

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Marek Lauko**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Degradace elektricky vodivých lepidel**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište strukturu a vlastnosti elektricky vodivých lepidel a uveďte metody jejich nanášení.
2. Diskutujte vlivy okolního prostředí na vlastnosti lepených elektricky vodivých lepidel.
3. Vytvořte sadu vzorků s lepenými vodivými spoji a sledujte elektrické a mechanické vlastnosti spojů v závislosti na klimatickém namáhání.

Seznam odborné literatury:

- [1] PIETRIKOVÁ A., ĎURIŠIN J., MACH P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálův pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010
- [2] LICARI, J. J, SWANSON, D. W.: Adhesives Technology for Electronic Applications, 2011 Elsevier, ISBN: 978-1-4377-7889-2
- [3] EBNESAJJAD S.: Handbook of Adhesives and Surface Preparation – Technology, Applications and Manufacturing, ISBN: 978-1-4377-4461-3

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

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

L.S.

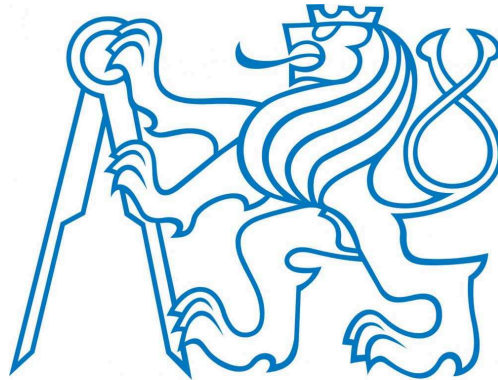
doc. Ing. Pavel Mach, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 11. 3. 2014

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

DEGRADACE ELEKTROVODIVÝCH LEPIDEL

ANOTACE

Předkládaná bakalářská práce se zabývá degradací elektrovedivých lepidel. Je popsána struktura, vlastnosti a metody jejich nanášení. Diskutuje o vlivech okolního prostředí na vlastnostech elektricky vodivých lepidel.

V praktické části je zhotovena sada vzorků s lepenými vodivými spoji, která je podrobena klimatickým namáháním. Vzorky byly podrobeny testům pro ověření elektrických a mechanických vlastností v závislosti na délce namáhání.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektricky vodivé lepidlo, spoj, metody nanášení, degradace, struktura spoje

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with degradation of conductive adhesives. It also describes structure, attributes and methods of their application and debates about influence of ambient on attributes of electrically conductive adhesives.

In the practical part there is a set of samples with bonded conductive connections, which is subjected to climatic strain. The samples were tested for verification of electrical and mechanical attributes depending on the length of strain.

KEY WORDS

Electrically conductive adhesive, connection, deposition methods, degradation, interconnect structure

Poděkování

Děkuji vedoucí práce Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové Ph.D. za pomoc, vedení a zabezpečení pracovních podmínek. Za cenné rady a vytvoření příjemného pracovního prostředí.

Dále bych poděkoval panu Doc.Ing. Janu Kubovi CSc., za věcné připomínky do problematiky laboratorních pokusů s elektricky vodivými lepidly a panu Ing. Pavlu Hrzinovi Ph.D. za rady pro zpracování naměřených hodnot.

Nakonec bych rád poděkoval svým rodičům a své přítelkyni Veronice Kudrnové za oporu a vytvoření podmínek pro vypracování této práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám a použil jsem podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis

OBSAH

Poděkování	3
Prohlášení	4
Zadání bakalářské práce	5
OBSAH	6
1 Úvod do propojování	8
1.1 Elektrické spoje	8
1.2 Ekologické omezení	9
1.2.1 Náhrada olova	9
2 Elektrovodivá lepidla	11
2.1 Struktura	11
2.1.1 Vazební složka	11
2.1.1.1 Reaktoplasty:	12
2.1.1.1.1 Epoxidové pryskyřice (EP)	13
2.1.1.1.2 Silikonové pryskyřice	15
2.1.1.2 Termoplasty:	16
2.1.1.2.1 Polyamidy	16
2.1.2 Vodivostní složka	17
2.1.2.1 Odpor elektricky vodivého lepidla a jeho zlepšení	18
2.2 Nanášení elektricky vodivých lepidel	21
2.2.1 Dispenzní nanášení	22
2.2.2 Nanášení hrotem	23
2.2.3 Sítotisk / Šablonový tisk	23
2.3 Porovnání elektrovodivých lepidel s pájkami	25
3 Vlivy okolního prostředí na vlastnosti vodivých lepidel	27

3.1 Úvod do namáhání	27
3.2 Namáhání elektricky vodivého spoje	28
3.2.1 Namáhání teplem	28
3.2.2 Namáhání mrazem	29
3.2.3 Namáhání vlhkem	29
3.2.4 Kombinované namáhání	29
4 Sada vzorků	30
4.2 Výroba vzorků	31
4.3 Měření	32
5 Zhodnocení výsledků	33
5.1 Vliv klimatického namáhání na odpor	33
5.2 Vliv klimatického namáhání na pevnost kontaktu	34
5.3 Závěr	36
6 Použitá literatura	38
7 Přílohy	39
7.1 Tabulky naměřených hodnot	39

1 Úvod do propojování

V dnešní době je nejvíce rozšířeným průmyslem elektrovýroba. Z hlediska nároků na cenu, rychlost výroby a použití materiálů, se klade čím dál větší důraz na samotné technologie propojování.

Nejvíce problematickou částí propojování jsou použité materiály. Používané materiály musí splňovat hned několik kritérií :

- Pevnost
- Chemickou stálost
- Odolnost proti klimatickým změnám
- Ohled na ekologii
- Výborná elektrická vodivost

Dále se dá do těchto kritérií zařadit rozměry daného spoje, které potřebuje tento materiál ke splnění všech těchto požadavků zejména pevnost a elektrická vodivost.

1.1 Elektrické spoje

Elektrické spoje se dají rozdělit na dvě hlavní skupiny:

- Mechanické
- Metalurgické

Mechanickými se zejména myslí použití různých konektorů a kontaktů, které jsou buď rozebíratelné nebo nerozebíratelné.

Metalurgické jsou spoje svařované nebo pájené. Kde vznikají vazby částic spojovaných materiálu na fyzikální úrovni vlivem :

- Tlaku (Tlakové svařování)
- Teploty (Tavné svařování)
- Času (Difuzní svařování)

1.2 Ekologické omezení

Ze vzrůstající výrobou elektropřístrojů a elektroniky vzrůstají požadavky na ekologii. A to nejen na ekologii používaných materiálů, ale také ekologie výroby, aplikace a následné recyklace výrobků.

Direktiva (2002/95/EC) vydaná Evropskou komisí dne 27.ledna 2003 byla rozšířena o směrnici RoHS (The **Restriction of Hazardous Substances Directive**) platná od 1. července 2006. Tuto směrnici musí dodržovat všechny členské státy EU.

Vlivem světového obchodu dodržují tuto směrnici i země mimo EU jako je Čína nebo Jižní Korea, či jiné státy, které chtějí vyvážet své výrobky do zemí EU.

RoHS omezuje obsah hlavních 6 látek :

- Rtuť
- Kadmium
- Olovo
- Šestimocný chróm
- Polybromované bifenyly
- Polybromované difenylethy

U těchto látek směrnice stanovuje přípustný podíl kadmia na 0,01% a u ostatních látek na 0,1% ve výrobních materiálech. Tato omezení mají výjimky u materiálu, které se bez těchto látek nedají vyrobit, například slitiny hliníku, výroba skla, pájek a akumulátorů. V těchto odvětvích se ovšem usiluje o nahrazování alternativními materiály, které jsou ovšem bržděny vysokou cenou použitých materiálů nebo podstatně horšími požadovanými vlastnostmi. Proto v aplikaci kladených na vysokou spolehlivost a kvalitu, jako je lékařství, armáda, vesmírný program, jsou tyto látky povoleny v neomezeném množství.

1.2.1 Náhrada olova

Jelikož směrnice omezuje jeden z hlavních materiálů používaný právě v technologiích propojování - Olovo, bylo nutné nalézt kvalitní náhradu a aplikovat je v co nejrychlejším možném čase do výroby montáže a propojování v

elektrotechnických zařízení.

V současné situaci jsou využívány hlavní dvě náhrady propojování - bezolovnaté pájky a ve specifických a nutných případech elektricky vodivá lepidla. Tyto technologie se liší velkou různorodostí spolehlivosti a aplikovatelnosti. Bezolovnaté pájky jsou založeny na binárních až terciálních slitinách povolených kovů. Problém s náhradou za olovo je v teplotách, při kterých se pájka nebo pasta taví. Teplota tavení je řádově posunuta o více jak 100°C a více. To omezuje využitelnost pájek a past, kde nemůže být tak vysoká teplota použita.

2 Elektrovodivá lepidla

Elektrovodivá lepidla jsou jednou ze dvou možných variant vedle bezolovnatých pájek náhrady za olovnaté pájky. Za poměrně krátkou dobu vývoje máme nepřeberné množství druhů a podruhů vodivých lepidel. Odlišující se jak v chemických vlastnostech, tak fyzických vlastnostech po vytvrzení, nebo s odlišným procesem vytvrzováním teplem či UV zářením s různými dobami dotvrzování.

2.1 Struktura

Základem elektrovodivých lepidel jsou izolační matrice a vodivé částice. Izolační matrice je spojitá složka, která slouží jako pojivo a zároveň chrání vodivé částice. Tedy matrice spadají do složky vazební a vodivé částice do složky vodivé.

2.1.1 Vazební složka

Vazební složku tvoří izolační matrice. Jelikož vazební složka je kompozit, nejčastěji se používá polymerních matric, které se dají rozdělit na reaktoplastické nebo termoplastické. Nejpoužívanější matrice jsou epoxidové pryskyřice (EP), polyamidové pryskyřice (PA) nebo silikonové pryskyřice.

Směsi vazebních složek mají pro masovou výrobu, jako jsou různé nanášecí či injekční technologie, specifické nároky na kinetiku vytvrzovacích procesů. Snaha pro co nejlepší smáčivost, která je u spojů tohoto typu velmi důležitá, neboť udává schopnost povrchu vytvářet slitiny na rozhraní základního materiálu a lepidla (přímo souvisí s povrchovým napětím lepidla), pro zajištění dobrých povrchových, elektrických a mechanických vlastností spoje. Aby bylo dosaženo těchto vlastností, smáčivost musí být stálá až do vytvrzení matrice. Smáčivost ovlivňuje především viskozita samotné pryskyřice.

Dalším nárokem je co nejkratší doba potřebná k dokonalému vytvrzení polymeru (co nejrychlejší chemická reakce) a zároveň omezit co nejvíce množství zdravotně závadných těkavých látek. Trend omezování těchto látek vede ke snaze úplného odstranění z procesu výroby, což vede ke zdražování lepidel.

Po stránce ekologické se usiluje o co nejlepší recyklovatelnost kompozitů, která vede k nahrazování termoplasty namísto reaktoplastů (zejména levnějšími polyamidy). Další nespornou výhodou termoplastů je větší chemická odolnost a houževnatost.

Hlavním ukazatelem pro výběr pryskyřice je:

- Houževnatost
- Pevnost
- Tepelná odolnost
- Hořlavost
- Chemická odolnost
- Navlhavost
- UV rezistivita

Po technologické stránce se klade důraz na:

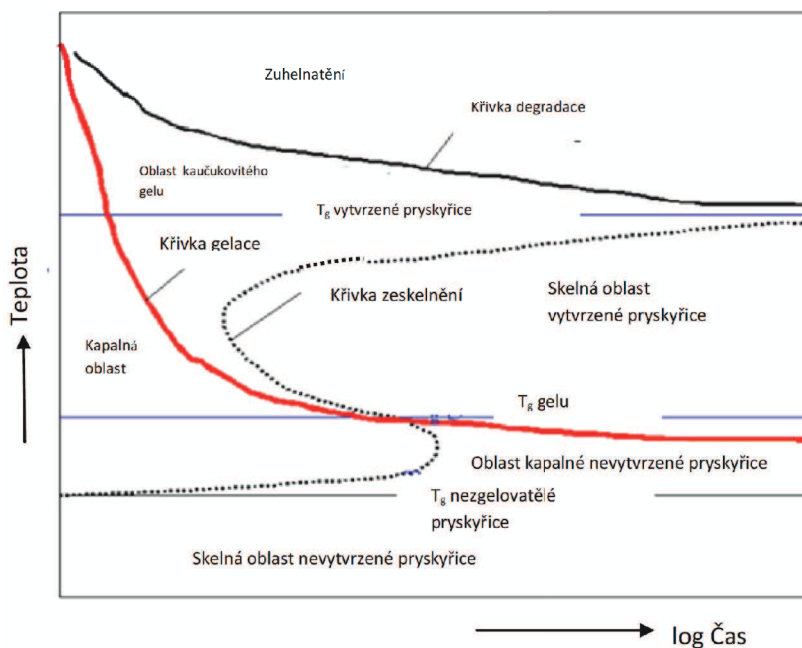
- Viskozitu
- Smáčivost
- Přílnavost
- Reakční rychlost
- Obsah těkavých složek

2.1.1.1 Reaktoplasty:

Jako pan Ing. Zdeněk Kořínek, Csc¹. ve své práci popisuje: Vytvrzování reaktoplastů je proces vedoucí k vytvoření prostorové makromolekuly s nekonečnou molární hmotností a probíhá při teplotě rychlostí závislou na druhu pryskyřice a typu tvrdidla. Některé technologie vyžadují, aby byla zkrácena doba vytvrzování za studena, a proto se do kompozitů přidávají urychlovače.

Velmi důležitou charakteristikou vytvrzování procesu je tzv. doba gelace (želatinace), po jejímž uplynutí se viskózní pryskyřice změní v elastickou tuhou hmotu s malým modulem pružnosti (kaučukové chování). Po této reakci již pryskyřice ztrácí schopnost protékat, vzlínat a zabraní pohybu vodivostní složky.

¹ Práce o matricích a pryskyřicích, Ing. ZDENĚK KOŘÍNEK, Csc. Dostupná z <http://mujweb.cz/zkorinek/matrice.pdf>



Obr. č.1 Diagram TTT ("Time-Temperature-Transformation"), (převzato z [1])

2.1.1.1 Epoxidové pryskyřice (EP)

Epoxidové pryskyřice jsou při pokojové teplotě v kapalném stavu. Tento stav lze měnit přidáním aromatických tvrdidel a anhydridy, které umožní být v pevném stavu. Z termoplastů mají největší využití díky rozsahu vlastností v závislosti na chemické struktuře a modifikovatelnosti příměsí. Vyzdvihovaná oproti ostatním reaktoplastům je také díky houževnatosti, odolnosti proti únavě a tečení, dobré přilnavosti a slušná teplotní a chemická odolnost, elasticnost a malý faktor smrštění po vytvrzení. Kvůli přítomnosti hydroxylových skupin jsou navlhavé, což je problém pokud se nachází ve vlhkém a mokřém prostředí. Díky této vlastnosti musíme počítat se sníženou teplotní odolností. Nejvýstižnější popis epoxidů má Ing. Zdeněk Kořínek, Csc. ,kde podle molekulové hmotnosti se jedná o kapaliny až tuhé látky nelepivého charakteru. Jejich vytvrzovací reakce u EP je pomalé stupňovité povahy, takže nevznikají problémy vytvrzovacích procesů s exotermickou povahou. Při vytvrzování se netvoří dutinky (bublíny) vlivem neuvolňujících se vedlejších produktů. V momentu kdy potřebujeme zrychlit vytvrzovací proces, lze použít urychlovačů např. BDMA - "benzyl dimethylamin". Nejčastěji používanější epoxidovou pryskyřicí je glycidylether bisfenolu A např. DGEBA "diglycidylether BPA".

Vliv tvrdidla na technologické parametry a teplotní odolnost epoxidové pryskyřice **DGEBPA** uvádí následující tabulka z práce pana Ing. Zdeňka Kořínka, Csc.

Tvrdidlo	Poměr na 100 dílů EP	Teplota vytvrzování °C	Doba vytvrzovací hod	Skladovatelnost (25°C), hod	Teplota tvarové stálosti °C
Alifatické aminy					
DTA	12	25	dny	1/4 - 1/2	124
TETA	14	25	dny		124
Polyamidy	30-50	25	dny	2-3	55
Cycloalifatické aminy					
DEAPA	8	115	-		100
AEP	20	60	3		110
MPDA	14	80/150	2		150
MDA	28	80/150	2		160
DDS+B3FMA	30	125/200	2	5 - 6	175
Eutektická směs	20	80/150	2		145
Anhydridy					
HHPA+BDMA	78	90/150	3	24	132
NMA+BMDA	90	120/150	3	60-80	144
DDS+BDMA	134	90/150		120	74
CA	117	25/150	3	0	197
Lewisova tvrdidla	6	120/200	4	250	174
Kyanamidy (DICY)	6	175	1		135

Tabulka č. 1, (převzato z [1])

2.1.1.1.2 Silikonové pryskyřice

Silikony jsou všeobecně známou hmotou díky použití v domácnosti, jako jsou například koupelny, akvária nebo kuchyně. Avšak mluvíme o silikonech, které vulkanizují na silikonovou pryž, nebo můžeme také říct silikonové kaučuky. Pokud se budeme bavit o silikonové pryskyřici jakožto reaktoplastu, musíme si uvést jejich rozdíly.

Silikony se připravují takzvanou kohydrolyzou dvojfunkčních monomerů s přídavkem monofunkčních terminačních monomerů. Kombinací dvojfunkčních monomerů s trojfunkčními, vzniká rozvětvená až zasíťovaná silikonová pryskyřice. Silikony můžeme snadno rozdělit do skupin podle poměru organických radikálů ke křemíku:

- silikonové oleje (poměr radikálů/křemíku je větší než 2)
- silikonové kaučuky (poměr je rovný 2)
- silikonové pryskyřice (poměr je menší než 2)

Silikony všeho druhu mají společné vlastnosti, které je tak charakterizují. Jedna z prvních je výborná tepelná odolnost (300°C až 600°C krátkodobě), která spočívá v jejich vazbě (Si - O - Si), kde vazba Si - O má vyšší energii (373 kJ mol⁻¹), než má vazba C - C (352 kJ mol⁻¹). Mnohé fyzikální veličiny mají malou závislost na teplotě. Dále mají silikony výborné elektroizolační vlastnosti a velmi malé povrchové napětí. Nevýhoda těchto pryskyřic spočívá v malé pevnosti v tahu.

2.1.1.2 Termoplasty:

Termoplasty jsou plastické materiály, které mají určitou teplotní oblast v které je dobře tvárný (plastický) až kapalný a tuto vlastnost si zachovávají opakovaně. Po ochlazení hmoty se změní zpět do pevného stavu, ve kterém se nacházel při zahřátí. Těmito vlastnostmi se výrazně liší u výše zmíněných reaktoplastů, proto po termickém vytvrzení proběhne nevratná chemická reakce a již je nelze nijak opakovaně tepelně tvarovat. Tyto termoplastické vysokomolekulové polymery jsou složeny z lineárních makromolekul s dlouhými řetězci. Makromolekuly mají různé délky a proto nelze přímo definovat přesnou teplotu tání. Proto tyto teploty určíme v přibližném rozsahu, kde se bude vyskytovat bod tání. U běžných termoplastů se teplota tání uvádí okolo 100°C až 130°C, ale jsou i termoplasty např. ABS, PTFE (teflon), kde teplota tání u ABS je 220°C až 270°C a dokonce u teflonu jakožto technologického fluoroplastu je přibližná teplota tání až od 327°C. Molekuly jsou mezi sebou vázány slabými van der Waalsovými silami (např. polyetylén), dále silnějšími interakcemi dipól-dipól (např. nylon) a vodíkovými můstky.

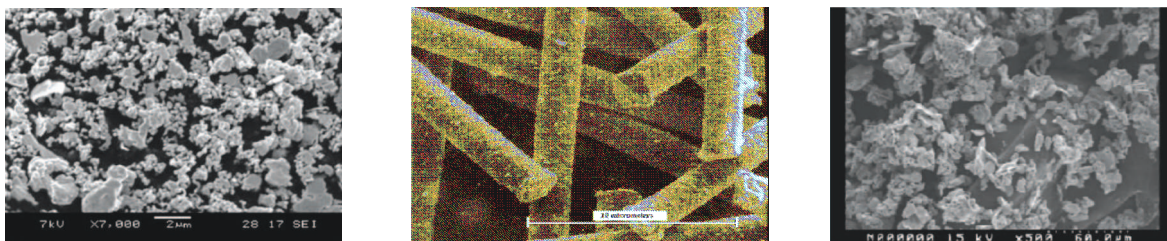
2.1.1.2.1 Polyamidy

Polyamidy se dělí na Alifické polyamidy a Aromatické polyamidy. Alifické polyamidy se získávají polykondenzační reakcí. **Aromatické polyamidy** označované jako **Aramidy** se získávají polykondenzací chloridů aromatických dikarboxylových kyselin a aromatických diaminů. Tyto plasty se vyznačují výjimečnou tepelnou rezistencí, kde bod tání převyšuje 400°C, odolností proti chemikáliím a vůči hoření, dále obrovskou houževnatostí v tahu (např. Kevlar).

2.1.2 Vodivostní složka

Vodivostní složka zvaná jako Filler, je tvořena elektricky vodivými částicemi kovů, které mají výborné elektrovodivé vlastnosti, převážně zlato (Au), stříbro (Ag), měď (Cu), nikl (Ni) a dnes již ve speciálních případech olovo (Pb). Příspěvek těchto částic musí být rovnoměrně rozmístěn ve vazební složce (matrici). Obsah částic v binderu musí být dostatečný, aby se částice navzájem dotýkaly a tvořili vodivou síť. Tato koncentrace obvykle bývá od 60% až 80% objemu lepidla.

Pro vytvoření co nejlepší vodivostní sítě se využívá specifických tvarů vodivých částic, které mohou být i mezi sebou poměrově nakombinovány. Vodivostní složka má i velmi dobrou tepelnou vodivost, proto našlo uplatnění v aplikacích, kde je vyžadována i dobrá tepelná vodivost.



Obr. č. 2 : (vlevo) stříbrné šupinky , (uprostřed) Bazaltová vlákna pokrytá stříbrem, (vpravo) Pozlacené Cu částice, (převzato z [2])

Vodivé částice mají tyto základní tvary:

- Kuličky
- Šupinky
- Trubičky
- Tyčinky

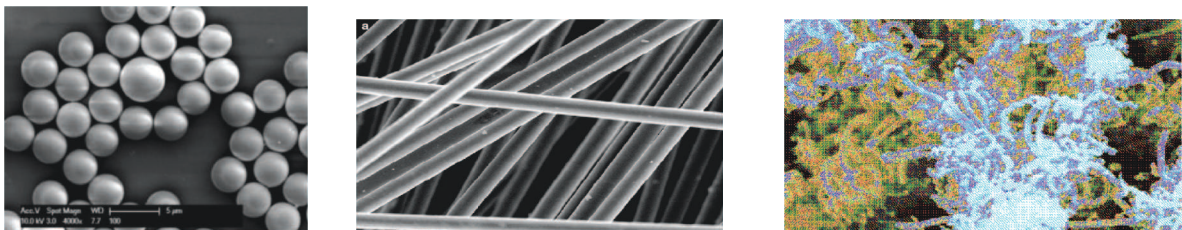
Tato kovová složka je nejčastěji tvořena drahými kovy (Ag nebo Au), kvůli velkým nárokům na kvalitu elektrické vodivosti. Tento faktor výrazně ovlivňuje finální cenu elektrovodivého lepidla. Proto pro snížení jeho ceny, se využívá levnějších kovů, jako je nikl nebo měď. Problém náhrady za levnější kovy, je jejich oxidace, která výrazně zhoršuje s časem jejich vodivost. Jiný způsob pro snížení ceny elektrovodivého lepidla jsou polymerní, niklové nebo měděné kuličky, které jsou potaženy vodivým povlakem (kovem), nejčastěji zlatem a stříbrem. Tyto

povlaky se mohou dále potahovat izolační nevodivou vrstvou, která změní vlastnost lepidla z izotropního na anizotropní.

Vodivostní síť, která se vytvoří dotykem vodivých částí je čistě náhodná a ovlivňuje se pouze koncentrací vodivých částic obsažených v pryskyřici.

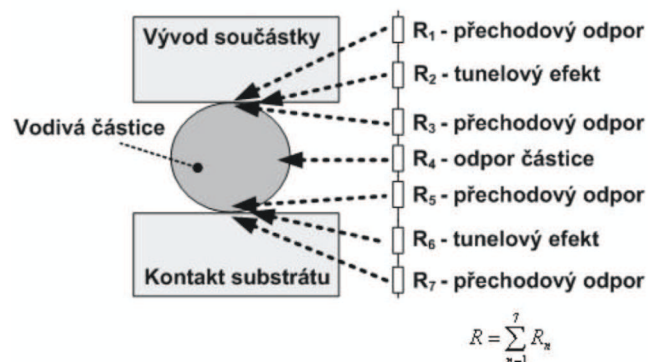
2.1.2.1 Odpor elektricky vodivého lepidla a jeho zlepšení

Vodivost mezi vodivými částicemi je zejména dána odporu tunelování, přechodového odporu, odporu částice a přeskovového odporu. Příklad mechanismu odporu anizotropního elektricky vodivého lepidla je na obrázku č.3. Jsou různé techniky k zlepšení odporu elektrovodivého lepidla. Jednou z technik, kterou popisuje pan doc. Ing Pavel Mach CSc. ve své práci, je zvolením vhodných rozměrů a tvaru částic, které pak do sebe lépe zapadají (zarývají) a tvoří robustnější elektricky vodivou síť. Příklady těchto částic jsou na obrázku č.4.



Obr. č.4 (vlevo) Stříbrné nanokuličky , (vprostřed) Stříbrná nanovlákna, (vpravo) Uhlíkové nanotrubičky, (převzato z [2])

Další používanou technikou je příměs nanočástic k mikročásticím. Nanočástice tvoří propojovací můstky mezi mikročásticemi v místech, kde se samotné mikročástice nedotýkají. Díky tomu vzniká v matrici mnoho vodivých cest (spojů) a poklesne výsledný odpor lepidla.



Obr. č.3 Mechanismus odporu elektrovodivého lepidla, (převzato z [2])

Zlato (Au)

Zlato latinsky "Aurum" je měkký drahý kov žluté barvy, který je výborně tepelně i elektricky vodivý. Má výbornou chemickou odolnost proti korozi. Vzhledem k těmto vlastnostem (elektrické vodivosti a inertnosti vůči prostředí) je nezbytnou součástí v mikroelektronice a v elektroprůmyslu. Kontakty ze zlata jsou dlouhodobé a bezproblémové. Výborná tažnost a kujnost (z 1g zlata lze vytáhnout drát dlouhý 165 metrů o průměru 20 mikrometrů a vytepat 1m² tloušťky 230 atomů).

Vlastnosti:

Teplota tání - 1337,33 K (1064,18 °C)

Tepelná vodivost - 318 W/mK

Měrný elektrický odpor (20°C) - 22,14 nΩ·m

Stříbro (Ag)

Stříbro latinsky "Argentum" je drahý kov bílé barvy, který je ze všech známých kovů nejlepší v tepelné a elektrické vodivosti. Používá se do mnoha různých slitin pro použití v elektroprůmyslu. Má dobrou kujnost a dobře se odlévá (dobrá zatékavost).

Vlastnosti:

Teplota tání - 1234,93 K (961,78 °C)

Tepelná vodivost - 429 W/mK

Měrný elektrický odpor (20°C) - 15,87 nΩ·m

Měď (Cu)

Měď latinsky "Cuprum" je ušlechtilý kov načervenalé barvy. Velmi dobrá elektrická i tepelná vodivost, dobře se mechanicky tváří a zpracovává, uspokojivá odolnost proti atmosferické korozi. Používá se jako základ do slitin využívaných v elektrotechnice. Nejvíce využívaný kov pro rozvodné kabely v bytech a pro průmyslové aplikace. Výroba chladičů a prvků pro rozvod tepla. Se slitinou cínu tvoří bronz.

Vlastnosti:

Teplota tání - 1357,77 K (1084,62 °C)

Tepelná vodivost - 386 W/mK

Měrný elektrický odpor (20°C) - 16,78 nΩ·m

Nikl (Ni)

Nikl latinsky “Niccolum” je bílý, feromagnetický dobře kujný a tažný kov. Využívá se hlavně jako součást různých slitin nebo k potahování jiných kovů, jako ochrana před korozi. Kvůli vyšší toxicitě je tento kov omezován.

Vlastnosti:

Teplota tání - 1728 K (1455 °C)

Tepelná vodivost - 90,9W/mK

Měrný elektrický odpor (20°C) - 69,3 nΩ·m

Olovo (Pb)

Olovo latinsky “Plumbum” je těžký velmi toxický kov. Dobře opracovatelný a kujný. Vyznačuje se dobrou odolností proti korozi a nízkým bodem tání. Nejvýznamnější je pro slitiny pájek převážně s cínem, používané v elektrotechnickém průmyslu. Pro toxicitu se jeho používání omezuje.

Vlastnosti:

Teplota tání - 600,6 K (327,5 °C)

Tepelná vodivost - 35,3 W/mK

Měrný elektrický odpor (20°C) - 22 nΩ·m

Izotropní vodivá lepidla

Vodivou složkou izotropních elektrických lepidel jsou částice kulového tvaru nebo jejich směsi šupinek a kuliček nejčastěji v epoxidové pryskyřici. Vodivost je ve všech směrech stejná.

Anizotropní vodivá lepidla

Vykazují elektrickou vodivost pouze v jednom směru. Nejčastěji je tvořena vodivá složka šupinkami při nízké koncentraci 25% - 30%, aby vytvořili souvislou vodivou síť. Při použití vodivých částic kulového tvaru (přibližně 10 μm), které jsou tvořeny z tvrdého polymeru s nanesenou vrstvou zlata nebo stříbra. Tyto vodivé vrstvy jsou pokryty tenkou izolační vrstvou. Při aplikaci a osazení součástky se stlačí lepidlo aplikované na kontaktech. V tomto směru se poruší tenká izolace kuliček vodivé vrstvy (vlivem tření kuliček o sebe), a vytvoří vodivý spoj. U anizotropních lepidel se nejčastěji používá akrylátová termoplastická pryskyřice.

2.2 Nanášení elektricky vodivých lepidel

Nanášení elektricky vodivých lepidel je velmi důležitou částí pro kvalitní a stálý elektrický spoj. Plocha, na kterou aplikujeme lepidlo musí být velmi dobře očištěna, aby bylo dosaženo dobré kvality lepeného spoje a to jak elektricky tak mechanicky. Dále je potřeba nanést správné množství na správné místo.

- Velké množství lepidla - dochází k přetékání a hrozí zkrat.
- Malé množství - dochází k odpadávání součástek (mechanická náchylnost) a také je elektricky nevyhovující.

Proto se vyvinuly metody, které budou eliminovat chyby vedoucí ke špatnému umístění a nanesení nesprávného množství elektrovodivého lepidla. Nejčastější metody jsou:

- Dispenzní nanášení
- Sítotisk / Šablonový tisk
- Nanášením hrotem

2.2.1 Dispenzní nanášení

Dispenzní nanášení je vhodné pro všechny typy elektricky vodivých lepidel. Množství vytlačované pasty lze upravovat velikostí tlaku a dobou vytlačování. Tyto přístroje si dokážou zapamatovat několik druhů nastavení pro různé typy lepidel. Každé lepidlo vyžaduje jiné nastavení tlaku / času na vytlačení stejného množství, díky jejich rozdílné viskozitě.

Pro aplikaci se využívá přístrojů ručního nebo plně automatického nanášení. Porovnání obou přístrojů můžeme vidět na obrázku č.5. Pro lepší aplikaci mají lepší přístroje na nanášecí hlavici ultrazvuk. Ultrazvuk zlepšuje viskozitu lepidla nebo pasty a zároveň promíchává její obsah. Toto se zejména vyplatí právě u elektricky vodivých lepidel, kdy je kladen velmi významný důraz na promíchání složek vazebních do nosné matrice pryskyřice. Dobré promíchání ovlivní konečný odpor lepidla po vytvrzení. Jestli se jedná o dvojsložkové lepidlo ovlivňuje to dále proces a rychlost vytvrzení pryskyřice.



Obr č.5 (vlevo) ruční dispenzní nanášeč, (vpravo) automatizovaný dispenzní nanášeč, (převzato z [5])

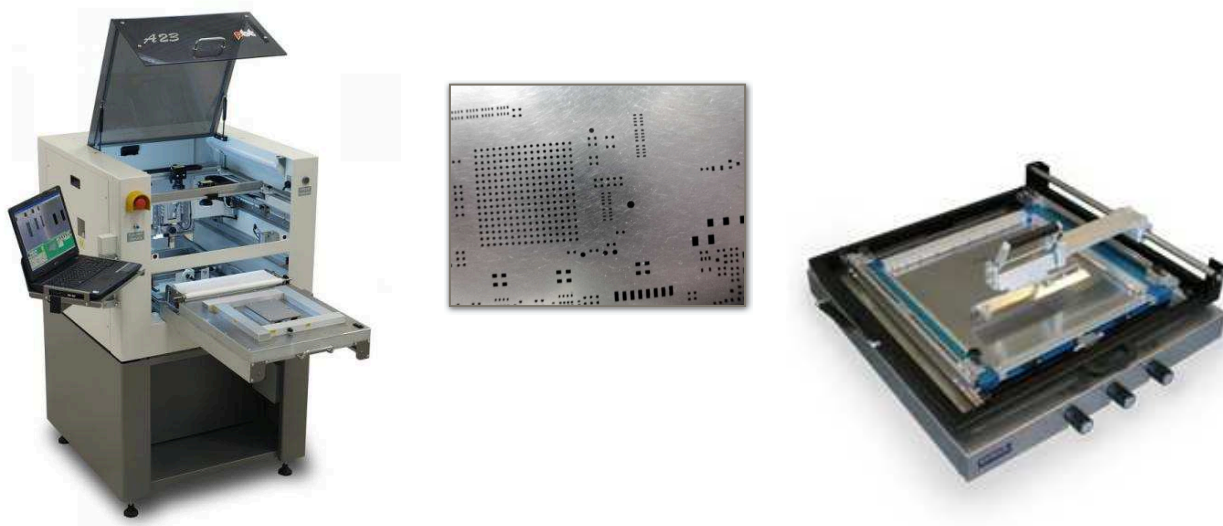
Přístroj pro ruční aplikaci se využívá pro vytváření prototypů a jednotlivých kusů. U automatizovaného přístroje lze vytvářet podstatně větší série s velkou přesností a kvalitou.

2.2.2 Nanášení hrotem

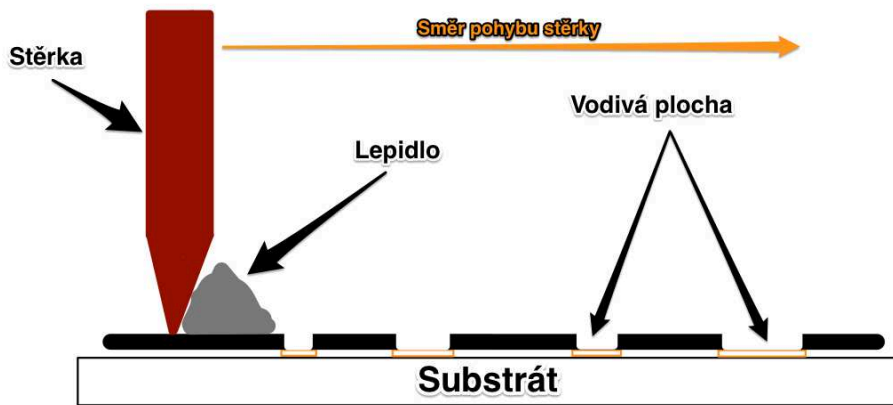
Nanášení hrotem se provádí pomocí jehel (hrotů), které se ponoří do mělké nádoby obsahující lepidlo. Lepidlo na hrotu přilne a přenesse se nad požadovaný kontakt. Přitisknutím hrotu do kontaktu s ploškou se lepidlo přenesse. Tento způsob je použitelný i s více hroty naráz.

2.2.3 Sítotisk / Šablonový tisk

Další technologií aplikace past a elektrovedivých lepidel je šablonový tisk/sítotisk. Princip šablonového tisku je popsán pomocí obrázků č.7 - č.9. Rozdíl mezi šablonovým tiskem a sítotiskem je, že stěrkou protlačíme skrz otvory v síťce, která má vhodně zamaskované otvory namísto šablony. S porovnáním mezi dispenzním nanášením je potřeba vyrobit šablonu obrázek č.6 (vprostřed), přes kterou bude lepidlo nebo pasta nanášena. Z tohoto důvodu se nevyplatí tato metoda pro jednorázový tisk jednoho vzorku, ale sérii vzorků nebo sériovou výrobu daných spojů. Pro šablonový tisk/sítotisk se vyrábí jak ručních nástrojů obrázek č.6 (vpravo), tak přístrojů pro automatický chod s možností výroby v sériích s kontrolovatelnou kvalitou č.6 (vlevo).

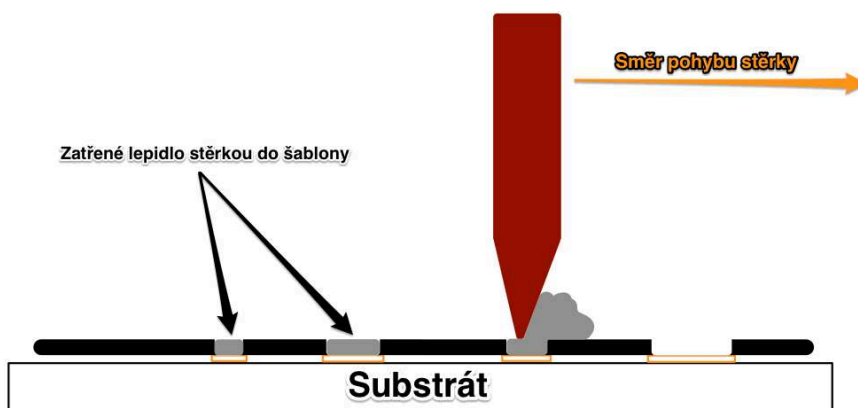


Obr. č 6 (vlevo) Automatizovaný sítotisk, (vprostřed) šablona, (vpravo) Ruční šablonový tisk, (převzato z [5])



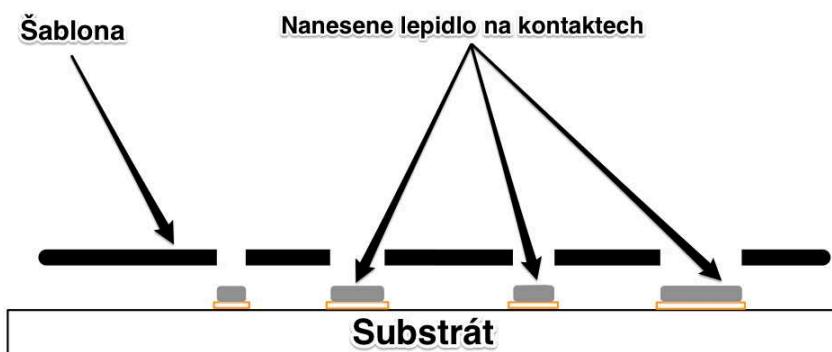
Obr. č. 7 Šablonový tisk

Šablona je přesně umístěna tak, aby laserem vyřezané otvory byly umístěné na vyleptaných kontaktech DPS.



Obr. č. 8 Šablonový tisk

Pomocí stěrky je lepidlo zatřeno do vyřezaných otvorů šablony.

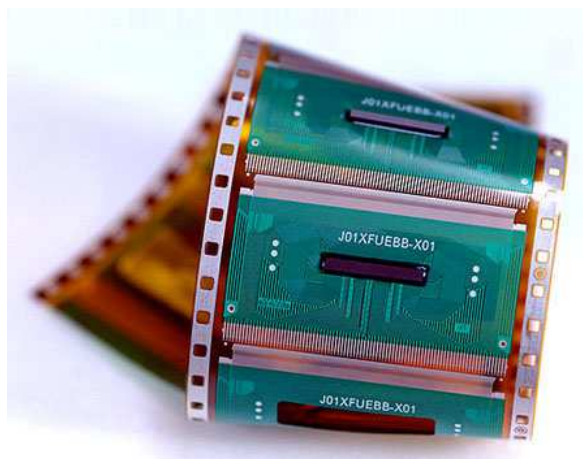


Obr. č. 9 Šablonový tisk

Po zatření se šablona odendá a DPS je možno osadit součástkami.

2.3 Porovnání elektrovedivých lepidel s pájkami

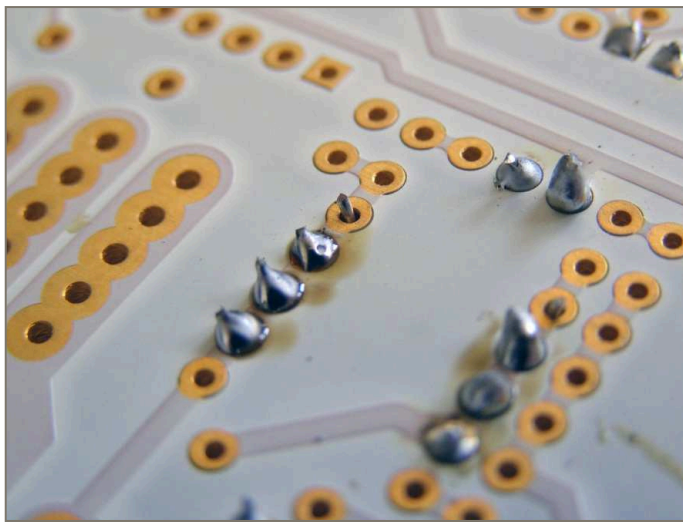
Jednou z významných nevýhod lepidel ve srovnání s pájkami, je jejich elektrická vodivost, která je o dva i tři řády nižší. Proto se hledají cesty, jak elektrickou vodivost lepidel zvýšit. Například přidáním nanočástic různých tvarů (kuličky, tyčinky, trubičky) do vodivého lepidla a tím zlepšit propojení vodivé sítě. Proto ceny lepidel vůči bezolovnatým pájkám výrazně převyšují ceny pájek. Když se podíváme na pájené spoje jsou vždy mírně lepší, nebo výrazně lepší, než vlastnosti spojů lepených. Pájené spoje dosahují i lepších mechanických vlastností, zatímco pájené spoje mohou být vystaveny prostředí se zvýšenou vlhkostí bez nebezpečí porušení spoje a změn jeho elektrických vlastností. Lepidla jsou k vlhkosti velice citlivá. Elektricky vodivá lepidla také neumožňují automatické vystředění, jako při pájení přetavováním.



Obr. č. 10 Technologie CHIP On FILM (COF), (převzato z [5])

Přesto však existují aplikace, kde nelze použít pájky, hlavně kvůli vysoké pájecí teplotě. Tyto technologie jsou např. COF (Chip on Film) nebo COG (Chip on Glass). Pájky se používají hlavně tam, kde je kladen velký důraz na odpor a houževnatost spoje proti nepříznivým vlivům, jako je třeba vlhkost (mnoho aplikací v armádě, astronautice, lékařství).

Co se týče aplikace elektrovedivých lepidel a pájecích past je technologie stejná, jelikož obě jsou ve formě pasty. U pájení přetavením se musí u pájek dodržovat teplotní profily pro správné vytvrzení pájky na kontaktech a její dobré elektrovedivé vlastnosti. U pevných pájek je již situace jiná, kde pájka nejčastěji ve formě drátu (trubičky) se taví pomocí rozpáleného hrotu přímo na požadovaný spoj kontaktů. U aplikace pájek je zapotřebí čištění kontaktu od tavidla, toto čištění není třeba při použití elektrovedivých lepidel.



Obr. č. 11 Aplikace pájky hrotem (okolo znečištění od tavidla), (převzato z [5])

3 Vlivy okolního prostředí na vlastnosti vodivých lepidel

3.1 Úvod do namáhání

Je známo, že elektrickým zařízením vadí změna teplot hlavně přechod teplo - zima. Nemají rády především vlhko a UV záření. Účinkům působení těchto vlivů na el. zařízení nemůžeme vždy předejít. Například mobilní telefon a jiné zařízení, které musíme mít u sebe, ať už jsme na sjezdovce a následně se zajdeme ohřát do restaurace ke kamnům, nebo si telefon vezmeme s sebou do koupelny. Z toho můžeme usoudit, že k největšímu namáhání dochází právě u přenosné elektrotechniky a nebo u techniky, která je přímo vyrobená pro účel, kde k namáhání dojde a bude docházet opakovaně. Tato zařízení určená pro extrémní zátěž, můžeme nalézt u armády, vesmírného programu a různých sportovních speciálů.

Okolní vlivy které mají dopad na vlastnosti elektricky vodivých lepidel:

- Teplo
- UV záření
- Otřesy a vibrace
- Mechanické namáhání
- Chemické namáhání
- Vlhko

V důsledku působení těchto vlivů je snížena kvalita zařízení a výrazně se omezí jejich životnost a funkčnost. Proto se provádí během vývoje testy, které prokážou chyby výrobku a jeho míru choulostivosti k různým vlivům zatěžování. Těmito testy se zabývá EZÚ (elektrotechnický zkušební ústav). Tento ústav také provádí zkoušky elektromagnetické kompatibility (EMC), zkoušky elektrické bezpečnosti, zkoušky RoHS a prohlášení o shodě (CE). Jak uvádí český zkušební ústav² :

² Elektrotechnický zkušební ústav: Mechanické zkoušky. In: [online]. [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://ezu.cz/produkty/mechanicke-zkousky-zkouseni-hluku-a-zkousky-vibracemi/>

Pro úspěšné uvedení výrobku na trh, ale i pro ověření jeho bezpečnostních a spolehlivostních parametrů, je nutné jeho vlastnosti ověřit i extrémním namáháním.

Může se jednat o mechanické namáhání točivých strojů a spotřebičů, nebo o zkoušky tahu a tlaku, pády a rázy, ohýbání, teplo, chlad, vlhkost, hoření nebo simulující vlivy okolního prostředí. Vybavení laboratoří umožňuje změřit vlivy stárnutí materiálu ve zrychleném procesu. Během několika týdnů jsme schopni simulovat stárnutí materiálu v řádu let.

3.2 Namáhání elektricky vodivého spoje

Elektricky vodivá lepidla se skládají tedy ze složky vazební a složky vodivostní. Složka vazební má za úkol držení vodivých částic i držení spoje jako takového. Proto největší mírou námahy na tento spoj bude záviset na kvalitě složky vazební.

3.2.1 Namáhání teplem

Namáhání teplem je jednou z nejběžnějších namáhání v elektrotechnice. Při chodu zařízení dochází k výrazným tepelným ztrátám a výsledkem je velké množství odpadního tepla, které se odvádí pomocí chladičů pryč. I přesto se desky se spoji, zahřívají zbytkovým neodvedeným teplem, dostatečným, aby spoj postupně degradoval. Plasty všeobecně nemají rády teploty, které jsou vyšší než pokojová. Proto se do elektricky vodivých lepidel volí takové druhy termoplastů a reaktoplastů, které mají větší vazební energii a tím získávají větší odolnost proti teplotám. Příkladem jsou silikonové pryskyřice, kterým zvýšené teploty nečiní obtíže. Se zvýšenou teplotou plastu dochází, jako u všech látek, k zvětšení svého objemu - rozpínavost. Elektricky vodivé spoje drží součástky materiálů, které mají jinou teplotní závislost rozpínavosti než samotná pryskyřice ve vazební složce, mohlo by dojít vlivem rozpínání a smršťování k porušení spoje. Tento spoj se pak může projevit pouze po elektrické stránce, kdy jeho vodivost klesá a vzroste přechodový odpor a nebo může vést k úplnému odpadnutí spojených částí. Výhoda pryskyřic je, že jsou značně pružné i po vytvrzení a dokáží tyto rozdíly vykompenzovat.

3.2.2 Namáhání mrazem

Mrazem namáhané součástky s elektrovedivými lepenými spoji se mohou nacházet například v zařízeních nebo dopravních prostředcích v zimním období nebo v extrémních podmínkách jako je Sibiř. Chlad působí na pryskyřice vazební složky blahodárně - téměř nestárnou. Problém se vyskytuje tehdy, kdy je se zařízením manipulováno a začne docházet k otřesům a chvění. Vlivem chladu pryskyřice zkřehne a ztrácí svojí pružnost. Díky tomu může snadno dojít k popraskání lepeného spoje, nebo k jeho úplnému odpadnutí. Praskání spoje se nemusí projevit hned na vodivosti, jelikož plast nepraská například jako sklo. V praskání mu také brání obsah vodivých částic, které prasklinu vychýlí a zabrání souvislé prasklině, nebo jejímu rozšiřování.

3.2.3 Namáhání vlhkem

Vlhko působí na kovové části zvýšená oxidace (koroze). Pryskyřice má za úkol vodivé částice před nepříznivým vlivem vlhka chránit. Na tento úkol se ideálně hodí silikonové pryskyřice. V případě použití více rozšířených epoxidových pryskyřic nastává problém v hydroxylových skupinách, které jsou navlhavé a nedokážou částice ochránit. Přítomnost vody v lepidlu zhoršuje mnoho jeho vlastností. V případě přechodu do mrazu hrozí popraskání epoxidu a zhoršení jeho vodivých vlastností.

3.2.4 Kombinované namáhání

V reálném provozu ovšem nedochází pouze k jednomu typu namáhání, ale hned několika současně. Spoj musí odolávat vibracím a současně výkyvům teplot. Zařízení se může nacházet v prostředí, kde ve vzduchu mohou být obsaženy různé chemické látky v podobě oxidů a naleptávat tak spoj.

4 Sada vzorků

4.1 Úvod

V zadání bakalářské práce jsem měl za úkol zhotovit sadu lepených elektricky vodivých spojů a sledovat jejich vlastnosti v závislosti na klimatickém a mechanickém namáhání. Jelikož lepidel je více typů a druhů zvolil jsem izotropně vodivá lepidla, protože byly volně dostupné na naší katedře. Ze škály dostupných lepidel jsem vybral jednosložkové lepidlo ELPOX SC 24D a dvojsložkové lepidlo ELPOX AX 12mn. Původně jsem chtěl mít více druhů lepidel, toto bohužel nebylo možno časově splnit, díky velkého množství potřebných vzorků. Každé další lepidlo by znamenalo další sadu vzorků a více měření. Stanovené dvě lepidla jsem vybíral podle kvality a aktuálního stáří. Vizuálně i mechanicky jsem testoval viskozitu lepidla, jestli není už příliš ztvrdlá. Pokud by jsme zvolili starší lepidlo vedlo by to k možné špatné adhezi lepidla k DPS a lepené součástky. Důvod se nachází, že vazebná složka je tvořena pryskyřicí, která má lepivé vlastnosti pouze ve fázi, kdy ještě nedochází k procesu vytvrzování. Lepidlo v procesu tvrdnutí přechází postupně od viskózního stavu do stavu kaučukového. V tomto stavu je lepidlo minimálně lepivé a tedy nepoužitelné k aplikaci. Po otevření několika málo balení jsme vybrali taková, aby splňovala výše zmíněné vlastnosti.

O výběru druhu klimatického namáhání jsem se poradil s paní Ing. Ivanou Beshajovou Pelikánovou Ph.D. Po konzultaci jsem rozhodl, že vzorky budu namáhat ve vlhkém prostředí. A to z důvodu, že dnešní všudepřítomná elektrotechnika se v tomto prostředí nevyskytuje výjimečně, ale naopak velmi často. Dalším důvodem, byla zvědavost do jaké míry tento proces ovlivní výslednou kvalitu spoje po stránce elektrické. Naše lepidlo je založeno na bázi epoxidové pryskyřice, která obsahuje hydroxilové skupiny, díky nimž má navlhavé vlastnosti. Jako další druh klimatického namáhání jsem si vybral mráz. Mráz prodlužuje životnost polymerů v podmínkách skladování a to jak před vytvrzením tak po vytvrzení. Tento spoj by tedy neměl stárnout. Za normální teploty je však pryskyřice do jisté míry pružná, po ponechání vystavení mrazu však tuto vlastnost postupně ztrácí, až zkréhne. Proto jsem chtěl pozorovat, jak se tyto změny projeví na vlastnostech spoje.

Má původní myšlenka byla namáhat kombinovaně mezi teplem a mrazem a provést tak šokové zkoušky. Tento pokus by se musel dělat ručně, a proto by výsledky ovlivňovalo mnoho lidských faktorů. K tomuto měření se dá využít zařízení, které je přímo zkonstruované na šokové zkoušky, avšak nemám k takovému zařízení přístup. Z mechanických zkoušek jsem si vybral trhání, pro ověření pevnosti spoje po namáhání v závislosti na čase. Zde by se dal udělat pokus o namáhání kroucením destiček s lepenými spoji, nebo podrobit destičky stálé dynamické zátěži vibracemi, jediný problém byl čas, který by jsem potřeboval k vymyšlení a zkonstruování přípravku nebo zařízení na kterých by se tyto procesy simulovaly.

4.2 Výroba vzorků

K pokusu jsem potřeboval zhotovit vzorky. Po spočítání všech namáhání a měření jsem došel k názoru, že budu potřebovat celkem 60 vzorků. Dva druhy lepidel po 15. vzorcích v každém prostředí, kde bude měřena mechanická odolnost trhání po 3. vzorcích od každého lepidla. Pro výrobu vzorků jsem použil destičky s vyleptanými měděnými spoji. Každá destička (vzorek) má 16 plošek pro měření elektrického odporu. Mezi těmito ploškami jsou vyleptány kontakty na 7 odporů. Destičky byly vyleptány hromadně po 10 kusech na velké desce. Tohoto jsem využil, když jsem přemýšlel o metodě aplikace lepidla. Původně jsem chtěl nanášet disperzí každý kontakt ručně³. Jelikož se toto dá posuzovat už za malosériový, rozhodl jsem se lepidlo aplikovat sítotiskem. Destičku jsem tedy musel řádně vystředit do manuálního nanášecem, aby kontakty byly přesně slícovány s vyřezanými otvory v hliníkové masce. Tento postup nanášení na rozdíl od prvně uvažovaného byl ve větší rychlosti aplikace⁴ a přesnosti množství naneseného lepidla na kontaktní plochu. Bohužel se jedná stále o ruční aplikaci, ve které jsou i v této metodě možnosti nuancí množství a polohy nánosu. Nejideálnější stav by byl, pokud by vzorky připravil stroj, kde by bylo zaručeno přesných parametrů.

Pro aplikaci odporů jsem využil ruční aplikátor, který se nalézá v naší laboratoři. Tento přístroj funguje na principu podtlaku, kdy aplikátor jezdí na posuvných

³ Což je $60 \text{ vzorků} \times 7 \text{ odporů} \times 2 \text{ kontaktů} = 840 \text{ kontaktů}$.

⁴ Současně nanesu lepidlo na 70 kontaktů.

hlazených tyčích v ose X, Y a Z. Aplikátor má zakončení malé kovové trubičky jehlovitého charakteru, která je tupá. Tato trubička je napojena na podtlakovou jednotku, která vytváří podtlak, když přiložíme trubičku k odporu. Tímto způsobem můžeme přenášet odpor na požadované místo a měnit jeho natočení. Postupně jsem aplikátorem nanесl všech 420 odporů. Snažil jsem se odpory umisťovat stejně ve stejném natočení. Jelikož se jedná o ruční aplikaci a ne strojovou musíme si uvědomit, že každý odpor byl nalepen jinak a pokaždé s jiným přitlakem součástky do naneseného lepidla.

Po nanesení byly vzorky dle technické dokumentace přiložené ke každému druhu lepidla zahřáty na požadovanou teplotu, kde byly ponechány předepsaný čas. Po kontrole vytvrzení byly vzorky popsány a rozděleny do testovacích klimat.

4.3 Měření

K měření jsem využil čtyřbodové metody dostupné na laboratorním miliohmmetru. Proudové sondy se aplikovali na krajní kontakty DPS. Napěťové sondy se vybavili kontaktními zobáčky. Těmito zobáčky se měřil každý odpor zvlášť. Při každém novém měření se laboratorní miliohmometr musel zkalibrovat zkratováním všech sond. Po kalibraci se změřila všechny vzorky z vlhka a mrazu najednou a výsledky byly zaznamenány do Numbers.

U mechanického namáhání jsem měřil 3 vzorky od každého lepidla z každého prostředí. K měření jsem využil trhačky, do které se vzorek zasune. Odpory se trhají po jednom, při postupu na další se destička se vzorky pouze poposadí v čelistech trhačky.

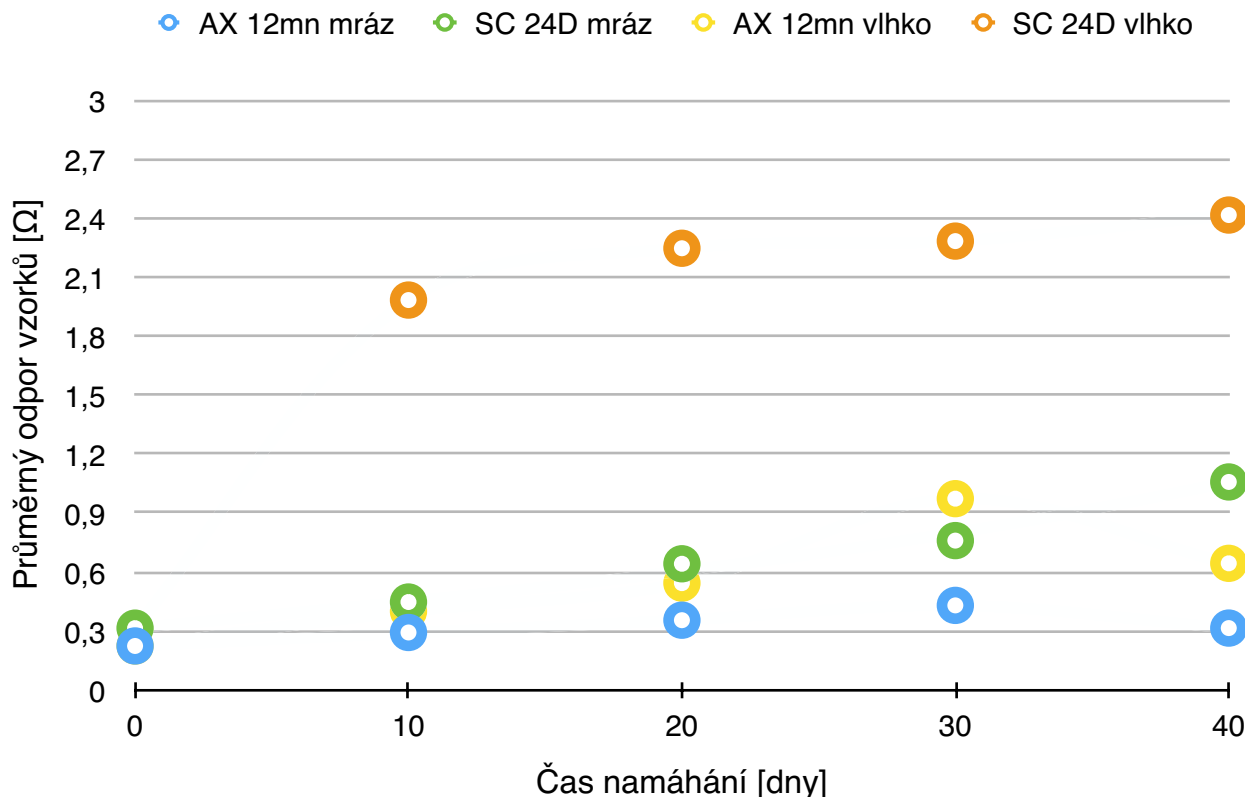
5 Zhodnocení výsledků

Z naměřených hodnot jsem musel vyloučit anomálie v tabulkách, které nebyli zařazeny do výpočtu. Důvod byl, aby nám výsledný graf neovlivnili vzorky odporů, které byly mechanicky špatně nalepeny nebo poškozeny manipulací. Jejich odpor je několikanásobně větší než průměrný odpor ostatních nakontaktovaných součástek. To by vedlo k úplnému zkreslení výstupu.

Po separaci chybových spojů jsem vyhotovil průměrné hodnoty v každé testované skupině.

5.1 Vliv klimatického namáhání na odpor

Očekávané hodnoty byly, že se vzrůstajícím namáháním bude růst i jeho elektrický odpor vlivem daným namáháním. U namáhání vlhkostí jsem očekával rychlejší degradaci, než u namáhání mrazem. Mráz totiž dobře konzervuje vazební složku, která drží vodivou složku a slouží jako pojivo mezi kontaktem součástky a DPS. Naopak u namáhání vlhkem jsem čekal odpor větší, protože se jedná o



Graf č.1 Průměrný odpor vzorků v závislosti na čase

epoxidovou pryskyřici obsahující hydroxilové skupiny, což způsobuje její navlhavost. Vlhkost vlivem vyšší korozivnosti a narušování vazební složky, mění vlastnosti lepidla a degraduje podstatně rychleji, než je tomu u mrazu.

Toto se i potvrdilo ve výsledném grafu č.1. Když porovnáme lepidla stejného druhu, vidíme že odpor ve vlhkém prostředí je vždy elektricky horší, než je tomu v mrazu. Zhodnotíme-li lepidla mezidruhově mezi sebou vidíme, že lepidlo 12 je stálejší a odolnější vůči oběma druhům namáhání. Tato charakteristika je typická pro dvojsložková lepidla pokud jsou striktně dodrženy míchací poměry a obě složky jsou dokonale promíchány.

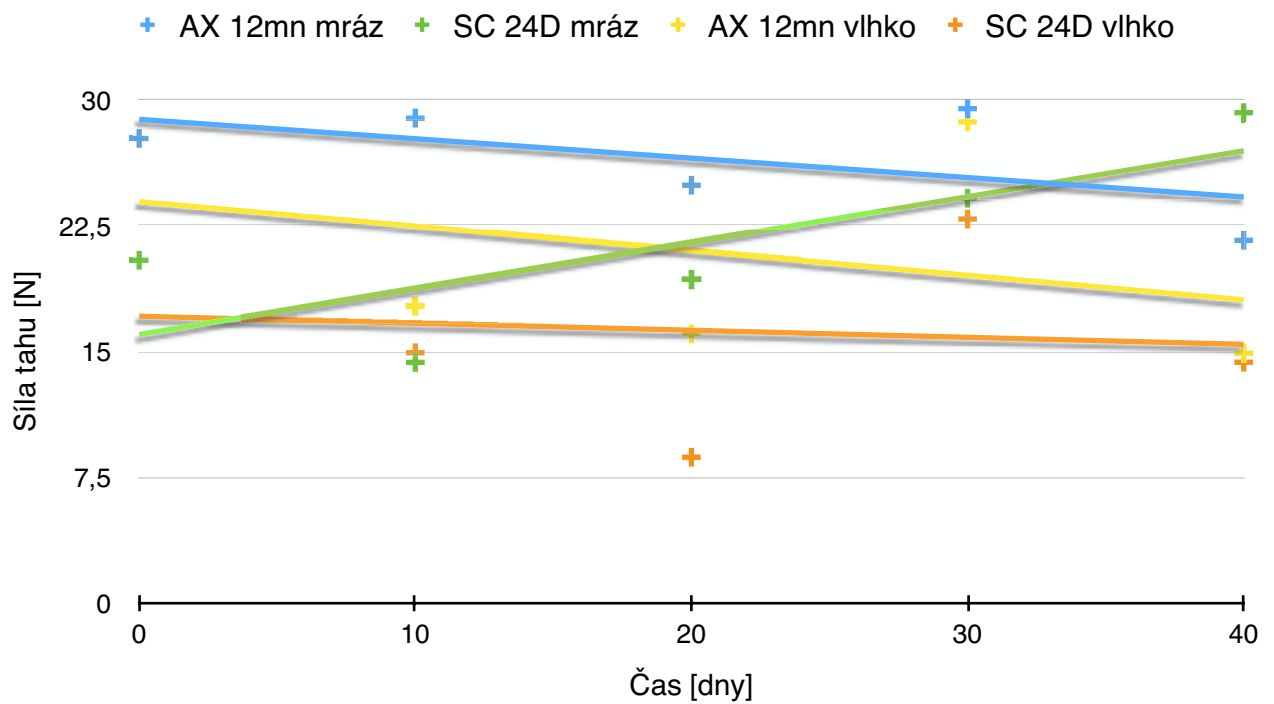
V obou případech u lepidla 12 mezi 30. dnem namáhání se začala jeho vodivost mírně zvyšovat. Naopak u lepidla 24 se 30. dnem odpor výrazněji zhoršil. Některé vzorky během namáhání ztratili vodivost nebo odpadly. Po detailnějším zkoumání těchto anomálií jsem zjistil, že na tyto vzorky byly nanесeny odpory hůře. Některé nebyly umístěny přesně a dotýkali se leptaného spoje pouze z části nebo byl odpor nanесen do malé či větší vrstvy lepidla. Tyto chyby na vzorcích zavinila ruční aplikace lepidla a odporů.

5.2 Vliv klimatického namáhání na pevnost kontaktu

U klimatického namáhání se v obou případech zhoršil elektrický odpor. Tento trend očekávám i co se týče pevnosti spoje. Se vzrůstající délkou namáhání by spoj měl degradovat a postupně ztrácet v pevnosti.

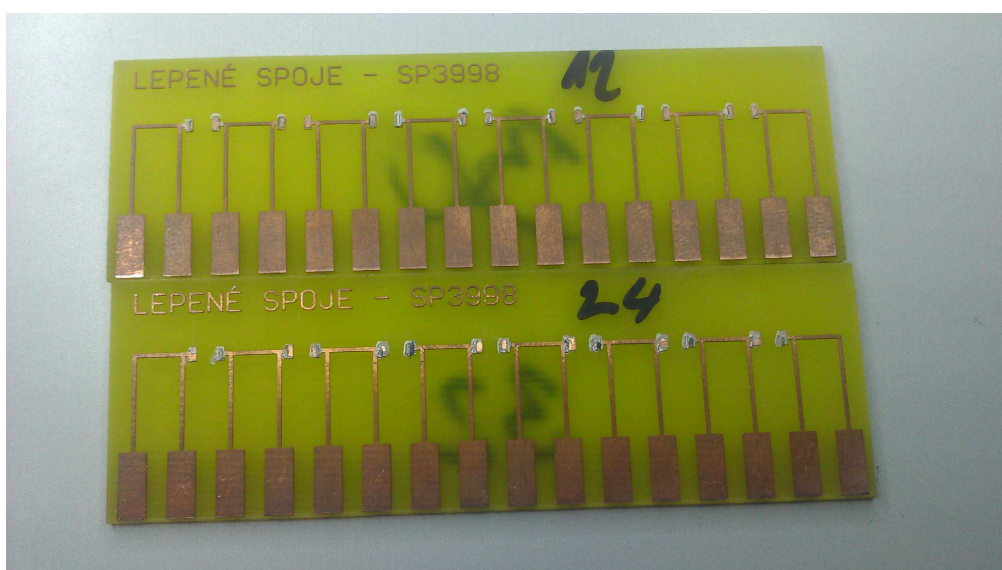
Naměřené hodnoty jsem zprůměroval a vynesl do grafu č.2 v podobě bodů. Tyto body jsem proložil vývojovými lineárními liniemi. Podíváme-li se a porovnáme druhy lepidel mezi sebou, je patrné, že lepidlo 12 dosahuje v obou případech namáhání lepších výsledků stejně, jako tomu je u naměřeného elektrického odporu. Podíváme-li se na lepidla mezidruhově zjistíme, že lepidlo 24 ve vlhku degraduje pomaleji, než je tomu u lepidla 12. Abnormalitou je lepidlo 24 v mrazu, kde se postupně zlepšují jeho pevnostní vlastnosti. Po 30. dnu dokonce vykazuje průměrně vyšší pevnost než je tomu u lepidla 12. Přisuzuji to tvrdidlu, které je obsaženo v lepidlech a jeho odlišné odpařování v závislosti na namáhání.

Po prozkoumání destiček plošných spojů, kde byly nalepeny odpory a následně odtrženy, jsem zjistil, že se odpory odtrhávají charakteristicky na rozdílném klimatickém namáhání. Na první pohled po odtržení se dalo určit, zda se vzorek

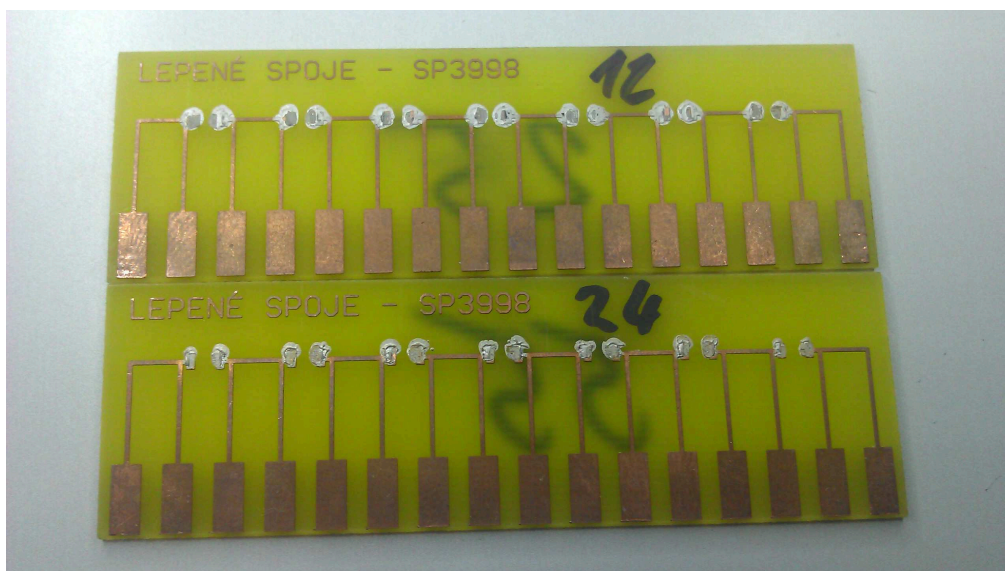


Graf č.2 Mechanická odolnost vzorků v závislosti na čase

nacházel v mrazu nebo ve vlhkém prostředí. Tento jev si můžeme prohlédnout na obrázku č.12, kde se nachází vzorky z mrazu a na obrázku č.13, kde se nachází vzorky z vlhka. Oba druhy lepidel, ať jednosložkové lepidlo 24, tak dvojsložkové lepidlo 12 se odhrly z DPS tak, že ve vlhku vlivem navlhavosti se lepidlo mírně rozpilo a nabobtnalo a po mechanické zátěži došlo k odtržení odporu od lepidla, které zůstalo na desce plošných spojů. Jiná situace nastala při mechanické zátěži u vzorků v mrazu, kde došlo k odtržení převážné většiny lepidla spolu s odporem.



Obr. č.12, DPS s odtrženými odpory namáhanými v mrazu



Obr. č.13, DPS s odtrženými odpory namáhanými ve vlhku

5.3 Závěr

Z výsledků této práce je patrná vysoká náchylnost těchto lepidel na klimatické a mechanické namáhání. V běžném provozu se tyto degradační činitele nachází kombinovaně, což může stárnutí takovýchto spojů výrazně urychlit.

Lepidla v mrazu vykazala v obou sledovaných hodnotách lepších výsledků. Tuto vlastnost přikládám k tvrdidlům obsažených v lepidlech. Tyto tvrdidla se během procesu tvrzení a dotvrzování vypařují a způsobují ve struktuře lepidla nehomogenity (dutinky). Dutinky ovlivňují lepidla nejen po stránce pevnosti, ale i po stránce elektrické, kde dochází k menší hustotě vytvoření vodivé sítě tvořené vodivými částicemi. Ve vlhku se dutinky plní vodou, kvůli použitým lepidlům na epoxidové pryskyřici za přítomnosti hydroxilových skupin má navlhavé vlastnosti. Díky tomuto se projevila odlišnost odlepování lepidla od plošek podle aplikovaného namáhání. Nehomogenita lepidla zvyšuje proudovou hustotu a více zahřívá spoj během průchodu elektrického proudu. Dále díky těmto dutinkám nelze lepidla použít na vysoká napětí nebo velké proudy (částečné výboje).

Elektrovodivá lepidla jsou nepostradatelnou součástí technologií, které potřebují kontaktování při nízkých teplotách. Jedná se přímou náhradu za olovnaté pájky. Díky směrnici RoHS, kterou tyto lepidla splňují, má velmi pozitivní vliv na stav životního prostředí a jeho ochrany do budoucna. Nevýhodou této směrnice je její rozšiřování i do výjimečných zařízení, zejména zdravotnictví, kde je velmi důležitá kvalita těchto spojů, protože může jít o ohrožení lidského života.

Elektrovodivá lepidla jsou v dnešní době s porovnáním s bezolovnatými pájkami velmi vysoké. Proto se převážně využívají, jako nutná alternativa, než přímá náhrada. Nutno upozornit na to, že dnešní bezolovnaté pájky jsou mnohem agresivnější, než olovnatý předchůdci. Daleko více to opotřebovává stroje a zařízení, které tyto spoje vyrábí a zdraží to celkově výrobu. Bohužel lepidla prokázala velkou labilitu ke klimatickým namáháním a proto zařízení a přístroje opatřené lepenými spoji, které se vyskytují v nevyhovujících podmínkách mají velmi malou životnost a spolehlivost.

6 Použitá literatura

- [1] Práce o matricích a pryskyřicích, Ing. ZDENĚK KOŘÍNEK, Csc.
<http://mujweb.cz/zkorinek/matrice.pdf>

- [2] Modifikovaná elektricky vodivá lepidla, doc.Ing. PAVEL MACH, Csc.
<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/528/r3c2c7.pdf?sequence=1>

- [3] Prezentace Náhrada olova v pájkách, P. MACH a A. DURAJ
<http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Nahrada%20olova%20v%20pajkach.pdf>

- [4] Prezentace Propojování v elektrotechnice Doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.
http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/08a_propojovani_v_elektronice.pdf

- [5] Elektricky vodivá lepidla, MAREK LAUKO, Praha 2014
Individuální projekt, ČVUT

- [6] Spolehlivostní rizika bezolovnatých druhů montáže, ŽÁK PAVEL, 2012
Disertační práce, ČVUT.

- [7] Montáž v elektrotechnice, MACH, P., V. SKOČIL a J. URBÁNEK, Praha 2001
ČVUT, ISBN 80-010-2392-3.

7 Přílohy

7.1 Tabulky naměřených hodnot

První měření po vytvrzení lepidlo AX 12mn

Číslo vzorku	Odpor [Ω]						
1	0,1138	0,09202	0,1651	0,1190	0,1112	0,0993	0,1056
2	0,2228	0,1351	0,1115	0,1161	0,1766	0,1848	0,3336
3	0,1684	0,2533	0,2075	0,5024	0,1234	0,1321	0,1653
4	0,0777	0,08004	0,09131	0,07404	0,08682	0,06871	0,1116
5	0,1055	0,08034	0,07290	0,087	0,09254	0,1106	0,09087
6	0,07516	0,08757	0,08012	0,0997	0,1331	0,09207	0,07736
7	0,08495	0,08589	0,2447	0,1034	0,09511	0,09527	0,5213
8	0,09260	0,1127	0,1292	0,1135	1,047 anomal	0,1999	0,1647
9	0,07963	0,08297	0,09701	0,08244	0,08409	0,0811	0,1740
10	0,08598	0,1318	0,1031	0,1071	0,09467	0,09496	0,09743
11	0,09957	0,09214	0,09117	0,08417	0,08897	0,07785	0,07337
12	0,08257	0,09184	0,1089	0,0762	0,08018	0,07946	0,07684
13	0,09558	0,2118	0,2795	0,0993	0,1112	0,1087	0,2059
14	0,1504	0,08633	0,1128	0,1144	0,1776	0,5027	0,2895
15	0,1448	0,1577	0,09297	0,1211	0,1147	0,1726	0,2097
16	0,2234	7,036 anomal	0,2624	0,1748	0,1330	0,1634	0,2423
17	0,08874	0,06724	0,1423	0,09226	0,07410	0,08563	0,07573
18	18,36 anomal	0,1125	0,1206	0,0983	0,1130	0,1036	0,09674
19	19,25	0,1078	0,2013	0,4305	0,1328	0,1019	0,1250
20	0,1026	0,1107	0,09714	0,08372	0,07880	0,09734	0,1476
21	0,1142	0,1323	0,1132	0,1275	0,1711	0,1442	0,1529
22	0,09137	0,07771	0,08695	0,1067	0,0987	0,1037	0,1500

23	0,07406	0,08187	0,08179	0,07831	0,2881	0,1170	0,1503
24	0,08973	0,1086	0,09077	0,1029	0,08190	0,1542	0,1394
25	0,2334	0,1355	0,1084	0,1260	0,2896	0,1153	0,1465
26	0,09428	0,09864	0,08288	0,1032	0,1180	0,1007	0,1070
27	0,07767	0,08147	0,07009	0,06940	0,08395	0,07580	0,0994
28	0,1716	0,1813	0,1146	0,1553	0,2096	0,2480	0,2199
29	0,1257	0,08839	0,2134	0,1467	0,1090	0,07758	0,07724
30	0,1117	0,1399	0,1636	0,1697	0,1330	0,1047	0,1001

Druhé měření: Mráz - lepidlo AX 12mn a lepidlo SC 24D

Číslo vzorku	Odpor [Ω]						
31	0,3239	0,3476	0,3235	0,4849	0,2441	0,4542	0,8879
32	0,6473	0,6537	0,3628	0,3460	0,2747	0,3607	0,5628
33	0,1951	0,4647	0,2490	0,2882	0,1965	0,2023	0,6131
34	0,1064	0,2654	0,09643	0,5232	0,1463	0,2202	0,2284
35	0,2668	0,2473	0,4876	0,2470	0,2417	0,1568	0,3740
36	10,73 anomal	10,67 anomal		0,2516	0,2061	0,1347	0,1757
37	0,3076	0,2091	0,3180	0,2676	0,4746	0,8164	0,5127
38	0,5148	0,6335	0,4027	0,1789	0,2429	0,2463	0,2516
39	0,2489	0,3487	0,1215	0,3804	0,2375	0,1677	0,1380
40	0,2430	0,2004	0,6360	0,2236	0,2425	0,5531	0,1971
41	0,5740	0,6064	0,5548	0,5712	0,978 anomal	0,5843	1,921 anomal
42	0,4587	0,2067	0,3002	0,1542	0,1639	0,3003	0,1687
43	0,1262	0,1414	0,2930	0,1297	0,2903	0,1515	0,2687
44	0,6291	0,3902	0,7343	0,6219	0,4725	0,9641	0,5320
45	0,2442	0,1652	0,1664	0,3490	0,4528	0,2953	0,2445
46	0,3410	0,2933	0,3886	0,4647	0,4449	0,3035	0,3956
47	0,2345	0,2758	0,5989	0,7289	0,7815	0,5889	0,1177

47	0,2345	0,2758	0,5989	0,7289	0,7815	0,5889	0,1177
48	0,2345	0,2758	0,5989	0,7289	0,7815	0,5889	0,1177
49	0,2961	1,028 anomal	0,1945	0,7977	0,5294	0,3457	0,3685
50	0,3131 dot	0,2323 dot	1,154 dot	0,1305 dot	0,2584 dot	0,8048 dot	0,940 dot
51	0,6431	0,3436	0,1738	0,1811	0,1079	0,5517	0,1092
52	0,38	0,6092	0,1085	0,3083	0,2045	0,2169	0,5255
53	0,2427	0,1665	0,10097	0,1504	0,1262	0,09363	0,1076
54	0,1663	0,1220	0,1490	0,1246	0,1540	0,1143	0,1231
55	0,1151	0,1422	0,1743	0,2528	0,3411	0,1882	0,1971
56	0,1289	0,3991	0,4102	0,3084	0,6274	0,3168	0,1711
57	0,4716	0,2878	0,4403	0,1903	0,1695	0,4273	0,2811
58	0,1482	0,09143	0,1241	0,1246	0,1391	0,2278	0,2138
59	0,3254	0,1903	0,4872	0,5008	0,3181	0,1857	0,2277
60	2,014 dot	0,8091dot	1,039 dot	0,6566 dot	0,9512 dot	0,5833 dot	0,5382 dot
50	0,1153	0,10113	0,1310	0,09018	0,0999	0,1566	0,2653
60	2,238 anomal	0,1170	0,1411	0,1775	0,10815	0,1273	0,2202

První měření: Mechanické namáhání

Lepidlo	Tah [N]						
12	38	30	17	36	26	24,5	19,5
12	29,5	38,5	39,5	31,5	37,5	32	35
12		14	5	24,5	5,5	22,5	18
12	26,5	35	29	38	26	38,5	31,5
24	21	32,5	22,5	16	18,5	15	14
24	16	20,5	22	15	18,5	21	21
24	29	20	19	13,5	8,5	12,5	19
24	30,5	23,5	26	21	32	24	20,5

Druhé měření: Mráz - lepidlo AX 12mn a lepidlo SC 24D

Číslo vzorku	Odpor [Ω]						
3	0,1997	0,4444	0,3936	odpadl	8,6 anomal	8,65 anomal	8,63 anomal
4	0,1182	0,10366	0,1417	0,1175	0,2677	0,1016	0,1243
5	0,1142	0,08804	0,08055	0,0949	0,1015	0,1195	0,09833
7	0,1983	0,09488	0,2519	0,1127	0,10397	0,10403	0,6933
10	0,09394	0,1414	0,1188	0,1155	0,10368	0,10263	0,10465
14	0,1620	0,09491	0,1266	0,1893	0,1894	0,9010	0,3026
18	0,1926	0,1214	0,1326	0,1075	0,1125	0,1127	0,10531
19	0,2230	0,1227	7,131	4,814	0,1800	0,1253	0,13
20	0,1097	0,1173	0,10425	0,09044	0,08603	0,10488	0,1548
22	0,09911	0,08484	0,09446	0,1143	0,1059	0,1107	0,1603
26	0,10162	0,1068	0,09079	0,1008	0,1273	0,1079	0,1143
28	0,1809	0,1989	0,1227	0,1626	0,2295	0,2703	0,2550
30	0,1227	0,1491	0,1829	0,1778	0,1405	0,1124	0,1025
32	0,7363	0,7340	0,3890	0,4040	0,3050	0,4085	0,6722
33	0,2089	0,4950	0,2612	0,2955	0,2133	0,2160	0,6384
35	0,2953	0,2763	0,5840	0,3210	0,2718	0,1757	0,5052
36	0,1611	0,2314	odpadl	8,66 anomal	8,52 anomal	8,56 anomal	8,64 anomal
37	0,3315	0,2576	0,3515	0,2834	0,4988	0,9017	0,5639
40	0,2637	0,2323	0,6478	0,2380	0,2867	0,6341	0,2287
41	0,5961	0,6670	0,6255	0,6431	1,101	0,6638	2,522
43	0,1333	0,1667	0,5650	0,1690	0,3580	0,1637	0,2881
49	0,3977	1,626	0,2134	1,089	0,6156	0,4078	0,4790
56	0,1275	0,4185	0,4410	0,3355	0,8540	0,3454	0,1856
58	0,1649	0,1082	0,1503	0,2120	0,1977	0,2331	0,3360

Druhé měření: Vlhko - lepidlo AX 12mn a lepidlo SC 24D

Číslo vzorku	Odpor [Ω]						
2	1,426	1,216	0,3608	0,4267	2,137	1,927	1,636
6	0,1127	0,1487	0,1364	0,4424	0,3158	0,1607	0,1244
9	0,1323	0,1251	0,3208	0,1065	0,1897	0,1500	0,4188
11	0,1605	0,1254	0,1733	0,2067	0,1523	0,1188	0,10623
12	0,1299	0,1732	0,2423	0,1118	0,1571	0,1126	0,1144
13	0,2952	0,3477	1,032	0,3217	0,2870	0,2474	1,413
15	0,9949	1,625	0,2653	0,7726	0,3400	0,7528	0,5221
17	0,1415	0,08849	0,2667	0,1474	0,09656	0,1245	0,1215
21	0,2540	0,3150	0,2554	0,4051	0,4363	0,3355	0,4278
23	0,2063	0,1165	0,1400	0,10305	1,341	0,2855	0,3540
25	0,3858	0,3502	0,3494	0,4653	0,6556	0,3167	0,2343
27	0,1134	0,1136	0,09522	0,09749	0,1236	0,1093	0,1590
29	0,4365	0,1610	1,051	1,290	0,2670	0,1075	0,10288
34	0,2014	1,573	0,1525	4,521	0,3078	0,5763	0,5932
38	1,306	2,108	1,499	1,48	0,6919	1,260	0,4866
42	5,265	0,8299	4,244	0,6220	0,7453	37,88	0,8451
44	1,644	1,801	8,692	4,531	6,619	6,624	6,983
46	0,7910	2,065	12,06 anomal	1,406	1,282	0,8039	1,039
47	1,519	0,6222	4,845	2,208	3,324	3,286	0,2964
48	1,802	2,009	2,642	0,6895	2,015	0,3408	0,2525
51	1,607	1,855	0,4405	0,5031	0,1845	1,473	0,2044
52	0,9369	1,904	0,1862	0,8599	0,3150	0,3510	0,7322
53	0,4826	0,4918	0,1231	0,2564	0,1500	0,1077	0,1256
55	0,1682	0,2743	0,2941	0,3949	0,6955	0,2753	0,2856
57	2,897	0,7858	1,920	1,668	1,673	1,253	0,7571
59	4,776	0,5150	3,413	3,574	1,075	0,3797	0,6861

Dopečené vzorky pro velký odpor

Číslo vzorku	Dopečené - Odpor [Ω]						
50	0,1153	0,10113	0,1310	0,09018	0,0999	0,1566	0,2653
60	2,238	0,1170	0,1411	0,1775	0,10815	0,1273	0,2202

Mechanické namáhání: Mráz

Číslo vzorku	Tah [N]						
20	32,5	40	33	29,5	46	35	57,5
26	32,5	32,5	25	26	23,5	24	24
30	26,5	15	17	25,5	22	17,5	23
40	16	17,5	12	14	15	14,5	18,5
41	22	17,5	23	16,5	17	16	22,5
49	8,5	8	9	10	7,5	8	8,5

Mechanické namáhání: Vlhko

Číslo vzorku	Tah [N]						
9	15	17	14	19	17,5	15,5	12
13	10	19,5	20,5	19	22,5	12,5	9
17	17	26	12,5	26	19	30	18,5
34	16	11	12	15,5	16,5	12,5	23,5
52	17,5	14,5	12,5	17,5	22,5	18	16
51	9	9,5	10	14	18	13	14,5

Druhé měření: Mráz - lepidlo AX 12mn a lepidlo SC 24D

3	0,5472	2,07	0,2973	odpadl	0,1590	0,1575	0,1751
4	0,1315	0,0667	0,011	0,1345	0,2584	0,1128	0,1277
5	0,1158	0,08959	0,08162	0,09588	0,10342	0,1208	0,09902
7	0,09275	0,09537	0,2601	0,1127	0,10402	0,10306	1,206
10	0,09626	0,1480	0,1165	0,1185	0,10808	0,1065	0,1065
14	0,1613	0,09454	0,1263	0,1235	0,1913	1,599	0,3035
18	0,1932	0,1232	0,1365	0,10717	0,1278	0,1122	0,1072
19	0,2025	0,1198	6,585	3,94	0,1865	0,1307	0,1352
22	0,10025	0,08587	0,09681	0,1186	0,10779	0,1135	0,1717
28	0,1860	0,2329	0,011	0,1345	0,2584	0,1128	0,1277
32	0,7405	0,74	0,3898	0,4033	0,3045	0,4133	0,6816
33	0,2930	0,5363	0,2787	0,3244	0,2302	0,2229	0,6623
35	0,3051	0,3059	0,6775	0,8509	0,2844	0,1796	0,5890
36	8,40	8,40	odpadl	0,1761	0,2218	0,1409	0,2215
37	0,3385	0,2740	0,3853	0,2973	0,5174	0,9047	0,5760
43	0,1319	0,1737	0,6466	0,1762	0,3915	0,1654	0,2972
56	0,1273	0,4173	0,4482	0,3361	0,8725	0,3519	0,1888
58	0,1694	0,1123	0,1524	0,2521	0,2443	0,2553	0,3834
60	2,237	0,1177	0,1432	0,1820	0,1167	0,1398	0,2213

Druhé měření: Vlhko - lepidlo AX 12mn a lepidlo SC 24D

Číslo vzorku	Odpor [Ω]						
2	1,405	1,536	0,5005	0,4503	4,066	2,481	1,821
6	0,1992	0,1530	0,1450	0,5453	0,3112	0,1757	0,1323
11	0,1777	0,1313	0,1937	0,2286	0,1600	0,1244	0,1103
12	0,1383	0,1825	0,2799	0,1169	0,1837	0,1150	0,1177
15	1,513	2,049	0,8345	1,011	0,3985	0,8390	0,5287
21	0,3011	0,3370	0,2891	0,4699	0,4921	0,4017	0,506
23	0,2395	0,1212	0,1508	0,1062	1,622	0,3154	0,3872

25	0,4030	0,3619	0,3899	0,5176	0,6976	0,3582	0,2444
27	0,1229	0,1175	0,1007	0,10085	0,1320	0,1135	0,1758
29	0,4815	0,1812	2,115	1,687	0,3236	0,1171	0,1088
38	1,442	3,21	2,009	4,05	1,170	1,659	0,9025
42	30,32 anomal	0,8430	4,487	2,11	1,165	44,14 anomal	1,502
44	10,01	2,007	0,08807	8,597	9,817	18,8 anomal	12,6 anomal
46	1,04	3,245	9,609	1,749	1,509	0,9554	1,290
47	2,287	0,7211	17,7 anomal	3,280	3,528	5,966	0,3928
48	2,622	3,471	4,678	0,9668	2,072	0,4761	3,031
50	0,1214	0,1110	0,1559	0,1095	0,1075	0,2421	0,664
53	0,0856	1,163	0,1535	0,4753	0,1628	0,1274	0,1395
55	0,2481	0,6903	0,3387	0,4257	1,300	0,3468	0,3095
57	5,74	1,023	2,092	4,740	5,956	1,643	0,9673
59	41,37 anomal	1,025	5,48	3,53	1,710	0,6312	9,45

Mechanické namáhání: Mráz

Číslo vzorku	Tah [N]						
12	55	30	49,5	37	17,5	10,5	21
12	13	28	18,5	14,5	12	12	34
12	34,5	34,5	17	21	20,5	26,5	17
24	16,5	22	22	19,5	21,5	17	14,5
24	24,5	23	21	19,5	22,5	21	19,5
24	20,5	17	11	26	13	16,5	17

Mechanické namáhání: Vlhko

Číslo vzorku	Tah [N]						
12	15	14	19,5	20	15	18	20,5
12	11	8	15,5	13,5	29	11,5	15
12	18,5	17	13	16,5	16,5	18	12
24	9,5	12	10,5	13	9	12,5	12
24	8	9,5	9	10	8	10,5	9
24	9	5	2	4,5	7	6,5	6

Třetí měření: Mráz - lepidlo AX 12mn a lepidlo SC 24D

Číslo vzorku	Odpor [Ω]						
3	0,5580	2,115	0,2933		0,1555	0,1541	0,1707
5	0,1212	0,09466	0,08653	0,10143	0,10882	0,1267	0,10409
10	0,10151	0,1546	0,1225	0,1229	0,1130	0,1234	0,11255
18	0,1990	0,1282	0,1431	0,1116	0,1260	0,1165	0,1117
19	0,2074	0,1250	6,436	4,561	0,1902	0,1360	0,1402
22	0,10531	0,0907	0,10157	0,1235	0,1103	0,1183	0,1784
28	0,1923	0,2353	0,1298	0,1679	0,2383	0,2926	0,2995
35	0,3121	0,3171	0,7502	0,3669	0,2939	0,1824	0,7491
36	7,95	8		0,2950	0,3570	0,2850	0,3909
37	0,3571	0,2793	0,3792	0,2915	0,5175	0,9004	0,5704
56	0,1253	0,4210	0,4480	0,3352	0,8839	0,3503	0,1889
58	0,1773	0,1199	0,1694	0,2794	0,2740	0,2404	0,3813
60	2,241	0,1230	0,1165	0,1847	0,1210	0,1437	0,2245

Třetí měření: Vlhko - lepidlo AX 12mn a lepidlo SC 24D

Číslo vzorku	Odpor [Ω]						
2	2,53	1,829	0,6107	0,5654	7,072	15,84	2,38
6	0,1176	0,1524	0,1471	0,5840	0,3176	0,1790	0,1388
21	0,3095	0,3640	0,3025	0,4774	0,5093	0,4145	0,5169
23	0,2580	0,1215	0,1574	0,1050	1,774	0,3280	0,4011
25	0,4076	0,3711	0,4090	0,5434	0,7117	0,3914	0,2427
27	0,1212	0,1156	0,09852	0,101	0,1340	0,1110	0,1794
29	0,4803	0,1790	2,134	1,83	0,3304	0,1150	0,1065
38	1,518	3,673	2,225	4,755	1,215	1,590	0,9631
42	15,04	0,8743	4,300	2,44	1,441	15	1,609
47	2,118	0,4153	8,03	1,724	2,403	2,782	0,4040
48	2,733	4,02	7,64	2,030	2,028	0,4923	3,043
50	0,1169	0,1088	0,1528	0,2214	0,1071	0,2834	1,207
53	1,263	1,382	0,1652	0,5341	0,1688	0,1236	0,1483
55	0,2858	0,8159	0,3670	0,5847	1,361	0,3702	0,3184
59	0,08663	1,744	8,530	4,449	1,804	0,6434	1,648

Mechanické namáhání: Mráz

Číslo vzorku	Tah [N]						
5	57	36	33	28,5	22	23	29
22	38	59	26	28	27,5	44	19
28	22,5	17,5	27	21,5	30	17	14
36	27	31	8	31	24,5	31	31
56	26	21	18	15	odpadl	16	17
58	33	37	25,5	19	27,5	21	23,5

Mechanické namáhání: Vlhko

Číslo vzorku	Tah [N]						
2	8	21	37	16,5	19	9	14
6	26	47,5	22,5	36	31	19,5	26
27	32	33	64	36	52	31	22
42	15,5	18	22	17	24	16,5	28
47	24	21	17	20	18,5	21	22,5
55	22	33	28,5	22	19,5	28	43

Páté měření: Mráz - lepidlo AX 12mn a lepidlo SC 24D

Číslo vzorku	Odpor [Ω]						
3	0,7024	2,116	0,3012	odpadl	0,1591	0,1630	0,1746
18	0,1746	0,1245	0,1854	0,1013	0,1222	0,1122	0,1074
10	0,09353	0,1540	0,1214	0,1201	0,1103	0,1077	0,1099
24	2,224	0,1184	0,1435	0,1402	0,1172	0,1395	0,2179
35	0,3268	0,3479	0,8021	0,3980	0,3094	0,1918	0,9351
37	0,3774	0,3117	0,4184	0,3060	0,5451	0,9222	0,6001
19	0,2088	0,1258	9,240	5,372	0,1822	0,1315	0,1336

Páté měření: Vlhko - lepidlo AX 12mn a lepidlo SC 24D

Číslo vzorku	Odpor [Ω]						
21	0,3478	0,3743	0,3225	0,4987	0,5314	0,4342	0,5907
23	0,2875	0,1313	0,1726	0,1124	1,944	0,3574	0,4276
25	0,4445	0,3906	0,4115	0,4053	0,4140	0,3532	0,2804
29	0,5410	0,1976	5,702	1,742	0,3445	0,1244	0,1159
38	1,514	4,73	0,4350	3,455	1,231	1,797	1,0457
48	3,521	5,560	14,56	1,485	2,055	0,5508	3,624
50	0,1291	0,2975	0,1648	0,1182	0,3140	0,3143	1,133
53	2,254	2,536	0,2012	0,6878	0,4580	0,1263	0,1610
59	140 anomal	4,32	13,35	4,622	1,815	0,7372	2,784

Mechanické namáhání: Mráz

Číslo vzorku	Tah [N]						
35	23	23	19	17,5	18,5	17	15
60	34	27	7,5	46,5	29,5	24	54,5
37	12,5	11,5	8,5	14,5	19	16	16,5
3	12	9	60		20	29	28
19	43	33,5	12,5	6	26	41	54
18	26,5	27	22	31	36	27,5	32,5
10	31	24	23,5	24,5	17	26,5	67

Mechanické namáhání: Vlhko

Číslo vzorku	Tah [N]						
50	23,5	38	15	18,5	19,5	16,5	15
38	13	14	11,5	12,5	15,5	11,5	16,5
59	13	14,5	7	11	12,5	8	9
53	15,5	16	15,5	16	20,5	19,5	14
48	11	6,5	14	13	10	13,5	21
29	11	13,5	5	13,5	6,5	16,5	20,5
23	12	11,5	16,5	19,5	5	12	11,5
21	11	18,5	20,5	18,5	12	19,5	19
25	17,5	20,5	16,5	12,5	8,5	15,5	17,5