

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



Pájené a lepené vodivé spoje

Bakalářská práce

Květen 2019

Jméno a příjmení: Filip Grňák

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



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Grňák** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **465846**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Pájené a lepené vodivé spoje

Název bakalářské práce anglicky:

The Soldered and Adhesive Conductive Joins

Pokyny pro vypracování:

1. Uveďte a popište pájky používané v elektrotechnice.
2. Popište strukturu elektricky vodivých lepidel a uveďte materiály, které se pro vodivá lepidla používají
3. Porovnejte pájky a elektricky vodivá lepidla z pohledu jejich vlastností a využití.
4. Připravte sadu vzorků pájených a lepených spojů.
5. Během urychleného stárnutí v klimatických komorách průběžně měřte elektrické a mechanické parametry spojů a výsledky vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J.: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001
[2] Ebnesajjad, S.: Handbook of Adhesives and Surface Preparation – Technology, Applications and Manufacturing, 2011, ISBN: 978-1-4377-4461-33.
[3] Bím, J.: Kvalita pájených a lepených vodivých spojů v elektrotechnice, bakalářská práce, ČVUT, Praha 2018

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **04.02.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.
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

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s vedením
vedoucího bakalářské práce, pouze za užití zdrojů, uvedených v závěru práce.

.....

datum a podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat paní Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za její odborné vedení této bakalářské práce, mnoho dobrých rad a za její ochotu. Dále své rodině za to, že mi umožnila studovat a tedy tuto práci napsat.

Abstrakt

Tato práce se zabývá porovnáním elektricky vodivých spojů, vytvořených pomocí pájení a lepení, dále se pak zabývá vlivem degradačních procesů na tyto spoje během stárnutí za různých podmínek. Práce se skládá ze dvou hlavních částí. V teoretické části je popsáno stárnutí spojů, struktura a materiálové složení elektricky vodivých lepidel i pájecích slitin a porovnání jejich vlastností, dále pak jsou zde popsány metody použité k měření elektrických a mechanických vlastností v praktické části této práce. Druhou hlavní částí je část praktická. V praktické části jsou popsány vzorky, na nichž se provádí pokusy, a také je zde detailně popsán postup jejich výroby. Dále jsou zde zkoumány a porovnány mechanické a elektrické vlastnosti elektricky vodivých lepidel a pájecích slitin. Poslední část praktické části je věnována zkoumání vlivu stárnutí na tyto typy spojů za různých klimatických podmínek.

Klíčová slova

Elektricky vodivá lepidla, pájecí slitiny, porovnání, stárnutí spojů, mechanické vlastnosti, elektrické vlastnosti

Abstract

This bachelor thesis deals with comparison of electrically conductive joints created by soldering and bonding, then it deals with the influence of degradation processes on these joints during aging under different conditions. The thesis consists of two main parts. The theoretical part describes the aging of joints, structure and material composition of electrically conductive adhesives and solder alloys and compares their properties, the second main part is the practical part. In the practical part there are described the samples on which the experiments are carried out and the procedure of their production is described in detail. Furthermore, mechanical and electrical properties of electrically conductive adhesives and solder alloys are investigated and compared. The last part of the practical part is devoted to the investigation of the influence of aging on these types of joints under different climatic conditions.

Key words

Electrically conductive adhesives, solder alloys, comparison, aging of joints, mechanical properties, electrical properties

Obsah

1	ÚVOD	6
2	TEORETICKÁ ČÁST	7
2.1	ELEKTRICKY VODIVÁ LEPIDLA	7
2.1.1	<i>Složení lepidel a používané materiály</i>	7
2.1.2	<i>Izotropní a anizotropní lepidla</i>	9
2.2	PÁJKY	10
2.2.1	<i>Smáčivost</i>	11
2.2.2	<i>Tavidla</i>	12
2.2.3	<i>Pájecí slitiny</i>	13
2.2.4	<i>Pájecí pasty</i>	14
2.3	POROVNÁNÍ PÁJKY A ELEKTRICKY VODIVÉHO LEPIDLA.....	15
2.3.1	<i>Nevýhody elektricky vodivých lepidel</i>	15
2.3.2	<i>Výhody elektricky vodivých lepidel</i>	16
2.4	STÁRNUTÍ A DEGRADACE SPOJŮ.....	16
2.5	POPIS POUŽITÝCH METOD MĚŘENÍ	18
2.5.1	<i>Elektrické vlastnosti</i>	18
2.5.2	<i>Mechanické vlastnosti</i>	19
3	PRAKTICKÁ ČÁST	22
3.1	VÝROBA TESTOVACÍCH VZORKŮ.....	22
3.2	POROVNÁNÍ LEPENÝCH A PÁJENÝCH SPOJŮ.....	25
3.2.1	<i>Elektrické vlastnosti</i>	26
3.2.2	<i>Mechanické vlastnosti</i>	30
3.3	VLIV STÁRNUTÍ NA ELEKTRICKY VODIVÉ SPOJE	33
3.3.1	<i>Popis měření</i>	33
3.3.2	<i>Vliv stárnutí na elektrické vlastnosti</i>	36
3.3.3	<i>Vliv stárnutí na mechanické vlastnosti</i>	39
3.3.4	<i>Odůvodnění odchylek hodnot v grafech</i>	42
4	ZÁVĚR	43
5	SEZNAMY OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	45
5.1	SEZNAM OBRÁZKŮ	45
5.2	SEZNAM GRAFŮ	46
5.3	SEZNAM TABULEK	46
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47
7	SEZNAM PŘÍLOH	48
8	PŘÍLOHY	49

1 Úvod

Přípevnit součástku k základové desce můžeme různými způsoby. Použití pájení a pájecích slitin je tou používanější a osvědčenější metodou, avšak použití nejspolehlivějších pájecích slitin, obsahujících olovo, je směrnici RoHS výrazně omezeno. Alternativou k pájecím slitinám je použití elektricky vodivých lepidel. Ty by měly mít na jednu stranu obecně horší vlastnosti, na druhou stranu však skýtají možnosti, kterým pájecí slitiny nemohou konkurovat. U takto vytvořených spojů jsou důležité nejen jejich elektrické vlastnosti, ale i vlastnosti mechanické. Tato práce se snaží odpovědět na otázku, jak moc se tyto vlastnosti liší a to nejen v okamžiku, kdy byl spoj vyroben, ale hlavně i během jeho životního cyklu. Spolehlivost mnohých zařízení totiž závisí právě na kvalitě elektricky vodivých spojů, jejichž vlastnosti se během jejich životního cyklu, v důsledku stárnutí, mohou drasticky měnit. To, že byly více méně zakázány pájecí slitiny obsahující olovo, způsobilo, že začaly být používány jejich náhrady jako právě bezolovnaté pájecí slitiny a elektricky vodivá lepidla, u nichž není vliv stárnutí na jejich vlastnosti dostatečně dobře prozkoumán.

2 Teoretická část

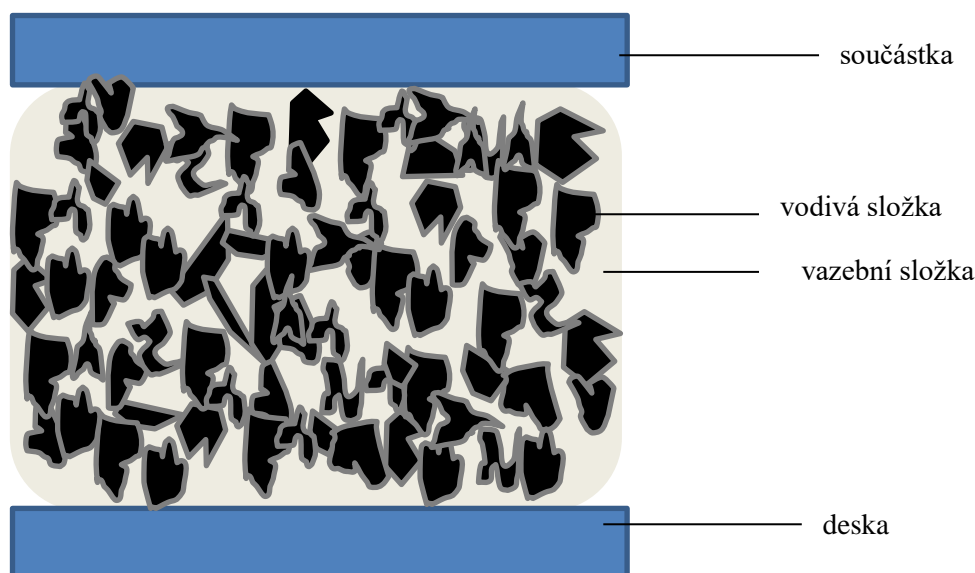
2.1 Elektricky vodivá lepidla

Lepení je postup trvalého spojování stejných nebo různých materiálů pomocí lepidla. Lepené spoje patří mezi nerozebíratelné spoje. Přilnutí lepidla ke spojovaným povrchům je způsobeno adhezí a kohezí. Adheze je přilnavost lepidla k povrchu lepených částí a koheze je vnitřní soudržnost lepidla, tvoří ji souhrn všech sil bránících oddálení molekul lepidla od sebe. [2]

Výhodou elektricky vodivých lepidel je to, že neobsahují olovo, takže se staly jedním ze způsobů, jak nahradit olovnaté pájky poté, co bylo z ekologických důvodů zakázáno používat při pájení olovo. Tím, že se staly olovnaté pájky zakázané, se nahradily pájkami složenými z jiných materiálů, ty však mají horší vlastnosti a pájení probíhá za vyšší teploty. Výhodou elektricky vodivých lepidel je, že je možné vytvrzení při normální teplotě nebo alespoň při teplotě nižší, než by byla nutná při pájení. Proto je možná aplikace tam, kde by zvýšená teplota způsobila poškození součástek. Další výhodou lepidel je, že existují anizotropní lepidla, tedy lepidla, která vedou elektrický proud pouze v určitém směru. Těmto lepidlům se budeme věnovat dále v textu.[2] [7]

2.1.1 Složení lepidel a používané materiály

Elektricky vodivá lepidla se skládají ze dvou složek a to ze složky vazební a složky vodivé. Struktura je vidět na obrázku č. 1, vazební složku by mohla tvořit například epoxidová pryskyřice a vodivou složku například šupinky ze stříbra. [7]

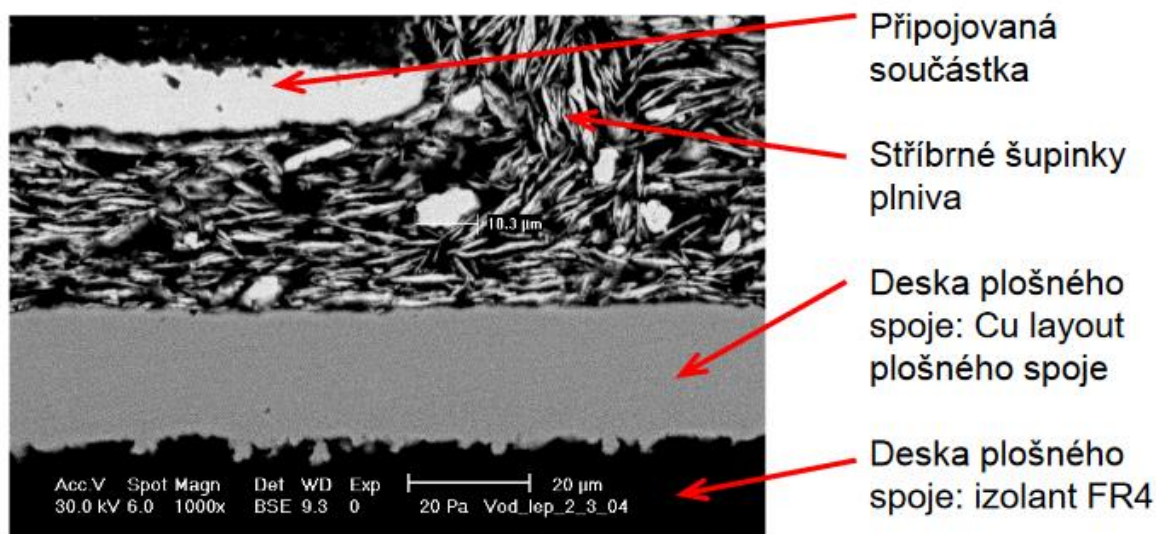


Obrázek 1: Struktura elektricky vodivého lepidla

Vazební složka neboli pojivo zajišťuje v elektricky vodivém spoji po vytvrzení mechanickou pevnost. Vazební složka je však elektricky nevodivá, je izolant. Udrží součástku na místě, na které byla přilepena a udržuje vodivou složku, přesněji částičky vodivé složky, na místě tak, aby docházelo k vedení el proudu. Dále zajišťuje odolnost spoje vůči vnějšímu prostředí. Vazební složka bývá tvořena například z epoxydové, silikonové nebo polyamidové pryskyřice či z termoplastů. Výhodou termoplastů je oproti pryskyřicím to, že při opětovném zvýšení teploty je lze rozpustit, to je výhoda například při opravách. Výhoda pryskyřic je v jejich tvrdosti. Jejich nevýhodou je však jejich křehkost a jak již bylo řečeno nemožnost je opětovně rozpustit. Vazební složka se dá dotovat různými plnidly, například karbonovými vlákny, které snižují křehkost. Tato složka může být jednosložková nebo dvousložková. Jednosložkovou vytvrzujeme při vyšších teplotách, ale kratší dobu. Dvousložková je tvořena pryskyřicí a tvrdidlem, tyto složky se míchají až před použitím lepidla, vytvrzují se při nižších teplotách, zato déle. Některá takováto lepidla se vytvrzují až 140 hodin. [3] [7] [8]

Vodivá složka neboli plnivo zajišťuje vytvoření elektricky vodivých cest v elektricky nevodivém pojivu. Tato složka má podobu kuliček o průměru přibližně šesti až osmi mikrometrů nebo šupinek různých velikostí. Vyrábí se například ze zlata, stříbra, mědi, niklu, paladia nebo plastů s vrstvou kovu na povrchu, případně měděné pocínované či jinými kovy pokryté kuličky. Nejlepších elektrických vlastností dosahují lepidla, ve kterých vodivou složku tvoří zlato. Toto řešení je však kvůli ceně zlata příliš nákladné. [7]

Na obrázku č. 2 je vidět průřez elektricky vodivým lepeným spojem.

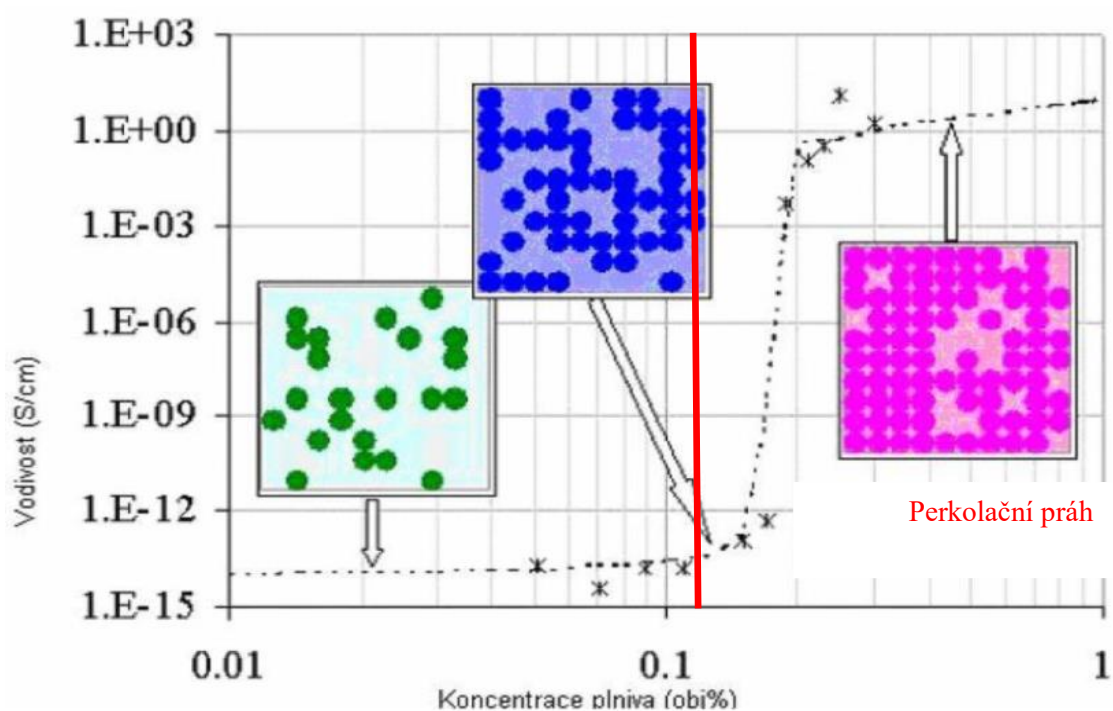


Obrázek 2 Průřez elektricky vodivým lepeným spojem [7]

2.1.2 Izotropní a anizotropní lepidla

Podle množství vodivých částic v lepidle je dělíme na izotropní a anizotropní, tedy taková, která vedou elektrický proud ve všech směrech stejně, a taková, která vedou elektrický proud pouze v určitém směru nebo v něm mají znatelně větší vodivost. [7] [10]

Rozdíl, respektive hranice, mezi těmito typy lepidel objasňuje teorie perkolace. Ta vysvětluje vztah mezi vodivostí a množstvím vodivých částic v lepidle. Tato teorie nám říká, že do určitého množství vodivých částic v objemu se lepidlo chová jako izolant, není vytvořena žádná vodivá cesta. Při daném množství částic však vodivost prudce vzroste a i při dalším zvyšování počtu vodivých částic, se téměř nezvyšuje. Množství částic, při kterém dochází k tomuto zlomu, nazýváme perkolační práh. Při dosažení perkolačního prahu dochází k vytvoření vodivé cesty přes celý objem lepidla. [5] [10]

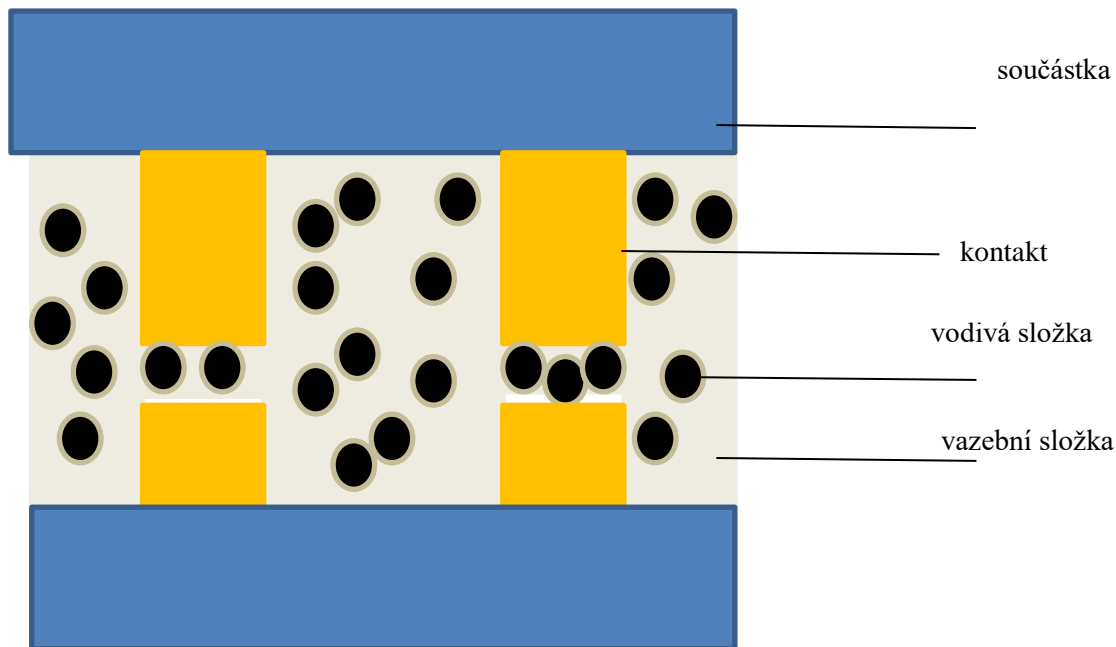


Obrázek 3 Závislost vodivosti lepidla v závislosti na koncentraci plniva [12]

Izotropní lepidla tedy mají elektrickou vodivost ve všech směrech stejnou a jsou tedy v tomto ohledu alternativou pro pájecí slitiny. Pájecí slitina u těchto lepidel tvoří 50 až 80% objemu, přičemž vodivé částice dosahují rozměrů kolem 2,5 μm . [5] [6] [7]

Lepidla s anizotropní elektrickou vodivostí jsou elektricky vodivá pouze v jednom směru, konkrétně ve směru osy z, tedy osy kolmé k rovině desky. V tomto směru mají odpor v řádech miliohmů, zatímco v ostatních směrech až v řádech megaohmů. U pájecích slitin tohoto efektu, že

by byla vodivost v různých směrech různá, docílit nemůžeme. Tato lepidla se používají hlavně při montáži TAB a flip-chip. Koncentrace vodivých částic v anizotropních lepidlech bývá v rozmezí 5 až 30% objemu. Vodivé částice bývají větší, dosahují rozměrů kolem 15 μm , jsou tedy větší, než částice u izotropních lepidel. Na obrázku č. 4 je znázorněn princip anizotropního lepidla, v lepidle není dostatek částic, aby se navzájem dotýkaly a tím vytvořily vodivou cestu, jsou od sebe izolovány vazební složkou. V určitém směru je však natolik tenká vrstva lepidla, že se vytvoří vodivá cesta, jak je vidět na následujícím obrázku. [5] [6] [7]



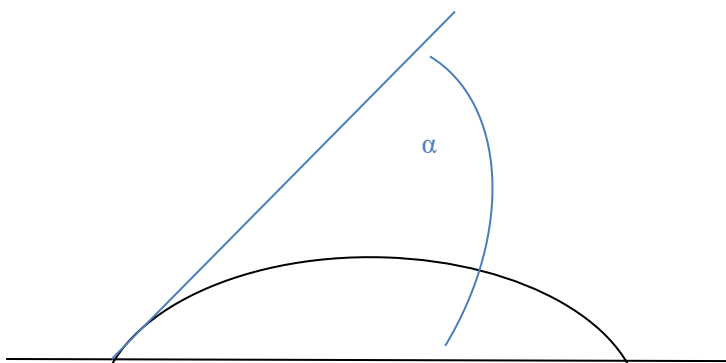
Obrázek 4 Princip anizotropního lepidla

2.2 Pájky

Pájení je proces, při kterém se roztaví a následně ztuhne nově přidaný materiál, který difunduje do materiálů, které jsou k sobě pájeny. Tím se k sobě dostanou dostatečně blízko povrchové atomy pájky a pájeného povrchu na to, aby po vychladnutí mohly vzniknout adhezní a kohezní síly, které je drží trvale u sebe. Výsledkem pájení je trvalé připevnění součástky na základní desku, přičemž součástka je se substrátem propojena mechanicky i elektricky. Pájení probíhá za vysokých teplot, teplota tavení pájky však musí být menší, než teplota tavení spojovaných částí, jednak proto, aby nebyly součástky roztaveny, jednak proto, aby nebyly tepelně poškozeny. Tento typ spojů je rozebíratelný, pro rozebrání stačí pájecí slitinu opět zahřát, pájku odsát a součástku odebrat. K tomu můžeme použít speciální odsávačku nebo jen obyčejnou páječku s tím, že pájku na spoji necháme nebo odstraníme mechanicky. [1] [4]

2.2.1 Smáčivost






Smáčivost je schopnost roztavené, tedy tekuté pájky, přilnout k povrchu základního materiálu. Uvnitř pájky se síly mezi částicemi vzájemně ruší, na povrchu roztavené pájky však na částice působí síly pouze jedním směrem, tím vzniká nerovnováha energie, která ovlivňuje tvar kapky pájky. Toto nazýváme povrchovým napětím. Povrchové napětí pájky určuje její smáčivost. Vhodným legováním pájky a optimálními podmínkami pájení, což zahrnuje teplotu, kvalitu pájených povrchů, dosáhneme snížení povrchového napětí. Lepší smáčení zajišťují tavidla. Smáčivost určujeme podle velikosti stykového úhlu. Stykový úhel je vysvětlen na obrázku číslo 5 a označen α . [1] [4]



Obrázek 5 Stykový úhel α

Stupně smáčivosti:

- Smáčení – smáčení nastává, pokud je úhel α v rozmezí od 0° do 90° . Čím menší tento úhel je, tím lepší je smáčivost. Do 15° je smáčivost dokonalá, do 75° je smáčivost dobrá a do 90° je ještě postačující.
- Nesmáčení – nastává tehdy, je-li úhel α větší 90° , potom je zřetelně vidět rozhraní mezi pájkou a povrchem. [6]

$\alpha = 0^\circ$	dokonale <u>smáčivý</u>	
$\alpha < 90^\circ$	dobře <u>smáčivý</u>	
$\alpha = 90^\circ$	<u>smáčivý</u>	
$\alpha > 90^\circ$	špatně <u>smáčivý</u>	
$\alpha > 180^\circ$	<u>nesmáčivý</u>	

Tabulka 1 Stupně smáčivosti

2.2.2 Tavidla

Tavidla jsou velice významnou součástí pájení. Jsou to nekovové chemické látky, které čistí místa určená k pájení, přesněji z nich odstraňují povlak oxidů a současně zabraňují novému vzniku těchto vrstev v průběhu pájení. Tavidla schopná odstraňovat vrstvy oxidů se nazývají aktivní tavidla. Dále zajišťují nebo zlepšují smáčení a roztékání roztavené pájky po pájeném místě. Za normálních teplot by tavidlo nemělo být moc aktivní, mělo by začít být aktivní až při teplotách odpovídajících teplotám pájení. Nejrozšířenější tavidla jsou pryskyřičná. To jsou tavidla s kalafunou, jejichž základem je právě pryskyřice. [1] [6]

Při výběru správného tavidla by měly být zohledněny tyto faktory

- Druh základní desky, na kterou se pájí
- Typ pájky, například, jestli je olovnatá či ne
- Technologie pájení a způsob nanášení tavidla
- Teplota tavení pájky
- Druh a tloušťka povrchových oxidů
- Odstranitelnost zbytků po pájení, případně způsob čištění

Základní úlohy tavidla v pájecí pastě jsou následující:

- Odstranění vrstvy oxidů na substrátu
- Ochrana proti oxidaci
- Snížení povrchového napětí pájky, aby se zlepšilo smáčení
- Tvoří pojivo mezi vodivými částicemi pájky v pájecí pastě tak, aby se dala pájecí pasta dobře tisknout

Existují různé formy tavidel

- Pevné
- Kapalné
- Gel
- Pasta
- Prášek

Tavidla můžeme mít rozpustná v rozpouštědlech, i ve vodě, to jsou například organické kyseliny. Výhodou těchto tavidel je, že proces jejich čištění je levnější. [1] [3] [6]

2.2.3 Pájecí slitiny

Pájení můžeme provozovat pomocí měkkých nebo tvrdých pájecích slitin. Měkké pájecí slitiny mají teplotu pájení pod 500° C, tvrdé pájecí slitiny tedy mají teplotu tavení vyšší 500° C. Měkké pájecí slitiny se k pájení používají nejčastěji. [11]

Dříve se k pájení používaly olovnaté pájecí slitiny, ty byly však z ekologických důvodů zakázány navzdory jejich dobrým vlastnostem pro pájení, jako jsou například

- Vysoká elektrická vodivost
- Pevnost spojů
- Termomechanická odolnost
- Nižší teplota tavení, než u bezolovnatých pájek
- Smáčitelnost
- Teplotní roztažnost
- Tečení.

Olovo je totiž pro lidský organismus stejně tak jako pro všechny jiné organismy jedovaté, ukládá se v nich a nedá se odbourat. Organokovové sloučeniny jsou navíc jedny z nejjedovatějších látek v přírodě. A tak bylo roku 2003 všemi evropskými zeměmi přijato, že použití olova je v elektrotechnice s určitými výjimkami zakázáno. Tento zákon vstoupil v roce 2006 v platnost. Možnosti používání olova v elektrických a elektronických zařízeních (EEZ) jsou v Evropské unii upraveny směrnicí 2011/65/EU a známy pod zkratkou RoHS. Ostatní země jako Spojené státy americké, Čínská lidová republika či Jižní Korea přijaly podobné zákony omezující používání olova v elektrotechnice. [4] [11]

V současnosti se proto používají až na určité výjimky bezolovnaté pájky, jedná se zejména o dvousložkové a tříložkové slitiny. Olovnaté pájky se používají pouze tam, kde jsou pro své vlastnosti nenahraditelné nebo jsou použity z bezpečnostních důvodů, neboť nejsou zaručeny dlouhodobé vlastnosti jejich náhrad. [11]

Existuje mnoho druhů pájecích slitin, nejpoužívanější olovnatá pájka se skládá z 63% z cínu (Sn) a z 37 % z olova (Pb), teplota tavení je 183 °C. Další zajímavou slitinou je slitina skládající se z olova (Pb), cínu (Sn), kadmia (Cd) a Bismuthu (Bi), jejíž teplota tavení je v rozmezí od 65 do 100 °C. [4] [11]

Z bezolovnatých slitin jsou to například:

- V Evropě je konsorciem BRITE-EURAM doporučena slitina skládající se z 95,5% Sn, 3,8% Ag a 0,7% Cu jako slitina vhodná na pájení všeho. Dalšími vhodnými slitinami jsou 96,5% Sn s 3,5% Ag, 99,3% Sn s 0,7% Cu a slitiny Sn-Pb-Bi a Sn-Ag-Sb.
- V USA jsou doporučeny institutem National Manufacturing Initiative (NEMI) slitiny skládající se z 99,3% Sn s 0,7% Cu pro pájení vlnou a pro pájení přetavením 96,5% Sn s 3,5% Ag a 95,5% Sn s 3,9% Ag a s 0,6% Cu. Dále se doporučují slitiny složené z 96,5% Sn s 3,5% Ag a s 4,8% Bi a z 58% Bi s 42% Sn.
- V Japonsku jsou institutem The Japanese Electronic Industry Development Association (JEIDA) pro pájení a přetavení vysokou teplotou doporučeny slitiny složené z 96,5% Sn s 3% Ag a s 0,5% Cu a 89% Sn s 8% Zn a s 3% Bi a pro přetavení nízkou teplotou 42% Sn s 57% Bi a s 1% Ag. [1] [5] [11]

2.2.4 Pájecí pasty

Pájecí pasty jsou homogenní směsi, obvykle složené ze tří složek a to z tavidel, z částic pájky a z reologických modifikátorů. Tavidlo je dále tvořeno z rozpouštědla jako je například polyhydric alkohol a z pevné části, což jsou například přírodní pryskyřice, syntetické pryskyřice nebo různé aktivátory na bázi organických kyselin. [1] [4] [5] [6]

Částice pájky jsou spolu s tavidlem nejdůležitější složkou pájecí pasty. Mívají obvykle tvar kuliček nebo vloček a velikost od 5 do 150 mikrometrů. Tyto částice se vyrábí například pomocí atomizace pájecí slitiny, kdy je slitina roztavena a její kapky dopadávají v ochranné atmosféře na rychle rotující disk, ten kapku rozstříkne směrem ke stěnám nádoby, než tyto malé kapky dopadnou na stěny nádoby, ztuhnou a tak vzniknou částice pájky. Tyto částice se potom pomocí sítí třídí podle velikosti. Nejvíce používané slitiny jsou nyní pájky typu SnAg, SnCu a pájky obsahující bizmut. Tyto částičky pájecí slitiny zajišťují elektrickou vodivost, přesněji vytvoření elektricky vodivých cest. [1] [4] [5] [6]

Druhou z těchto nejdůležitějších složek je tavidlo. Úkolem tavidla je hlavně podpořit a urychlit smáčení. Tavidlo dále odstraňuje oxidy a zlepšuje přenos tepla. Také na něm velice závisí chování pasty během tisku. Tavidlo je více než z poloviny tvořeno pryskyřicí s aktivátory, zbytek tvoří rozpouštědla. [1] [4] [5] [6]

Třetí složkou pájecích past jsou reologické modifikátory, ty ovlivňují chování pasty během tisku a smáčení. Reologické modifikátory ovlivňují hlavně viskozitu a lepivost, ta zajišťuje udržení součástky na správném místě, dokud nedojde k přetavení pájecí pasty. Lepivost závisí na interakcích mezi jednotlivými složkami pasty. [1] [4] [5] [6]

2.3 Porovnání pájky a elektricky vodivého lepidla

Porovnání těchto dvou způsobů elektricky vodivého připevnění součástek je pro přehlednost vztaženo k elektricky vodivým lepidlům. Výhody elektricky vodivých lepidel jsou tedy považovány za nevýhody pájek a naopak nevýhody elektricky vodivých lepidel jsou považovány za výhody pájek.

V současnosti se používá hlavně pájení, avšak lepené spoje jsou nezastupitelné ve speciálních případech jako je například výroba LCD displejů. [11]

2.3.1 Nevýhody elektricky vodivých lepidel

- Cena – pájecí slitiny bývají zpravidla levnější
- Skladování - Skladovat elektricky vodivé lepidlo je náročnější, neboť může zaschnout a pak už se nebude dát použít. V případě lepidel, kterými je možné připevnit součástku za normální teploty, probíhá skladování v ledničkách či mrazácích. Skladovatelnost je časově omezená
- Malá odolnost proti mechanickému namáhání
- Malá odolnost vůči klimatickému namáhání – zejména vlhkosti, jsou citlivé na navlhnutí a následné bobtnání
- Rozebíratelnost – připájené součástky lze odpájet, zatímco odstranění lepeného spoje je destruktivní proces, výjimkou jsou lepidla, jejichž vazební složku tvoří termoplasty
- Technologie výroby – proces pájení je výborně zvládnutá metoda, která je dlouhodobě osvědčená a spolehlivá, zatímco u lepených spojů je problém s nedostatečnými dlouhodobými zkušenostmi
- Elektrický odpor – mnou změřený elektrický odpor byl u pájení přibližně desetkrát menší, než u lepidel a rozptyl naměřených hodnot odporů je mnohem větší u lepidel, to je uvedeno v praktické části této práce
- Mechanická pevnost - síla potřebná k odtržení připájeného odporu je více než pětkrát větší při pájení, než při lepení, toto tvrzení vychází z praktické části této práce
- Spolehlivost
- Délka života

[3] [6] [11]

2.3.2 Výhody elektricky vodivých lepidel

- Nižší teplota při vytvrzení – tato teplota se pohybuje v rozmezí 100° až 180° (pro porovnání, bezolovnaté pájecí slitiny se taví přibližně při teplotě 225°), některá lepidla dokonce tuhnou i za pokojové teploty, musí se však skladovat zmrazená
- Anizotropní vodivost – elektricky vodivá pouze v jednom směru
- Připojování vývodů o velmi malé rozteči – při pájení u malých roztečí vznikají můstky mezi vývody, rozteč může být až 0,1 mm
- Nižší výrobní náklady na spoj – to je způsobeno tím, že k vytvoření spoje je potřeba méně procesních kroků oproti pájeným spojům
- Lepší pružnost – to znamená větší odolnost vůči tepelným změnám během pracovního procesu [3] [6] [11]

2.4 Stárnutí a degradace spojů

Doba života vodivého spoje, tedy jeho stárnutí, souvisí s jeho degradací, což je proces, při němž dochází ke změně jeho struktury a molekulové hmotnosti. To způsobuje změnu jeho vzhledu a vlastností, jako například elektrických, mechanických a tepelných. V určitých případech se může jednat o změnu k lepšímu, jako například, když je lepený spoj v prostředí s vyšší teplotou, tak dojde k jeho dotvrzení a tím zlepšení mechanických vlastností, avšak ve většině případů se jedná o změnu k horšímu, kdy se vlastnosti spoje postupně zhoršují, až nakonec dojde ke ztrátě jeho vlastností (elektrické vodivosti) nebo k jeho úplnému zničení (odpadnutí přilepené či připájené součástky). S těmito procesy se proto musí při výrobě spojů počítat, aby nedošlo k předčasnému ukončení života elektrického zařízení, jehož jsou součástí. Degradaci může způsobovat jeden degradační proces nebo i kombinace více takovýchto procesů, což mívá na spoj z pravidla horší účinky. Obecně jsou lepené spoje k degradačním procesům více náchylné i proto mají kratší životnost a spolehlivost. Degradální procesy způsobují parametry prostředí, v němž se spoj nachází, jednotlivé parametry, ne všechny možné, jsou uvedeny v následující tabulce, tabulce č. 2, spolu s jejich účinky na spoj. [4] [5] [6]

parametry prostředí	Účinky na spoj
vysoká teplota	urychluje chemické reakce, způsobuje měknutí a rozpínání materiálu, ovlivňuje elektrické i mechanické vlastnosti, při překročení teploty tání pájky nebo lepidla zničení spoje a uvolnění součástky
nízká teplota	křehnutí, změna velikosti objemu, tedy smrštění
prudká změna teploty	Narušení struktury spoje v důsledku vzniku prasklin
vysoká vlhkost	u lepidel hrozí absorpce vlhkosti a bobtnání lepidla, to způsobí vzdalování se vodivých částic v jeho objemu a rapidní zhoršení jak mechanických, tak i elektrických vlastností, u lepených i pájených spojů způsobuje chemické reakce materiálu a změnu struktury spoje
nízká vlhkost	může vést ke zkřehnutí materiálu a jeho praskání, nebezpečné u lepidel
přetlak	stlačení až deformace spoje
podtlak	rozpínání materiálu, zhoršené chlazení
sluneční záření	fotochemické reakce vedoucí ke změně struktury spoje a přehřívání spojů vedoucí ke zhoršení jak mechanických, tak i elektrických vlastností
znečištění (prach, písek)	otěr a eroze materiálu spoje vedoucí k jeho opotřebení, mimo to i možnost vzniku elektrostatického náboje
vibrace	narušení struktury spoje
nárazy	na součástku působí síla, jež může narušit strukturu spoje, při opakovaném nárazu nebo v případě, že by byl náraz dostatečně velký, dojde k uvolnění součástky
vysokofrekvenční signály	způsobuje vznik mikrotrhlin v materiálu spoje, případně rozšiřování již existujících mikrotrhlin

Tabulka 2 Parametry prostředí a jejich účinky na degradační procesy

Jak bylo zmíněno výše, elektricky vodivá lepidla se skládají ze dvou základních složek a to elektricky nevodivé vazební složky a z elektricky vodivého plniva. Tyto dvě složky se od sebe naprosto liší, a proto obě mají naprosto odlišné degradační procesy. Každá z nich je tedy náchylná na jiné degradační činitele.

Protože plnivo je z různých kovů, jako jsou stříbro či pocínovaná měď, je jeho hlavním degradačním procesem oxidace, stejně tak jako u pájecích slitin, zhoršující elektrickou vodivost lepidla. Plnivo je však od okolního prostředí izolováno vazební složkou, takže jeho degradace neprobíhá tak rychle, Jeho degradace neovlivňuje mechanické vlastnosti lepidla stejně tak, jako degradace vazební složky neovlivňuje elektrické vlastnosti lepidla. [5]

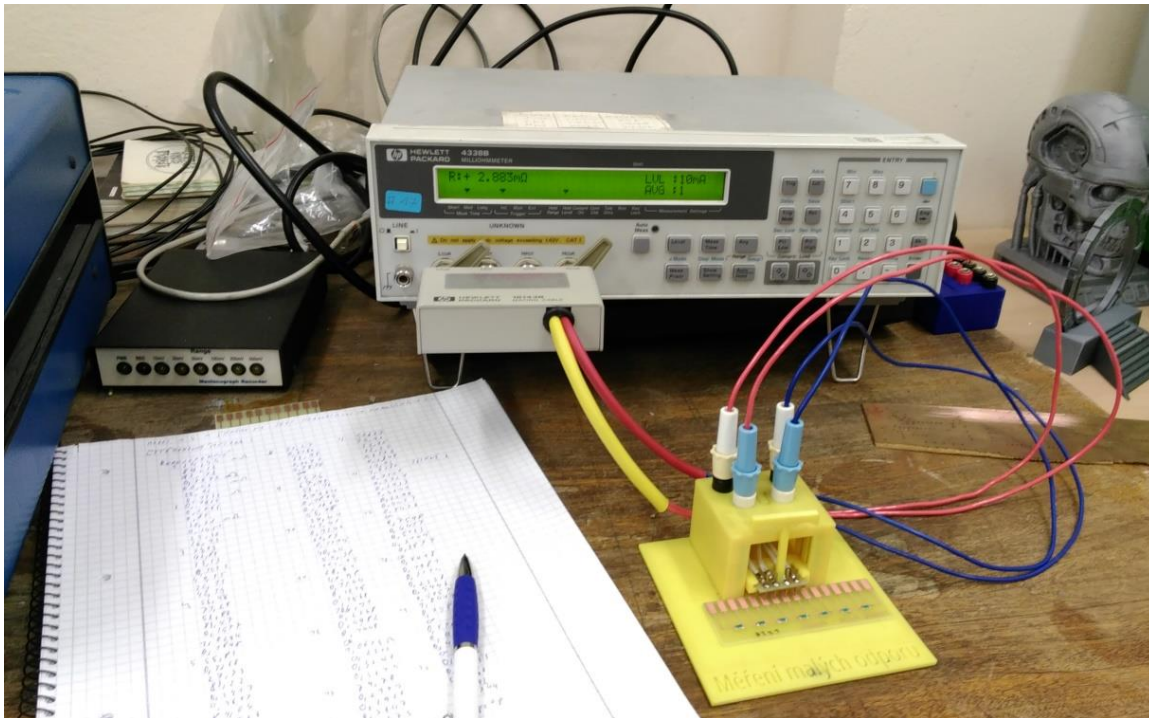
Vazební složka je většinou tvořena pryskyřicí, ať už epoxidovou nebo silikonovou. Pryskyřice se skládá z polymerů, tedy dlouhých uhlíkových řetězců. Její degradace probíhá odštěpováním uhlíku z konce těchto řetězců, čímž v lepidlu vznikají monomery, nebo dochází k rozbití těchto řetězců, čímž vznikají dva odlišné, kratší polymery. Oba tyto procesy vedou k zhoršení mechanických vlastností elektricky vodivého lepidla. Takováto lepidla jsou velice citlivá na vlhkost. [5] [9]

2.5 Popis použitých metod měření

2.5.1 Elektrické vlastnosti

K měření těchto vlastností je v praktické části použita čtyřbodová metoda. Tato metoda se používá k měření rezistivity, respektive elektrického odporu. Přípravek na měření má čtyři hroty, tyto hroty jsou uspořádány v přímce. Prostřední dva hroty jsou napěťové, zatímco hroty na krajích jsou proudové. Tyto hroty mají mezi sebou přibližně stejnou vzdálenost. Změřené napětí a proud jsou vyhodnoceny miliohmmetrem firmy Hewlett Packard 4388B a odpor je změřen s přesností $0,001\text{m}\Omega$. Číslo udávající hodnotu posledního řádu však překmitává, a tak se tedy dá mluvit o přesnosti na $0,01\text{ m}\Omega$. Tato přesnost je plně dostačující, neboť porovnávané hodnoty se liší o jednotky až stovky miliohmů a tedy není třeba měřit s přesností na tři desetinná místa $\text{m}\Omega$. Na obrázku č. 6 je vidět přípravek s čtyřbodovou měřicí hlavicí.

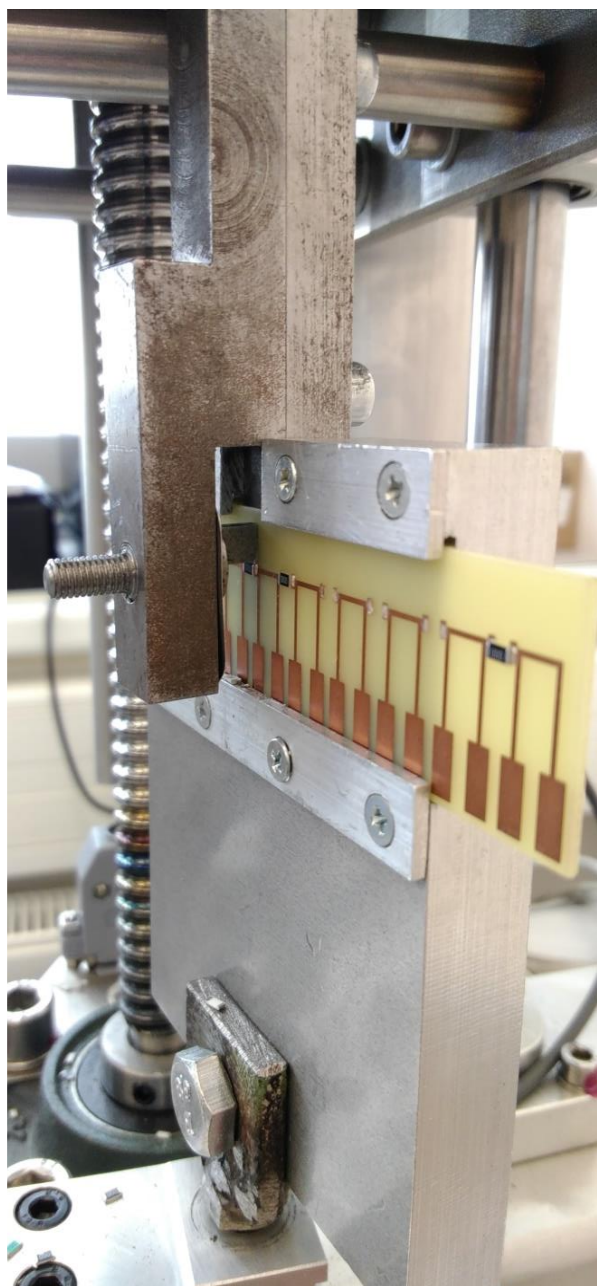
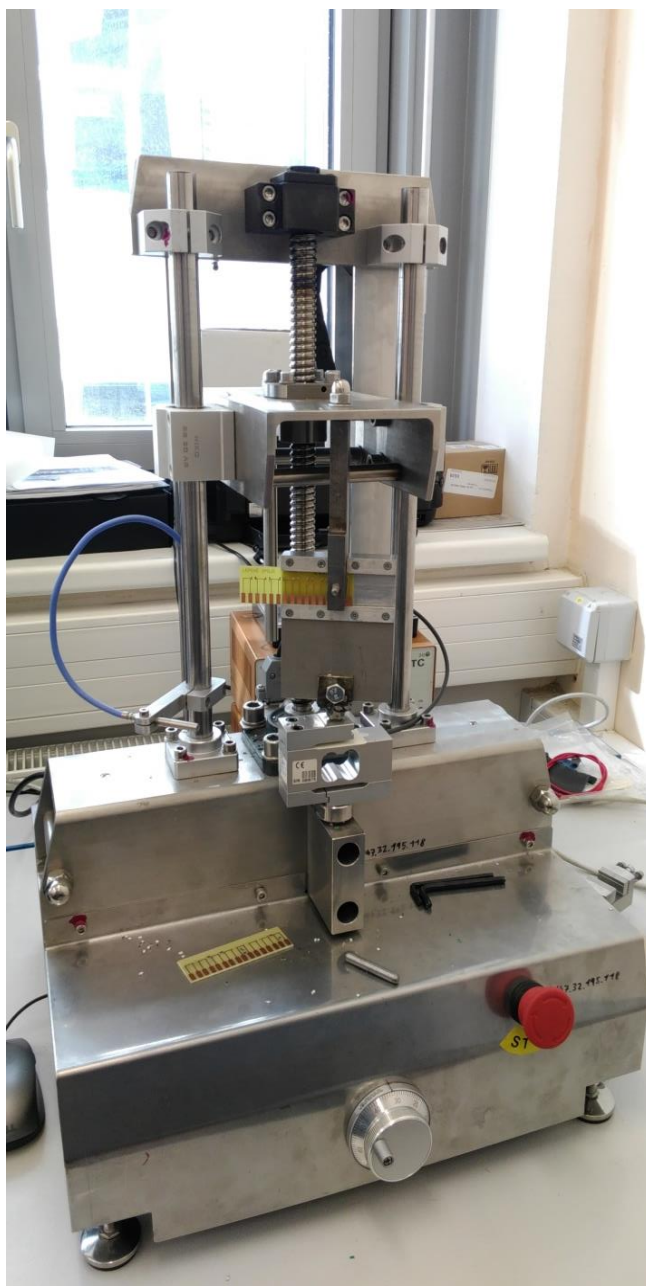
Při měření elektrického odporu pájených i lepených spojů je nutno zohlednit, že i připájené nulové odpory mají určitý odpor a tedy nejsou úplně nulové. Odpor těchto odporů byl také změřen pomocí čtyřbodové metody, avšak ne pomocí přípravku se 4 hroty. Z přípravku byly vytáhnuty proudové i napěťové drátky a ty byly přiloženy na odpor. Takto změřený odpor nulového odporu určeného k pájení byl změřen a zprůměrován na $9\text{ m}\Omega$ a odporu určeného k lepení na $20\text{ m}\Omega$.



Obrázek 6 Aparatura na měření elektrického odporu pájených a lepených spojů

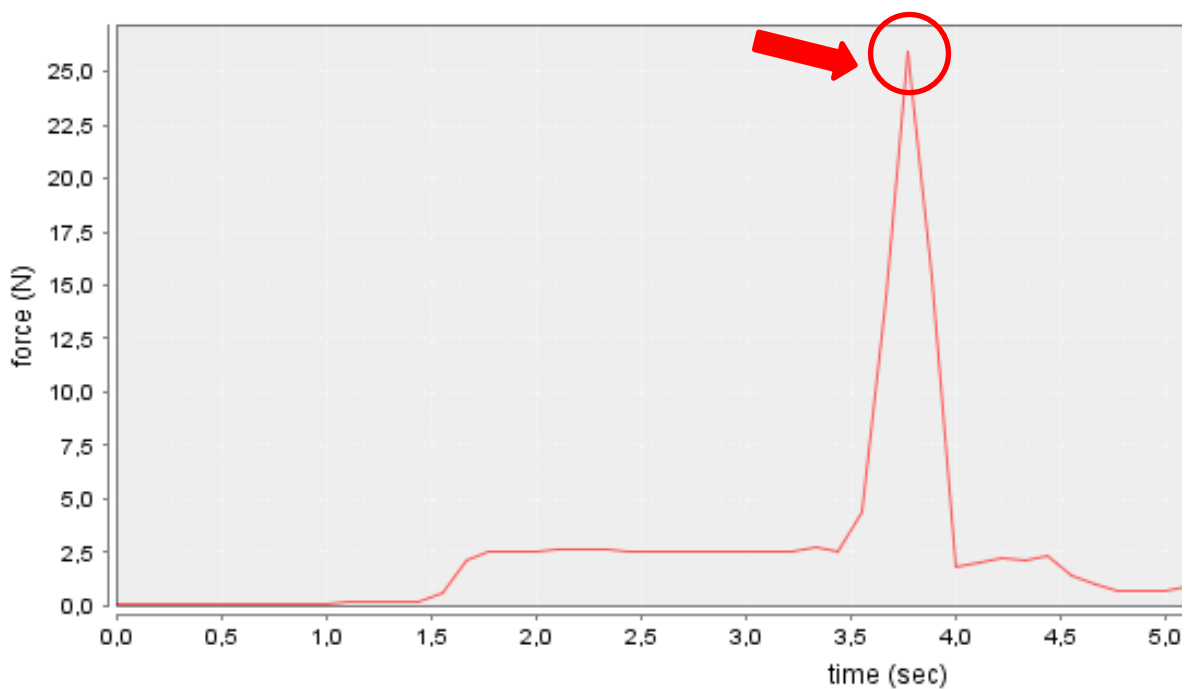
2.5.2 Mechanické vlastnosti

K měření mechanických vlastností je v praktické části této práce použita trhačka, kterou můžeme vidět na obrázku č. 7. Tato trhačka lineárně zvyšuje sílu, kterou působí na odpor, do té doby, než jej odtrhne od desky. Pomocí jí tedy měříme maximální sílu, jež vzorek vydrží. Trhačka je propojena s počítačem, na němž se zobrazuje průběh velikosti síly v závislosti na čase, tento průběh můžeme vidět na obrázku č. 8. Pro větší přesnost odečtení velikosti maximální síly se tento průběh zapisuje do textového souboru jako množina čísel. Díky tomu jsme schopni určit velikost maximální síly s přesností na 0,0001 N. Vzhledem k tomu, že v této práci jde o porovnání vlastností lepených a pájených spojů a hodnoty maximální síly potřebné k zničení spoje se liší až o desítky Newtonů, není třeba měřit s takovou přesností, ani vypočítávat a uvažovat nejistoty měření. Toto měření je na rozdíl od měření elektrických vlastností destruktivní a po změření vlastností vzorku se již na tomto vzorku nedá nic víc měřit. To vysvětluje, proč jsou mechanické vlastnosti změřeny pro méně vzorků, než elektrické a proč se postupně s časem zmenšuje počet vzorků při měření vlivu stárnutí na mechanické i elektrické vlastnosti. V pravé části obrázku č. 7 je vyfocen detail hlavy trhačky. Tvoří ji pevně uchycené čelisti, do níž se zasune vzorek a pohyblivá horní část, na níž je zub, jenž se zachytí o odpor a nakonec jej utrhne.



Obrázek 7 Trhačka

Na obrázku č. 8 je vidět (v odstavci výše zmíněný) průběh síly v závislosti na čase při odtrhávání odporu od základní desky. K odtržení nulového odporu došlo v červeně zakroužkovaném bodě.



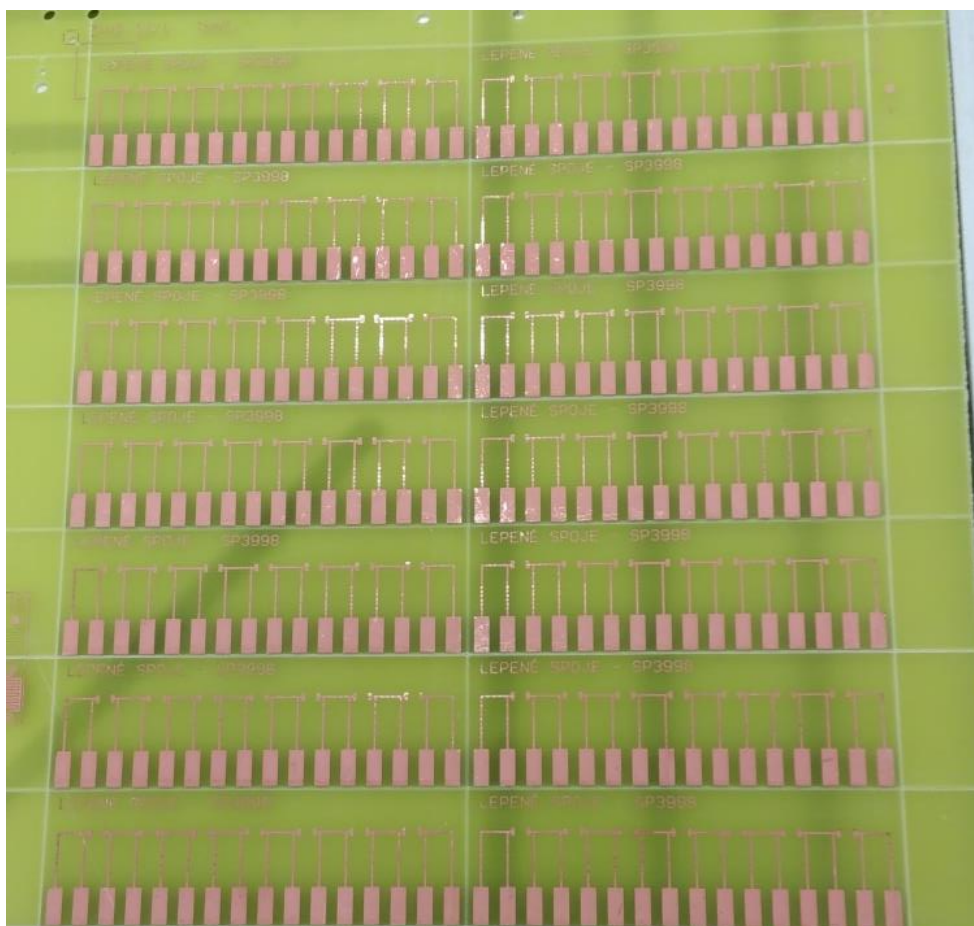
Obrázek 8 Průběh síly při měření mechanických vlastností spoje

3 Praktická část

3.1 Výroba testovacích vzorků

První část praktické části této práce se zabývá postupem výroby vzorků, na nichž budou testovány elektrické a mechanické vlastnosti za účelem porovnat vlastnosti pájecích slitin a elektricky vodivého lepidla a zjistit vliv degradačních procesů během stárnutí na oba tyto způsoby připevnění součástek k základové desce.

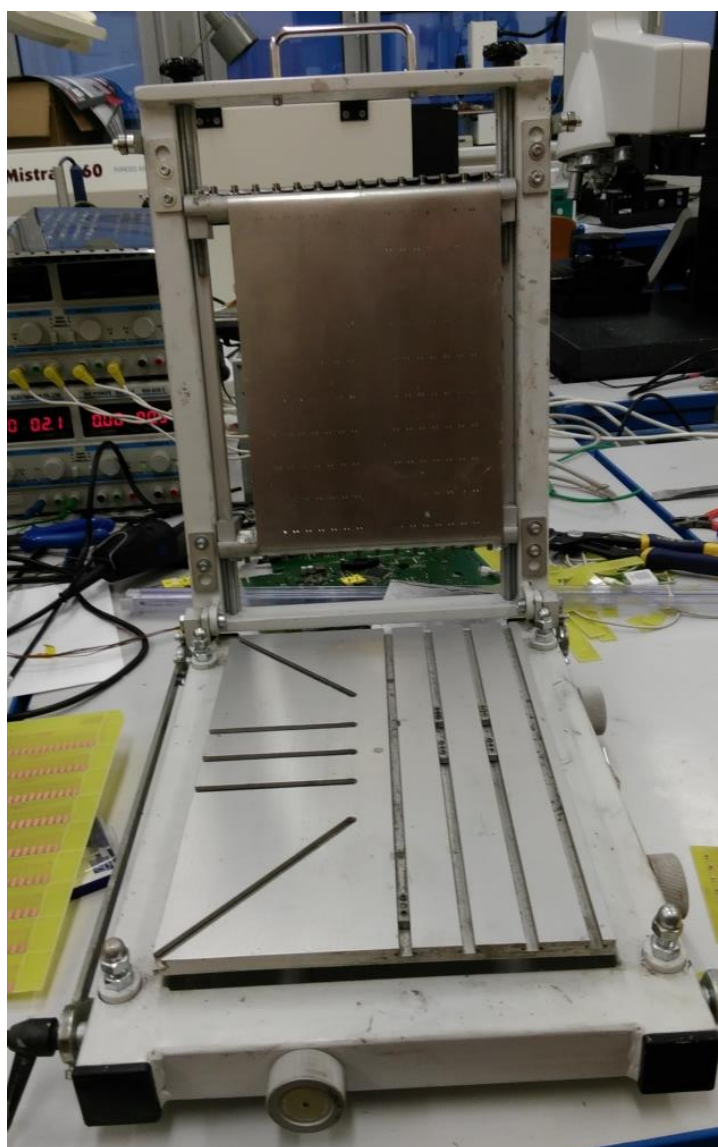
K výrobě vzorků byly použity desky FR4, to jsou desky tvořené ze skelných vláken a sycené epoxidovou pryskyřicí. Mají tloušťku 1,55 mm s tloušťkou elektricky vodivého měděného plátování 18 μm . Tyto desky nebyly mnou vyrobeny, ale byly mi poskytnuty k dispozici fakultou elektrotechnickou ČVUT v Praze. Desky byly vyrobeny metodou fotolitografie. Na obrázku č. 9 je vidět sada těchto desek. Na horní kontakty (ty menší) byla nanесena pájecí slitina / elektricky vodivé lepidlo a byly propojeny nulovým odporem. Spodní kontakty (ty větší) byly použity k měření elektrického odporu.



Obrázek 9 FR4 deska

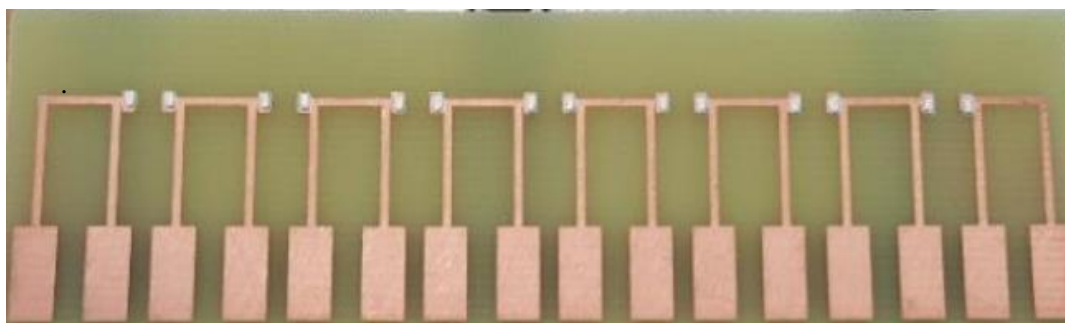
Na každou desku bylo přilepeno nebo připájeno pomocí šablonového tisku sedm nulových odporů. Nulové odpory byly použity proto, aby se při měření elektrického odporu změřil pouze odpor pájených nebo lepených spojů. Ve skutečnosti však nulový odpor nemají, toto již bylo zmíněno v části 2.5.1. teoretické části.

Na šablonu byla nanášena pájka nebo lepidlo a pohybem těrkou tam a zpět bylo rovnoměrně protlačeno do všech otvorů v šabloně, které byly umístěny nad kontakty, na které mělo být lepidlo či pájka nanášena. Šablona připevňovaná na stroji pro nanášení pájky a elektricky vodivých lepidel je na obrázku č. 10. Šablona je pevně připevněna na odklápějící se části, deska FR4 se zafixuje na neodklápějící se část. Páčka v levém dolním rohu obrázku zajišťuje, že dojde k odklopení šablony ve směru kolmém k desce, čímž je nanášená pájka či lepidlo zachováno přesně tam, kde mělo být. Až následně dojde k odklopení šablony tak, jak je vidět na obrázku.



Obrázek 10 stroj na nanášení pájky a lepidla

Na obrázku č. 11 jsou vidět výsledky sítotisku, deska s natištěnou pájecí slitinou na měděné kontakty.



Obrázek 11 Deska s nanesenou pájecí slitinou

Na takto připravené kontakty byly pomocí SMT manipulátoru umístěny nulové odpory. Tento manipulátor funguje na principu vakuové jehly. Při přiložení jehly je odpor pomocí podtlaku přisát a po opětovném přitlačení jehly je odpor uvolněn a zůstává tak tam, kam byl umístěn. SMT manipulátor je vyfocen na obrázku č. 12.



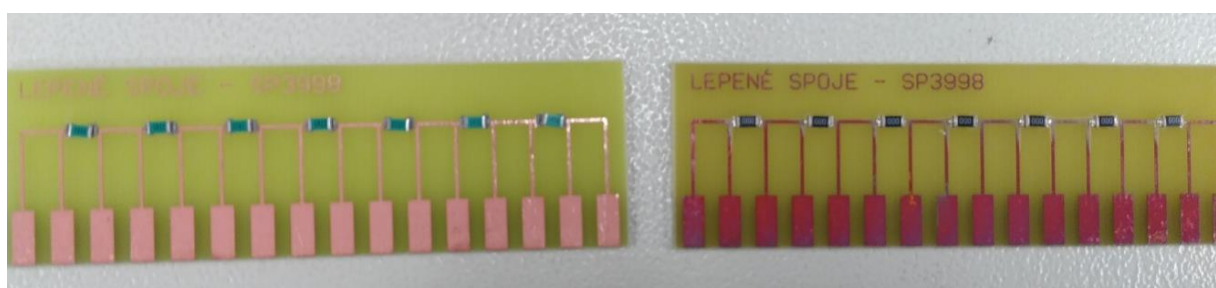
Obrázek 12 SMT manipulátor na osazování součástek

Takto připravené vzorky byly přetaveny v peci Mistral 260, ta je vidět na obrázku č. 13 na další straně. Tato pec má tři nastavitelné zóny. Vzorek byl položen na pás, na němž projel celou pecí. V prvních dvou zónách pece dochází k předehřátí vzorku a ve třetí části k samotnému pájení, případně k roztavení lepidla. Výhodou tohoto předehřátí je to, že vzorky postupně zahříváme a tak nedojde k jejich degradaci náhlou změnou teploty.



Obrázek 13 Pec

Na obrázku číslo 14 je vidět ukázka vzorku vyrobeného výše uvedeným způsobem. V levé části obrázku je vzorek před přetavením pasty a v pravé části obrázku je vzorek po přetavení pasty. Můžeme si povšimnout, že měděné plátování pečením změnilo barvu. To je způsobeno zoxidováním, tato vrstva oxidů však nemá na měření elektrických vlastností spojů žádný vliv, to bylo ověřeno tak, že byla obroušena a elektrický odpor byl před i po obroušení této vrstvy shodný.



Obrázek 14 Konečná podoba vyrobeného vzorku

3.2 Porovnání lepených a pájených spojů

Druhá část praktické části této práce se zabývá porovnáním vlastností pájecí pasty a elektricky vodivého lepidla. Konkrétně jejich elektrickým odporem a mechanickými vlastnostmi. Metody použité k měření těchto veličin jsou popsány v oddíle 2.5. Popis použitých metod měření z teoretické části.

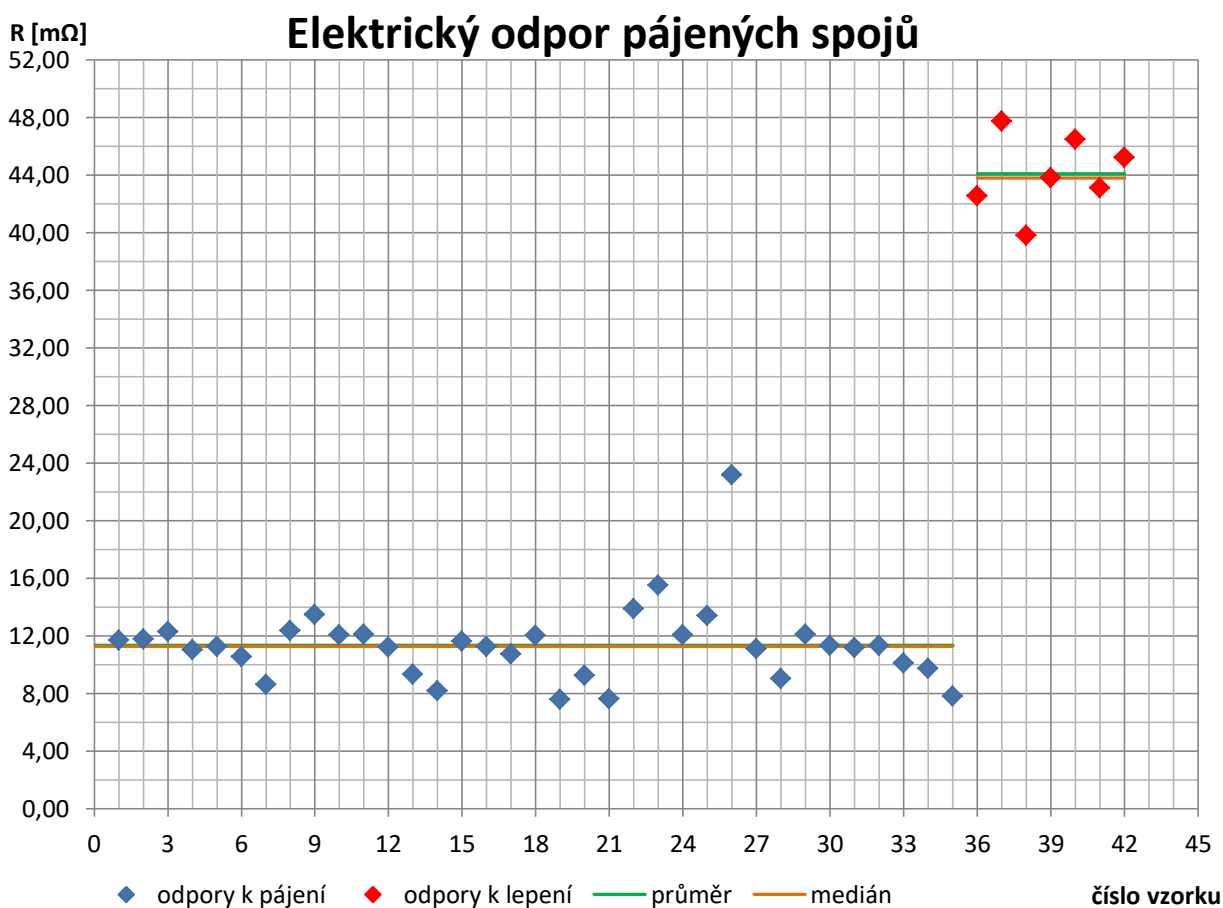
V této části práce jsou použity:

- pájecí pasta M31-6RN360-K1MK-V. Její složení je 95,75% Sn, 3,5% Ag a 0,75% Cu.
- elektricky vodivé lepidlo ER 55 MN. Pro správné vytvrzení má být po dobu 7 až 8 minut v teplotě 180° C.

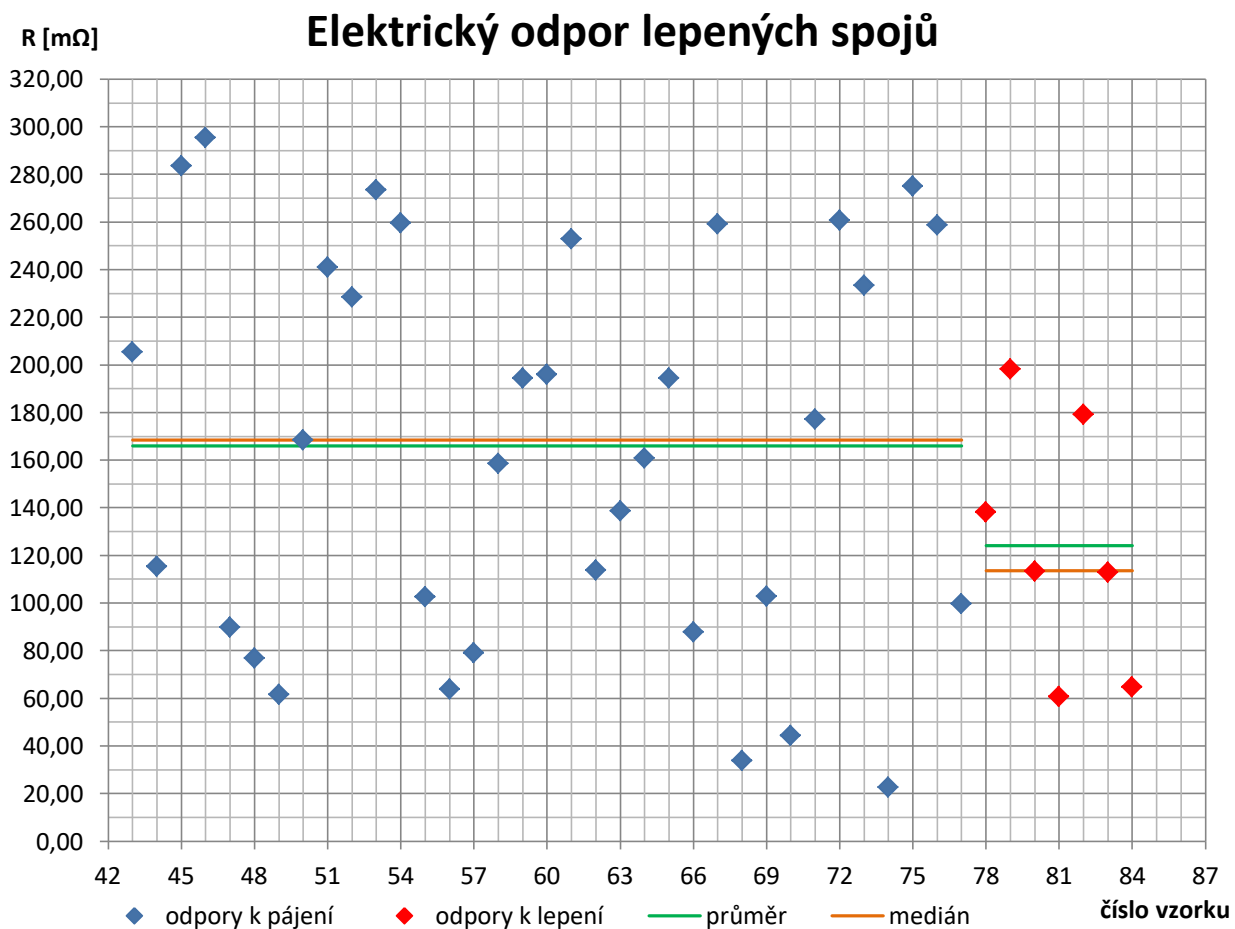
jejich katalogové listy jsou uvedeny v přílohách této práce, přílohy 47 až 52.

3.2.1 Elektrické vlastnosti

Z elektrických vlastností byl měřen elektrický odpor pájených a lepených spojů. Vždy se změřil elektrický odpor dvou spojů a jednoho nulového odporu, odpor nulového odporu byl odečten. Jak je uvedeno v části 2.5.1., odpor nulového odporu určeného k pájení byl určen na 9 mΩ a odpor odporu určeného k lepení na 20 mΩ. Na prvních pět desek byly použity odpory určené k pájení a na šestou desku byl v obou případech použit jiný druh odporů, určený pro lepené spoje. V přílohách této práce jsou uvedeny tabulky s naměřenými hodnotami, příloha 1, a v následujících grafech, grafu č. 3 a 4, jsou tyto hodnoty vyneseny.



Graf 1 Odpor pájených spojů



Graf 2 Odporů lepených spojů

Z naměřených hodnot jasně vyplývá, že pájené spoje mají mnohonásobně lepší elektrické vlastnosti, nežli spoje s elektricky vodivým lepidlem. Jejich průměrný odpor (bráno pro odpor určený k pájení) je přibližně čtrnáctkrát menší.

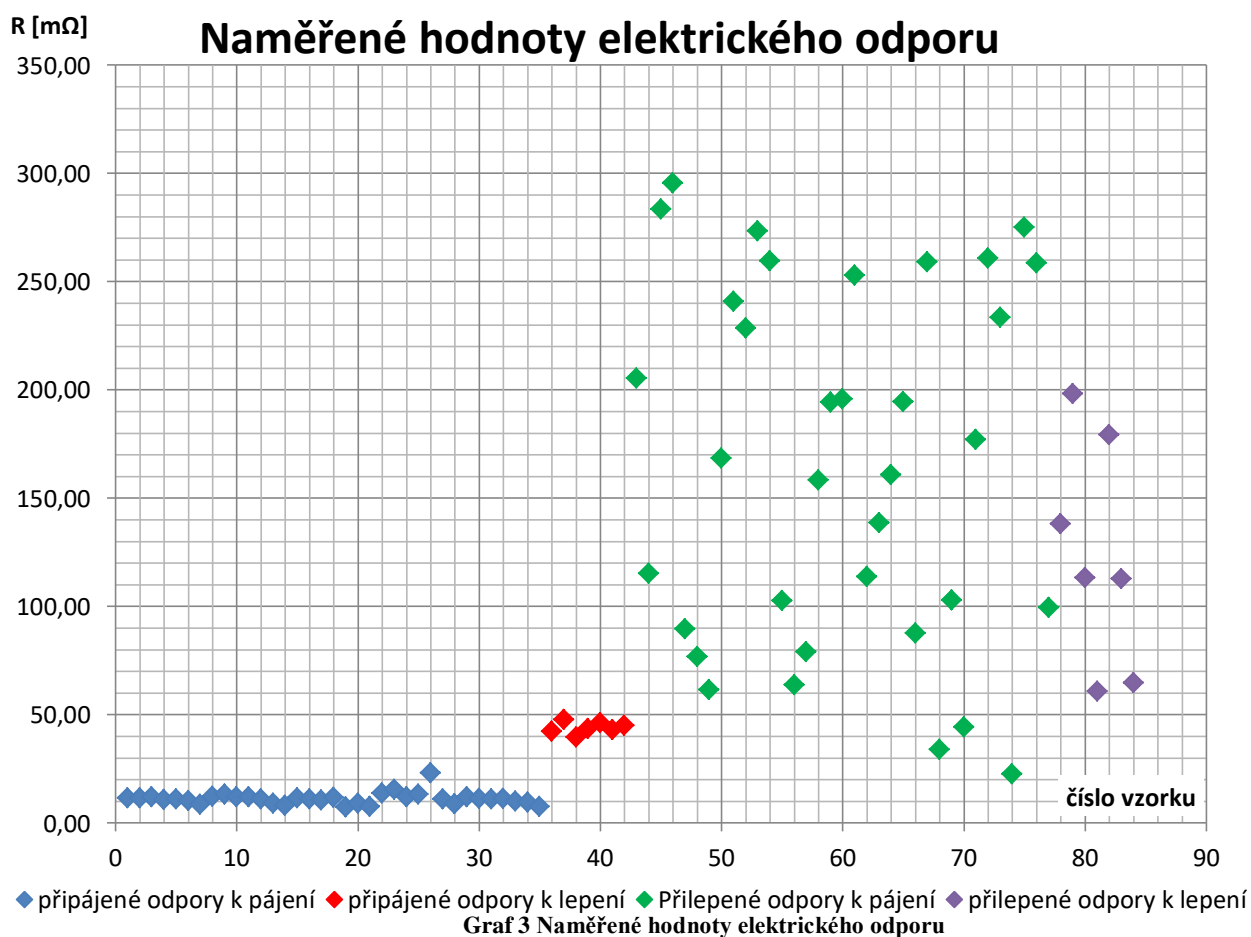
Dále lze z grafů vypořizovat, že je velký rozdíl v tom, použijeme-li při pájení odpory určené k lepení nebo odpory určené k pájení. Rozptyl naměřených hodnot je pro oba typy odporů podobný, ale průměrná hodnota odporu určeného k pájení je téměř čtyřikrát menší, než průměrná hodnota odporu určeného k lepení. To je způsobeno smáčivostí, pájecí slitina po roztavení nesmáčí tak dobře kontakty nulového odporu určeného k lepení, kontakt mezi pájkou a kontaktem nulového odporu tedy není tak kvalitní a odpor spoje je větší. U lepených spojů má sice odpor určený k lepení průměrnou hodnotu elektrického odporu menší o 24,4%, než odpor určený k pájení, z grafu číslo 2 je však vidět, že rozdíl mezi tím, jaký druh odporu pro spoj použijeme, je malý, jen odpory určené k lepení nedosahují tak vysokých hodnot.

V tabulce č. 3 jsou vypsané statistické údaje k porovnání elektrických vlastností pájených a elektricky vodivých lepených spojů. Z tabulky a z grafů č. 1 a 2 je vidět, že rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou lepených spojů je mnohem větší, než tento rozdíl u pájených spojů. Z výše uvedených grafů jasně vyplývá, že rozptyl změřených hodnot je u lepených spojů taktéž mnohem větší, to znamená, že dosáhnout určité kvality lepeného spoje je mnohem náročnější, než u pájeného.

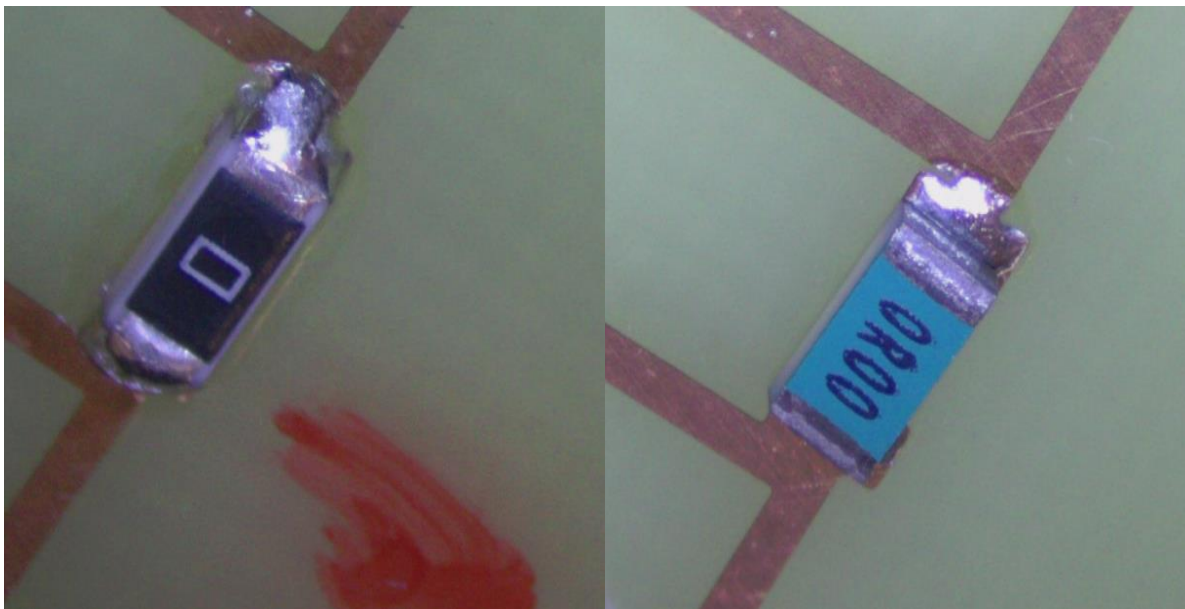
	Pájené spoje s odporem k pájení	Pájené spoje s odporem k lepení	Lepené spoje s odporem k pájení	Lepené spoje s odporem k lepení
	R [mΩ]			
Maximum	23,20	47,77	295,60	198,4
Minimum	7,57	39,82	22,70	60,89
Průměr	11,36	44,11	166,09	124,04
Medián	11,26	43,81	168,50	113,50

Tabulka 3 Porovnání elektrických vlastností pájených a lepených spojů

Na následujícím grafu č. 3, jsou vyneseny všechny naměřené hodnoty, pro oba typy spojů s oběma typy odporů. Tento graf není tak přehledný a dobře čitelný, jako předchozí grafy, avšak jsou na něm vidět poměry mezi naměřenými hodnotami.



Na obrázku č. 15 můžeme vidět pájené spoje. Jsou zde vidět připájené odpory určené k pájení (vlevo) a k lepení (vpravo). Na těchto odporech je krásně vidět, jak pájka mnohem lépe smáčí kontakty odporu vlevo, než odporu vpravo, to je důvodem, proč má odpor vlevo mnohem menší elektrický odpor, než odpor vpravo, jak již bylo zmíněno výše.



Obrázek 15: Připájené odpory

Na obrázcích č. 16 jsou vidět přilepené odpory. Odpor vlevo je určen k pájení a odpor vpravo je určen k lepení. Vizuálně nejde určit důvod, proč se odpory těchto spojů liší, byť jen minimálně, jako to šlo určit u pájených spojů. Tímto důvodem jsou chemické vlastnosti kontaktů odporu a lepidla.



Obrázek 16: Přilepené odpory

Výhodou pájecí pasty je při pájení samosrovnávací efekt. Když je součástka při přiložení natočena o určitý úhel, síly působící v tavící se pájecí pastě ji při tavení srovnají. Tento efekt funguje jen do určitého úhlu natočení. Vpravo na obrázku č. 7 byla součástka samosrovnávacím efektem při tavení narovnána, zatímco vlevo na obrázku č. 7 lepená součástka při tavení srovnána nebyla.

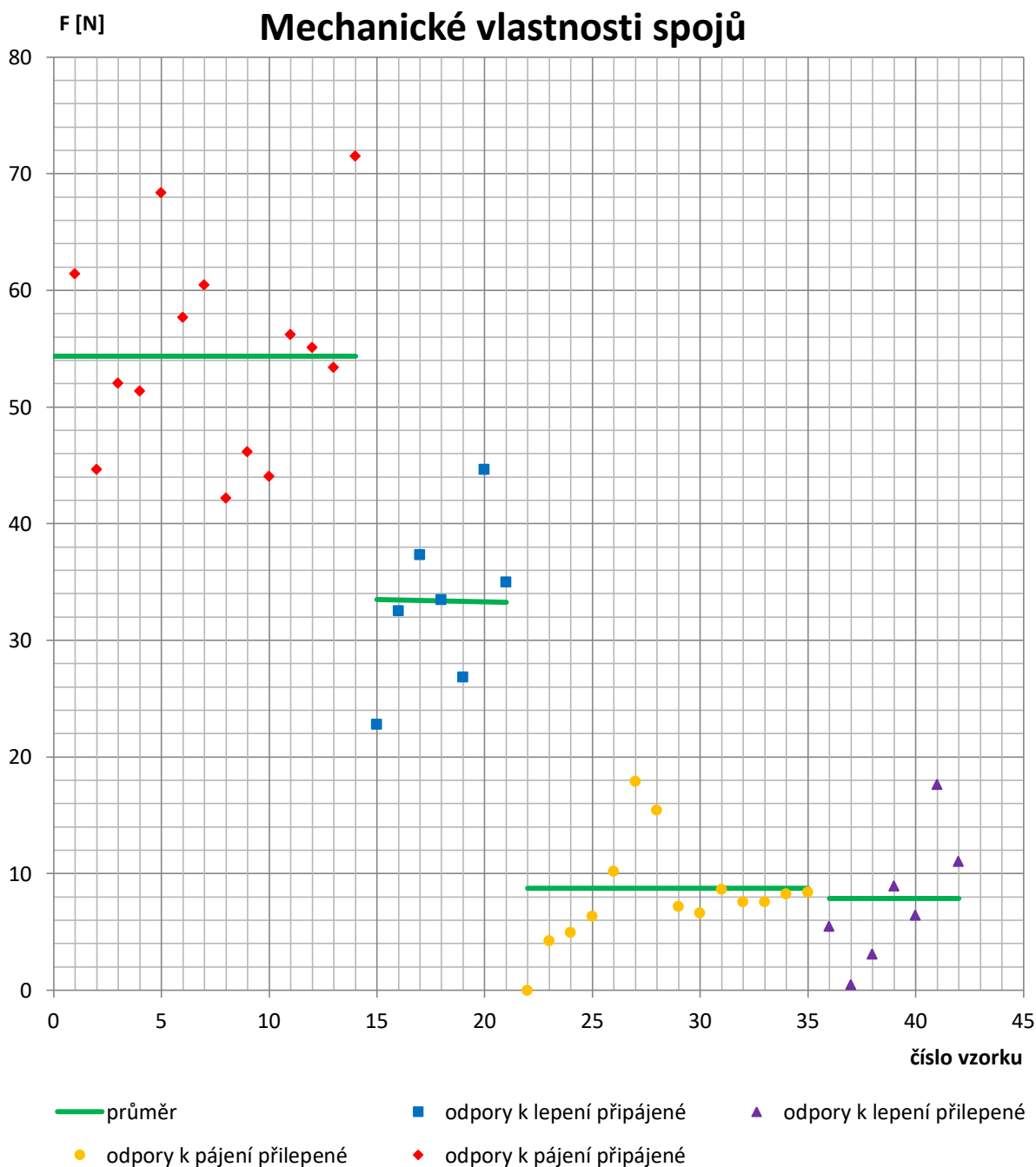


Obrázek 17: Samosrovnávací efekt

3.2.2 Mechanické vlastnosti

Z mechanických vlastností byla měřena síla, která musí působit na připájené a přilepené odpory, aby byly odtrženy od základové desky. Tento pokus je tedy destruktivní a došlo při něm ke zničení vzorků. Z tohoto důvodu bylo toto měření provedeno pouze na polovině vzorků, aby nebyly zničeny všechny. Měření bylo prováděno pomocí trhačky, která lineárně zvětšovala sílu působící na odpor do doby, než jej odtrhla. Toto je přesněji popsáno v oddíle 2.5.2 Mechanické vlastnosti. Na šestý vzorek byl v obou případech použit jiný druh odporů, určený pro lepené spoje, stejně tak, jako u měření elektrických vlastností, na oba druhy měření byly totiž použity stejné vzorky.

Tabulka s naměřenými hodnotami je uvedena v přílohách této práce, příloha č. 2, celkem bylo testováno 6 destiček, s lepidlem i s pájkou po třech, přičemž na třetí základovou desku byly použity jiné odpory. Na následujícím grafu, grafu číslo 4, jsou tyto hodnoty vyneseny.



Graf 4 Mechanické vlastnosti spojů

Z naměřených hodnot a grafu č. 4, ve kterém jsou tyto hodnoty vyneseny i s jejich průměrnými hodnotami, můžeme vidět, že nejlepší mechanické vlastnosti, tedy jak moc velkou silou musíme na odpor působit, abychom ho odtrhli, mají připájené odpory určené k pájení. Pájené spoje, ať už s odpory určenými k pájení nebo k lepení mají mnohem lepší mechanické vlastnosti a to 6krát a 4krát. U pájených spojů záleží na, tom, jaký druh odporů použijeme, průměrná hodnota potřebné síly je u pájených odporů určených k lepení o 63% menší. To je způsobeno tím, že pájka nesmáčí odpory určené k lepení tak dobře, jako odpory určené k pájení a tedy nevzniká tak silné připojení součástky k základové desce. Rozdíl mezi těmito spoji můžeme vidět na obrázku č. 15.

Rozptyl hodnot je u lepených spojů o něco málo menší, avšak ne nějak výrazně, vyrobit tedy spoj s určitou kvalitou je u obou druhů připevnění podobně obtížné. U lepených spojů jsou průměrné hodnoty přibližně stejné, což ukazuje, že u elektricky vodivého lepidla je jedno, jaký druh odporů použijeme. Rozptyl naměřených hodnot je taktéž shodný. V následující tabulce, tabulce č. 4, jsou uvedeny statistické údaje k naměřeným hodnotám.

	Pájené spoje s odporem k pájení	Pájené spoje s odporem k lepení	Lepené spoje s odporem k pájení	Lepené spoje s odporem k lepení
	F [N]			
Maximum	71,52	44,67	17,93	17,62
Minimum	42,22	22,82	4,23	2,46
Průměr	54,36	33,25	8,72	7,86
Medián	54,27	33,5	7,58	6,44

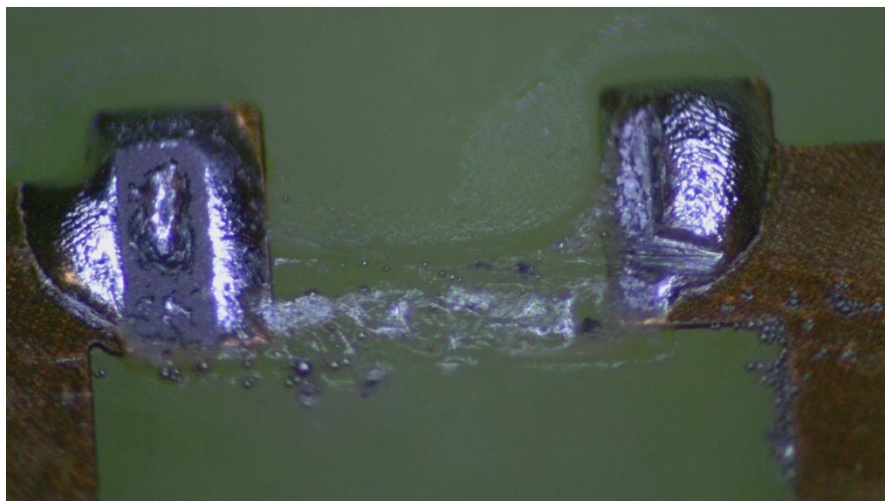
Tabulka 4 Porovnání mechanických vlastností pájených a lepených spojů

Mechanické vlastnosti u lepených i u pájených spojů závisí na množství pájky či lepidla, které se na spoj použije. Spoj č. 48 na obrázku č. 9 vlevo vydržel sílu o 12,98 N větší, než spoj č. 45 na obrázku č. 9 vpravo. To je o 72,4%. Lepidlo bylo nanášeno na kontakty pomocí šablonového tisku rozetřením pomocí třerky, nanesení takového množství bylo ojedinělé. Spíše však, než že by bylo nanášeno méně lepidla, bylo lepidlo omylem rozetřeno do stran, místo toho, aby tvořilo kontakt.

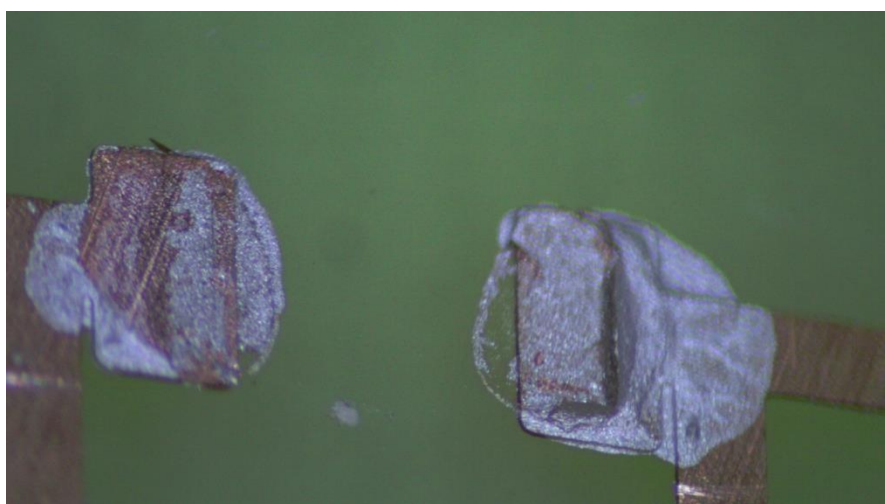


Obrázek 18 Množství lepidla

Na obrázcích č. 19 a č. 20 je vidět, jak dopadnou vzorky po mechanické zkoušce, tedy po otestování trhačkou. Na obrázku č. 19 je pájený spoj a na obrázku č. 20 je lepený spoj.



Obrázek 19: Odtržený připájený odpor



Obrázek 20: Odtržený přilepený odpor

3.3 Vliv stárnutí na elektricky vodivé spoje

3.3.1 Popis měření

Tato část práce se zabývá tím, jak degradační procesy změni vlastnosti spojů během stárnutí. Pro tuto část byla vytvořena nová sada vzorků, postup jejich výroby je shodný jako u předchozích vzorků a popsán v části 3.1. Pro tuto část práce byly použity pouze odpory určené k pájení, neboť z části 3.2 vyplývá, že připájené odpory k lepení mají mnohem horší vlastnosti, než připájené odpory k pájení, zatímco přilepené odpory k pájení mají srovnatelné, u mechanických vlastností i lepší, vlastnosti, než přilepené odpory určené k lepení. Navíc tyto nulové odpory mají

mnohem menší odpor, jak bylo uvedeno v části 2.5.1 a jsou novější. Na výrobu vzorků byly použity následující pájecí slitiny a lepidla:

- Pájecí slitina M31-GRN360-K1MK-V (95,75% Sn, 3,5 Ag, 0,75% Cu)
- Jednosložkové lepidlo ECO SOLDER AX 70MN a
- Dvousložkové lepidlo ELPOX AX 12LVT

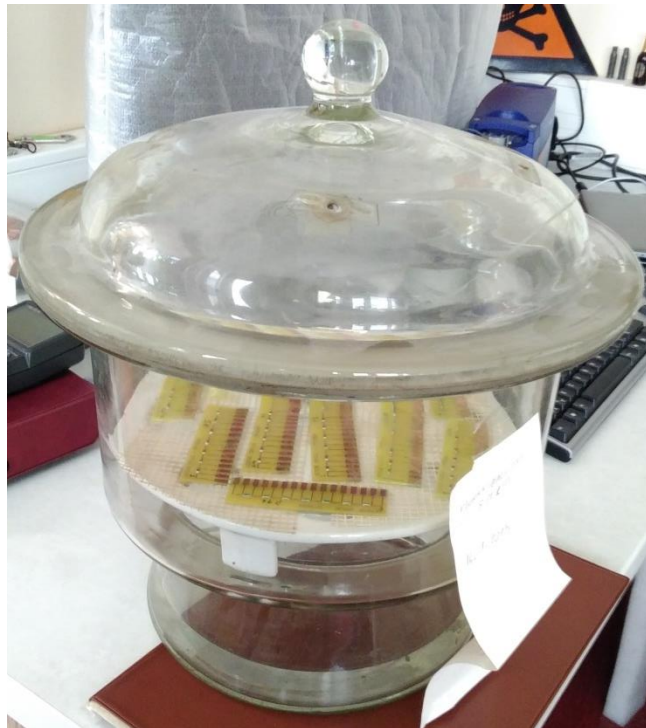
Jejich katalogové listy jsou uvedeny v přílohách této práce, přílohy 43 až 46 a 49 až 52.

Stárnutí bude probíhat za třech typů podmínek po dobu 10 týdnů. V 0. týdnu budou změřeny počáteční vlastnosti spoje, poté budou tyto vlastnosti měřeny s odstupem dvou týdnů. Z vlastností budou stejně jako v předchozí části práce měřeny elektrický odpor a síla potřebná ke zničení spoje. Od elektrického odporu bude odečten odpor nulového odporu, jenž není úplně nulový. První sada vzorků bude vystavena zvýšené teplotě, přesněji teplotě 85 °C, vzorky budou stárnout v peci Memmert, ta je zobrazena na obrázku č. 21.



Obrázek 21 Pec na tepelné stárnutí vzorků

Druhá sada vzorků bude vystavena zvýšené vlhkosti 100% v nádobě, jež je vidět na obrázku č. 22. Očekává se, že tento typ stárnutí značně negativně ovlivní vlastnosti lepených spojů, neboť jak je uvedeno v teoretické části, elektricky vodivá lepidla jsou citlivá na navlhnutí.



Obrázek 22 Nádoba se zvýšenou vlhkostí

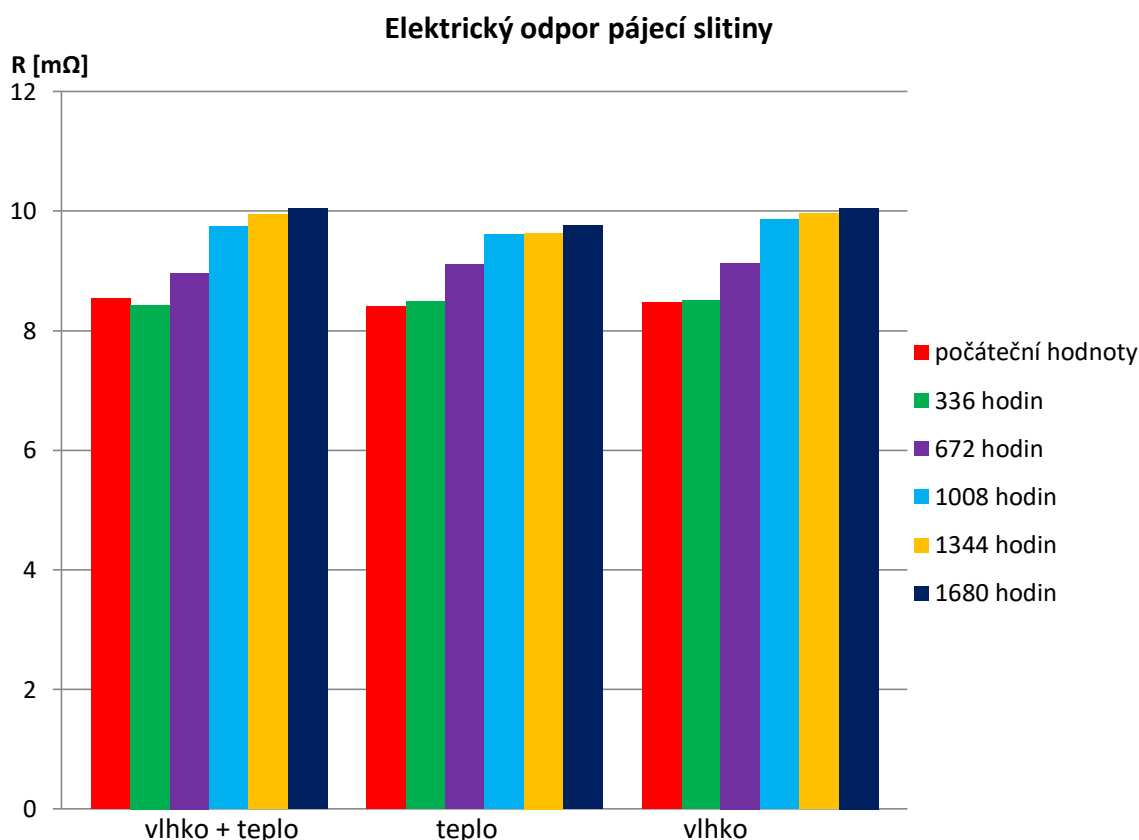
Třetí sada vzorků bude vystavena kombinaci předchozích namáhání a to zvýšené teplotě 85 °C a vlhku 85%. Vzorky stárnou v peci CTS, ta je na obrázku č. 23. Vlastnosti těchto vzorků by měly být zhoršeny nejvíce.



Obrázek 23 Pec se zvýšenou teplotou a vlhkostí

Podmínky v pecích, tedy teplota 85 °C a vlhkost 85% byly zvoleny takto, protože v nich již jeden dlouhodobý experiment probíhal, tedy jedna sada vzorků zde již stárla a mé vzorky k ní byly přidruženy.

3.3.2 Vliv stárnutí na elektrické vlastnosti



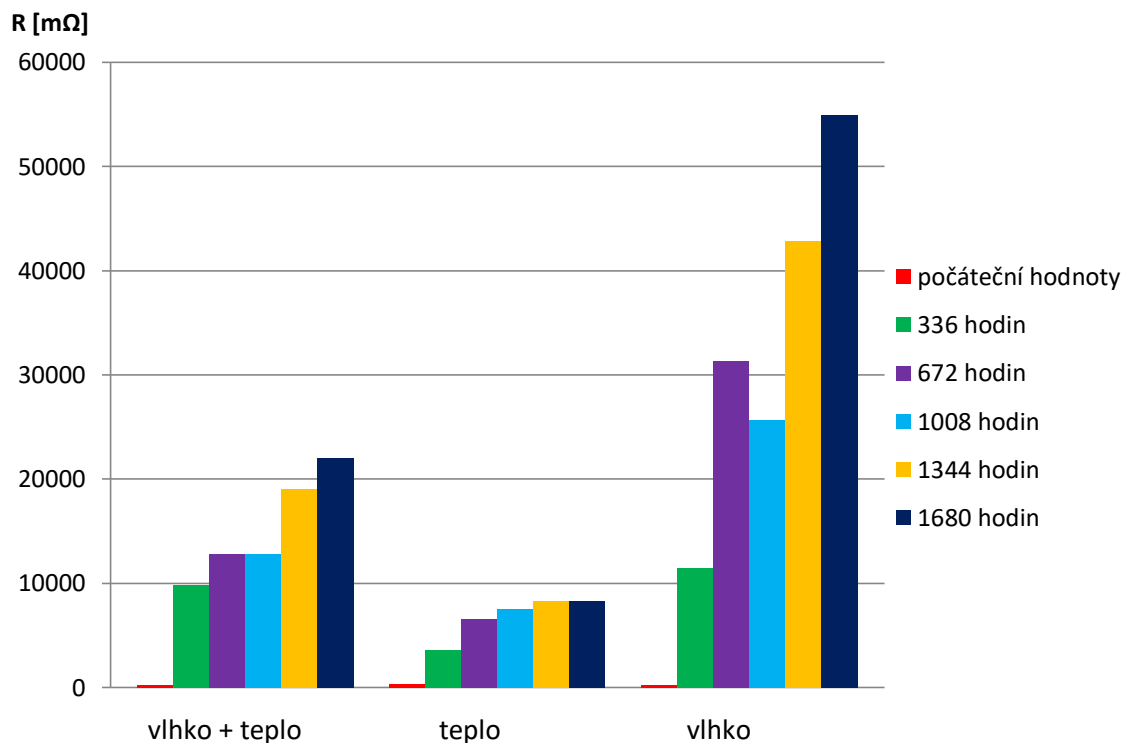
Graf 5 Vliv stárnutí na elektrický odpor pájecí slitiny za různých podmínek

Z naměřených hodnot můžeme vidět, že degradace pájeného spoje probíhá za všech tří podmínek přibližně stejnou rychlostí. Jako nejméně škodlivé prostředí se však ukázalo to se zvýšenou teplotou. Z grafů dále vyplývá, že degradace ze začátku probíhala nejrychleji a ke konci už se zpomalovala. Dalo by se tedy očekávat, že elektrický odpor se již nijak rapidně nezvětší. Degradaci pájených spojů způsobuje zejména oxidace pájené slitiny, již napomáhá zvýšená vlhkost i teplota (zvýšená teplota urychluje a usnadňuje chemické reakce), dále pak zvýšená teplota způsobuje měknutí a rozpínání materiálu, čímž vznikají mikrotrhliny v pájeném spoji. Hodnoty elektrického odporu se zvětšily pro vlhko a teplo o 17,7%, pro teplo o 15,8% a pro vlhko o 18,7%. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v přílohách 21 až 24.

podmínky/hodiny	0	336	672	1008	1344	1680
zvýšená teplota a vlhko	8,53	8,43	8,97	9,75	9,95	10,04
zvýšená teplota	8,42	8,49	9,11	9,61	9,63	9,75
zvýšené vlhko	8,47	8,5	9,13	9,86	9,95	10,05

Tabulka 5 Tabulka hodnot průměrů elektrického odporu pájecí slitiny

Elektrický odpor dvousložkového lepidla

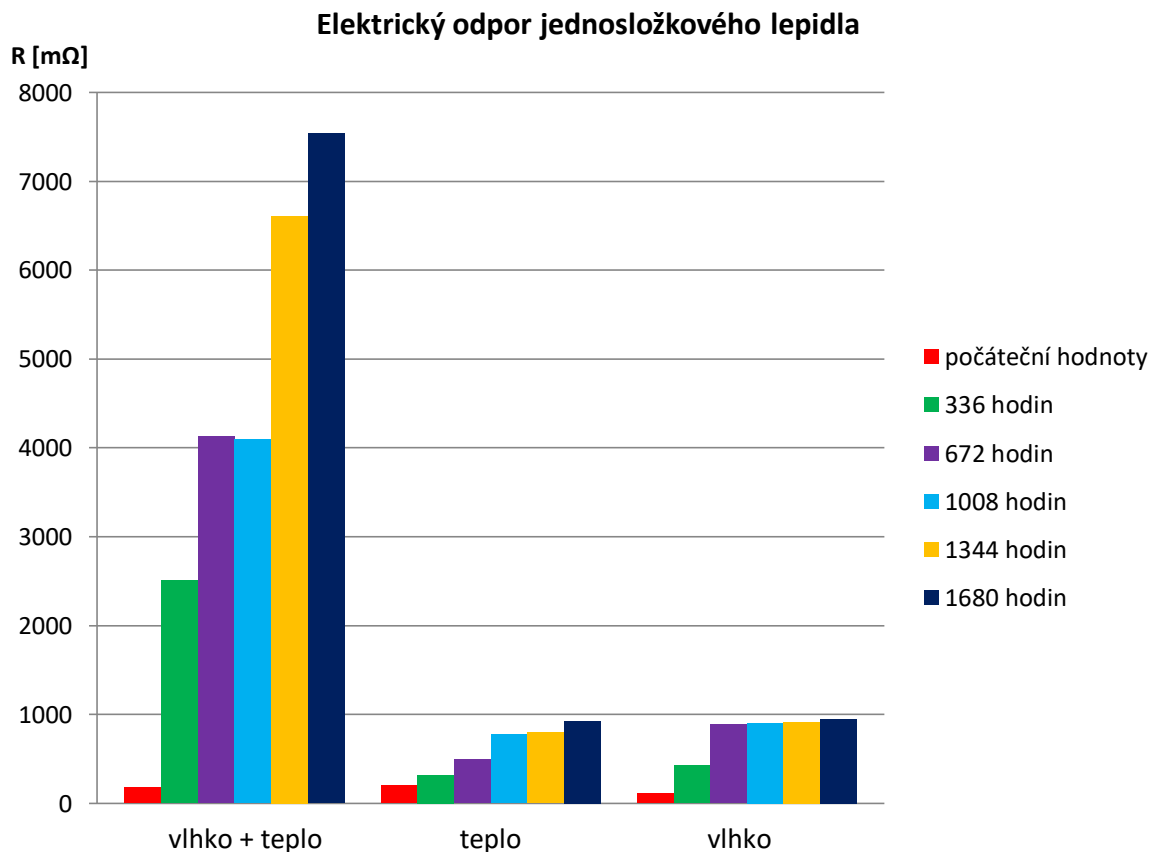


Graf 6 Vliv stárnutí na elektrický odpor dvousložkového lepidla za různých podmínek

Z grafu č. 6 je jasně vidět, že nejhorší vliv na degradaci dvousložkového lepidla mají podmínky se zvýšenou vlhkostí. Při kombinaci zvýšené vlhkosti a teploty dochází k částečnému potlačení navlhání a bobtnání efektem dotvrzení lepidla. To způsobuje, že se elektrický odpor dvousložkového lepidla nezhorší tak moc jako při zvýšené vlhkosti, kdy dochází pouze k navlhnutí a bobtnání lepidla. Při vytváření lepeného spoje dáváme lepidlo do pece, kde dojde k jeho vytvrzení, efekt dotvrzení znamená, že v tomto procesu pokračujeme mimo pec, matrice se smršťuje a vodivé částice se přibližují více k sobě. Navlhání lepidla způsobuje jeho bobtnání, to znamená, že matrice zvětšuje svůj objem a vodivé částice v lepidle se dostávají dále od sebe, což způsobuje přerušování vodivých řetězců, vodivé částice již nejsou v přímém kontaktu, elektrony musí překonat potenciálovou bariéru, dochází k tunelování nebo přeskoků. Za zvýšené teploty také došlo k výraznému zhoršení elektrických vlastností spoje, avšak změna není tak razantní, jako při zbylých dvou podmínkách. Při zvýšené teplotě dochází k oxidaci částic. Při zvýšené teplotě se odpor zvýšil 29,6 krát, při zvýšené vlhkosti a teplotě 107 krát a při zvýšené vlhkosti 307 krát. Z pájecí slitiny, jednosložkového lepidla a dvousložkového lepidla má dvousložkové lepidlo znatelně nejhorší elektrické vlastnosti vzhledem ke stárnutí a degradaci. Tabulky s naměřenými hodnotami k této části jsou uvedeny v přílohách 17 až 20.

podmínky/hodiny	0	336	672	1008	1344	1680
zvýšené vlhko a teplota	205,72	9817	12768	12821	19015	22010
zvýšená teplota	281,77	3597	6556	7479	83302	8340
zvýšené vlhko	179,07	11416	31363	25661	42829	54979

Tabulka 6 Tabulka hodnot průměrů elektrického odporu pájecí slitiny



Graf 7 Vliv stárnutí na elektrický odpor jednosložkového lepidla za různých podmínek

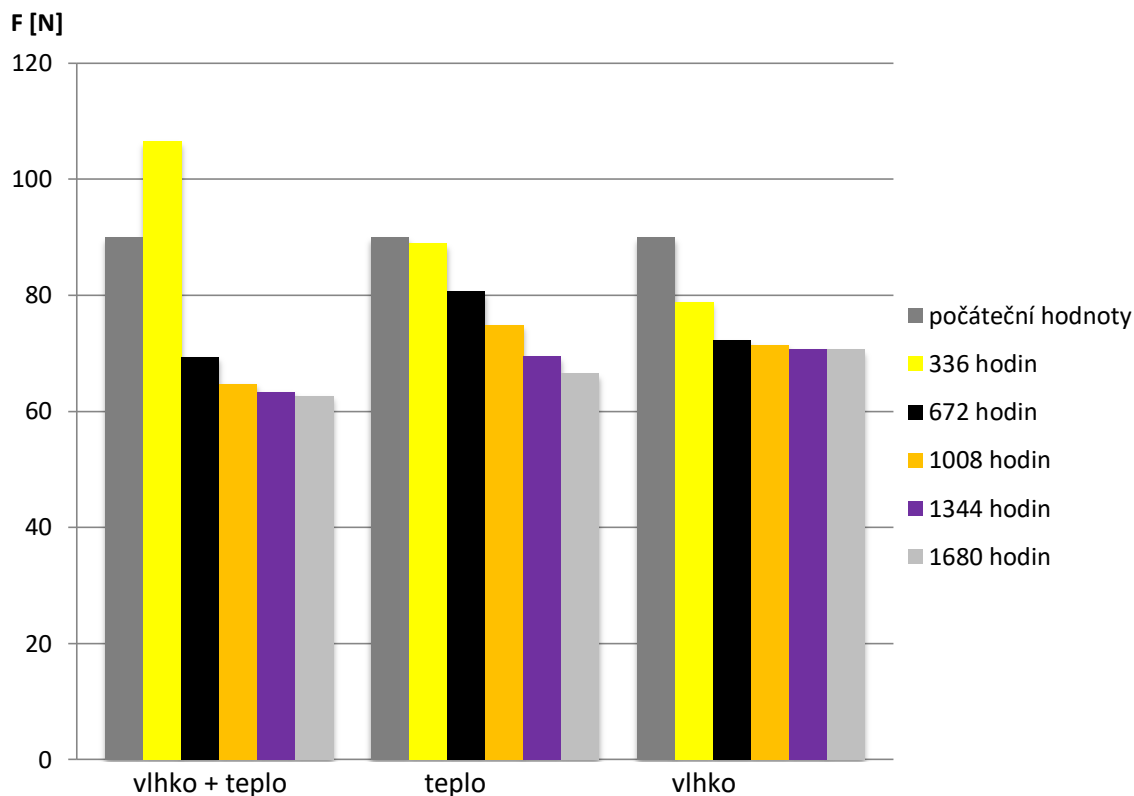
Z naměřených výsledků můžeme vidět, že kombinace zvýšeného tepla a vlhkosti má výrazně horší vliv na elektrický odpor, než pouze zvýšená vlhkost. Je tomu právě naopak, než u dvousložkového lepidla. Důvodem toho je, že jednosložková lepidla obsahují více vodivých částic, než dvousložková. Dále je to způsobeno tím, že zvýšená teplota umožňuje, popřípadě urychluje chemické reakce, což způsobuje rychlejší degradaci elektrických vlastností spoje. Elektricky vodivá lepidla by měla být citlivá na navlhnutí a bobtnat, avšak za pokojové teploty tento proces moc neprobíhá, a tak, jak můžeme vidět na grafu, došlo během prvních 672 hodin k významnému zhoršení vodivosti, avšak dále by se vodivost již nijak drasticky zvyšovat neměla. Prostředí se zvýšeným vlhkem mělo nakonec téměř stejné účinky jako prostředí se zvýšenou teplotou, průběh degradace vodivosti byl však pozvolnější. Zvýšená teplota a vlhko způsobily nárůst elektrického odporu přibližně 43 krát, zvýšené teplo 4,6 krát a zvýšená vlhkost 8,7 krát. Tabulky s naměřenými hodnotami k této části jsou uvedeny v přílohách 13 až 16.

podmínky/hodiny	0	336	672	1008	1344	1680
zvýšené vlhko a teplota	176,74	2512	4133	4097	6608	7537
zvýšená teplota	200,8	317,14	495,85	777	795	925
zvýšené vlhko a teplota	108,04	419,05	889,15	903,34	915	949

Tabulka 7 Tabulka hodnot průměrů elektrického odporu pájecí slitiny

3.3.3 Vliv stárnutí na mechanické vlastnosti

Síla potřebná k destrukci spoje tvořeného pájecí slitinou



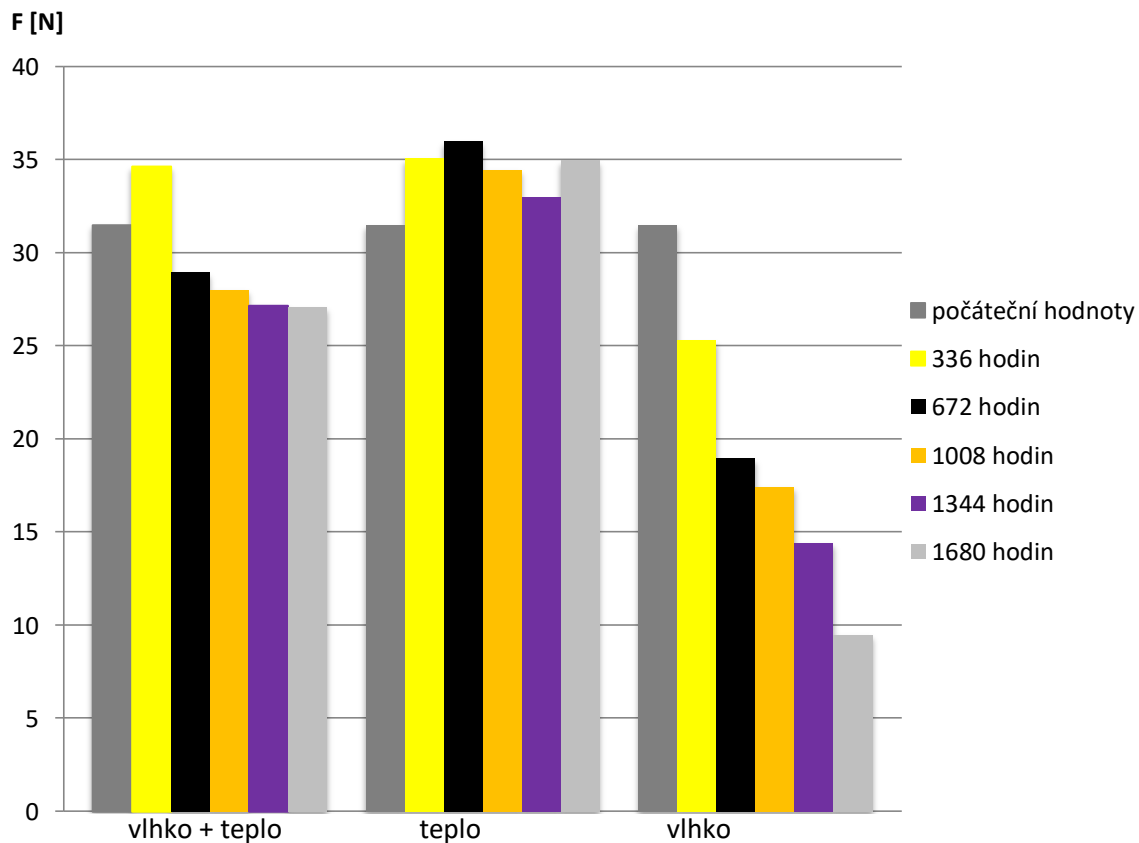
Graf 8 Vliv stárnutí na mechanickou pevnost spoje tvořeného pájecí slitinou

Z naměřených hodnot můžeme vidět, že degradace spoje, tvořeného pájecí slitinou, probíhá nejrychleji za zvýšené teploty a vlhkosti a poté za zvýšené teploty. Jako nejméně škodlivé prostředí se ukázalo to se zvýšenou vlhkostí. To je způsobeno tím, že zvýšená teplota napomáhá chemickým reakcím, jako je například koroze a oxidace, při zvýšené teplotě dochází k rozpínání materiálu a vzniku mikrotrhlin ve spoji. Zvýšená vlhkost tomuto procesu ještě více napomáhá. Z naměřených hodnot se dá předpokládat, že mechanické vlastnosti se dále nebudou nijak drasticky zhoršovat, spíše jen velmi málo, toto samozřejmě platí jen omezenou dobu, časem dojde ke zničení spoje. Hodnoty průměrné minimální síly potřebné ke zničení spoje se zmenšily pro vlhko a teplotu o 30,3%, pro teplotu o 26% a pro vlhko o 21,5%. V porovnání s lepenými spoji, ať už jednosložkovým nebo dvousložkovým lepidlem, je tato síla mnohem větší i po vystárnutí pro pájecí slitinu, než pro tato lepidla. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v přílohách 21 až 24.

podmínky/hodiny	0	336	672	1008	1344	1680
zvýšená teplota a vlhko	89,9	106,6	69,4	64,8	63,3	62,7
zvýšená teplota	89,9	88,9	80,7	74,9	69,5	66,6
zvýšené vlhko	89,9	78,8	72,3	71,4	70,8	70,6

Tabulka 8 Průměrná minimální síla nutná ke zničení spoje z pájecí slitiny

Síla potřebná k destrukci spoje tvořeného dvousložkovým lepidlem

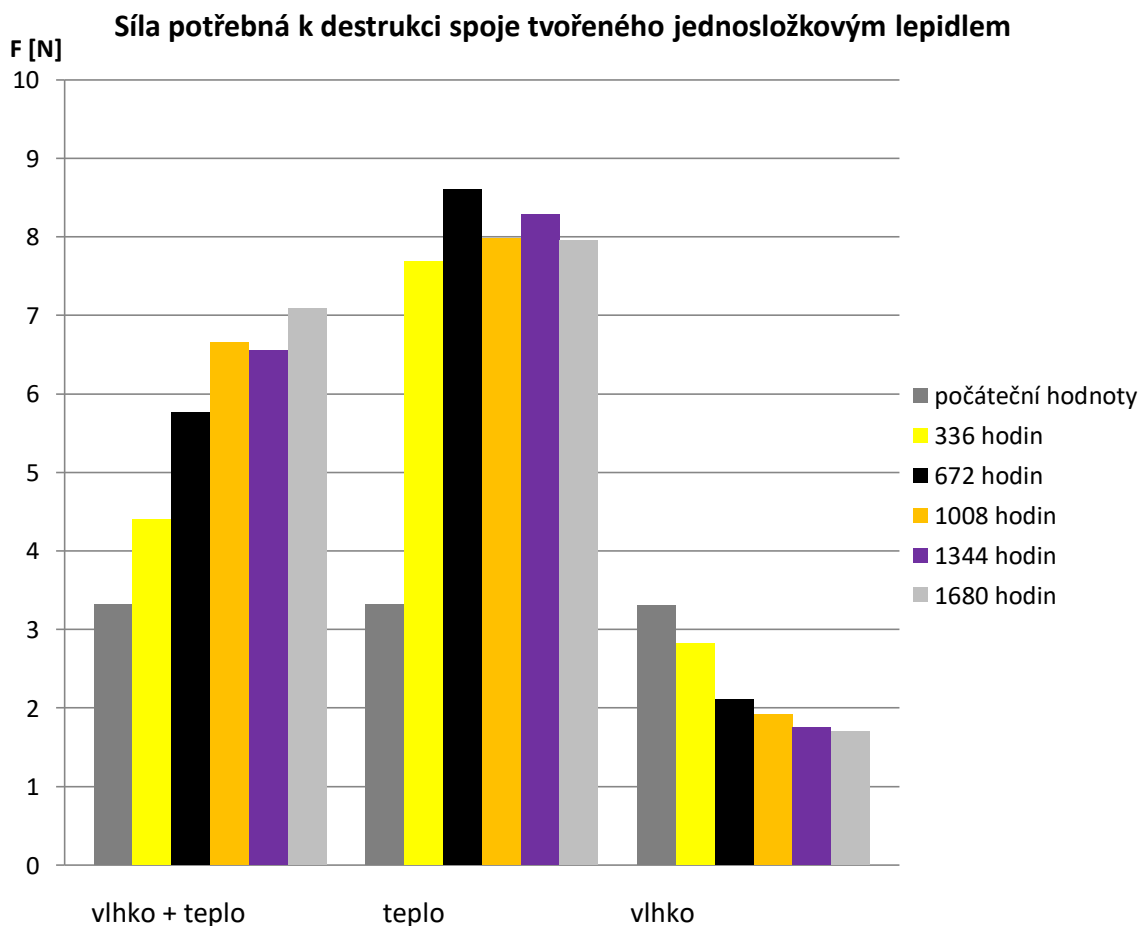


Graf 9 Vliv stárnutí na mechanickou pevnost spoje tvořeného dvousložkovým lepidlem

Vystavením spoje tvořeného dvousložkovým lepidlem prostředí se zvýšenou teplotou dosáhneme dotvrzení tohoto lepidla, což ve směru mechanických vlastností spoje znamená, že dojde k zlepšení těchto jeho vlastností, při nejmenším k zachování jeho původních vlastností. Dotvrzením dojde ke smrštění matrice, což zvětší vnitřní soudržnost lepidla, působí zde větší kohezní síly a musí se tedy působit větší silou, aby došlo ke zničení spoje. U naměřených hodnot pro prostředí se zvýšeným vlhkem a teplem také působí dotvrzovací efekt, avšak proti němu působí vliv navlhání lepidla a následného bobtnání, jež je silnější, takže dochází ke zhoršování mechanických vlastností, avšak v porovnání s prostředím pouze se zvýšenou vlhkostí je zhoršení těchto vlastností mnohem menší. Navlhání lepidla způsobuje jeho bobtnání, to znamená nabývání objemu lepidla a pokles vnitřní soudržnosti lepidla. Na spoje vystavené pouze zvýšené vlhkosti nepůsobí dotvrzovací efekt a tak je degradace mechanických vlastností největší. Hodnoty průměrné minimální síly potřebné ke zničení spoje se zmenšily pro vlhko a teplo o 14%, pro teplo o -11,1% a pro vlhko o 70%.

podmínky/hodiny	0	336	672	1008	1344	1680
zvýšená teplota a vlhko	31,5	34,6	28,9	28	27,2	27,1
zvýšená teplota	31,5	35,1	36	34,5	32,9	35
zvýšené vlhko	31,5	25,3	18,9	17,4	14,4	9,5

Tabulka 9 Průměrná minimální síla nutná ke zničení spoje z dvousložkového lepidla



Graf 10 Vliv stárnutí na mechanickou pevnost spoje tvořeného jednosložkovým lepidlem

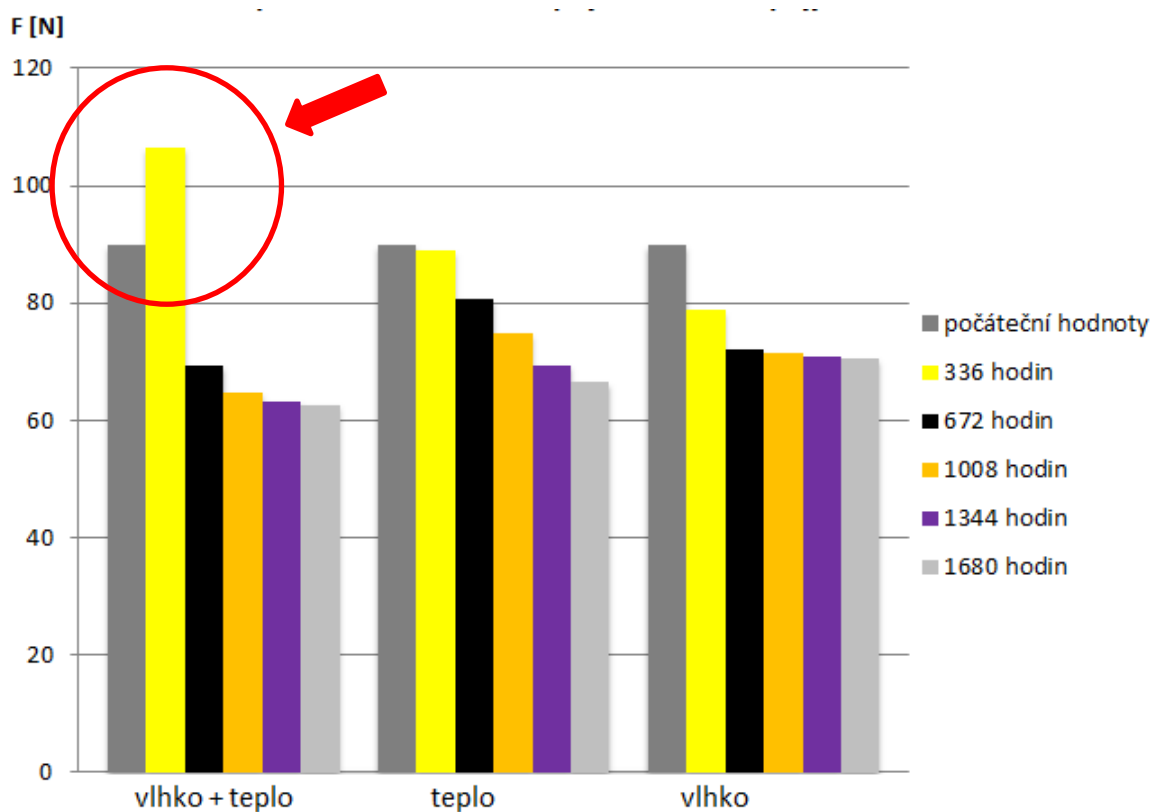
Stejně tak, jako u předchozího grafu, tedy jako u dvousložkového lepidla, i u jednosložkového lepidla dochází při zvýšené teplotě k dotvrzení, to způsobuje v prostředí se zvýšenou teplotou zlepšení mechanických vlastností spoje. Na rozdíl od dvousložkového lepidla zde však dochází v prostředí se zvýšenou vlhkostí i teplotou k převládnutí dotvrzovacího efektu nad navlhnutím a tím tedy ke zlepšení mechanických vlastností v tomto prostředí. V prostředí, kde je pouze zvýšená vlhkost dochází ke zhoršení mechanických vlastností stejně jako u dvousložkového lepidla, neboť zde působí pouze degradační procesy a žádné dotvrzení. Mechanické vlastnosti jednosložkového lepidla jsou celkově mnohem horší, než tyto vlastnosti dvousložkového lepidla a ještě mnohem víc, než tyto vlastnosti pájecí slitiny a to před i po vystárnutí. Hodnoty průměrné minimální síly potřebné ke zničení spoje se zmenšily pro zvýšené vlhko a teplo o -115%, pro zvýšené teplo o -142,5% a pro zvýšenou vlhkost o 51,5%. Tabulky s naměřenými hodnotami k této části jsou uvedeny v přílohách 13 až 16.

podmínky/hodiny	0	336	672	1008	1344	1680
zvýšené vlhko a teplota	3,3	4,4	5,8	6,7	6,6	7,1
zvýšená teplota	3,3	7,7	8,6	8	8,3	8
zvýšené vlhko	3,3	2,8	2,1	1,9	1,8	1,7

Tabulka 10 Průměrná minimální síla nutná ke zničení spoje z jednosložkového lepidla

3.3.4 Odůvodnění odchylek hodnot v grafech

V předchozích kapitolách, kapitolách 3.3.2 a 3.3.3, můžeme v grafech občas pozorovat odchylku hodnot, jako například tu zobrazenou na obrázku č. 24 (na něm je graf č. 8). Zde hodnota síly průběžně klesá, ale po 336 hodinách stoupla. Toto je způsobeno tím, že vzorky byly postupně ničeny při měření mechanických vlastností, a tak se vždy měřilo na menším počtu vzorků, tedy v podstatě na jiné sadě vzorků. U elektrických vlastností pájecích slitin toto může být způsobeno i určitou nejistotou měření, neboť hodnoty se měřily na setiny $m\Omega$. U mechanických vlastností je toto výraznější, protože síla byla měřena vždy na jiné desce. Tendence zhoršování či zlepšování vlastností je však z grafů dobře čitelná, takže to ničemu nevádí.



Obrázek 24 odchylka hodnot v grafu

4 Závěr

V teoretické části této práce jsou popsány oba způsoby připevnění součástky k základové desce a to jak pomocí pájecích slitin, tak i pomocí elektricky vodivých lepidel. Také je zde uvedeno teoretické porovnání spojů vytvořených pomocí pájecích slitin a lepidel, což se v praktické části této práce ověřovalo. Dále jsou zde popsány degradace a stárnutí spojů, jako teoretický úvod pro druhou polovinu praktické části.

První polovina praktické části této práce se zabývá porovnáním pájených a lepených spojů. Z naměřených výsledků vyplývá, že pájené spoje mají lepší elektrické vlastnosti, než spoje lepené. Elektrický odpor pájených spojů je přibližně desetkrát menší, rozptyl naměřených hodnot je také mnohem menší a i když připájíme odpory určené k lepení, dostáváme skoro poloviční odpor, než když je přilepíme. Co se týče mechanických vlastností, tak ty jsou také mnohem lepší při pájení. Síla potřebná k odtržení připájeného odporu je více, než pětkrát větší, než síla potřebná k odtržení lepeného spoje. Když připájíme odpory určené k lepení, tak i navzdory tomu, že pájka ideálně nesmáčí kontakty odporu, je síla potřebná k odtržení takového odporu přibližně tři a půl krát větší, než síla potřebná k odtržení odporu přilepeného. Tyto výsledky potvrzují fakt, zmíněný v teoretické části, že pájecí slitiny jsou v obou těchto ohledech lepší k připevnění součástky k desce, než lepidla. Pro druhou polovinu praktické části této práce z této části vyplynul výsledek, že z odporů, které byly k dispozici, budou použity pouze odpory určené k pájení, nikoliv ty určené k lepení. Je to z toho důvodu, že tyto nulové odpory mají mnohem menší reálný odpor, jsou novější, a i když přilepíme odpor určený k pájení, dostáváme lepší výsledky v ohledu mechanických vlastností a téměř shodné výsledky v ohledu elektrických vlastností, než když přilepíme odpor určený k lepení.

V druhé polovině praktické části je studován vliv stárnutí na elektrické a mechanické vlastnosti lepených a pájených spojů. Ukázalo se, že změna elektrických vlastností pájených spojů je ve všech třech zkoumaných podmínkách (zvýšené vlhko, zvýšená teplota, zvýšené vlhko a teplota) téměř stejná, dochází k mírnému zhoršení vlastností. U elektricky vodivých lepidel na sebe působí dva procesy s opačnými účinky a to dotvrzování a bobtnání lepidel. U dvousložkového lepidla bobtnání způsobuje podstatnou degradaci elektrických vlastností, zatímco v kombinaci s dotvrzováním při zvýšené teplotě dochází k brždění procesu degradace. Zvýšená teplota není schopna zlepšit původní elektrické vlastnosti. U jednosložkových lepidel je tomu naopak, vliv zvýšené vlhkosti sám o sobě spoji škodí podobně jako vliv zvýšené teploty. Až kombinace vlivu zvýšené vlhkosti a teploty umožní drastické zhoršení jejich elektrických vlastností. Mechanické vlastnosti pájecí slitiny degradují nejvíce při kombinaci zvýšené vlhkosti a teploty a to o třetinu, avšak samotná vlhkost či teplo nejsou o moc lepší. U lepidel v ohledu mechanických vlastností proti sobě opět působí dotvrzování a bobtnání. Zatímco u dvousložkového lepidla vliv zvýšené

teploty sám o sobě jen mírně zlepšuje mechanické vlastnosti, tak v kombinaci s vlivem zvýšené vlhkosti je proces dotvrzování slabší, než bobtnání a převládá degradace vlastností spoje. U jednosložkového lepidla je tomu právě naopak, vliv zvýšené teploty převládá nad vlivem zvýšené vlhkosti a při kombinaci těchto podmínek se mechanické vlastnosti zlepšují. U obou typů lepidel dochází vlivem zvýšené teploty k zlepšení vlastností a vlivem zvýšené vlhkosti k jejich degradaci.

Z porovnání pájených a lepených spojů po stárnutí vychází mnohem lépe pájecí slitiny. Za všech testovaných podmínek mají minimálně dvakrát, povětšinou i mnohonásobně vícekrát, lepší mechanické vlastnosti, než spoje lepené. Elektrické vlastnosti pájecích slitin jsou řádově lepší, než elektrické vlastnosti lepidel. Dvousložkové lepidlo má podstatnější slabost v elektrických vlastnostech, zatímco podstatnější slabost jednosložkového lepidla je v mechanických vlastnostech.

5 Seznamy obrázků, tabulek a grafů

5.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Struktura elektricky vodivého lepidla	7
Obrázek 2 Průřez elektricky vodivým lepeným spojem [7].....	8
Obrázek 3 Závislost vodivosti lepidla v závislosti na koncentraci plniva [12]	9
Obrázek 4 Princip anizotropního lepidla	10
Obrázek 5 Stykový úhel α	11
Obrázek 6 Aparatura na měření elektrického odporu pájených a lepených spojů	19
Obrázek 7 Trhačka	20
Obrázek 8 Průběh síly při měření mechanických vlastností spoje.....	21
Obrázek 9 FR4 deska	22
Obrázek 10 stroj na nanášení pájky a lepidla	23
Obrázek 11 Deska s nanesenou pájecí slitinou.....	24
Obrázek 12 SMT manipulátor na osazování součástek	24
Obrázek 13 Pec	25
Obrázek 14 Konečná podoba vyrobeného vzorku	25
Obrázek 15: Připájené odpory	29
Obrázek 16: Přilepené odpory.....	29
Obrázek 17: Samo srovnávací efekt	30
Obrázek 18 Množství lepidla	32
Obrázek 19: Odtržený připájený odpor	33
Obrázek 20: Odtržený přilepený odpor	33
Obrázek 21 Pec na tepelné stárnutí vzorků	34
Obrázek 22 Nádoba se zvýšenou vlhkostí	35
Obrázek 23 Pec se zvýšenou teplotou a vlhkostí.....	35
Obrázek 24 odchylka hodnot v grafu	42

5.2 Seznam grafů

Graf 1 Odpory pájených spojů	26
Graf 2 Odpory lepených spojů	27
Graf 3 Naměřené hodnoty elektrického odporu	28
Graf 4 Mechanické vlastnosti spojů	31
Graf 5 Vliv stárnutí na elektrický odpor pájecí slitiny za různých podmínek.....	36
Graf 6 Vliv stárnutí na elektrický odpor dvousložkového lepidla za různých podmínek ...	37
Graf 7 Vliv stárnutí na elektrický odpor jednosložkového lepidla za různých podmínek...	38
Graf 8 Vliv stárnutí na mechanickou pevnost spoje tvořeného pájecí slitinou	39
Graf 9 Vliv stárnutí na mechanickou pevnost spoje tvořeného dvousložkovým lepidlem..	40
Graf 10 Vliv stárnutí na mechanickou pevnost spoje tvořeného jednosložkovým lepidlem	41

5.3 Seznam tabulek

Tabulka 1 Stupně smáčivosti.....	11
Tabulka 2 Parametry prostředí a jejich účinky na degradační procesy	17
Tabulka 3 Porovnání elektrických vlastností pájených a lepených spojů	28
Tabulka 4 Porovnání mechanických vlastností pájených a lepených spojů	32
Tabulka 5 Tabulka hodnot průměrů elektrického odporu pájecí slitiny	36
Tabulka 6 Tabulka hodnot průměrů elektrického odporu pájecí slitiny	37
Tabulka 7 Tabulka hodnot průměrů elektrického odporu pájecí slitiny	38
Tabulka 8 Průměrná minimální síla nutná ke zničení spoje z pájecí slitiny	39
Tabulka 9 Průměrná minimální síla nutná ke zničení spoje z dvousložkového lepidla	40
Tabulka 10 Průměrná minimální síla nutná ke zničení spoje z jednosložkového lepidla ...	41

6 Seznam použitých zdrojů

- [1] Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J.: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001
- [2] Ebnesajjad, S.: Handbook of Adhesives and Surface Preparation – Technology, Applications and Manufacturing, 2011, ISBN: 978-1-4377-4461-33.
- [3] Bím, J.: Kvalita pájených a lepených vodivých spojů v elektrotechnice, bakalářská práce, ČVUT, Praha 2018
- [4] Podzemský, J.: Degradace spojů pájených pájkami bez olova, disertační práce, ČVUT, Praha 2015
- [5] Hirman, M.: Materiálové a procesní aspekty připojování součástek na flexibilní substráty, disertační práce, ZČU, Plzeň 2017
- [6] Franko, J.: Technologie pájení a vodivého lepení v elektronice, bakalářská práce, ZČU, Plzeň 2016
- [7] MACH, P.: Elektricky vodivé lepení v elektrotechnice [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-11-27]. Dostupné z:
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34502/mod_resource/content/1/Elektricky_vodive_lepeni_v_elektrotechnice.pdf. Přednáška. ČVUT FEL.
- [8] F. Steiner, A. Hamáček, V. Skočil, a J. Štrunc, Nové uplatnění lepidel v elektronice: Materiály pro elektroniku a elektrotechniku. Ostrava: Tanger, 1999.
- [9] Zámorský, Z.: Nauka o polymerech, 3. Brno : Ediční středisko Vysokého učení technického, 1982.
- [10] Janíček, M.: Tepelné stárnutí nanokompozitů, bakalářská práce, VUT, Brno 2013
- [11] MACH, P.: Přednášky MVE, 2017. Dostupné z:
<https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=1767>
- [12] AJAYAN P.M., SCHADLER S.L., BRAUN V.P. Nanocomposite science and technology. Weinheim :Wiley-VCH, 2003, 230 s. ISBN 3-527-30359-6

7 Seznam příloh

Příloha 1 Tabulka naměřených hodnot k části 3.2.1	49
Příloha 2 Tabulka naměřených hodnot k části 3.2.2.....	49
Příloha 3 katalogový list lepidla ELPOX AX 12 LVT část 1	50
Příloha 4 katalogový list lepidla ELPOX AX 12 LVT část 2	51
Příloha 5 Katalogový list lepidla ECO SOLDER AX 70MN část 1	51
Příloha 6 Katalogový list lepidla ECO SOLDER AX 70MN část 2	51
Příloha 7 Katalogový list lepidla ELPOX ER 55MN část 1	51
Příloha 8 Katalogový list lepidla ELPOX ER 55MN část 2	51
Příloha 9 Katalogový list pájecí slitiny M31-GRN360-K-V část 1	51
Příloha 10 Katalogový list pájecí slitiny M31-GRN360-K-V část 2	51
Příloha 11 Katalogový list pájecí slitiny M31-GRN360-K-V část 3	51
Příloha 12 Katalogový list pájecí slitiny M31-GRN360-K-V část 4	51
Příloha 13 Tabulka naměřených počátečních hodnot jednosložkového lepidla	51
Příloha 14 Tabulka naměřených hodnot pro jednosložkové lepidlo, vlhko + teplo	51
Příloha 15 Tabulka naměřených hodnot pro jednosložkové lepidlo, vlhko	51
Příloha 16 Tabulka naměřených hodnot pro jednosložkové lepidlo, teplo	51
Příloha 17 Tabulka naměřených počátečních hodnot dvousložkového lepidla	51
Příloha 18 Tabulka naměřených hodnot pro dvousložkové lepidlo, vlhko	51
Příloha 19 Tabulka naměřených hodnot pro dvousložkové lepidlo, vlhko + teplo	51
Příloha 20 Tabulka naměřených hodnot pro dvousložkové lepidlo, teplo	51
Příloha 21 Tabulka naměřených počátečních hodnot jednosložkového lepidla	51
Příloha 22 Tabulka naměřených hodnot pro pájecí slitinu, vlhko + teplo.....	51
Příloha 23 Tabulka naměřených hodnot pro pájecí slitinu, vlhko.....	51
Příloha 24 Tabulka naměřených hodnot pro pájecí slitinu, teplo.....	51

8 Přílohy

pájené spoje						lepené spoje					
číslo desky	číslo spoje	R [mΩ]	číslo desky	číslo spoje	R [mΩ]	číslo desky	číslo spoje	R [mΩ]	číslo desky	číslo spoje	R [mΩ]
P1	1	11,70	P4	22	13,88	L1	43	205,50	L4	64	160,90
	2	11,77		23	15,50		44	115,40		65	194,60
	3	12,27		24	12,05		45	283,60		66	87,86
	4	11,02		25	13,40		46	295,60		67	259,30
	5	11,26		26	23,20		47	89,85		68	34,00
	6	10,54		27	11,12		48	76,93		69	103,00
	7	8,63		28	9,02		49	61,62		70	44,50
P2	8	12,35	P5	29	12,09	L2	50	168,50	L5	71	177,20
	9	13,47		30	11,34		51	241,05		72	260,90
	10	12,06		31	11,16		52	228,60		73	233,60
	11	12,12		32	11,31		53	273,60		74	22,70
	12	11,23		33	10,10		54	259,80		75	275,20
	13	9,31		34	9,73		55	102,80		76	258,80
	14	8,18		35	7,79		56	63,98		77	99,70
P3	15	11,63	P6	36	42,55	L3	57	79,11	L6	78	138,40
	16	11,25		37	47,77		58	158,60		79	198,40
	17	10,72		38	39,82		59	194,50		80	113,50
	18	12,03		39	43,81		60	196,00		81	60,89
	19	7,57		40	46,49		61	253,10		82	179,30
	20	9,26		41	43,11		62	114,00		83	112,97
	21	7,63		42	45,24		63	138,80		84	64,80

Příloha 1 Tabulka naměřených hodnot k části 3.2.1

pájené spoje			lepené spoje		
číslo destičky	číslo spoje	F [N]	číslo destičky	číslo spoje	F [N]
P1	1	61,4528	L1	22	-
	2	44,6444		23	4,227
	3	52,0601		24	4,9533
	4	51,3781		25	6,3484
	5	68,3738		26	10,2194
	6	57,6896		27	17,932
	7	60,4904		28	15,4415
P2	8	42,216	L2	29	7,176
	9	46,17		30	6,6147
	10	44,06		31	8,6439
	11	56,215		32	7,5666
	12	55,128		33	7,5786
	13	53,4105		34	8,2443
	14	71,5223		35	8,4148
P6	15	22,8186	L3	36	5,4796
	16	32,5366		37	0,4578
	17	37,3507		38	3,0823
	18	33,4988		39	8,9438
	19	26,8597		40	6,4362
	20	44,6654		41	17,6241
	21	35,0088		42	11,0317

Příloha 2 Tabulka naměřených hodnot k části 3.2.2



ELPOX AX 12LVT

ELECTRICALLY CONDUCTIVE, SILVER EPOXY

- * **TWO COMPONENTS EPOXY ADHESIVE**
- * **FOR PROFESSIONAL – ELECTRONIC APPLICATIONS**
- * **LOWER TEMPERATURE CURING VERSION**
- * **LOWER VISCOSITY VERSION**

GENERAL DESCRIPTIONS:

ELPOX AX 12LVT is a two components, 100% solid (thinners free) epoxy base adhesive containing the purest silver flakes, especially for surface mounting applications and popular uses in electronics production process. This is generally modification of **ELPOX AX 12LT** type with much floable (lower viscosity) properties of this formulation.

ELPOX AX 12LVT has soft paste consistency and it has very good adhesion to many different types of materials - especially glass, quartz, semiconductor chips and oxide covered metals. This formulation is very easy to use and has very convenient pot life time and curing conditions.

SPECIFICATIONS:

Number of components	Two.
Mixing ratio A : B (by weight)	1 : 1
Consistency after mixing A+B	Soft paste, 100% solids.
Color	Silver.
Percentage of silver	55 ± 1%
Viscosity (A+B)	250 000 – 290 000 cps (*)
Thixotrophy index Ti = (10/100)	5.4 - 6.0
Recommended curing schedule	80° C - 25 min. 100° C - 15 min. 120° C - 10 min.
Recommended curing with IR heating tunnel	150° C (peak) – 5 min (total time)
Pot life	5 hours @ 25° C.
Storage	6 months with closed container @ 25° C.

(*) BROOKFIELD DVII; SSA#14;1 rpm;25C

Příloha 3 katalogový list lepidla ELPOX AX 12 LVT část 1

PHYSICAL PROPERTIES (*):

Specific gravity	2.35 – 2.65 g/ccm
Thermal conductivity	3.0 - 3.5 W/mK
Glass transition temp. (Tg)	Ab. 95° C (TMS method).
Resistivity after curing	0.00015 – 0.00025 Ωcm

(*) – Typical value for number of tests

ATTENTION:

ELPOX AX 12LVT is supplied as a two component material and is available in a variety of screw-top jar sizes. Minimum order quantity is 100 grams.

1. Mix **ELPOX AX 12LVT** – Part "A" and "B" inside containers separately first very thoroughly before use. After adding hardener – Part "B", mix mixture "A+B" very thoroughly before use, with wood or plastic spatula. Mix smoothly from the bottom of the container. Mix carefully - not to whip air into the product. **INSURE ELPOX AX 12LVT IS AT ROOM TEMPERATURE WHEN YOU WILL START WORKING WITH.**
2. Prepare consistency before use according your SPECIFICATION.
3. If you need, use AXMC **TH # 12** thinner. Thinner will change paste resistivity. Pls, do not exceed 1% of weight. After first tests pls let us know about your viscosity requirements – we will be able to change it for you.
4. Low conductivity and/or poor adhesion performance are symptomatic that **ELPOX AX 12LVT** is under curing conditions.
5. Refrigeration during shelf time is useful. Keep containers with both parts of adhesive in temp. no less 10° C. Before use, increase temperature very slowly.
6. Use silver epoxy with adequate ventilation.
7. Avoid skin and eye contact. If ingested, consult a physician immediately.
8. Clean by MEK, alcohol or other suitable solvents.

WARNING:

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

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

(ELPC

Příloha 4 katalogový list lepidla ELPOX AX 12 LVT část 2



ECO SOLDER AX 70MN

POLYMER BASE, SOLDER REPLACEMENT PASTE

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

GENERAL DESCRIPTIONS:

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

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

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

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

SPECIFICATIONS:

Number of components	One
Consistency	Floable paste
Color	Bright silver
Percentage of silver (inside ready paste)	70 ± 1%
Specific gravity	2.1 – 2.4 g/cm 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)

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

Příloha 5 Katalogový list lepidla ECO SOLDER AX 70MN část 1

TECHNICAL PROPERTIES (*):

Electrical resistivity	$(1.0 - 2.5) \times 10^{-6} \Omega\text{m}$
Pencil hardness	9H pencil hardness (one day after curing)
Range of service for continuous temperature	$(-55)^{\circ}\text{C} - (+200)^{\circ}\text{C}$
Max. operating temperature	300°C for ab 1.5 h.

(*) - Typical value for number of tests.

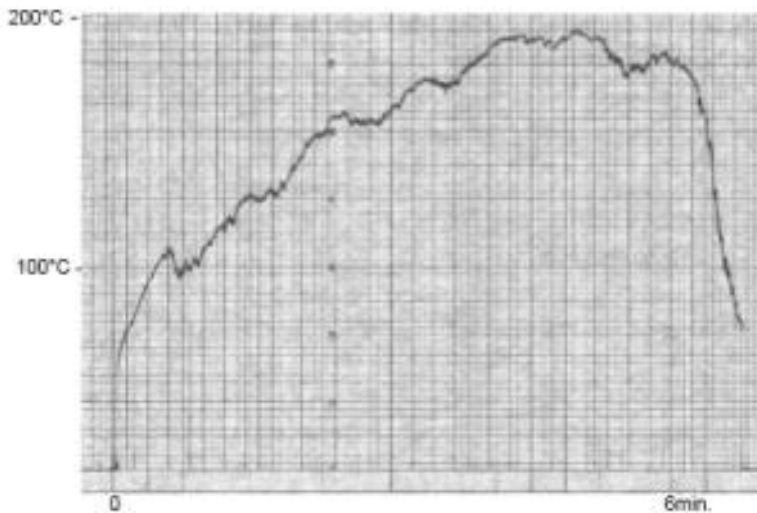


Fig. 1. Example of heating tunnel profile for curing E-S AX 70MN

ATTENTION:

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

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



ELPOX ER 55MN

EPOXY-PHENOLIC HYBRIDE TYPE RESIN

- * **ELECTRICALLY CONDUCTIVE**
- * **HIGH TEMPERATURE RESISTANT**
- * **VERY GOOD ADHESION FOR COPPER**
- * **SCREEN PRINTING OR TRANSFERING APPLICATION**
- * **100% SOLID FORMULATION.**

GENERAL DESCRIPTIONS:

ELPOX ER 55MN is single component, electrically conductive, silver filled, epoxy-phenolic base resin adhesive. This adhesive is especially prepared for making connections to copper material and for high temperature resistant application. As 100% solid formulation, this will help to do "sandwich" type connections (surface to surface) between Si, glass, ceramics and metals.

ELPOX ER 55MN has very stable electrical conductivity. This type is mostly for high-speed technological process. It doesn't dry out even on open screen during one shift working time.

SPECIFICATIONS:

Number of components	One
Consistency	Floable paste
Color	Silver
Percentage of silver (inside ready paste)	70 ± 1%
Specific gravity	3.2 – 3.5 g/cm ³
Viscosity	24 500 – 48 000 cps (*)
Recommended curing schedule with air-circulated oven	150°C - (15 - 20) min. 180°C - (7 - 8) min. 200°C - (3 - 4) min.
Recommended curing schedule with heating tunnel	180°C in peak – 5 min. total time inside tunnel
Shelf life	Min. 6 months (when storage at 5°C – unopened)

(*) - Brookfield DVII; SSA#14; 10 rpm; 25°C.

TECHNICAL PROPERTIES (*):

Electrical sheet resistivity (curing inside oven)	0.02 Ω /sq @ 1 mil.
Electrical sheet resistivity (curing inside tunnel)	0.001 Ω /sq @ 1 mil.
Electrical resistivity	(4.0 – 7.5) x E(-5) Ω cm
Pencil hardness	9H pencil hardness (one day after curing)
Range of service for continuous temperature	(-55) $^{\circ}$ C - (+180) $^{\circ}$ C
Max. operating temperature	Over 280 $^{\circ}$ C for a couple of hours.

(*) - Typical value for number of tests.

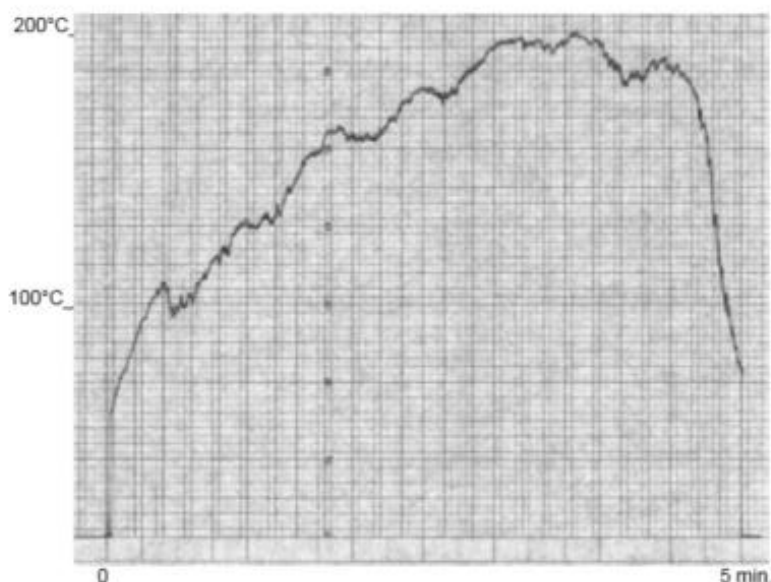


Fig.1. Example of heating tunnel profile for curing ER 55MN

ATTENTION:

1. Product is ready for use, but should be mixed very thoroughly before use using wood or plastic spatula. Mix smoothly from the bottom of the container. Mix carefully - not to whip air into the product. **INSURE ELPOX ER 55MN IS AT ROOM TEMPERATURE WHEN YOU WILL START WORKING WITH.**
2. Prepare consistency before use according your SPECIFICATION.
3. Low conductivity and poor adhesion performance are symptomatic that paste is under curing conditions.
4. Refrigeration during long shelf time is necessary. Keep container with paste in temp. no less 5 $^{\circ}$ C. Before use, increase temperature of paste very slowly.
5. Use paste with adequate ventilation.
6. Avoid skin and eye contact. If ingested, consult a physician immediately.
7. Clean by MEK or other suitable solvents. Allow screen to completely dry before using again.
8. Temperature during printing process must be kept between 20 $^{\circ}$ C and 25 $^{\circ}$ C, with relative humidity (RH) between 40% and 65%. This condition reduces static charges on the substrate.
9. When stored – keep container closed.

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

(ex-er55mn)

Senju Metal Industry Co., Ltd.
Senju Manufacturing (Europe) Ltd.

ECO SOLDER®

High-Reliability Lead-Free Solder Paste

M31-GRN360-K-V

Manufacturer	European Facility
Senju Metal Industry Co.,Ltd.	Senju Manufacturing (Europe) Ltd.
23 Senju Hashido-cho, Adachi-Ku, Tokyo, Japan Phone: +81-33888-5156 Fax: +81-33870-3032	Unit 5, The Gateway Centre, Coronation Road, Cressex Business Park, High Wycombe, Bucks HP12 3SU England Phone:+44 (0) -1494-526000 Fax: +44 (0) -1494-526100

M31-GRN360-K V-Type

Lead-Free solder paste ECOSOLDER M31-GRN360-K V-Type is a further development of the GRN360 K-series and especially designed to meet higher preheat temperatures. This means users will not only benefit from

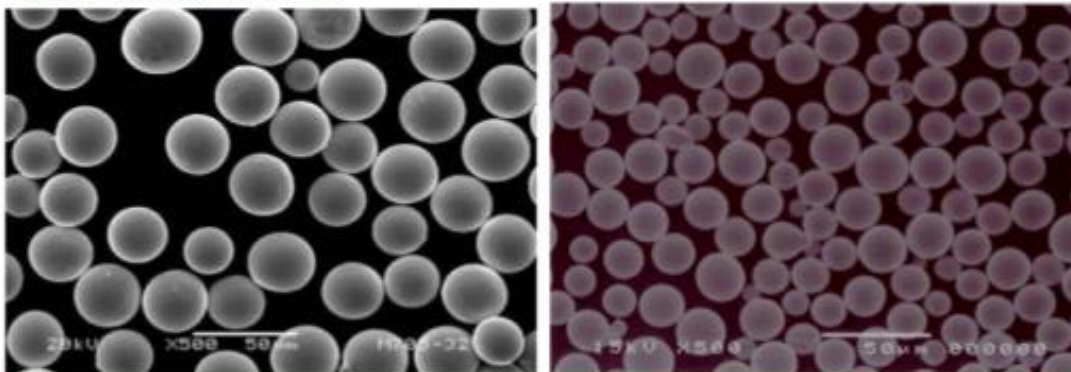
Very stable solder paste viscosity	Excellent wettability
Clear flux residue combined	Reduced flux residue cracking
Excellent joint cosmetics	Reduced occurrence of side ball

that are the features of the GRN360-K series but also from a wide application range due to the improved thermal properties. This includes also high density applications with BGAs, CSPs etc.

Characteristic of M31 alloy compared to eutectic tin-lead alloy

		M31	63Sn-Pb
Alloy Composition(%)		Sn95.75-Ag3.5-Cu0.75	Sn63-Pb37
Specific gravity		7.4	8.4
Melting temperature °C	Solidus	217	183
	Peak	219	
	Liquidus	219	
Tensile strength (Mpa)		53.0	56.0
Elongation(%)		47	59
Young's module (Gpa)		45.1	26.3
0.2% Yield point (Mpa)		39.4	45.8
Coefficient of linear expansion (ppm/C)		21.3	23.5
Vickers Hardness (Hv)		17.9	16.6

SEM Photo of M31 powder



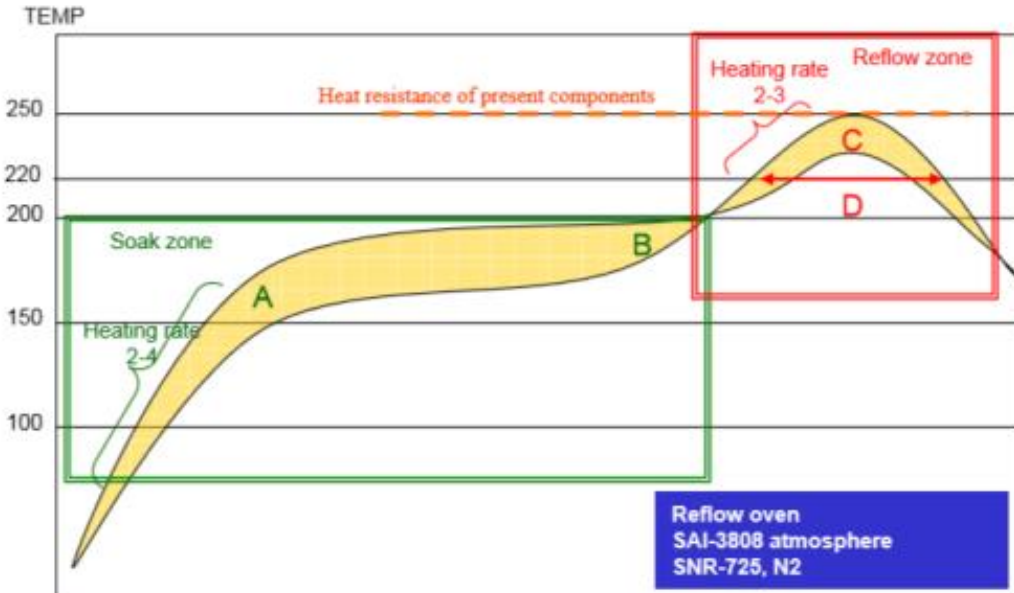
No surface oxidation, spherical lead-free powder is used in all Senju ECOSOLDER paste products .
(The photograph shows type-4 (25-36µm) and type-5 (15-25µm))

M31-GRN360-K V-Type characteristics

Items	M31-GRN360-K-V (Type 4)	M31-GRN360-K-MK-V (Type 3)	Test method /Remarks
Solder Powder			
Alloy Composition	Sn95.75-Ag3.5-Cu0.75		---
Melting Temperature	217 ~ 219 C		DSC
Powder Shape	Spherical		SEM
Powder size/distribution	25 ~ 36um	25-45 um	SEM & Laser method
FLUX			
Type	RO		J-STD-004
Activity	L0		J-STD-004
Halide	0.0%/Flux		Titration method
Surface Insulation Resistance (40C90%RH,168hr)	Over 1.0E+12		ISO 9445-1 & 94554-1
Electro-migration Resistance (85C85%RH Bias DC45V, 1000hr)	Over 1.0E+9 No migration		ISO 9445-1 & 94554-1
Water resistance	750Ωm		ISO 9455
Copper mirror test	PASS		ISO 9455
Fluoride Test	PASS		ISO 9455
Solder Paste			
Viscosity	K1:180 Pa.s K2:200 Pa.s		ISO 9445-1 & 94554-1
Thixotropic Index	0.6		ISO 9445-1 & 94554-1
Flux Content	11.5%		ISO 9455
Hot Slump	0.4mm Max.		ISO 9445-1 & 94554-1
Tackiness	1.3N		ISO 9445-1 & 94554-1
Tackiness Time	Over 24h/1.0N		ISO 9445-1 & 94554-1
Spreading	77%		ISO 9455
Wetting and dewetting	Rank 1-2		ISO 9445-1 & 94554-1
Solder balls	Rank 1-2		ISO 9445-1 & 94554-1
Copper plate corrosion test	PASS		ISO 9455
Validity (unopened, keep at 0 ~ 10°C)	6 months		---

Recommended Reflow Temperature Profile M31-GRN360-K-V

Recommended reflow temperature profile for M31-GRN360-K-V is shown below.
During reflow not all temperatures on PCB are the same, there will be a variation due to the different thermal mass.
However, all soldering points on the PCB showed go into the following recommendation for the thermal profile.



Recommendation			
A: soak start:	150 - 180	C: Peak temp:	230 - 250
B: soak end:	170 - 200	D: time above 220,	30 - 60sec
A - B: soak time:	90 ±30sec	(solidus line)	

jednosložkové lepidlo								
počáteční hodnoty elektrického odporu								
číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]
1	1	42,8	6	36	163,3	11	71	96,06
	2	73,42		37	74,68		72	101,33
	3	147,9		38	228,9		73	59,22
	4	65,21		39	211,9		74	64,31
	5	109,5		40	674		75	36,63
	6	212,5		41	83,31		76	44,01
	7	185,5		42	274		77	438,5
2	8	102,89	7	43	91,71	12	78	106
	9	83,26		44	330,6		79	567,1
	10	91,37		45	119,8		80	26,22
	11	82,98		46	305,3		81	98,16
	12	131,3		47	562,3		82	81,49
	13	74,18		48	120,5		83	79,37
	14	152,9		49	219,4		84	85,57
3	15	132,7	8	50	110,1	13	85	104,08
	16	89,64		51	231		86	221,5
	17	123,5		52	48,92		87	122,8
	18	72,08		53	61,24		88	-
	19	88,82		54	58,23		89	175,6
	20	293,3		55	75,12		90	63,13
	21	73,92		56	129,3		91	178
4	22	78,14	9	57	120,9	14	92	42,47
	23	42,35		58	75,78		93	86,43
	24	72,83		59	397,3		94	650,4
	25	66,59		60	87,51		95	206,6
	26	78,24		61	172,9		96	37,43
	27	164,3		62	374,2		97	294,8
	28	114,4		63	210,7		98	677,3
5	29	203,5	10	64	43,53	15	99	171
	30	78,73		65	123,5		100	167,8
	31	106,9		66	37,42		101	284,1
	32	134		67	85,24		102	368,7
	33	46,57		68	129,9		103	174,6
	34	57,35		69	95,72		104	800,8
	35	125,8		70	57,91		105	115,9
počáteční hodnoty síly potřebné k destrukci spoje								
číslo vzorku	číslo spoje	F [N]						
1	1	2,27						
	2	2,64						
	3	3,72						
	4	4,91						
	5	4,09						
	6	2,26						
	7	3,31						

Příloha 13 Tabulka naměřených počátečních hodnot jednosložkového lepidla

jednosložkové lepidlo, stárnutí ve vlhku a v teple										
	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	F [N]	
2. týden	7	43	-	9	57	1096	6	36	4,6	
		44	-		58	2281		37	5,1	
		45	-		59	6702		38	4,4	
		46	416,4		60	572,5		39	3,5	
		47	-		61	17930		40	3,2	
		48	5564		62	3670		41	5,1	
		49	1050		63	824,4		42	4,9	
	8	50	355,7	10	64	694,6	X			
		51	10392		65	1019,5				
		52	264,3		66	107				
		53	172,2		67	2542				
		54	655,1		68	653,6				
		55	167,7		69	1157				
		56	1813		70	203,4				
4. týden	7	43	490,1	9	57	1773	7	43	11	
		44	2361		58	5228		44	6,1	
		45	-		59	25750		45	4,1	
		46	1731		60	2489		46	4,4	
		47	-		61	5453		47	5,9	
		48	-		62	7593		48	4,6	
		49	1050		63	1174		49	4,3	
	8	50	423,3	10	64	813	X			
		51	24312		65	1410				
		52	238,7		66	394				
		53	123,1		67	15122				
		54	877,6		68	985				
		55	227,8		69	1913				
		56	890		70	521				
6. týden	7	43	-	9	57	2760	8	50	-	
		44	-		58	2420		51	-	
		45	-		59	25750		52	-	
		46	-		60	1930		53	1,52	
		47	-		61	11090		54	-	
		48	-		62	7593		55	10,94	
		49	-		63	1760		56	7,51	
	8	50	671,4	10	64	407,4	X			
		51	7650		65	1675				
		52	383		66	490,1				
		53	314		67	10736				
		54	1320		68	1140,3				
		55	488,3		69	2766				
		56	3750		70	954,4				
8. týden	7	43	-	9	57	-	9	57	5,8	
		44	-		58	10924		58	6,9	
		45	-		59	28912		59	7,6	
		46	-		60	6607		60	6,5	
		47	-		61	7067		61	6,4	
		48	-		62	-		62	6,1	
		49	-		63	2342		63	-	
	8	50	-	10	64	382	X			
		51	-		65	2597				
		52	-		66	879				
		53	-		67	10790				
		54	-		68	3375				
		55	-		69	4131				
		56	-		70	1295				
10. týden	7	43	-	9	57	-	10	64	5,6	
		44	-		58	-		65	6,4	
		45	-		59	-		66	6,8	
		46	-		60	-		67	5,6	
		47	-		61	-		68	3,1	
		48	-		62	-		69	4,1	
		49	-		63	-		70	18	
	8	50	-	10	64	1812	X			
		51	-		65	4562				
		52	-		66	-				
		53	-		67	32920				
		54	-		68	2043				
		55	-		69	3427				
		56	-		70	457				

Příloha 14 Tabulka naměřených hodnot pro jednosložkové lepidlo, vlhko + teplo

jednosložkové lepidlo, stárnutí ve vlhku										
	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	F [N]	
2. týden	2	8	171,8	4	22	117,5	2	8	3,51	
		9	241,8		23	72,57		9	1,14	
		10	240,1		24	243,7		10	3,73	
		11	220,9		25	131,7		11	5,23	
		12	231,7		26	138,2		12	0,74	
		13	229,6		27	426,5		13	-	
		14	284,9		28	184,2		14	2,57	
	3	15	558,8	5	29	-	X			
		16	208		30	141,5				
		17	179,5		31	163,3				
		18	125,7		32	188,6				
		19	5629		33	65,18				
		20	575,7		34	9,49				
		21	120,7		35	413,9				
4. týden	2	8	-	4	22	220	3	15	0,25	
		9	-		23	170		16	-	
		10	-		24	674		17	-	
		11	-		25	264		18	3	
		12	-		26	-		19	2,6	
		13	-		27	-		20	-	
		14	-		28	-		21	2,6	
	3	15	175,2	5	29	-	X			
		16	522,8		30	267				
		17	577,5		31	281				
		18	-		32	296				
		19	394		33	150				
		20	561		34	798				
		21	410,8		35	2046				
6. týden	2	8	-	4	22	-	4	22	2,2	
		9	-		23	-		23	2	
		10	-		24	-		24	1,4	
		11	-		25	664		25	-	
		12	-		26	674		26	-	
		13	-		27	1170		27	-	
		14	-		28	620		28	-	
	3	15	-	5	29	-	X			
		16	-		30	647				
		17	-		31	781				
		18	-		32	596				
		19	-		33	650				
		20	-		34	1098				
		21	-		35	2246				
8. týden	2	8	-	4	22	-	4	22	-	
		9	-		23	-		23	-	
		10	-		24	-		24	-	
		11	-		25	664		25	1,63	
		12	-		26	674		26	1,53	
		13	-		27	1170		27	1,87	
		14	-		28	620		28	1,95	
	3	15	-	5	29	-	X			
		16	-		30	647				
		17	-		31	781				
		18	-		32	596				
		19	-		33	650				
		20	-		34	1098				
		21	-		35	2246				
10. týden	2	8	-	4	22	-	5	29	2,7	
		9	-		23	-		30	1,4	
		10	-		24	-		31	1,7	
		11	-		25	-		32	1,1	
		12	-		26	-		33	1,5	
		13	-		27	-		34	1,9	
		14	-		28	-		35	-	
	3	15	-	5	29	2138	X			
		16	-		30	389				
		17	-		31	958				
		18	-		32	316				
		19	-		33	1316				
		20	-		34	578				
		21	-		35	-				

Příloha 15 Tabulka naměřených hodnot pro jednosložkové lepidlo, vlhko

jednosložkové lepidlo, stárnutí v teple										
	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	F [N]	
2. týden	12	78	157,4	14	92	74,13	11	71	-	
		79	-		93	-		72	3,92	
		80	39,69		94	-		73	9,74	
		81	161,3		95	1009,8		74	6,67	
		82	159,8		96	88,2		75	8,48	
		83	142,7		97	440,2		76	7,21	
		84	165,4		98	1924		77	10,15	
	13	85	156,5	15	99	417,3	X			
		86	448		100	277,8				
		87	471,5		101	926,3				
		88	377		102	796,3				
		89	547		103	235,9				
		90	337		104	1686				
		91	-		105	417,2				
4. týden	12	78	171,9	14	92	74,13	12	78	11,2	
		79	-		93	-		79	5,8	
		80	44,23		94	-		80	8,1	
		81	214,8		95	1009,8		81	8,7	
		82	182,9		96	88,2		82	7,7	
		83	165,3		97	440,2		83	-	
		84	186,9		98	1924		84	10,2	
	13	85	175,2	15	99	417,3	X			
		86	522,8		100	277,8				
		87	577,5		101	926,3				
		88	-		102	796,3				
		89	394		103	235,9				
		90	561		104	1686				
		91	410,8		105	417,2				
6. týden	12	78	-	14	92	239,6	13	85	8,6	
		79	-		93	-		86	8,2	
		80	-		94	-		87	5,7	
		81	-		95	1346		88	6,6	
		82	-		96	265,4		89	9,4	
		83	-		97	638,5		90	8,3	
		84	-		98	2025		91	9,1	
	13	85	352,2	15	99	633,1	X			
		86	768,2		100	475,7				
		87	782,1		101	1212				
		88	-		102	1069				
		89	689,5		103	600,4				
		90	804,5		104	-				
		91	644,5		105	665,1				
8. týden	12	78	-	14	92	2185	14	92	11,2	
		79	-		93	576		93	6,75	
		80	-		94	464		94	8,9	
		81	-		95	636		95	8,7	
		82	-		96	-		96	-	
		83	-		97	-		97	-	
		84	-		98	151		98	5,9	
	13	85	-	15	99	647	X			
		86	-		100	-				
		87	-		101	534				
		88	-		102	1078				
		89	-		103	1269				
		90	-		104	424				
		91	-		105	776				
10. týden	12	78	-	14	92	-	15	99	8,4	
		79	-		93	-		100	-	
		80	-		94	-		101	8,1	
		81	-		95	-		102	9,7	
		82	-		96	-		103	10,3	
		83	-		97	-		104	5,5	
		84	-		98	-		105	5,7	
	13	85	-	15	99	765	X			
		86	-		100	-				
		87	-		101	654				
		88	-		102	1153				
		89	-		103	1657				
		90	-		104	460				
		91	-		105	863				

Příloha 16 Tabulka naměřených hodnot pro jednosložkové lepidlo, teplo

dvousložkové lepidlo								
počáteční hodnoty elektrického odporu								
číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]
1	1	34,44	6	36	153,3	11	71	28,61
	2	89,32		37	541,3		72	40,98
	3	93,73		38	450,7		73	114,4
	4	757,2		39	-		74	121,5
	5	60,46		40	164,5		75	156,8
	6	50,92		41	72,27		76	104,51
	7	113,3		42	79,93		77	226,8
2	8	193,1	7	43	137,4	12	78	498,2
	9	206,3		44	80,21		79	144,8
	10	850		45	293,2		80	-
	11	30,78		46	233,6		81	1067,3
	12	145		47	187,4		82	231,1
	13	25,3		48	861,2		83	325,7
	14	26,93		49	572,6		84	567,5
3	15	74,03	8	50	25,27	13	85	79,7
	16	92,85		51	116,6		86	217,5
	17	35,13		52	33,98		87	292
	18	140,1		53	137,3		88	334,7
	19	49,75		54	583		89	527,3
	20	32,11		55	-		90	710,3
	21	42,13		56	91,76		91	403,2
4	22	56,48	9	57	57,9	14	92	-
	23	71,28		58	53,1		93	38,75
	24	52,8		59	726,4		94	496,4
	25	83,47		60	189,5		95	81,4
	26	157,7		61	309,4		96	314,1
	27	1024,4		62	55,18		97	212,3
	28	189,8		63	39,44		98	196,8
5	29	55,81	10	64	41,4	15	99	1062,7
	30	126,8		65	124,6		100	74,96
	31	27,33		66	60,83		101	53,95
	32	83,22		67	119,5		102	32,15
	33	541,7		68	40,65		103	272,5
	34	569,7		69	54,38		104	234,8
	35	84,03		70	101,05		105	34,73
počáteční hodnoty síly potřebné k destrukci spoje								
číslo vzorku	číslo spoje	F [N]						
1	1	24,31						
	2	27,5						
	3	26,32						
	4	27,14						
	5	45,08						
	6	35						
	7	35,05						

Příloha 17 Tabulka naměřených počátečních hodnot dvousložkového lepidla

dvousložkové lepidlo, stárnutí ve vlhku										
	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	F [N]	
2. týden	2	8	1,356	4	22	0,1596	2	8	32,14	
		9	32,84		23	9,883		9	27,75	
		10	61,96		24	0,4505		10	30,92	
		11	0,1539		25	-		11	26,76	
		12	2,287		26	10,83		12	21,23	
		13	0,043		27	-		13	19,09	
	3	14	0,0352	5	28	0,7556	2	14	19,12	
		15	1,33		29	0,1259		X		
		16	15,64		30	59,64				
		17	3,603		31	0,2673				
		18	0,8429		32	22,19				
		19	0,1479		33	12,6				
	20	0,9039	34	54,08						
	4. týden	2	21	0,3324	4	35	5,546	3	15	31,5
8			-	22		0,335	16		17,5	
9			-	23		100,06	17		11,2	
10			-	24		0,823	18		32,5	
11			-	25		73,97	19		6,1	
12			-	26		165,3	20		31,1	
3		13	-	5	27	160,05	2	21	2,9	
		14	-		28	1,58		X		
		15	3,996		29	0,38				
		16	78,82		30	43,871				
		17	3,962		31	3,939				
		18	1,072		32	50,178				
19		1,443	33	9,202						
6. týden		2	20	1,948	4	34	49,769	4	22	11,2
	21		0,3004	35		6,702	23		18,2	
	8		-	22		0,258	24		22,8	
	9		-	23		9,586	25		15,4	
	10		-	24		0,761	26		19,4	
	11		-	25		-	27		18,6	
	3	12	-	5	26	-	2	28	16,4	
		13	-		27	-		X		
		14	-		28	22,7				
		15	-		29	0,263				
		16	-		30	55,91				
		17	-		31	49,53				
	18	-	32	47,82						
	8. týden	2	19	-	4	33	-	4	22	14,81
20			-	34		48,45	23		12,47	
21			-	35		21,34	24		10,92	
8			-	22		-	25		19,5	
9			-	23		-	26		-	
10			-	24		-	27		-	
3		11	-	5	25	-	2	28	-	
		12	-		26	1098		X		
		13	-		27	23446				
		14	-		28	-				
		15	-		29	-				
		16	-		30	41553				
17		-	31	41457						
10. týden		2	18	-	4	32	91886	5	29	8,79
	19		-	33		69328	30		12,4	
	20		-	34		31036	31		10,7	
	21		-	35		-	32		9,1	
	8		-	22		-	33		7,5	
	9		-	23		-	34		8,6	
	3	10	-	5	24	-	2	35	-	
		11	-		25	-		X		
		12	-		26	-				
		13	-		27	-				
		14	-		28	-				
		15	-		29	36518				
	16	-	30	83201						
	3	17	-	5	31	-	2	X		
18		-	32		75591					
19		-	33		40514					
20		-	34		39325					
21		-	35		54725					

Příloha 18 Tabulka naměřených hodnot pro dvousložkové lepidlo, vlhko

dvousložkové lepidlo, stárnutí ve vlhku a v teple										
	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	F [N]	
2. týden	7	43	14,24	9	57	1,13	6	36	52,5	
		44	18,71		58	0,2		37	49,1	
		45	5,88		59	4,06		38	38,2	
		46	4,74		60	0,99		39	37,6	
		47	4,88		61	14,3		40	26,3	
		48	24,13		62	0,92		41	21,7	
	8	49	18,5	10	63	0,35		42	17,1	
		50	0,39		64	0,14				
		51	9,42		65	8,35				
		52	0,34		66	0,16				
		53	0,34		67	8,81				
		54	20,05		68	0,12				
	4. týden	7	55	14,22	9	69	1,9	7	43	20
			56	72,78		70	24,85		44	32
43			16,67	57		4,12	45		32,9	
44			50,39	58		0,59	46		32,6	
45			12,51	59		5,15	47		29,8	
46			31,82	60		2,97	48		19,1	
8		47	14,75	10	61	13,11		49	36,2	
		48	28,83		62	2,18				
		49	19,24		63	1,13				
		50	3,03		64	5,08				
		51	9,02		65	12,01				
		52	4,06		66	1,6				
6. týden		7	53	6,36	9	67	12,21	8	50	39,3
			54	46,37		68	1,45		51	29,1
	55		31,26	69		7,89	52		28,7	
	56		6,32	70		7,38	53		35,3	
	43		-	57		7,33	54		18,4	
	44		-	58		0,86	55		22,3	
	8	45	-	10	59	12,9		56	23,1	
		46	-		60	23				
		47	-		61	7,52				
		48	-		62	8,04				
		49	-		63	21,66				
		50	3,93		64	4,47				
	8. týden	7	51	4,16	9	65	11,41	9	57	29,8
			52	2,14		66	12,21		58	27,5
53			9	67		16,41	59		25,1	
54			46,37	68		1,49	60		28,7	
55			31,26	69		28,74	61		23,4	
56			-	70		3,52	62		28,2	
8		43	-	10	57	7,08		63	27,5	
		44	-		58	56,62				
		45	-		59	34,91				
		46	-		60	14,02				
		47	-		61	29,11				
		48	-		62	1,41				
10. týden		7	49	-	9	63	23,12	10	64	32,7
			50	-		64	8,31		65	26,8
	51		-	65		-	66		21,6	
	52		-	66		2,41	67		24,9	
	53		-	67		13,73	68		28,3	
	54		-	68		14,32	69		28,2	
	8	55	-	10	69	35,58		70	27,2	
		56	-		70	6,58				
		43	-		57	-				
		44	-		58	-				
		45	-		59	-				
		46	-		60	-				
	8	47	-	10	61	-		64	32,7	
		48	-		62	-		65	26,8	
49		-	63		-	66		21,6		
50		-	64		22,32	67		24,9		
51		-	65		48,58	68		28,3		
52		-	66		9,97	69		28,2		
8	53	-	10	67	14,56		70	27,2		
	54	-		68	18,85					
	55	-		69	23,53					
	56	-		70	16,26					

Příloha 19 Tabulka naměřených hodnot pro dvousložkové lepidlo, vlhko + teplo

dvousložkové lepidlo, stárnutí v teple									
	2. týden	4. týden	6. týden	8. týden	10. týden				
číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	F [N]	
12	78	994,7	14	92	6448	11	71	33,2	
	79	913,9		93	4634		72	21,8	
	80	21850		94	2561		73	40,5	
	81	10085		95	16270		74	38,1	
	82	2648		96	1740		75	42,1	
	83	733,4		97	661,7		76	27,6	
	84	4306		98	3261		77	42,3	
13	85	156,4	15	99	6602	X			
	86	2415		100	259,3				
	87	1293		101	214,5				
	88	3721		102	108,7				
	89	1430		103	6844				
	90	3075		104	5012				
	91	2477		105	1626				
12	78	5998	14	92	18460	12	78	24,2	
	79	1276		93	7025		79	23,5	
	80	175,5		94	3313		80	43,1	
	81	9586		95	29910		81	46,6	
	82	4545		96	1992		82	24,6	
	83	933		97	1029		83	56,6	
	84	10088		98	8496		84	33,7	
13	85	403	15	99	7676	X			
	86	4758		100	487				
	87	1545		101	474				
	88	12780		102	296				
	89	21060		103	8675				
	90	4077		104	11960				
	91	3387		105	3190				
12	78	-	14	92	10960	13	85	37,5	
	79	-		93	8450		86	32,6	
	80	-		94	1920		87	32,5	
	81	-		95	29910		88	36	
	82	-		96	2170		89	34,65	
	83	-		97	1190		90	36,21	
	84	-		98	9160		91	31,9	
13	85	459,9	15	99	7690	X			
	86	6026		100	440				
	87	1814		101	420				
	88	12660		102	290				
	89	21060		103	8580				
	90	4560		104	19350				
	91	5607		105	4350				
12	78	-	14	92	5251	14	92	36,4	
	79	-		93	1380		93	33,8	
	80	-		94	2279		94	37,7	
	81	-		95	29910		95	28,6	
	82	-		96	5960		96	39,2	
	83	-		97	9059		97	34,7	
	84	-		98	3605		98	20,4	
13	85	-	15	99	5918	X			
	86	-		100	24080				
	87	-		101	4835				
	88	-		102	263				
	89	-		103	8675				
	90	-		104	11817				
	91	-		105	3190				
12	78	-	14	92	-	15	99	70,2	
	79	-		93	-		100	56,8	
	80	-		94	-		101	29,8	
	81	-		95	-		102	24,6	
	82	-		96	-		103	2,3	
	83	-		97	-		104	28,6	
	84	-		98	-		105	32,5	
13	85	-	15	99	6650	X			
	86	-		100	12446				
	87	-		101	6270				
	88	-		102	5420				
	89	-		103	6657				
	90	-		104	8412				
	91	-		105	12528				

Příloha 20 Tabulka naměřených hodnot pro dvousložkové lepidlo, teplo

pájecí slitina								
počáteční hodnoty elektrického odporu								
číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]
1	1	9,012	6	36	8,262	11	71	8,447
	2	8,383		37	8,773		72	8,239
	3	8,517		38	7,049		73	8,671
	4	6,654		39	8,097		74	8,249
	5	8,714		40	8,63		75	7,846
	6	7,657		41	8,579		76	5,792
	7	8,854		42	8,68		77	8,365
2	8	9,31	7	43	8,398	12	78	8,375
	9	8,337		44	8,404		79	8,311
	10	8,982		45	9,053		80	8,608
	11	8,34		46	7,235		81	8,623
	12	8,263		47	8,487		82	8,235
	13	8,307		48	8,973		83	8,834
	14	8,702		49	8,837		84	8,847
3	15	8,794	8	50	8,735	13	85	7,892
	16	9,031		51	8,636		86	8,568
	17	8,727		52	8,51		87	8,173
	18	8,713		53	8,261		88	8,613
	19	8,028		54	8,395		89	8,852
	20	8,556		55	9,118		90	8,121
	21	9,091		56	8,207		91	9,437
4	22	8,832	9	57	8,253	14	92	8,496
	23	7,136		58	8,247		93	8,603
	24	7,831		59	8,251		94	7,792
	25	7,907		60	8,523		95	8,623
	26	8,37		61	8,51		96	8,116
	27	8,695		62	8,318		97	8,762
	28	7,14		63	8,603		98	8,806
5	29	8,291	10	64	9,743	15	99	8,037
	30	7,855		65	9,465		100	8,603
	31	8,543		66	9,138		101	9,16
	32	8,94		67	8,652		102	8,317
	33	9,301		68	8,241		103	8,521
	34	9,327		69	8,576		104	8,923
	35	9,422		70	9,002		105	8,675
počáteční hodnoty síly potřebné k destrukci spoje								
číslo vzorku	číslo spoje	F [N]						
1	1	100,4						
	2	80,01						
	3	85,31						
	4	93,72						
	5	89,2						
	6	81,2						
	7	100,03						

Příloha 21 Tabulka naměřených počátečních hodnot jednosložkového lepidla

pájecí slitina, stárnutí ve vlhku a v teple									
	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	F [N]
2. týden	7	43	8,052	9	57	8,047	6	36	75,24
		44	8,416		58	8,323		37	72,13
		45	8,745		59	8,564		38	165,4
		46	8,268		60	8,761		39	72,3
		47	7,947		61	7,659		40	144,81
		48	8,862		62	8,27		41	65,84
		49	8,219		63	8,25		42	150,12
	8	50	8,567	10	64	9,82	X		
		51	8,486		65	8,82			
		52	8,287		66	8,87			
		53	8,115		67	8,29			
		54	-		68	8,25			
		55	9,044		69	8,79			
		56	7,743		70	8,17			
4. týden	7	43	8,905	9	57	9,346	7	43	61,5
		44	7,931		58	8,292		44	83
		45	9,593		59	9,42		45	64
		46	8,176		60	9,011		46	71
		47	9,106		61	8,902		47	65,2
		48	9,414		62	8,832		48	73,3
		49	8,985		63	9,754		49	67,5
	8	50	9,03	10	64	9,374	X		
		51	8,782		65	9,039			
		52	9,447		66	9,582			
		53	8,229		67	9,384			
		54	8,837		68	8,479			
		55	8,924		69	9,311			
		56	8,135		70	8,827			
6. týden	7	43	-	9	57	9,263	8	50	61,9
		44	-		58	9,465		51	72,5
		45	-		59	9,85		52	61,8
		46	-		60	9,345		53	83,2
		47	-		61	9,663		54	49,1
		48	-		62	10,313		55	57,5
		49	-		63	10,589		56	67,8
	8	50	9,913	10	64	9,629	X		
		51	9,397		65	10,096			
		52	9,382		66	9,495			
		53	9,472		67	9,733			
		54	9,518		68	8,935			
		55	10,702		69	9,675			
		56	9,637		70	10,724			
8. týden	7	43	-	9	57	9,535	9	57	81,7
		44	-		58	9,414		58	51,3
		45	-		59	9,78		59	53,4
		46	-		60	9,513		60	64,3
		47	-		61	9,563		61	65,1
		48	-		62	10,411		62	76,1
		49	-		63	10,621		63	51,5
	8	50	-	10	64	10,07	X		
		51	-		65	9,804			
		52	-		66	10,2			
		53	-		67	10,01			
		54	-		68	9,946			
		55	-		69	10,63			
		56	-		70	9,759			
10. týden	7	43	-	9	57	-	10	64	61,7
		44	-		58	-		65	59,8
		45	-		59	-		66	54,2
		46	-		60	-		67	65
		47	-		61	-		68	52,3
		48	-		62	-		69	79,7
		49	-		63	-		70	66,2
	8	50	-	10	64	11,079	X		
		51	-		65	11,36			
		52	-		66	9,61			
		53	-		67	9,35			
		54	-		68	9,42			
		55	-		69	9,26			
		56	-		70	10,21			

Příloha 22 Tabulka naměřených hodnot pro pájecí slitinu, vlhko + teplo

pájecí slitina, stárnutí ve vlhku										
	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	F [N]	
2. týden	2	8	8,807	4	22	8,512	2	8	89,64	
		9	8,622		23	8,423		9	80,94	
		10	8,365		24	7,946		10	86,37	
		11	7,324		25	8,026		11	69,91	
		12	7,934		26	8,462		12	63,27	
		13	8,264		27	8,389		13	70,03	
		14	7,012		28	8,365		14	100,03	
	3	15	8,781	5	29	8,348	X			
		16	8,97		30	8,386				
		17	9,136		31	9,212				
		18	8,808		32	8,453				
		19	8,575		33	9,138				
		20	8,546		34	9,023				
		21	8,713		35	9,447				
4. týden	2	8	-	4	22	9,237	3	15	78,1	
		9	-		23	8,816		16	90	
		10	-		24	8,869		17	68,2	
		11	-		25	8,619		18	72,4	
		12	-		26	9,109		19	70	
		13	-		27	8,429		20	65,2	
		14	-		28	9,212		21	61,9	
	3	15	9,419	5	29	8,412	X			
		16	9,064		30	8,34				
		17	9,563		31	9,473				
		18	9,228		32	9,122				
		19	9,155		33	9,329				
		20	9,597		34	9,762				
		21	9,157		35	9,853				
6. týden	2	8	-	4	22	10,306	4	22	70,1	
		9	-		23	9,983		23	73,4	
		10	-		24	9,39		24	80,4	
		11	-		25	9,868		25	69,5	
		12	-		26	9,204		26	64,3	
		13	-		27	9,198		27	62,9	
		14	-		28	10,317		28	79,2	
	3	15	-	5	29	8,987	X			
		16	-		30	10,279				
		17	-		31	9,884				
		18	-		32	9,817				
		19	-		33	9,58				
		20	-		34	10,73				
		21	-		35	10,441				
8. týden	2	8	-	4	22	10,32	4	22	77,8	
		9	-		23	10,01		23	65,3	
		10	-		24	9,49		24	68,6	
		11	-		25	10,12		25	71,3	
		12	-		26	9,54		26	-	
		13	-		27	9,22		27	-	
		14	-		28	10,32		28	-	
	3	15	-	5	29	9,19	X			
		16	-		30	10,28				
		17	-		31	9,93				
		18	-		32	9,86				
		19	-		33	9,71				
		20	-		34	10,79				
		21	-		35	10,54				
10. týden	2	8	-	4	22	-	5	29	58,7	
		9	-		23	-		30	61,2	
		10	-		24	-		31	65,8	
		11	-		25	-		32	71,7	
		12	-		26	-		33	76,1	
		13	-		27	-		34	83,4	
		14	-		28	-		35	77,6	
	3	15	-	5	29	9,07	X			
		16	-		30	9,43				
		17	-		31	9,91				
		18	-		32	9,92				
		19	-		33	11,01				
		20	-		34	10,86				
		21	-		35	10,18				

Příloha 23 Tabulka naměřených hodnot pro pájecí slitinu, vlhko

pájecí slitina, stárnutí v teple	2. týden	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	odpor [mΩ]	číslo vzorku	číslo spoje	F [N]
		12	14	11	78	8,312	92	7,447	71	72
	79				8,962	93	7,915	73		77,35
	80				8,671	94	8,642	74		97,4
	81				8,885	95	8,224	75		112,65
	82				8,481	96	8,247	76		63,8
	83				8,504	97	8,534	77		78,25
	13	15		84	8,906	98	7,934			90,84
				85	8,411	99	8,864			
				86	9,037	100	8,737			
87				8,462	101	8,846				
88				8,641	102	8,613				
89				8,812	103	8,361				
4. týden	12	14	12	90	8,872	104	8,324			
				91	9,033	105	8,903			
				78	8,86	92	9,643	78	99,4	
				79	8,661	93	8,368	79	94,3	
				80	9,934	94	8,282	80	61,8	
				81	9,536	95	9,456	81	80,9	
	13	15		82	8,709	96	8,317	82	71,1	
				83	7,745	97	9,413	83	70,5	
				84	9,402	98	9,533	84	86,6	
				85	9,599	99	9,914			
86				9,656	100	9,864				
87				9,571	101	8,997				
5. týden	12	14	13	88	8,298	102	8,734			
				89	9,481	103	8,486			
				90	8,426	104	9,789			
				91	9,533	105	8,887			
				78	-	92	9,935	85	73,2	
				79	-	93	9,995	86	87,3	
	13	15		80	-	94	9,531	87	67,4	
				81	-	95	10,047	88	70,1	
				82	-	96	8,76	89	55,3	
				83	-	97	9,439	90	68,2	
84				-	98	10,021	91	64,9		
85				9,443	99	9,241				
8. týden	12	14	14	86	9,166	100	9,335			
				87	9,975	101	9,599			
				88	9,338	102	10,127			
				89	9,088	103	9,264			
				90	10,427	104	9,547			
				91	9,113	105	10,354			
	13	15		78	-	92	9,631	92	73,2	
				79	-	93	9,301	93	87,3	
				80	-	94	9,697	94	67,4	
				81	-	95	9,564	95	70,1	
82				-	96	9,451	96	55,3		
83				-	97	10,093	97	68,2		
10. týden	12	14	15	84	-	98	9,37	98	64,9	
				85	-	99	9,37			
				86	-	100	9,249			
				87	-	101	9,074			
				88	-	102	10,174			
				89	-	103	9,358			
13	15		90	-	104	9,552				
			91	-	105	9,954				
			78	-	92	-	99	39,6		
			79	-	93	-	100	69,7		
			80	-	94	-	101	84,6		
			81	-	95	-	102	74,8		
10. týden	12	14	15	82	-	96	-	103	77,2	
				83	-	97	-	104	57,6	
				84	-	98	-	105	62,1	
				85	-	99	10,58			
				86	-	100	10,92			
				87	-	101	8,6			
13	15		88	-	102	9,84				
			89	-	103	9,2				
			90	-	104	9,53				
			91	-	105	9,62				

Příloha 24 Tabulka naměřených hodnot pro pájecí slitinu, teplo