo / pojivo</i>)	Vytvrzování		Rezistivita [Ω .cm]	Viskozita [Pa.s]	Zpracov atelnost	Skladov atelnost
DELO DUALBON D [®] IC343	stříbro / .	30 min.	80 °C	$1,4 \cdot 10^{-4}$	30	25 °C, 72 hod.	-18 °C, 6 měsíců
		15 min.	90 °C				
		10 min.	100 °C				
		UV záření, 1 až 5 sek.					

4 Elektricky vodivé lepené spoje - vlastnosti a charakterizace

Představme si vytvrzenou polymerovou substanci (přírodně nevodivou), v jejímž objemu se nachází určité množství elektricky vodivých částic se vzájemným fyzickým kontaktem. Specifické množství těchto vodivých částic je dáno perkolační mezí (viz kapitola 2.2.2). Je-li tato substance pevně přilepena ke kontaktním ploškám – elektrodám – lze hovořit o elektricky vodivém lepeném spoji² [38].

4.1 Spolehlivostní aspekty a základní vlastnosti vodivě lepených spojů

Elektricky vodivý lepený spoj (dále jen ECA spoj) vykazuje řadu vlastností, které je zapotřebí pro hlubší poznání blíže konkretizovat.

4.1.1 Elektrický odpor a příčiny jeho vzniku

Celkový elektrický odpor vodivě lepeného spoje částečně vychází ze zmiňované perkolační teorie. Rozvinutá teorie podrobněji charakterizující celkový elektrický odpor je vysvětlena hlouběji například v [38]. Ve zkratce se jedná o rozklad celkového elektrického odporu lepeného spoje na elektrický odpor samotných částic plniva, vzájemný kontaktní odpor mezi vodivými částicemi plniva a odpor mezi částicemi plniva a kontaktními ploškami a elektrodami.

- ***elektrický odpor samotných vodivých částic***

Hodnota tohoto odporu je dána materiálem částic (jejich rezistivita) a geometrickým uspořádáním částic (vločky, kuličky a další různé nepravidelné tvary). Jsou-li plnivem stříbrné částice, velikost tohoto odporu je pak podstatně nižší než u vzájemného přechodového odporu a přechodového odporu mezi částicemi a kontaktními ploškami. Jsou-li plnivem plastové částice s tenkou povrchovou vrstvou kovu, hodnota tohoto odporu bývá srovnatelná s přechodovými odpory [41].

- ***vzájemný kontaktní odpor mezi vodivými částicemi plniva***

Vzájemný kontaktní odpor mezi jednotlivými vodivými částicemi plniva je dán kombinací

² Definice lepeného spoje odpovídá izotropním vodivým lepidlům, jejichž bližšímu zkoumání se tato diplomová práce věnuje. Definice nevyhovuje ACAs, jelikož u nich nelze hovořit o vzájemném fyzickém kontaktu vodivých částic plniva. Vodivé lepené spoje anizotropních lepidel blíže charakterizuje například [45].

přechodového odporu mezi kontakty a vodivostí tunelového jevu (resp. jeho převrácenou hodnotou). Přechodový odpor mezi kontakty vzniká vždy, jelikož plocha žádného kontaktu není absolutně rovná. Předpoklad pro vznik přechodového odporu je existence určitého silového působení mezi sousedícími částicemi, díky kterému dochází ke vzájemnému styku. V izotropních lepidlech je jako příčina vzniku vzájemně působících sil považováno vytvrzení lepidla. Při tvrzení dochází ke smršťování polymerní matrice, čímž je dosaženo spřažení částic plniva ve shluk tvořící propojený řetězec [38].

- ***odpor mezi částicemi plniva a kontaktními ploškami***

Jedná se opět o kontaktní odpor. V tomto případě je to přechodový odpor mezi částicemi plniva a kontaktními ploškami, které jsou typicky umístěny na substrátu z jedné strany a na přípevněné součástce z druhé strany. Velikost tohoto odporu je značně závislá na kvalitě kontaktních plošek. Tunelový odpor se projevuje i zde [41].

- ***environmentální vlivy***

Prostředí má zásadní vliv na spolehlivost lepených spojů. Vlivem působení okolních podmínek, jako je teplota nebo vlhkost, je principiálně ovlivňován elektrický odpor a to zejména odpor mezi částicemi a kontaktními ploškami. Negativní vliv však postihuje i adhezní schopnosti spoje.

- ***absorpce vlhkosti polymerní matricí***

Polymerní matrice ECA spojů do jisté míry vždy absorbují určité množství okolní vlhkosti. Při výrazné absorpci vlhkosti dochází k rapidním změnám elektrických a mechanických vlastností spoje. Jedná se o zhoršení adheze a zvýšení elektrického odporu. Tento jev byl vyšetřován například v [39] nebo [40]. Pro snížení objemu absorbované vlhkosti lze modifikovat polymerovou matrici příměsí hydrofobních látek. Jejich vliv však ovlivňuje mechanické vlastnosti a přispívají také ke snížení flexibility [39].

- ***galvanická koroze***

Galvanická koroze je nežádoucí elektrochemický jev, který nastává u vodivě lepených spojů na rozhraní mezi kontaktní ploškou z méně ušlechtilého materiálu a částicí plniva z kovu ušlechtilého - za přítomnosti elektrolytu. V případě ECA spojů bývají nejčastěji používanými plnivy stříbrné částice, jejichž elektroodový potenciál znázorňuje tabulka 4.1. Pro zamezení vzniku galvanické koroze je zapotřebí využívat kontaktní plochy ošetřené

ušlechtilým pokovením (např. Au, Ni). Obecně se doporučuje využívat materiály s podobnými elektrodoovými potenciály, aby výsledný rozdíl potenciálů byl minimalizován [38], [42], [43].

Tabulka 4.1 - Elektrodoový potenciál některých kovů typicky využívaných v ECA spojih [46]

Kov	Au	Pt	Ag	Cu	Pb	Sn	Ni
Elektrochemický potenciál [V]	+1,52	+1,19	+0,80	+0,34	-0,13	-0,13	-0,25

V důsledku nedostatečné ochrany vůči galvanické korozi klesá kvalita povrchu kontaktu a tím roste kontaktní odpor. Tento proces se objevuje zejména po vystavení ECA spoje zvýšené vlhkosti [41].

- *vliv oxidace*

Oxidace se může objevit jak na kontaktních ploškách, tak na vodivých částicích plniva. Velký vliv na vznik oxidace má environmentální zatížení lepeného spoje. Důvodem využívání stříbrného plniva je krom jeho výborné vodivosti také fakt, že zoxidované stříbro je elektricky vodivé. Oxidace je vzhledem k vlastnostem stříbra větším problémem u niklových a zejména měděných plniv. Proto se často využívá postříbření těchto částic. Vznik oxidace může mít na lepený spoj negativní vliv vzhledem k růstu elektrického odporu vzájemného kontaktu mezi vodivými částicemi plniva [38], [42].

4.1.2 Mechanické aspekty spolehlivosti

Mechanické namáhání ECA spoje je způsobeno nejen fyzickým ohýbáním, ale také teplotními změnami. Zde je důležité sledovat koeficient termální expanze polymerní matrice (CTE) v porovnání s hodnotou CTE plniva. V případě stříbra se jedná o hodnotu $19 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Polymerní matrice pak dosahují hodnoty CTE v přibližném rozmezí 80 až $200 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Na rozhraní těchto materiálů lze tedy očekávat při tepelných změnách stresové namáhání. V průběhu životního cyklu ECA spoje pak tyto stresy vedou k mechanickým poškozením, prasklinám, dutinám a celkově ke zhoršení adheze schopnosti i elektrické vodivosti [41].

Během mechanického zatížení vystává důležitá také hodnota Youngova modulu pružnosti, který udává poměr mechanického napětí a jím vyvolané deformace. Hodnota Youngova modulu pružnosti stříbra převyšuje průměrné hodnoty polymerní matrice zhruba dvacetkrát, což opět ústí ve značné mechanické stresy na rozhraní dvou odlišných materiálů způsobené mechanickým zatížením [41].

- **vznik dutin**

Další negativní vliv na spolehlivost ECA spoje má formování dutinek, které se děje během vytvrzování lepidla, případně během cyklických teplotních změn a vlhkostních zatížení. Přítomnost dutinek v matrici může vést k vyššímu mechanickému namáhání vzhledem k příměsi dalšího materiálu (vzduch) s rozdílným teplotním koeficientem termální expanze a Youngova modulu pružnosti. Typicky se dutinky mohou po vytvrzení objevit díky nedostatečnému promíchání adhezivní substance před nanesením [41].

4.2 Metody pro testování a měření vodivě lepených spojů

Díky testování lze kvalitativně ohodnotit elektrické vlastnosti spoje, pevnost lepeného spoje, dále lze také porovnávat různé techniky lepení, vliv čistoty substrátu, efektivitu povrchových úprav substrátů a lepených součástek, cyklus vytvrzování a to vše v závislosti na simulovaných zatíženích odvozených od podmínek, které lze očekávat v praktických aplikacích.

Analýzu chování elektricky vodivých lepidel a jejich spojů ve vztahu k popsaným vlastnostem v kapitole 4.1 je vhodné provádět na základě standardizovaných postupů definovaných organizací ISO [52]:

- **ISO 16525-1:2014** *Adhesives -- Test methods for isotropic electrically conductive adhesives -- Part 1: General test methods*
- **ISO 16525-2:2014** *Adhesives -- Test methods for isotropic electrically conductive adhesives -- Part 2: Determination of electrical characteristics for use in electronic assemblies*
- **ISO 16525-3:2014** *Adhesives -- Test methods for isotropic electrically conductive adhesives -- Part 3: Determination of heat-transfer properties*
- **ISO 16525-4:2014** *Adhesives -- Test methods for isotropic electrically conductive adhesives -- Part 4: Determination of shear strength and electrical resistance using rigid-to-rigid bonded assemblies*
- **ISO 16525-5:2014** *Adhesives -- Test methods for isotropic electrically conductive adhesives -- Part 5: Determination of shear fatigue*
- **ISO 16525-6:2014** *Adhesives -- Test methods for isotropic electrically conductive adhesives -- Part 6: Determination of pendulum-type shear impact*
- **ISO 16525-7:2014** *Adhesives -- Test methods for isotropic electrically conductive*

adhesives -- Part 7: Environmental test methods

- **ISO 16525-8:2014** *Adhesives -- Test methods for isotropic electrically conductive adhesives -- Part 8: Electrochemical-migration test methods*
- **ISO 16525-9:2014** *Adhesives -- Test methods for isotropic electrically conductive adhesives -- Part 9: Determination of high-speed signal-transmission characteristics*

Standardy pro testování ECA a ECA spojů jsou odvozeny z existujících postupů pro testování spojů pájených, jelikož primární požadavky na obě technologie jsou ekvivalentní (uspokojivé elektrické a mechanické vlastnosti, environmentální stálost).

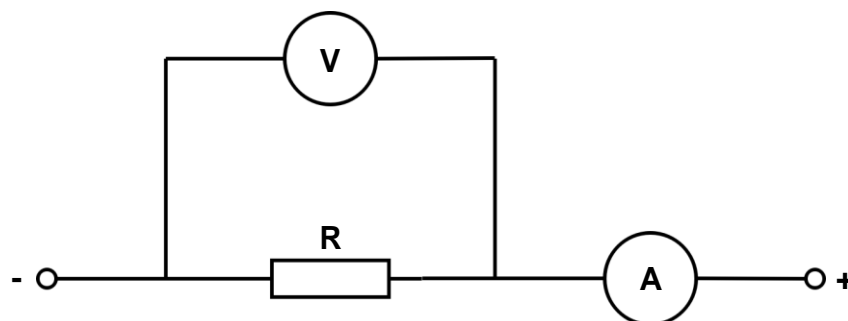
4.2.1 Měření elektrických veličin

Nejčastěji měřený elektrický parametr lepených spojů je celkový elektrický odpor spoje. Pro toto měření se používá čtyřbodová metoda. Další typ elektrické diagnostiky ECA spojů je zjišťování nežádoucího šumu nebo měření nelinearity voltampérové charakteristiky spoje [47].

- **čtyřbodová metoda měření elektrického odporu ECA spoje**

Čtyřbodová metoda se používá pro měření velmi malých odporů v hodnotách přibližně $< 1 \Omega$. V případě ECA spojů můžeme díky této metodě vyloučit elektrický odpor přírodních vodičů měřících přístrojů a přechodové odpory jejich kontaktů a minimalizovat tak systematickou chybu měření [48].

Rezistor, jehož lepený spoj je objektem měření, musí být opatřen čtyřmi vývody. Vnější vývody (nazývané jako proudové nebo v angličtině *force*) slouží k připojení zdroje napětí a vnitřními vývody (napěťové – *sense*) se připojuje voltmetr, jehož vnitřní odpor je výrazně vyšší, než odpor měřený. Proud tekoucí do voltmetru je zanedbatelný oproti proudu, jehož hodnota je měřena ampérmetrem [48].



Obrázek 4.1 – Schématické znázornění měření elektrického odporu čtyřbodovou metodou [49]

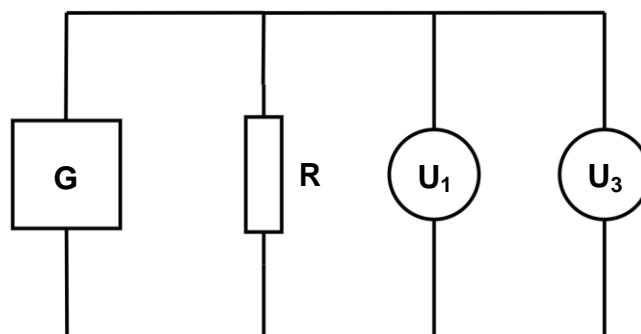
- **měření šumu**

Proud procházející lepeným spojem překonává několik různorodých bariér, jako jsou přechody mezi jednotlivými částicemi plniva, přechody mezi částicemi plniva a kontaktními ploškami vodivého motivu (jež je natištěn na substrátu) nebo přechody mezi plnivem a materiálem povrchové úpravy připevněné součástky. Během tohoto procesu vzniká šum. Detekce šumu je využívána jako nástroj pro testování strukturálních změn typicky vznikajících po klimatických testech. K měření šumu lze využít metodu z podle autorů Mach P., Plaček M., Kolář J., Bušek D. publikovanou v článku *Diagnostics of Electrical Properties of Electrically Conductive Adhesives* [47].

- **měření nelinearity VA charakteristiky spoje**

Voltampérová charakteristika lineárních komponent je lineární přímka. Stejně tak by tomu mělo být i u ECA spojů. Nehomogenity uvnitř polymerní matrice vznikající degradačními vlivy, nedokonalou montáží či nedostatečným tvrzením apod., však mohou způsobovat odklon VA charakteristiky - neboli nelinearitu. Konkrétně teplotní působení na ECA spoje má podle Zhigal'skiiho teorie [49] vliv na vznik třetí harmonické, jež způsobuje odklon VA charakteristiky od lineárního průběhu [50].

Nelinearitu ECA spojů lze měřit dvěma způsoby. První způsob ve zkratce vychází z principu intermodulace, kdy současným průchodem dvou signálů o různém kmitočtu vzniká spektrum složek, které jsou celistvým násobkem kmitočtů vstupních signálů. Druhý způsob je znázorněn na obrázku 4.2. Měřený ECA spoj reprezentovaný na obrázku jako R je napájen sinusovým proudem, přičemž nelineární složky napětí jsou měřeny selektivně nastavenými voltmetry U_1 a U_3 , které měří první resp. třetí harmonickou složku napětí [47], [51].



Obrázek 4.2 – Zapojení pro měření nelinearity ECA spojů [51]

4.2.2 Mechanické testování

K charakterizaci nevodivých lepidel a lepených spojů existuje celá řada testů, jejichž výsledky mohou pomoci stanovit odolnost lepeného spoje vůči mechanickému namáhání a únavě. Některé z těchto testů jsou výhodné i pro charakterizaci ECA spojů. Zejména se jedná o zkoušku stříhem a cyklické únavové testování.

- **zkouška stříhem**

Princip zkoušky stříhem ECA spoje spočívá v zjišťování síly, která je zapotřebí k utržení součástky ze substrátu. Tímto destruktivním testem se zjišťuje adheze mezi připevněnou součástkou, adhezivem a substrátem. Hodnota bývá udávána v N/mm^2 nebo jen v N. V případě flexibilních substrátů je zapotřebí substrát připevnit k rigidní podložce, jelikož flexibilita by způsobovala nežádoucí pružení, které by nedovolilo uskutečnit tento test.

- **cyklické únavové zkoušky**

Při cyklických únavových zkouškách jsou ECA spoje namáhány v periodických opakováních, během nichž dochází střídavě k tlakovému a tahovému namáhání spoje. Během cyklických únavových zkoušek je vhodné měřit elektrický odpor ECA spojů v režimu on-line. Lze tak vysledovat vliv tlakových a tahových namáhání na velikost elektrického odporu spoje, tak jako v [53].

4.2.3 Akcelerované klimatické testování

Akcelerované zkoušky životnosti se provádějí za účelem simulace dlouhodobého působení okolních podmínek na testovaný objekt. Účelem je blíže porozumět mechanismům stárnutí těchto materiálů. V laboratorních podmínkách je zkoušený objekt uložen do komory, v níž probíhají stresové klimatické děje. Provádění akcelerovaných testů je obzvlášť významné v případě kompozitních látek, u nichž jsou teoretické předpoklady chování vždy náročněji predikovatelné.

V případě akcelerovaných zkoušek je velmi výhodné sledovat proměnlivost měřených parametrů (nejčastěji se jedná o měření elektrického odporu ECA spoje) v režimu on-line. Poruchové mechanismy vyvolané testovými podmínkami mohou nastávat až po určité době během expozice, což lze účelně sledovat on-line monitoringem.

Na základě standardu *ISO 16525-7:2014 Adhesives -- Test methods for isotropic electrically conductive adhesives -- Part 7: Environmental test methods* jsou definovány podmínky pro klimatické testy simulující akcelerované stárnutí elektricky vodivých lepidel resp. ECA spojů [52].

Tabulka 4.2 - Environmentální testování ECAs na základě standardu ISO [52]

Název testu	Klimatické podmínky	Doba testování
Cold (chlad)	-25 ± 3 °C -40 ± 3 °C -55 ± 3 °C	500 hod. 1 000 hod.
Dry Heat (suché teplo)	+85 ± 2 °C +100 ± 2 °C +125 ± 2 °C	500 hod. 1 000 hod.
Damp Heat (vlhké teplo)	+85 ± 2 °C, 85 +2/-3 %	500 hod. 1 000 hod.
Change of temperature (teplotní změny)	-40 + 0 / -10 °C, 85 +15/-0 °C -40 + 0 / -10 °C, 100 +15/-0 °C -40 + 0 / -10 °C, 125 +15/-0 °C	500 cyklů 1 000 cyklů

5 Experimentální část – příprava vzorků

První fáze experimentální části je samotná realizace vodivě lepených spojů. V této kapitole jsou popsány použité flexibilní substráty, výběr vodivých lepidel pro vytvoření lepených spojů, jejich základní vlastnosti, proces depozice lepidel a umístění nulových rezistorů na flexibilní destičky.

5.1 Flexibilní substráty

Jako nosný flexibilní substrát byla zvolena PET folie MELINEX[®] 506 [54] s tloušťkou 175 μm . Jedná se o opticky čirou polyesterovou folii, která dle výrobních údajů oplývá vynikajícími adhezními schopnostmi a rozsáhlými možnostmi potisku širokým spektrem inkoustů. Dobré vlastnosti pro tiskové metody podporuje i velmi hladký povrch.

Tabulka 5.1 - Vybrané charakteristické vlastnosti PET folie MELINEX[®] 506 [55]

Teplota tání	255 až 260 °C
Koeficient termální expanze (CTE), při teplotách 20 až 50 °C	$19 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Smršťování po vystavení teplotě 150 °C po dobu ≥ 5 min	0,5 % v příčném směru 1 % v podélném směru

K potištění flexibilního substrátu vodivým motivem byla využita metoda sítotisku. Při volbě vodivého inkoustu byly zohledněny požadavky na flexibilitu, které splňuje stříbrná pasta AG-530 od firmy Applied Ink Solutions [56].

Mezi významné vlastnosti této pasty patří extrémní flexibilita, odolnost vůči krčení a mačkání, velmi dobrá přilnavost k polyesteru, polyimidu či k textilním substrátům. Tabulka 5.2 shrnuje další důležité parametry této vodivé pasty [56].

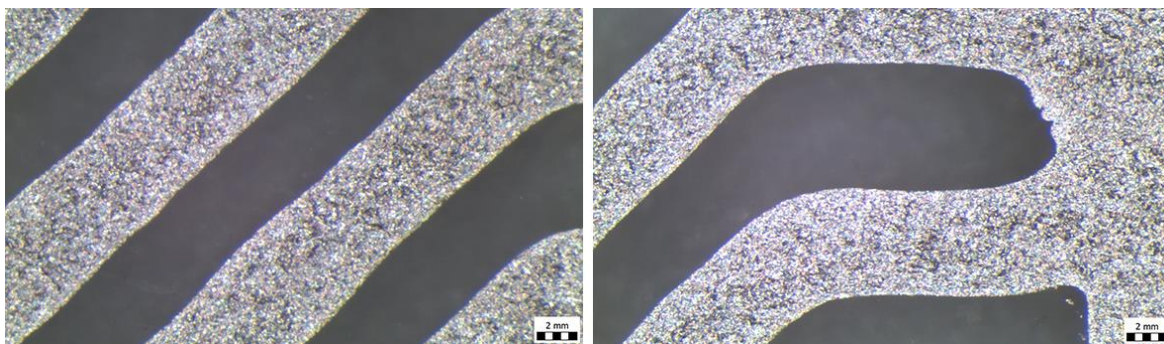
Tabulka 5.2 - Charakteristické vlastnosti vodivého inkoustu AG-530 firmy Applied Ink Solutions [56]

Viskozita [Pa.s]	Vytvrzování	Skladovatelnost	Rezistivita [$\Omega\cdot\text{cm}$]
4,30 až 5,25	90 až 270 sek., 130 °C	6 měsíců, v uzavřeném balení	$2,50 \cdot 10^{-6}$

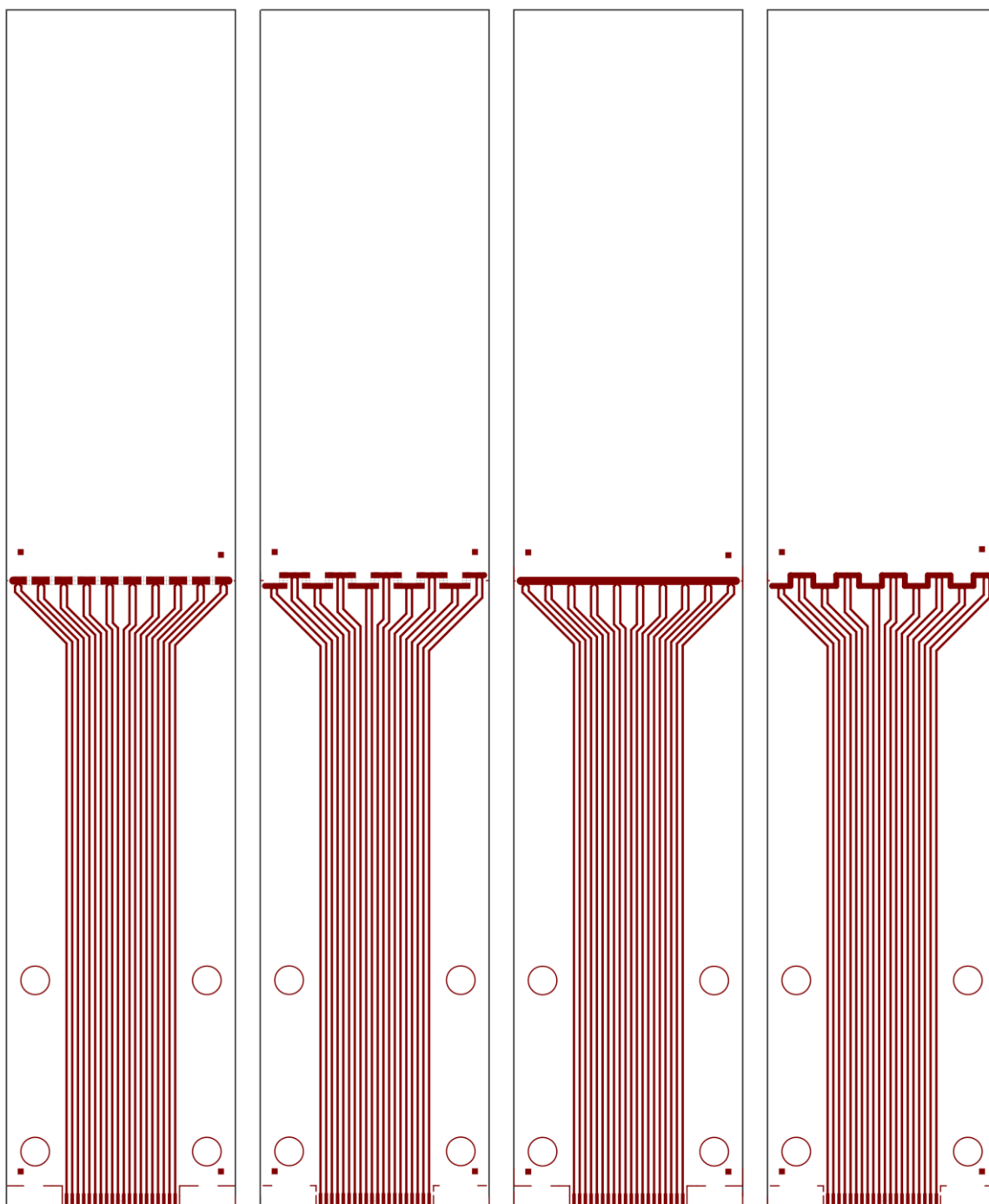
Návrh a vytištění vodivého motivu proběhl v rámci jiného experimentu na Katedře technologií a měření (KET). Výsledná realizace flexibilních substrátů je znázorněna na obrázku 5.1, parametry tiskového procesu pak v tabulce 5.3.

Tabulka 5.3 - Parametry tisku vodivého inkoustu AG-530 na flexibilní substrát

Metoda tisku	Vytvrzení	Těrka	Rychlost	Tlak	Odskok
sítotisk	5 min, 120 °C	75 Sh	100 min/s	0,3 bar / 15 N	1 mm



Obrázek 5.1 - Natištěný vodivý motiv, označení v pravých dolních rozích symbolizuje velikost 2 mm



Obrázek 5.2 – Flexibilní substráty s vodivými motivy. Výška 210 mm, šířka 40 mm

První a druhý typ destiček (zleva) na obrázku 5.2 má vyhraněné prostory pro osazení SMD rezistory o velikosti 0805. Třetí a čtvrtá destička je zkratovaná – při testech využívána jako referenční. Rozdílné varianty orientace osazovaných součástek nejsou pro tuto diplomovou práci předmětem zkoumání.

5.2 Výběr lepidel a jejich charakteristika

Pro vytvoření elektricky vodivých lepených spojů byly zvoleny tři typy lepidel od třech různých výrobců – PC3201 od firmy Heraeus, 8331S od firmy MG Chemicals a Elecolit[®] 3661 od firmy Panacol. Důležité vlastnosti těchto lepidel shrnuje tabulka 5.4.

Tabulka 5.4 - Důležité technické parametry lepidel

PC 3201, Heraeus [27]							
Materiál (plnivo / pojivo)	Vytvrzování		Teplota skelného přechodu [°C]	Rezistivita [Ω.cm]	Skladovatelnost	Zpracovatelnost	
stříbro / epoxid	60 sek.	180 °C	5,5	3·10 ⁻⁴	-20 °C, 12 měs.	5 dní	
	3 min.	130 °C					
8331S, MG Chemicals [57]							
Materiál (plnivo / pojivo)	Vytvrzování		Teplota skelného přechodu [°C]	Rezistivita [Ω.cm]	Skladovatel nost	Zpracovatel nost	Dovolené prac. teploty
stříbro / epoxid	2 hod.	65 °C	34	6·10 ⁻³	22 až 27 °C, ≥ 36 měs.	4 hod.	-40 až 150 °C
	1 hod.	80 °C					
	40 min.	100 °C					
Elecolit [®] 3661, Panacol [28]							
Materiál (plnivo / pojivo)	Vytvrzování		Teplota skelného přechodu [°C]	Rezistivita [Ω.cm]	Skladovatel nost	Zpracovatel nost	Dovolené prac. teploty
stříbro / epoxid	360 min.	80 °C	90 až 130	5·10 ⁻³	0 až 10 °C, 2 až 4 měs.	> 14 dní	-40 až 180 °C
	45 min.	110 °C					
	30 min.	120 °C					
	15 min.	130 °C					
	10 min.	150 °C					

Tučně zvýrazněné hodnoty vytvrzování byly zvoleny pro realizaci ECA spojů v tomto experimentu.

5.2.1 Lepidlo Heraeus PC3201 – L1

Reaktoplastické jednosložkové lepidlo bez rozpouštědel Heraeus PC 3201 (dále jen L1) je určeno k vodivému propojení SMD součástek s flexibilními deskami plošného spoje. Doporučený způsob aplikace je *dispensing* (dávkování) [27].

Před použitím je nutné lepidlo ohřát na pokojovou teplotu – dvě hodiny před depozicí je doporučeno přemístit lepidlo z podchlazených skladovacích prostor. Otevření lepidla může doprovázet zkondenzovaná vlhkost, pro zamezení tohoto nežádoucího jevu je důležité otevřít lepidlo až po ohřátí na pokojovou teplotu [27].

5.2.2 Lepidlo MG Chemicals 8331S – L2

Dvousložkové lepidlo se silnou přilnavostí ke kovům, sklům či plastům. Lepidlo 8331S (dále jen L2) nevyžaduje nízké skladovací teploty. Mezi výhodné vlastnosti 8331S patří značná odolnost vůči vodě, solným roztokům, kyselinám i zásadám. Doporučené použití 8331S je k vytváření lepených spojů namísto spojů pájených, typicky v aplikacích s vyšší teplotní citlivostí – nejedná se tedy o lepidlo primárně určené pro flexibilní substráty [57].

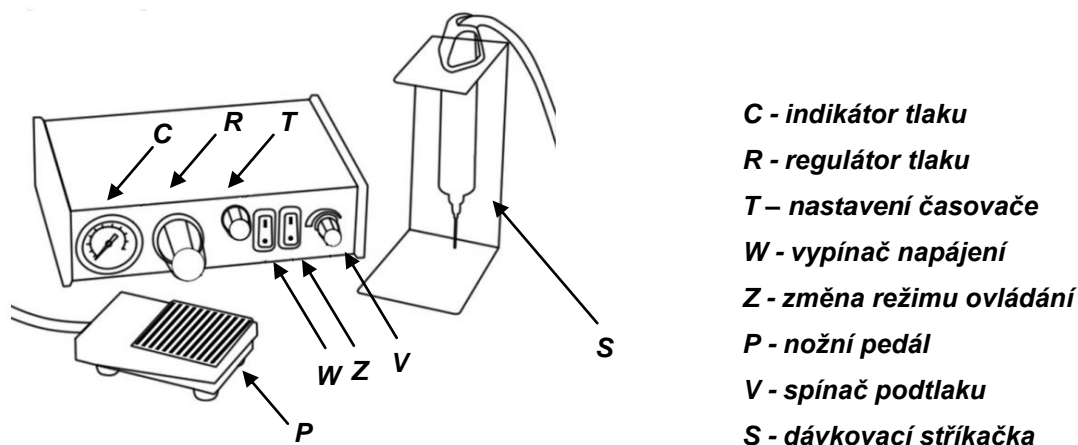
5.2.3 Panacol Elecolit® 3661 – L3

Panacol Elecolit 3661 (dále jen L3) je jedno či dvou složkové lepidlo (v našem případě jednosložkové) bez obsahu rozpouštědel. Vytvrzování těchto lepidel může být buď za zvýšeného teplotního působení, nebo při pokojové teplotě. Polymerní matrice je schopna do určité míry odolávat flexibilnímu namáhání, proto je použití těchto lepidel možné i v aplikacích kde dochází k vibracím nebo k rychlým teplotním změnám [28].

5.3 Postup depozice lepidel a vytváření lepených spojů

Depozice lepidel proběhla v laboratořích KET metodou *dispensingu* s použitím automatického analogového disperzeru (dávkovače) JBE1113 od firmy Fisnar.

Počet osazovaných destiček čítal devatenáct kusů – sedm s lepidly L1 a L3 a pět s lepidlem L2. Každá z destiček čítá osmnáct plošek pro přilepení devíti SMD rezistorů, což znamená vytvoření devíti lepených spojů na devatenácti flexibilních substrátech třemi různými lepidly.



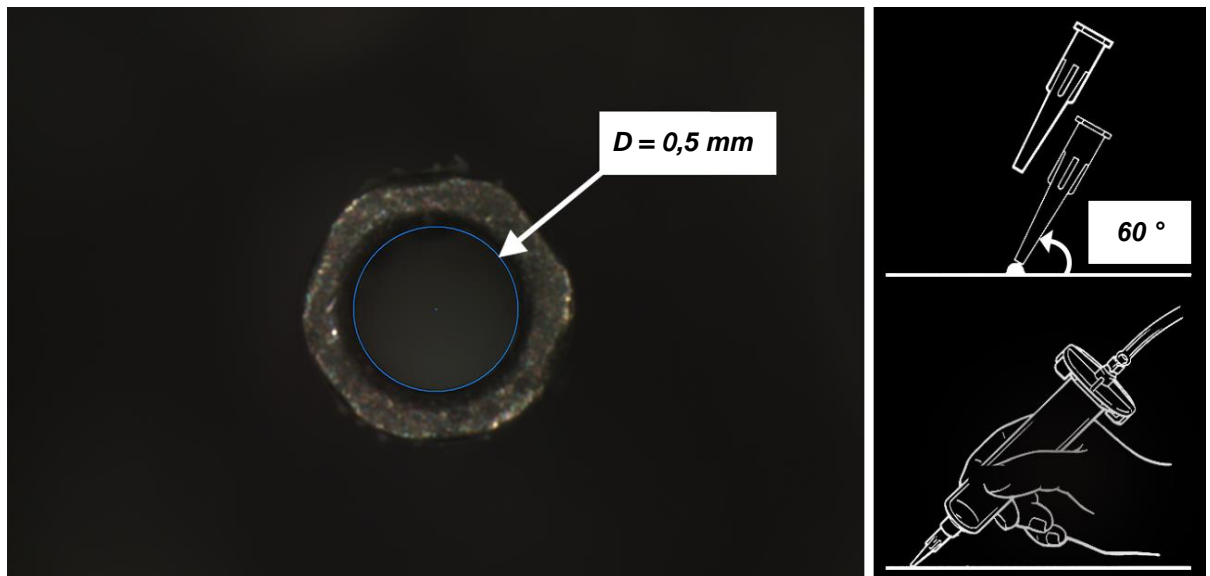
Obrázek 5.3 – Znárodnění a popis dispenzeru JBE1113 od firmy Fisnar [58]

Doba nanášení jedné série součástek (vztaženo k jednomu typu lepidla) se pohybovala okolo 80 minut. Ačkoliv se tato doba nepřibližuje k hranici doporučené zpracovatelnosti žádného z lepidel (viz tabulka 5.4), během nanášení byly zpozorovány mírné změny viskozity a bylo proto nutné upravovat nastavení dispenzeru (časovač a tlak) pro depozici optimálního množství.

V tabulce 5.5 jsou proto zaznamenány hmotnosti deponovaného lepidla odpovídající jednomu lepenému spoji před i po nanášení.

Tabulka 5.5 - Nastavení dispenzeru pro jednotlivá lepidla, množství nanášeného lepidla

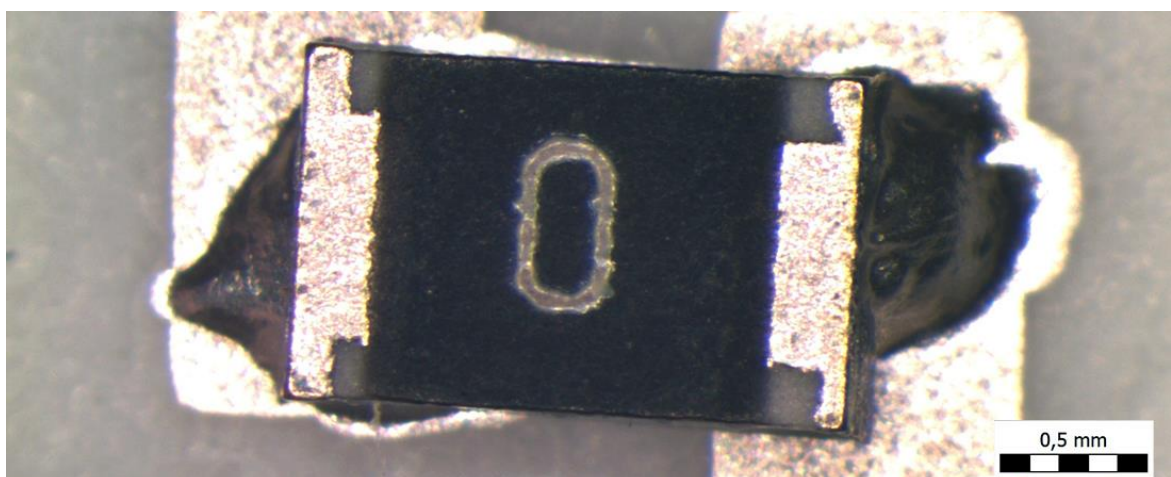
Lepidlo	Heraeus PC 3201	MG Chemicals 8331s	Panacol Elecolit® 3661
Hmotnost nanášeného lepidla na jeden spoj (před depozicí)	1,2 mg	0,44 mg	0,52 mg
Hmotnost nanášeného lepidla na jeden spoj (po depozici)	0,8 mg	0,44 mg	0,44 mg
Nastavení dispenzeru (časovač)	1 až 1,5 s	9 až 10 s	1,5 až 2 s
Nastavení dispenzeru: (tlak)	75 až 80 Pa	80 až 85 Pa	80 až 85 Pa
Průměr dávkovací jehly	0,5 mm	0,5 mm	0,5 mm



Obrázek 5.4 – Průměr dávkovací jehly použité při dispenzingu a znázornění aplikace lepidla [60]

K vytvoření lepených spojů byly zakoupeny nulové SMD rezistory Multicomp, model MC0805S8F0000T5E Thick Film Resistors, 0 Ohm, 125 mW, 1% o velikosti 0805 s povrchovou úpravou kontaktních plošek niklovým pokovením [59].

Po umístění nulových rezistorů na deponované lepidlo bylo nutné lepidlo vytvrdit. Všechna lepidla jsou tvrditelná zvýšeným teplotním působením, proto následovalo jejich umístění do vytvrzovacích pecí s parametry vytvrzování zvýrazněnými tučně v tabulce 5.2.



Obrázek 5.5 – Ukázka realizovaného lepeného spoje

5.4 Sestava pro měření elektrického odporu

Složení aparatury pro měření elektrického odporu obsahuje digitální multimetr (DMM) Keithley 2700, nezbytné propojovací zásuvné karty pro připojení D-SUB konektoru s FPC konektorem a také k propojení DMM s počítačem. Do FPC konektoru (s dvaceti piny) se již přímo vkládá destička s proměřovanými ECA spoji.



Obrázek 5.6 – DMM Keithley 2700 [61] a FPC konektor propojený s D-sub konektorem

Propojení počítače s DMM slouží k nastavení měřicí metody - v tomto případě se jedná o čtyřbodovou metodu měření elektrického odporu (viz kapitola 4.2.1) – a také k zaznamenávání naměřených dat ve formátu pro zpracování tabulkovými procesory.

K měření elektrického odporu ECA spojů destiček umístěných v klimatických komorách jsou k FPC konektorům navíc připájeny „prodlužovací“ ploché kabely, které lze vystavit testovacím klimatickým podmínkám.

6 Experimentální část – testování vodivě lepených spojů

Testování ECA spojů probíhalo v prostorách laboratoří KET a Regionálního inovačního centra elektrotechniky (RICE). Vzorky s ECA spoji byly nejprve vystaveny klimatickým testům zrychleného stárnutí a následně byly podrobeny testu mechanického odtržení součástí, kde byla zjišťována pevnost přilepené součástky ve smyku.

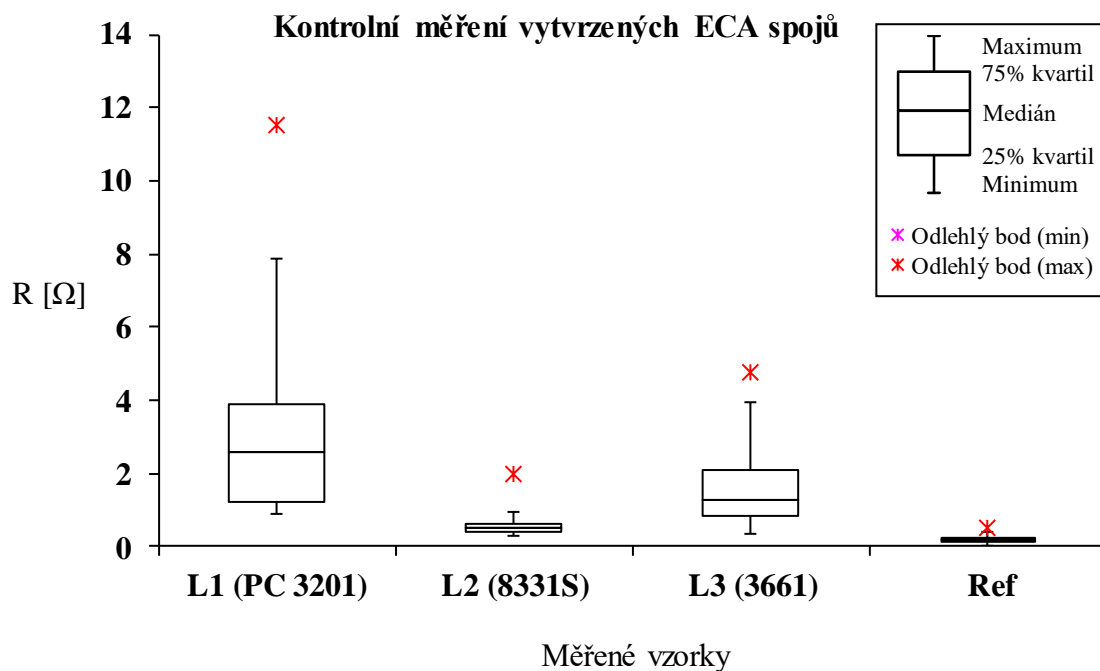
Charakteristika kvality ECA spojů je zpracována na základě hodnot naměřeného elektrického odporu jednotlivých ECA spojů (čtyřbodová metoda) a jejich pevnosti ve smyku. Vyšetření ECA spojů je provedeno také z mikroskopického pohledu.

6.1 Ověření funkčnosti realizovaných vzorků měřením elektrického odporu

Před započnutím klimatického testování proběhlo ověření správné depozice a vytvrzení lepených spojů měřením elektrického odporu. Měřeno bylo sedm destiček s lepenými spoji s lepidly L1 a L3 a pět destiček se spoji L2 a dále čtyři referenční destičky bez lepených spojů (referenční destičky jsou zobrazeny na obr. 5.2 - viz třetí a čtvrtá destička).

Tři destičky se spoji realizovanými L1 dosahovaly přibližně o řád vyšších hodnot elektrického odporu, proto byly tyto destičky dále vyřazeny. Ze stejného důvodu byly vyřazeny také tři destičky lepidla L3. Lepidlo L2 dosahovalo uspokojivých hodnot a nejvíce se přibližovalo referenčním hodnotám.

Destičky L1 vykazovaly největší rozptyl hodnot jednotlivých lepených spojů. Některé z ECA spojů L1 nebyly dostatečně kvalitně vytvrzeny a jejich elektrický odpor zasahoval do velmi odlehlých hodnot (řádově desítky Ohmů). Z grafu 6.1 jsou výrazně odlehlé hodnoty vyloučeny – jednotlivé rezistory, jejichž lepené spoje vykazovaly odlehlé hodnoty el. odporů, byly na destičce označeny a v klimatických testech již nebyly proměřovány, nicméně vyřadit celou destičku kvůli jednomu či dvěma nevyhovujícím spojům by bylo nevhodné. Hodnoty všech naměřených lepených spojů vč. zde vyloučených hodnot jsou v příloze A.



Obrázek 6.1 – Srovnání hodnot el. odporu lepených spojů dle typu lepidla po vytvrzení

6.2 Akcelerované stárnutí vzorků – klimatické testování

Účelem dlouhodobého klimatického testování ECA spojů bylo simulovat akcelerované stárnutí a na základě naměřených dat dále charakterizovat kvalitu vodivě lepených spojů. Testování probíhalo za konstantních, zvýšených, snížených teplot a při klimatickém cyklování teploty a vlhkosti – na základě standardu *ISO 16525-7:2014 Adhesives -- Test methods for isotropic electrically conductive adhesives -- Part 7: Environmental test methods* [52].

6.2.1 Klimatické testování – suché teplo

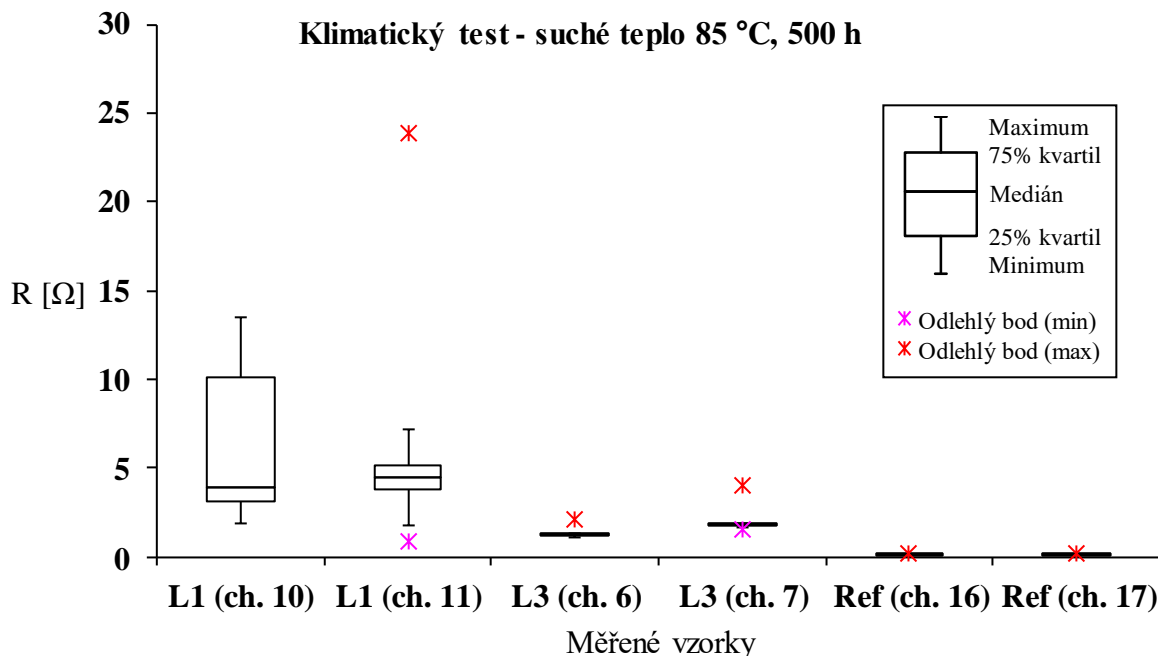
Testování konstantního vlivu suchého tepla na kvalitu ECA spojů bylo realizováno dle údajů v tabulce 6.1. Konfigurace DMM umožnila periodický odečet hodnot elektrického odporu ECA spojů v on-line režimu. Měřené vzorky byly vloženy do teplotní pece Memmert.

Tabulka 6.1 - Parametry testování ECA spojů - suché teplo

Typ testu	Teplotní podmínky		Délka trvání testu		Počet cyklů odečítání hodnot		Doba trvání jednoho cyklu	
Suché teplo (<i>dry heat</i>)	85 °C ± 2 °C		500 h		3000		600 s	
Připojení k DMM	ch. 4	ch. 5	ch. 6	ch. 7	ch. 10	ch. 11	ch. 16	ch. 17
	L2	L2	L3	L3	L1	L1	ref.	ref.

Testování vlivu suchého tepla probíhalo souběžně s testem v chladném prostředí. Hodnoty obou měření byly zaznamenávány prostřednictvím jednoho DMM. Vzhledem

k dostupné instrumentaci bylo možné využít celkově dvacet měřících kanálů. Pro rovnoměrné měření bylo využito šestnáct kanálů DMM, přičemž pro vysokoteplotní a pro nízkoteplotní testování bylo vyhrazeno zvlášť osm a osm kanálů (označeno *ch.*).



Obrázek 6.2 - Srovnání hodnot el. odporu ECA spojů L1 a L3

Z testování vyšlo nejlépe lepidlo L3 Elecolit® 3661 od firmy Panacol. Hodnoty elektrického odporu ECA spoje dosahují oproti lepidlu L1 nižších hodnot a také nižšího rozptylu. Hodnoty elektrického odporu lepidla L3 jsou v tomto testu stále a nízké, což je pozitivum pro hodnocení kvality ECA spoje.

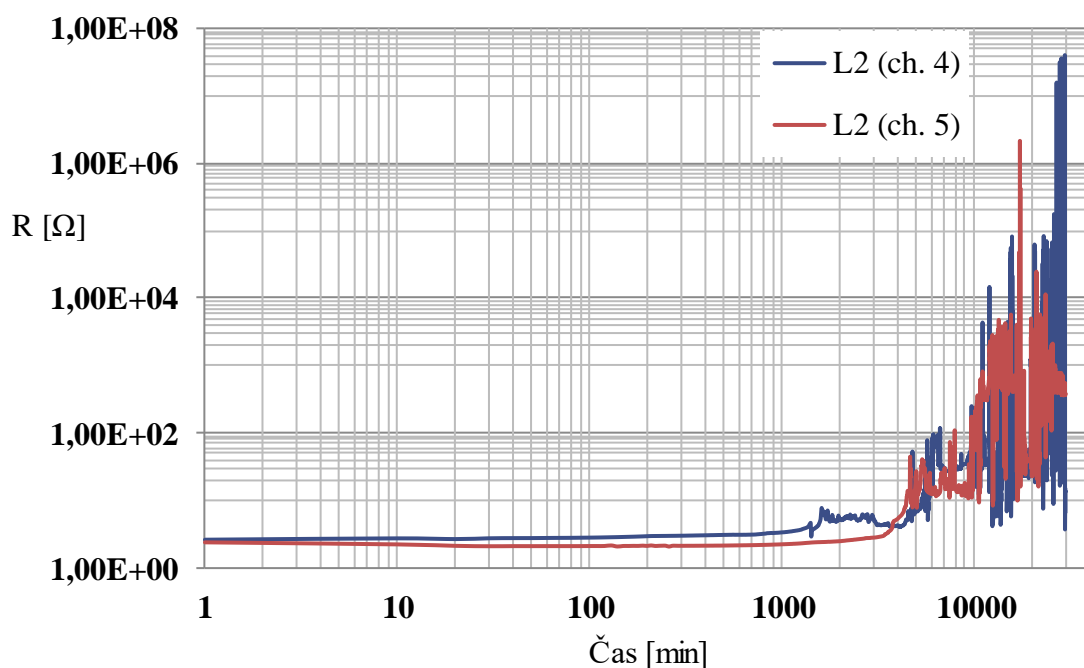
Lepidlo L2 je ze srovnání v grafu 6.2 vyjmuta z důvodu příliš vysokých hodnot, které by znehodnotily vypovídací schopnost aktuální podoby grafu, proto jsou výsledky měření L2 zobrazeny samostatně.

Časová závislost velikosti měřeného odporu ECA spojů L2 (obr. 6.3) ukazuje rapidní nárůst obou křivek přibližně okolo 4700. minuty probíhajícího testu (78,3. hodina z celkových 500). Ačkoliv je výrobcem MG Chemicals deklarováno, že lepidlo 8331S je schopné pracovat v konstantních podmínkách od -40 °C do 150 °C (nicméně bez časové specifikace) [57], v tomto testu oba měřené lepené spoje L2 jednoznačně selhaly.

Vzhledem k deklarovaným vlastnostem lepidla lze soudit, že problém mohl částečně nastat nedokonalou ruční přípravou vzorků – jedná se dvousložkové lepidlo a před samotnou depozicí je nezbytné obě složky promíchat zvlášť a poté smíchat dohromady v homogenní směs v poměru 1:1. Není-li lepidlo důkladně promíchané, mohou v něm vznikat například dutinky (viz kapitola 4.1.2).

Výrobce také udává, že jedna ze složek lepidla obsahuje alifatické aminy [57], které se v lepidlech obecně používají jako vytvrzovací činidla. Nevýhodné vlastnosti těchto látek obsažených v lepidlech jsou popsány v publikacích *Semiconductor Packaging (2016)* [62] nebo *Adhesives Technology for Electronic Applications (2011)* [18]. Jedná se o tzv. „outgassing“ neboli odplyňování. Konkrétně alifatické aminy zapříčiňují odplynění amoniaku [62]. Odplyňování se objevuje při vyšších teplotních zatíženích a zákonitě je doprovázeno vznikem dutinek, jejichž existence má za následek zhoršení elektrických i mechanických vlastností ECA spoje [41].

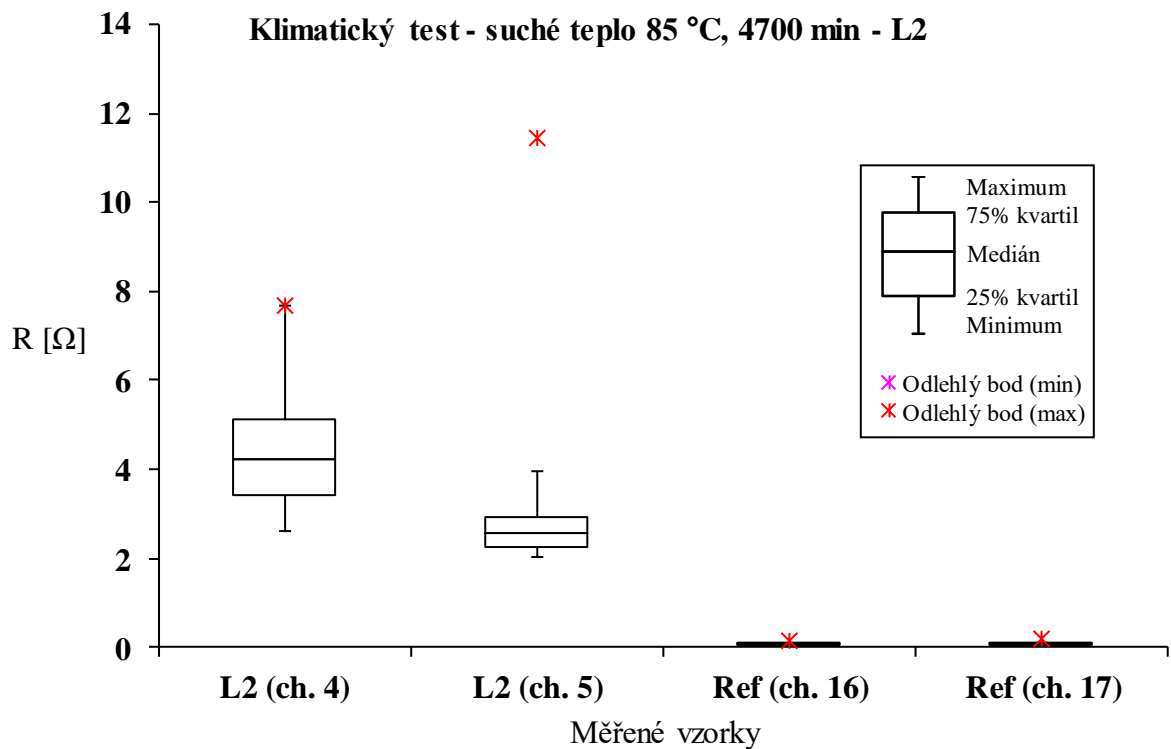
Klimatický test - suché teplo 85 °C, 500 h - časová závislost, L2



Obrázek 6.3 - Časový vývoj el. odporů ECA spojů L2

Obrázek 6.4 zobrazuje rozložení hodnot elektrického odporu ECA spoje L2 při teplotě 85 °C v upraveném časovém horizontu 4700 minut (78,3 hodin) v porovnání s referenčními

vzorky. Lepidlo L2 má v tomto časovém rozpětí srovnatelné hodnoty el. odporu jako lepidlo L1, které je porovnávávané na obrázku 6.2.



Obrázek 6.4 - Rozložení hodnot el. odporů ECA spojů L2 v redukovaném čase při teplotě 85 °C

6.2.2 Klimatické testování – chladné prostředí

Testování konstantního vlivu nízké teploty na kvalitu ECA spojů bylo realizováno dle údajů v tabulce 6.2. Destičky byly umístěny na skloepoxidovou desku a upevněny kaptonovou páskou – pro snadnější manipulaci při přemísťování měřených vzorků.



Obrázek 6.5 - Měřené vzorky na skloepoxidové desce umístěné v mrazáku

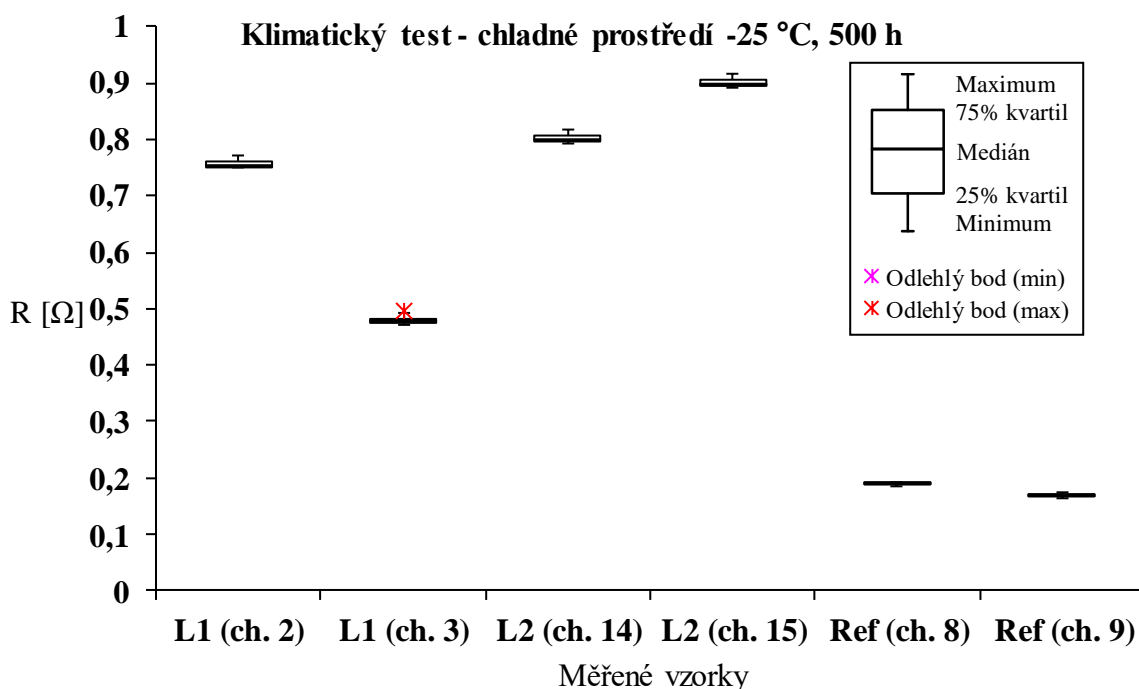
Tabulka 6.2 - Parametry testování ECA spojů – chladné prostředí

Typ testu	Teplotní podmínky		Délka trvání testu		Počet cyklů odečítání hodnot		Doba trvání jednoho cyklu	
Chladné prostředí (cold)	-25 °C ± 3 °C		500 h		3000		600 s	
Připojení k DMM	ch. 2	ch. 3	ch. 14	ch. 15	ch. 12	ch. 13	ch. 8	ch. 9
	L1	L1	L2	L2	L3	L3	ref.	ref.

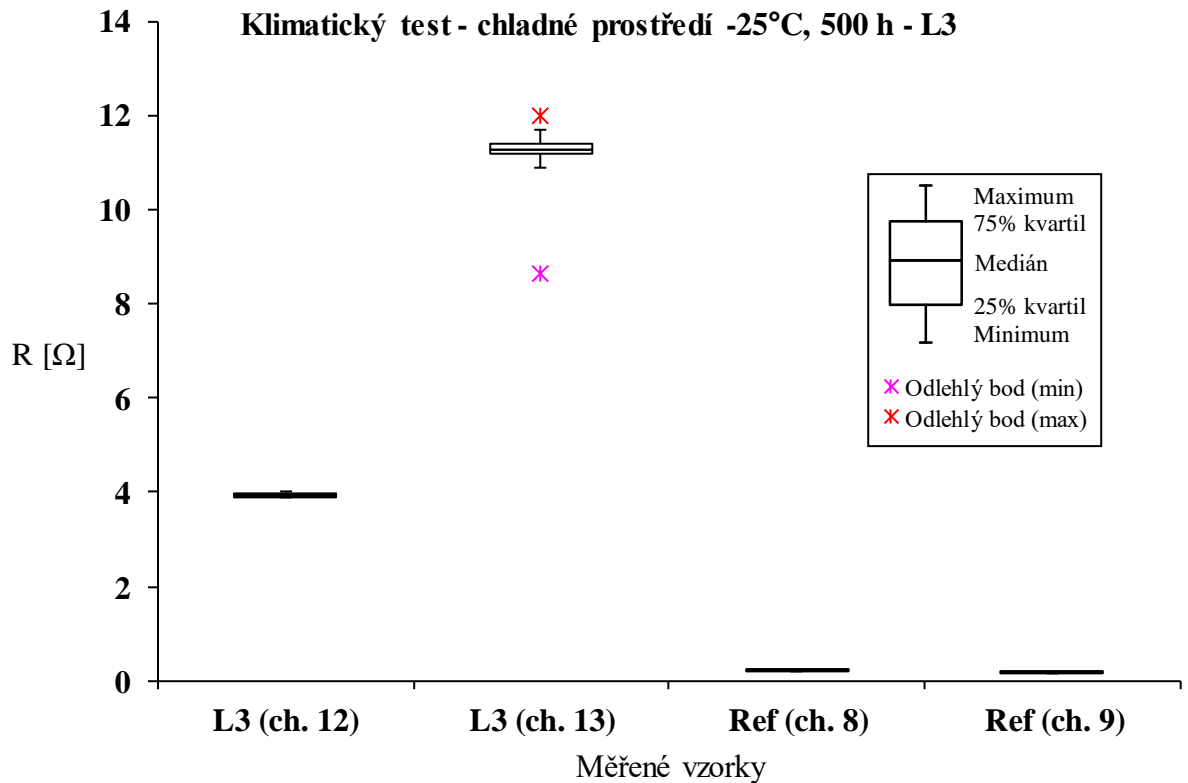
Z grafického znázornění rozložení hodnot el. odporu na obrázku 6.6 bylo vyjmuto lepidlo L3, které vykazovalo výrazně vyšší hodnoty el. odporu – proto je zobrazeno samostatně na obr. 6.7.

Z naměřených hodnot vyplývá, že vliv teploty -25 °C nemá významný vliv na rozložení hodnot el. odporu ECA spojů a tedy ani na kvalitu ECA spojů z pohledu elektrického, jelikož velikosti odporů jsou stále a nízké.

Významnější změny chování ECA spojů vystavených dlouhodobým nízkým teplotám lze očekávat u mechanických vlastností.

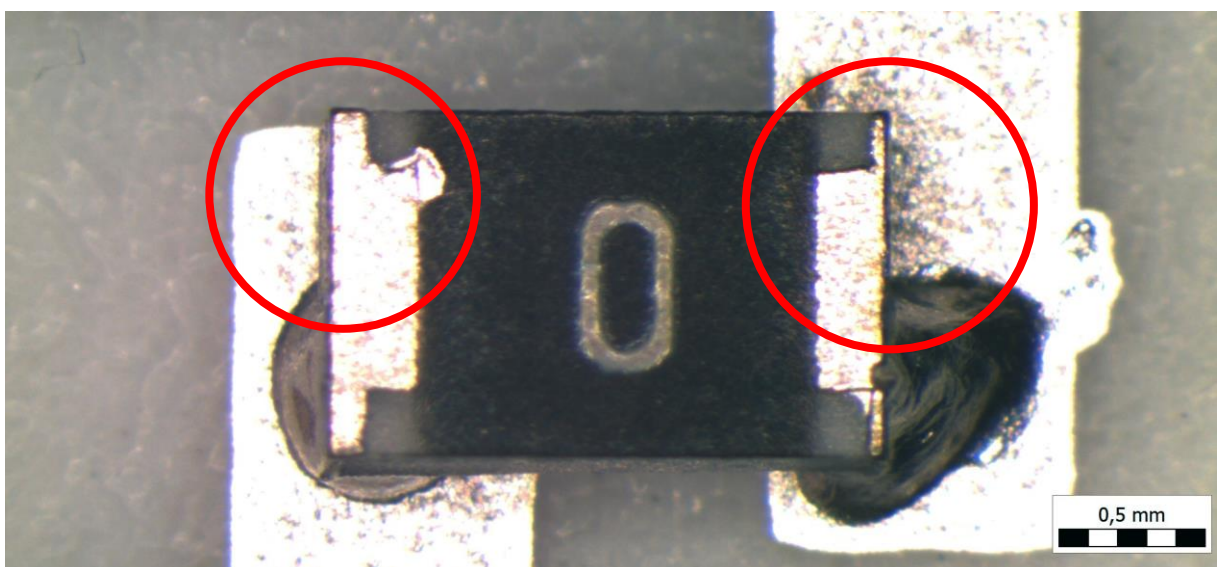


Obrázek 6.6 - Srovnání hodnot el. odporu ECA spojů L1 a L2



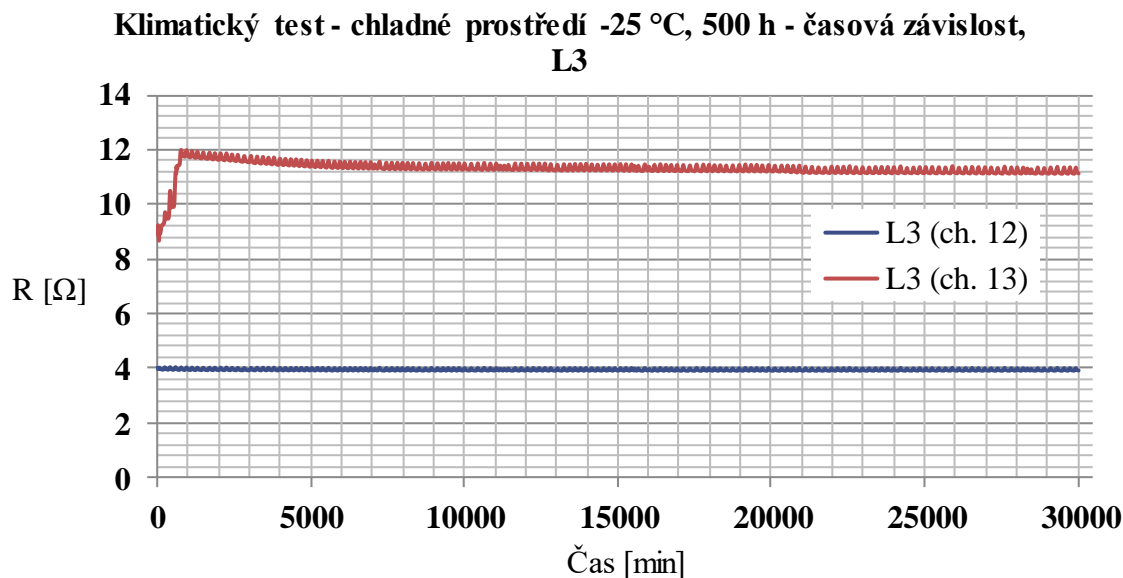
Obrázek 6.7 - Rozložení hodnot el. odporů ECA spojů L3 při teplotě -25 °C

Hodnoty el. odporů ECA spojů L3 jsou vyšší v porovnání se spoji L1 a L2. Zejména spoj L3 (ch. 13) dosahuje vysokých hodnot. Mikroskopický pohled odhalil nerovnoměrné rozložení lepidla na nulovém rezistoru, což může být důvod pro horší elektrické propojení a tudíž vyšší hodnoty el. odporu.



Obrázek 6.8 - Mikroskopický pohled na ECA spoj L3 (ch. 13) s nerovnoměrným rozložením lepidla

Časový průběh el. odporu u ECA spoje L3 (ch. 12) neproказuje vliv nízkoteplotního prostředí na velikost el. odporu. V případě ECA spoje L3 (ch. 13) sice nastal výrazný růst el. odporu již na počátku testu, záhy se však hodnota ustálila.



Obrázek 6.9 - Časový vývoj el. odporů ECA spojů L3

6.2.3 Klimatické testování – vlhké teplo

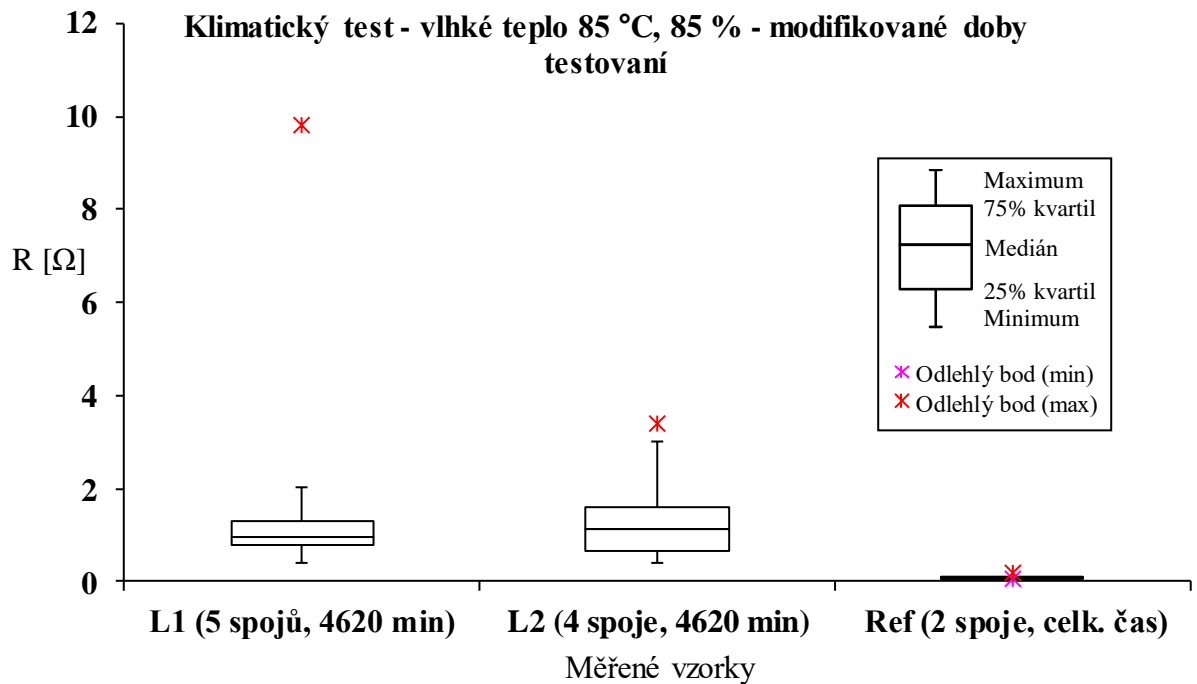
Působení vlhkého tepla bylo provedeno ve zkušební klimatické komoře VCC³ 0034 od firmy Vötsch. On-line měřením byl zjišťován elektrický odpor pěti ECA spojů u destiček L1, L2, L3 a také pět odporů referenční zkratované destičky. Podmínky tohoto testu jsou zobrazeny v tabulce 6.3.

Tabulka 6.3 - Parametry testování ECA spojů – vlhké teplo

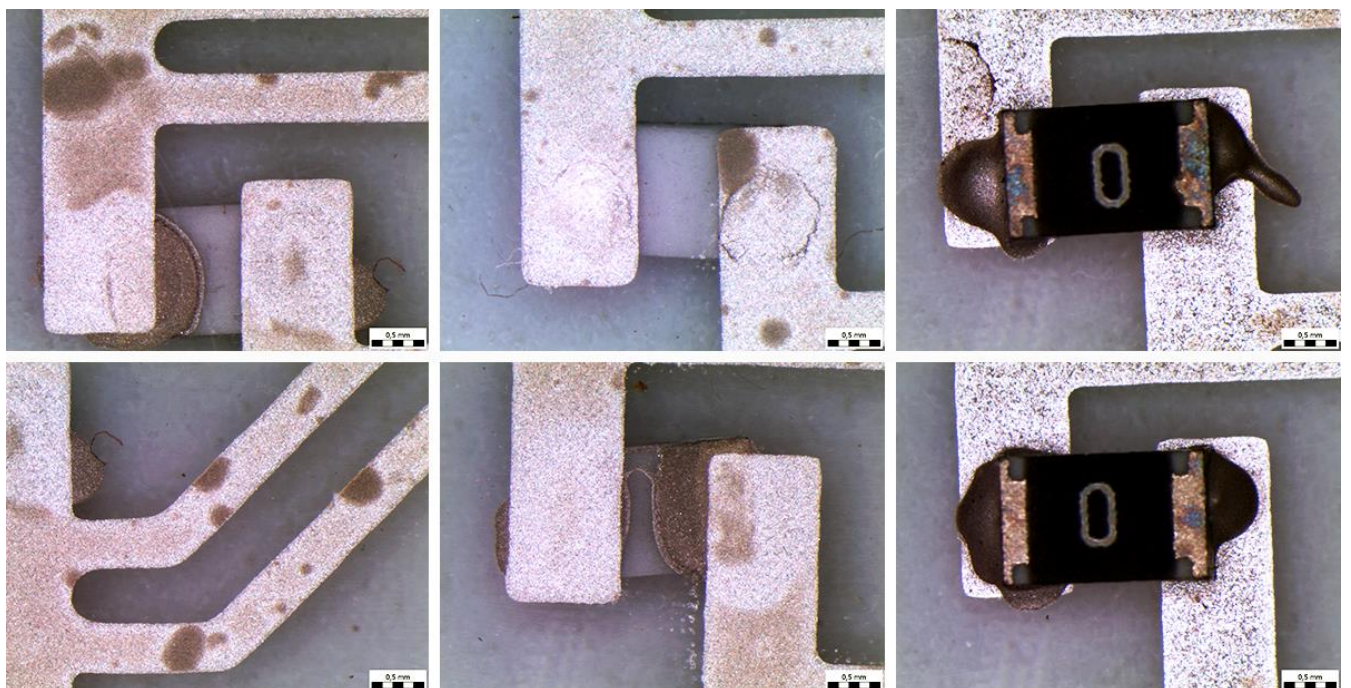
Typ testu	Teplotní podmínky	Délka trvání testu	Počet cyklů odečítání hodnot	Doba trvání jednoho cyklu
Vlhké teplo (<i>damp heat</i>)	+85 ± 2 °C, 85 $^{+2}_{-3}$ %	500 h	3000	600 s
Připojení k DMM	ch. 6 až ch. 10	ch. 1 až ch. 5	ch. 11 až ch. 15	ch. 16 až ch. 20
	L1	L2	L3	Ref.

Vystavení ECA spojů teplotě 85 °C v kombinaci s 85% vlhkostí prokázal znehodnocení všech měřených spojů. Stejně tak i vodivé motivy byly tímto prostředím poškozeny. Z mikroskopických snímků jsou patrná zatmavená místa na vodivých motivech Ag pasty, místy jsou viditelné i praskliny, zkraty pod rezistory nebo začernalé povrchy rezistorů.

Vzhledem k množství proměřovaných vzorků a s ohledem na přehlednost jsou zobrazeny pouze souhrnné hodnoty el. odporů ECA spojů L1, L2 a referenčních, nikoliv samostatných spojů připojených k měřicím kanálům DMM. ECA spoje L3 vykazovaly již po 200 minutách příliš vysoké hodnoty el. odporů, proto v grafu 6.10 zařazeny nejsou. Podrobnější grafy jednotlivých spojů jsou v přílohách B.



Obrázek 6.10 - Srovnání hodnot el. odporu ECA spojů L1 a L2



Obrázek 6.11 - Vliv vlhkého tepla na ECA spoje, měřítko 0,5 mm

6.2.4 Klimatické testování – teplotní změny

Klimatické testování teplotních změn na ECA spoje proběhlo v laboratořích RICE v teplotní zkušební komoře VT³ 7012 S2 od firmy Vötsch.

Zkušební komora VT³ 7012 S2 je rozdělena do dvou vertikálních testovacích zón. V každé z nich jsou odlišné klimatické podmínky. Díky posuvu testovaných destiček mezi jednotlivými zónami během krátkého časového okamžiku lze dosáhnout rychlých – šokových – teplotních změn.

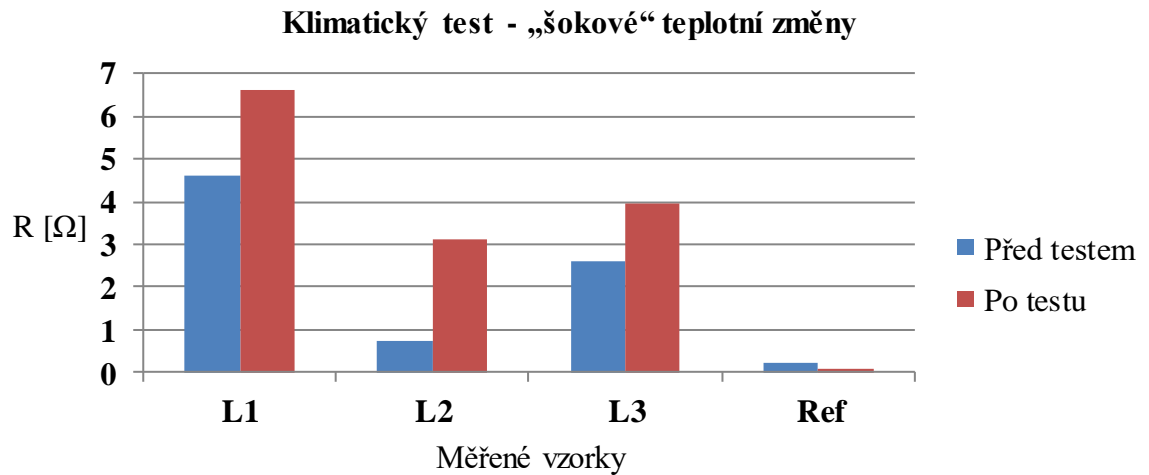
Tabulka 6.4 - Konfigurace testu klimatických šokových změn

Typ testu	Teplotní podmínky	Délka trvání testu	Počet cyklů teplotních změn během testu
Šokové teplotní změny (<i>change of temperature - shock</i>)	$-40_{-10}^{+0} \text{ } ^\circ\text{C} \mid 85_{-0}^{+15} \text{ } ^\circ\text{C}$	190 h	1000

Vzhledem k neustálým vertikálním posuvům testovaných destiček nebylo možné zabezpečit propojení s DMM a zjišťovat tak elektrický odpor on-line měřením. Proto byla hodnota el. odporu změřena před testováním a po testování. Změna el. odporu je zaznamenána na obrázku 6.13.



Obrázek 6.12 - Klima komora VT³ 7012 S2 od firmy Vötsch s testovanými vzorky

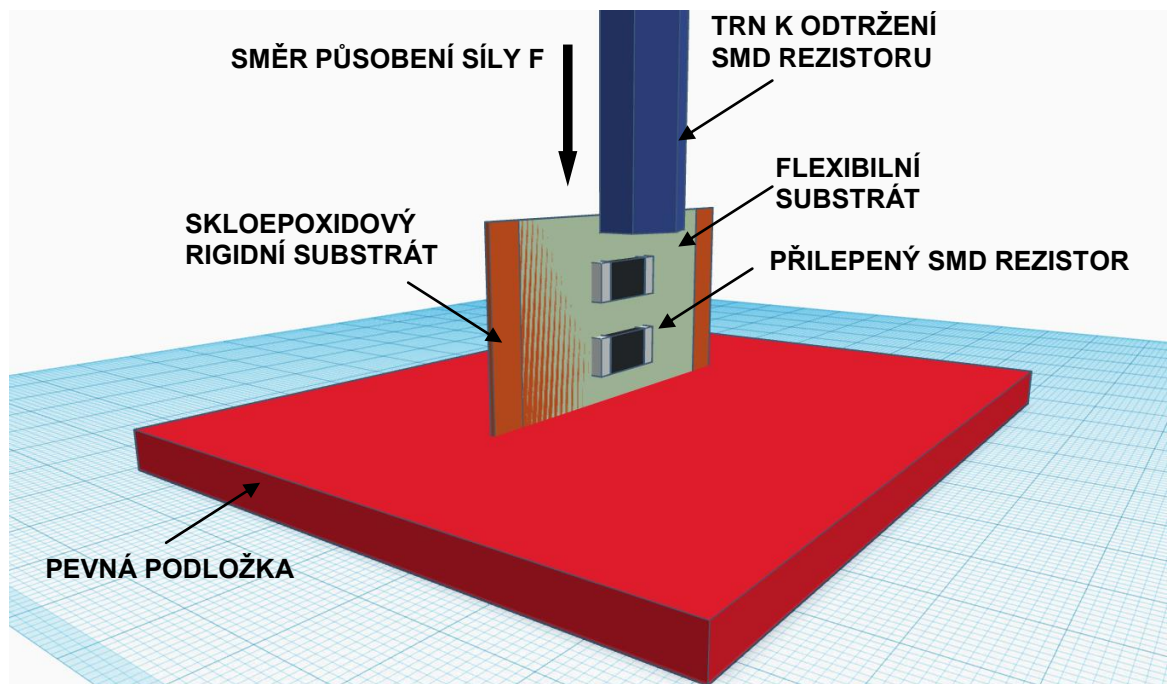


Obrázek 6.13 – Srovnání průměrných hodnot el. odporů jednotlivých ECA spojů před a po testu

Z naměřených hodnot neplynou výrazné změny elektrického odporu ECA spojů po klimatických šokových změnách. Vzhledem k tomu, že nebylo možné měřit elektrický odpor v on-line režimu, je analýza chování ECA spojů při klimatickém cyklování ochuzená o zajímavá data.

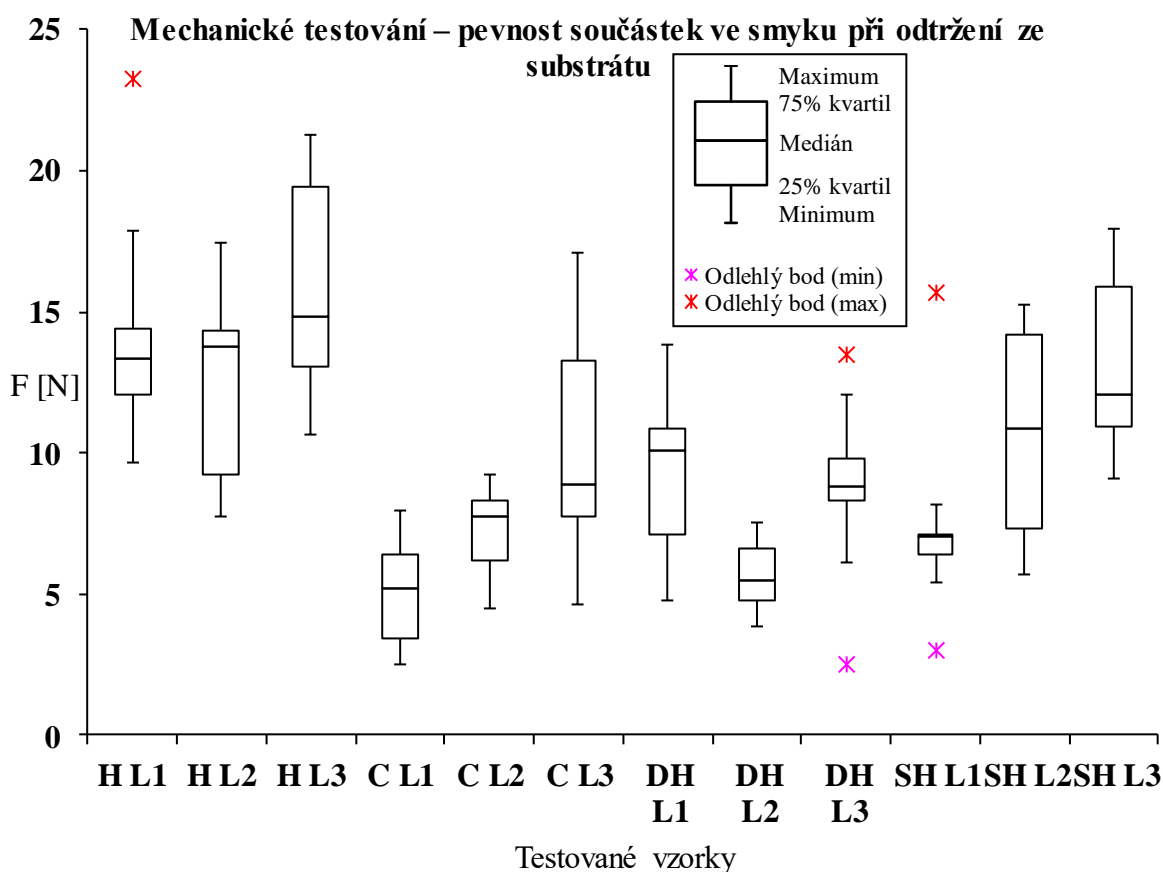
6.3 Mechanické testování – pevnost součástek ve smyku

Důležitá součást hodnocení kvality ECA spojů je pevnost přilepené SMD součástky na flexibilním substrátu. Princip měření spočívá v zjišťování maximální síly, která je zapotřebí k odtržení přilepeného SMD rezistoru.



Obrázek 6.14 - Znáznornění experimentu pro měření mechanické pevnosti SMD rezistorů ve smyku

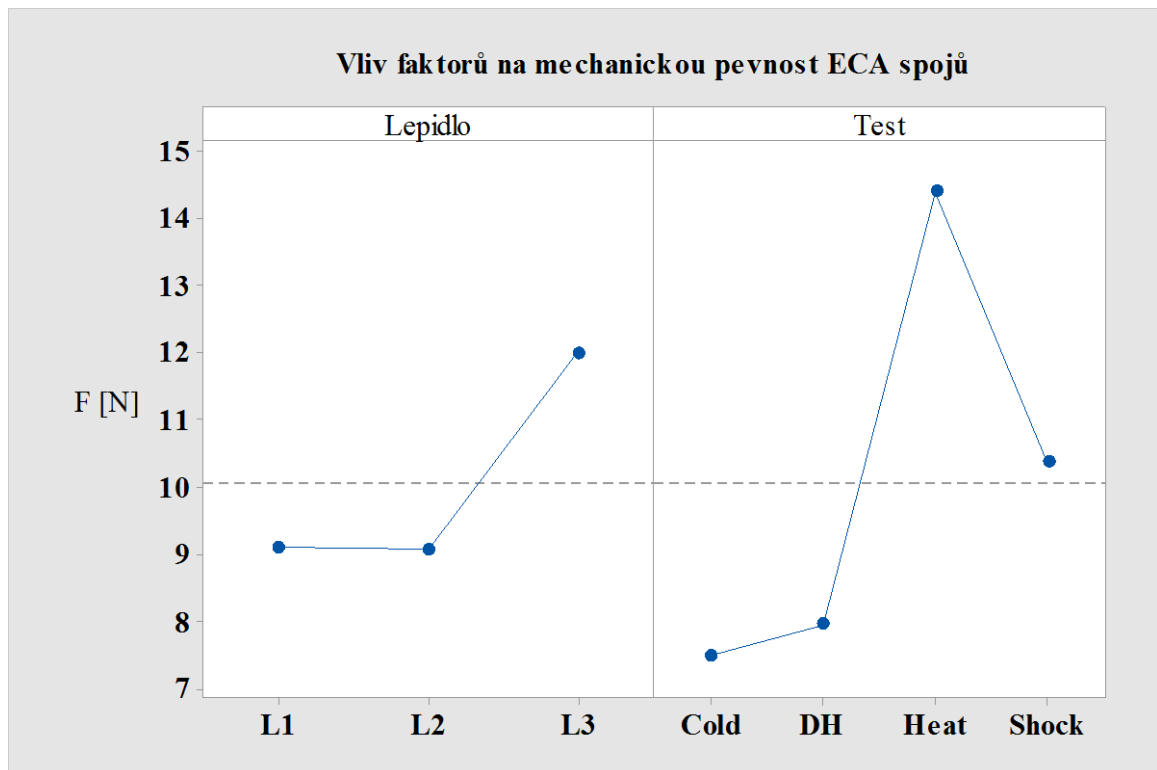
Nejprve bylo nutné flexibilní substrát připevnit na očištěnou rigidní podložku. Podobně jako v experimentu *Shear Strength of Conductive Adhesive Joints on Rigid and Flexible Substrates Depending on Adhesive Quantity* [63] byla flexi destička přilepena oboustrannou lepicí páskou ke skloepoxidové destičce. Poté následoval samotný experiment, který proběhl na trhací soustavě Labor Tech.



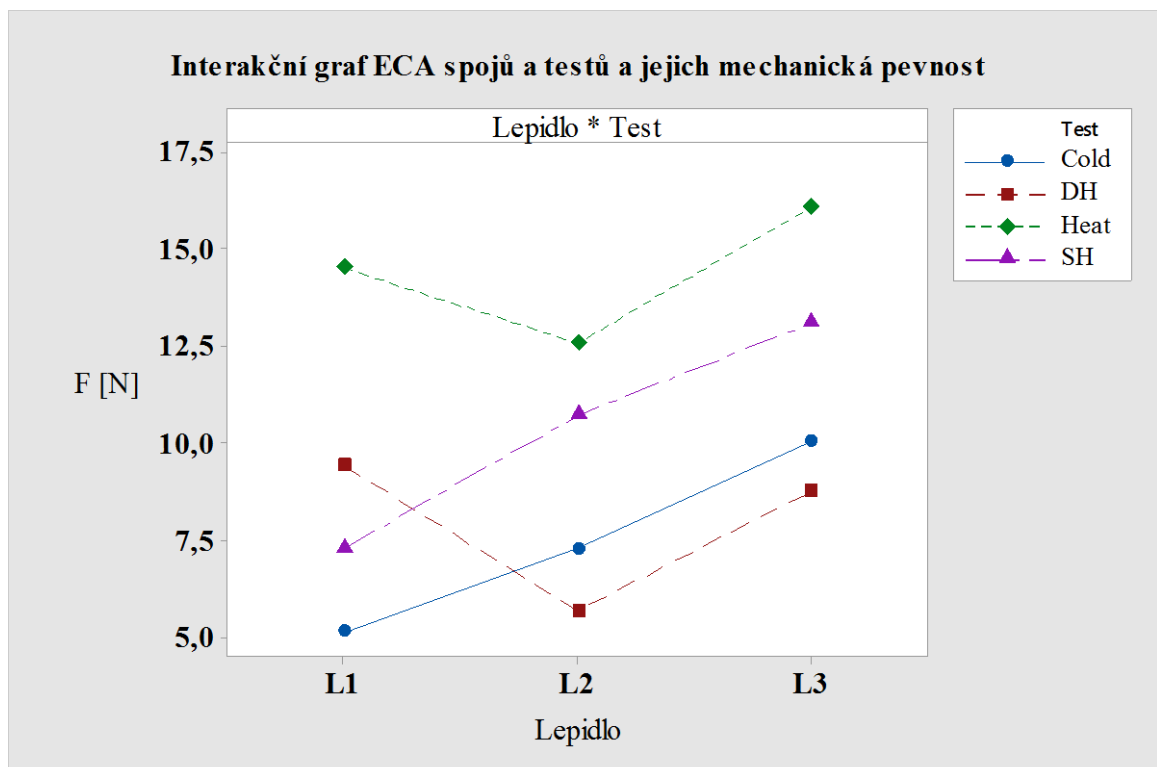
Obrázek 6.15 – Srovnání hodnot síly F k odtržení jednotlivých součástek ze zkoušených destiček, rozdělení uvažuje také jednotlivé testy, značené jako H – Heat (suché teplo), C – Cold (chladné prostředí), DH – Damp Heat (vlhké teplo) a SH – Shock (šokové změny teploty)

Pro přehlednější hodnocení tohoto experimentu byla vypracována faktorová analýza pomocí programu Minitab. Výsledky faktorové analýzy na obrázku 6.16 a 6.17 porovnávají maximální sílu k odtržení součástek jednotlivých lepených spojů dle typu lepidel a provedených klimatických testů.

S rostoucí strmostí roste vliv daného faktoru. Z obrázku 6.16 je patrné, že nejvyšší síla je dosažena u ECA spojů lepidla L3 (Panacol Elecolit[®] 3661). Lepidla L1 a L2 mají srovnatelné hodnoty síly k odtržení součástek.



Obrázek 6.16 - Vliv faktorů (typ lepidla a typ testu) na pevnost ECA spojů



Obrázek 6.17 - Interakční graf ECA spojů a klimatických testů a jejich mechanická pevnost

Z klimatických testů má nejmarkantnější vliv na pevnost lepených spojů test chladného prostředí. Dlouhodobě působící nízká teplota způsobuje ztvrdnutí a zkřehnutí lepidla, což

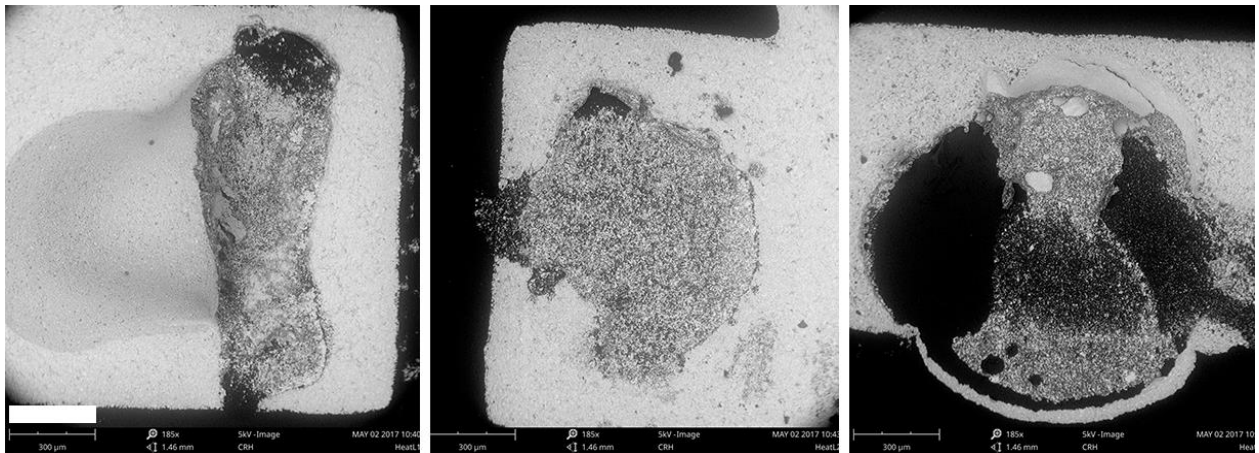
vede ke zhoršení přilnavosti spoje. Obdobně špatných výsledků dosahují také ECA spoje testované ve vlhkém teple. Zde je patrné provlhnutí spojů, což degraduje nejen mechanickou pevnost, ale také elektrické vlastnosti ECA spoje (viz kapitola 4.1.1).

Vliv suchého tepla má pozitivní vliv na pevnost spojů. Testovací teplota 85 °C ani zdaleka nepřesahuje výrobcem deklarovanou maximální teplotu pro provoz lepidel (viz tabulka 5.4 – parametry testovaných lepidel), proto lze považovat dlouhodobé působení zvýšené teploty za faktor zvyšující mechanickou pevnost ECA spojů.

7 Rozbor ECA spojů na základě mikroskopického pohledu

Po mechanickému odtržení součástek byly vybrané ECA spoje nasnímány elektronovým mikroskopem. Mikroskopickým pohledem na odtržené ECA spoje lze určit mechanismus nejslabšího článku řetězce, jež tvoří elektricky vodivý lepený spoj.

- *Suché teplo*

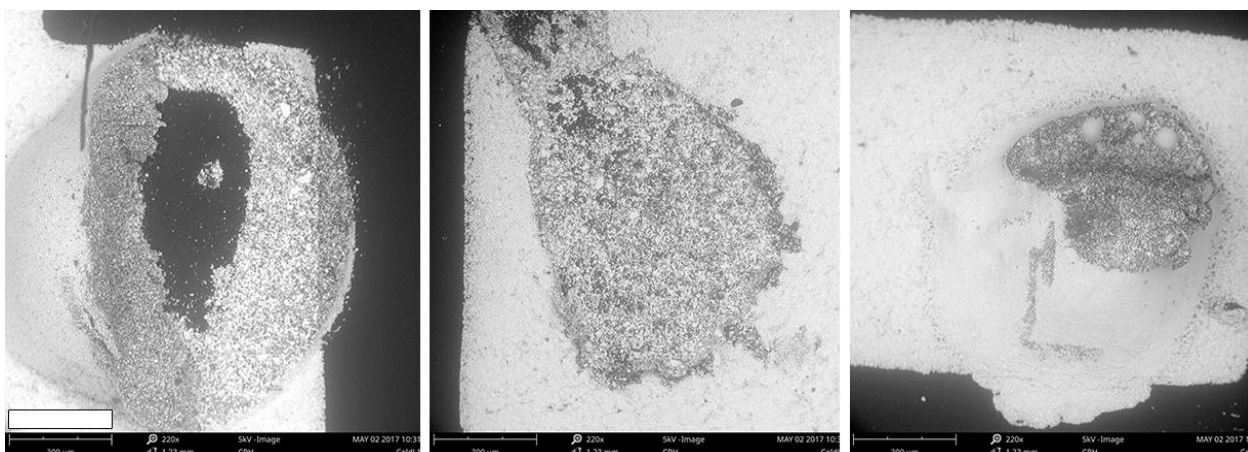


Obrázek 7.1 - ECA spoje po heat testu – v pořadí L1, L2, L3 - bílá značka určuje velikost 300 µm

První a druhý obrázek zleva (ECA spoje L1 a L2) prokazují, že nejslabší článek lepeného spoje jsou samotná lepidla. Při najetí trnu na zkoušené SMD rezistory se vytvrzené lepidlo podvolilo působící síle.

Třetí obrázek (lepidlo L3) prokazuje odlišný mechanismus. V levé třetině je patrná sytě černá plocha, což značí odtržení Ag inkoustu tvořící vodivý motiv. V prostřední třetině jsou majoritně viditelné zbytky lepidla a v poslední třetině jsou patrné zbytky metalizace součástky. Na základě tohoto pohledu nelze jednoznačně identifikovat nejslabší článek ECA spoje lepidla L3 testovaném v suchém teple.

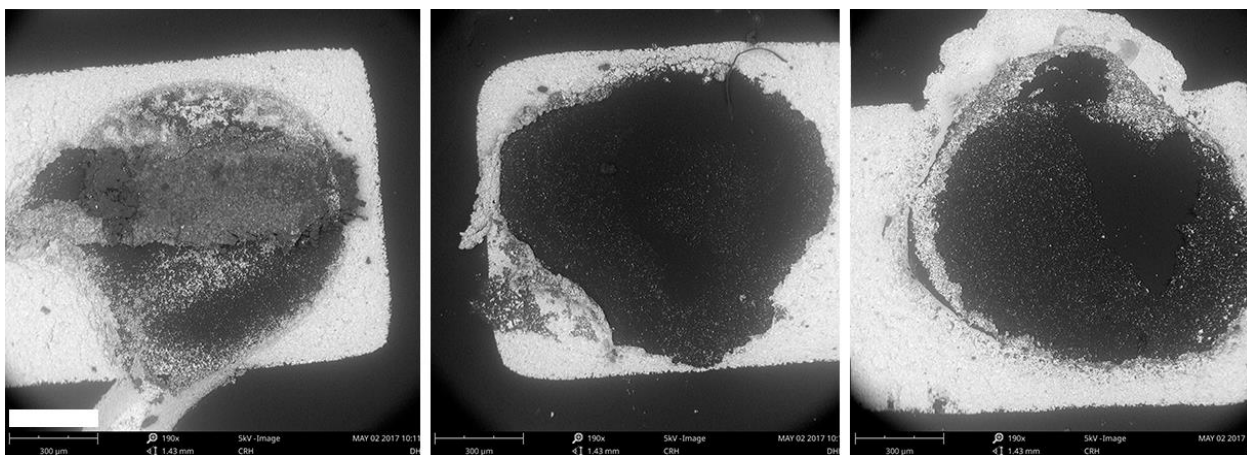
- **Chladné prostředí**



Obrázek 7.2 - ECA spoje po cold testu – v pořadí L1, L2, L3 - bílá značka určuje velikost 300 µm

Mechanismus selhání ECA spoje L1 svědčí o částečné kombinaci odtržení vodivého motivu a především selhání lepidla. Ve spoji L2 jsou zachyceny nehomogenity lepidla. Nerovnoměrnost je znakem nedostatečného vytvrzení. ECA spoj L3 jednoznačně selhal kvůli zvýšené křehkosti způsobené nízkou teplotou lepidla

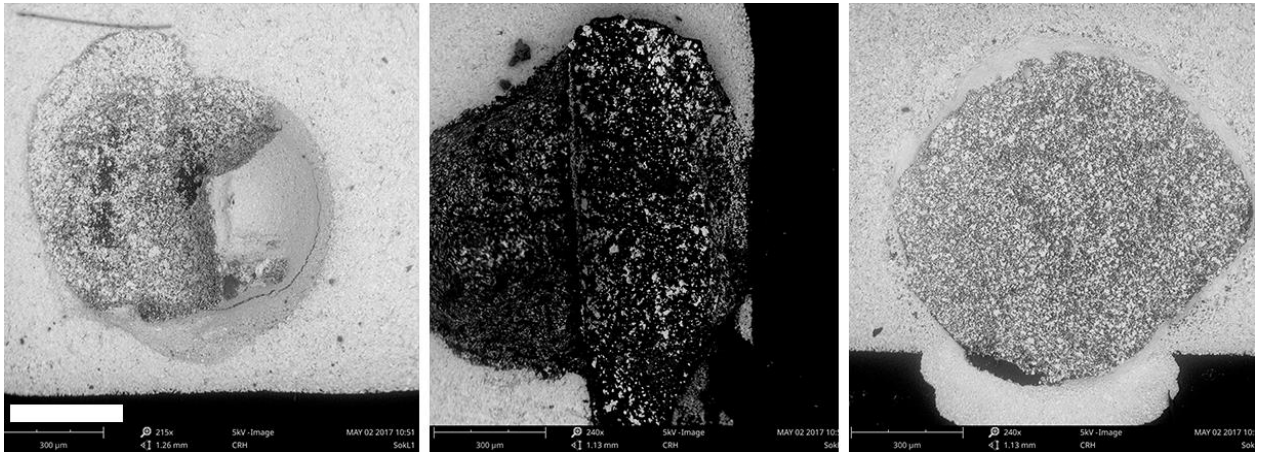
- **Vlhké teplo**



Obrázek 7.3 - ECA spoje po damp heat testu – v pořadí L1, L2, L3 - bílá značka určuje velikost 300 µm

ECA spoj L1 po testu vlhkého tepla zanechal výrazné zbytky metalizace součástky. Povrchová úprava nulového rezistoru má v tomto případě nejnižší odolnost vůči kombinaci vlhkého prostředí a vysoké teploty. Podobný mechanismus je patrný i u spoje L3. Nejnižší odolnost vůči trhacímu trnu u lepidla L2 vykazuje Ag inkoust, který se při odtržení součástky sloupal z téměř celého povrchu ECA spoje.

- **Šokové změny teploty**



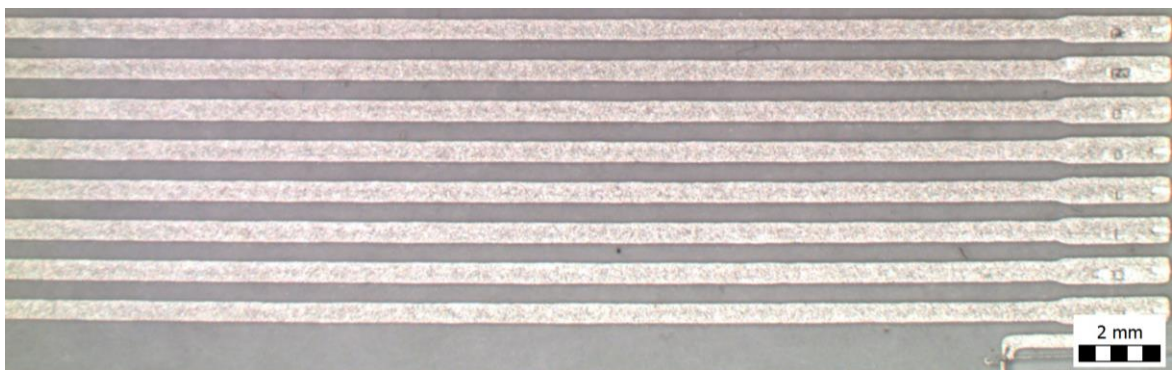
Obrázek 7.4 - ECA spoje po teplotních změnách – v pořadí L1, L2, L3 - bílá značka určuje velikost 300 µm

Kolaps všech ECA spojů vystavených šokovým změnám teploty nastal na straně lepidel. ECA spoj L1 má navíc viditelnou prasklinu, jejíž původcem jsou pravděpodobně šokové teplotní změny. U ECA spoje L2 je viditelné nevyhovující vytvrzení lepidla, o čemž svědčí množství tmavých ploch v oblasti zbytku naneseného lepidla.

8 Zhodnocení experimentu a diskuze výsledků

Přesnost depozice lepidla a umístění SMD rezistorů na flexibilní substrát narážela na limity spojené s lidským faktorem. I přes maximální snahu nanášet součástky na optimální množství lepidla v pokud možno ideálním postavení tak, aby kontaktní plošky SMD rezistorů doléhaly přímo na deponované lepidlo, se toto ne vždy podařilo. Zhoršující se viskózní vlastnosti s dobou nanášení se nejvíce projevíly u lepidla L2 (MG Chemicals 8331S).

Problémy spojené s měřením elektrického odporu představovalo umístění flexibilní destičky s měřenými vzorky do FPC konektoru, který byl propojen s DMM. S každým vyndáním a zandáním proměřované destičky docházelo k odírání natištěného vodivého motivu a tím se zhoršoval elektrický kontakt.



Obrázek 8.1 - Odřené kontaktní plochy po vyjmutí destičky z FPC konektoru

Při klimatických zkouškách bylo nutné k FPC konektorům připájet ploché kabely o průměru 0,9 mm, přičemž rozteč pinů FPC konektoru je 1 mm. Při náročných klimatických testech – zejména test vlhkého tepla – se tento fakt mohl projevit nižší životností pájeného spoje, nežli spoje lepeného, čímž mohlo dojít k předčasnému nárůstu měřeného elektrického odporu.

Problém s připájenými konektory k plochým kabelům by se naplno projevil v testu šokových klimatických změn – během teplotních cyklů probíhá komorou prudká cirkulace vzduchu a dochází také k mechanickým posuvům o několik desítek centimetrů do teplotně odlišných zón. Proto v tomto testu neproběhlo on-line měření. Do budoucna by bylo vhodné

navrhnout spolehlivý způsob propojení zkoušených vzorků v šokové klimatické komoře VT³ 7012 S2 od firmy Vötsch k on-line měření.

Měření elektrického odporu vzorků vyjmutých z klimatické komory proběhlo zhruba 24 hodin po skončení testu. Vzorky byly umístěny ve stabilní pokojové teplotě o standardních parametrech vlhkosti apod. Během této doby mohlo dojít k vyschnutí a celkovému či částečnému zotavení, v jehož důsledku pak velikost změřeného elektrického odporu nedosahovala takových hodnot, jako např. hodnoty po testech vlhkého tepla.

Pro budoucí měření by bylo příhodné proměřit všechny testované vzorky i po určité době od skončení klimatických testů a následně porovnat naměřené hodnoty. Tímto způsobem by se daly pozorovat regenerační procesy ECA spojů.

Přesnost měření mechanického odtržení součástek byla ovlivněna dvěma faktory: flexibilní substrát bylo nutné připevnit k rigidnímu substrátu pomocí oboustranné lepicí pásky a měřenou destičku bylo nutné ručně přidržovat v kolmé poloze. První faktor ovlivňuje velikost maximální síly nutné k odtržení součástky vlivem zanedbatelného, byť nenulového pro pružení lepicí pásky. Nicméně všechny testované substráty měly v tomto ohledu stejnou výchozí pozici a „chyba“ tohoto měření byla zanesena rovnoměrně ke každému substrátu. Ručním přidržováním substrátů a udržováním kolmé polohy však nelze zajistit stoprocentně rovné podmínky všem testovaným substrátům.

Na základě mechanického odtržení součástek byla sestavena faktorová analýza a následné vyhodnocení jednotlivých ECA spojů. Pro elektrická měření se vytvoření faktorové analýzy nehodilo z důvodu příliš rozsáhlých a příliš variabilních souborů dat, které se vázaly k jednotlivým měřením a testům.

Závěr

Diplomová práce *Testování vodivě lepených spojů pro flexibilní elektroniku* se v teoretické části zabývá obecnou charakteristikou flexibilní elektroniky, elektricky vodivých lepidel a popisu základních vlastností těchto speciálních lepidel včetně jejich dělení. Třetí kapitola shrnuje nejdůležitější světové výrobce elektricky vodivých lepidel současnosti.

Čtvrtá kapitola se zabývá charakterizací vodivě lepených spojů s důrazem na spolehlivostní vlastnosti, mechanismy poškození elektricky vodivých spojů i na strukturální zákonitosti vedoucí k definování elektricky vodivých spojů.

Experimentální část práce popisuje realizaci elektricky vodivých lepených spojů, jejich testování na základě dostupných norem a zpracování výsledků s ohledem na hodnocení kvality – z pohledu elektrického i mechanického.

K souhrnnému hodnocení kvality elektricky vodivých lepených spojů po mechanických testech (pevnost přilepené součástky ve smyku) posloužila faktorová analýza. Z jejích výsledků plyne, že vliv suchého tepla (85 °C) má pozitivní vliv na pevnost přilepené součástky, protože velikost síly nutné k utržení součástky od substrátu byla u všech tří lepidel jednoznačně nejvyšší.

Naopak nejhorší výsledky mechanických testů jsou dle očekávání u vzorků vystavených chladnému prostředí a vlhkému teplu. Nízká teplota značně zvýšila křehkost nanesených lepidel a tím celý spoj degradoval. Vlhké teplo mělo i dle optického zkoumání mikroskopem komplikovanější mechanismus degradace. Vlhké teplo narušilo strukturu povrchových úprav SMD rezistorů, proto jsou na snímcích patrné zbytky metalizace součástky.

Jednoznačné určení kvalitních či nekvalitních elektricky vodivých lepených spojů napříč testy a typy lepidel z pohledu elektrického je složité z toho důvodu, že v každém z klimatických testů došlo ke znehodnocení alespoň jednoho typu lepeného spoje (typ lepeného spoje je myšlen ve smyslu použitého lepidla). V případě testu vlhkého tepla jsou vyhodnoceny pouze hodnoty naměřené do času 4 620 minut (77 hodin) z celkové délky

testování 500 hodin, přičemž testy suché a chladné teploty jsou téměř u všech vzorků vyhodnoceny z plné doby testování 500 hodin. Testování šokových změn neproběhlo v režimu on-line - pouze před testem a po testu - proto ani vzájemné srovnání výsledků s tímto měřením by nemohlo mít vysokou vypovídající hodnotu.

Závěrečné doporučení použití lepidel je nutné brát s ohledem na výše zmíněná fakta. Použití lepidla L1 Heraeus PC 3201 je limitováno vysokými teplotami. ECA spoje vytvořené tímto lepidlem snášejí špatně i šokové teplotní změny – naopak jejich použití se jeví jako vhodné do nízkých teplot, kdy hodnoty elektrického odporu dosahovaly nejlepších výsledků. Z mechanického hlediska však lepidlo L1 dosahovalo nejhorších hodnot pevnosti ve smyku při odtržení součástek.

Lepidlo L2 MG Chemicals 8331S dosahovalo po vytvrzení nejlepších naměřených hodnot elektrického odporu. I přes výrazně patrné zhoršující se vlastnosti lepidla při depozici, je toto lepidlo dle naměřených hodnot nejméně náchylné na nepřesnou ruční depozici, o čemž svědčí i fakt, že žádná z destiček nebyla po vytvrzení a kontrolním měření vyřazena. Zcela nevyhovující výsledky byly zaznamenány v testu suchého tepla, kdy došlo po zhruba 78 hodinách z celkových 500 k degradačním procesům a prudkému nárůstu elektrického odporu. Lepidlo MG Chemicals 8331S je zcela nevyhovující pro dlouhodobé použití ve vysokých teplotách – dle data listů je vhodné jako náhrada pájky a to zejména v aplikacích s vysokou teplotní citlivostí okolních komponent. Naměřené hodnoty elektrického odporu v chladném prostředí jsou uspokojivé. Z mechanického pohledu je lepidlo srovnatelné s lepidlem L1.

Lepidlo L3 Panacol Elecolit[®] 3661 obstálo nejlépe v testu suchého tepla, kdy hodnoty naměřeného odporu jsou srovnatelné s hodnotami před testováním. Naměřené hodnoty elektrického odporu v nízkoteplotním testování sice prokázaly nejvyšší elektrický odpor z testovaných vzorků, nicméně časová závislost neprokázala významný růst hodnot s časem a navíc rozptyl odporu byl velmi nízký. Vysoká hodnota elektrického odporu v nízkých teplotách mohla být způsobena méně kvalitní realizací vzorků (zdůvodněno v kapitole 6.2.2). Z těchto důvodů lze lepidlo s jistotou doporučit k použití v dlouhodobě vysokých teplotách. Pro nízké teploty by bylo vhodné experiment zopakovat. Pevnost přilepených součástek lepidlem L3 výrazně převyšovala lepidla L1 a L2.

Souhrnně platí, že vliv vlhkého tepla je absolutně rizikový pro všechna testovaná lepidla.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MACH, Pavel. Modifikovaná elektricky vodivá lepidla. Electroscope [online]. 2009, 2009(2), 1-4 [cit. 2016-11-19]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/528>
- [2] Flexible & Printed Electronics. SEMI.ORG [online]. Berlín: Yole Développement SARL, 2013 [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://bit.ly/2f8tyqI>
- [3] WONG, William S. a Alberto. SALLEO. Flexible electronics: materials and applications [online]. New York: Springer, c2009 [cit. 2016-11-19]. ISBN 978-038-7743-639. Dostupné z: <http://bit.ly/2pLctcE>
- [4] Energy Harvesting. NETME Centre: Centrum nových technologií pro strojírenství, součástí FSI VUT v Brně [online]. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT v Brně, 2017 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://netme.cz/cs/energy-harvesting/>
- [5] Workshop Flexible Electronics IITC / MAM conference. International Interconnect Technology Conference [online]. Culpeper (Virginia): Yole Développement, 2015 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://bit.ly/2rf8HZe>
- [6] Printed Electronics. Butler Technologies, Inc. [online]. Butler (Pennsylvania): Butler Technologies, 2016 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://www.butlertechnologies.com/printed-electronics/>
- [7] Tištěná a flexibilní elektronika a její možné aplikace. OTK GROUP - Obchodní tiskárny, a.s. [online]. Praha: Radek Soukup, 2015 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: http://www.otk.cz/download.php?group=stranky3_soubory&id=103
- [8] A New Switching Device for Printed Electronics: Inkjet-Printed Microelectromechanical Relay. Nano Letters (ACS Publications) [online]. Washington: American Chemical Society, ©2013 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/ipdf/10.1021/nl4028632>
- [9] Flexible & Printed Electronics. SEMI.ORG [online]. Berlín: Yole Développement SARL, 2013 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://bit.ly/2frgWMw>

- [10] Ultra-Flexible Printed Circuits (UFPC). Share and Discover Knowledge on LinkedIn SlideShare [online]. Lorca (Spain): Vivainnova, 2015 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/davidvaluex/ultraflexible-printed-circuits-ufpc>
- [11] Flexible Electronics Market worth \$13.23 Billion by 2020. Market Research Reports [online]. Dallas: MarketsandMarkets, 2014 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/flexible-electronics.asp>
- [12] Flexible Display Driver Chips. BURGHARTZ, Joachim. Ultra-thin chip technology and applications [online]. New York: Springer, 2011, s. 414 [cit. 2016-11-19]. ISBN 1441972765. Dostupné z: <http://bit.ly/2g552rx>
- [13] HARRIS, K. D., A. L. ELIAS a H.-J. CHUNG. Flexible electronics under strain: a review of mechanical characterization and durability enhancement strategies. Journal of Materials Science [online]. 2016, 51(6), 2771-2805 [cit. 2016-11-19]. DOI: 10.1007/s10853-015-9643-3. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-015-9643-3>
- [14] BY KATSUAKI SUGANUMA. Introduction to Printed Electronics [online]. 1. Imprint: Springer, 2014 [cit. 2016-11-19]. ISBN 978-146-1496-250. Dostupné z: <http://www.springer.com/us/book/9781461496243>
- [15] Understanding and Measuring Electrical Resistivity in Conductive Inks and Adhesives. In: Applied Ink Solutions: A Division of Microchem [online]. Hudson (New Hampshire): Applied Ink Solutions, 2000 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.appliedinksolutions.com/pdf/sgia.pdf>
- [16] Novel conductive adhesives for electronic packaging applications: a way towards economical, highly conductive, low temperature and flexible interconnects [online]. Georgia Institute of Technology, 2011 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/39548>. Disertace. Georgia Institute of Technology. Vedoucí práce C. P. Wong.
- [17] MACH, Pavel a Radoslav RADEV. Electrically Conductive Adhesives With Micro-Nano Filer. Nanocon [online]. Brno: Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, 2011, s. 6 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/nanocon_11/lists/papers/1272.pdf

- [18] LICARI W., James J. a Dale SWANSON. Adhesives Technology for Electronic Applications Materials, Processing, Reliability [online]. 2nd ed. Burlington: Elsevier Science, 2011 [cit. 2016-11-20]. ISBN 978-143-7778-908. Dostupné z: <http://bit.ly/2fIfYy9>
- [19] WONG, C. P., Kyoung-Sik. MOON a Yi. LI. Nano-bio-electronic, photonic and MEMS packaging [online]. 2. New York: Springer, c2010 [cit. 2016-11-19]. ISBN 14-419-0039-X. Dostupné z: http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4419-0040-1_2
- [20] FRISK, Laura. Study of Structure and Failure Mechanisms in ACA Interconnections Using SEM. Scanning Electron Microscopy [online]. InTech, 2012, 2012(25) [cit. 2016-11-20]. DOI: 10.5772/36965. ISBN 978-953-51-0092-8. Dostupné z: <http://bit.ly/2qglPzZ>
- [21] SANCAKTAR, Erol a Lan BAI. Electrically Conductive Epoxy Adhesives. Polymers [online]. 2011, 3(4), 427-466 [cit. 2016-11-20]. DOI: 10.3390/polym3010427. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2073-4360/3/1/427/>
- [22] YIM, Myung Jin, Yi LI, Kyoung-sik MOON, Kyung Wook PAIK a C. P. WONG. Review of Recent Advances in Electrically Conductive Adhesive Materials and Technologies in Electronic Packaging. Journal of Adhesion Science and Technology [online]. 2008, 22(14), 1593-1630 [cit. 2016-11-20]. DOI: 10.1163/156856108X320519. ISSN 0169-4243. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1163/156856108X320519>
- [23] TAO, Bo, Han DING, Zhouping YIN a Youlun XIONG. ACF Curing Process Optimization for Chip-on-Glass (COG) Considering Mechanical and Electrical Properties of Joints. New Developments in Liquid Crystals [online]. InTech, 2009, 2009(10), 190 [cit. 2016-11-20]. DOI: 10.5772/9688. ISBN 978-953-307-015-5. Dostupné z: <http://bit.ly/2rfXKaL>
- [24] Growth Opportunities for Adhesives in the Global Electronics Industry 2016-2021: Trends, Forecast, and Opportunity Analysis, August 2016. ReportBuyer: Market research reports from top publishers [online]. Dallas: Lucintel, 2016 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://bit.ly/2ntkfGc>

- [25] Electrically Conductive Adhesives 2016-2026. IDTechEx: Market Research, Scouting and Events on Emerging Technologies [online]. Boston: IDTechEx, 2016 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://bit.ly/2nvtntT>
- [26] Electronics - Henkel [online]. Westerlo (Belgie): Henkel AG & Co., ©2017 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.henkel-adhesives.com/>
- [27] Heraeus Group [online]. Hanau, Germany: Heraeus Holding, ©2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://www.heraeus.com/>
- [28] Panacol - Industrial adhesives and medical grade adhesives [online]. Steinbach/Taunus (Německo): Panacol-Elosol, ©2009-2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://www.panacol.com>
- [29] Epoxy Technology Inc.: EPO-TEK® Specialty Adhesives [online]. Massachusetts: Epoxy Technology, 2015 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.epotek.com/>
- [30] Creative Materials Conductive Adhesives, Coatings, and Inks [online]. Massachusetts: Creative Materials, 2017 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.creativematerials.com/>
- [31] EMS Adhesives [online]. Ohio: EMS Adhesives, ©2017 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://emsadhesives.com/>
- [32] MasterBond.com | Adhesives, Sealants & Coatings [online]. USA: Master Bond, 2017 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.masterbond.com/>
- [33] Polytec: Polytec Worldwide [online]. Waldbronn: Polytec, ©2017 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.polytec.com/>
- [34] FERRO [online]. Ohio: Ferro Electronic Materials, ©2016 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.ferro.com/>
- [35] Chomerics, Division of Parker Hannifin Corporation [online]. Parker Chomerics, ©2014 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://www.chomerics.com/>
- [36] Protavic America | Electronic Assembly Materials [online]. New Hampshire (USA): Protavic America, ©2017 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.protavicamerica.com/>
- [37] Industrial adhesives for all applications | DELO [online]. Mnichov: DELO Industrial Adhesives, 2017 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://www.delo-adhesives.com/>

- [38] NICOLICS, Johann a Martin MÜNDLEIN. Electrically Conductive Adhesives. Micro- and Opto-Electronic Materials and Structures: Physics, Mechanics, Design, Reliability, Packaging [online]. Boston (MA): Springer US, 2007, , B571 [cit. 2017-04-13]. DOI: 10.1007/0-387-32989-7_41. ISBN 978-0-387-27974-9. Dostupné z: https://publik.tuwien.ac.at/files/pub-et_12396.pdf
- [39] Contact Resistance of Anisotropic Concutive Adhesive Film Based FLip-Chip On Glass Packages. Reviews on Advanced Materials Science [online]. 2011, 2011(27), 151-157 [cit. 2017-04-18]. ISSN 1605-8127. Dostupné z: http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_22711/uddin.pdf
- [40] HIRATA, Takuya a Hirokazu TANAKA. Humidity Resistance Evaluation of Adhesive Interface, Between Conductive Adhesive and Plating. In: Test Navi: Provide reliability testing information dedicated to engineers [online]. Tokyo: ESPEC CORP. Technology Development Div., 2008 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://bit.ly/2pM4qeY>
- [41] MACH, P., R. RADEV a A. PIETRIKOVA. Electrically conductive adhesive filled with mixture of silver nano and microparticles. 2008 2nd Electronics Systemintegration Technology Conference [online]. IEEE, 2008, , 1141-1146 [cit. 2017-04-13]. DOI: 10.1109/ESTC.2008.4684513. ISBN 978-1-4244-2813-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4684513/>
- [42] GUMFEKAR, Sarang. Characterization of Silver-Polyaniline Epoxy Conductive Adhesives. Waterloo (Kanada), 2012. Master of Applied Science. University of Waterloo. Vedoucí práce Boxin Zhao.
- [43] JAIN, Shiwani. Isotropically conductive adhesive filled with silver metalised polymer spheres [online]. Loughborough University, 2016 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/20297>. Disertace. Loughborough University. Vedoucí práce David C. Whalley.
- [44] EDITED BY R. GOMATAM AND K.L. MITTAL. Electrically Conductive Adhesives [online]. Hoboken: CRC Press, 2008 [cit. 2017-04-13]. ISBN 90-041-8782-0. 9789004187825. Dostupné z: <http://bit.ly/2pa6lxx>
- [45] UDDIN, M.A., M.O. ALAM, Y.C. CHAN a H.P. CHAN. Adhesion strength and contact resistance of flip chip on flex packages—effect of curing degree of anisotropic conductive film. Microelectronics Reliability [online]. 2004, 44(3), 505-514 [cit.

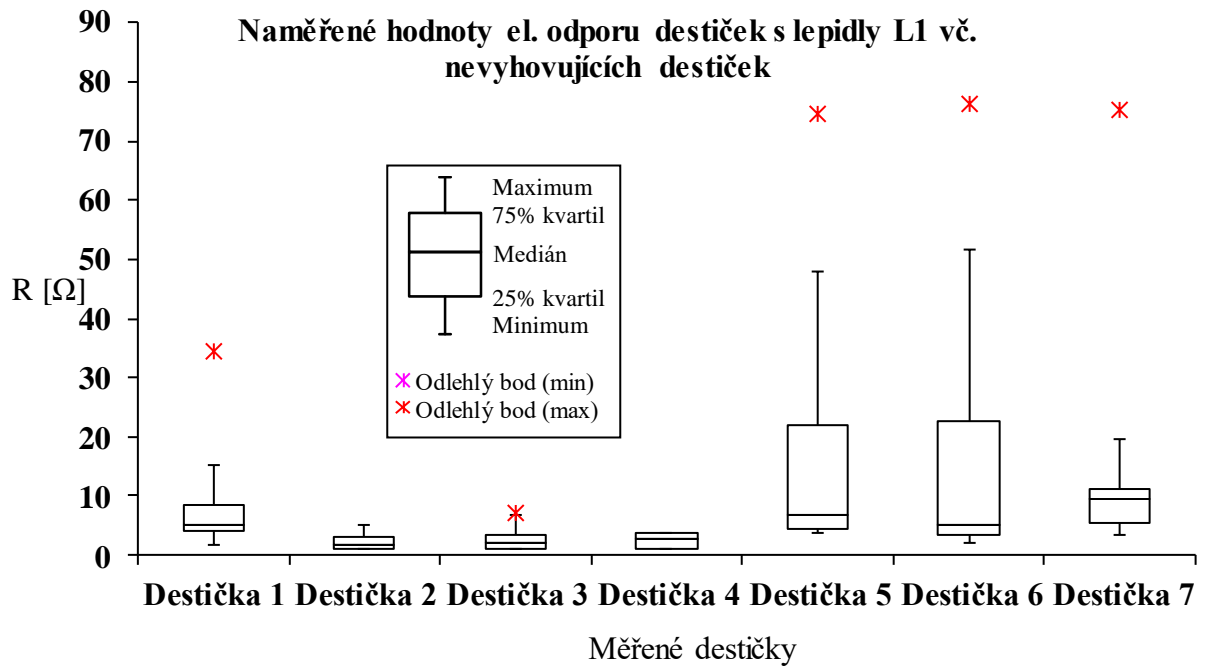
- 2017-04-13]. DOI: 10.1016/S0026-2714(03)00185-9. ISSN 00262714. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026271403001859>
- [46] Beketovova řada kovů. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Beketovova_%C5%99ada_kov%C5%AF
- [47] MACH, Pavel, Martin PLÁČEK, Jiří KOLÁŘ a David BUŠEK. Diagnostics of Electrical Properties of Electrically Conductive Adhesives. In: Diagnostika '13: Conference on Diagnostics in Electrical Engineering CDEE 2013 [online]. Plzeň: The Department of Technologies and Measurement, Section of Electrotechnology of the Faculty of Electrical Engineering, University of West Bohemia in Pilsen, 2013, s. 14-17 [cit. 2017-04-18]. ISBN 978-80-261-0210-6. ISSN 2464-7071. Dostupné z: <https://www.diagnostika.zcu.cz/proceedings13.pdf>
- [48] Fyzikální praktikum II. Fyzikální praktikum II: Elektřina a magnetismus [online]. 2. vyd., přeprac. Praha: Státní pedagogické nakladatelství Praha, 1989, s. 25-26 [cit. 2017-04-18]. Systém celoživotního vzdělávání Moravskoslezska. ISBN 80-7066-058-9. Dostupné z: <http://bit.ly/2oIrXyx>
- [49] ZHIGAL'SKII, G. P. a Brian K. JONES. Physical properties of thin metal films [online]. London: Taylor, 2003 [cit. 2017-04-18]. ISBN 04-152-8390-6. Dostupné z: <http://bit.ly/2qgoqdg>
- [50] MACH, Pavel a Aleš DURAJ. Adhesive joining or lead-free soldering? In: Informacije MIDEM [online]. Bled (Slovenia): Strokovno društvo za mikroelektroniko, elektronske sestavne dele in materiale, 2005, s. 228-235 [cit. 2017-04-19]. ISSN 0352-9045. Dostupné z: <http://www.dlib.si/?URN=URN:NBN:SI:DOC-B3ABUWCZ>
- [51] MACH, Pavel, Vaclav PAPEZ, David BUSEK a Ales DURAJ. Equipment for measurement of nonlinearity of nominally linear components. In: 2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology [online]. St. Marienthal: IEEE, 2006, s. 237-240 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/ISSE.2006.365394. ISBN 1-4244-0550-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4216034/>
- [52] ISO 16525-7. Adhesives — Test methods for isotropic electrically conductive adhesives: Part 7: Environmental test methods. Switzerland: ISO, 2014.

- [53] SU, Bin a Jianmin QU. Fatigue Behavior of Electrically Conductive Adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology* [online]. 2008, 22(8-9), 927-946 [cit. 2017-04-24]. DOI: 10.1163/156856108X305516. ISSN 0169-4243. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1163/156856108X305516>
- [54] MELINEX® 506. HiFi [online]. Hertfordshire (UK): HiFi Industrial Film, 2017 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.hififilm.com/product/melinex-506/>
- [55] Melinex® 506. ADDEV Materials - Insulation & Films [online]. Saint-Chamond (France): ADDEV Materials, 2017 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: http://www.micel.fr/IMG/pdf/Melinex-506_FT_micel-4.pdf
- [56] AG-530 Flexible Silver Conductive Ink. Applied Ink solutions: A Division of Microchem [online]. New Hampshire (USA): Applied Ink Solutions, 2017 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.appliedinksolutions.com/pdf/ag530-silver-ink.pdf>
- [57] Silver Conductive Epoxy Adhesive Slow Cure / Extreme Conductivity: 8331S Technical Data Sheet. MG Chemicals [online]. Ontario (Canada): MG Chemicals, ©2017 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.mgchemicals.com/downloads/tds/tds-8331s-2parts.pdf>
- [58] Návod na uvedení dávkovačů do provozu. TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky [online]. Ostrava: TME Czech Republic, 2017 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://bit.ly/2rg4PIp>
- [59] Thick Film Chip Resistors. Farnell element14 Česká republika - Distributor elektronických součástek [online]. Leeds (UK): Premier Farnell Limited, ©2017 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://bit.ly/2pzoA0f>
- [60] JB1113N Dispense Controller: Operating Manual. TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky [online]. Ostrava: TME Czech Republic, 2017 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://bit.ly/2qhqdPb>
- [61] Keithley 2700 Multimeter, Data Acquisition System with 2 Slots. In: Cole-Parmer: Fluid Handling and Analysis Supplies from Cole-Parmer Germany [online]. United States: Cole-Parmer Instrument Company, LLC., ©2017 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://bit.ly/2qhrNjO>

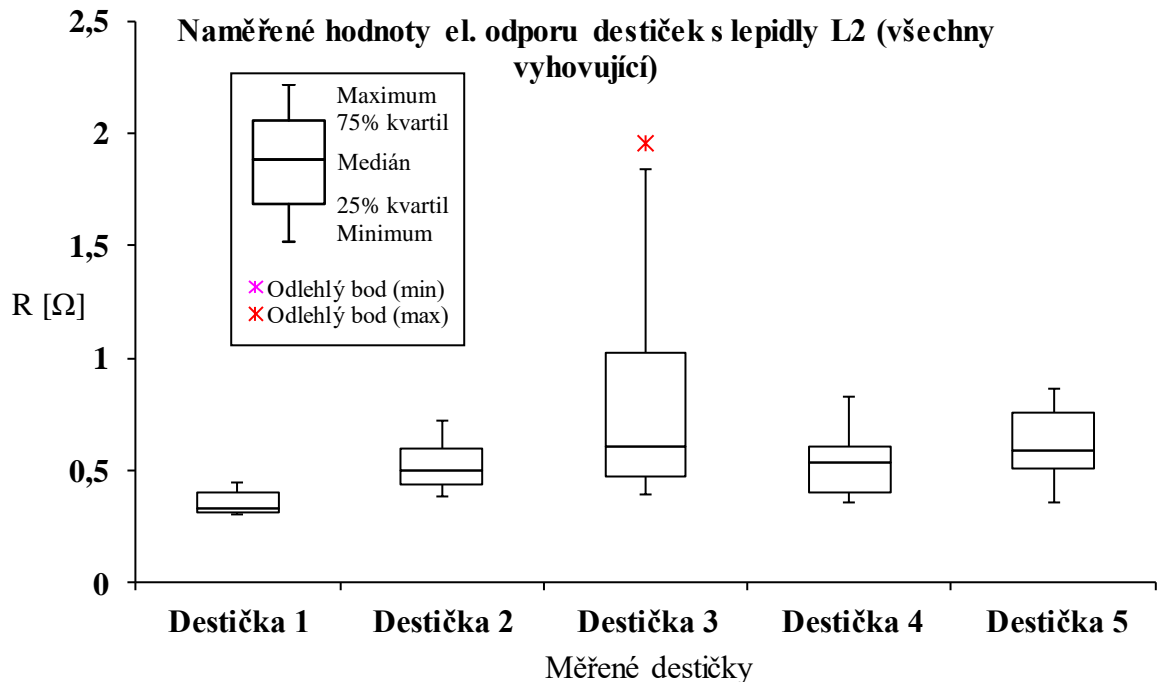
- [62] Adhesives Technology for Electronic Applications Materials, Processing, Reliability [online]. 2nd ed. Burlington: Elsevier Science, 2011, s. 25-29 [cit. 2017-05-06]. ISBN 9781437778908. Dostupné z: <http://bit.ly/2pNGESZ>
- [63] HIRMAN, Martin a Frantisek STEINER. Shear Strength of Conductive Adhesive Joints on Rigid and Flexible Substrates Depending on Adhesive Quantity. Journal of Electrical Engineering [online]. 2016-01-1, 67(3), - [cit. 2017-05-08]. DOI: 10.1515/jee-2016-0025. ISSN 1339-309x. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/jee.2016.67.issue-3/jee-2016-0025/jee-2016-0025.xml>

Přílohy

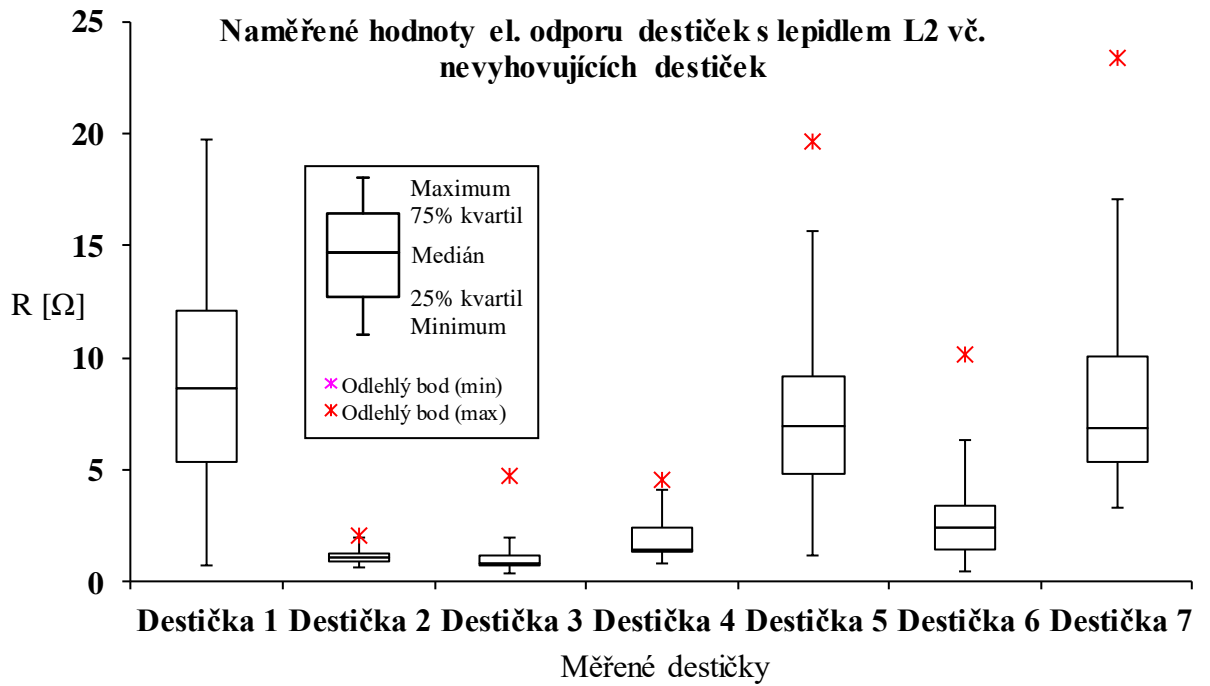
Příloha A: Naměřené hodnoty ECA spojů z kontrolního ověření funkčnosti



Obrázek A.1 - Souhrnné naměřené hodnoty el. odporů ECA spojů jednotlivých proměřovaných destiček s lepidlem L1 včetně vyřazených destiček



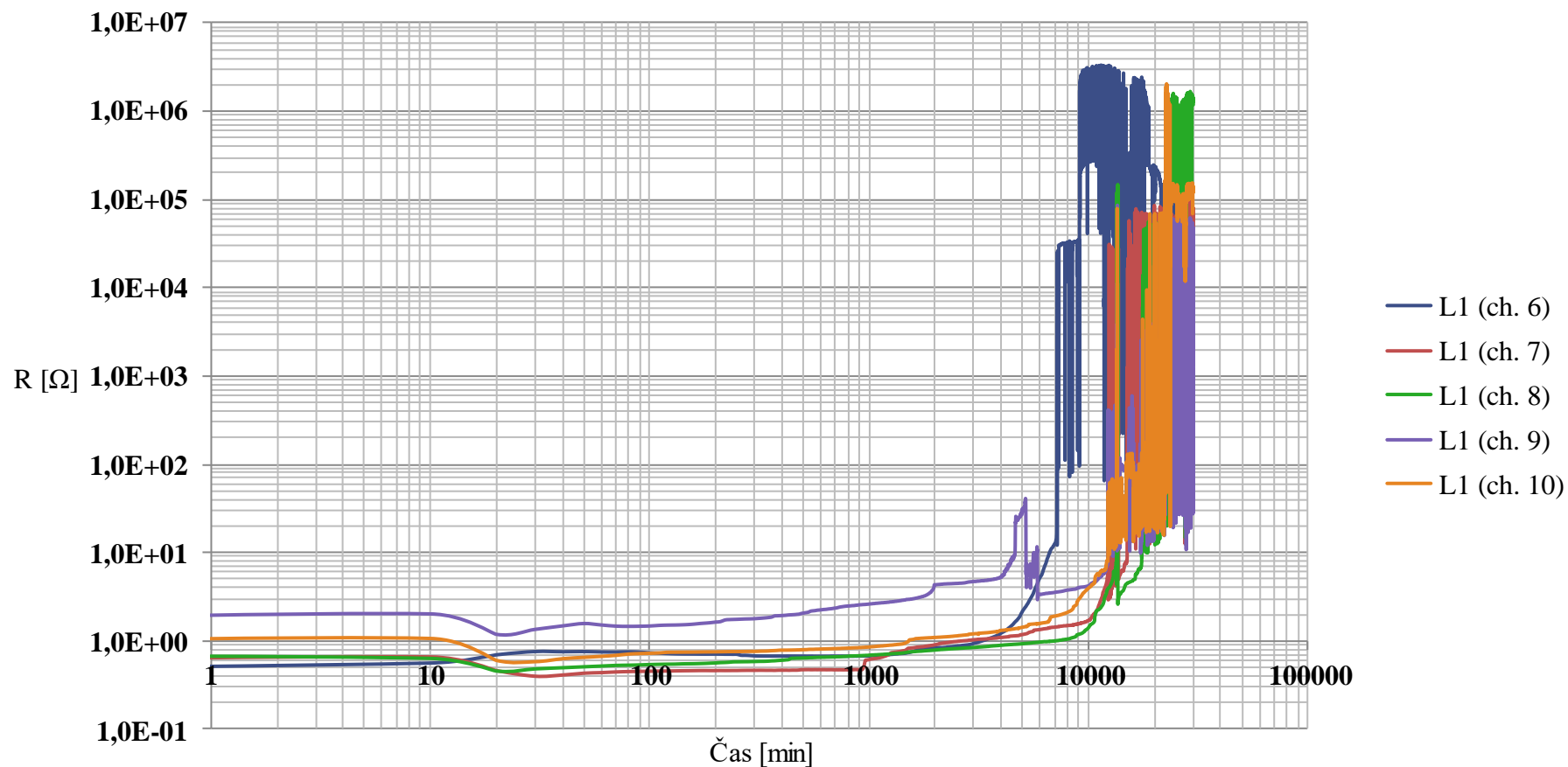
Obrázek A.2 Souhrnné naměřené hodnoty el. odporů ECA spojů jednotlivých proměřovaných destiček s lepidlem L2



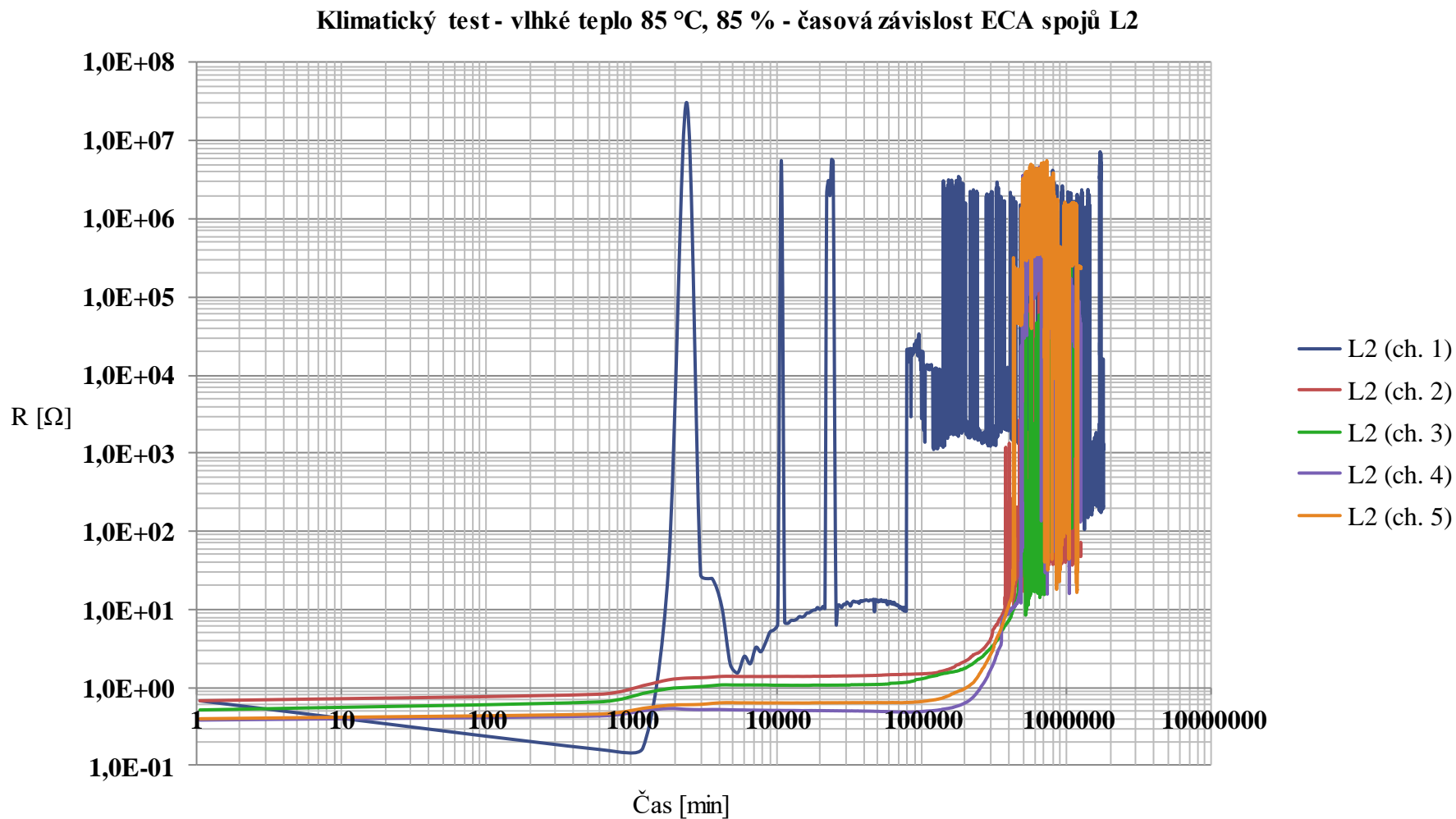
Obrázek A.3 - Souhrnné naměřené hodnoty el. odporů ECA spojů jednotlivých proměřovaných destiček s lepidlem L3 včetně vyřazených destiček

Příloha B: Časová závislost elektrického odporu ECA spojů při klimatickém testování vlhkého tepla

Klimatický test - vlhké teplo 85 °C, 85 % - časová závislost ECA spojů L1

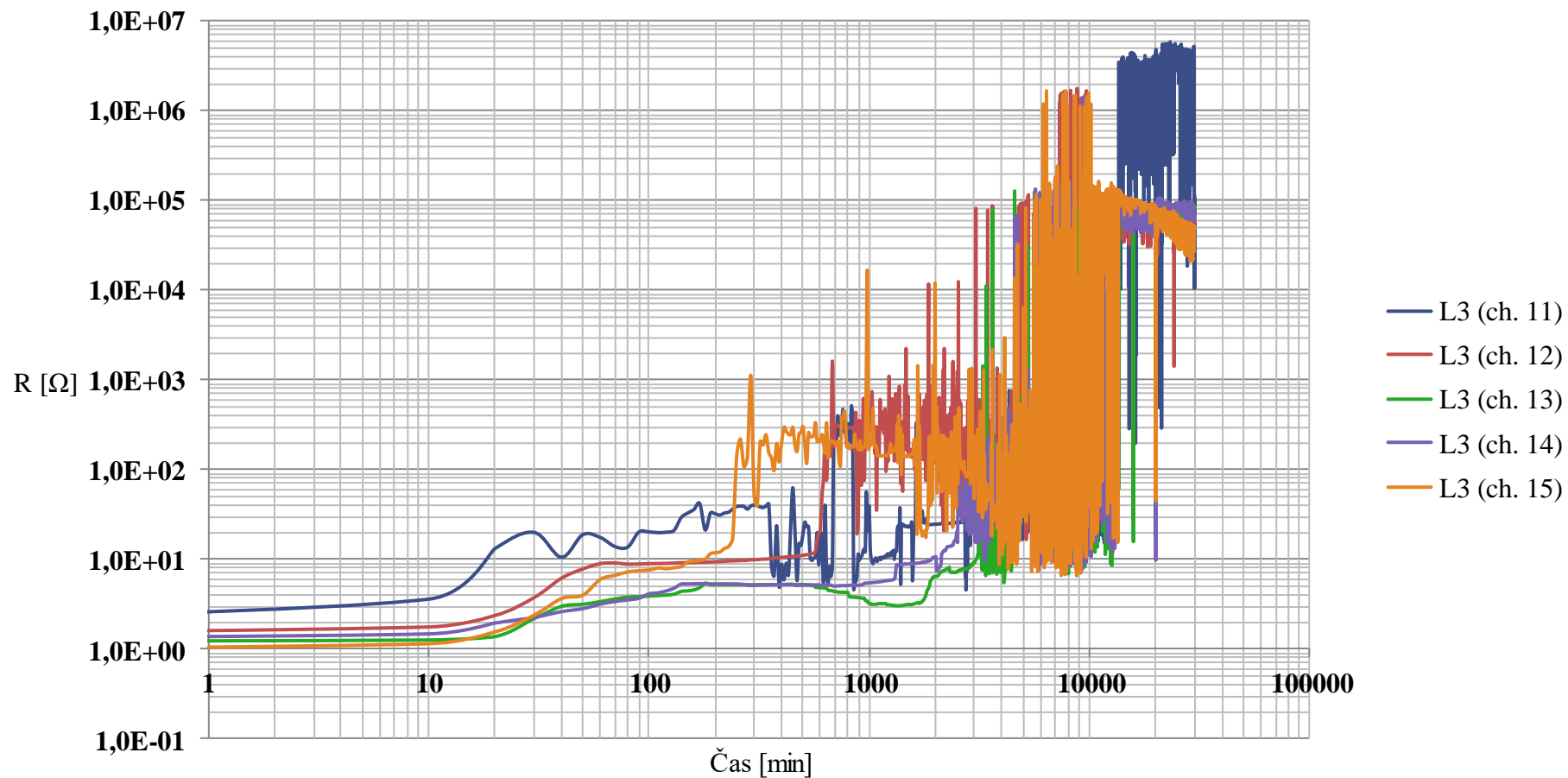


Obrázek B.1 – Časová závislost elektrického odporu ECA spojů L1 při klimatickém testování vlhkého tepla



Obrázek B.2 - Časová závislost elektrického odporu ECA spojů L2 při klimatickém testování vlhkého tepla

Klimatický test - vlhké teplo 85 °C, 85 % - časová závislost ECA spojů L3



Obrázek B.3 - Časová závislost elektrického odporu ECA spojů L3 při klimatickém testování vlhkého tepla