



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Sledování vybraných vlastností elektricky vodivých lepidel
Monitoring of specific characteristics of the electrically conductive adhesives

bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Mach, CSc.

Jakub Petrůj

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Petrůj** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **457042**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Sledování vybraných vlastností elektricky vodivých lepidel

Název bakalářské práce anglicky:

Monitoring of specific characteristics of the electrically conducting adhesives

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je sledování změny vybraných vlastností standardního elektricky vodivého lepidla (epoxidová matrice plněná stříbrnými mikročásticemi (šupinkami)). Lepidlo bude sledováno v původním (dodaném) stavu v různých stupních vytvrzení.

1. Seznamte se s principy a typy elektricky vodivých lepidel
2. Seznamte se se základními typy měření elektrických a mechanických vlastností adhezních spojů.
3. Použijte různé vytvrzovací rozvrhy lepidla dle zadání vedoucího práce.
4. Vyhodnoťte vliv vytvrzovacího rozvrhu na vlastnosti adhezních spojů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Richter, L.: Diplomní práce, ČVUT FEL, Praha 2007
- [2] Lau, J. H. et al.: Electronic Manufacturing, McGraw-Hill 2003

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Pavel Mach, CSc., katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

doc. Ing. Pavel Mach, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Machovi, CSc. za projevenou ochotu, trpělivost a celkově za vedení a pomoc při řešení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové Ph.D. a prof. Ing. Václavu Papežovi, CSc. za poskytnutí volného vstupu do jejich laboratoří. Nesmím také zapomenout poděkovat doc. Ing. Jiřímu Vašíčkovi, CSc. a Ing. Josefu Černohousovi za poskytnuté konzultace ohledně ekonomické části práce.

Abstrakt

Teoretická část této bakalářské práce se zaměřuje na základní popis elektricky vodivých lepidel. Zejména se zaměřuje na jejich složení, použití a nanášecí metody.

Praktická část této práce popisuje přípravu měřených vzorků, měření jejich elektrického odporu a nelinearity volt-ampérové charakteristiky. Po klimatickém stárnutí vybraných vzorků následuje další měření elektrického odporu a nelinearity volt-ampérové charakteristiky. Ke konci práce jsou i nastíněny náklady experimentální úlohy ve velkovýrobním měřítku.

Ke konci práce je zhodnocení změřených hodnot a závěr z nich vyplývající.

Klíčová slova

Elektricky vodivá lepidla, vazební složka, vodivá složka, perkolační teorie, vytvrzování, odpor, nelinearita, šablonový tisk, lepené spoje, klimatické stárnutí.

Abstract

Theoretical part of this bachelor's thesis deals with a basic description of electrically conductive adhesives. It is mainly focused on its composition, usage and methods of application.

Practical part of this thesis describes a preparation of tested samples, measuring their electrical resistance and nonlinearity of the volt-ampere characteristics. After climate ageing chosen samples, follows another measuring of electrical resistance and nonlinearity of the volt-ampere characteristics. At the end of the thesis are outlined overall costs of the experimental part on a mass production scale.

At the end of the thesis is an evaluation and conclusion of previously measured values.

Key words

Electrically conductive adhesives, binder, filler, percolation theory, curing, resistivity, nonlinearity, stenciling, adhesive joints, climate ageing.

OBSAH

1	SEZNAM OBRÁZKŮ	7
2	SEZNAM GRAFŮ	8
3	SEZNAM TABULEK	8
4	ÚVOD.....	9
5	CÍLE PRÁCE	9
6	TEORETICKÁ ČÁST	10
6.1	Elektricky vodivá lepidla.....	10
6.1.1	Vazební složka (binder)	10
6.1.2	Vodivá složka (filler)	11
6.1.3	Izotropní vodivá lepidla (lepidla s izotropní elektrickou vodivostí)	12
6.1.4	Anizotropní vodivá lepidla (lepidla s anizotropní elektrickou vodivostí)	12
6.1.5	Perkolační teorie	12
6.1.6	Vodivost izotropních lepidel	13
6.1.7	Nanášení vodivých lepidel.....	15
6.2	Základní typy měření vlastností adhezních spojů	17
7	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	19
7.1	Příprava vzorků	19
7.2	Měření vlastností adhezních spojů před stárnutím	20
7.2.1	Měření elektrického odporu	20
7.2.2	Měření nelinearity VA charakteristiky	23
7.2.3	Shrnutí stavu zjištěného před stárnutím.....	24
7.3	Měření vlastností adhezních spojů po klimatickém stárnutí	26
7.3.1	Měření elektrického odporu	26
7.3.2	Měření nelinearity VA charakteristiky	29

7.3.3	Shrnutí naměřených hodnot po stárnutí	32
7.4	Ekonomické zhodnocení	32
7.4.1	Shrnutí ekonomické části práce	37
8	ZÁVĚR	38
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	39

1 SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1 A) STŘÍBRNÉ NANOKULIČKY [1], B) BAZALTOVÁ VLÁKNA POKRYTÁ STŘÍBREM [5]	12
OBR. 2 PERKOLAČNÍ KŘIVKA [8]	13
OBR. 3 ÚŽINOVÝ ODPOR [4]	14
OBR. 4 PRINCIP SÍTOTISKU [7].....	15
OBR. 5 PRINCIP ŠABLONOVÉHO TISKU [5]	16
OBR. 6 NANÁŠENÍ PLNOU JEHLOU [5]	16
OBR. 7 SCHÉMA PŘÍSTROJE NA JETTING [7]	17
OBR. 8 ČTYŘVODIČOVÁ METODA MĚŘENÍ [9]	18
OBR. 9 NANÁŠECÍ ZAŘÍZENÍ PRO ŠABLONOVÝ TISK [8]	19
OBR. 10 UKÁZKA VYTVOŘENÝCH VZORKŮ	20

2 SEZNAM GRAFŮ

GRAF 1 – MEDIÁNY ZMĚŘENÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU ADHEZNÍCH SPOJŮ PŘED STÁRNUTÍM	22
GRAF 2 - MEDIÁN NELINEARITY ADHEZNÍCH SPOJŮ.....	24
GRAF 3 - MEDIÁN ZMĚŘENÝCH HODNOT ELEKTRICKÉHO ODPORU PO STÁRNUTÍ	27
GRAF 4 - NÁRŮST ELEKTRICKÉHO ODPORU PO STÁRNUTÍ VZORKŮ	28
GRAF 5 - NÁRŮST ELEKTRICKÉHO ODPORU PO STÁRNUTÍ VZORKŮ	28
GRAF 6 - MEDIÁN ZMĚŘENÝCH HODNOT VA NELINEARITY PO STÁRNUTÍ	30
GRAF 7 - ZMĚNA VA NELINEARITY LEPIDLA 2369/2 PO STÁRNUTÍ.....	31
GRAF 8 - ZMĚNA VA NELINEARITY VYBRANÝCH VZORKŮ OD FIRMY AMEPOX	31

3 SEZNAM TABULEK

TABULKA 1 - VYTVRZOVACÍ PARAMETRY.....	20
TABULKA 2 – PRŮMĚR, MEDIÁN A SMĚRODATNÁ ODCHYLKA ZMĚŘENÝCH ODPORŮ LEPIDEL	21
TABULKA 3 – PRŮMĚR, MEDIÁN A SMĚRODATNÁ ODCHYLKA NAMĚŘENÝCH HODNOT NELINEARITY	23
TABULKA 4 - PRŮMĚR, MEDIÁN A SMĚRODATNÁ ODCHYLKA ELEKTRICKÉHO ODPORU PO STÁRNUTÍ PRVKŮ	26
TABULKA 5 - PRŮMĚR, MEDIÁN A SMĚRODATNÁ ODCHYLKA VA NELINEARITY PO STÁRNUTÍ.....	29
TABULKA 6 VYBRANÉ PARAMETRY ZAŘÍZENÍ F400	32
TABULKA 7 VYBRANÉ PARAMETRY ZAŘÍZENÍ TOP-8T-600	33
TABULKA 8 VYBRANÉ PARAMETRY ZAŘÍZENÍ RO400FC	33
TABULKA 9 PŘEHLED UVAŽOVANÝCH NÁKLADŮ	34
TABULKA 10 CELKOVÉ NÁKLADY VZTAŽENÉ NA HODINY.....	35
TABULKA 11 CELKOVÉ NÁKLADY VZTAŽENÉ NA POČET VÝROBKŮ.....	36

4 ÚVOD

Ve snaze omezit negativní dopady elektrického a elektrotechnického průmyslu na životní prostředí byl Evropskou komisí roku 2000 předložen návrh na omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních. Tento návrh byl uveden v platnost v podobě směrnice č. 2002/95/ES pod označením RoHS 1 (Restriction of Hazardous Substances). V českém právním řádu je tato směrnice reprezentována vyhláškou č. 352/2005 Sb. s účinností od 1.7.2006 [10]. Tato vyhláška kromě jiných ekologicky a zdravotně nebezpečných látek omezuje používání olova v elektrických a elektronických zařízeních. Toto opatření vedlo ke hledání vhodných náhrad olovnatých pájek.

Mezi možné náhrady těchto pájek patří používání bezolovnatých pájek, nebo elektricky vodivých lepidel. Přestože bezolovnaté pájené spoje vykazují vyšší odolnost proti vlhkosti, výkyvům teploty a mechanickému namáhání než lepené spoje, u vybraných aplikací jsou preferovány v elektrotechnickém průmyslu lepené spoje. Jedná se zejména o aplikace součástek náchylných na vyšší teplotu. Jednou z výhod vodivých lepidel je právě potřeba nižší vytvrzovací teploty, než je teplota pájení u pájených spojů.

5 CÍLE PRÁCE

- Seznámit se s typy a principy elektricky vodivých lepidel a s měřením jejich vybraných vlastností.
- Vyrobit adhezní spoje za různých vytvrzovacích profilů.
- Provést klimatické stárnutí spojů.
- Provést ekonomickou analýzu a celkové zhodnocení vlivu rozdílného vytvrzovacího rozvrhu na vlastnosti adhezních spojů před a po stárnutí.

6 TEORETICKÁ ČÁST

6.1 Elektricky vodivá lepidla

(ECA – Electrically Conductive Adhesives)

Vodivá lepidla jsou kompozitními materiály. Sestávají z vazební složky (angl. Binder), která tvoří izolační matici a z vodivé složky (angl. Filler), která zajišťuje elektrickou vodivost spoje. Tyto složky budou podrobněji popsány v kapitolách jim věnovaných. Elektricky vodivá lepidla začala být širěji užívána na začátku jednadvacátého století jako jedna z možných náhrad ekologicky závadné Sn-Pb pájky, protože bezolovnaté pájení není možné používat u všech aplikací z důvodu pájecí teploty, která může poškodit některé, tepelně citlivé součástky [3]. Elektricky vodivá lepidla mají oproti pájení tyto výhody [4]:

- Pro jejich vytvrzení je potřeba nižší teplota než pro pájení. Nedojde tedy k poškození některých komponentů citlivých na vyšší teploty.
- Jednodušší možnost zpracování. Není třeba odstraňovat rozpouštědlo na rozdíl od pájení (i když existují také bezoplachová tavidla).
- Možnost použití a přichycení na materiálech na kterých není možné použít klasickou pájku, například sklo.

Základní rozdělení elektricky vodivých lepidel je následující [5]:

- Lepidla s izotropní elektrickou vodivostí – elektrická vodivost je ve všech směrech stejná.
- Lepidla s anizotropní elektrickou vodivostí – lepidla mají v jednom směru vysokou elektrickou vodivost. V ostatních směrech je vodivost výrazně nižší.

6.1.1 Vazební složka (binder)

Jedná se o izolant sloužící po vytvrzení k zajištění mechanické pevnosti a stálosti vodivého spoje a k fixaci částic vodivé složky. Nejčastěji bývá tvořena epoxidovou pryskyřicí [3].

Mezi nejdůležitější vlastnosti použité pryskyřice řadíme tepelnou odolnost, tepelnou roztažnost, pevnost, navlhavost, hořlavost a chemickou odolnost. Při výrobě vazební složky je kladen důraz na viskozitu, smáčivost, přilnavost, reakční dobu a obsah těkavých složek. Je také kladen důraz na smáčivost a adhezívní vlastnosti této složky s ohledem na spojované povrchy. To ovlivňuje elektrické a zejména mechanické vlastnosti spoje [5]. Vazební složku rozdělujeme na tyto dvě základní skupiny:

- Složka termoplastická

Tento druh vazební složky je složen z polymerů tvořených lineárními makromolekulami s dlouhými řetězci. Jednotlivé molekuly mají mezi sebou slabé vazby, které po zahřátí slábnou a polymer taje. To poskytuje hlavní výhodu termoplastů, a to tedy případnou opravu vodivého spoje. Mezi jejich dvě hlavní nevýhody patří slabší adheze při vyšších teplotách a odpařování rozpouštědel obsažených v termoplastech. To má za následek vznik dutinek ve vodivém spoji a následné zhoršení kvality spoje [5]. Použití termoplastické matrice u vodivých lepidel není časté, protože při zvýšení teploty vyvolané provozem zařízení s adhezní montáží dochází ke zhoršení mechanických vlastností adhezních spojů, což může vést k poruše zařízení [5].

- Složka reaktoplastická

U reaktoplastických materiálů dochází při zahřívání k chemické reakci, při které se původní molekuly zpravidla síťují a materiál se stává tvrdším a houževnatějším. Takováto chemická reakce se nazývá vytvrzování. Jedná se o nevratný proces, který zajistí tvrdost a tuhost u vytvrzeného reaktoplastu. [6]

6.1.2 Vodivá složka (filler)

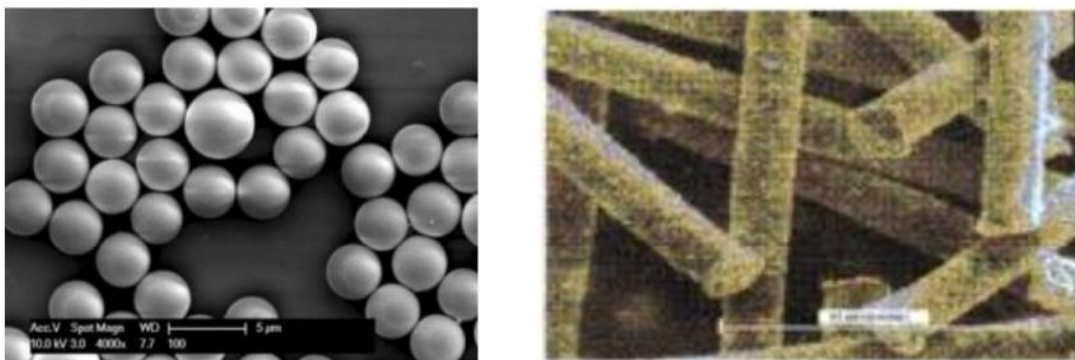
Hlavním úkolem vodivé složky je zajištění elektrických vlastností vodivých adhezních spojů. Průchod proudu zajišťují částice kovů o dostatečné koncentraci. U izotropních lepidel jejich zastoupení bývá od 60 do 80 % váhových procent lepidla. U anizotropních se koncentrace pohybuje v rozsahu 10-25 % váhových procent lepidla [1].

Vodivé částice bývají nejčastěji ze stříbra. Stříbro je používáno zejména pro své výborné elektrické vlastnosti. Mezi další kovy používané pro vytvoření vodivé cesty řadíme např. měď, zlato, nikl a paladium. Měď je považována za dobrou alternativu pro stříbro. Je levnější a má výborné elektrické vlastnosti. Její nevýhodou ale je vytváření oxidu, který je elektricky nevodivý. Proto je nutné měděné částice před použitím pozlatit nebo postříbřit [1].

Částice zajišťující elektrické spojení dělíme podle tvaru do těchto skupin [5]:

- Kuličky
- Lupínky a šupinky
- Tyčinky, trubičky, vlákna

Příklady některých z výše zmíněných tvarů jsou na obrázku číslo jedna.



Obr. 1 a) stříbrné nanokuličky [1], b) bazaltová vlákna pokrytá stříbrem [5]

6.1.3 Izotropní vodivá lepidla (lepidla s izotropní elektrickou vodivostí)

Plnivem lepidel s izotropní elektrickou vodivostí bývají kovové částice, nejčastěji ve tvaru šupinek. Velikost šupinek bývá v rozmezí 8-15 μm , každá šupinka má jiný tvar, protože tyto částice jsou nejčastěji vyráběny mletím. S ohledem na vysokou koncentraci částic plniva v lepidle je zajištěn vzájemný dotyk mezi jednotlivými částicemi a tím vytvoření vodivé sítě v lepidle, která zajišťuje stejnou vodivost lepidla ve všech směrech. Izotropní lepidla se užívají pro montáž jednoduchých součástek na desku plošného spoje (rezistory, kapacitory atd.) [2].

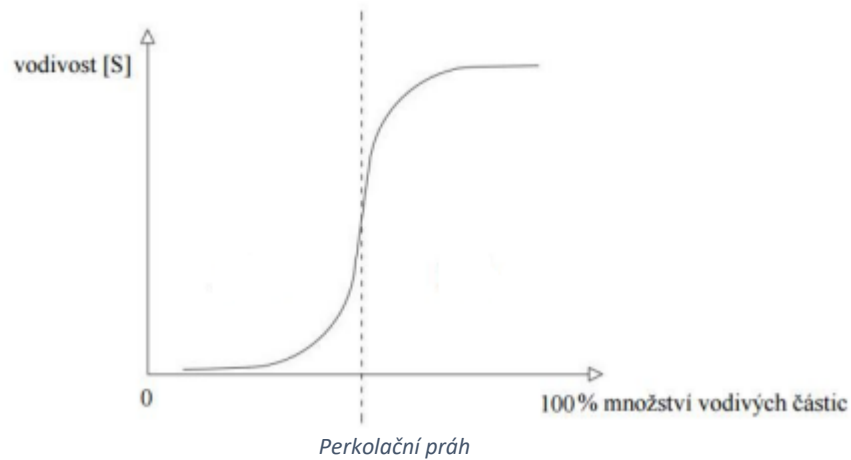
6.1.4 Anizotropní vodivá lepidla (lepidla s anizotropní elektrickou vodivostí)

V tomto případě mají částice vodivého plniva zpravidla tvar kuliček. S ohledem na nízkou koncentraci kuliček v adhezivu, nejsou kuličky ve vzájemném kontaktu. To zajišťuje, že částice nevytvoří vodivou síť. Vodivá cesta je vytvořena pouze v tom směru, v jakém na vodivé lepidlo působí tlak vyvolaný montáží čipu na desku plošného spoje (DPS). Tento tlak sevře vodivé částice mezi kontakt (vývod) součástky a připojovací plošku na desce plošného spoje a vytvoří tak elektricky vodivou cestu ve směru kolmém k povrchu desky plošného spoje, tedy ve směru osy „Z“. Proto se tato lepidla nazývají také „Z“ lepidly. V ostatních směrech se vodivé lepidlo chová jako izolant [2].

6.1.5 Perkolační teorie

Elektrická vodivost lepidel s izotropní vodivostí je často popisována perkolační teorií (viz obr.2). Stěžejním bodem této teorie je perkolační práh. Budeme-li do izolační matrice přidávat více a více vodivých částic, při určité koncentraci těchto částic se vytvoří v lepidle vodivá cesta, která způsobí skokový nárůst elektrické vodivosti lepidla. Koncentrace vodivých částic, při které k tomuto jevu dojde, se nazývá perkolačním prahem. Jinak řečeno, perkolační práh je takové

procentuální zastoupení vodivých částic v lepidle, kdy se materiál začne chovat jako vodič. Tedy kdy dojde k přímému kontaktu vodivých částic [7].



Obr. 2 perkolační křivka [8]

6.1.6 Vodivost izotropních lepidel

K porozumění teorie vodivosti izotropních lepidel je třeba si rozebrat jednotlivé složky elektrického odporu. Elektrický odpor izotropních lepidel se skládá ze tří složek [4, 8]:

- Odpor vodivých částic.
- Kontaktní odpor mezi vodivými částicemi.
- Kontaktní odpor mezi vodivými částicemi a kontaktovací plochou nebo vývodem součástky.

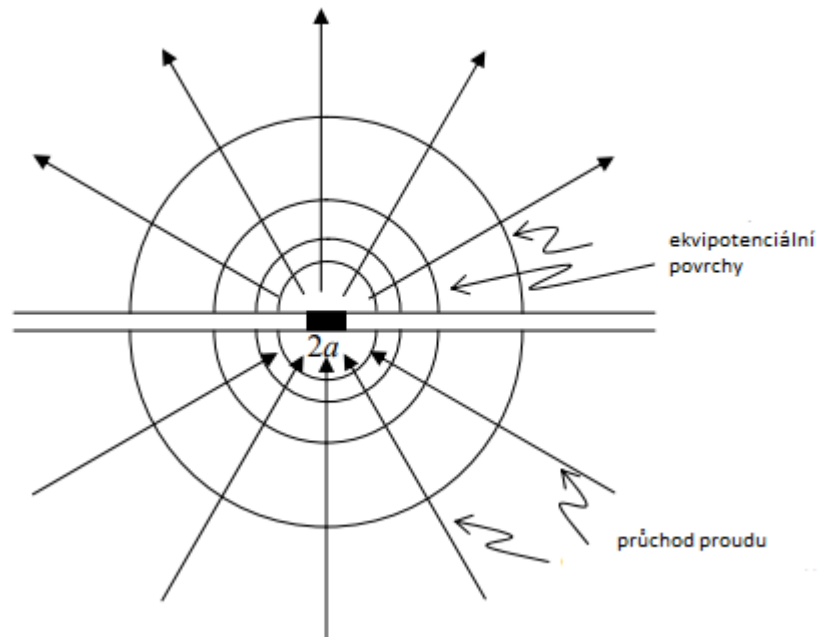
Odpor vodivých částic je nejvíce ovlivněn vlastnostmi vodivých částic. Přesněji řečeno materiálem a rozměry vodivých částic [4, 8].

Kontaktní odpor mezi vodivými částicemi se skládá z odporu tunelového a z odporu úžinového. Tunelový odpor je založen na teorii tunelového jevu. Podle kvantové teorie může elektron v důsledku svých vlnových vlastností překonat energetickou bariéru vyšší, než by byl schopen překonat v případě klasické Newtonovské mechaniky. Tato bariéra je v elektricky vodivých lepidlech tvořena tenkými izolačními vrstvami mezi částicemi vodivého plniva navzájem, zpravidla oxidy, nebo mezi částicemi vodivého plniva a připojovacími ploškami. Tunelový odpor je vyjádřen následujícím vzorcem [8].

$$R_T = \frac{\sigma}{\pi a^2} [\Omega; \Omega m^2; m^2] \quad (1)$$

Kde σ je tunelová rezistivita a parametr a je poloměr kontaktní plochy kruhového tvaru.

K úžinovému odporu dochází v místech, kde je kontaktní plocha výrazně menší než rozměry kontaktních členů. Předpokládejme kruhovou kontaktovací plochu s průměrem $2a$ mezi dvěma kontaktními členy nekonečně velkými jedním směrem [4, 8]. Viz obrázek 3.



Obr. 3 úžinový odpor [4]

Na obrázku číslo 3 vidíme, že průchod proudu je uzpůsoben tak, aby prošel skrz malou kontaktní plochu o průměru $2a$. Tento jev má za následek zvýšení hodnoty odporu oproti stavu, kdy by proud mohl procházet skrz nekonečně velkou kontaktní plochu. Pokud je rezistivita obou členů ρ , poté můžeme vypočítat úžinový odpor R_c jako:

$$R_c = \frac{\rho}{2a} [\Omega; \Omega\text{m}; \text{m}] \quad (2)$$

Nutná podmínka pro pravdivost rovnice číslo dva je, aby rozměry kontaktních členů byly mnohonásobně větší než rozměry kontaktní plochy [4].

Výsledný kontaktní odpor se skládá ze součtu odporu tunelového a odporu úžinového.

$$R = R_c + R_T = \frac{\rho}{2a} + \frac{\sigma}{\pi a^2} [\Omega] \quad (3)$$

Ke vzniku odporu mezi vodivými částicemi, které jsou ve vzájemném kontaktu a mezi vodivými částicemi a kontaktovací plochou dochází většinou kvůli vytvoření nežádoucí oxidační vrstvy. Ta vzniká buď přirozenou oxidací částic plniva v důsledku interakce s materiálem matrice a v případě kontaktu mezi částicemi filleru a připojovací ploškou, která je z jiného materiálu, i možnou elektrochemickou korozí, která vzniká za přítomnosti vlhkosti u dvou kovů s rozdílným elektrochemickým potenciálem. Navlhání matrice však může mít za následek i vznik dalších sloučenin, které mohou způsobovat nárůst izolační tunelové bariéry mezi částicemi plniva,

případně mezi částicemi plniva a připojovací ploškou, případně kontaktem na nulovém odporu [8].

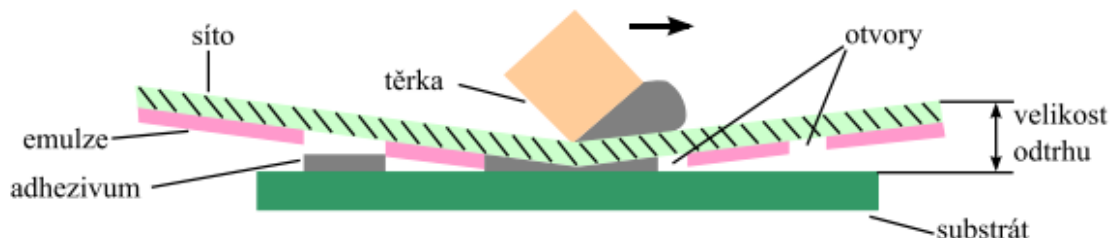
6.1.7 Nanášení vodivých lepidel

Na kvalitu vodivého spoje mají velký vliv techniky použité při samotném nanášení vodivých lepidel. Mezi nejpoužívanější techniky nanášení lepidel řadíme tyto aplikace:

- Sítotisk

Sítotisk je jeden z nejjednodušších a relativně levných způsobů aplikace. Samotné síto je nejčastěji z polyesteru natažené na rámu z hliníkových slitin. Motiv na sítu se dá vytvořit dvěma způsoby. Buď maskováním síta přímo nebo nepřímou pomocí plastové folie. Přímé maskování je založeno na použití fotocitlivé emulze. Ta je nanesena do ok síta a ozářena UV zářením přes masku s motivem. Tím dojde k jejímu vytvrzení. Při následném vyvolání fotocitlivé emulze ve vývojce (provádí se zpravidla sprchováním vývojkou) se neozářená emulze smyje [7].

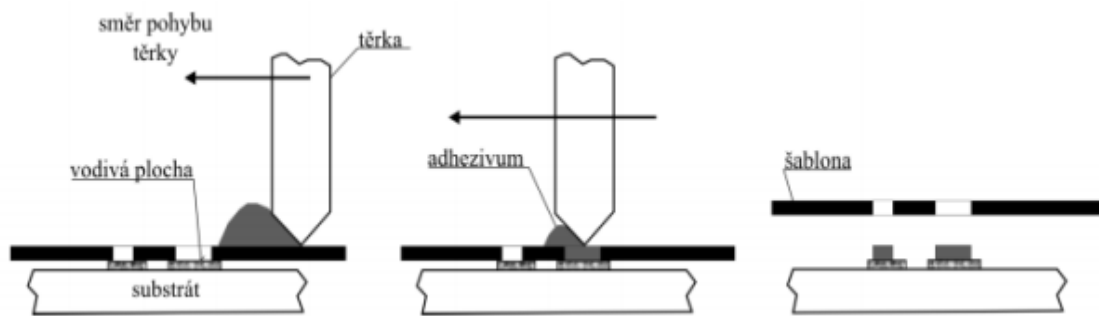
Nepřímý způsob maskování spočívá v tom, že oka v sítu, která mají být neprůchodná při tisku vodivého lepidla, se zamaskují nalepením plastové šablony. Při samotném tisku lepidla je rám se sítím v definované poloze ku základnímu substrátu. Lepidlo je naneseno na síto a protlačeno skrz oka, která nejsou v sítu maskovaná na desku substrátu pomocí třerky. Rychlost pohybu a úhel náklonu třerky jsou jasně stanoveny [7].



Obr. 4 princip sítotisku [7]

- Šablonový tisk

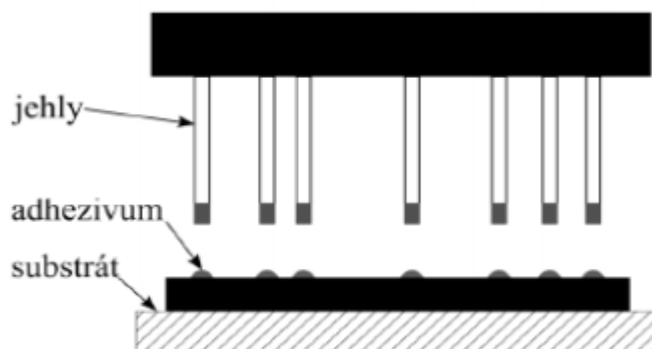
Šablonový tisk je obdobou sítotisku. Namísto síta je lepidlo nanášeno přes šablonu s vytvořeným motivem. Samotná šablona je zpravidla kovová folie o malé tloušťce, např. 200 μm , ve které je vyleptán nebo vyřezán laserem či vodním svazkem požadovaný motiv pro nanesení lepidla. Šablona bývá někdy položena přímo na substrátu, pak výška naneseného lepidla je totožná s výškou použité šablony [5].



Obr. 5 princip šablonového tisku [5]

- Nanášení plnou jehlou

Tento typ nanášení je nejvhodnější pro velkoobjemovou výrobu. Jeho princip spočívá ve stejném uspořádání hrotů a vývodů součástek na substrátu, viz. obr.6. Hroty se nejdříve namočí do nádoby s nevytvrzeným lepidlem. Poté dojde ke kontaktu namočených hrotů a substrátu. Tím dojde k přenosu lepidla z jehel na požadovaná místa na substrátu. Mezi hlavní nevýhody této metody patří malá použitelnost metody pro menší výrobní objemy, kdy je třeba často měnit uspořádání hrotů. Dalšími nevýhodami jsou zejména možnost kontaminace nádoby s adhezivem, možné pohlcování vlhkosti lepidlem z okolního prostředí, postupné vytvrzování a tím také nárůst viskozity nanášeného lepidla a tím proměnný objem nanášeného lepidla [7].



Obr. 6 nanášení plnou jehlou [5]

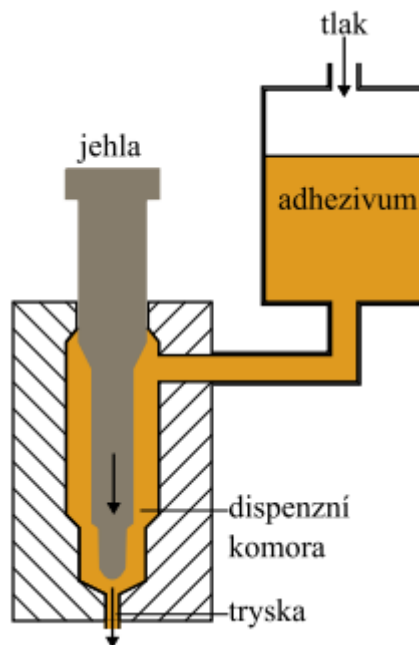
- Dispenzing

Tato kontaktní technika umožňuje přesné nanesení lepidla o požadovaném množství pod požadovaným tlakem. K nanášení se používají automatická nebo poloautomatická zařízení využívající duté jehly různých rozměrů pro vytlačování adheziva. Nejčastěji je používán zásobník ve tvaru injekční stříkačky, který je schopen se manuálně nebo automaticky pohybovat ve třech osách x , y , z . Nejpoužívanější metody vytlačování adheziva jsou metody využívající vzduchovou pumpu nebo šroubový systém [7].

- Jet dispenzing (Jetting)

Jet dispenzing je aditivní depoziční technologie, která se používá pro nanášení vodivých lepidel na široké spektrum povrchů. Jedná se o technologii řízenou CAD systémem, která bezkontaktně aplikuje lepidlo na určenou plochu využitím aerodynamiky nosného plynu, viz obr.7. Díky tomu tato technologie nepotřebuje síta či jiné šablony [7].

Hlavní rozdíl oproti dispenznímu nanášení je v tom, že se jedná o bezkontaktní a zcela automatickou techniku nanášení. Nanášecí hlava se pohybuje pouze v osách x a y . Tato technologie využívá mechanické, elektrické nebo pneumatické aktuátory zakončené jehlou. Nanášecí zařízení se obvykle skládá z trysky, dispenzní komory, jehly a nádoby s adhezivem. Tryska je díky tlaku naplněna adhezivem a pohybem jehly směrem k trysce dojde k nanesení kapky adheziva na substrát. Dispenzní komora slouží k přehřívání materiálu [7].



Obr. 7 schéma přístroje na jetting [7]

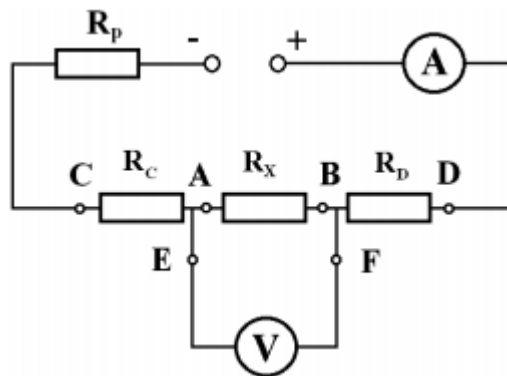
Ve velkovýrobě je v dnešní době upřednostňován jet dispenzing oproti klasickému dispenznímu nanášení. To je dáno hlavně díky vyšší rychlosti nanášení, možnosti nanášet lepidlo do menších prostorů než při klasickém kontaktním dispenzování a možnosti nanášet různé tekutiny o různých viskozitách [7].

6.2 Základní typy měření vlastností adhezních spojů

Ze základních typů měření vlastností adhezních spojů jsou uvedeny ty, které byly použity v experimentální části práce. Jsou to měření elektrického odporu a měření nelinearity VA charakteristiky.

- Měření elektrického odporu – čtyřvodičová metoda

Jedná se o měřicí metodu používanou pro měření malých odporů. Její hlavní výhoda spočívá v eliminaci přechodových odporů a odporů přívodních vodičů ve změřené hodnotě odporu. Na obrázku číslo 8 jsou přechodové odpory kontaktů označeny jako R_c a R_D . Pokud bychom připojili voltmetr přímo na proudové svorky označené jako C a D, měřili bychom napětí na obou kontaktních odporech a na lepeném spoji označeném R_x . Naměřili bychom tedy výslednou hodnotu odporu $R_c+R_x+R_D$. Při zapojení voltmetru přímo na vývody lepeného spoje označené A a B, naměříme pouze odpor lepeného spoje R_x [9].



Obr. 8 Čtyřvodičová metoda měření [9]

- Měření nelinearity volt-ampérové charakteristiky

Pro testování použitelnosti některých elektronických obvodů v oblastech s vyšší klimatickou zátěží, např. s vyšší vlhkostí nebo teplotou, je užíváno různých typů klimatických zkoušek. Tento soubor zkoušek ale často bývá časově a finančně náročný. Nehledě na to, že často dochází k destrukci zkoušených součástí. Jako vhodná alternativa pro zjištění spolehlivosti elektronických součástí se zde jeví měření nelinearity jejich volt-ampérové (dále v textu pouze jako VA) charakteristiky. Jedná se o nedestruktivní a rychlou metodu měření [11].

Bylo zjištěno, že pokud lineární elektronické komponenty, kterými adhezni vodivé spoje jsou, vykazují vyšší hodnotu nelinearity, jsou zároveň méně stabilní, méně spolehlivé a většinou vykazují i kratší životnost. Tyto negativní vlastnosti mohou být způsobeny nekvalitním lepidlem, oxidovanými částicemi plniva, degradovaným lepidlem, které bylo použito po výrobcem definované době použitelnosti (shelf time), špatným tepelným vytvrzením lepidla, oxidovanými připojovacími ploškami nebo vývody montovaných součástí a řadou dalších příčin [11].

Princip měření nelinearity spočívá v tom, že měřený prvek je napájen sinusovým signálem s minimálním zkreslením o frekvenci 10 kHz. V takovémto signálu je velice nízká hodnota vyšších harmonických. Jestliže VA charakteristika adhezního spoje není zcela lineární, výstupní signál bude obsahovat vyšší harmonické [11].

Při napájení prvku s takovouto charakteristikou sinusovým proudem se na prvku objeví nesinusové periodické napětí, které lze rozložit na liché harmonické. Jelikož třetí harmonická zde má největší amplitudu, její velikostí se určuje nelinearita prvku [11].

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

7.1 Příprava vzorků

Zkoumané vzorky byly vytvořeny ze tří elektricky vodivých lepidel. Jedná se o dvě lepidla od firmy Amepox a jedno lepidlo od firmy Permacol. Od firmy Amepox to je jednosložkové lepidlo AX 70MN a dvousložkové lepidlo AX 15S. Od firmy Permacol bylo zkoumáno jednosložkové lepidlo 2369/2. Úplné technické informace k uvedeným prvkům jsou v sekci Příloha.

Měřená lepidla byla nanášena pomocí zařízení pro šablonový tisk na přípojovací plošky na testovací desce plošného spoje. Vodivý obrazec na této desce byl navržen tak, aby umožňoval čtyřvodičové měření odporu a nelinearity adhezních spojů.



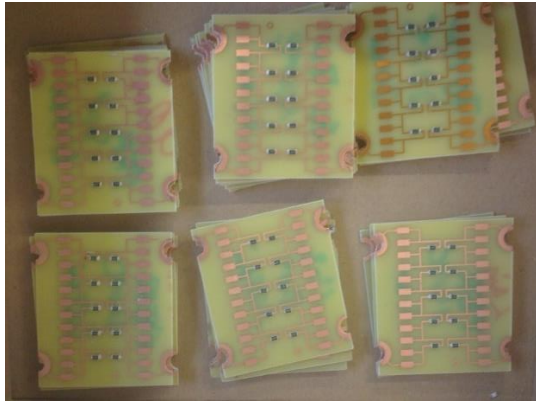
Obr. 9 nanášecí zařízení pro šablonový tisk [8]

Adhezní vodivé spoje byly následně vytvořeny osazením desek plošných spojů SMD rezistory o nulovém odporu (skutečný odpor těchto součástek byl 14,5 mΩ). Osazení bylo provedeno pomocí vakuové pinzety. Následně byly osazené desky umístěny do sušárny SPT 200 (sušárna s nucenou cirkulací vzduchu).

Vytvrzovací parametry byly voleny podle pokynů vedoucího práce. U lepidel AX 70MN a Permacol 2369/2 bylo rozhodnuto studovat vlastnosti lepidel po vytvrzení při minimální (v případě lepidla AX 70MN i při teplotě nižší než nejnižší doporučené) a maximální teplotě doporučené výrobcem po dobu doporučenou výrobcem a po dobu delší. To proto, že někdy se uvádí jako možnost zlepšení parametrů adhezních spojů tzv. dotvrzení lepidel při vyšší teplotě, případně delším časem vytvrzování. Zvolené prodloužené časy vyplynuly ze zkušeností s uvedenými lepidly na pracovišti katedry elektrotechnologie. Protože použité lepidlo AX 15S

bylo již po době skladování doporučené výrobcem a při jeho nanášení šablonovým tiskem byla jeho viskozita na mezi použitelnosti, bylo pro vytvrzování tohoto lepidla použito pouze střední vytvrzovací teploty a času doporučeného výrobcem. Zároveň byl zkoumán i druhý vytvrzovací rozvrh při času kratším, než byl čas doporučený.

Ukázka vytvořených vzorků je na následující fotografii.



Obr. 10 ukázka vytvořených vzorků

V následující tabulce je jednak uveden čas, po který byly vzorky vytvrzovány a také vytvrzovací teplota.

teplota/čas	AX 70MN	AX 15S	2369/2
°C/min	150/20	80/70	80/40
	150/40	80/100	80/60
	200/4		80/80
	200/20		80/120
			150/2
			150/3
			150/5
			150/8

Tabulka 1 - vytvrzovací parametry

7.2 Měření vlastností adhezních spojů před stárnutím

7.2.1 Měření elektrického odporu

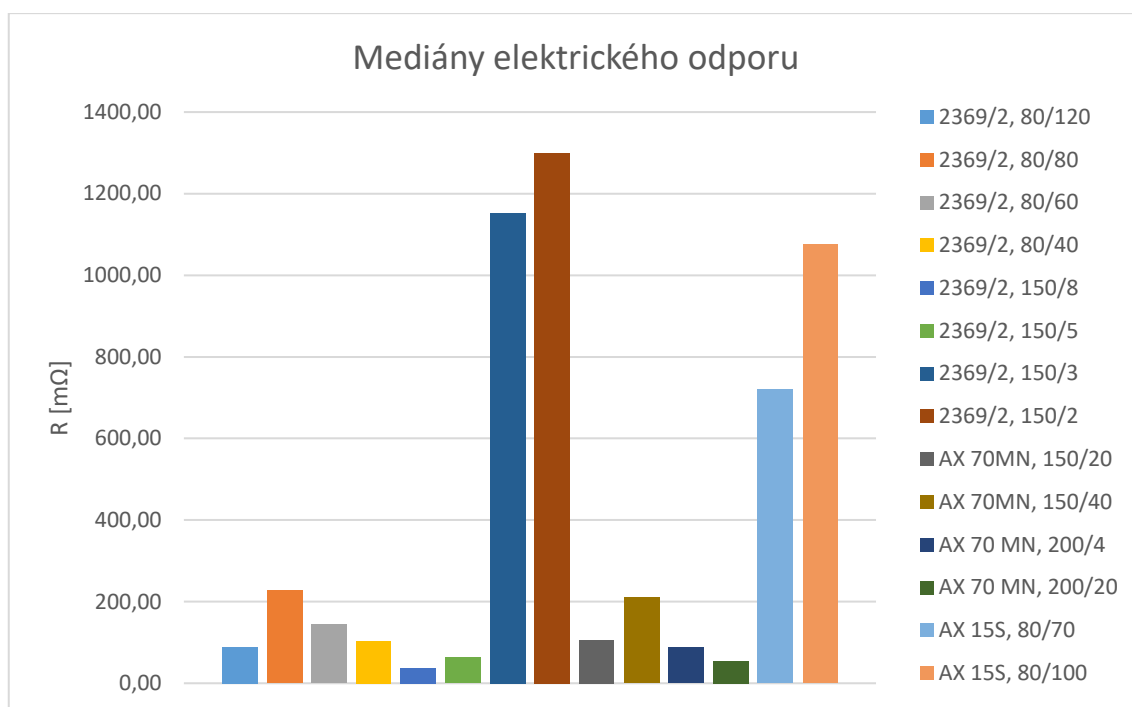
Odpor lepených spojů byl měřen čtyřvodičovou metodou vhodnou pro měření malých odporů. Jako měřicí přístroj byl použit Agilent 4263B LCR metr. Měření bylo provedeno při kmitočtu 1 kHz. V následujících tabulkách jsou uvedeny pouze hodnoty průměru, mediánu a směrodatné odchylky měřených odporů.

Kompletní změřené hodnoty jsou kvůli své rozsáhlosti v Příloze této práce. Řádky čas a teplota vyjadřují, jak dlouho a při jaké teplotě byly lepené spoje vytvrzovány.

Permacol 2369/2				
Teplota [°C]	80	80	80	80
Čas [min]	120	80	60	40
Průměr [mΩ]	99,78	242,55	159,94	153,22
Medián [mΩ]	88,95	227,70	143,40	103,35
Směrodatná odchylka [mΩ]	50,13	104,87	77,39	91,27
Permacol 2369/2				
Teplota [°C]	150	150	150	150
Čas [min]	8	5	3	2
Průměr [mΩ]	52,23	141,33	3050,85	1679,09
Medián [mΩ]	36,65	64,05	1152,50	1300,00
Směrodatná odchylka [mΩ]	33,13	269,35	3867,22	905,93
Amepox AX 70MN				
Teplota [°C]	150	150	200	200
Čas [min]	20	40	4	20
Průměr [mΩ]	114,51	404,5	112,44	59,815
Medián [mΩ]	105,85	210,8	87,05	54,85
Směrodatná odchylka [mΩ]	439,50	837,84	146,45	24,74
Amepox AX 15S				
Teplota [°C]	80		80	
Čas [min]	70		100	
Průměr [mΩ]	843,25		873,25	
Medián [mΩ]	720,50		593,00	
Směrodatná odchylka [mΩ]	595,18		1075,91	

Tabulka 2 – průměr, medián a směrodatná odchylka změřených odporů lepidel

V následujícím grafu jsou vyneseny mediány změřených odporů zkoumaných lepidel. Vynesení mediánů oproti průměrným hodnotám bylo zvoleno z toho důvodu, aby byl omezen případný negativní vliv jednoho špatně vsazeného rezistoru na přesnost měření. Legenda vyjadřuje teplotu a čas, při kterých byly vzorky vytvrzovány. Přesněji řečeno jedná se o teplota/čas.



Graf 1 – Mediány změřeného elektrického odporu adhezních spojů před stárnutím

Z grafu vidíme, že z hlediska odporu se jako nejideálnější jeví lepidlo od firmy Permacol 2369/2 vytvrzované při teplotě 150 °C po dobu osmi minut. Zároveň tento rozvrh vytvrzování vykazuje jednu z nejmenších směrodatných odchylek ze změřených dat, která vypovídá o konzistentní kvalitě spojů. Řádově vyšší elektrický odpor u dvou posledních vytvrzovacích rozvrhů lepidla 2369/2 je nejspíše dán nedostatečným vytvrzením lepidla. K tomuto jevu došlo i přesto, že vytvrzovací rozvrh 150/3 (myšleno teplota/čas) je výrobcem udáván v technických listech jako jeden z doporučených vytvrzovacích rozvrhů.

Jako naprosto nejhorší z hlediska elektrického odporu se jeví dvousložkové lepidlo AX 15S. To odráží již zmíněnou skutečnost, že lepidlo bylo použito již po době uvedené výrobcem jako maximální doba skladování. Jednosložkové lepidlo AX 70MN vykazuje nejmenší elektrický odpor při vytvrzování za teploty 200 °C po dobu dvaceti minut. Kvalita tohoto lepidla je z hlediska elektrického odporu při různých vytvrzovacích rozvrzích srovnatelná s daleko dražším lepidlem 2369/2 od firmy Permacol. Zajímavé je, že vytvrzovací profil 200/20 lepidla AX 70MN až pětinašobně převyšuje doporučený čas vytvrzování za dané teploty.

7.2.2 Měření nelinearity VA charakteristiky

Pro měření nelinearity VA charakteristiky byl použit přístroj CLT 1 (Component Linearity Test Equipmetnt). Napájecí napětí bylo zvoleno 30 MV, kmitočet základní harmonické byl 10 kHz.

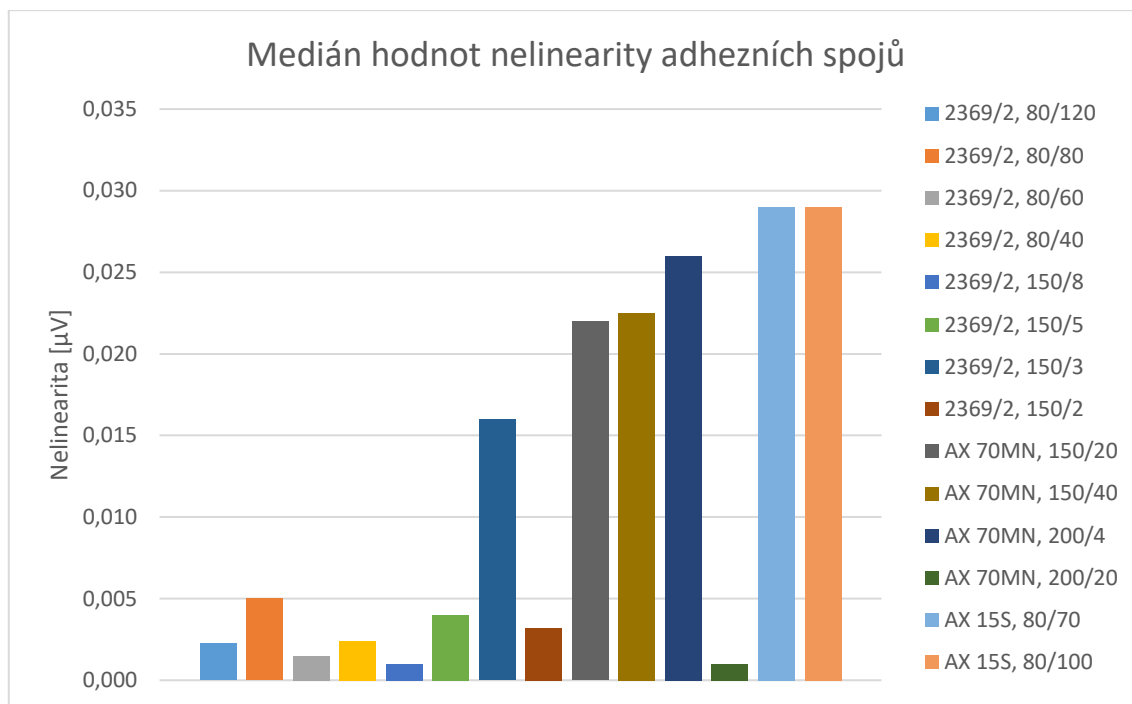
Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce číslo 3. Stejně jako u měření odporů jsou uvedeny vypočtené průměry, mediány a směrodatné odchytky naměřených hodnot. Řádky teplota a čas opět označují, jak dlouho a při jaké teplotě byla lepidla vytvrzována. Kompletní naměřená data jsou v Příloze.

Permacol 2369/2				
Teplota [°C]	80	80	80	80
Čas [min]	120	80	60	40
Průměr [μ V]	0,004	0,006	0,002	0,005
medián [μ V]	0,002	0,005	0,002	0,002
směrodatná odchylka [μ V]	0,006	0,003	0,001	0,004
Permacol 2369/2				
Teplota [°C]	150	150	150	150
Čas [min]	8	5	3	2
Průměr [μ V]	0,004	0,022	0,023	0,007
medián [μ V]	0,001	0,004	0,016	0,003
směrodatná odchylka [μ V]	0,004	0,007	0,021	0,009
Amepox AX 70MN				
Teplota [°C]	150	150	200	200
Čas [min]	20	40	4	20
Průměr [μ V]	0,067	0,052	0,079	0,003
medián [μ V]	0,022	0,023	0,026	0,001
směrodatná odchylka [μ V]	0,078	0,069	0,138	0,006
Amepox AX 15S				
Teplota [°C]	80		80	
Čas [min]	70		100	
Průměr [μ V]	0,07		0,05	
medián [μ V]	0,03		0,03	
směrodatná odchylka [μ V]	0,096		0,054	

Tabulka 3 – průměr, medián a směrodatná odchylka naměřených hodnot nelinearity

Při porovnání průměrů a mediánů změřených hodnot vidíme, že průměrná hodnota mnohdy dosahuje až dvojnásobné hodnoty. To je zapříčiněno vysokou nelinearitou jednoho či několika kusů rezistoru v měřené sadě rezistorů.

V následujícím grafu je zobrazen medián naměřených hodnot nelinearity VA charakteristiky adhezních spojů před jejich stárnutím. Význam legendy je stejný jako u předchozího grafu.



Graf 2 - medián nelinearity adhezních spojů

Z grafu vidíme, že z hlediska spolehlivosti a stability nejlepší podmínky jeví lepidlo 2369/2 vytvrzované při teplotě 150 °C po dobu osmi minut. Tyto výsledky korespondují i s výsledky měřeného elektrického odporu v předchozím měření.

Naprosto nejhorší vlastnosti z hlediska nelinearity jeví lepidlo AX 15S. Možné důvody těchto hodnot jsou napsány už u měření elektrického odporu.

Jako méně stabilní a méně kvalitní se jeví lepidlo AX 70MN. To při některých rozvrzích vytvrzování jeví i více než pětinasobnou hodnotu VA nelinearity oproti lepidlu 2369/2. Hodnoty elektrického odporu ale jeví obě lepidla obdobná. Tento nárůst oproti lepidlu 2369/2 ukazuje na vyšší podíl nelineárního mechanismu tunelování na celkovém mechanismu vodivosti spoje. To svědčí o tom, že zvolený způsob vytvrzování není optimální. Jediný vytvrzovací rozvrh lepidla AX 70 MN, kdy spoje mají malý odpor i nelinearitu je 200/20. Jak bylo dříve zmíněno, jedná se přitom o rozvrh dalece se lišící od rozvrhu doporučeného.

7.2.3 Shrnutí stavu zjištěného před stárnutím

Jako nejkvalitnější lepidlo se ze zkoumaných jeví lepidlo 2369/2 od firmy Permacol. Přestože vytvrzovací profil 150/8 je u tohoto lepidla nejlepší jak z hlediska elektrického odporu, tak i z hlediska nelinearity VA charakteristiky, vytvrzovací rozvrhy při teplotě 80 °C vykazují větší stálost s proměnným časem při vytvrzování. Výrobce doporučované vytvrzovací rozvrhy jsou 80/60 a 150/3.

Nejlepší z hlediska elektrického odporu a VA nelinearity je u lepidla AX 70MN vytvrzovací rozvrh 200/20. Doporučovaný vytvrzovací rozvrh 200/4 propadl u hodnot nelinearity VA charakteristiky. Možná příčina těchto hodnot je popsána výše.

7.3 Měření vlastností adhezních spojů po klimatickém stárnutí

Po změření elektrického odporu a VA nelinearity u všech vzorků byly vybrané vzorky umístěny do klimatické komory ke stárnutí. Stárnutí probíhalo po dobu tří set hodin při teplotě 85 °C a při relativní vlhkosti 85 %.

7.3.1 Měření elektrického odporu

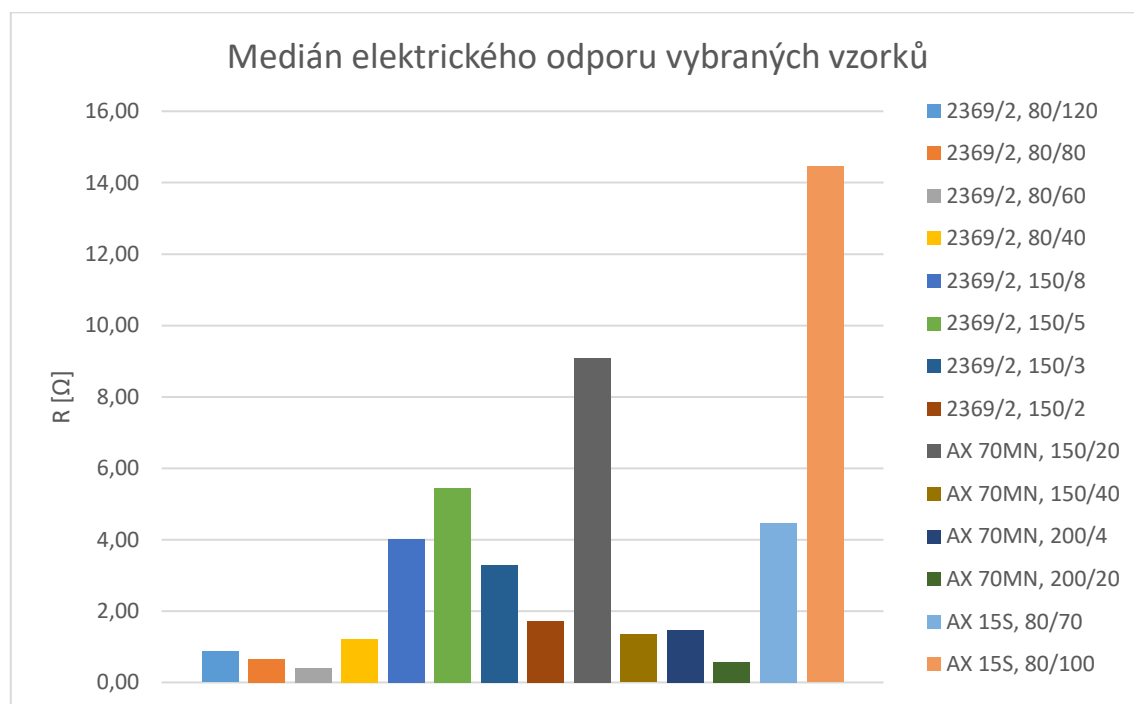
Měření elektrického odporu po stárnutí bylo prováděno stejným přístrojem při stejném nastavení jako při měření před stárnutím.

V následujících tabulkách jsou zobrazeny průměr, medián a směrodatná odchylka změřených hodnot elektrického odporu u vybraných adhezních spojů. Kompletní přehled změřených hodnot je kvůli své rozsáhlosti v Příloze práce.

Permacol 2369/2				
Teplota [°C]	80	80	80	80
Čas [min]	40	60	80	120
Průměr [Ω]	1,54	0,41	1,14	1,10
medián [Ω]	1,23	0,40	0,65	0,87
směrodatná odchylka [Ω]	1,072	0,146	1,289	0,638
Permacol 2369/2				
Teplota [°C]	150	150	150	150
Čas [min]	2	3	5	8
Průměr [Ω]	2,43	71,67	$1,20 \cdot 10^5$	163,75
medián [Ω]	1,72	3,28	5,45	4,02
směrodatná odchylka [Ω]	1,814	200,752	$2,94 \cdot 10^5$	378,900
Amepox AX 70MN				
Teplota [°C]	150	150	200	200
Čas [min]	20	40	20	4
Průměr [Ω]	8,81	2,36	0,80	2,41
medián [Ω]	9,08	1,35	0,56	1,48
směrodatná odchylka [Ω]	6,550	2,637	0,531	2,343
Amepox AX 15S				
Teplota [°C]	80		80	
Čas [min]	70		100	
Průměr [Ω]	5,39		$2,57 \cdot 10^6$	
medián [Ω]	4,45		14,45	
směrodatná odchylka [Ω]	4,155		$5,36 \cdot 10^6$	

Tabulka 4 - průměr, medián a směrodatná odchylka elektrického odporu po stárnutí prvků

V následujícím grafu jsou graficky zobrazeny mediány elektrického odporu adhezních spojů po jejich teplotně-vlhkostním stárnutí. Mediány jsou oproti průměrným hodnotám zvoleny z toho důvodu, aby byl omezen negativní vliv několika špatně vsazených rezistorů.



Graf 3 - medián změřených hodnot elektrického odporu po stárnutí

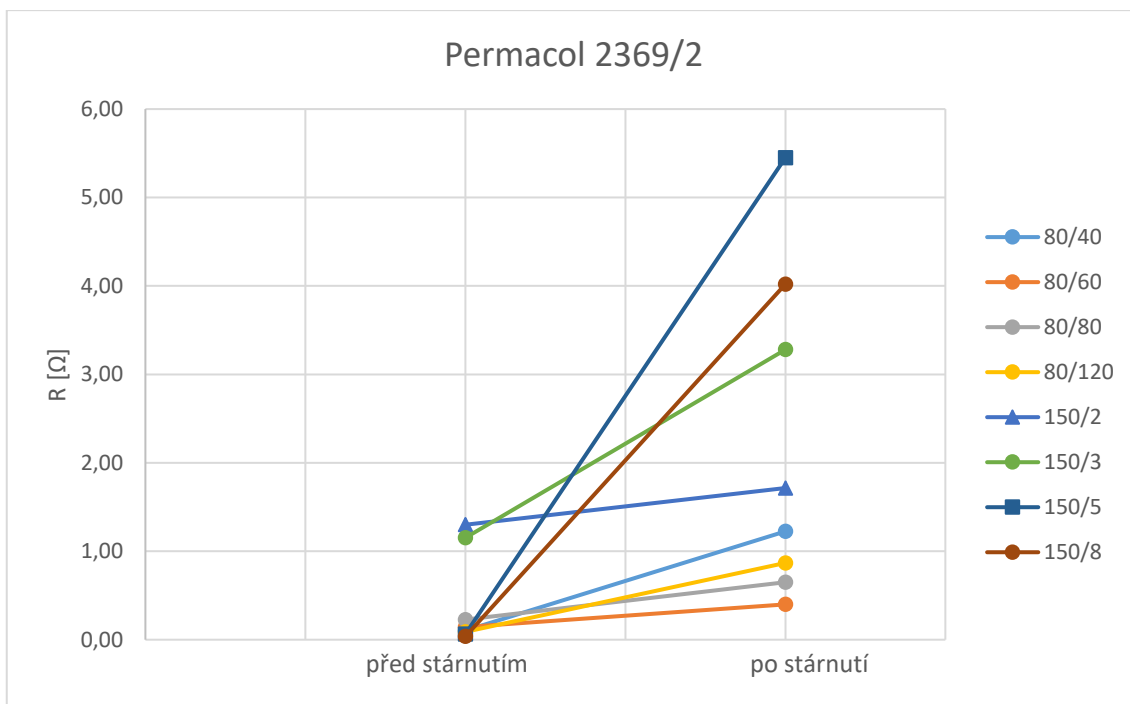
Z grafu číslo 3 je vidět, že vyšší odolnost oproti oblastem s vyšším klimatickým zatížením u lepidla 2369/2 jeví ty vzorky, které byly vytvrzovány při teplotě 80°C. Jako nejlepší se zde jeví lepidlo 2369/2 vytvrzované při teplotě 80 °c po dobu šedesáti minut. Jedná se o výrobcem doporučený rozvrh. Tento rozvrh zároveň vykazuje nejnižší směrodatnou odchylku, která vypovídá o konzistentní kvalitě adhezních spojů.

Naopak pro lepidlo AX 70MN se jeví jako odolnější vzorky, které byly vytvrzovány při teplotě vyšší. Jako nejlepší se jako v předchozích měřeních jeví vytvrzovací rozvrh 200/20.

Pro lepidlo AX 15S platí stejné poznatky uvedené v sekci před stárnutím.

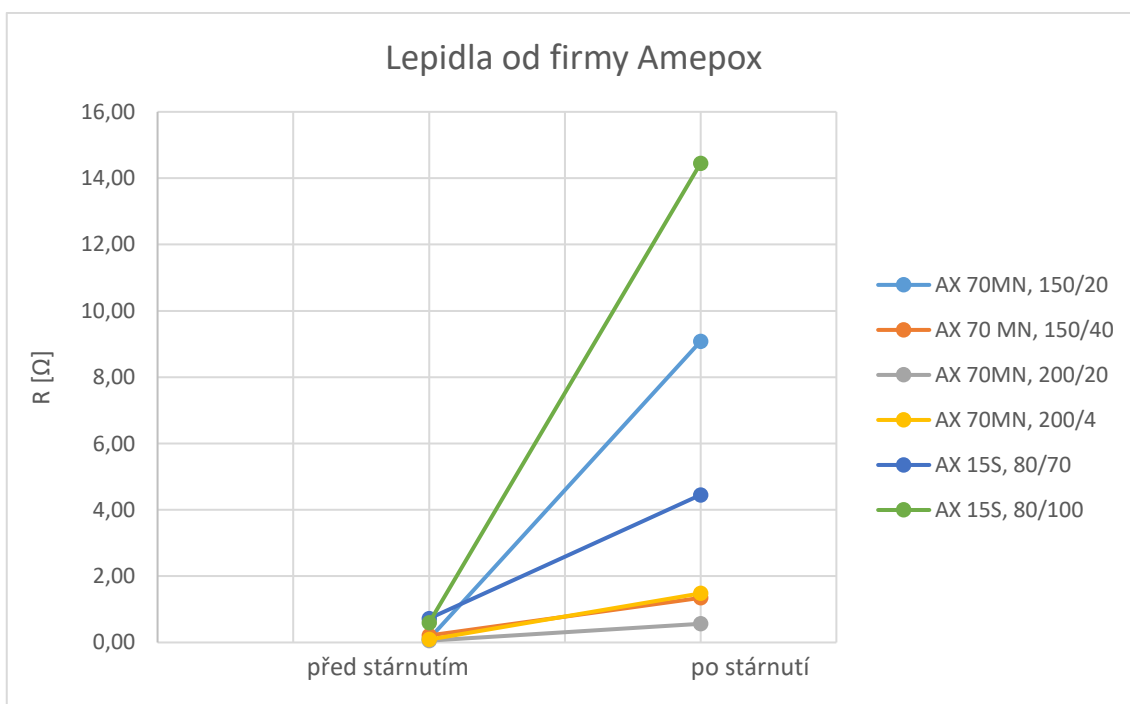
Nárůst elektrického odporu adhezních spojů po skončení teplotně-vlhkostního stárnutí byl pravděpodobně způsoben vznikem vrstviček oxidu na rozhraní vodivých částic, popřípadě vznikem elektrochemické koroze mezi stříbrnými vodivými částicemi a měděnou kontaktovací ploškou na desce plošného spoje [15].

V následujících dvou grafech je znázorněn nárůst elektrického odporu adhezních spojů před stárnutím a po stárnutí. Hodnoty jsou rozděleny do dvou grafů z důvodu přehlednosti.



Graf 4 - nárůst elektrického odporu po stárnutí vzorků

Tyto grafy jsou uvedeny proto, aby byl názorně vidět nárůst elektrického odporu z počáteční hodnoty před stárnutím na hodnotu po stárnutí. V horním grafu můžeme vidět, že vytvrzovací rozvrhy 80/60 a 80/80 vykazují nejen nejmenší hodnoty elektrického odporu po stárnutí, ale zároveň i nejnižší nárůsty elektrického odporu v průběhu stárnutí.



Graf 5 - nárůst elektrického odporu po stárnutí vzorků

Velice špatné vlastnosti z hlediska teplotně-vlhkostní odolnosti jeví dvousložkové lepidlo AX 15S od firmy Amepox. Jak už bylo dříve napsáno, tyto hodnoty jsou zapříčiněny nižší kvalitou lepidla nebo jeho aplikací po konci životnosti. V tomto případě můžeme hovořit o naprosté degradaci vzorků. Nejlepší vlastnosti u lepidla AX 70MN jako v předchozích měřeních jeví vytvrzovací profil 200/20.

7.3.2 Měření nelinearity VA charakteristiky

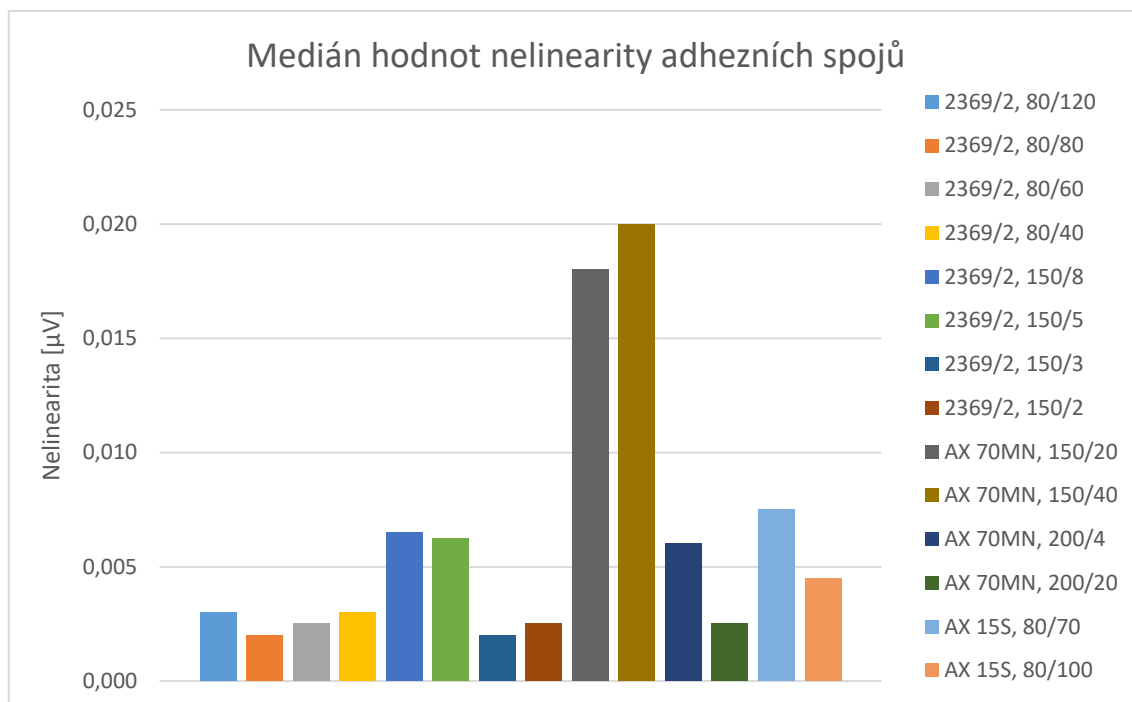
Měření nelinearity Va charakteristiky po stárnutí probíhalo za stejných podmínek a za použití stejného přístroje jako měření před stárnutím.

Z důvodu rozsáhlosti dat v následující tabulce uvádím pouze průměr, medián a směrodatnou odchylku. Kompletní naměřené hodnoty jsou v Příloze této práce.

Permacol 2369/2				
Teplota [°C]	80	80	80	80
Čas [min]	40	60	80	120
Průměr [μV]	0,004	0,003	0,004	0,003
medián [μV]	0,003	0,003	0,002	0,003
směrodatná odchylka [μV]	0,003	0,002	0,005	0,003
Permacol 2369/2				
Teplota [°C]	150	150	150	150
Čas [min]	2	3	5	8
Průměr [μV]	0,004	0,004	0,027	0,040
medián [μV]	0,003	0,002	0,006	0,007
směrodatná odchylka [μV]	0,003	0,004	0,043	0,071
Amebox AX 70MN				
Teplota [°C]	150	150	200	200
Čas [min]	20	40	20	4
Průměr [μV]	0,018	0,036	0,005	0,010
medián [μV]	0,018	0,020	0,003	0,006
směrodatná odchylka [μV]	0,012	0,037	0,003	0,009
Amebox AX 15S				
Teplota [°C]	80		80	
Čas [min]	70		100	
Průměr [μV]	0,009		0,014	
medián [μV]	0,008		0,005	
směrodatná odchylka [μV]	0,011		0,021	

Tabulka 5 - průměr, medián a směrodatná odchylka VA nelinearity po stárnutí

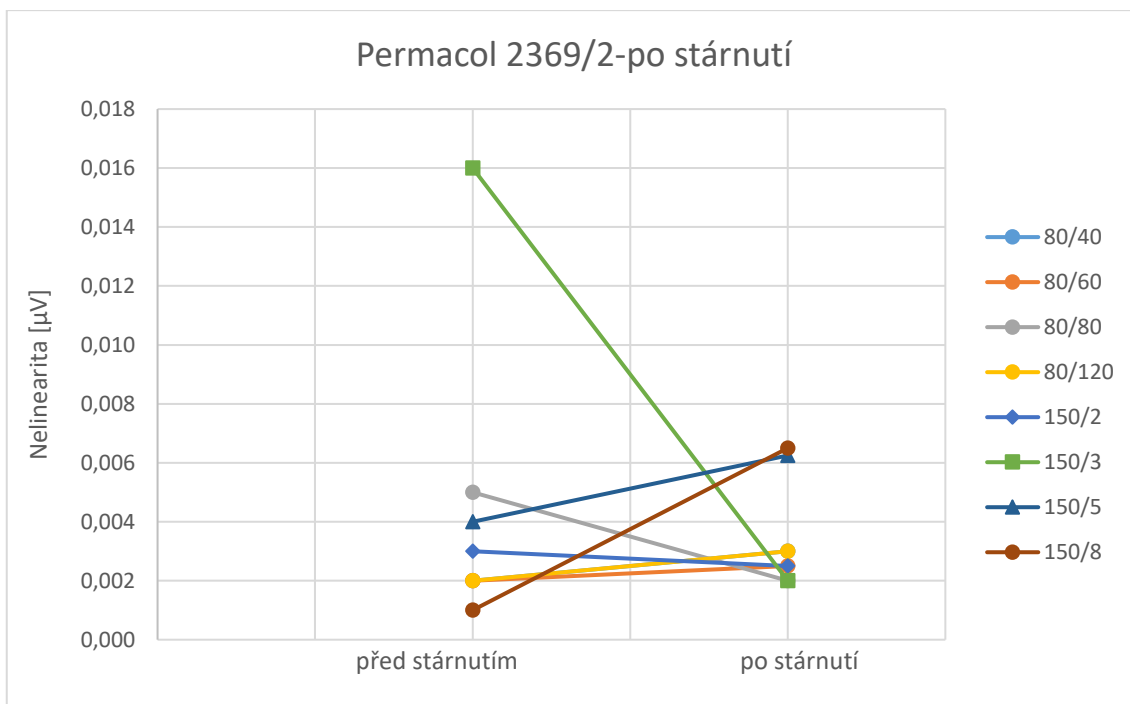
V následujícím grafu jsou vyneseny mediány změřených hodnot VA nelinearity vybraných vzorků po stárnutí. Legenda má stejný význam jako v předchozích případech.



Graf 6 - medián změřených hodnot VA nelinearity po stárnutí

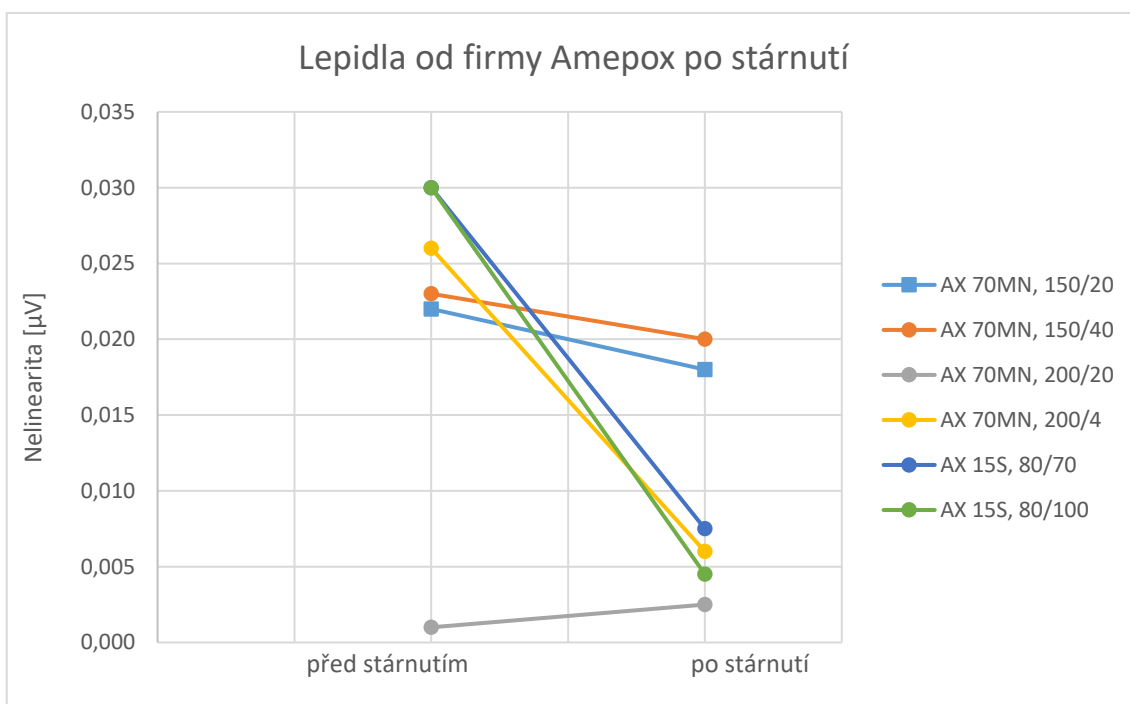
V grafu číslo 6 je vidět, že jako nejlepší a nejstabilnější lepidlo se ukázalo jednosložkové lepidlo 2369/2 od firmy Permacol. Tento trend se drží celou dobu ve všech měřeních.

V sedmém a osmém grafu na následující straně bychom na základě teoretické části práce předpokládali znatelný nárůst VA nelinearity u zkoumaných vzorků. Ve většině případů došlo k přímému opaku. Lepidlo, které se chovalo ve většině případů předvídatelně, bylo lepidlo 2369/2 od firmy Permacol. Razantní pokles hodnot nelinearity u vytvrzovacího rozvrhu 150/3 je překvapivý a jeho příčina bude předmětem dalšího zkoumání. Uvažovat o příčinách tohoto jevu v dané fázi výzkumu by bylo spekulativní, protože tento rozvrh jevil řádově vyšší hodnoty elektrického odporu i nelinearity před klimatickým stárnutím, způsobené nejspíše nedostatečným vytvrzením. Příčinou by zde mohla být i chyba při měření.



Graf 7 - změna VA nelinearity lepidla 2369/2 po stárnutí

Nebývalý pokles hodnot nelinearity po skončení klimatického stárnutí u lepidla AX 15S by mohl být zapříčiněn tím, že teplota v průběhu stárnutí byla blízká teplotě v průběhu vytvrzování lepidla. Tím mohlo dojít k dotvrzení lepidla, zmenšení jeho objemu, a tím zlepšení kvality kontaktů mezi vodivými částicemi lepidla a celkovému zlepšení kvality spoje.



Graf 8 - změna VA nelinearity vybraných vzorků od firmy Amepox

7.3.3 Shrnutí naměřených hodnot po stárnutí

Z naměřených hodnot po stárnutí se ukázalo, že z hlediska odolnosti je vhodnější vytvrzovat lepidlo 2369/2 po delší dobu za nižší teploty. Doporučený profil 80/60 se zde poté ukázal jako nejlepší.

Pro lepidlo AX 70MN se ukázal jako nejvhodnější vytvrzovací profil 200/20. Ten jako v případě před stárnutím i tentokrát předčil svými vlastnostmi doporučený vytvrzovací rozvrh 200/4. Použití nižší teploty, než je nejnižší doporučená, vedlo u lepidla AX 70MN k horším naměřeným hodnotám. Ty se projevily zejména u hodnot VA nelinearity.

7.4 Ekonomické zhodnocení

Hlavním cílem ekonomické části mé práce je zhodnocení rozdílného vytvrzovacího profilu lepidel ve vztahu s celkovými náklady. Výpočet celkových nákladů jsem před výpočtem čisté současné hodnoty upřednostnil z toho důvodu, jelikož při vytvrzování vodivých lepidel používám stále jednu technologii. Z toho důvodu by dle mého názoru neměl výpočet čisté současné hodnoty smysl. Navíc by bylo třeba určovat hotovostní toky a hodnotu diskontu. To by dle mého názoru převyšovalo rozsah této práce.

U níže uvedené úlohy se jedná o převedení experimentální části práce za určitých zjednodušujících parametrů do velkovýrobního měřítka, kde mohou být náklady lépe zhodnoceny a promítnuty.

Pro základní nastínění nákladů dle mého názoru stačí promítnout náklady pro jeden rok. Z toho důvodu jsem se rozhodl parametry jako inflaci a růst mezd při mých výpočtech zanedbat. Převod zahraničních měn na české koruny je aktuální k datu 15.4.2018.

Následující 3 ukázky zařízení představují mou teoretickou výrobní SMT linku.

F400 od firmy Jaguar

Jedná se o velice přesné, automatické zařízení využívající šablonový tisk pro aplikaci pájecích past a lepidel. V následující tabulce jsou zobrazeny vybrané parametry zařízení [12].

Čas cyklu (bez tisku)	<8 sec.
Výška x šířka DPS	50x50 mm – 400x340 mm
Rozměry rámu šablony	470x370 mm – 737x737 mm
Spotřeba	4,8 kW

Tabulka 6 vybrané parametry zařízení F400

TOP-8T-600 od firmy Jaguar

Jedná se o multifunkční, velice přesné pick and place zařízení. Stroj může fungovat ve dvou funkčních režimech na které dohlíží dva sety kamer [13].

V následující tabulce jsou vybrané parametry zařízení.

Výška x šířka DPS	50x50 mm – 600x350 mm
Tloušťka DPS	0,5 – 5 mm
Počet čipů za hodinu	42000
Přesnost	±0,02 mm
Spotřeba	4 kW

Tabulka 7 vybrané parametry zařízení TOP-8T-600

RO400FC od firmy Assemtec

Jedná se o konvekční reflow pec se čtyřmi ohřívacími zónami a jednou zónou chladící. Je vhodná jak pro pájení, tak i lepení díky rovnoměrnému přenosu tepla. Má až 49 nastavitelných režimů vytvrzování [14]. V následující tabulce jsou zobrazeny vybrané parametry zařízení.

Nastavitelná teplota	20–290 °C
Maximální šířka dopravníku	400 mm
Rychlost dopravníku	100-800 mm/min
Délka ohřívací části dopravníku	1620 mm
Spotřeba kontinuální	5,8 kW
Spotřeba při zahřívání	11,6 kW

Tabulka 8 vybrané parametry zařízení RO400FC

Podrobnější technické informace o výše zmíněných zařízeních jsou v Příloze práce.

Desky plošných spojů i šablonu jsem teoreticky namodeloval u firmy Printed s.r.o. DPS jsou jednovrstvé bez nepájivé masky. Základní materiál je FR4 o tloušťce 1,55 mm. Tloušťka měděného plátování je 18 μm. Výška a šířka jednotlivých DPS jsou 350x340 mm. Tyto rozměry jsou navrženy podle parametrů zobrazených v tabulkách u jednotlivých zařízeních. Šířka a výška šablony jsou 470x370 mm. Její tloušťka dosahuje 150 μm a její materiál je z ocelového plechu SUS-304. Po konzultaci se zástupcem firmy Printed s.r.o. mi bylo sděleno, že pokud se takto vytvořená šablona mechanicky nepoškodí, má prakticky neomezenou životnost. Přesto jsem se rozhodl stanovit životnost šablony na deset let.

Pro osazování jsou pro zachování korelace s experimentální částí práce používány nulové SMD odpory. Jejich cena při nákupu nad 5000 kusů je 0,075 Kč včetně DPH za kus. Počet rezistorů na jednu desku je 160.

Pokud budeme počítat se sto šedesáti rezistory na jednu DPS, v šabloně budeme mít 320 otvorů o rozměrech 1x1 mm pro protlačení lepidla. Výška otvoru je samotná výška šablony. Budeme počítat s průměrnou hustotou lepidla 2,2 g/cm³ a k výsledku ještě připočteme 10 procent jako odpad lepidla. Za těchto předpokladů můžeme napsat rovnici pro celkovou hmotnost spotřeby lepidla na výrobu jedné DPS. Celkovou hmotnost lepidla spotřebovaného pro osazení jedné desky označíme *S*.

$$S = \text{počet} * \text{rozměry} * \text{hustota} * 1,1$$

$$S = 320 * 1 * 1 * 0,150 * 2,2 * 10^{-3} * 1,1 = 0,12 \text{ g}$$

Počáteční investice v podobě tří zařízení budu účetně odepisovat po dobu deseti let. V následující tabulce jsou zobrazeny náklady, které jsou brány v potaz.

Náklady	F400	TOP-8T-600	RO400FC
Počáteční investice	688 073,00 Kč	410 357,00 Kč	1 150 000,00 Kč
Spotřeba zařízení [W]	4800	4000	5800
Spotřeba elektřiny zařízení za směnu	134,00 Kč	112,00 Kč	172,00 Kč
Spotřeba DPS na jeden cyklus	4		
Náklady v podobě pořízení DPS-1 kus	120,00 Kč		
Spotřeba lepidla na jednu DPS [g]	0,12		
Spotřeba součástek na jednu DPS	160		
Požizovací cena šablony	2 300,00 Kč		
Účetní odpisy šablony pro 1 rok	230 Kč		
Náklady součástek na jednu DPS	12,00 Kč		
Permacol 2369/2–1 kg	71 550,00 Kč		
Amepox AX 70MN – 1 kg	39 750,00 Kč		
Amepox AX 15S – 1 kg	38 230,89 Kč		
Měsíční hrubá mzda zaměstnanců	35 200,00 Kč	28 000,00 Kč	
Měsíční superhrubá mzda zaměstnanců	47 200,00 Kč	37 520,00 Kč	
Měsíční čistá mzda zaměstnanců	26 320,00 Kč	21 350,00 Kč	
Sociální a zdravotní pojištění	15 840,00 Kč	12 600,00 Kč	
Počet pracovních hodin denně	8		
Počet pracovních dní v roce	250		
Účetní odpisy zařízení pro 1 rok	68 807,00 Kč	41 035,00 Kč	115 000,00 Kč

Tabulka 9 přehled uvažovaných nákladů

Požizovací ceny zařízení a lepidel vycházejí zejména z e-mailové komunikace s firmami. Při vyčíslení ceny spotřeby elektřiny za směnu byla brána průměrná hodnota ceny elektřiny a to 3,50 Kč/kWh. Při vyčíslování spotřeby elektřiny reflow pece už je dopředu započítán půlhodinový zvýšený výkon nutný pro zahřátí pece. Abych zachoval stejný princip vytvrzování jako při experimentální části práce, rozhodl jsem se všechny výhřevné zóny průběžné pece nastavit na jednu stejnou vytvrzovací teplotu. Jelikož je jejich celková délka 1620 mm, v jednom cyklu se dají

vytvrdit 4 DPS. Pro výpočet superhrubé a čisté mzdy jsem použil internetovou kalkulačku na serveru vypocet.cz. Jak bylo výše zmíněno, zařízení rovnoměrně odepisují po dobu deseti let. Při porovnávání jednotlivých vytvrzovacích profilů můžu na tento problém pohlížet z více perspektiv. Jednak z hlediska počtu vyrobených výrobků za určitý časový úsek a jejich nákladů, nebo jako výši nákladů při výrobě konstantního množství. V následujících tabulkách jsou zobrazeny oba náhledy na problematiku. Půlhodina nutná k zahřátí pece není zakalkulována do osmi pracovních hodin. Je automaticky uvažováno, že pec je zapnuta prvním příchozím zaměstnancem půl hodiny před začátkem směny. Měsíc má 21 pracovních dní a rok má 250 pracovních dní. Počet pracovních dní je aktuální pro rok 2018, dovolená pracovníků zde nebyla započítána.

V následující tabulce jsou vyčísleny celkové uvažované náklady za předpokladu, že bychom používali neustále jeden vytvrzovací rozvrh po uvedené dobu ve sloupci.

Sloupec parametry vytvrzování chápeme jako teplotu/čas ([°C] /[min]) po kterou byly vzorky vytvrzovány. Sloupec počet DPS za rok udává počet vyrobených osazených plošných spojů za rok za předpokladu používání stále jednoho vytvrzovacího profilu.

Lepidlo	Parametry vytvrzování	Celkové náklady vztahované na:			počet DPS za rok
		8 hodin	1 měsíc	1 rok	
Amepox AX 70 MN	150/20	18 023 Kč	387 963 Kč	4 628 463 Kč	24 000
	150/40	11 458 Kč	250 099 Kč	2 987 223 Kč	12 000
	200/4	70 543 Kč	1 490 877 Kč	17 758 383 Kč	120 000
	200/20	18 072 Kč	389 086 Kč	4 641 923 Kč	24 000
Amepox AX 15S	80/70	8 640 Kč	190 909 Kč	2 282 584 Kč	6 857
	80/100	7 516 Kč	167 307 Kč	2 001 604 Kč	4 800
Permacol 2369/2	80/40	11 642 Kč	253 946 Kč	3 033 015 Kč	12 000
	80/60	9 392 Kč	206 709 Kč	2 470 671 Kč	8 000
	80/80	8 268 Kč	183 090 Kč	2 189 499 Kč	6 000
	80/120	7 143 Kč	159 472 Kč	1 908 327 Kč	4 000
	150/2	139 856 Kč	2 946 449 Kč	35 086 623 Kč	240 000
	150/3	94 869 Kč	2 001 711 Kč	23 839 743 Kč	160 000
	150/5	58 878 Kč	1 245 920 Kč	14 842 239 Kč	96 000
150/8	38 634 Kč	820 788 Kč	9 781 143 Kč	60 000	

Tabulka 10 celkové náklady vztahované na hodiny

Při tomto pohledu na problematiku jsou v jednotlivých sloupcích mzdové náklady a odpisy konstantní. Díky tomu je možné lépe sledovat dopad ostatních variabilních nákladů.

Z tabulky je vidět, že vytvrzovací profily, které trvají nejdéle, přirozeně vykazují nejnižší náklady na daný časový interval. Při těchto vytvrzovacích profilech totiž dochází k nižší spotřebě lepidla, desek a součástek za směnu, den, popřípadě rok. Podíl v tomto případě variabilních nákladů lze nejlépe sledovat u lepidla Permacol. U tohoto lepidla totiž jsou až čtyři rozvrhy o stejné teplotě

lišící se pouze dobou vytvrzování. U rozvrhů 80/40 a 80/80 je vidět, že přestože počet vyrobených kusů u kratšího rozvrhu je dvojnásobný, celkové náklady jsou větší pouze o polovinu. Pokud tento případ zobecníme na celou tabulku, tak z ní vyplývá, že z dlouhodobého hlediska je ekonomicky výhodnější používat ty rozvrhy, které trvají kratší dobu. Samozřejmě je potřeba najít vhodnou hranici mezi technologickým a ekonomickým optimem.

V následující tabulce jsou zobrazeny celkové náklady na výrobu osazené DPS. Pro zobrazení rozdílu nákladů ve větším měřítku jsou náklady zobrazeny i pro tisíc kusů. Sloupec parametry vytvrzování má stejný význam jako u předchozí tabulky.

Lepidlo	Parametry vytvrzování	náklady na 1 DPS	náklady na výrobu 1000 ks
Amepox AX 70 MN	150/20	188 Kč	187 744 Kč
	150/40	239 Kč	238 717 Kč
	200/4	147 Kč	146 965 Kč
	200/20	190 Kč	189 621 Kč
Amepox AX 15S	80/70	315 Kč	314 996 Kč
	80/100	391 Kč	391 456 Kč
Permacol 2369/2	80/40	243 Kč	242 533 Kč
	80/60	294 Kč	293 507 Kč
	80/80	344 Kč	344 481 Kč
	80/120	446 Kč	446 428 Kč
	150/2	146 Kč	145 683 Kč
	150/3	148 Kč	148 232 Kč
	150/5	153 Kč	153 329 Kč
	150/8	161 Kč	160 975 Kč

Tabulka 11 celkové náklady vztažené na počet výrobků

Tabulka jedenáct názorněji ukazuje, co už bylo řečeno dříve. Tedy nejnižší celkové náklady vykazuje vytvrzovací rozvrh, který trvá nejméně minut. Jedná se o vytvrzení jednosložkového lepidla 2369/2 od firmy Permacol teplotou 150 °C po dobu dvou minut. Také vidíme, že dominantním nákladem pro krátkodobé rozvrhy je pořizovací cena desky ve výši 120 Kč.

U vytvrzovacích profilů 80/40 lepidla 2369/2 od firmy Permacol a vytvrzovacího profilu 150/40 lepidla AX 70MN od firmy Amepox vidíme, jak malou roli hraje rozdílná cena lepidla a spotřeba pece. Přestože cena lepidla od firmy Permacol je téměř dvojnásobná oproti ceně lepidla AX 70MN, spotřeba 0,12 g lepidla na osazení jedné desky plošného spoje je natolik malá, že to ovlivní výslednou cenu minimálně.

7.4.1 Shrnutí ekonomické části práce

Výroba o vysokém objemu součástek ukázala, jak malou roli hraje v celkových nákladech téměř dvojnásobná cena lepidla od firmy Permacol oproti lepidlu AX 70MN od firmy Amepox. Samozřejmě se jedná o výsledek za určitých zjednodušujících parametrů a s rostoucím objemem výroby bude tento rozdíl v celkové ceně nákladů nabývat. Ale také tak budou úměrně narůstat i ostatní variabilní náklady a cena lepidla by měla zůstat poměrově stále stejně nevýznamná. Samozřejmě toto tvrzení platí za předpokladu, že spotřeba lepidla na osazení jednoho plošného spoje bude podobně nízká jako v tomto případě. Pro složitější plošné spoje, kde spotřeba lepidla bude přirozeně vyšší, se cena lepidla promítne dramatičtěji.

Z těchto poznatků vyplývá, že při výběru vhodného lepidla jsou přednostně důležitější jeho technické parametry změřené v experimentální části práce než jeho cena.

Zároveň bylo potvrzeno, že nejvíce ekonomicky výhodné jsou ty rozvrhy, které trvají nejkratší dobu. S tímto poznatkem ale musíme brát v potaz i technické vlastnosti, které daný vytvrzovací rozvrh jeví. V experimentální části bylo vidět, že rozvrhy 80/40 a 80/80 lepidla Permacol vykazují obdobné hodnoty měřených veličin. V tomto případě se tedy celkově jeví rozvrh 80/40 jako výhodnější rozvrh ze dvou zmíněných. Na druhou stranu rozvrh 150/2 se jeví jako ekonomicky nejvýhodnější ze všech rozvrhů, ale z technické stránky je nevhodný a těžko předvídatelný.

U lepidla Amepox AX 70MN se z technologického hlediska jeví jako nejlepší ekonomicky nejdražší vytvrzovací rozvrh 200/20.

8 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce v krátkosti shrnuje vše nejdůležitější ohledně pojmu elektricky vodivá lepidla. Práce popisuje strukturu a typy lepidel, teorii jejich vodivosti a v neposlední řadě způsoby aplikace lepidel. V teoretické části jsou ještě v krátkosti popsána dvě měření základních vlastností lepidel.

Hlavní částí práce je její část experimentální. Práce se zde zabývá vlivem rozdílných vytvrzovacích rozvrhů u tří vybraných lepidel na kvalitu adhezních spojů z nich vytvořených. Jedná se o dvě jednosložková lepidla a jedno lepidlo dvousložkové. Lepidla jsou testována z hlediska elektrického odporu a nelinearity VA charakteristiky. Z těchto testů vychází nejlépe nejdražší lepidlo 2369/2 od firmy Permacol. Měření dále ukazují, že výrobcem doporučené vytvrzovací rozvrhy nejsou vždy nejlepší. Například vytvrzovací rozvrh 200/20 jednosložkového lepidla AX 70MN ve všech ohledech vykazoval nejlepší hodnoty ze zkoumaných rozvrhů daného lepidla. Jedná se přitom o vytvrzovací rozvrh velice vzdálený rozvrhu doporučenému. Podrobnější výsledky měření vlastností lepidel a možné příčiny těchto výsledků jsou blíže popsány v kapitolách věnovaných daným měřením.

Ke hlubší analýze vlivu různých vytvrzovacích rozvrhů na kvalitu adhezních spojů bylo, navíc oproti zadání, provedeno i klimatické stárnutí lepidel. Po prvotním změření vlastností byla lepidla umístěna do klimatické komory za účelem teplotně-vlhkostního stárnutí (85 °C/85 % RV). Nejvyšší odolnost proti klimatickému namáhání jevílo opět lepidlo od firmy Permacol. Podrobnější rozbor výsledků a jejich možných příčin je v kapitolách věnovaných měřením vlastností adhezních spojů po klimatickém stárnutí.

V závěru práce je i propočet celkových výrobních nákladů, kdyby byla experimentální úloha převedena do velkovýrobního měřítka. Z poznatků vyplývá, že cena lepidla má v tomto případě daleko menší dopad na celkové výrobní náklady než ostatní variabilní náklady. Hlouběji je tato problematika rozebrána ve shrnutí na konci ekonomické části práce.

Tato práce rozšiřuje řady studií zabývajících se problematikou a vlastnostmi elektricky vodivých lepidel. Poskytuje základní informace o elektricky vodivých lepidlech a nastiňuje dopad rozdílných vytvrzovacích rozvrhů na jejich nejdůležitější vlastnosti.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] POŘÍZEK, Michal. *Elektricky vodivá lepidla* [online]. 2016 [cit. 2017-10-21]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/38309/po%C5%99%C3%ADzek_2016_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [2] *Propojování v elektronice: Elektrické spoje* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/08a_propojovani_v_elektronice.pdf
- [3] MACH, Pavel. *Elektricky vodivé lepení v elektrotechnice* [online]. [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34502/mod_resource/content/1/Elektricky_vodive_lepeni_v_elektrotechnice.pdf
- [4] BIN, Su. *Electriccal, thermomechanical and reliability modeling of electrically conductiv adhesive* [online]. 2006 [cit. 2017-10-23]. Disertační práce. Georgia Institute of Technology.
Dostupné z: https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/10425/su_bin_200605_phd.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [5] BOLCEK, Martin. *Aplikace lepidel v mikroelektronických sestavaách* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-10-23]. Bakalářská práce. Vysoké učení Technické v Brně.
Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/69408/bakalarska_prace_bolcek.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [6] *Polymery: Rozdělení a charakteristika polymerů* [online]. [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [7] KRČMÁŘ, Ondřej. *Elektricky vodivá adheziva pro flexibilní substráty* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2017-10-29]. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni.
Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/xmlui/bitstream/handle/11025/18897/DP_Krcmar_Ondrej.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [8] ŽALSKÁ, Pavlína. *Stárnutí spojů vytvořených elektricky vodivými lepidly* [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-11-13]. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68445/F3-DP-2017-Zalska-Pavlina-Starnuti_spoju_vytvorenych_elektricky_vodivymi_lepidly.pdf?sequence=-1
- [9] *Měření malých odporů čtyřvodičovou metodou: Fyzikální praktikum* [online]. [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: [file:///C:/Users/Jakub/Downloads/Mereni_malych_odporu_lab%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Jakub/Downloads/Mereni_malych_odporu_lab%20(2).pdf)
- [10] *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2017 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/rohs-elektrozarizeni/zakladni-informace-k-problematice-rohs--158558/>
- [11] *CLT1: Component Linearity Test Equipment* [online]. London, 1991 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: https://linearaudio.net/sites/linearaudio.net/files/CB-to-ES-V1-ref-2-IMG_0001.pdf
- [12] *JAGUAR Automation Equipment: F400 High Accuracy Automatic Stencil Printer* [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.jaguar-ele.net/te_product_c/2015-08-19/2202.shtml
- [13] *TOP-8T-600: High Precison Pick and Place machine* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://jaguarsmt.en.made-in-china.com/product/myfQMvBxOpcl/China-2017-High-Precision-Pick-and-Place-Machine-Top-8t-600-Factory-Price.html>
- [14] *Produkty: Lizard* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.essemtec.com/produkte/reflow-oefen/>
- [15] SAVOLAINEN, Petri. *DfR Solutions: Failure Modes in Conductive Adhesives* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.dfrsolutions.com/hubfs/Resources/services/Failure-Modes-in-Conductive-Adhesives.pdf?t=1517409357240>

PŘÍLOHA

Technické informace o měřených izotropních lepidlech

- Permacol 2369/2

Technical data

Base	: epoxy
Colour	: silver
Viscosity	: 30.000 mPa·s
Particle size	: <50 µm
Application method	: dispensing / stencil printing
Curing schedule	150°C 3 min.
	125°C 6 min.
	110°C 10 min.
	100°C 15 min.
	80°C 60 min.
Volume resistivity	: <3x10 ⁻⁴ Ω.cm
Hardness	: 70° Shore D

Curing at temperatures below 125°C will obtain an increase of the volume resistivity.

- Amepox AX 70MN

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

- Amepox AX 15S

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

Naměřené hodnoty elektrického odporu před stárnutím

Permacol 2369/2								
Teplota [°C]	80				80			
čas [min]	80				60			
R [mΩ]	555,0	208,5	77,3	170,9	78,8	118,8	249,7	153,0
	226,6	286,7	367,0	163,4	97,7	168,7	258,0	148,8
	249,4	138,8	178,9	240,6	87,5	122,7	199,0	249,2
	205,6	188,8	291,4	388,0	91,6	90,4	234,0	238,0
	228,8	317,6	252,3	115,3	123,8	94,0	138,0	257,0
průměr [mΩ]	242,545				159,9			
medián [mΩ]	227,7				143,4			
směrodatná odchylka [mΩ]	104,87				77,39			
Permacol 2369/2								
Teplota [°C]	80				80			
čas [min]	120				40			
R [mΩ]	241,2	30,0	49,0	74,6	74,4	73,3	109,7	162,2
	150,0	91,2	86,7	111,4	93,0	95,9	454,3	205,0
	109,4	115,6	70,8	70,2	47,6	71,4	182,0	214,3
	172,4	149,1	72,5	60,6	58,8	97,0	138,4	278,0
	49,3	111,6	136,6	43,3	87,0	80,8	251,3	290,0
průměr [mΩ]	99,775				153,2			
medián [mΩ]	88,95				103,4			
směrodatná odchylka [mΩ]	50,13				91,27			
Permacol 2369/2								
Teplota [°C]	150				150			
čas [min]	8				3			
R [mΩ]	67,0	170,0	31,3	33,9	7600,0	1400,0	222,0	291,0
	37,3	33,8	34,0	39,0	11000,0	1300,0	465,0	5000,0
	30,3	56,4	50,7	33,2	1000,0	9000,0	513,0	738,0
	102,7	77,0	39,6	35,5	1940,0	4900,0	1600,0	1005,0
	32,7	30,7	73,4	36,0	371,0	12200,0	198,0	274,0
průměr [mΩ]	52,225				3050,9			
medián [mΩ]	36,65				1152,5			
směrodatná odchylka [mΩ]	33,13				3867,22			

Permacol 2369/2								
Teplota [°C]	150				150			
čas [min]	5				2			
R [mΩ]	66,7	198,5	76,5	55,8	1900,0	1700,0	2000,0	881,6
	42,4	92,1	101,3	61,4	807,8	1400,0	1000,0	583,3
	60,0	45,5	196,4	96,1	1900,0	809,0	3800,0	1200,0
	43,5	57,8	106,3	56,5	1900,0	1000,0	688,0	1900,0
	72,0	1300,0	40,5	57,3	1550,0	862,0	1100,0	6600,0
průměr [mΩ]	141,3295				1679,1			
medián [mΩ]	64,05				1300,0			
směrodatná odchylka [mΩ]	269,35				905,93			
Amepox AX 70MN								
Teplota [°C]	150				200			
čas [min]	20				4			
R [mΩ]	2800,0	495,8	124,1	52,7	264,0	277,0	220,0	76,4
	296,6	136,1	167,9	134,3	104,2	80,1	91,0	67,6
	121,9	159,3	120,0	316,1	107,6	134,6	88,5	97,5
	170,1	98,5	275,7	148,7	79,3	60,0	62,4	112,8
	200,8	78,0	66,3	960,0	80,5	58,1	85,6	469,0
	168,5	28,0	114,4	75,3	120,5	57,0	112,0	65,6
	134,5	2,3	238,2	150,3	67,6	74,0	76,5	62,0
	95,3	86,3	137,6	193,6	76,0	61,9	53,8	102,5
	58,9	123,8	96,0	125,9	93,8	195,0	66,0	113,3
	61,0	97,3	94,0	209,0	177,1	157,4	93,0	56,2
průměr [mΩ]	114,51				112,4			
medián [mΩ]	105,85				87,1			
směrodatná odchylka [mΩ]	439,50				146,45			
Amepox AX 70MN								
Teplota [°C]	150							
čas [min]	40							
R [mΩ]	4000,0	720,7			222,3		20,7	
	301,3	231,4			201,1		365,3	
	182,2	210,0			110,9		243,1	
	223,1	166,1			70,7		127,6	
	352,6	65,7			64,2		211,5	
průměr [mΩ]	404,5							
medián [mΩ]	210,8							
směrodatná odchylka [mΩ]	837,84							

Amepox AX 70MN								
Teplota [°C]	200							
čas [min]	20							
R [mΩ]	53,0	34,4	35,5	72,0				
	46,5	47,2	55,1	119,0				
	50,3	37,3	40,7	66,1				
	48,1	46,6	71,0	45,7				
	37,0	58,6	68,6	155,5				
	70,6	55,4	70,5	52,8				
	82,0	54,3	47,7	45,2				
	63,7	61,5	36,2	59,1				
	112,7	100,8	49,2	46,3				
	43,6	65,7	31,1	47,9				
průměr [mΩ]	59,815							
medián [mΩ]	54,85							
směrodatná odchylka [mΩ]	24,74							
Amepox AX 15S								
Teplota [°C]	80				80			
čas [min]	70				100			
R [mΩ]	1800,0	880,2	587,5	679,0	7,5	1000,0	904,0	543,0
	701,0	990,0	333,2	970,0	370,0	5100,0	346,7	435,7
	520,9	2460,0	967,0	796,0	2400,0	643,0	368,2	287,0
	84,0	740,0	362,4	1490,0	950,0	736,0	670,0	864,0
	87,2	1700,0	427,9	288,7	877,4	363,2	241,3	358,0
průměr [mΩ]	843,25				873,3			
medián [mΩ]	720,5				593,0			
směrodatná odchylka [mΩ]	595,18				1075,91			

Naměřené hodnoty nelinearity před stárnutím

Permacol 2369/2								
Teplota [°C]	80				80			
čas [min]	120				80			
U [μV]	0,003	0,001	0,001	0,001	0,010	0,002	0,004	0,021
	0,004	0,004	0,001	0,001	0,005	0,010	0,004	0,004
	0,007	0,004	0,001	0,012	0,006	0,003	0,005	0,006
	0,008	0,001	0,001	0,003	0,006	0,002	0,005	0,005
	0,026	0,003	0,001	0,002	0,002	0,004	0,009	0,007
průměr [μV]	0,004				0,006			
medián [μV]	0,002				0,005			
směrodatná odchylka [μV]	0,0058				0,0032			

Permacol 2369/2								
Teplota [°C]	80				80			
čas [min]	60				40			
U [μV]	0,002	0,001	0,001	0,002	0,010	0,002	0,006	0,002
	0,002	0,001	0,001	0,002	0,008	0,003	0,001	0,008
	0,001	0,003	0,002	0,006	0,007	0,002	0,001	0,001
	0,003	0,001	0,001	0,001	0,020	0,001	0,002	0,009
	0,002	0,002	0,001	0,001	0,006	0,001	0,001	0,001
průměr [μV]	0,002				0,004625			
medián [μV]	0,002				0,002			
směrodatná odchylka [μV]	0,0012				0,0045			
Permacol 2369/2								
Teplota [°C]	150				150			
čas [min]	3				2			
U [μV]	0,024	0,012	0,001	0,006	0,002	0,002	0,008	0,002
	0,036	0,044	0,003	0,022	0,002	0,003	0,024	0,004
	0,065	0,040	0,005	0,016	0,007	0,004	0,018	0,003
	0,075	0,008	0,002	0,015	0,016	0,002	0,010	0,002
	0,030	0,016	0,001	0,038	0,003	0,003	0,016	0,003
průměr [μV]	0,023				0,00668			
medián [μV]	0,016				0,003			
směrodatná odchylka [μV]	0,0207				0,0094			

Permacol 2369/2								
Teplota [°C]	150				150			
čas [min]	8				5			
U [μV]	0,001	0,008	0,003	0,001	0,005	0,001	0,006	0,200
	0,010	0,001	0,010	0,001	0,005	0,001	0,001	0,064
	0,001	0,006	0,002	0,001	0,035	0,001	0,002	0,042
	0,001	0,001	0,004	0,004	0,003	0,001	0,001	0,024
	0,001	0,001	0,016	0,001	0,003	0,001	0,007	0,032
průměr [μV]	0,004				0,022			
medián [μV]	0,001				0,004			
směrodatná odchylka [μV]	0,0041				0,0073			

Amepox AX 70MN								
Teplota [°C]	200				150			
čas [min]	4				20			
U [μV]	0,020	0,016	0,058	0,100	0,016	0,170	0,026	0,070
	0,018	0,015	0,160	0,020	0,200	0,110	0,025	0,020
	0,038	0,012	0,034	0,024	0,080	0,380	0,014	0,002
	0,028	0,010	0,030	0,030	0,100	0,210	0,050	0,012
	0,240	0,100	0,034	0,028	0,140	0,100	0,016	0,012
	0,710	0,001	0,010	0,034	0,005	0,008	0,007	0,032
	0,440	0,001	0,020	0,030	0,001	0,003	0,014	0,160
	0,320	0,001	0,012	0,012	0,001	0,005	0,018	0,120
	0,180	0,001	0,010	0,014	0,001	0,024	0,001	0,100
0,160	0,010	0,010	0,170	0,000	0,012	0,120	0,300	
průměr [μV]	0,079				0,067			
medián [μV]	0,026				0,022			
směrodatná odchylka [μV]	0,1376				0,0783			
Amepox AX 70 MN								
Teplota [°C]	150							
čas [min]	40							
U [μV]	0,300	0,050			0,140	0,001		
	0,100	0,015			0,014	0,030		
	0,050	0,009			0,025	0,010		
	0,120	0,010			0,012	0,060		
	0,040	0,020			0,016	0,010		
průměr [μV]	0,052							
medián [μV]	0,023							
směrodatná odchylka [μV]	0,0686							
Amepox AX 70MN								
Teplota [°C]	200							
čas [min]	20							
U [μV]	0,002	0,001			0,001	0,001		
	0,015	0,002			0,002	0,001		
	0,001	0,001			0,001	0,001		
	0,001	0,001			0,001	0,001		
	0,002	0,002			0,001	0,001		
	0,032	0,001			0,001	0,001		
	0,010	0,002			0,001	0,001		
	0,010	0,001			0,001	0,001		
	0,008	0,001			0,001	0,001		
	0,001	0,001			0,003	0,001		
průměr [μV]	0,003							
medián [μV]	0,001							
směrodatná odchylka [μV]	0,0056							

Amepox AX 15S								
Teplota [°C]	80				80			
čas [min]	70				100			
U [μV]	0,030	0,050	0,050	0,007	0,028	0,140	0,008	0,007
	0,028	0,026	0,340	0,008	0,076	0,080	0,003	0,020
	0,030	0,018	0,040	0,040	0,040	0,220	0,030	0,018
	0,026	0,014	0,250	0,011	0,040	0,120	0,004	0,016
	0,040	0,010	0,280	0,012	0,044	0,050	0,010	0,020
průměr [μV]	0,066				0,049			
medián [μV]	0,029				0,029			
směrodatná odchylka [μV]	0,0963				0,0543			

Naměřené hodnoty elektrického odporu po stárnutí

Permacol 2369/2								
Teplota [°C]	80		80		80		80	
čas [min]	40		60		80		120	
R [Ω]	0,34	1,06	0,68	0,30	4,83	0,81	1,97	0,91
	3,00	2,65	0,42	0,53	0,65	0,65	0,59	0,38
	1,31	0,59	0,61	0,21	1,01	0,55	0,41	0,70
	0,41	3,55	0,41	0,25	1,72	0,41	1,72	1,20
	1,22	1,23	0,39	0,32	0,34	0,42	2,28	0,83
průměr [Ω]	1,54		0,41		1,14		1,10	
medián [Ω]	1,23		0,40		0,65		0,87	
směrodatná odchylka [Ω]	1,072		0,146		1,289		0,638	
Permacol 2369/2								
Teplota [°C]	150		150		150		150	
čas [min]	2		3		5		8	
R [Ω]	1,41	1,31	0,83	4,03	0,34	2,80	4,35	0,09
	5,69	0,38	0,48	4,51	3,85	4,16	1290,00	0,19
	3,76	2,02	2,22	0,37	2,16·10 ⁵	59,76	83,22	0,04
	0,49	2,75	24,13	3,24	0,93	73,26	122,65	3,69
	1,18	5,33	3,32	673,60	6,74	9,8·10 ⁵	132,98	0,27
průměr [Ω]	2,43		71,67		119571,18		163,75	
medián [Ω]	1,72		3,28		5,45		4,02	
směrodatná odchylka [Ω]	1,814		200,752		293920,643		378,900	

Amebox AX 70MN								
Teplota [°C]	150		150		200		200	
čas [min]	20		40		20		4	
R [Ω]	0,15	19,00	9,02	1,38	1,93	0,56	8,48	3,84
	7,48	10,68	5,65	1,71	0,57	0,79	1,76	1,44
	11,84	1,09	1,31	0,46	0,51	0,45	4,04	0,95
	15,92	5,68	1,74	1,29	1,56	1,08	0,44	0,91
	15,71	0,56	0,47	0,58	0,12	0,47	1,52	0,69
průměr [Ω]	8,81		2,36		0,80		2,41	
medián [Ω]	9,08		1,35		0,56		1,48	
směrodatná odchylka [Ω]	6,550		2,637		0,531		2,343	
Amebox 15S								
Teplota [°C]	80				80			
čas [min]	70				100			
R [Ω]	3,70		11,49		43,65		11,08	
	10,17		6,22		1,63·10 ⁷		0,40	
	1,00		0,24		30,93		2,08	
	11,79		2,07		16,36		12,54	
	5,20		2,04		9,35·10 ⁶		0,74	
průměr [Ω]	5,39		2565011,78					
medián [Ω]	4,45		14,45					
směrodatná odchylka [Ω]	4,155		5360220,572					

Naměřené hodnoty nelinearity po stárnutí

Permacol 2369/2								
Teplota [°C]	80		80		80		80	
čas [min]	40		60		80		120	
U [μV]	0,003	0,004	0,004	0,003	0,020	0,003	0,004	0,003
	0,008	0,003	0,002	0,004	0,001	0,001	0,003	0,001
	0,010	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,001	0,002
	0,002	0,006	0,002	0,001	0,002	0,002	0,005	0,003
	0,001	0,003	0,008	0,005	0,002	0,001	0,010	0,000
průměr [μV]	0,004		0,003		0,004		0,003	
medián [μV]	0,003		0,003		0,002		0,003	
směrodatná odchylka [μV]	0,003		0,002		0,005		0,003	

Permacol 2369/2								
Teplota [°C]	150		150		150		150	
čas [min]	2		3		5		8	
U [μV]	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,027	0,001	0,050
	0,010	0,002	0,001	0,010	0,001	0,014	0,001	0,020
	0,006	0,003	0,001	0,001	0,001	0,008	0,001	0,012
	0,001	0,002	0,009	0,010	0,005	0,070	0,001	0,070
	0,003	0,009	0,001	0,002	0,001	0,141	0,001	0,240
průměr [μV]	0,004		0,004		0,027		0,040	
medián [μV]	0,003		0,002		0,006		0,007	
směrodatná odchylka [μV]	0,003		0,004		0,043		0,071	
Amepox AX 70MN								
Teplota [°C]	150		150		200		200	
čas [min]	20		40		20		4	
U [μV]	0,020	0,001	0,100	0,020	0,010	0,002	0,007	0,020
	0,050	0,010	0,010	0,004	0,002	0,002	0,003	0,005
	0,018	0,010	0,020	0,004	0,002	0,010	0,004	0,030
	0,020	0,012	0,070	0,100	0,002	0,003	0,002	0,015
	0,022	0,018	0,027	0,003	0,007	0,007	0,008	0,004
průměr [μV]	0,018		0,036		0,005		0,010	
medián [μV]	0,018		0,020		0,003		0,006	
směrodatná odchylka [μV]	0,012		0,037		0,003		0,009	
Amepox AX 15S								
Teplota [°C]	80				80			
čas [min]	70				100			
U [μV]	0,003	0,002			0,005	0,050		
	0,010	0,010			0,002	0,005		
	0,005	0,001			0,002	0,004		
	0,040	0,010			0,002	0,060		
	0,010	0,002			0,001	0,006		
průměr [μV]	0,009				0,014			
medián [μV]	0,008				0,005			
směrodatná odchylka [μV]	0,011				0,021			

Technické parametry přístrojů SMT linky

- F400

Items	Parameter
Repeat Position Accuracy	±0.008mm
Printing Accuracy	±0.015mm
Cycle Time	<8s (Excluding Printing & Cleaning)
Products Changeover	<5Min
Screen Stencil Size/Min	470mm X 370mm

Screen Stencil Size/Max	737mm X 737mm	
Screen Stencil Size/Thickness	20mm ~ 40mm	
PCB Size/Min	50X50mm	
PCB Size/Max	400X340mm	
PCB Thickness	0.6~6mm	
PCB Warpage Ratio	<1% (Based on diagonal length)	
Platform to Board distance	13mm (standard configuration) , 25mm (optional configuration)	
Edge to Board rim distance	3mm	
Transport Height	900±40mm	
Transport Direction	Left-Right; Right-Left; Left-Left; Right-Right	
Transport Speed	100-1500mm/sec Programmable	
Board Location	Support System	Magnetic pin/Side support block/Flexible automatic pin (optional)
	Clamping System	Elastic side clamping/Vacuum nozzle/Elastic Z-direction tablet (Optional)
Print head	Programmable motor driven print head/ Integrated motor driven and pneumatic control print head (Optional)	
Squeegee Speed	10~200mm/sec	
Squeegee Pressure	0-15kg programmable (Standard)/ 0~0.5MPa with adjustable pressure reducing meter valve (Optional closed-loop pressure feedback system)	
Squeegee Angle	60°(Standard)/55°/45°	
Squeegee Type	Steel squeegee (standard), rubber squeegee, customizable other types of squeegee	
Stencil Separation Speed	0.01~10mm/sec Programmable	
Cleaning Method	Dry-type, wet-type, vacuum-type (Programmable combination of Cleaning methods)	
Table Adjustment Range	X: ±4mm;Y:±6mm;θ:±2°	

- TOP-8T-600

Length*Width*Height 1400mm*1550mm *1440mm
 Total Weight 1000kg
 PCB Length Width Max:600*350mm Min:50*50mm
 PCB Thickness 0.5-5mm
 PCB Clamping Adjustable pressure pneumatic
 Mounting Mode Group picking and separate placing\separate picking and separate placing
 Software Windows 7
 Display LED Monitor
 Input Device Keyboard,Mouse
 No. of Camera 2 sets of imported camera
 Position Camera Vision for the flight identification + MARK correction
 Mounting Precision ± 0.02 mm chip
 Mounting Height 13 ± 2 mm
 Mounting Speed 42000 CPH(optimum)
 Components LED,capacitors,resistors,shaped components(0402-17mm)
 Components Speed 0.2mm
 Power 220AC 50HZ
 Power Consumption 4kw
 Air Force 0.5mpa
 Operating Environment $23^{\circ}\text{C} \pm 3$
 Conveyor Transmission Max Length:600mm
 Transmission Direction > 500 mm/s
 Transmission Direction Single(left \rightarrow right or right \rightarrow left)
 Transmission Mode Online drive
 Air pressure > 5.0 kg/cm²
 Air consumption < 100 L/min
 Electrical control Independent research and development by ETON
 Motion control card module 2 sets Independent research and development by ETON
 X,Y Axes Driving Servo motor
 No. of feeders 17PCS
 No. of nozzles 8 nozzles
 Feeder type Electronic feeder

- RO 400FC

		RO400FC	RO400FC-C
Control	Type	Microprocessor	
	Languages	English, German, French	
	Temperatures selectable	°C, °F	
	Program capacity	49 (10xpreset standard, 10x preset leadfree, 10xpreset curing, 19xfree)	
	Board counter	optional with sensor or standard with SMEMA option	
	Gas temperature adjustment	Adjustable from 20° to 290°C (68° to 554°F) for each zone	
Substrate dimensions	Max. reflow width	400 mm (15.8")	
	Max. Substrate width	10-400 mm (0.39-15.8")	60-400 mm (2.4" - 15.8")
	Max. substrate width without middle rail support	400 mm	Approx. 250 – 300mm (9.84 – 11.81") by 1.5mm (0.06") PCB material
Conveyor	Transport direction	left to right	
	Pin length	-	3 mm (0.12")
	Conveyor speed range	100-800 mm / min (3.9"- 31.5" / min), see slow speed option for slower speed	
	Conveyor speed repeatability	+/- 2 mm (0.079") / min	
	Conveyor motor type	24V DC with encoder	
	Rail parallelism	-	+/- 0.3mm (0.012") from 20 to 290°C
	In feed length	300 mm (11.8")	
	Out feed length	200 mm (7.9")	
	Entrance height (max)	30 mm (1.18")	
	Free space below substrate	0	20 mm (0.79")
	Process dimensions	Heated length	1'620 mm (63.8")
Length of heating zone		400 mm (15.75")	
Length of active cooling zone		250mm (9.84")	
Overall length cooling zone		450mm (17.72")	
Process data	Total Air circulation heating zones	2'575 m3/h (1'515 cfm)	
	Air circulation per heating zone	515 m3/h (303 cfm)	
	Air circulation peak zone	1'030 m3/h (606 cfm)	
	Air circulation cooling zone	300 m³/h (177 cfm)	
Machine dimensions	Footprint	2'800x914mm (110.2x36")	
	Machine height	1'350 mm (53.2")	
	Weight	660 kg (1455 lb)	760 kg (1675 lb)
Supplies	Electrical	EU: 3x400 VAC, 50Hz, 25 A, circuit breaker not required US: 3x480/277/249/209 VAC, 60Hz, 25 A (with transformer), 3 phase circuit breaker required in front of transformer	
	Power consumption	5.8 kW continuous, 11.6 kW (during initial heat up, 15 min)	
	Minimum exhaust volume	2x150 m³/h = 300 m³/h (2x88 cfm=176 cfm)	
	Recommended exhaust volume	2x250 m³/h = 500 m³/h (2x150 cfm=300 cfm), option RO400FC-VNT recommended.	
	Filter / Air Cleaning Systems	No / must be added in the exhausting system	
	Exhaust specifications	1 each at entry and exit, distance 2.075 m (81.69"), diameter 150 mm (5.9"), length 50 mm (1.97"), gas temperature at exhaust <45°C (<113F)	