

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv klimatického stárnutí na vlastnosti vodivých spojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek ŘÍHA**
Osobní číslo: **E19N0050P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Vliv klimatického stárnutí na vlastnosti vodivých spojů**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši klimatických testů využívaných pro vybrané vodivé spoje.
2. Navrhněte vzorky pro klimatické testování zvolených vodivých spojů.
3. Navrhněte experiment pro zjištění klimatických vlivů na vybrané vlastnosti zvolených spojů.
4. Proveďte a vyhodnoťte navržený experiment.

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

Seznam doporučené literatury:

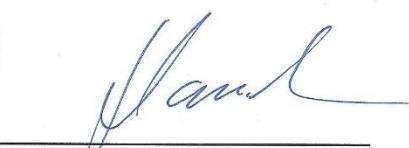
1. Anglicky psané vědecké publikace (z konferencí, impaktovaných časopisů, ...)
2. K.L. Mittal, A. Tanweer – Adhesion in Microelectronics
3. R. J. Klein Wassink; Soldering in electronics
4. S. Ebnesajjad, A.H. Landrock – Adhesives Technology Handbook
5. Internetové zdroje

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Hirman, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

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


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




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

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Tato práce se věnuje problematice klimatického testování a vlivu stárnutí na vlastnosti vodivých spojů. V první části práce je tato problematika popsána v teoretické rovině. Jsou zde zmíněny obecné informace o klimatickém testování, dále jsou zde popsány jednotlivé klimatické a teplotní testy dle normy ČSN EN 60068-2. Jsou zde také uvedeny informace o klimatických komorách a v neposlední řadě také metody kontaktování součástek se substráty.

Ve druhé části této práce je navržen experiment, který se týká této problematiky. Jedná se o experiment zaměřený na oblasti týkající se způsobů kontaktování SMD čipových rezistorů na vodivé textilní stuhly, vytvrzování elektricky vodivých lepidel, nevodivého lepení, pájení a měření elektrického odporu. Zároveň je zde navržen klimatický test pro zjištění klimatických vlivů na vlastnosti vodivých spojů. Dále je zde popsána výroba vzorků pro experiment a zhodnocení výsledků experimentu.

Klíčová slova

Klimatické zkoušky, klimatické komory, stárnutí škodlivými plyny (H_2S , SO_2), ruční pájení, vodivé lepení, nevodivé lepení, elektricky vodivé textilní stuhly, měření elektrického odporu

Abstract

This work deals with the issue of climate testing and the effect of aging on the properties of conductive connections. In the first part of the thesis, this issue is described on a theoretical level. General information on climatic testing is mentioned here, as well as individual climatic and temperature tests according to the ČSN EN 60068-2 standard. There is also information about climatic chambers and, last but not least, methods of contacting components with substrates.

In the second part of this work, an experiment that relates to this issue is proposed. It is an experiment focused on areas related to methods of contacting SMD chip resistors on conductive textile ribbons, curing of electrically conductive adhesives, non-conductive gluing, soldering and electrical resistance measurement. A climatic test is proposed to determine the climatic influences on the properties of conductive connections as well. Furthermore, the production of samples for the experiment and the evaluation of the results of the experiment are described here.

Key words

Climatic tests, climatic chambers, aging by harmful gasses (H₂S, SO₂), hand soldering, conductive gluing, non-conductive gluing, electrically conductive textile ribbons, electrical resistance measurement

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.

.....Marek Říha.....

podpis

V Plzni dne 21.5.2021

Bc. Marek Říha

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Martinu Hirmanovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2021-003 „Materiály, technologie a diagnostika v elektrotechnice“.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 KLIMATICKÉ TESTOVÁNÍ	12
1.1 POPIS JEDNOTLIVÝCH KLIMATICKÝCH A TEPLOTNÍCH TESTŮ.....	13
1.1.1 Zkouška chladem (ČSN EN 60068-2-1)	13
1.1.2 Zkouška suchým teplem (ČSN EN 60068-2-2)	15
1.1.3 Zkouška změnou teploty (ČSN EN 60068-2-14).....	17
1.1.4 Zkouška vlhkým teplem cyklickým (ČSN EN 60068-2-30)	21
1.1.5 Složená zkouška cyklická teplotou a vlhkostí (ČSN EN 60068-2-38).....	24
1.1.6 Korozní zkouška proudící směsí plynů (ČSN EN 60068-2-60).....	25
1.1.7 Zkouška vlhkým teplem konstantním (ČSN EN 60068-2-78).....	27
1.2 KLIMATICKÉ KOMORY	28
1.3 METODY KONTAKTOVÁNÍ	31
1.3.1 Měkké pájení	32
1.3.2 Vodivé lepení.....	35
1.3.3 Nevodivé lepení	40
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	42
2.1 PŘÍPRAVA VODIVÉ STUHY	42
2.2 KONTAKTOVÁNÍ SOUČÁSTEK	44
2.3 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU	48
2.4 NAVRŽENÝ KLIMATICKÝ TEST.....	49
2.5 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU	50
2.5.1 Výsledky horkovzdušného pájení (Sn/Bi).....	51
2.5.2 Výsledky lepidla 8331S.....	52
2.5.3 Výsledky lepidla Loctite AA 3926.....	53
2.5.4 Výsledky lepidla DuPont ME902.....	54
2.6 DISKUSE VÝSLEDKŮ	55
ZÁVĚR	57
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	59
PŘÍLOHY	1

Úvod

Elektronická zařízení by v dnešní době měla mít stále delší a delší životnost. Uvádí se, že by měla být funkční po dobu 20 let, což nelze přesně predikovat. Elektronická zařízení ztrácejí během svého života spolehlivost a životnost právě kvůli nejrůznějším klimatickým vlivům, které na ně během svého života působí. Z tohoto důvodu jsou podrobeny nejrůznějším klimatickým testům dle normy ČSN EN 60068-2. Tyto testy jsou v praxi důležitým ukazatelem z hlediska odolnosti produktů různého druhu proti působení klimatických vlivů okolí. Na druhou stranu menší komponenty, například rezistory, jsou schopny odolávat nejrůznějším klimatickým vlivům až do selhání pájených či lepených spojů, a tím tak mohou prokazovat delší životnost. Testování životnosti je zcela klíčové pro stanovení poruchovosti a prognózy spolehlivosti zařízení. Velmi často je však časově náročné.

Elektrické propojení součástky se substrátem může být docíleno nejrůznějšími metodami. Elektricky vodivý lepený spoj lze využít k propojení součástky se substrátem tam, kde není možné realizovat pájený spoj. Pájený i lepený spoj má za úkol zajistit elektrické propojení a mechanickou fixaci součástky. V dřívějších letech byly používány především olovnaté pájecí slitiny k vytvoření kvalitního spoje. Ovšem vzhledem k toxicitě olova byly tyto slitiny na základě směrnice Evropské unie RoHS a WEEE zakázány. Z tohoto důvodu jsou tyto slitiny dnes nahrazovány bezolovnatými pájecími slitinami. U některých aplikací však bezolovnatou pájecí slitinu není možné použít, a proto se do popředí dostávají elektricky vodivá, v některých případech i nevodivá lepidla. Kvalita elektricky vodivého lepeného spoje závisí na mnoha faktorech. Samotný výběr lepidla a typ použitého substrátu jsou jedním z hlavních faktorů. Dalším faktorem, který ovlivňuje lepený spoj, je například způsob nanášení lepidla, vytvrzování, čistota povrchu a mnoho dalších.

Tato práce je věnována právě výše zmíněné problematice a zkoumá vlastnosti pájených a lepených spojů v průběhu klimatického testu zrychleným stárnutím s ohledem na textilní substráty s cílem zjistit elektrický odpor takto vzniklých pájených a lepených spojů na vodivé textilní stuze.

Seznam symbolů a zkratk

Použité zkratky

ACA.....	Anisotropic Conductive Adhesive [Anizotropní vodivá lepidla]
Ag.....	Stříbro
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
Au.....	Zlato
Bi.....	Bismut
Cl ₂	Plynný chlor
C.....	Uhlík
CTE	Coefficient of Thermal Expansion [Koeficient tepelné roztažnosti]
Cu.....	Měď
DPS.....	Deska plošného spoje
ECA.....	Electrically Conductive Adhesives [Elektricky vodivá lepidla]
ICA	Isotropic Conductive Adhesive [Izotropní vodivá lepidla]
IO.....	Integrated Circuit [Integrovaný obvod]
LCD.....	Liquid Crystal Display [Displej z kapalných krystalů]
LED.....	Light-Emitting Diode [Elektroluminiscenční dioda]
H ₂ S.....	Sirovodík
NCA	Non-Conductive Adhesive [Nevodivá lepidla]
Ni.....	Nikl
NO ₂	Oxid dusičitý
NO _x	Oxid dusíku
OFHC	Oxygen-free High Thermal Conductivity [Bezkyšlíkatá měď s vysokou tepelnou vodivostí]
Pb.....	Olovo
R.....	Elektrický odpor
RH	Relative humidity [Relativní vlhkost]
RICE.....	Research and Innovation Centre for Electrical Engineering
RoHS.....	Restriction of Hazardous Substances [Omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních]
SiO ₂	Oxid křemičitý
SMD.....	Surface Mount Device [Součástky určené pro povrchovou montáž]
SMT.....	Surface Mount Technology [Povrchová montáž]

Sn.....	Cín
SO ₂	Oxid siřičitý
THT.....	Through-Hole Technology [Technologie součástek s drátovými vývody]
UV.....	Ultrafialové záření
WEE.....	Waste Electrical and Electronic Equipment [Odpadní elektrická a elektronická zařízení]

Použité symboly a veličiny

A.....	Ampér [Základní jednotka pro elektrický proud]
cm.....	Centimetr
h.....	Hodina
K.....	Kelvin
kg.....	Kilogram
min.....	Minuta
mm.....	Milimetr
mPa.s.....	Milipascal sekunda
Pa.s.....	Pascal sekunda [Jednotka dynamické viskozity]
ppb.....	Parts Per Billion [Díl na jeden bilion]
ppm.....	Parts Per Million [Díl na jeden milion]
s.....	Sekunda
°C.....	Stupeň Celsia
Ω.....	Ohm [Jednotka elektrického odporu]
Ω.cm.....	Rezistivita
mΩ.....	Miliohm
MΩ.....	Megaohm
μm.....	Mikrometr

1 Klimatické testování

Klimatické testování je zvláštním typem zátěžového testování zaměřené na testování prostředí, které simuluje podmínky týkající se okolního prostředí, se kterými může zařízení či produkt přijít do styku. Výrobci tak mají adekvátní zpětnou vazbu o tom, jak si dané zařízení bude počínat ve zvoleném prostředí. [1]

Důvodem použití této technologie je stanovit životnost a spolehlivost produktu. Díky testování se totiž může odhalit velké množství chyb, které se pak mohou opravit, a tím se produkty stávají spolehlivějšími a konkurenceschopnějšími na trhu. Elektronickým zařízením se během svého života snižuje spolehlivost právě kvůli měnícím se podmínkám prostředí. Provoz a životnost elektronických zařízení jsou ovlivněny kolísáním teploty, vlhkostí a mnoha dalšími parametry. [1], [2]

Ke změnám teploty může docházet při přemísťování zařízení z teplého (uzavřeného) prostředí do studeného (otevřeného), či přesně naopak. Účinky poklesu nebo nárůstu teploty na dané zařízení mohou být odlišné. Například objeví-li se na zařízení námraza či rosa, mohou tyto škodlivé vlivy způsobovat další namáhání zařízení. Na zvýšení povrchové teploty má také vliv sluneční záření. [2]

Mezi další vlivy, které ovlivňují spolehlivost a stárnutí zařízení v důsledku působení environmentálních podmínek, patří například koroze. K tomuto jevu může dojít díky přítomnosti vlhkosti ve vzduchu. Máme-li prostředí, ve kterém se vyskytuje vysoká koncentrace soli, lze tento jev ještě urychlit. Rychlost, s jakou bude koroze postupovat, závisí do značné míry na množství okysličeného solného roztoku, který se může dostat na povrch zařízení. [2]

Klimatické testování je velmi široký pojem pokrývající celou škálu simulací, různých zkoušek a může zahrnovat několikero kategorií. Na zařízení totiž působí nejrůznější klimatické vlivy (chlad, teplota, vlhkost, koroze, ...), podle kterých lze provádět nejrůznější klimatické zkoušky, jakými jsou například zkouška chladem, zkouška suchým teplem, zkouška změnou teploty, zkouška vlhkým teplem cyklickým, složená zkouška cyklická teplotou a vlhkostí, korozní zkouška proudící směsí plynů, zkouška vlhkým teplem konstantním a mnoho dalších. Všechny tyto zkoušky jsou součástí normy ČSN EN 60068-2. [2], [3]

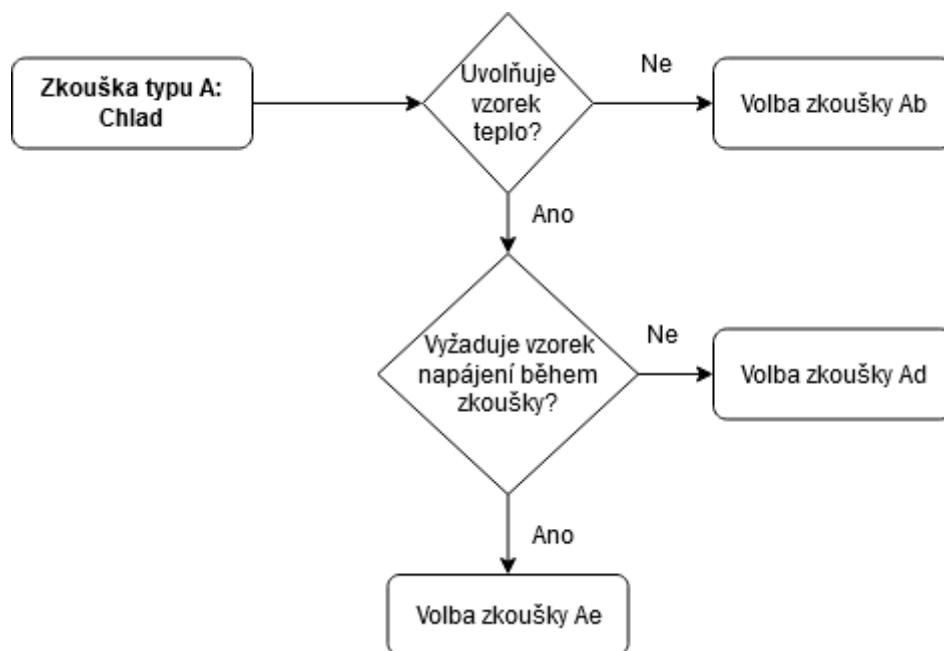
1.1 Popis jednotlivých klimatických a teplotních testů

V této části práce se zaměřím na vybrané klimatické a teplotní testy. Důvodem použití těchto testů je schopnost definovat klimatické podmínky, při kterých je zařízení schopno fungovat aniž by došlo k jakémukoliv selhání. Chceme-li zjistit, zda zkoušený vzorek (zařízení) odolá nízké konstantní teplotě, použijeme zkoušku chladem. Naproti tomu zkouška suchým teplem nám pomůže definovat schopnost zařízení odolat vysoké konstantní teplotě při normální relativní vlhkosti. Zařízení, které je předurčeno k tomu, že bude během svého života vystaveno prudkým změnám teplot, otestujeme pomocí zkoušky změnou teploty. Zkoušku vlhkým teplem cyklickým/konstantním či složenou zkoušku cyklickou teplotou a vlhkostí použijeme, pokud nás zajímá životnost zařízení, které je vystaveno velmi vlhkému prostředí. V tomto prostředí s největší pravděpodobností hrozí jev difúze či absorpce vlhkosti. Korozní zkouška nám zase pomůže stanovit korozní vliv prostředí na zařízení, součástky a materiály (kontakty, spoje). [4]

Při výběru klimatických zkoušek musíme rozmýšlet nad tím, kterým klimatickým podmínkám by mohlo být zařízení vystaveno v reálném provozu. Vždy raději počítáme s extrémními podmínkami a tím jsme schopni zajistit „maximální“ spolehlivost zařízení. Výběr klimatického testu není vždy jednoznačná záležitost. Musíme totiž brát v potaz několik parametrů, které mohou ovlivňovat spolehlivost zařízení. Je proto efektivnější vyhledat odborníky, kteří provedou rozbor jednotlivých parametrů a dále pak stanoví, jakým zkouškám by měl být produkt vystaven. [4]

1.1.1 Zkouška chladem (ČSN EN 60068-2-1)

Tato zkouška je definována normou ČSN EN 60068-2-1 ed.2 a je označována písmenem A. Základním principem této zkoušky je rozlišit, zda vzorek (testované zařízení) uvolňuje do svého okolí teplo, či nikoliv. Další zkoušky, které platí pro toto rozdělení vzorků, jsou popsány níže. Vzorkům, které uvolňují teplo, musíme věnovat dostatečnou pozornost. Zejména je důležité, abychom minimalizovali uvolňování tepla sáláním. Musíme ale také dbát na správné upevnění vzorku v klimatické komoře, a tím tak zajistíme, že nebude docházet k ovlivnění zkoušky kondukcí tepla. Další typem této zkoušky je zkouška *Ab*, která je určena pro vzorky, které neuvolňují teplo. Naproti tomu zkouška s označením *Ad*, je určena pro vzorky, jejichž teplo je uvolňováno. Zde ale musíme ještě rozlišit, zda vzorek vyžaduje v průběhu zkoušky nepřetržité napájení, či nikoliv. Pokud vzorek vyžaduje napájení, bavíme se o zkoušce s označením *Ae*. K ucelenější představě o volbě typu testu nám poslouží vývojový diagram (viz *Obr. 1*), který je součástí normy ČSN EN 60068-2-1 ed.2. [5]



Obr. 1: Vývojový diagram zkoušky A, (převzato z [5]).

Každá zkouška je definována tzv. stupni přísnosti, které jsou též součástí normy. Stupně přísnosti nám udávají, jaké hodnoty bychom měli volit pro daný typ zkoušky. Speciálně pro zkoušku chladem jsou stanoveny stupně přísnosti pro teplotu (viz Tab. 1) a stupně přísnosti pro dobu trvání zkoušky (viz Tab. 2). Stupně přísnosti musí být zvoleny z hodnot, které jsou uvedené v příslušné normě. [5]

Tab. 1: Stupně přísnosti teploty pro zkoušku A, (převzato z [5]).

+5 °C	-5 °C	-10 °C	-20 °C	-25 °C
-33 °C	-40 °C	-50 °C	-55 °C	-65 °C

Tab. 2: Stupně přísnosti pro dobu trvání zkoušky A, (převzato z [5]).

2 h	16 h	72 h	96 h
-----	------	------	------

Mezi další důležité ukazatele, které jsou součástí zkoušek v klimatických komorách, patří rychlost proudění vzduchu. V normách jsou definovány dva typy – nízká rychlost vzduchu a vysoká rychlost vzduchu. Při nízké rychlosti vzduchu jsme schopni zajistit takovou rychlost proudění, která je dostatečná k udržování podmínek v klimatické komoře a zároveň tak nedojde k ovlivnění teploty většímu než 5 K v libovolném bodě vzorku. Vysoká rychlost vzduchu pracuje na zcela opačném principu, takže dochází ke změně teploty o více než 5 K v libovolném bodě vzorku. [5]

U zkoušky typu *Ab* (vzorky neuvolňující teplo) je vzorek nejprve umístěn do klimatické komory a je zde nastavena teplota okolí. Poté je postupně teplota v klimatické komoře snižována na požadovanou úroveň. Dosáhne-li vzorek teplotní „rovnováhy“, pak je v klimatické komoře stanovená teplota konstantně ponechávána po dobu, která je určena specifikací. Postupně pak dochází k ohřívání vzorku na pokojovou teplotu, přičemž průměrná rychlost změny teploty v klimatické komoře nesmí přesáhnout 1K/min. Tato zkouška je určena pro vzorky, které nevyžadují v průběhu testování napájení. Avšak potřebujeme-li, aby byl vzorek napájen po celou dobu testu, lze tento typ zkoušky zařadit taktéž mezi *Ab*. Musíme ale zajistit napájení vzorku ještě před začátkem testu. V tomto typu zkoušky je doporučeno rychlé proudění vzduchu. Hlavním důvodem je totiž rychlejší dosažení teplotní „rovnováhy“ testovaného objektu. [5]

Zkouška typu *Ad* je určena pro vzorky, které uvolňují teplo. Průběh této zkoušky je podobný jako u zkoušky *Ab*. Jsou zde ale některé odlišnosti. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že musíme zajistit nízkou rychlost vzduchu v klimatické komoře ještě před započítáním zkoušky. Tento krok je velice důležitý. Minimalizujeme tak totiž samovolné unikání tepla samotným vzorkem. Jakmile je opět dosažena teplotní „rovnováha“ vzorku v klimatické komoře, vzorek se uvede do provozu a následně musí být dosaženo teplotního ustálení. [5]

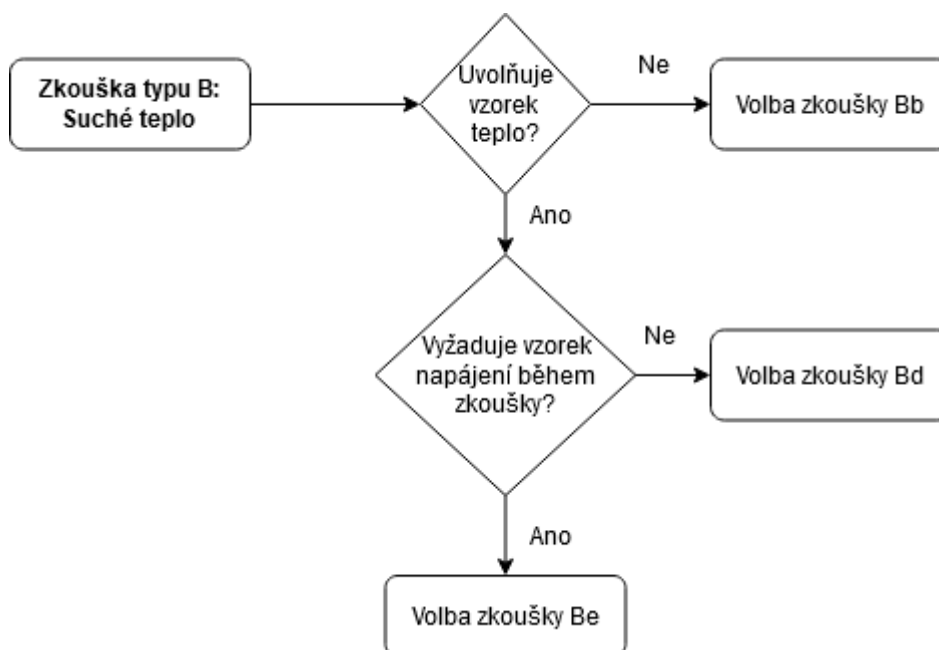
Posledním typem zkoušky je zkouška *Ae*. Stejně jako u výše zmíněných zkoušek je nejprve vzorek umístěn do klimatické komory při teplotě okolí. Dále může být vyhotoven test funkčnosti zařízení dle požadovaných specifikací a dosažením teplotní „rovnováhy“ může být započata expozice vzorku. V tomto typu zkoušky je obvykle vyžadováno nepřetržité napájení a také nízká rychlost vzduchu. [5]

Je-li potřeba více doplňujících informací o výše zmíněných testech, lze tyto informace nalézt v normě ČSN EN 60068-3-1.

1.1.2 Zkouška suchým teplem (ČSN EN 60068-2-2)

Další zkouška, která je v této práci popsána, je zkouška suchým teplem. Tento typ zkoušky je definován v normě ČSN EN 60068-2-2 a je označována písmenem *B*. U této zkoušky nás nezajímá, jak si bude daný testovaný objekt počínat při proměnné teplotě. Naopak, hlavním účelem této zkoušky je vystavit daný testovaný objekt konstantní vysoké teplotě. Opět se zde využívá trojího dělení jako u výše zmíněné zkoušky. Zkoušku tedy rozdělujeme na *Bb*, *Bd* a *Be*. Nyní si vysvětlíme, co se pod jednotlivým označením skrývá. Zkouška typu *Bb* se využívá

u vzorků, které neuvolňují teplo. Naopak zkouška typu *Bd* je určena pro vzorky uvolňující teplo. Posledním typem je zkouška *Be*, která je využívána u vzorků, které sice uvolňují teplo, ale musí být ještě zajištěno nepřetržité napájení v průběhu zkoušky. Jako u předešlé zkoušky, tak i zde, je volba typu zkoušky znázorněna vývojovým diagramem (viz *Obr. 2*). [6]



Obr. 2: Vývojový diagram zkoušky B, (převzato z [6]).

Stupně přísnosti jsou zde opět dvojího typu jako u zkoušky chladem. Rozlišujeme tedy stupně přísnosti pro teplotu (viz *Tab. 3*) a pro dobu trvání zkoušky (viz *Tab. 4*). Průměrná změna teploty určená intervalem, který nepřesahuje 5 minut, nesmí překročit 1 K/min. [6]

Tab. 3: Stupně přísnosti teploty pro zkoušku B, (převzato z [6]).

+30 °C	+35 °C	+40 °C	+45 °C	+50 °C
+55 °C	+60 °C	+65 °C	+70 °C	+85 °C
+100 °C	+125 °C	+155 °C	+175 °C	+200 °C
+250 °C	+315 °C	+400 °C	+500 °C	+630 °C
+800 °C	+1 000 °C			

Tab. 4: Stupně přísnosti pro dobu trvání zkoušky B, (převzato z [6]).

2 h	16 h	72 h	96 h
168 h	240 h	336 h	1 000 h

Nyní si podrobněji popíšeme jednotlivé typy zkoušek. Začneme zkouškou typu *Bb*. Postup chronologicky odpovídá zkoušce *Ab*. V prvním kroku je tedy vzorek vložen do klimatické komory. V klimatické komoře je nejprve nastavena teplota okolí a následně je teplota zvyšována až na požadovanou úroveň. Jakmile je dosaženo teplotní „rovnováhy“ testovaného objektu a ustálení teploty v klimatické komoře, jako druhý krok lze provést expozici testovaného objektu konstantní vysoké teplotě. V komoře bývá obvykle vysoká rychlost proudění vzduchu, není-li specifikací vyžadována rychlost pomalá. [6]

Druhým typem zkoušky je zkouška *Bd*. I v tomto případě je nejprve testovaný objekt vložen do klimatické komory s teplotou okolí (laboratoře). Další krok je ale odlišný, než je tomu u zkoušky *Bb*. Nejprve je potřeba, aby bylo v klimatické komoře zajištěno pomalé proudění vzduchu a až posléze je teplota zvyšována na požadovanou úroveň. Jakmile je dosaženo požadované teploty dané specifikací, lze testovaný objekt uvést do provozu a posléze musíme vyčkat do té doby, než je dosaženo teplotní „rovnováhy“. Poté opět může být testovaný objekt exponován vysoké konstantní teplotě. [6]

Posledním typem zkoušky je zkouška *Be*. Tato zkouška je koncipována pro vzorky, které uvolňují teplo. Musí být také zajištěno napájení po celou dobu zkoušky, jak již bylo zmíněno výše. Průběh zkoušky *Be* je analogický se zkouškou *Bd*. U tohoto typu ale může docházet jak k sálání tepla vzorkem, tak i k šíření tepla vedením. Tyto vlivy nejsou přínosné, musíme je tedy omezit na minimum. [6]

1.1.3 Zkouška změnou teploty (ČSN EN 60068-2-14)

Další zkouška, která zde bude popsána, je zkouška změnou teploty. Tato zkouška se výrazně liší od zkoušky chladem či suchým teplem. Během testování je totiž nutno měnit teplotu, zatímco u výše zmíněných zkoušek byla použita pouze konstantní teplota. Tato zkouška je popsána normou ČSN EN 60068-2-14 a značí ji písmeno *N*. Tato zkouška je stanovena rychlostí změny teplot, vysokou a nízkou teplotou, teplotou, při níž dochází k expozici vzorku, počtem zkušebních cyklů a v neposlední řadě také množstvím tepla přeneseného do vzorku. Touto zkouškou je doporučeno testovat produkty, u nichž dochází k prudkým změnám teploty. [7]

Dle výše zmíněné normy je zkouška změnou teploty rozdělena do několika skupin – *Na* (Rychlá změna teploty s předepsanou dobou přemístění), *Nb* (Změna teploty se stanovenou rychlostí změny) a *Nc* (Rychlá změna teploty, metoda se dvěma kapalinovými lázněmi). [7]

Každý typ zkoušky je zcela unikátní. Chceme-li vyhodnotit elektrické a mechanické vlastnosti během změny teploty testovaného objektu, je doporučeno řídit se zkouškou *Na*. Naopak, chceme-li vyhodnotit mechanickou a elektrickou odolnost testovaného objektu proti rychlým změnám teploty, je doporučeno řídit se zkouškami *Na* a *Nc*. Stupně přísnosti jsou zde stanoveny pro každou jednotlivou zkoušku. U zkoušky *Na* se jedná o kombinaci dvou teplot, počtů cyklů, doby přemístění vzorku a doby expozice testovaného objektu. Jednotlivé teploty mohou být vybrány z normy ČSN EN 60068-2-1 (viz *Tab. 1*) či z normy ČSN EN 60068-2-2 (viz *Tab. 3*). [7]

Stupně přísnosti pro zkoušku *Nb* jsou téměř totožné s výše zmíněnou zkouškou. Také se zde vyskytuje kombinace dvou teplot, počet cyklů a doba expozice. Je zde ale jedna odlišnost oproti zkoušce *Na*. Doba přemístění vzorku je totiž nahrazena rychlostí změny teploty. U zkoušky *Nc* jsou stupně přísnosti stanoveny teplotami dvou lázní, počtem cyklů a dobou přemístění testovaného objektu z jedné lázně do druhé. [7]

Nyní si podrobněji rozebereme jednotlivé zkoušky. V první řadě se zaměříme na zkoušku *Na*. Tato zkouška je koncipována pro vzorky, které určují schopnost odolávat rychlým změnám teploty okolí. Vzorek je buď vystaven rychlým změnám teploty ve vzduchu, či inertnímu plynu střídavým vystavením nízké a vysoké teplotě. V tomto testu může být využito jedné klimatické komory s rychlou změnou teploty, či dvou samostatných komor. Je-li zvolena varianta dvou komor, je nutno zajistit, aby jednotlivé komory nebyly od sebe příliš vzdálené. Chceme totiž zajistit, aby byl vzorek přesunut z jedné komory do druhé v definovaném čase. Existují zde 2 principy přemístování – ruční, jež vyžaduje obsluhu, a automatické, které využívá například dopravníkového pásu. [7]

Zkouška začíná vložením vzorku do klimatické komory s teplotou okolí. V klimatické komoře je následně nastavena nižší teplota, která nese označení T_A po dobu t_1 . Tato část tvoří první polovinu cyklu. To samé platí i pro vyšší teplotu, která je označována T_B . Čas expozice (t_1) závisí na tepelné kapacitě testovaného objektu. Může se jednat o 3 h, 2 h, 1 h, 30 min či 10 min. Není-li ve specifikaci uvedena žádná doba, automaticky se počítá s dobou 3 h. Je doporučeno využívat 5 zkušebních cyklů, není-li uvedeno jinak. Teplota v klimatické komoře a teplota vzorku musí mít teplotu okolního vzduchu ($+25\text{ °C} \pm 5\text{ K}$). Musí být zajištěno exponování vzorku při nízké teplotě T_A . Tato teplota musí být udržována po dobu t_1 . Následně je vzorek vystaven po stejnou dobu t_1 vyšší teplotě T_B . Doba přechodu mezi těmito teplotami t_2 nesmí překročit 3 minuty. Tento postup platí v případě použití jedné komory. [7]

Máme-li ale variantu se dvěma komorami, tak interval t_2 nám značí jak čas mezi jednotlivými cykly, tak i čas přesunu daného vzorku. To znamená, že doba náběhu na stanované teploty T_A a T_B nesmí překročit desetinu intervalu t_1 . Z veškerých informací tedy vyplývá, že jeden cyklus N_a je složen ze dvou dob expozice t_1 a dvou dob přemístění vzorku t_2 . Pro lepší představu je zde uvedeno grafické znázornění (viz Obr. 3). [7]

A – začátek prvního cyklu

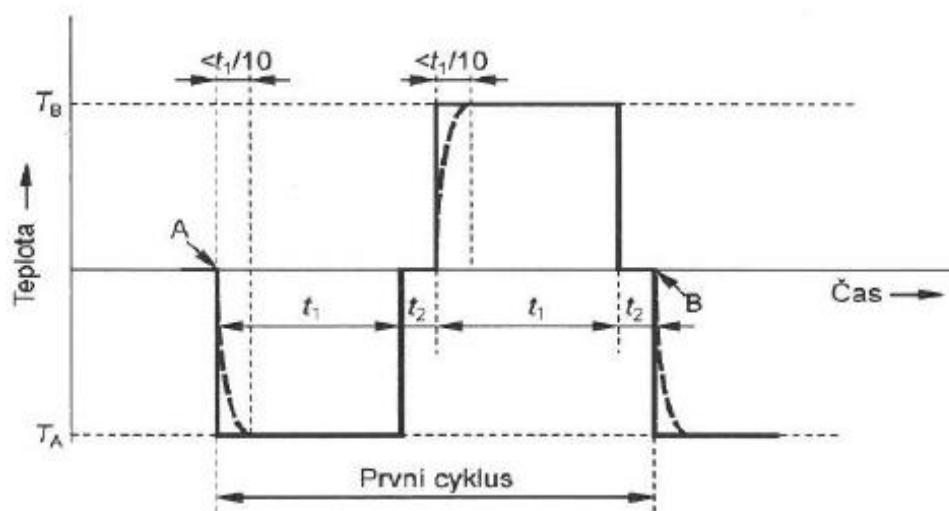
B – konec prvního a začátek druhého cyklu

T_A - nízká teplota

T_B – vysoká teplota

t_1 – čas expozice

t_2 – čas přemístění



Obr. 3: Průběh zkoušky N_a , (převzato z [7]).

Po posledním cyklu je nutná aklimatizace vzorku. To znamená, že vzorek musí zůstat v normálních klimatických podmínkách, dokud není dosaženo teplotní „rovnováhy“. Tato doba není přesně specifikována. Záleží totiž především na výběru vzorku. [7]

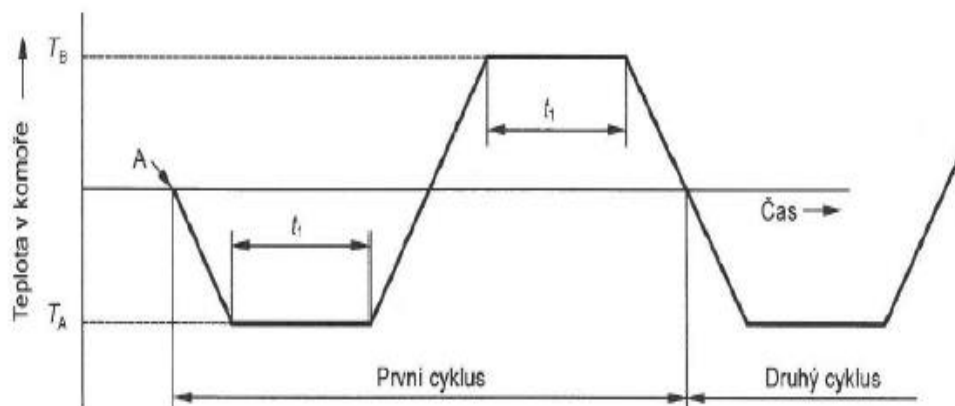
Druhým typem zkoušky je zkouška s označením N_b . Pro jeden zkušební cyklus vypadá zkouška následovně. Nejdříve se však musí snížit teplota v klimatické komoře specifikovanou rychlostí na nízkou teplotu T_A . Jakmile je dosaženo teplotní „rovnováhy“, může být vzorek exponován teplotě T_A po dobu t_1 . Čas expozice je totožný se zkouškou N_a . Po tomto kroku je teplota v klimatické komoře zvyšována až na úroveň T_B . Následně musí být opět dosaženo teplotní „rovnováhy“ a vzorek je posléze exponován teplotě T_B po stejně dlouhý časový interval t_1 . Teplota vzduchu v klimatické komoře se poté musí srovnat na teplotu okolního vzduchu ($+25\text{ °C} \pm 5\text{ K}$). Stejně jako u výše zmíněné zkoušky i zde je uvedeno grafické znázornění (viz Obr. 4). [7]

A – začátek prvního
cyklu

T_A - nízká teplota

T_B – vysoká teplota

t_1 – čas expozice



Obr. 4: Průběh zkoušky Nb, (převzato z [7]).

Posledním typem zkoušky je zkouška, která nese označení Nc. Tato zkouška je nejvíce odlišná od dvou předchozích zkoušek. Uplatňuje se zejména tam, kde je zapotřebí realizovat velký a rychlý tepelný šok testovaného objektu. Není prioritně určena pro testování elektrických zařízení, ale spíše se využívá pro testování nejrůznějších materiálů (sklo-kov, ...). Zde totiž nevystavujeme testovaný objekt různé teplotě, ale studené a teplé kapalinové lázni. Ve studené lázni je kapalina s nízkou teplotou T_A , která je určena danou specifikací. Není-li teplota stanovena, pak kapalina dosahuje teploty 0 °C. V teplé lázni je obsažena kapalina s vysokou teplotou T_B . Teplota je opět stanovena specifikací. Není-li tomu tak, pak kapalina dosahuje teploty 100 °C. Teplota kapaliny ve studené lázni nesmí nikdy v průběhu zkoušky vzrůst o 2 K. Naopak teplota kapaliny v teplé lázni nesmí poklesnout o více než 5 K. Kapaliny mohou být různého druhu, ale vždy musí být kompatibilní s testovaným materiálem. Lázně by měly být umístěny co možná nejbližší u sebe, abychom zamezili případnému ovlivnění teploty při přesunu testovaného objektu z jedné lázně do druhé. Grafické znázornění je vidět na Obr. 5. [7]

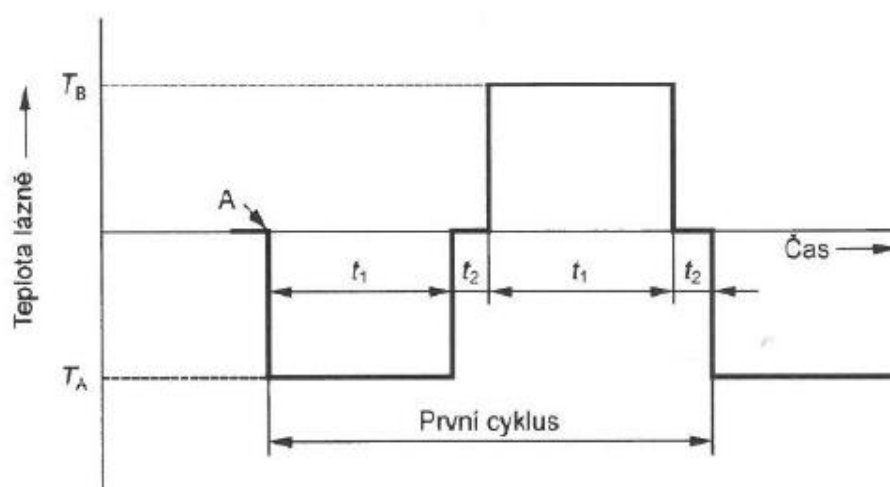
A – začátek prvního cyklu

T_A - nízká teplota

T_B – vysoká teplota

t_1 – čas expozice

t_2 – čas přemístění



Obr. 5: Průběh zkoušky Nc, (převzato z [7]).

Jak již bylo zmíněno v prvním odstavci této kapitoly, touto zkouškou se testují produkty, které jsou po dobu svého života vystaveny prudkým změnám teploty. K tomuto účelu se používají speciální testovací komory (viz *Obr. 6*), ve kterých je možno velmi rychle měnit teplotu. [8]



Obr. 6: Testovací komora, (převzato z [8]).

Dalšími možnostmi šokového testování je zkouška mechanickými šoky. Tato zkouška zde není zpracována, jelikož tato práce pojednává o klimatických testech. Nicméně pro úplnost lze vyhledat informace v příslušných normách.

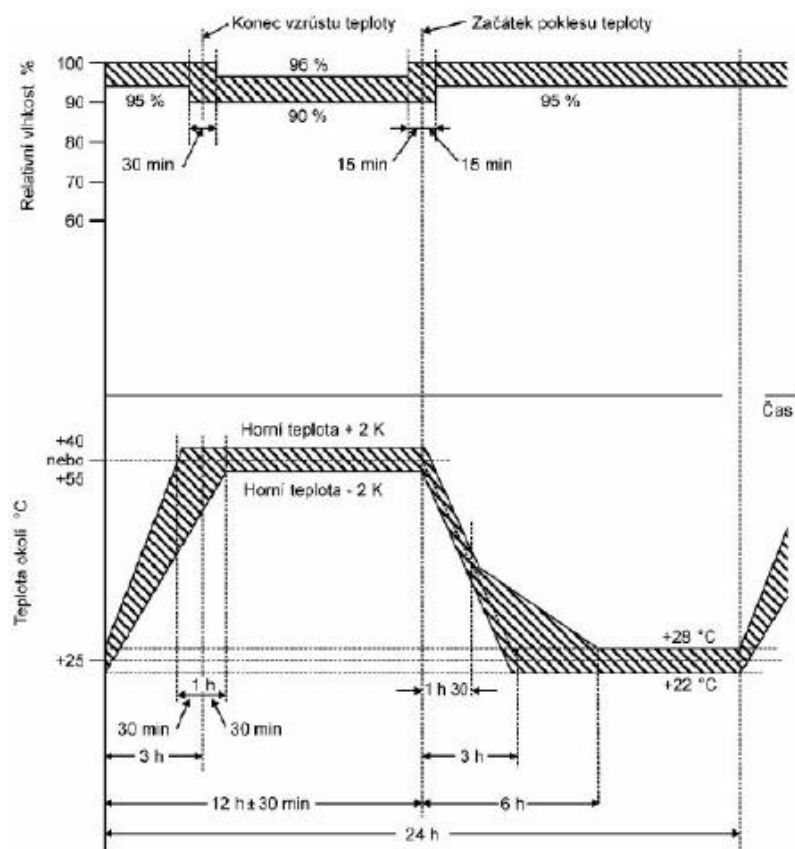
1.1.4 Zkouška vlhkým teplem cyklickým (ČSN EN 60068-2-30)

Tato zkouška je definována normou ČSN EN 60068-2-30 ed.2. Jak již název vypovídá, jedná se o zkoušku teplem při vysoké vlhkosti vzduchu v klimatické komoře. Je definována označením *Db* a jedním cyklem na 12 h + 12 h. Zkoušku tvoří jeden cyklus, kdy je udržována vysoká RH a teplota, což má za následek kondenzaci na povrchu vzorku. Stupně přísnosti (viz *Tab. 5*) jsou určeny kombinací horní teploty a počtem cyklů. [9]

Tab. 5: Stupně přísnosti pro zkoušku Db, (převzato z [9]).

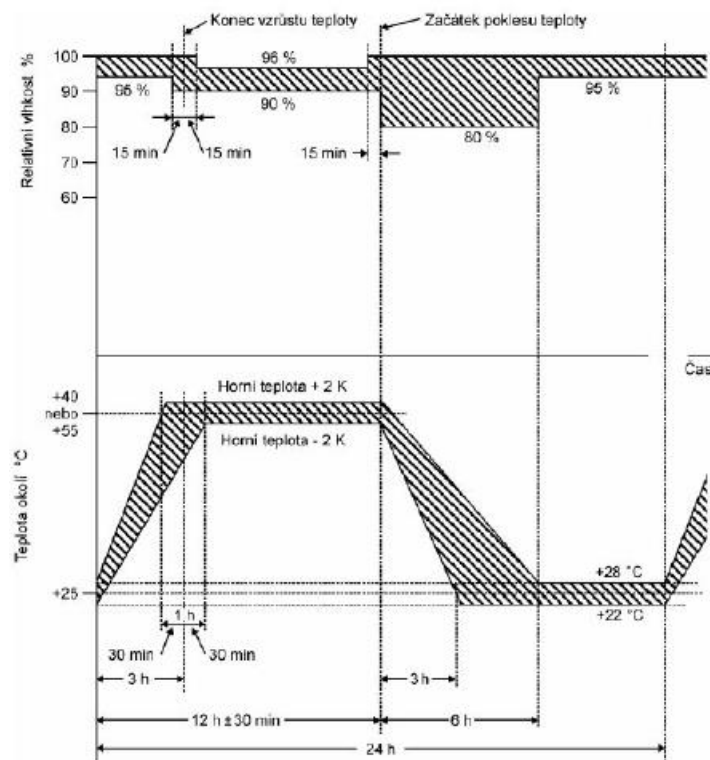
Teplota	40 °C
Počet cyklů	2, 6, 12, 21, 56
Teplota	55 °C
Počet cyklů	1, 2, 6

V prvním kroku této zkoušky je nejprve zvyšována teplota v klimatické komoře na horní teplotu určenou rychlostí, která je součástí výše zmíněné normy. Během nárůstu teploty nesmí RH v klimatické komoře spadnout pod 95 % a ke konci nárůstu pod 90 %. Po 12 hodinách expozice vysoké vlhkosti a horní teplotě má RH a teplota klesat dle dvou variant, jež jsou součástí dané normy. Pro variantu č. 1 jsou vyžadovány speciálně konstruované komory. Tato varianta je doporučena pro vzorky, kde dochází k velkému průniku vlhkosti v důsledku jevu dýchání, či je určena pro vzorky, které obsahují duté prostory, ve kterých může docházet ke kondenzaci na vnitřních površích. Průběh zkoušky je znázorněn na Obr. 7. [9]



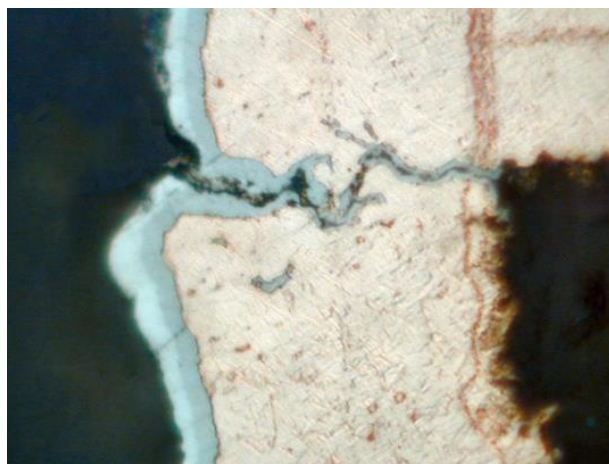
Obr. 7: Zkušební cyklus Db, varianta 1, (převzato z [9]).

Druhá varianta je doporučena pro ostatní typy vzorků, kde je jev dýchání v podstatě zanedbatelný. U této varianty je požadavek na dodržování RH v klimatické komoře méně přísný, než je tomu i varianty č. 1. Průběh zkoušky je znázorněn na Obr. 8. [9]



Obr. 8: Zkušební cyklus Db, varianta 2, (převzato z [9]).

Vlivu působení tepelného cyklu a jeho degradaci se například věnuje článek *Thermal cycle testing of PWBs – Methodology*, který říká, že integrovaný obvod na bázi křemíku má CTE 2 ppm/°C, zatímco DPS má hodnotu CTE přibližně 21 ppm/°C. Na tomto příkladu je velmi dobře vidět značný nesoulad CTE. Důležitou roli zde také samozřejmě plní použitá pájecí slitina mezi komponenty. Jakmile se sestava zahřeje, DPS bude namáhána mnohem více než integrovaný obvod, čímž se vytvoří napětí vzniklé napříč pájených spojů, které připojují integrovaný obvod k DPS. Tím, jak je sestava neustále vystavována tepelným cyklům, tím více dochází k poškození, až se nakonec vytvoří trhlina (viz Obr. 9), která přeruší obvod. [10], [11]

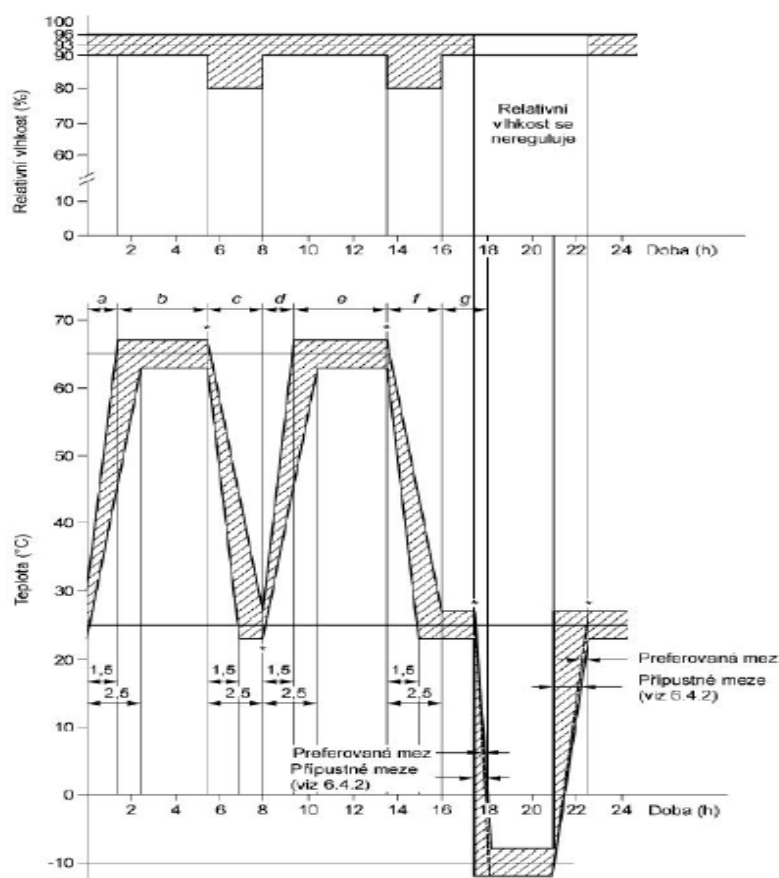


Obr. 9: Měděná trhlina s přetavenou prasklou pájkou, (převzato z [11]).

1.1.5 Složená zkouška cyklická teplotou a vlhkostí (ČSN EN 60068-2-38)

Jak již název vypovídá, tato zkouška představuje kombinaci zkoušek cyklickou teplotou a cyklickou vlhkostí. Tato zkouška je popsána normou ČSN EN 60068-2-38 a nese označení Z/AD. Průběh zkoušky se dá rozdělit do dvou kategorií – teplotně vlhkostní kategorie a kategorie chladu. V první zmíněné je v klimatické komoře nastavena teplota okolí (laboratoře), avšak se zde také vyskytuje vysoká RH. V dalším kroku je teplota v klimatické komoře zvyšována na normou specifikovanou hodnotu, ovšem RH musí zůstat vysoká. Tyto podmínky musejí být po nějakou dobu udržovány. Uplynutím potřebné doby musí být teplota snižována zpět na teplotu laboratoře (okolí), ale RH musí být udržována v závislosti, zda byla zvolena varianta klesání č. 1 nebo č. 2. Celý tento postup se v této části jednou opakuje. [12]

Po této části, je-li to požadováno specifikací, nastupuje chladná část zkoušky. V této části již není potřeba brát zřetel na RH, jak je tomu u výše zmíněné kategorie. Testovaný objekt je totiž exponován nízké teplotě. Jakmile je dokončen poslední cyklus, klimatická komora musí být udržována na teplotě okolí (laboratoře) a vysoké RH. Pro ucelenější představu je zde znázorněn průběh zkoušky (viz Obr. 10), jež zahrnuje i chladnou část zkoušky. [12]



Obr. 10: Zkušební cyklus Z/AD, (převzato z [12]).

Tato zkouška je především koncipována pro součástky, u kterých je potřeba zjistit odolnost vůči vlivům vysoké vlhkosti, teploty a chladu. Tímto způsobem je otestováno, zda nedojde například k zamrznutí kondenzované vody, což vede k následnému popraskání či zničení materiálu právě při vlhkých změnách teploty. Normou je definováno, na jaký typ vzorku je tato zkouška doporučena. Co se týče klimatických komor, vyskytují se zde dvě přípustné varianty. Můžou zde být dvě komory, nebo je zde přípustná pouze jedna komora, která ale musí splňovat přísnější požadavky. Stupně přísnosti jsou zde stanoveny pro 10 cyklů po dobu trvání 24 h, není-li specifikací vyžadováno jinak. [12]

1.1.6 Korozní zkouška proudící směsí plynů (ČSN EN 60068-2-60)

Tato zkouška je popsána normou ČSN EN 60068-2-60 ed.2 a je označována *Ke*. Obsahuje celkem čtyři metody, podle kterých může být zkouška prováděna. Pro experimentální část byla vybrána metoda č. 1. Stupně přísnosti jsou v tomto případě dány vybranou zkušební metodou (viz *Tab. 6*) a dobou trvání zkoušky (viz *Tab. 7*). [13]

Tab. 6: Zkušební podmínky, (převzato z [13]).

Parametry	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3	Metoda 4
H ₂ S (10 ⁻⁹ obj.)	100 ± 20	10 ± 5	100 ± 20	10 ± 5
NO ₂ (10 ⁻⁹ obj.)	-	200 ± 50	200 ± 50	200 ± 20
Cl ₂ (10 ⁻⁹ obj.)	-	10 ± 5	20 ± 5	200 ± 20
SO ₂ (10 ⁻⁹ obj.)	500 ± 100	-	-	25 ± 1
Teplota (°C)	25 ± 1	30 ± 1	30 ± 1	25 ± 1
RH (%)	75 ± 3	70 ± 3	75 ± 3	75 ± 3
Počet výměn atmosféry za hodinu	3 – 10	3 – 10	3 – 10	3 – 10
Přírůstek hmotnosti měděných kupónů v mg/(dm ² x den)	1,0 – 2,0	0,3 – 1,3	1,2 – 2,2	1,2 – 2,4

Tab. 7: Stupně přísnosti pro dobu trvání zkoušky Ke, (převzato z [13]).

4 dny	7 dní	10 dní	14 dní	21 dní
-------	-------	--------	--------	--------

Zkušební zařízení je složeno ze zkušební komory, klimatizačního systému a zařízení pro přívod plynu. Pro každou jednotlivou metodu musí být splněny určité předepsané podmínky. Nesmí se například do komory vstříkovat vodní kapky či aerosoly, s odváděnými plyny musí být zacházeno v souladu s příslušnými předpisy, vzduch či použitá voda musí být dostatečně čisté, aby nedošlo k ovlivnění zkoušky a mnoho dalších. Vyžaduje-li to specifikace, může dojít k aklimatizaci vzorku ještě před samotnou zkouškou (čištění). U vzorků uvolňující teplo musí být doba provozu taková, aby teplota a RH vzduchu zůstaly ve stanovených tolerancích. Dále

musí být zajištěno, aby na vzorcích nedošlo při vložení do komory ke kondenzaci. Vzdálenost mezi jednotlivými vzorky musí být nejméně 10 mm. Není-li tato vzdálenost dodržena, může dojít k narušení stejnosměrného proudění vzduchu, a tím tak k ovlivnění výsledku měření. [13]

U metody č. 1 musí být nejprve předepsaná teplota stabilizována a po dokončení procesu stabilizace je přiveden vlhký vzduch. Teplota a vlhkost jsou nastaveny tak, aby na vnitřních stěnách komory ani na vzorku nedocházelo ke zmíněné kondenzaci. Po tomto kroku je přiváděn plyn do proudu vlhkého vzduchu a vyčká se stabilizace. Dále se nastaví a změří koncentrace plynů a opět se vyčká stabilizace. V dalším kroku jsou vloženy vzorky a materiály pro sledování korozní agresivity do klimatické komory. Musíme dbát na to, aby zkušební vzorky a materiály pro sledování korozní agresivity byly rozmístěny rovnoměrně. Vzorky se nesmějí navzájem dotýkat ani stínit. Stav vzorků musí odpovídat příslušné specifikaci. Od tohoto okamžiku se měří doba trvání zkoušky. [13]

Nyní musí dojít ke stabilizaci zkušebních podmínek. Tato část může trvat poměrně delší dobu. Vyžaduje-li to situace, nastaví se teplota, vlhkost či koncentrace plynů podle potřeby. Avšak během procesu nastavování, nesmí dojít k překročení koncentrace plynů. Celý tento cyklus nesmí trvat déle, než 24 h. Během expozice musí být vlhkost, teplota a koncentrace plynů udržována v předepsaných mezích. Klimatická komora může být během zkoušky otevírána, avšak za dodržení jistých podmínek. Máme-li například zkoušku s dobou trvání kratší než 4 dny, komora nesmí být otevřena. V našem případě ponecháme vzorky v klimatické komoře po dobu 3 týdnů. To znamená, že klimatická komora může být otevřena jednou za týden. Po uplynutí zkušební doby jsou vzorky a materiály pro sledování korozní agresivity vyjmuty z klimatické komory a před konečným měřením musí být uloženy v podmínkách stanovených v příslušné specifikaci. [13]

Zbylé metody (2 – 4) lze použít, jestliže je ve zkušební atmosféře přítomen chlor. Jako u metody č. 1 se po stabilizování předepsané teploty zahájí přívod vlhkého vzduchu a vyčká se stabilizace. V dalším kroku je nastavena teplota a vlhkost tak, aby na zkušebním vzorku ani na vnitřních stěnách komory nedošlo ke kondenzaci, jako je tomu u výše zmíněné metody. Nyní následuje přívod chloru do proudu vlhkého vzduchu, poté dojde k měření a nastavení koncentrace chloru a vyčká se stabilizace. Do klimatické komory jsou následně vloženy zkušební vzorky spolu s materiály pro sledování korozní agresivity a musí být zajištěno, aby nedošlo k jejich vzájemnému dotýkání či stínění. [13]

Dále je provedena stabilizace vlhkosti, teploty a koncentrace chloru. Zde může docházet k delší časové prodlevě v důsledku absorpce chloru na povrchu či počáteční vysoké rychlosti reakce. Nyní je opět v případě potřeby změřena a nastavena koncentrace chloru, která musí zůstat stabilní nejméně 2 h. Poté je zahájen přívod ostatních plynů, změní se, a je-li to vyžadováno, nastaví se vlhkost, teplota a také koncentrace plynů s výjimkou chloru. Jsou-li ve zkušební atmosféře obsaženy všechny plyny, doba trvání zkoušky je měřena právě od toho okamžiku. [13]

Teplota, vlhkost a koncentrace plynů musí být během expozice udržována v předepsaných mezích. V průběhu zkoušky však koncentrace chloru nemůže být regulována. Její hodnoty se tedy zjistí změřením obsahu chloru až po skončení zkoušky. Komora může být během zkoušky otevírána, jak je uvedeno v příslušné normě, avšak za dodržení příslušných bezpečnostních předpisů. Po uplynutí zkušební doby je zastaven přívod plynů s výjimkou chloru, jenž musí být i nadále přiváděn. Následně dojde k vytlačení ostatních plynů z klimatické komory, avšak nesmí dojít k narušení analýzy chloru. V dalším kroku je změřena koncentrace chloru a jsou vyjmuty zkušební vzorky a materiály pro sledování korozní agresivity z klimatické komory. Po vyjmutí vzorků je provedena aklimatizace. [13]

Abychom ověřili, že podmínky zkoušky odpovídají podmínkám stanoveným, jsou kromě zkušebních vzorků exponovány také tzv. měděné kupóny, které jsou zhotoveny z polotvrdé mědi OFHC pro sledování korozní agresivity. Normou je definováno nejméně pět zkušebních kupónů, jenž musí být exponovány spolu se zkušebními vzorky. Přírůstek hmotnosti kupónů je pak považován za míru této shody. [13]

1.1.7 Zkouška vlhkým teplem konstantním (ČSN EN 60068-2-78)

Tato zkouška nese označení *Cab* a je popsána normou ČSN EN 60068-2-78 ed.2. Důvodem použití této zkoušky je zjistit, jak si daný vzorek bude počínat z hlediska difúze a absorpce vlhkosti či vodní páry. Tato zkouška je uplatnitelná jak pro vzorky uvolňující teplo, tak i pro vzorky neuvolňující teplo. Co se týče stupňů přísnosti, uplatňuje se zde kombinace teploty, RH a celkové doby trvání (viz *Tab. 8*). Stupně přísnosti v závislosti na teplotě a RH jsou poté uvedeny v *Tab. 9*. [14]

Tab. 8: Stupně přísnosti pro dobu trvání zkoušky Cab, (převzato z [14]).

12 h	16 h	24 h	2 dny
4 dny	10 dní	21 dní	51 dní

Tab. 9: Stupně přísnosti pro zkoušku Cab, (převzato z [14]).

Teplota [°C]	RH [%]
30 ± 2	93 ± 3
30 ± 2	85 ± 3
40 ± 2	93 ± 3
40 ± 2	85 ± 3

Průběh zkoušky vypadá tak, že vzorek je nejprve vložen do klimatické komory, ale musí se dbát na to, aby nedošlo ke kondenzaci. Tato část je velice důležitá, neboť může dojít k znehodnocení testu. Lze tomu však zamezit tím, že ještě před samotným vložením vzorku do komory, upravíme teplotu vzorku předehřátím a to na totožnou teplotu, jaká se vyskytuje uvnitř komory. V komoře je pak nastavena teplota a vysoká RH. Jakmile je dokončen zkušební interval, následuje postupná aklimatizace vzorku. [14]

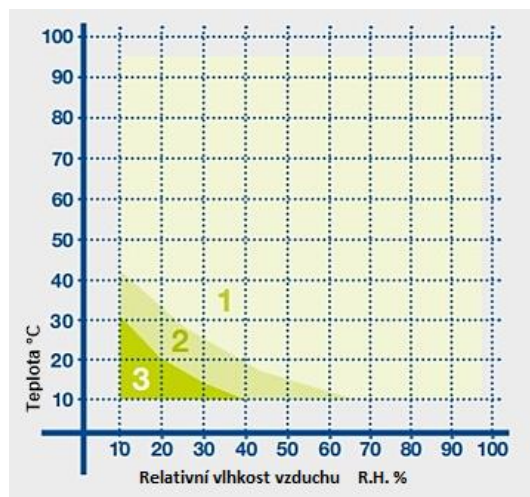
1.2 Klimatické komory

Hlavní funkcí těchto komor je testování „chování“ zařízení nebo vzorků v extrémních klimatických podmínkách [15]. Jedná se tedy o uzavřený prostor, ve kterém je možno regulovat nejrůznější podmínky prostředí, jako je teplota a vlhkost. Některé komory jsou dokonce schopny simulovat korozi například přivedením solného postřiku či proudící směsí plynů. Nejrůznější klimatické a teplotní zkoušky probíhají ve velkém množství právě v klimatických či teplotních komorách. [16]

Správný výběr komory, která má posloužit našim potřebám, je velmi často komplikovaný úkol. Předem musíme znát vlastnosti vzorku a typ testu, kterému bude vzorek podroben. Pro účely testování existuje několik typů zkušebních komor, které vyhovují nejdůležitějším standardům. Existuje několik typů komor, které se velikostně liší. Malé komory jsou určeny k testování miniaturních součástí (DPS). V komorách střední velikosti probíhá testování větších předmětů či testování většího množství malých předmětů. Ve většině klimatických komor je přednastavená „maximální“ teplota +180 °C. Lze samozřejmě teplotu zvýšit až na +200 °C. Maximální teplota je téměř vždy stejná, naproti tomu minimální teplota komory je díky chladicímu systému odlišná. Dalším parametrem, který se u klimatických komor liší, je rychlost změny teploty (°C/min, K/min). Komory mohou být rozdělovány do dvou skupin: [17]

- Jednostupňové komory (-40 °C)
- Dvoustupňové komory (-70 °C)

Dvoustupňové komory se skládají ze dvou chladicích systémů, proto je zde dosaženo velmi nízkých teplot. V katalogovém listu klimatické komory můžeme najít hodnotu minimální a maximální teploty. Rozsah vlhkosti se pohybuje v rozmezí 10 – 98 %. Abychom lépe pochopili možné hodnoty vlhkosti, které můžeme získat v klimatické komoře, musíme si uvědomit, že relativní vlhkost se mění s teplotou. Ke správnému pochopení nám pomůže diagram vlhkosti (viz Obr. 11), který zobrazuje možné hodnoty vlhkosti pro jednotlivé hodnoty teplot. [17]



Obr. 11: Diagram vlhkosti, (převzato z [17]).

V tomto diagramu jsou obsaženy tři oblasti:

- *Oblast 1*

V této oblasti probíhají průběžné zkoušky s rosným bodem mezi +4 °C až +94 °C (standardní rozsah). Lze tedy snadno najít minimální hodnotu vlhkosti pro jednotlivou hodnotu teploty. Například teplotě 20 °C odpovídá minimální hodnota vlhkosti RH = 40%.

- *Oblast 2*

Zde můžeme nastavit teplotu a vlhkost pouze na omezenou dobu, tedy krátkodobě (rosný bod -3 °C).

- *Oblast 3*

Do této oblasti spadají hodnoty, které jsou kombinací teploty a vlhkosti, a lze je získat speciálním příslušenstvím, které se skládá ze vstřikování suchého vzduchu pro zkoušky s velmi nízkou vlhkostí (rosný bod -40 °C). [17]

Pro experimentální část byla vybrána klimatická komora od německé společnosti Vötsch. Jedná se o komoru pro testování korozních charakteristik materiálů, která se nachází na RICE s označením VCC³ 0034 (viz *Obr. 12*). [18], [19]



Obr. 12: Klimatická komora VCC³ 0034

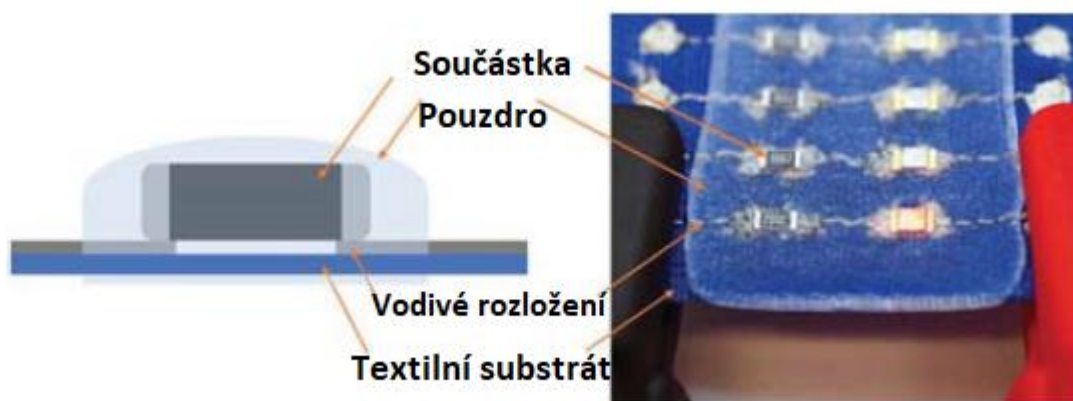
Tato komora byla německou společností vyvinuta především k prokázání odolnosti výrobků či zařízení vůči korozivním plynům. Její princip spočívá v přesném dávkování korozivních plynů s klimatizovaným objemem vzduchu. Hlavní složky korozivních prvků tvoří například oxid siřičitý (SO₂), oxid dusíku (NO_x), sirovodík (H₂S) či plynný chlor (Cl₂). V základní výbavě obsahuje komora dvířka s oknem. Lze tedy během zkoušky vzorek pozorovat, jelikož vnitřní testovací „skříň“ je vyrobena z akrylového skla. Tato komora je jedinečná tím, že je možno dávkovat až čtyři plyny současně. [19]

Komora disponuje 340, 600 či 1000 litry testovacího prostoru, jehož rozměry jsou 750 mm na výšku, 580 mm na šířku a 765 mm na hloubku. Rozsah teplot se pro teplotní zkoušky pohybuje od -10 °C do +90 °C. Bude-li v komoře prováděna zkouška klimatická, lze nastavit rozsah na +10 °C až +90 °C. Relativní vlhkost se pohybuje v rozmezí 10 – 98 %. Vzhledem k vysoce kvalitnímu zpracování a propracované konstrukci, dosahují komory řady VCC³ vynikající konzistence teploty a vlhkosti, což zaručuje správné a spolehlivé výsledky. [20], [21]

1.3 Metody kontaktování

Při kontaktování součástky se substrátem musí být součástka propojena elektricky, ale i mechanicky. Je nutné, aby byla zajištěna co nejlepší elektrická vodivost spojení, mechanická pevnost spoje a v neposlední řadě také co nejlepší tepelná vodivost spoje. V dřívějších letech byly používány například technologie svařovaných, ovíjených spojů, které měly značnou řadu nevýhod. Z tohoto důvodu bylo od těchto technologií zcela ustoupeno a začala se využívat technologie měkkého pájení. [22], [23]

Postupem času se začaly vyvíjet kromě pájení další nové a nové technologie, například kontaktování pomocí vodivých a nevodivých lepidel a mnoho dalších. Všechny tyto technologie lze dokonce aplikovat i na flexibilní substráty. V dnešní době jsou tyto technologie použity i pro kontaktování součástek na textilie. Testují se však i moderní metody, například kontaktování SMD součástek na textilie pomocí termokomprese [24]. K osazení byly použity nulové SMD rezistory a LED diody (viz Obr. 13). [22], [23], [24]

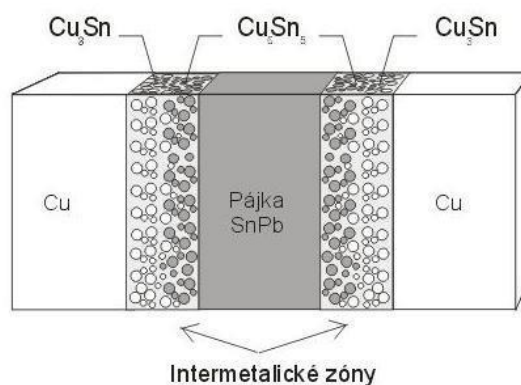


Obr. 13: Kontaktování součástek termokompresí, (převzato z [24]).

Elektrické propojení zde bylo docíleno bismutovou pájecí pastou. Termokomprese probíhala při teplotě nad 180 °C. Následně došlo k roztavení pouzdra součástky a přitlačení na textilní substrát za pomoci speciálního zařízení došlo k realizaci elektrického kontaktu. Tento experiment přinesl poměrně dobré výsledky, jelikož při testování bylo 8 z 10 LED diod plně funkčních. Podobných výsledků bylo docíleno i v případě měření elektrického odporu pomocí čtyřbodové metody. [24]

1.3.1 Měkké pájení

Pájení je definováno jako metalurgické spojení dvou materiálů, přičemž tyto materiály se přímo netaví. K tavení a následnému ztuhnutí nám slouží pouze přídavný kovový materiál, který se nazývá pájecí slitina. Teplota tavení pájecí slitiny je vždy nižší než teplota tavení spojovaných materiálů. Pájení v zásadě rozlišujeme na měkké a tvrdé. V elektrotechnice se však využívá měkkého pájení, kde teplota tavení pájecí slitiny dosahuje maximálně 450 °C. Takto realizovaný pájený spoj klasickou olovnatou pájkou, jež vytváří intermetalické sloučeniny (Cu_3Sn , Cu_6Sn_5), které se tvoří na rozhraní pájecí slitiny a pájeného povrchu, je pak zobrazen na Obr. 14. [22], [23], [25]



Obr. 14: Pájený spoj, (převzato z [25]).

Při měkkém pájení musíme vždy dodat do spoje pájecí slitinu a zajistit čistotu pájených ploch. K tomuto účelu se nejčastěji používají tavidla, která slouží k očištění kovových povrchů a k usnadnění tečení pájky po spojovaných dílech, a tím tak dochází ke zlepšení smáčivosti pájené plochy. Základní principy pájení jsou stejné jak pro běžné, flexibilní, tak i textilní substráty. Avšak pájení na flexibilní či textilní substráty vyžaduje určité specifikace. Nuance souvisí například s manipulací materiálu a flexibilitou substrátu. Například flexibilní substráty jsou také schopny s větší pravděpodobností absorbovat vodu. Proto je doporučováno jejich předpečení před samotným pájením při 150 °C po dobu 30 – 60 minut. Tímto by mělo být zamezeno delaminaci vlivem tepelného šoku, zejména při vysoké vlhkosti. Výsledkem tedy je, že samotný návrh a technika pro pájení na flexibilní a textilní substráty se mírně liší od pájení na klasických substrátech. Jakákoliv manipulace s flexibilním, textilním substrátem, ať už se jedná o kroucení, ohýbání atd., může způsobit velké mechanické namáhání pájených spojů. [22], [23], [26], [27]

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, metody pájení pro flexibilní či textilní substráty mají různé odlišnosti. Metoda ručního pájení se používá tam, kde chceme provádět drobné ruční opravy, či chceme připojit součástky, které neumožňují hromadné pájení. Proces ručního pájení u textilního substrátu je podobný jako při pájení na „klasický“ substrát. K vytvoření dobrého pájeného spoje je za potřebí pouze minimálního tlaku pomocí páječky. U textilních, flexibilních substrátů je vyvinut menší tlak pájecího hrotu, jelikož se substrát může pohybovat, klouzat atd. Jakákoliv nadměrná teplota či prodleva během procesu ručního pájení může způsobit poškození substrátu nebo vodivého motivu. Při pájení SMD součástek na textilní substrát je velmi často vyžadováno upevnění substrátu, jelikož zvolený substrát se může kroutit či ohýbat. [23], [26], [27]

Další metoda, kterou lze použít pro pájení na flexibilní substráty, je metoda pájení vlnou. Tato metoda je založena na jednoduchém principu. Základ tvoří čerpadlo, jež čerpá roztavenou pájecí slitinu, která představuje pájecí vlnu. Přes vlnu posléze putuje pomocí dopravníkového pásu DPS s THT součástkami nebo přilepenými SMD součástkami. Samotné zařízení, jež je součástí výrobní linky, je složeno ze zóny nanášení tavidla, zóny předehřevu, zóny pájení a zóny chlazení. Samotný proces pájení a zařízení pro flexibilní obvody a DPS jsou až na pár výjimek velmi podobné. Největší rozdíl spočívá v samotné přepravě desek přes vlnu. Flexibilní obvody se totiž obvykle během procesu nepřenášejí bez upevnění na rozdíl od většiny DPS. Další rozdíl tvoří samotné parametry pájení. Parametry pro pájení vlnou, jako například teplota pájky, teplota předehřátí, rychlost dopravníku se budou lišit mezi „tvrdou“ deskou a „flexem“ kvůli rozdílným vlastnostem materiálu. [23], [26], [27]

Mezi další významnou technologii strojního pájení patří pájení přetavením. Tato metoda pracuje na zcela opačném principu než výše zmíněné technologie. Pájecí slitina může být aplikována různými způsoby, nejčastěji je však aplikována ve formě pájecí pasty. Pájecí pasta je nanesena na předem určené místo, poté dojde k osazení součástek a osazená DPS je vložena do přetavovací pece. V přetavovací peci dojde k ohřevu na teplotu předehřevu a poté k přetavení pájecí pasty. Tato technologie se převážně využívá pro DPS, které jsou osazeny SMD součástkami. V případě flexibilních a textilních substrátů se proces pájení bude opět mírně lišit v závislosti na použitém materiálu. [23], [26], [27]

- **Olovnaté pájecí slitiny**

Z historického hlediska byly olovnaté pájecí slitiny nejvíce využívány. Mezi hlavní prvky těchto slitin patřil cín (Sn) a olovo (Pb). Do 1. 7. 2006 byla nejvíce využívána eutektická slitina Sn63Pb37, která obsahovala 63% cínu a 37% olova, popřípadě Sn60Pb40 s 40% olova. Pokud je slitina eutektická, pak teplota tuhnutí je nejnižší možná. Slitina Sn63Pb37 má teplotu tavení 183 °C. Z tohoto důvodu byla tato slitina hojně využívána. Mezi další výhody patřila také nízká cena olova, výborná smáčivost povrchu a mnoho dalších. [22], [28]

- **Bezolvnaté pájecí slitiny**

Od roku 2006 dle směrnice *WEEE* (Waste from Electrical and Electronic Equipment directive) a směrnice *RoHS* (Restriction of Hazardous Substances directive) nesmí komerční elektronické zařízení obsahovat více než 0,1% olova, a to z důvodu jeho toxicity. V roce 2018 byl ještě vydán dodatek ke směrnici 2011/65/EU – *RoHS* o zákazu prodeje olova a jeho slitin veřejnosti s platností od 1. března 2018. V České republice jsou ty směrnice implementovány do zákona 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů. Tato legislativa zakazuje používání olovnatých pájecích slitin až na určité výjimky, které jsou v této legislativě uvedeny. [28], [29]

Z tohoto důvodu bylo doporučeno používat tzv. bezolvnaté pájky, které se skládají převážně z cínu (Sn), stříbra (Ag) a mědi (Cu). Parametry a technologické postupy by měly být srovnatelné s olovnatými pájkami. Jako nejvhodnější náhrada za olovnatý cín se používá bezolvnatá pájka SAC 305 (96,5% Sn, 3% Ag, 0,5% Cu), která má teplotu tavení 217 °C. [28]

Vzhledem k nutnosti používání bezolvnatých pájek bylo objeveno několik jejich pozoruhodných vlastností, jako například vysoká pevnost spoje, lepší odolnost proti únavě, a také došlo ke snížení spotřebovaného olova o 0,5 % v porovnání s olovnatými pájecími slitinami. Tyto slitiny mají však poměrně větší množství nevýhod. Především se jedná o vyšší teplotu tavení v porovnání s olovnatými pájecími slitinami. Další nevýhodou představuje horší smáčivost a tvorba whiskerů, což představuje jeden z největších problémů bezolvnatých pájek. [22], [28]

1.3.2 Vodivé lepení

Další možností, kterou lze nahradit olovnaté pájecí slitiny, jsou elektricky vodivá lepidla (ECA). Tato lepidla se však výrazně liší svými vlastnostmi a strukturou od pájek. Na rozdíl od pájených spojů, které mohou být vystaveny prostředí, ve kterém se vyskytuje zvýšená vlhkost bez nebezpečí porušení spoje, lepené spoje jsou naopak velice citlivé na vlhkost. Kritéria pro jejich výběr jsou převážně zaměřena na elektrické a mechanické vlastnosti adhezních spojů. Nejčastěji je zkoumána elektrická vodivost spojů, pevnost v tahu a pevnost ve smyku. [23], [30]

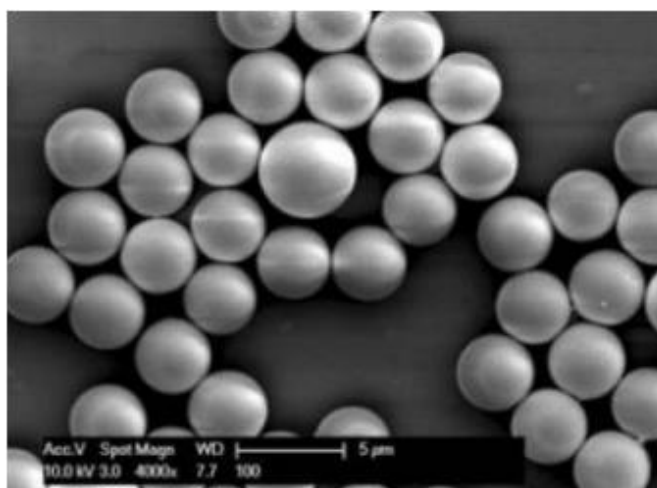
Metoda vodivého lepení slouží k vytvoření elektrického spoje. Tato technologie není v dnešní době příliš používaná pro běžné aplikace. V současnosti je zejména užívána pro speciální aplikace (výroba LCD displejů, rychlé opravy vodivých spojů, ...). Výhodou lepeného spoje je vyjma ekologičnosti také možnost připojování vývodů o velmi malé rozteči (do 0,1 mm). Další výhodou je také nižší vytvrzovací teplota na rozdíl od teploty pájení bezolovnatou pájkou. Uvádí se, že vytvrzovací teplota vodivých lepidel je zpravidla 100 °C až 180 °C. Existují však i některá vodivá lepidla, která se vytvrzují při pokojové teplotě, avšak jejich vytvrzení trvá v řádech dnů. Lze tedy konstatovat, že tyto teploty jsou vždy nižší než teplota tavení bezolovnatých pájecích slitin, která se pohybuje zpravidla v rozmezí 210 °C až 225 °C. Vzhledem k takto nižším teplotám jsou lepené spoje vhodné pro lepení teplotně citlivých součástek. [30], [31], [32]

Navzdory výše zmíněným výhodám se i tato technologie lepení potýká s několika problémy. Hlavní nevýhodou lepených spojů je zejména jejich elektrická vodivost, která je o dva až tři řády nižší než u pájených spojů. Lepený spoj má obvykle vodivost $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$. Další významnou nevýhodou jsou horší mechanické vlastnosti, cena a tepelná vodivost v porovnání s pájenými spoji. [30], [32]

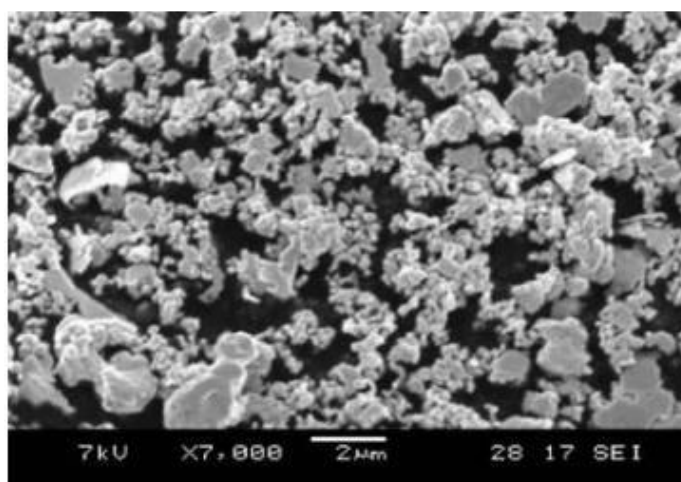
Elektricky vodivá lepidla jsou složena ze dvou složek. První složku tvoří vazební složka (binder). Tato složka je tvořena převážně epoxidovou pryskyřicí. Využívají se také ale pryskyřice polyimidové či silikonové. Hlavní funkcí této složky je vytvářet izolační matici, která má za úkol udržet vodivé částice vodivé složky na svém místě, tak aby nedocházelo k jejich pohybu. Pokud by došlo k pohybu vodivých částic, byla by tak výrazně ovlivněna vodivost lepeného spoje. Další funkcí vazební složky je také zajistit mechanické vlastnosti spoje a odolnost spoje vůči vnějšímu prostředí. Vazební složky mohou být jednosložkové či dvousložkové. Lepený spoj se v případě jednosložkové vazební složky vytvrzuje při teplotě 100 °C až 180 °C. Dvousložková vazební složka obsahuje kromě pryskyřice také tvrdidlo, přičemž

vytvrzení probíhá při nižší teplotě. [30], [32], [33], [34]

Druhou složku vodivého lepidla tvoří plnivo (filler). Tato složka slouží k zajištění elektrických vlastností (vodivost) a je tvořena vodivými částicemi, které mají nejčastěji tvar kuliček (viz *Obr. 15*) nebo šupinek (viz *Obr. 16*), jejichž velikosti jsou v řádu μm . Méně obvyklý tvar připadá nanotrubicím. [30], [33]



Obr. 15: Stříbrné nanokuličky, (převzato z [33]).



Obr. 16: Stříbrné šupinky, (převzato z [33]).

Jako vodivé částice jsou nejčastěji užívány částice ze stříbra (Ag). Lze také však použít i zlato (Au), nikl (Ni), uhlík (C), případně plastové pozlacené kuličky. Vodivá lepidla obsahující zlaté částice mají zpravidla nejlepší elektrické vlastnosti, avšak jsou velmi drahá. Lepidla, která obsahují jako plnivo zlaté či stříbrné částice, mají kromě výborné elektrické vodivosti také dobrou tepelnou vodivost, a proto jsou využívány v aplikacích, kde jsou tyto vlastnosti požadovány. Koncentrace vodivých částic ve vodivém lepidle se pohybuje v rozmezí 10 % až 80 %. [30], [32], [33], [34]

Dle této koncentrace je pak rozlišováno, zda se jedná o lepidla s anizotropní elektrickou vodivostí (ACA) či lepidla s izotropní elektrickou vodivostí (ICA). Rozdíl mezi těmito lepidly udává perkolační práh (viz *Obr. 17*), který je určen pomocí perkolační teorie. [30], [32], [34]



Obr. 17: Perkolační křivka, (převzato z [34]).

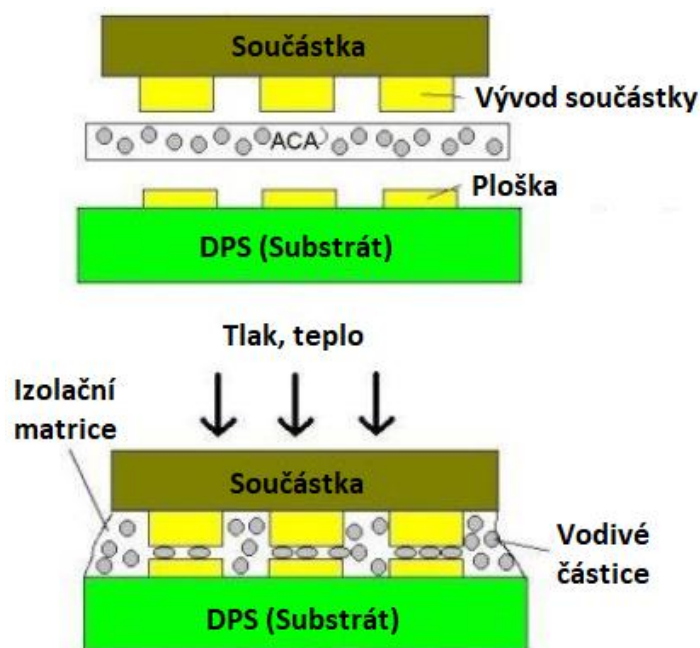
Perkolační teorie nám říká, že pokud je do polymerní matrice situováno dostatečné množství elektricky vodivých částic, pak se vazební složka transformuje z izolátoru na vodič. Toho je dosaženo pomocí spojitých vazeb částic plniva. Proběhne-li náhodné rozptýlení plniva do vazební složky, nedochází tak k žádné výrazné změně, není-li dosažena kritická koncentrace vodivých částic. Jakmile je dosaženo kritické koncentrace, začínají se tvořit řetězce z vodivých částic, které překlenují kompozit, a tím nastane výrazné snižování elektrického odporu. Tento bod, ve kterém je tohoto jevu docíleno, se nazývá perkolační práh. [32]

- **Anizotropní vodivá lepidla (ACA)**

Tento druh lepidel poskytuje elektrickou vodivost pouze ve směru kolmém na rovinu DPS. Ve směru rovnoběžném jsou tato lepidla nevodivá. Tento fakt je zapříčiněn malou koncentrací vodivých částic v lepidle. Koncentrace vodivých částic zpravidla tvoří 5 % až 20 % objemu, přičemž tyto částice kulovitěho tvaru dosahují velikosti 5 μm až 20 μm . Částice jsou v lepidle obvykle náhodně rozptýleny, existují ale i lepidla, ve kterých je plnivo rovnoměrně rozloženo. [30], [32], [33]

Princip těchto lepidel je značně vidět na *Obr. 18*. Během procesu nanášení je lepidlo umístěno mezi vývodem součástky a přípojovací ploškou. Propojení ACA je následně

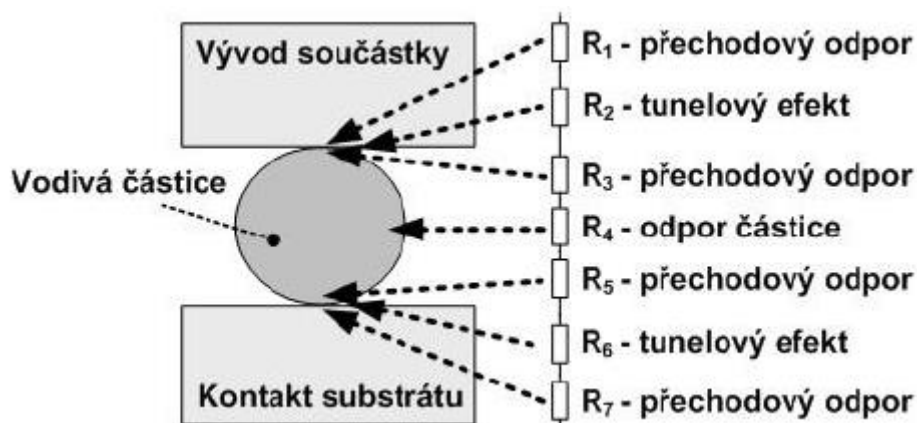
vytvořeno působením tlaku či tepla a vytvrzením lepidla. Samotné vytvrzování probíhá při 20 °C až 180 °C. Zvýšením teploty se matrice přemění na kapalinu s nízkou viskozitou, lepidlo tak může samovolně proudit ze spojů, což vede k vyplnění prostoru okolo kontaktů. Vodivé částice tak zůstanou zachyceny mezi kontakty, a tím dojde k vytvoření elektrického spojení. U těchto lepidel hraje roli především deformace vodivých částic, které jsou sevřeny mezi připojovací ploškou a samotným kontaktem součástky. Na výsledné vodivosti lepeného spoje vytvořeného ACA se podílejí nejrůznější mechanismy, které jsou uvedeny na *Obr. 19*. Vodivé částice jsou zde obsaženy mezi 8 % až 15 %. [30], [32], [33]



Obr. 18: Princip ACA, (převzato z [33]).

Anizotropně vodivá lepidla se převážně používají u velmi malých vývodů, přičemž lepidlo je nanášeno na celou plochu DPS pod součástkou a poté dojde k osazení součástky. Tato lepidla mohou být také dodávána ve formě fólie. Princip spočívá v přiložení fólie na DPS, přičemž u součástky, zpravidla integrovaného obvodu (IO), dochází vlivem zvýšené teploty a tlaku k jejímu namontování. Tato možnost také celkem zjednodušuje nanášení lepidla na DPS. [32], [33]

V porovnání s pájenými spoji, mají ACA také několik výhod. Teplota v porovnání s pájením je nižší, což je vhodné pro použití materiálů citlivých na teplo, a také není potřeba nanášení žádné ochranné vrstvy okolo kontaktů. Na druhou stranu mají oproti pájení větší proudovou vodivost a kontaktní odpor, což představuje značné nevýhody. [34]

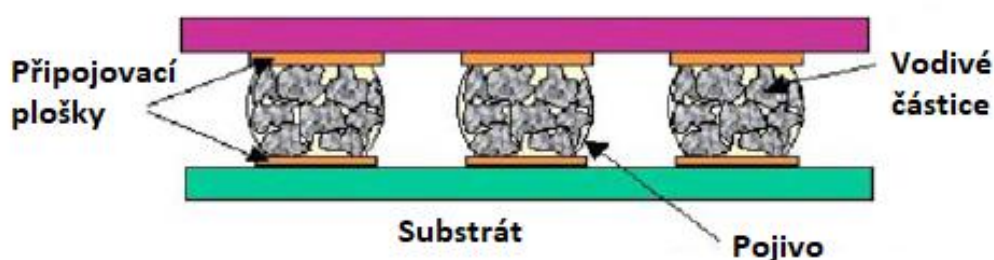


Obr. 19: Mechanizmy podílející se na vodivosti ACA, (převzato z [33]).

• Izotropní vodivá lepidla (ICA)

Tento druh lepidel lze považovat za přímou obdobu pájek, jelikož se také vyznačuje elektrickou vodivostí ve všech směrech. V některých publikacích je tento typ lepidel nazýván jako „polymerní pájka“. Na rozdíl od ECA se vyznačují výrazně vyšší koncentrací objemových částic, je uváděno 50 % až 80 % objemu lepidla. Velikost částic, zpravidla šupinkových, je naopak v porovnání s ECA menší (1 μm – 5 μm). [30], [32], [34]

Izotropní vodivá lepidla jsou nanášena pouze na připojovací plošky. Nejčastěji probíhá nanášení formou šablonového tisku, v některých případech je použit i dispensing. V další fázi je do lepidla osazena součástka a proběhne vytvrzení lepidla za pomoci tepla. Základní princip je zobrazen na Obr. 20. [23], [34]



Obr. 20: Princip ICA, (převzato z [34]).

Izotropní vodivá lepidla se kromě plniva skládají také z vazební složky. Nejčastěji jsou použity termoplasty nebo termosety. Mezi nejčteněji používaný termoplast se řadí polyimidová pryskyřice. Mezi termosety se naopak řadí epoxidová pryskyřice, která má zde největší

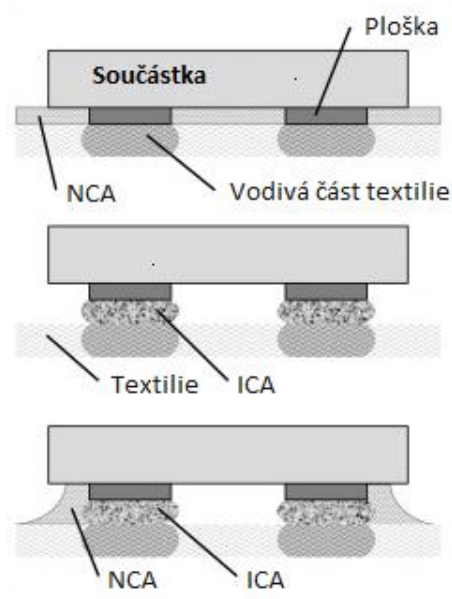
zastoupení, silikon či polyurethan. Hlavní výhodou těchto lepidel spočívá v poměrně snadné opravě vzniklého spoje. Mezi hlavní nevýhodu ICA patří degradace adheze při vyšších teplotách. Další nevýhodu mohou představovat rozpouštědla, která se během vytvrzení odpařují, a tím může dojít ke vzniku dutin (voidů) v lepeném spoji. Většina komerčních ICA je založena na termosetových pryskyřicích, jelikož poskytují dobré vlastnosti, jako jsou chemická odolnost, přilnavost a nízké náklady. [30], [32], [34]

Plnivo poskytuje kompozitu elektrickou vodivost díky kontaktu mezi vodivými částicemi, které mohou zahrnovat stříbro (Ag), zlato (Au), nikl (Ni), měď (Cu) a uhlík (C). Mezi nejběžněji používané vodivé plnivo patří stříbrné vločky, a to zejména kvůli vysoké vodivosti. Vodivá lepidla na bázi mědi a niklu nemají tak dobrou stabilitu jako stříbro, jelikož jsou snadno oxidována. ICA jsou považovány jako náhrada eutektických slitin cínu (Sn) a olova (Pb) v aplikacích určených pro povrchovou montáž (SMT) a mnoho dalších. ICA lze aplikovat pouze na místa, která mají být vodivá. K jakémukoliv dalšímu šíření lepidla by nemělo docházet. [30], [32], [34]

1.3.3 Nevodivé lepení

Vodivý lepený spoj lze realizovat i pomocí lepidla, které neobsahuje vodivé částice. Elektrické spojení je v tomto případě dosaženo přitisknutím kontaktů, které jsou vystaveny velkému tlaku. Následně dojde k zalití lepidla a vytvrzení. Výsledná kvalita spoje poté závisí na drsnosti povrchu kontaktů. Princip nanášení nevodivého lepidla je prakticky stejný jako v případě ACA. Nevodivá lepidla, zpravidla na bázi epoxidových pryskyřic, jsou nejčastěji produkována ve formě pasty a jsou naplněna SiO_2 (oxid křemičitý) nebo Al_2O_3 (oxid hlinitý), aby co možná nejvíce zlepšily jejich tepelnou vodivost. [34], [35], [36]

Pro kontaktování součástek na textilie se běžně používají tři způsoby lepení (viz *Obr. 21*), díky kterým dojde k elektrickému spojení. Prvním způsobem může být právě metoda nevodivého lepení, jejíž princip je popsán v předchozím odstavci. Další možností je použití ICA, popřípadě kombinace NCA a ICA. [35]



Obr. 21: Metody kontaktování na textilie, (převzato z [35]).

Využití nevodivých lepidel má i svoje výhody. Lepidlo nezpůsobuje zkrat a lze ho nanést na celou desku jako v případě ACA. Mezi další výhodou lze také zařadit vytvrzování při nízkých teplotách. Tato metoda se však potýká s horší spolehlivostí při vyšších teplotách, vlhkosti a při působení teplotního cyklu. [34], [36]

2 Experimentální část

V této části diplomové práce bude popsán celý proces výroby jednotlivých vzorků, ze kterých se posléze určí odpory mezi pájenými a lepenými spoji. Nejprve se budeme zabírat samotnou přípravou experimentu, tzn. přípravou vodivých stuh, způsobem kontaktování nulových rezistorů včetně měření odporů před navrženým klimatickým testem, až po konečné měření odporů po dobu 3 týdnů v klimatické komoře za přítomnosti oxidu siřičitého (SO_2) a sirovodíku (H_2S). Celkem budou popsány 4 typy vzorků, jež byly vyrobeny pomocí různých technologických procedur. Na závěr bude provedena interpretace výsledků experimentu každého jednotlivého typu vzorku a diskuse výsledků.

2.1 Příprava vodivé stuh

Pro samotný experiment bylo nejdříve nutné připravit vodivou stuhu. K tomuto experimentu byla použita speciální stuha vyrobená z postříbřených měděných vodivých drátů, které jsou do stuhy vsity. V prvním kroku byla stuha nejprve zkrácena na požadovanou délku. V našem případě byla zvolena taková délka, abychom na ni osadili 10 nulových SMD rezistorů 0R0. Rezistory byly ve všech případech osazeny na vyznačené vodivé dráhy (viz *Obr. 22*).

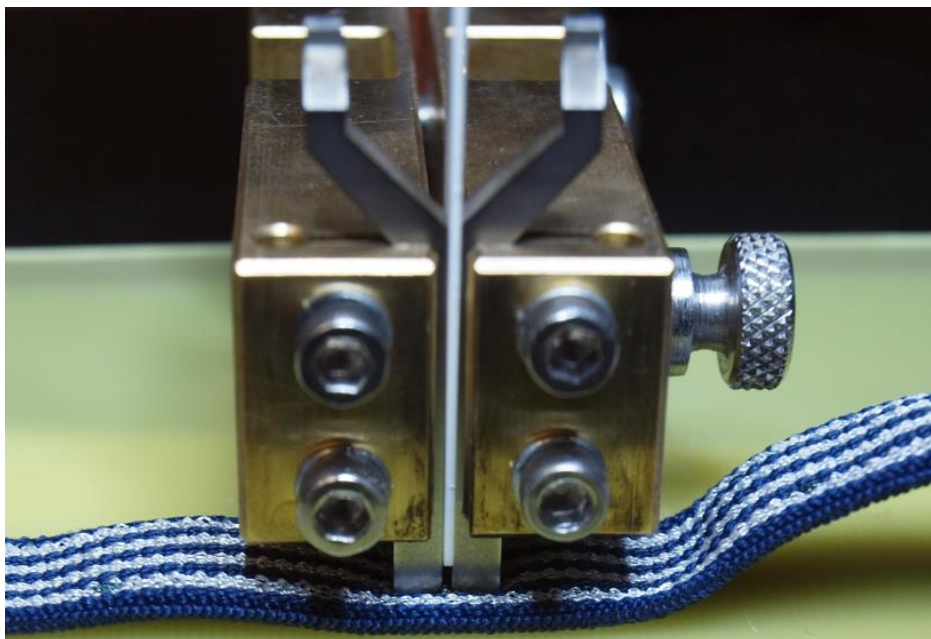


Obr. 22: Vodivá stuha s vyznačenými vodivými drahami

Před samotným osazením musel být však ještě proveden důležitý technologický proces. Zvýrazněné vodivé dráhy musely být přerušeny. Přerušování vodivých drah se provádí proto, aby bylo možné měřit elektrický odpor na jednotlivých rezistorech pomocí čtyřbodové metody, která bude popsána později.

Samotné přerušování bylo dosaženo přitlačením dvou elektrod na vodivou stuhu a následně došlo k aktivaci proudového pulzu. Vzhledem k takto vysokému proudu (500 A) došlo k přepálení vodivých vláken. Jelikož je stuha ve všech případech osazena 10 rezistory, bylo provedeno celkem 9 přerušování.

Proces přerušení vodivých vláken lze vidět na *Obr. 23*, kde je zachycen i samotný pulz. Samotný detail přerušených drah je pak zobrazen na *Obr. 24*.



Obr. 23: Proces přerušení vodivých vláken



Obr. 24: Přerušené vodivé dráhy

Po přerušení vodivých drah byla ještě provedena kontrola pomocí digitálního multimetru. Tímto krokem bylo skutečně ověřeno, zda opravdu došlo k jejich přerušení. Tento celý postup se opakoval celkem 4x.

Následující kapitola bude věnována přípravě jednotlivých vzorků a způsobů kontaktování vodivých stuh nulovými SMD rezistory 0R0.

2.2 Kontaktování součástek

V tomto experimentu byly použity tři způsoby kontaktování nulových SMD rezistorů 0R0. Byla zde využita metoda horkovzdušného pájení, elektricky vodivého lepení (ECA) a v neposlední řadě také metoda nevodivého lepení (NCA). Všechny zmíněné metody byly zvoleny s ohledem na nižší odolnost vodivých stuh vůči teplotnímu namáhání.

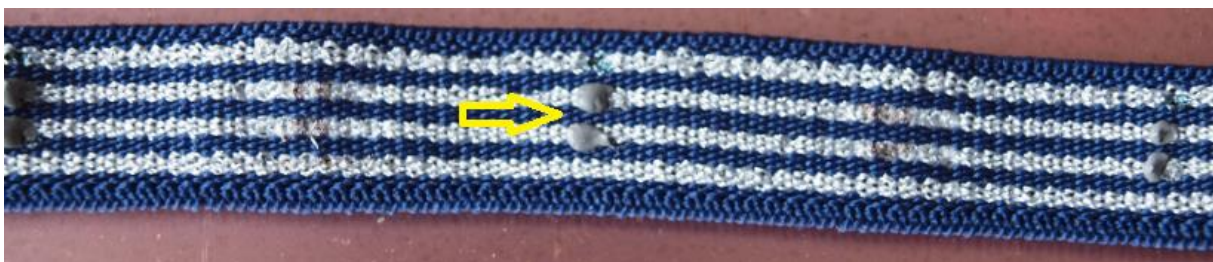
- **Pájení horkým vzduchem (Sn/Bi)**

U tohoto vzorku byla v první fázi vodivá stuha narovnána a posléze přichycena k pevné podložce (viz *Obr. 25*). Přichycením k pevné podložce bylo zajištěno, že se vodivá stuha během osazování nezkroutí, což by mohlo ovlivnit samotný výsledek experimentu.



Obr. 25: Narovnáání vodivé stuhý

V dalším kroku byla na vodivou stuhu pomocí dispenseru nanášena nízkoteplotní pájecí pasta o složení 58 % Bi, 42 % Sn od společnosti SHENMAO PF602-P26 (viz *Obr. 26*). Veškeré další informace o této pastě lze vyhledat v katalogovém listu [37]. Po nanášení pájecí pasty byly na vodivou stuhu osazeny pomocí pinzety nulové SMD rezistory. Poté již následovalo samotné pájení horkým vzduchem, které spočívá v jednoduchém principu. Proud horkého vzduchu proudí na místo, kde je nanášena pájecí pasta, přičemž samotné proudění trvá tak dlouho, dokud nedojde k zahřátí a přetavení [38]. V našem případě byla zvolena teplota pájení 160 °C.

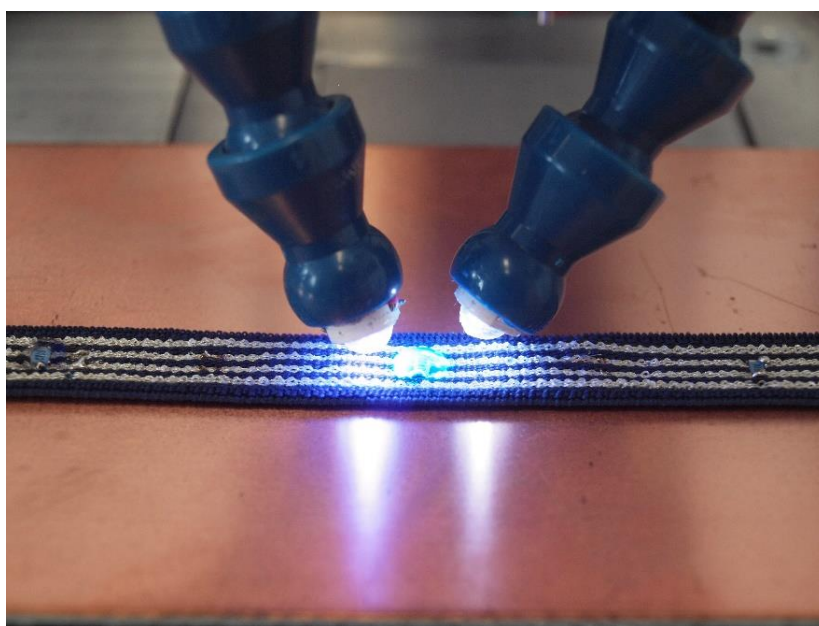


Obr. 26: Nanášená pájecí pasta PF602-P26

Jakmile byl dokončen proces pájení, následovalo zapouzdření všech rezistorů kapkou UV tvrditelného lepidla Loctite AA 3926.

Jedná se o jednosložkové lepidlo vyrobené firmou Loctite určené pro širokou škálu aplikací. Jeho výhoda spočívá v rychlém vytvrzení (řádově několik vteřin) při osvětlení UV zářením. Teplotní odolnost tohoto lepidla se pohybuje v rozmezí $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Viskozita je stanovena na $5500\text{ mPa}\cdot\text{s}$. [39]

Po procesu zapouzdření kapkou jednosložkového lepidla bylo nanesené lepidlo vytvrzeno pomocí UV záření (viz *Obr. 27*). Výsledný detail vzorku lze pak vidět na *Obr. 28*.



Obr. 27: Vytvrzení lepidla UV zářením

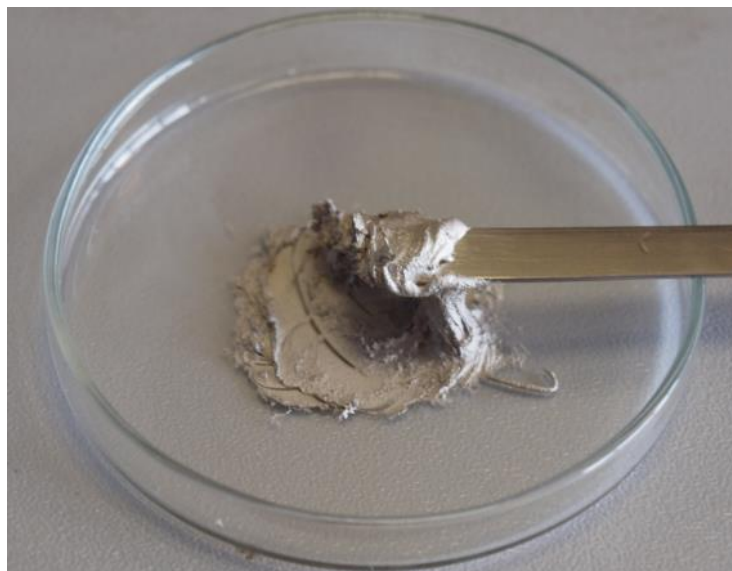


Obr. 28: Detail finálního vzorku

- **Elektricky vodivé lepení (8331S, DuPont ME902)**

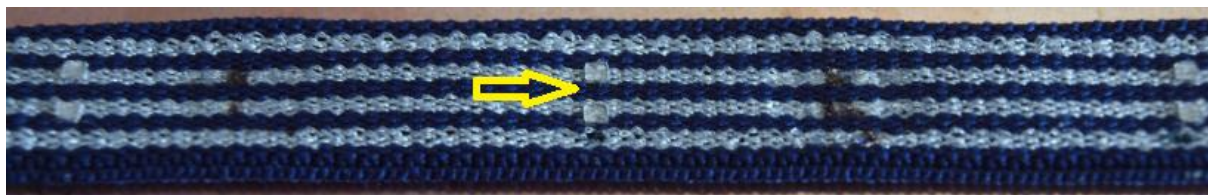
K tomuto účelu byla vybrána dvě elektricky vodivá lepidla. U prvního typu vzorku bylo vybráno dvousložkové lepidlo 8331S, které bylo zvoleno jako standardní elektricky vodivé lepidlo určené pro běžné aplikace. U druhého typu vzorku bylo vybráno jednosložkové lepidlo ME902 od výrobce DuPont, které je doporučováno pro aplikace, u kterých je potřeba zajistit flexibilitu vzniklého spoje.

Prvním krokem přípravy vzorku bylo smíchání obou složek lepidla 8331S v poměru 1,17 (A) : 1 (B). Takto připravené lepidlo mělo viskozitu tužší pasty (viz *Obr. 29*). Vazební složku lepidla tvoří epoxidová pryskyřice, vodivou složku pak stříbrné částice. Toto lepidlo může sloužit jako náhrada pájky pro vytváření vodivých spojení zejména tam, kde pájení není možné. Rezistivita tohoto lepidla má hodnotu $6 * 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$. [40]



Obr. 29: Lepidlo 8331S

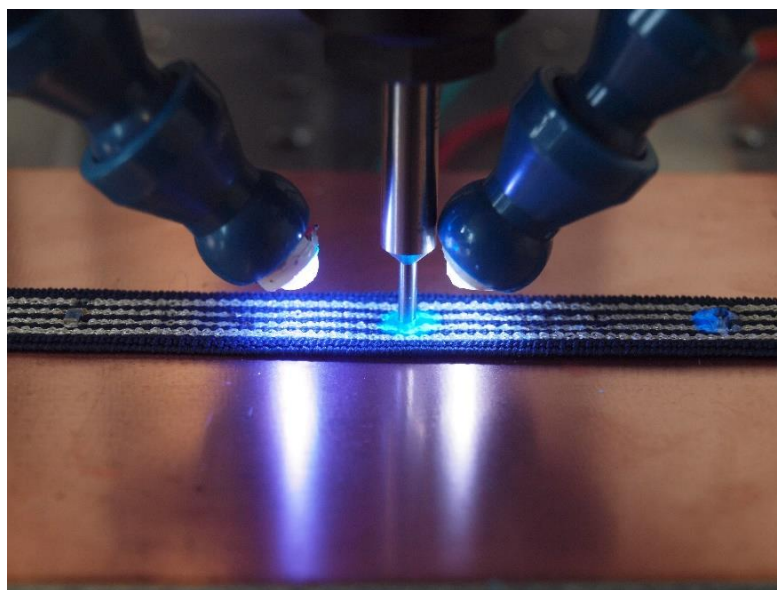
V následující fázi bylo lepidlo pomocí šablony o tloušťce 120 μm a těrky nanášeno na vodivou stuhu (viz *Obr. 30*). Poté již proběhlo samotné osazení rezistorů do lepidla. Jakmile byl tento proces dokončen, následovalo vytvrzení v peci na 130 $^{\circ}\text{C}$ po dobu 30 minut.



Obr. 30: Nanesené vodivé lepidlo 8331S

Po vytvrzení v peci bylo na každý jednotlivý rezistor nanášeno UV tvrditelné lepidlo Loctite AA 3926. Poté byla součástka přitlačena trnem o celkové hmotnosti 3 kg a došlo k vytvrzení lepidla UV zářením (viz *Obr. 31*). Následně byla součástka zapouzdřena stejným lepidlem (Loctite AA 3926). Výsledný detail vzorku je pak zobrazen na *Obr. 32*.

Tento postup byl zvolen s ohledem na zvolený typ lepidla, jelikož toto lepidlo neposkytovalo dostatečný kontakt při použití na vodivé stuze. Zároveň byly tímto způsobem součástky lépe přitlačeny k vodivé stuze, čímž dochází k lepší vodivosti spojů.



Obr. 31: Přítlak trnem a vytvrzení UV zářením

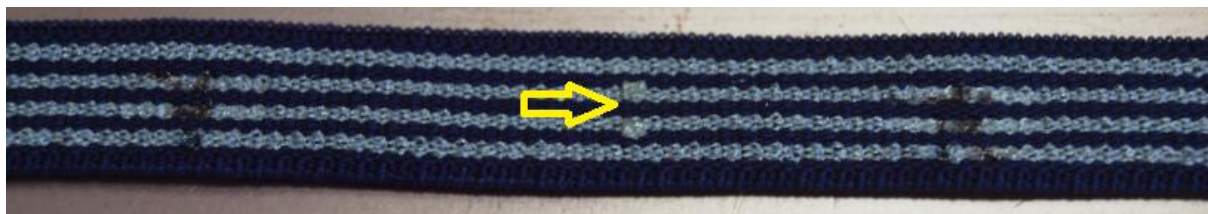


Obr. 32: Detail finálního vzorku

Pro druhý vzorek bylo vybráno lepidlo DuPont ME902. Jedná se o elektricky vodivé jednosložkové lepidlo, jehož složení poskytuje dobrou přilnavost mezi SMD součástkami a substrátem. Viskozita se pohybuje v rozmezí 40 – 90 Pa.s. Hodnota rezistivity je pak stanovena na 100 - 150 m Ω /sq/mil. [41]

Prvním krokem přípravy tohoto vzorku bylo nanášení lepidla šablonovým tiskem na vodivou stuhu (viz *Obr. 33*). Dále byly do lepidla osazeny součástky a proběhlo vytvrzení v peci na 120 °C po dobu 20 minut.

Po vytvrzení bylo na rezistory nanášeno UV tvrditelné lepidlo (Loctite AA 3926). Následně byla součástka opět přitlačena trnem o hmotnosti 3 kg a současně bylo lepidlo vytvrzeno UV zářením (viz *Obr. 31*). Poté byla součástka zapouzdřena stejným lepidlem (AA 3926).



Obr. 33: Nanesené vodivé lepidlo DuPont ME902

- **Nevodivé lepení (Loctite AA 3926)**

U tohoto typu vzorku bylo vybráno nevodivé lepidlo AA 3926 od výrobce Loctite, které se vytvrzuje UV zářením, čehož využíváme u každého typu vzorku. Prvním krokem přípravy vzorku bylo nanášení kapky tohoto lepidla na vodivou stuhu (viz *Obr. 34*) a osazení součástek pomocí pinzety.



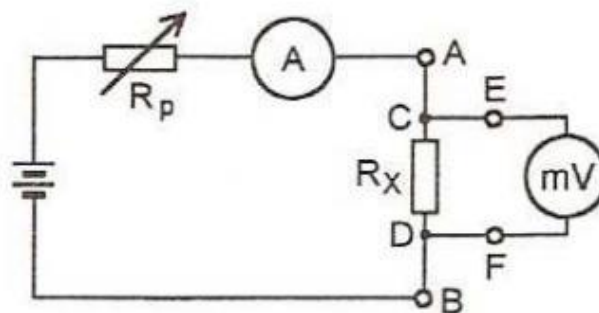
Obr. 34: Nanesené UV tvrditelné lepidlo Loctite AA 3926

V následující fázi byl opět proveden přitlak trnem (3 kg) a lepidlo bylo vytvrzeno UV zářením (viz *Obr. 31*). Po výrobě byly opět jednotlivé součástky zapouzdřeny kapkou stejného lepidla (AA 3926).

2.3 Měření elektrického odporu

U všech vyrobených vzorků byl změřen elektrický odpor za pomoci čtyřbodové (Kelvinovy) metody. Elektrický odpor byl změřen jak před navrženým klimatickým testem, tak i v pravidelných intervalech v průběhu testu.

Čtyřbodová metoda je určena k měření malých odporů. Eliminuje vliv odporu přívodu a přechodových odporů svorek. Princip spočívá v procházení konstantního proudu měřeným vzorkem, který na něm vytváří úbytek napětí. Toto napětí je pak přímo úměrné velikosti odporu. Schématické uspořádání je zobrazeno na *Obr. 35*. [42], [43]



Obr. 35: Schéma zapojení čtyřbodové metody, (převzato z [43]).

Z obrázku je patrné, že měřený odpor je připojen ke zdroji proudu na svorkách AB (proudové svorky). K napěťovým svorkám EF je připojen voltmetr a mezi svorkami C a D je definován měřený rezistor (R_x). Voltmetrem není měřen úbytek napětí na proudových svorkách, proto nedochází ke zkreslení výsledku měření. Lze také zanedbat přechodový odpor kontaktů E a F , jelikož tento odpor, jenž je v sérii s voltmetrem, má velmi malou hodnotu v porovnání se vstupním odporem voltmetru. [43]

2.4 Navržený klimatický test

V tomto experimentu byl navržen klimatický test dle normy ČSN EN 60068-2-60 ed. 2. K našemu účelu byla zvolena metoda č. 1, tedy zkouška s využitím oxidu siřičitého (SO_2) a sirovodíku (H_2S). Celková délka testu byla dle normy stanovena na 21 dnů, přičemž měření elektrického odporu u každého typu vzorku probíhalo každých 7 dnů. Parametry tohoto testu včetně objemové koncentrace plynů jsou uvedeny v *Tab. 10*.

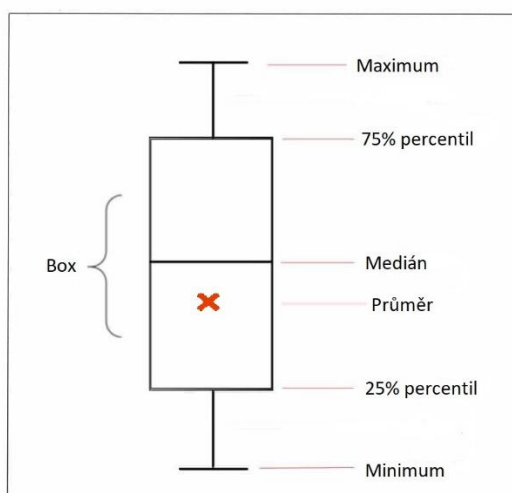
Tab. 10: Parametry testu

H_2S	100 ppb
SO_2	500 ppb
Teplota	25 °C
Relativní vlhkost	75 %
Počet výměn atmosféry v boxu	6x / h

2.5 Interpretace výsledků experimentu

Jak bylo popsáno v kapitole 2.3, byl na každém jednotlivém vzorku změřen elektrický odpor před klimatickým testováním a v průběhu klimatického testování. Veškeré naměřené hodnoty elektrického odporu u každého jednotlivého typu vzorku jsou zobrazeny v tabulkách v příloze A.

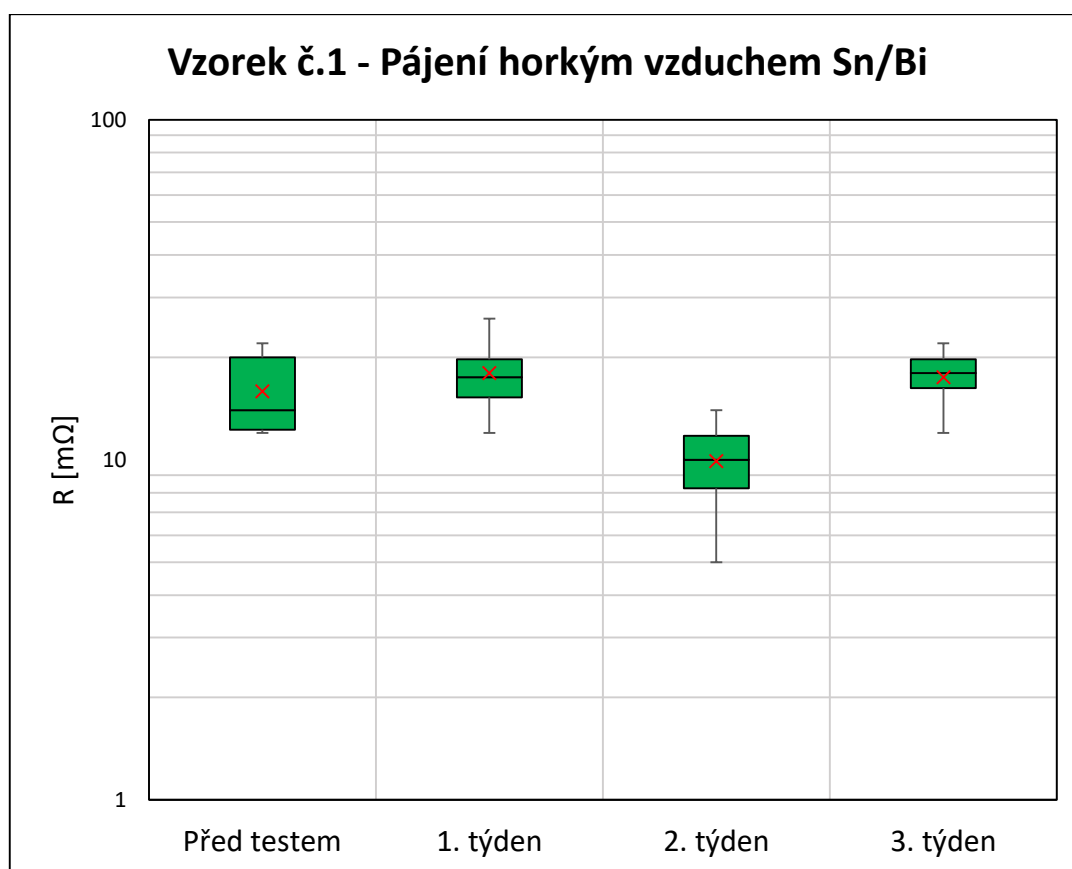
Vzhledem k poměrně většímu množství hodnot, jsou výsledky experimentu rozděleny do několika částí. Pro každý jednotlivý vzorek bylo pomocí čtyřbodové metody změřeno deset hodnot elektrického odporu ($m\Omega$). Tyto hodnoty byly následně statisticky zpracovány do boxových (krabicových) grafů. K vytvoření těchto grafů musela být vypočítána maximální hodnota, horní kvartil, medián, průměr, dolní kvartil a minimální hodnota. Výpočty těchto hodnot jsou uvedeny v příloze C. Zpracování těchto hodnot je pak provedeno dle legendy zobrazené na *Obr. 36*.



Obr. 36: Legenda statistického zpracování

2.5.1 Výsledky horkovzdušného pájení (Sn/Bi)

Výsledky pájených spojů (viz Obr. 37) na vodivé textilní stuže nám ukazují, že elektrický odpor pájených vzorků na textilních stuhách se pohyboval mezi 5 až 30 mΩ. Jedná se o hodnotu dvou spojů a samotného rezistoru. Přesné hodnoty elektrického odporu jsou uvedeny v příloze A. Výsledky dále ukazují, že rozptyl naměřených hodnot je poměrně malý, přičemž hodnoty elektrického odporu se významně nemění po celou dobu klimatického testování za přítomnosti kyselých dešťů v emisní komoře. Z obrázku je dále patrné, že u hodnot měřených v 2. týdnu došlo k poklesu elektrického odporu. Příčinou tohoto poklesu je pravděpodobně změna odporu u některých spojů, která mohla nastat při manipulaci se stuhami.



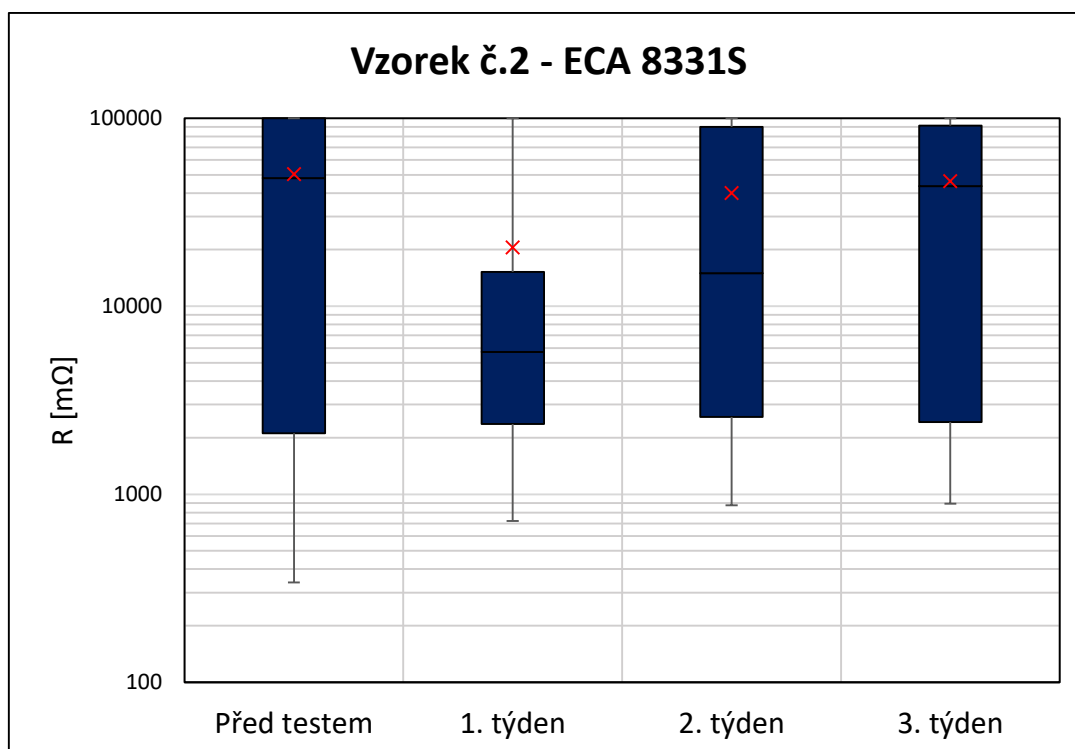
Obr. 37: Statisticky zpracované hodnoty elektrického odporu (Sn/Bi)

2.5.2 Výsledky lepidla 8331S

Výsledky lepených spojů (viz *Obr. 38*) pro dvousložkové lepidlo 8331S na vodivé textilní stuže nám ukazují, že elektrický odpor lepených vzorků na textilních stuhách se pohyboval mezi 340 až 100 000 mΩ. Z výsledků je tedy patrné, že rozptyl naměřených hodnot je velice vysoký a hodnoty elektrického odporu se významně mění po celou dobu realizovaného testu v emisní komoře. Navíc téměř u poloviny hodnot nebyl změřen žádný elektrický odpor. Pro zlepšení vypovídající hodnoty grafu byla hodnota elektrického odporu vybraných spojů změněna na 100 000 mΩ. Jednalo se o spoje, u kterých byla naměřená hodnota elektrického odporu velmi vysoká (MΩ) či nad rozsah měřicího přístroje.

Z obrázku je patrné, že u hodnot naměřených v 1. týdnu došlo k poklesu elektrického odporu. Příčinou tohoto poklesu je pravděpodobně změna velmi vysokého odporu některých spojů při manipulaci se stuhami. Při měření elektrického odporu jsou totiž vodivé stuhy narovnávány, a tím tak dochází ke změně délky vodivých drah. Z toho nám tedy vyplývá, že odpor se mění s natažením stuhy.

Z výsledků je však patrné, že elektrický odpor lepených spojů je velmi vysoký a použití tohoto lepidla pro tvorbu kontaktu na vodivé stuhy je zcela nevhodné.

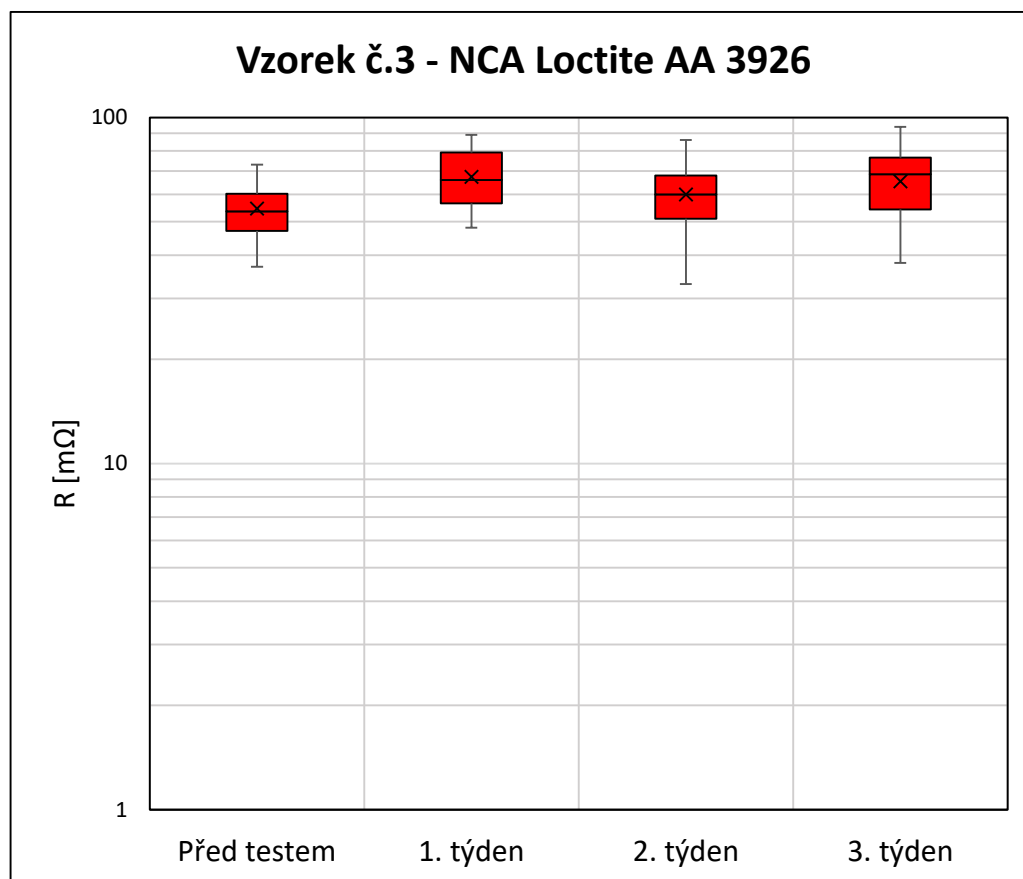


Obr. 38: Statisticky zpracované hodnoty elektrického odporu (8331S)

2.5.3 Výsledky lepidla Loctite AA 3926

Výsledky lepených spojů (viz *Obr. 39*) pro nevodivé lepidlo na vodivé textilní stuze nám ukazují, že elektrický odpor lepených vzorků na textilních stuhách se pohyboval mezi 30 až 100 mΩ. Výsledky dále ukazují, že rozptyl naměřených hodnot je celkem malý, přičemž hodnoty elektrického odporu takto lepených spojů jsou oproti pájeným spojům výrazně větší po celou dobu klimatického testu v emisní komoře. Důvodem použití tohoto lepidla bylo prozkoumat možnosti a vlastnosti nevodivého lepidla a porovnat je s lepidly vodivými.

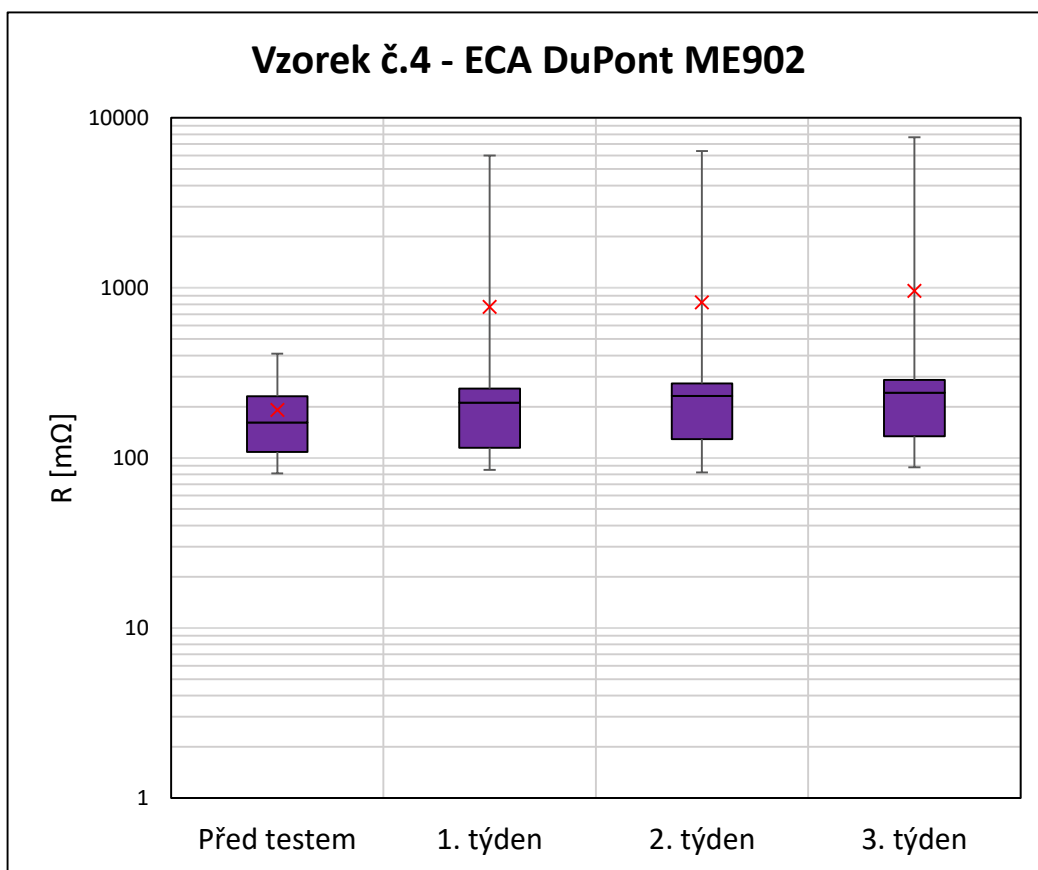
Na základě výsledků bylo zjištěno, že nevodivé lepidlo může být teoreticky použito jako náhrada elektricky vodivých lepidel, jelikož bylo dosaženo výrazně menších hodnot elektrického odporu v porovnání s lepidlem 8331S a také bylo zajištěno dobré vodivé spojení součástek s vodivou stuhou. Toto lepidlo lze tedy doporučit pro některé aplikace.



Obr. 39: Statisticky zpracované hodnoty elektrického odporu (NCA Loctite AA 3926)

2.5.4 Výsledky lepidla DuPont ME902

Výsledky lepených spojů (viz *Obr. 40*) pro jednosložkové lepidlo na vodivé textilní stuzce nám ukazují, že elektrický odpor lepených vzorků na textilních stuhách se pohyboval mezi 90 až 8 000 mΩ. Výsledky dále ukazují, že rozptyl naměřených hodnot je v porovnání s dvousložkovým lepidlem výrazně menší i v průběhu klimatického testování v emisní komoře. V porovnání s dvousložkovým lepidlem bylo tedy dosaženo „lepších“ hodnot elektrického odporu. Elektrický odpor byl také změřen ve všech případech. Medián roste v průběhu testování pouze mírně, což také značí mnohem „lepší“ výsledky než v případě lepidla 8331S.

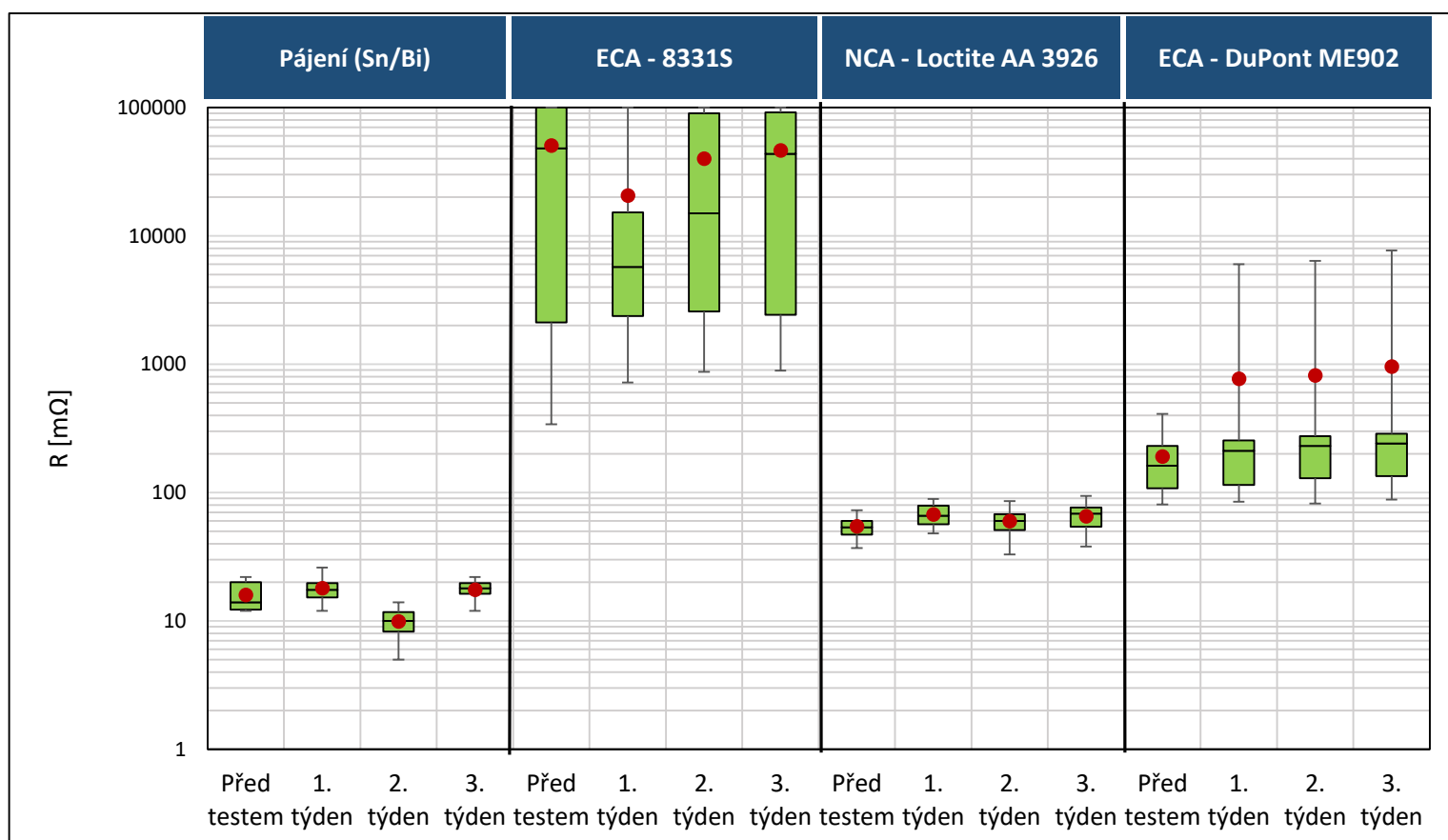


Obr. 40: Statisticky zpracované hodnoty elektrického odporu (DuPont ME902)

2.6 Diskuse výsledků

Na základě všech výsledků experimentu (viz *Obr. 41*) je možné usuzovat, že kontaktování součástek nízkoteplotním pájením na vodivé textilní stuhy je možné a elektrický odpor takto vzniklých spojů je dostatečně nízký a stabilní i v průběhu provedeného testu zrychleným stárnutím. Kontaktování součástek metodou nevodivého lepení na vodivé textilní stuhy přineslo „podobné“ výsledky jako v případě pájených spojů. Nicméně odpory takto vzniklých lepených spojů byly i v průběhu realizovaného testu v emisní komoře přibližně 3 – 4x větší než v případě pájených spojů. Z tohoto důvodu je tedy nízkoteplotní pájení mnohem efektivnější metoda pro kontaktování součástek s vodivou textilní stuhou.

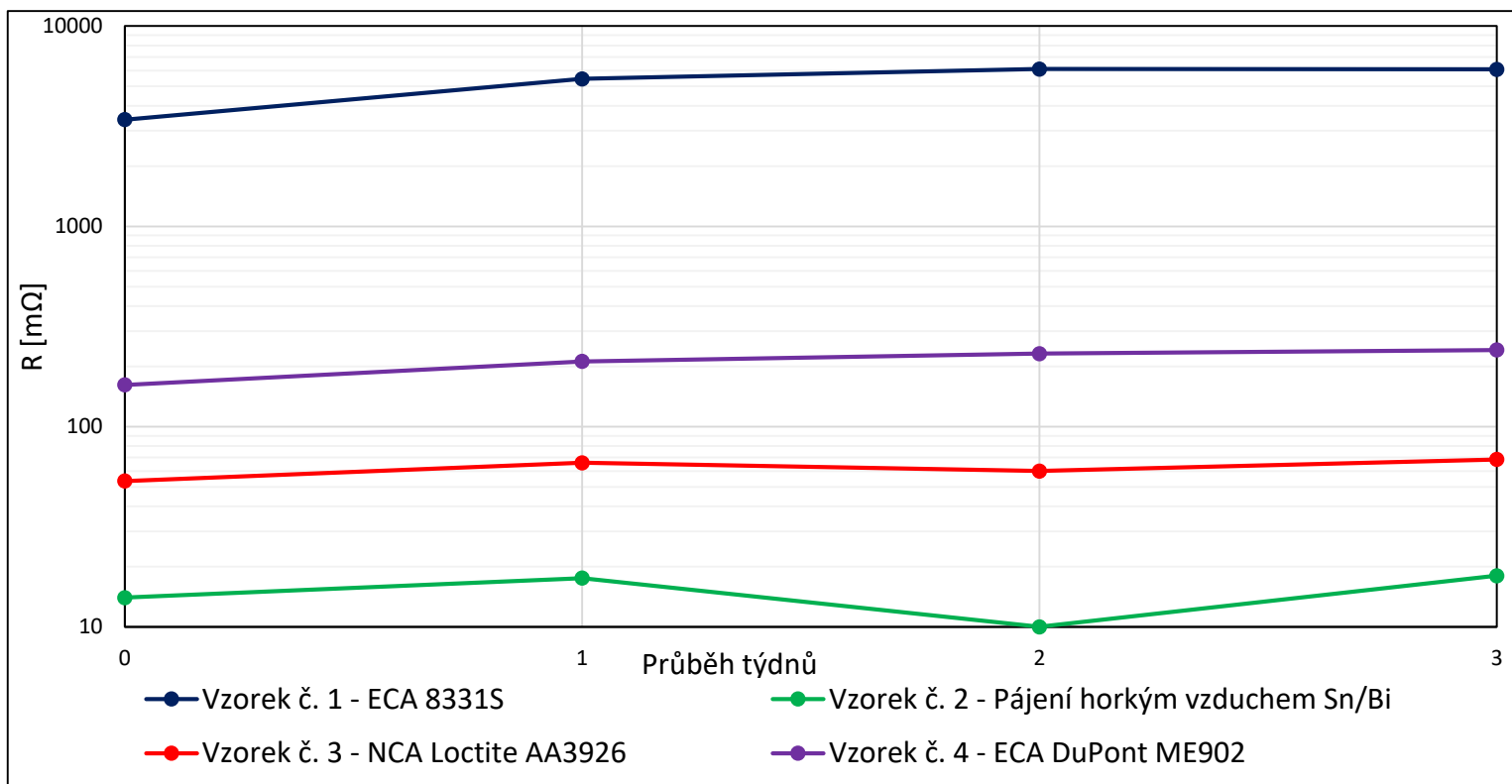
Kontaktováním součástek metodou vodivého lepení na vodivé textilní stuhy bylo dosaženo nejhorších výsledků. Elektrický odpor lepených spojů byl velmi vysoký a nestabilní i v průběhu provedeného testu zrychleným stárnutím. Dvousložkové lepidlo 8331S kromě velkých hodnot elektrického odporu také neposkytovalo dostatečnou flexibilitu lepených spojů na vodivé stuze. Z obrázku je jasně patrné, že vodivé lepidlo DuPont ME902 dopadlo v porovnání s lepidlem 8331S výrazně lépe nejen kvůli nižším hodnotám elektrického odporu, ale také pravděpodobně kvůli mnohem větší flexibilitě, kterou udává výrobce.



Obr. 41: Statisticky zpracované hodnoty elektrického odporu všech vzorků

Pro ověření výsledků byl ještě vytvořen graf mediánů každého jednotlivého typu vzorku v průběhu klimatického testování v emisní komoře (viz *Obr. 42*). Graf tedy jasně potvrzuje naši hypotézu, že nejhorší výsledky přinesla metoda vodivého lepení jak v případě použití dvousložkového lepidla 8331S, tak i lepidla jednosložkového, jelikož takto vytvořené lepené spoje dosahovaly velkých hodnot elektrického odporu.

Naopak nízkoteplotní pájení přineslo daleko lepší výsledky v porovnání s ostatními typy vzorků. Na obrázku je vidět i značný pokles elektrického odporu v průběhu 2. týdne realizovaného klimatického testu v emisní komoře.



Obr. 42: Porovnání mediánů všech typů vzorků

Závěr

Tato práce je zaměřena na problematiku klimatického testování a stárnutí vodivých spojů, především pro použití na vodivé textilní stuhu. V předložené práci jsou uvedeny teoretické informace o klimatickém testování a jsou zde popsány jednotlivé klimatické a teplotní testy dle normy ČSN EN 60068-2. Dále zde byly uvedeny teoretické informace o klimatických komorách. V další části této práce je zmapována problematika kontaktování součástek se substráty. Jsou zde uvedeny teoretické informace z oblasti měkkého pájení, vodivého a nevodivého lepení. V případě vodivého lepení je zde popsána problematika perkolační teorie, která rozděluje elektricky vodivá lepidla na anizotropní a izotropní. Problematika těchto lepidel je zde také popsána v teoretické rovině spolu s metodou nevodivého lepení a jeho způsobem použití. Dále zde byl navržen klimatický test dle normy ČSN EN 60068-2-60 ed.2 pro zjištění klimatických vlivů na vlastnosti pájených a lepených spojů, který byl využit při realizaci samotného experimentu. Tyto vlivy jsou testovány s ohledem na elektrický odpor vzniklých spojů. Je zde také popsána čtyřbodová metoda měření elektrického odporu, která je též součástí experimentu.

Po dokončení rešeršní činnosti byl na základě teoretických informací navržen a realizován experiment s použitím elektricky vodivých lepidel, nízkoteplotního pájení a nevodivého lepení. V tomto experimentu byly navrženy čtyři typy vzorků. U prvního typu vzorku byly nulové SMD rezistory kontaktovány pomocí nízkoteplotního pájení na vodivou textilní stuhu. Pro realizaci elektricky lepených spojů byla vybrána lepidla 8331S od společnosti MG Chemicals a ME902 od společnosti DuPont. V případě nevodivého lepení bylo vybráno UV tvrditelné lepidlo Loctite AA 3926. Dále je zde popsána samotná výroba vzorků a postup experimentu. Všechny vyrobené vzorky byly vystaveny zrychlenému stárnutí za přítomnosti kyselých dešťů v emisní komoře po dobu 21 dnů, jak udává norma.

Poslední část této práce je zaměřena na interpretaci výsledků experimentu a jejich diskusi. Ze zmíněných výsledků je patrné, že pájené spoje mají nejmenší elektrický odpor, který je stabilní i v průběhu provedeného testu zrychleným stárnutím v emisní komoře. Lepené spoje, zejména lepidlo 8331S přineslo velmi špatné výsledky, což odpovídá jeho velmi vysokým, nestabilním hodnotám odporů a špatnou flexibilitou na daném substrátu. V porovnání s tímto lepidlem dopadlo lepidlo DuPont ME902 podstatně lépe, což dokazují nižší hodnoty elektrického odporu a pravděpodobně také větší flexibilita vzniklých spojů na daném substrátu. Lepené spoje vytvořené nevodivým lepidlem dosahují lepších výsledků v porovnání s oběma

vodivými lepidly. Tento fakt nám opět garantují nižší hodnoty elektrického odporu. Lze tedy konstatovat, že nevodivé lepidlo může být v některých případech použito jako náhrada elektricky vodivých lepidel. Výsledky experimentu také ukázaly, že ačkoliv elektrický odpor v průběhu realizovaného klimatického testu zrychleným stárnutím spíše rostl, tak kontaktování součástek nízkoteplotním pájením a nevodivým lepením je za určitých okolností možné. Kontaktování součástek metodou vodivého lepení se s tímto závěrem však neslučuje. Lze také konstatovat, že velký vliv na kvalitu výsledného spoje má i samotný materiál substrátu a jeho manipulace s ním.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *What is Climatic Testing? | NTS News Center* [online]. [vid. 2020-10-11]. Dostupné z: <https://www.nts.com/ntsblog/what-is-climatic-testing/>
- [2] *Teslab | climatic test* [online]. [vid. 2020-10-11]. Dostupné z: <https://teslab.it/en/lab/climatic-test-room/>
- [3] *Zkoušky vlivu prostředí* [online]. [vid. 2020-11-16]. Dostupné z: <http://www.abegu.cz/zkousky-vlivu-prostredi.html>
- [4] *ČSN EN 60068-1 ed. 2 Zkoušení vlivů prostředí - Část 1: Obecně a návod*. 32 stran. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [5] *ČSN EN 60068-2-1 ed. 2 Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-1: Zkoušky - Zkouška A: Chlad*. 16 stran. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [6] *ČSN EN 60068-2-2 Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-2: Zkoušky - Zkouška B: Suché teplo*. 16 stran. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [7] *ČSN EN 60068-2-14 ed. 2 Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-14: Zkoušky - Zkouška N: Změna teploty*. 20 stran. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [8] *Thermal Shock Testing | Oneida Research Services, Inc.* [online]. [vid. 2020-10-26]. Dostupné z: <https://www.orlabs.com/services/environmental-testing/thermal-shock-testing/>
- [9] *ČSN EN 60068-2-30 ed. 2 Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-30: Zkoušky - Zkouška Db: Vlhké teplo cyklické (cyklus 12 h + 12 h)*. 16 stran. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [10] *Introduction to Thermal Cycling Life Testing* [online]. [vid. 2020-10-18]. Dostupné z: <https://accendoreliability.com/introduction-thermal-cycling-life-testing/>
- [11] FRED A, Mike a Paul REID. Thermal cycle testing of PWBs - Methodology. *IPC APEX Expo 2009* [online]. 2009, **5**, 3079–3096. Dostupné z: https://www.circuitinsight.com/pdf/thermal_cycle_testing_ipc.pdf
- [12] *ČSN EN 60068-2-38 Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-38: Zkoušky - Zkouška Z/AD: Složená cyklická zkouška teplotou a vlhkostí*. 16 stran. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [13] *ČSN EN 60068-2-60 ed.2 Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-60: Zkoušky - Zkouška Ke: Korozní zkouška proudící směsí plynů*. 20 stran. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [14] *ČSN EN 60068-2-78 Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-78: Zkoušky - Zkouška Cab: Vlhké teplo konstantní*. 12 stran. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

- [15] *Environmental Chambers - an overview | ScienceDirect Topics* [online]. [vid. 2020-12-27]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/environmental-chambers>
- [16] *How does an Environmental Chamber Work? – FDM – Environment Makers* [online]. [vid. 2020-12-27]. Dostupné z: <https://www.dellamarca.it/en/how-does-an-environmental-chamber-work/>
- [17] *Practical guide to the selection of a climatic chamber* [online]. [vid. 2020-10-13]. Dostupné z: <https://acs.angelantoni.com/en/resources/practical-guide-selection-climatic-chamber>
- [18] *RICE - Regionální inovační centrum elektrotechniky - Klimatické a tepelné zkoušky* [online]. [vid. 2020-11-16]. Dostupné z: http://www.rice.zcu.cz/cz/services/environment/services/clima_tests.html
- [19] *VCC³ - Corrosion Test Chambers - Test Chambers - Simultech* [online]. [vid. 2021-01-29]. Dostupné z: <https://www.simultech.com.au/vcc>
- [20] *Chambers* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.weiss-technik.com/fileadmin/Redakteur/Mediathek/Broschueren/WeissTechnik/Umweltsimulation/Voetsch/Voetsch-Technik-VC3-VCS3-EN.pdf>
- [21] *Vötsch Technik – Test chambers - Climate chamber – Amtest, test and measurement* [online]. [vid. 2021-01-29]. Dostupné z: <https://klimakamra.hu/en/label/votsch-technik-test-chambers>
- [22] WASSINK, R J Klein. *Soldering in Electronics: A Comprehensive Treatise on Soldering Technology for Surface Mounting and Through-hole Techniques*. 1989. ISBN 9780901150240.
- [23] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice, pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [24] KALAS, David, Stanislav SUCHY, Jan KALCIK, Jan REBOUN, Radek SOUKUP a Ales HAMACEK. Contacting of SMD Components on the Textile Substrates. In: *2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* [online]. B.m.: IEEE, 2020, s. 1–6 [vid. 2021-05-02]. ISBN 978-1-7281-6773-2. Dostupné z: [doi:10.1109/ISSE49702.2020.9120911](https://doi.org/10.1109/ISSE49702.2020.9120911)
- [25] *Pájený spoj | SMTcentrum - služby v oblasti pájení* [online]. [vid. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/pajeny-spoj/>
- [26] *Soldering Flexible Circuits | All Flex* [online]. [vid. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.allflexinc.com/blog/soldering-flexible-circuits/>
- [27] *Soldering to Flex - Engineering Technical -PCBway* [online]. [vid. 2021-04-30]. Dostupné z: https://www.pcbway.com/blog/Engineering_Technical/Soldering_to_Flex.html

- [28] *Olovnaté a bezolovnaté pájky* | *KONDIK.cz* [online]. [vid. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.kondik.cz/blog/-olovnata-a-bezolovnata-pajka/>
- [29] *185/2001 Sb. Zákon o odpadech* [online]. [vid. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [30] *Náhrada olova v pájce - PDF Stažení zdarma* [online]. [vid. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12944059-Nahrada-olova-v-pajke.html>
- [31] *Electrically conductive adhesive* | *Panacol-Elosol GmbH* [online]. [vid. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.panacol.com/adhesive-glue/electrically-conductive-glue>
- [32] SANCAKTAR, Erol a Lan BAI. Electrically Conductive Epoxy Adhesives. *Polymers* [online]. 2011, **3**(1), 427–466. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym3010427
- [33] MACH, Pavel. Modifikovaná elektricky vodivá lepidla. *Electroscope* [online]. 2009, **II**, 4. Dostupné z: http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2009/cislo2_2009_Diagnostika/r3c2c7.pdf
- [34] LI, Yi a C.P. WONG. Recent advances of conductive adhesives as a lead-free alternative in electronic packaging: Materials, processing, reliability and applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports* [online]. 2006, **51**(1–3), 1–35. ISSN 0927796X. Dostupné z: doi:10.1016/j.mser.2006.01.001
- [35] *Nonconductive Adhesive - an overview* | *ScienceDirect Topics* [online]. [vid. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nonconductive-adhesive>
- [36] URBÁNEK, Jan a Edvard KLABAČKA. *Technologie Elektrických Zařízení*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997.
- [37] ITEM, Test, Test RESULT a Test METHOD. FORMOSA No- No - Clean Solder Paste Model : PF602-P26 [online]. 2011, 29–31. Dostupné z: [https://www.daycounter.com/LabBook/ShenMao/PF602-P26\(TDS-E03\).pdf](https://www.daycounter.com/LabBook/ShenMao/PF602-P26(TDS-E03).pdf)
- [38] *Tools and Techniques for Hot Air Soldering Surface-Mount Components - Projects* [online]. [vid. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/projects/tools-techniques-hot-air-soldering-surface-mount-components/>
- [39] AKRYL, Technologie, Fluorescence POZITIVN, Viskozita ST, Aplikace LEPEN, Produkt LOCTITE, Protokolem Henkel ISO, Vlastnosti NEVYTVRZEN a H O MATERI. Loctite ® aa 3926™ [online]. 2015, 6–8. Dostupné z: <https://www.officentrum.eu/gallery/downloads/572.pdf>
- [40] CONDUCTIVE, Silver a Epoxy ADHESIVE. Silver conductive epoxy adhesive. *Reinforced Plastics* [online]. 2019, **63**(4), 177. ISSN 00343617. Dostupné z: doi:10.1016/j.repl.2019.06.053
- [41] DUPONT. DuPont™ ME902. *Technical Datasheet* [online]. 2019, (K-29896), 1–2. Dostupné z: <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/products/ei-transformation/documents/ME902.pdf>
- [42] *Měření napětí a proudu* [online]. [vid. 2021-04-02]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap4/4_1.html

- [43] BODY, D. Měření malých odporů čtyřvodičovou metodou [online]. 2013, **3**, 1–2.
Dostupné z: <https://nanoed.tul.cz/>

Přílohy

Příloha A - Naměřené hodnoty elektrického odporu

Před testem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Pájení (Sn/Bi)</i>	22	21	12	14	12	14	12	22	17	13
<i>ECA (8331S)</i>	600	340	X	820	X	X	X	76000	20000	6000
<i>NCA (Loctite AA 3926)</i>	45	73	51	37	61	50	69	56	46	58
<i>ECA (DuPont ME 902)</i>	410	105	118	140	340	202	81	183	240	91

1. týden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Pájení (Sn/Bi)</i>	19	26	24	20	17	18	12	16	13	15
<i>ECA (8331S)</i>	2100	720	X	8500	60000	6000	17500	3000	5450	2160
<i>NCA (Loctite AA 3926)</i>	80	82	63	55	77	50	89	61	48	69
<i>ECA (DuPont ME 902)</i>	6000	96	125	219	364	250	85	204	257	111

2. týden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Pájení (Sn/Bi)</i>	14	12	10	9	8	10	11	12	8	5
<i>ECA (8331S)</i>	1400	1040	X	874	X	X	17000	60000	13000	6100
<i>NCA (Loctite AA 3926)</i>	72	68	54	48	68	33	86	57	50	63
<i>ECA (DuPont ME 902)</i>	6380	90	135	238	365	270	82	225	276	127

3. týden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Pájení (Sn/Bi)</i>	20	22	20	18	16	19	17	18	13	12
<i>ECA (8331S)</i>	1200	1062	X	890	X	X	30000	57000	66000	6080
<i>NCA (Loctite AA 3926)</i>	84	75	54	38	77	40	94	63	55	74
<i>ECA (DuPont ME 902)</i>	7700	93	128	247	360	290	88	236	280	153

Příloha B - Klimatické stárnutí vzorků (1. – 3. týden v emisní komoře)



Příloha C - Výpočet hodnot v excelu (Sn/Bi, ECA 8331S, NCA Loctite AA 3926, ECA DuPont ME902)

Před testem	1. týden	2. týden	3. týden		Před testem	1. týden	2. týden	3. týden	
22	19	14	20	Min	12	12	5	12	
21	26	12	22	Q1	12,25	15,25	8,25	16,25	
12	24	10	20	Median	14	17,5	10	18	
14	20	9	18	Q3	20	19,75	11,75	19,75	
12	17	8	16	Max	22	26	14	22	
14	18	10	19						
12	12	11	17						
22	16	12	18	Box 1 Hidden	12,25	15,25	8,25	16,25	Q1
17	13	8	13	Box 2 Lower	1,75	2,25	1,75	1,75	Median - Q1
13	15	5	12	Box 3 Upper	6	2,25	1,75	1,75	Q3 - Median
				Average	15,9	18	9,9	17,5	
				Whisker Top	2	6,25	2,25	2,25	Max - Q3
				Whisker Bottom	0,25	3,25	3,25	4,25	Q1 - Min

Před testem	1. týden	2. týden	3. týden		Před testem	1. týden	2. týden	3. týden	
600	2100	1400	1200	Min	340	720	874	890	
340	720	1040	1062	Q1	2115	2370	2575	2420	
100000	100000	100000	100000	Median	48000	5725	15000	43500	
820	8500	874	890	Q3	100000	15250	90000	91500	
100000	60000	100000	100000	Max	100000	100000	100000	100000	
100000	6000	100000	100000						
100000	17500	17000	30000						
76000	3000	60000	57000	Box 1 Hidden	2115	2370	2575	2420	Q1
20000	5450	13000	66000	Box 2 Lower	45885	3355	12425	41080	Median - Q1
6000	2160	6100	6080	Box 3 Upper	52000	9525	75000	48000	Q3 - Median
				Average	50376	20543	39941,4	46223,2	
				Whisker Top	0	84750	10000	8500	Max - Q3
				Whisker Bottom	1775	1650	1701	1530	Q1 - Min

Před testem	1. týden	2. týden	3. týden		Před testem	1. týden	2. týden	3. týden	
45	80	72	84	Min	37	48	33	38	
73	82	68	75	Q1	47	56,5	51	54,25	
51	63	54	54	Median	53,5	66	60	68,5	
37	55	48	38	Q3	60,25	79,25	68	76,5	
61	77	68	77	Max	73	89	86	94	
50	50	33	40						
69	89	86	94						
56	61	57	63	Box 1 Hidden	47	56,5	51	54,25	Q1
46	48	50	55	Box 2 Lower	6,5	9,5	9	14,25	Median - Q1
58	69	63	74	Box 3 Upper	6,75	13,25	8	8	Q3 - Median
				Average	54,6	67,4	59,9	65,4	
				Whisker Top	12,75	9,75	18	17,5	Max - Q3
				Whisker Bottom	10	8,5	18	16,25	Q1 - Min

Před testem	1. týden	2. týden	3. týden		Před testem	1. týden	2. týden	3. týden	
410	6000	6380	7700	Min	81	85	82	88	
105	96	90	93	Q1	108,25	114,5	129	134,25	
118	125	135	128	Median	161,5	211,5	231,5	241,5	
140	219	238	247	Q3	230,5	255,25	274,5	287,5	
340	364	365	360	Max	410	6000	6380	7700	
202	250	270	290						
81	85	82	88						
183	204	225	236	Box 1 Hidden	108,25	114,5	129	134,25	Q1
240	257	276	280	Box 2 Lower	53,25	97	102,5	107,25	Median - Q1
91	111	127	153	Box 3 Upper	69	43,75	43	46	Q3 - Median
				Average	191	771,1	818,8	957,5	
				Whisker Top	179,5	5744,75	6105,5	7412,5	Max - Q3
				Whisker Bottom	27,25	29,5	47	46,25	Q1 - Min