VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

APLIKACE LEPIDEL V MIKROELEKTRONICKÝCH SESTAVÁCH
APPLICATIONS OF ADHESIVES IN MICROELECTRONICS ASSEMBLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE — Martin Bolcek
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**
Ústav mikroelektroniky

Student: Martin Bolcek ***ID:*** 174192
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Aplikace lepidel v mikroelektronických sestavách

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši v oblasti využívání lepidel při konstrukci a montáži elektronických sestav. Vytvořte přehled jednotlivých aplikací a definujte vhodné materiály pro jednotlivé použití (elektricky vodivá, tepelně vodivá, nevodivá). Na navrženém testovacím vzorku ověřte vliv vlhkosti na vlastnosti vodivého lepidla.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2017 ***Termín odevzdání:*** 8.6.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
Konzultant:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Předkládaná práce se zabývá problematikou elektricky a tepelně vodivých lepidel v mikroelektronických sestavách. V první části je popsána struktura, vlastnosti a metody nanášení lepidel na substrát. Následující část je experimentální a zabývá se vlivem zvýšené vlhkosti a teploty na vlastnosti lepeného spoje.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektricky vodivá lepidla, tepelně vodivá lepidla, pevnost ve střihu, vlhkostní komora, mikrovýbrus, spolehlivost

ABSTRACT

This bachelor´s thesis deals with issue of electrical and thermal conductive adhesive in microelectronics assembly. It also describes structure, atributes and methods of applying adhesive to a printed circuit boards. The following section is an experimental and discusses environmental influences, as increase humidity and temperature, on properties of conductive adhesive joint.

KEY WORDS

Electicall conductive adhesive, thermal conductiv adhesive, die shear strenght, humidity chambre, micro cut, reliability

Bolcek, M. *Aplikace lepidel v mikroelektronických sestavách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2017, 49 s, Bakalářská práce, Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma **„Aplikace lepidel v mikroelektronických sestavách“** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 8. června 2017 .....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu. Dále bych rád poděkovat Ing. Jiřímu Starému, Ph.D., Ing. Alexandru Otáhalovi a Ing. Josefu Skácelovi za věnovaný čas a pomoc při měření.

V Brně dne 8. června 2017 .....

podpis autora

Obsah

Úvod 10

1. Struktura lepidel 11

1.1. Vazební složka (binder) 11

1.2. Vodivá složka (filler) 13

1.3. Vytvrzení 14

1.4. Nanášení lepidel 17

2. Viskozita a reologie 19

2.1. Termické analýzy 21

2.2. Dynamická mechanická analýza (DMA) 23

3. Vodivá lepidla 25

3.1. Tepelně vodivá lepidla 25

3.2. Elektricky vodivá lepidla 26

4. Metody zkoušení lepených spojů 30

4.1. Mechanické namáhání 31

4.2. Klimatické namáhání 32

5. Experimentální část 34

5.1. Příprava experimentu 34

5.2. Měření elektrického odporu lepeného spoje 36

5.3. Měření mechanické pevnosti lepeného spoje 37

5.4. Mikrovýbrus 41

5.5. Vyhodnocení výsledků 42

6. Závěr 43

Seznam literatury 44

Příloha A: Naměřené hodnoty elektrického odporu 46

Příloha B: Naměřené hodnoty pevnosti lepených spojů ve střihu..... 48

Seznam obrázků:

Obr. 1: Polymerní vazba polyetylénu [14] 11

Obr. 2: Zesítění reaktolastického polymeru [14] 12

Obr. 3: Stříbrné šupinky [12] 14

Obr. 4: Pozlacené Cu částice [12] 14

Obr. 5: Bazaltová vlákna pokrytá stříbrem [12] 14

Obr. 6: Chemická reakce při diferenční kompenzační kalorimetrii [1] 15

Obr. 7: Závislost tepelného toku na době vytvrzení [1] 15

Obr. 8: DSC výstup závislost tepelného toku na teplotě s hodnotami Tg [1] 16

Obr. 9: Princip šablonového tisku [13] 17

Obr. 10: Princip nanášení plnou jehlou [13] 18

Obr. 11: Princip funkce viskozimetru [1] 19

Obr. 12: Závislost smykové rychlosti na smykovém napětí, pseudoplastický mat. [1] . 20

Obr. 13: Závislost smykové rychlosti na smykovém napětí, diletantní materiál [1] 20

Obr. 14: Závislost smykové rychlosti na smykovém napětí, plastický materiál [1] 20

Obr. 15: Graf teplotní degradace materiálu [1] 21

Obr. 16: Graf snížení hmotnosti v důsledku uvolňování plynů při rostoucí teplotě 22

Obr. 17: Koeficient tepelné roztažnosti [1] 23

Obr. 18: Průběh napětí a deformace s fázovým zpožděním [9] 23

Obr. 19: Vzájemný vztah mezi moduly E*,E´ a E“ [1] 24

Obr. 20: Výstup DMA [1] 24

Obr. 21: Teplotní odpor v závislosti na vytvrzení [14] 25

Obr. 22: Stříbrné nanokuličky [12] 26

Obr. 23: Stříbrná nanovlákna [12] 26

Obr. 24: Uhlíkové nanotrubičky [12] 26

Obr. 25: Struktura izotropního lepidla [2] 27
Obr. 26: Struktura anizotropního lepidla [2] 27
Obr. 27: Perkolační teorie [13] 28
Obr. 28: Měření pevnosti v tahu [1] 31
Obr. 29: Měření pevnosti ve střihu [1] 32
Obr. 30: Testovací DPS 34
Obr. 31: Detail lepeného spoje po vytvrzení 34
Obr. 32: Sušička Memmert UF 36
Obr. 33: Klimatická komora SDH01 36
Obr. 34: Velikost testovacího hrotu vůči součástce 38
Obr. 35: Nastavení polohy testovacího hrotu 38
Obr. 36: Graf naměřených pevností lepených spojů pro typ součástky 2010 39
Obr. 37: Graf naměřených pevností lepených spojů pro typ součástky 1208 39
Obr. 38: Graf naměřených pevností lepených spojů pro typ součástky 0805 40
Obr. 39: Zařízení Dage PC2400 40
Obr. 40: Detail odtrhu součástky 40
Obr. 41: Detail mikrovýbrusu, zatížení rezistoru 168 hodin 41
Obr. 42: Detail mikrovýbrusu, zatížení rezistoru 504 hodin 41
Obr. 43: Mikrovýbrus, rezistor bez zatížení 42

Úvod

Rozmach montáže elektronických součástek nastal v šedesátých létech minulého století po vzniku prvního integrovaného obvodu (1958). Součástky byly připojovány pomocí kovů, jako jsou cínové a olověné pájky, nebo pevným spojením zlatých a hliníkových mikrodrátků k nosnému substrátu nebo pouzdru. S postupným rozšířením elektroniky do spotřebního zboží přišla snaha o snížení nákladů a zrychlení výroby. Proto se polymerní substráty a lepidla staly v elektronice především z důvodu jednoduchého výrobního procesu atraktivní variantou, která může v některých případech nahradil pájené spoje. A dodnes jsou považována za důležitý materiál s širokým spektrem využití nejen pro vodivé spoje, ale také tepelně vodivé a nevodivé.

Lepidlo se používá jako funkční i jako konstrukční materiál k montáži a pouzdření součástek. Zajišťuje elektrickou vodivost, odvod tepla z polovodičů, mechanické vlastnosti a integritu pouzdra. Lepidla se vyrábějí ve formě pasty nebo filmu. Uplatnění lepidel se nalezlo také ve výrobě LCD displejů, čipových karet, flexibilních substrátů, sensorů a také jako náhrada pájek v technologii montáže pouzder Flip-chip, Ball Grid Array (BGA), Chip Scale Package (CSP).

Z důvodu nízkých vytvrzovacích teplot lepidla nedochází k tepelnému namáhání nosného substrátu a součástek. Výhodou je i možnost propojovat pouzdra s velmi malou roztečí vývodů. Absorpce vlhkosti, koeficient tepelné roztažnosti, tepelné napětí, tvorba vzduchových dutinek a uvolňování plynů během vytvrzení jsou problémy, kterými se dlouhou dobu zabývá mnoho institucí. Lepidla tak procházejí neustálým vývojem a díky tomu dosahují stále lepších vlastností a parametrů.

Tato bakalářská práce se zabývat rešerší elektricky vodivých a tepelně vodivých lepidel využívaných při konstrukci a montáži elektronických sestav, včetně základních vlastností a jejich struktury. V praktické části je experimentálně sledován vliv zvýšené vlhkosti a teploty na mechanické a elektrické změny vodivého lepidla.

1. Struktura lepidel

1.1. Vazební složka (binder)

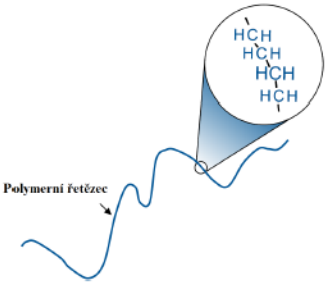
Vazební složka se chová jako nosič a je izolantem. Jelikož je vodivé lepidlo kompozit, používá se polymerních matric, které se dělí na reaktoplastické a termoplastické. Materiálem vazební složky bývají různé typy pryskyřic.

Při výrobě směsí vazebních složek je kladen důraz na viskozitu, smáčivost, přilnavost, reakční dobu a obsah těkavých látek. Viskozita samotné pryskyřice ovlivňuje smáčivost, která je u spojů důležitá, protože udává schopnost povrchu vytvářet slitiny na rozhraní lepidla a základního materiálu, pro zajištění dobrých povrchových, elektrických a mechanických vlastností spoje. Aby lepidlo dosáhlo těchto vlastností, musí být smáčivost až do vytvrzení matrice stálá. Důležitá je také co nejkratší doba k vytvrzení polymeru, tu určuje rychlost chemických reakcí, a omezení zdravotně závadných těkavých látek. Mezi důležité parametry pro výběr pryskyřice patří tepelná odolnost, houževnatost, pevnost, navlhavost, hořlavost, chemická odolnost.

Vazební pryskyřice může být jednosložková nebo dvojsložková. U dvojsložkového lepidla se k základní pryskyřici přidává pro její vytvrzení tvrdidlo. Z tohoto důvodu se některá dvojsložková lepidla vytvrdí při pokojové teplotě. Jsou ovšem dražší a před aplikací se musí obě složky smísit ve správném poměru.

Termoplasty

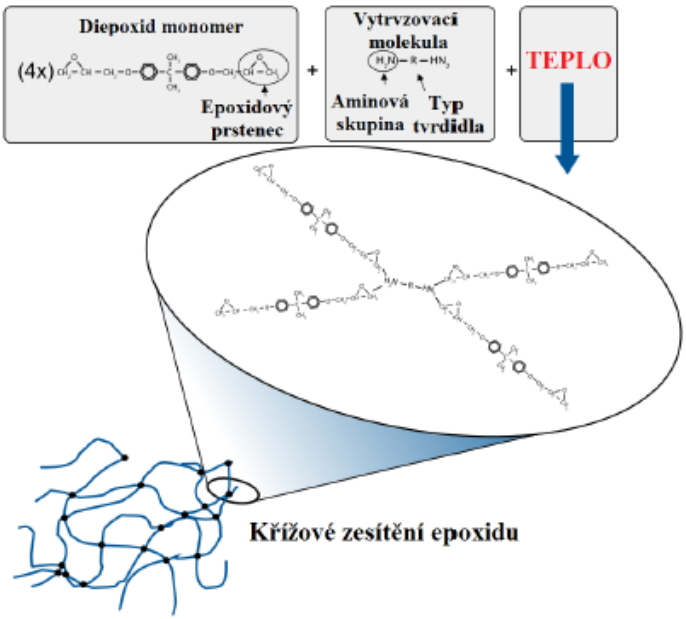
Termoplasty jsou polymery složené z lineárních makromolekul s dlouhými řetězci. Řetězce jsou drženy u sebe pouze slabými interakcemi, které po zahřátí slábnou, a polymer měkne. Jsou tedy opakovatelně zpracovatelné, čehož můžeme především využít při opravách lepeného spoje. Hlavní nevýhodou termoplastických pryskyřic je degradace adheze při vyšších teplotách a také obsahují rozpouštědla, která se vlivem zahřívaní vypařují, čímž vznikají dutiny. Na obrázku č. 1 je lineární polyetylén, nejjednodušší uhlovodíkový termoplastický polymer.



Obr. 1: Polymerní vazba polyetylénu [14]

Reaktoplasty

Reaktoplasty, nebo také termosety jsou plasty na bázi epoxidových pryskyřice, vytvořené reakcí monomerů. Skládají se z prostorově síťované struktury, kde jsou i mezi jednotlivými molekulami kovalentní vazby. Základem je diepoxid monomeru, který má na koncích epoxidový prstenec. K tomuto prstenci se naváže vytvrzovací molekula aminové skupiny s dvěma možnými vazbami. Chemická, tepelná a elektrická odolnost i odolnost proti vlhkosti je závislá na množství volných vazeb vytvrzovadla. S počtem volných vazeb roste odolnost. Tyto materiály jsou teplem vytvrditelné a mohou být tvarovány pouze během procesu vytvrzování.



Obr. 2: Zesítění reaktolastického polymeru [14]

Většina používaných vodivých lepidel je založena na epoxidech z důvodu vysoké tepelné odolnosti a adhezi. Oproti termoplastům jsou také odolnější vůči chemickým vlivům a korozi.

Epoxidové pryskyřice

Epoxidy představují jedny z nejčastěji používaných polymerních materiálu v elektronice. Nevytvrzená epoxidová pryskyřice je viskózní kapalina, u níž přidáním tvrdidel jako anhydridy, polyaminy, můžeme docílit pevného stavu. Z reaktoplastů má největší využití díky houževnatosti, dobré přilnavosti, slušné teplotní i chemické odolnosti a malému faktoru smrštění po vytvrzení. Kvůli přítomnosti hydroxylových skupin jsou navlhavé. Vytvrzovací cyklus je ovlivněn typem obsaženého tvrdidla a přítomností urychlovače nebo katalyzátoru.

Silikonové pryskyřice

Silikony jsou anorganicko-organické polymery, jejichž základní řetězec je tvořen střídajícími se atomy křemíku a kyslíku. V elektronice je tento materiál používán díky svým vlastnostem, iontové čistotě a snadnému zpracování. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří teplotní stabilita, pružnost, malé povrchové napětí a nízká navlhavost. V rozsahu teplot -60 až 180 °C, u speciálních typů i vyšším, má vysokou stabilitu, kvůli které nedochází k teplotnímu stárnutí materiálu. Stálost vlastností v širokém spektru teplot v kombinaci s elastickou povahou silikonů poskytuje dobrou ochranu proti termomechanickým šokům, způsobených rozdílnou teplotní roztažností substrátu a součástek. Nevýhoda těchto pryskyřic spočívá v malé pevnosti v tahu. Tento materiál je často používán v odvětví flexibilní elektroniky.

Polyuretany

Polyuretany jsou polymery skládající se z řetězce organických jednotek, spojených uretanovými vazbami. Struktura polyuretanů může být upravována rozšířením chemického řetězce, proto mohou být navrženy a syntetizovány podle zadaných požadavků. Polyuretan má vysokou tvrdost, pevnost a lepidla na této bázi byla vyvinuta pro splnění požadavků pro flexibilní propojení. Má dobrou přilnavost k flexibilním substrátům a zachovává si nízkou rezistivitu i při ohýbání, vlnění a kompresi.

Polyimidy

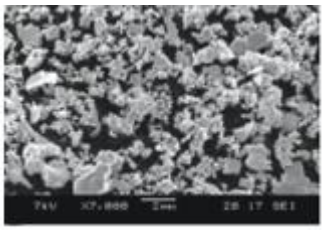
Polyimid je polymer získaný kondenzací diaminu a dianhydridu a jeho vlastnosti se mění se změnou poměru diaminu a dianhydridu. Má výbornou tuhost, flexibilitu, elektrické vlastnosti, iontovou čistotu, ale především vysokou tepelnou odolnost. Teplota skelného přechodu základního polyimidu je v rozmezí od 400 až do 500°C. Ve vytvrzeném stavu může pohlcovat vlhkost. Z důvodu tvorby dutinek, vzniklé vypařováním rozpouštědla, je nutno několikrát vytvrdit.

1.2. Vodivá složka (filler)

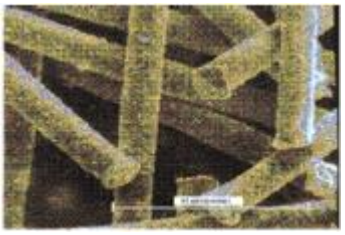
Elektrickou i tepelnou vodivost lepidel zajišťují částice kovů rovnoměrně rozptýlené v izolační matrici. Obsah částic ve vazební složce musí být dostatečný, aby se částice navzájem dotýkaly, a tvořily vodivou síť. Tato koncentrace se u izotropních lepidel obvykle pohybuje od 60 do 80 % objemu lepidla a u anizotropních lepidel mezi 20 až 25 %. Výslednou vodivost tedy ovlivňuje koncentrace, tvar a materiál vodivých částic.

Základní tvary vodivých částic:

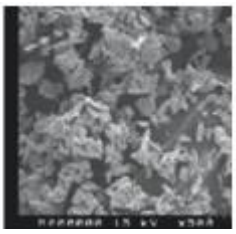
- kuličky o průměru 1-20µm
- lupínky, šupinky různých velikostí
- tyčinky, trubičky, vlákna



Obr. 3: Stříbrné šupinky [12]



Obr. 4: Pozlacené Cu částice [12]



Obr. 5: Bazaltová vlákna pokrytá stříbrem [12]

Nejběžněji používaný materiál vodivých částic je stříbro, pro své výborné elektrické vlastnosti a schopnosti zachovat si vodivost i za působení vlhkosti a různé teploty. Vodivost si zachová, i když se na povrchu stříbra vytvoří oxid stříbrný. Dobrou alternativou ke stříbru je měď. Je levnější, má dobrou elektrickou vodivost, ale vytváří oxid, který je elektricky nevodivý. Proto je nutné částice mědi pokovit stříbrem, nebo zlatem. Platina a zlato je i přes dobrou vodivost a odolnost vůči vlhkosti a teplotě používána minimálně z důvodu vysoké ceny. Nikl a hliník je kvůli horším elektrickým vlastnostem ve většině případu používán v kombinaci se stříbrným, či zlatým pokovením.

Tabulka 1: Parametry vodivých částic

Materiál	Objemová hustota [g/cm^3]	Měrný elektrický odpor [Ω*m]	Tepelná vodivost [W/m*K]
Platina	21,5	$10{,}5*10^{-6}$	72
Zlato	19,3	$2{,}3*10^{-6}$	318
Stříbro	10,5	$1{,}6*10^{-6}$	429
Měď	8,9	$1{,}8*10^{-6}$	401
Nikl	8,9	$10*10^{-6}$	91
Hliník	2,7	$2{,}9*10^{-6}$	237

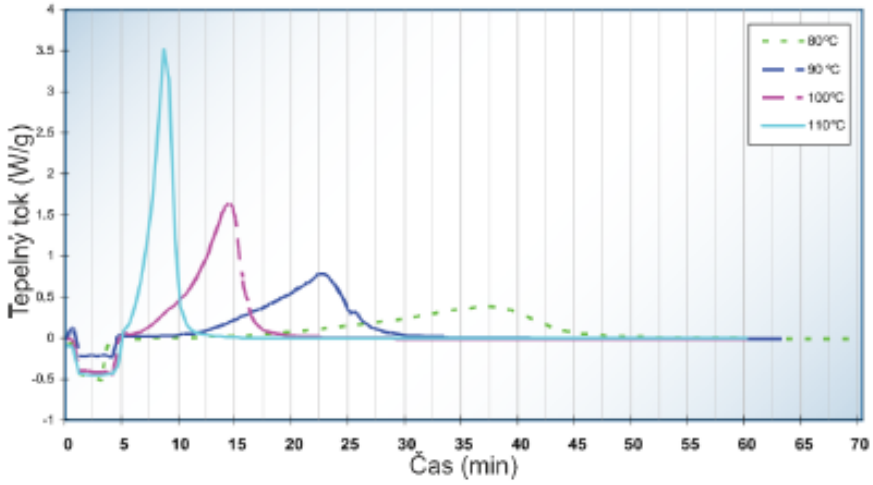
1.3. Vytvrzení

Pro měřené energie potřebné k vytvrzení používáme diferenční kompenzační kalorimetr (DSC). Tento kalorimetr funguje na principu porovnávání absorbovaného nebo generovaného teplotního toku měřeného materiálu s referenčním vzorkem. Do jedné misky se umístí lepidlo a do druhé referenční vzorek, u kterého známe hodnoty chemických změn materiálu. Za dodávání konstantní energie oběma vzorkům se měří rozdíl jejich teplot a tepelný tok. Během chemických změn v materiálu jako jsou tavení, vytvrzení nebo rozklad se uvolní nebo generuje značná část energie. Výstupem DSC je teplotní profil, ze kterého lze rozeznat, o jaký chemický proces jde. Jedná se o závislost tepelného toku na teplotě. Během tavení dochází k přeměně tepelné energie na kinetickou energii kapaliny. Tento proces patří mezi reakce

endotermické, které energii absorbují. Reakce, při kterých se energie uvolňuje, se nazývají exotermické a patří mezi ně krystalizace a vytvrzení.

Obr. 6: Chemická reakce při diferenční kompenzační kalorimetrii [1]

Závislost dodané energie na době vytvrzení materiálu pro různé hodnoty teplot je znázorněná na obr. 10. Z grafu lze vyčíst, že se snižující se teplotou potřebnou pro vytvrzení roste doba vytvrzovacího procesu, proto pro aplikace, kdy není nutné udržovat nízké teplotní zatížení je z výrazné úspory času používaná vyšší teplota vytvrzení. Rychlost vytvrzení také ovlivňuje pevnost spoje. Čím rychleji se lepidla vytvrzují, tím více vzniká vnitřní pnutí v materiálu, které snižuje pevnost ve střihu. Pevnost rozlišujeme na vysokou s výdrží nad 10 kg, střední pevnost je v rozmezí 5–10 kg a nízká pevnost pod 5 kg.



Obr. 7: Závislost tepelného toku na době vytvrzení [1]

Během procesu vytvrzení vznikají chemické vazby mezi jednotlivými molekulami materiálu. Prostorové uspořádání molekul pomocí chemických vazeb zajišťuje materiálu tvrdost a chemickou i tepelnou odolnost.

Po nanesení lepidla a osazení součástek je u většiny jednosložkových lepidel zapotřebí, aby bylo lepidlo vytvrzeno. Teprve po vytvrzení je zajištěno elektricky a tepelně vodivé a mechanicky odolné spojení. Základními metodami vytvrzování jsou vytvrzování UV zářením, UV + teplem, teplem a viditelným světlem.

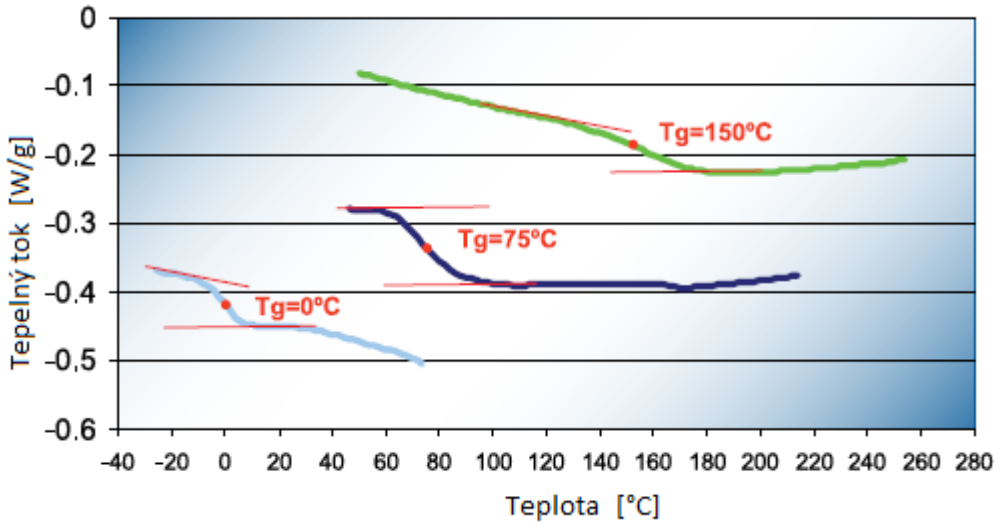
Tepelné vytvrzování lepidel probíhá v pecích s infračerveným ohřevem nebo odporovým. Základní parametry vytvrzování teplota a čas, se u každého typu lepidla liší a záleží na vlastnostech lepidla. S nižší potřebnou teplotou pro vytvrzení roste čas vytvrzení.

Vytvrzení pomocí ultrafialového záření je velice rychle a z toho důvodu i výhodné. Doba vytvrzení se pohybuje v řádu sekund. Nedá se ovšem použit pro všechny typy lepidel a je zapotřebí nanést na plošky větší množství lepidla, než je zapotřebí u tepelného vytvrzování.

Teplota skelného přechodu Tg

Teplota skelného přechodu je jedním z nejdůležitějších parametrů polymerů. Jde o střední hodnotu intervalu v rozmezí 10-20 °C, ve kterém plynule probíhají významné změny fyzikálních vlastností, např. modul pružnosti se mění v rozmezí několika řádů. Jde o moment, kdy se tuhý materiál dostává do stavu kaučukovitého. S rostoucí hodnotou Tg je daný materiál teplotně stálejší.

Hodnota teploty skelného přechodu závisí na volném objemu polymeru, na mezimolekulárních interakcích, molární hmotnosti, a také na vnitřní pohyblivosti řetězců, která souvisí s tuhostí řetězců. Nejnižší Tg mají polymery se slabými mezimolekulárními interakcemi. Naopak hodnota Tg se zvětšuje s rostoucí průměrnou molární hmotností polymeru.



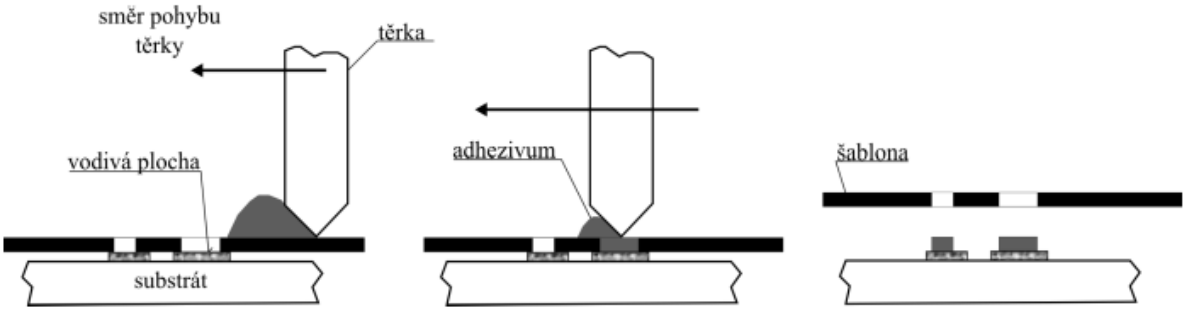
Obr. 8: DSC výstup závislost tepelného toku na teplotě s hodnotami Tg [1]

1.4. Nanášení lepidel

Správné nanesení lepidla je důležitý faktor k dosažené kvalitního a stálého propojení mezi součástkou a nosným substrátem. Mechanická pevnost spoje závisí i na kvalitě a materiálu povrchu substrátu, proto se ještě před nanášením musí očistit. Při použití pájek zajišťuje čistotu okolí spoje tavidlo, to se však u lepení nepoužívá, proto musí být kontaktní ploška očištěna chemicky a mechanicky. Při nanesení velkého množství lepidla může dojít k přetékání a hrozí zkrat. Naopak u malého množství je riziko špatného mechanického upevnění i elektrické vodivosti.

Šablonový tisk

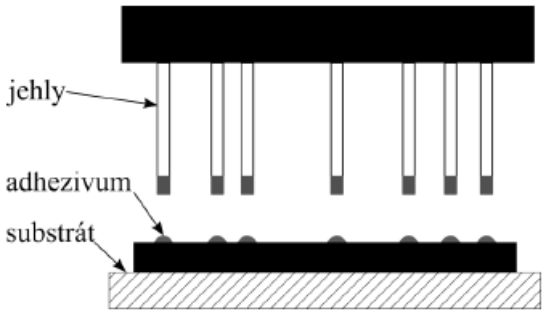
Technologie tisku lepidla přes šablonu je podobná sítotisku. Místo síta se používá šablona z pevného materiálu, ve kterém je vyleptán, nebo laserem vyřezán požadovaný motiv. Šablona je položená přímo na substrátu. Pohybem stěrky s požadovanou rychlostí a úhlem naneseme lepidlo skrz motiv na substrát. Výhodou šablony je tisk motivů s větším rozlišením, definovanou tloušťkou nanášeného lepidla a také vyšší životnost šablony v porovnání se sítem.



Obr. 9: Princip šablonového tisku [13]

Nanášení plnou jehlou

Jedním z dalších způsobů nanášení vodivého lepidla je pomocí hrotů. Jedná se o nejjednodušší metodu. Sada hrotů rozmístěných podle míst kontaktních plošek se namočí do nádoby s nevytvrzeným lepidlem a zachytí kapky lepidla. Celá sada jehel se následně přesune nad substrát a po přitisknutí hrotů přenese na kontaktní plošky.



Obr. 10: Princip nanášení plnou jehlou [13]

Dispenzní nanášení

Často využívané nanášení lepidel je pomocí automatických a poloautomatických dispenzerů. Lepidlo je na kontaktní plošky aplikováno ze zásobníku dutou jehlou pomocí dávkovače. Z důvodu odlišné viskozity jednotlivých lepidel můžeme množství vytlačené pasty upravovat změnou tlaku a doby vytlačování. Některé přístroje mají na nanášecí hlavici ultrazvuk, který promíchává pastu a tím zlepšuje viskozitu lepidla.

2. Viskozita a reologie

Patří mezi nejdůležitější pojmy u určování vlastností adhezivních materiálů. Viskozita popisuje vnitřní tření materiálu a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Čím více vnitřního tření, tím je zapotřebí více síly k rozetření materiálu. Příkladem může být voda, která potřebuje mnohem méně síly k tečení než vysoce viskózní pájecí pasta. Ke změření této síly se používá viskozimetr (obr. 6). Matematicky je viskozita definována vztahem:

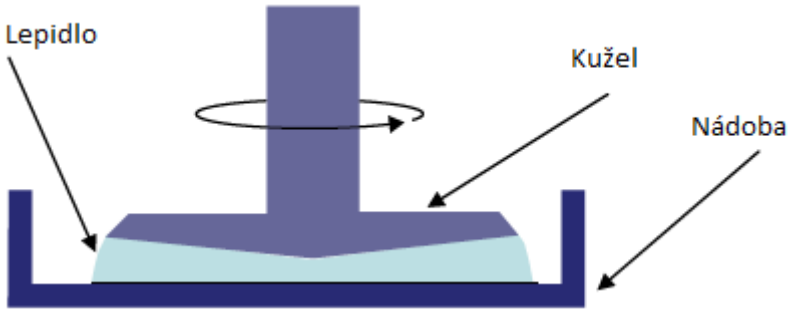
$\eta = F'/S$ = smykové napětí/smykové rychlosti,

její jednotkou je poise [*P*], pro kterou platí:

$1P = 1g/(cm*s)$

$10P = 1kg/(m*s) = Pa*s$

Otáčivý kužel měří točivý moment potřebný k rozetření měřeného materiálu umístěného v nádobce. Točivý moment je přímo úměrný smykovému napětí v materiálu. Pro zjištění výsledné viskozity musíme znát počet otáček, napětí vyvolané točivým momentem a geometrický tvar kuželu. Většinou se viskozita měří při jedné a deseti otáčkách, nebo při deseti a sta otáčkách. Podíl těchto výsledků je označován jako index tixotropnosti.



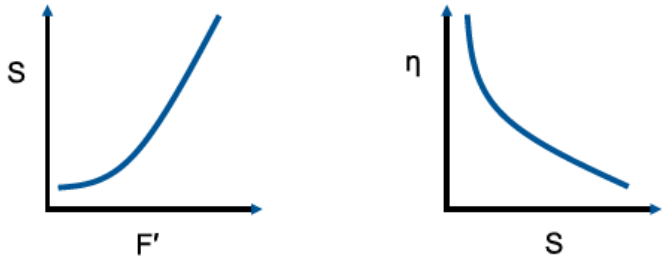
Obr. 11: Princip funkce viskozimetru [1]

Následující grafy zobrazují závislosti tří podskupin nenewtonoských kapalin určujících vlastnosti adhesivních materiálů. Pseudoplastické, dilatantní a plastické tekutiny. V prvním grafu jde o závislost smykové rychlosti na smykového napětí a v druhém viskozity η na smykové rychlosti. Pro výpočet viskozity platí vztah:

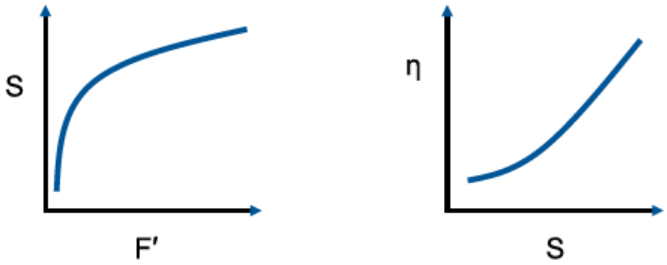
$\eta = F'/S$, kde

F' je smykové napětí, S je smyková rychlost

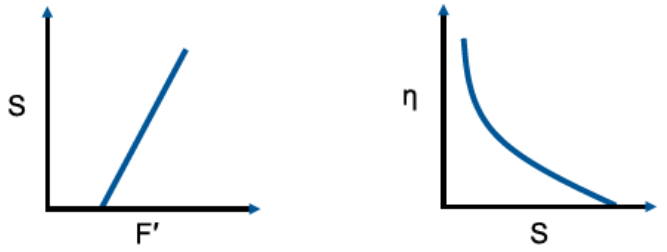
U pseudoplastických tekutin se při zvýšení smykové rychlosti snižuje viskozita. Tyto tekutiny tečou i při malém napětí a s rostoucí smykouvou reychlostí se částice molekuly začnou orientovat ve směru pohybu tekutiny. Dilatantní tekutiny se vyznačuje zvýšenou viskozitou při rostoucí smykové rychlosti. Zvýšením smykové rychlosti se částice uspořádají do vrstev a suspenze dilatuje. Plastické tekutiny dosahujé toku až po překročení počátečního smykového napětí. Po jeho dosažení se původně stabilní struktura tekutiny rozpadne a začne se chovat newtonovsky, tedy téct.



Obr. 12: Závislost smykové rychlosti na smykovém napětí, pseudoplastický mat. [1]



Obr. 13: Závislost smykové rychlosti na smykovém napětí, diletantní materiál [1]



Obr. 14: Závislost smykové rychlosti na smykovém napětí, plastický materiál [1]

Rychlost deformace látky nemusí být pouze funkcí smykového napětí, ale i doby, po kterou smykové napětí působí. Zvětšuje-li se rychlost deformace s dobou působení smykového napětí, jde o tixotropní kapalinu. Naopak u reopexní kapaliny se rychlost deformace zmenšuje

s dobou působení napětí. Pseudoplastické a plastické kapaliny mohou být tixotropní a diletantní kapaliny reopexní.

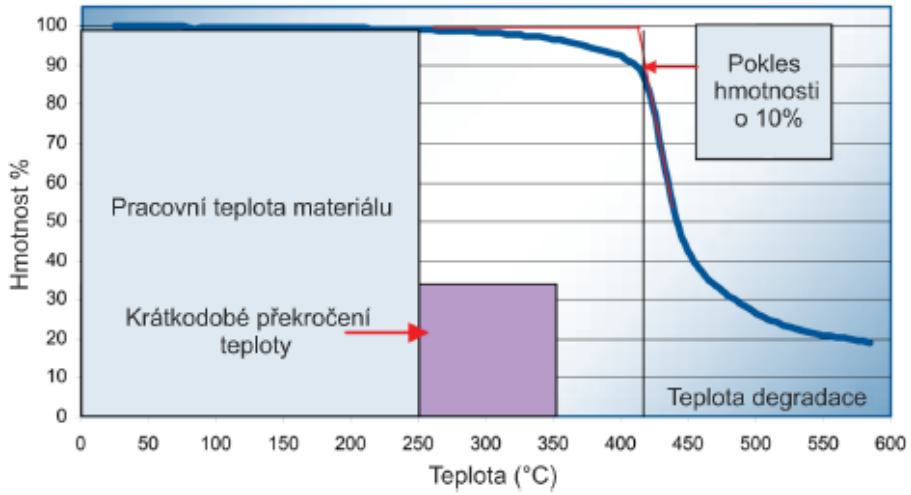
Jelikož se u epoxidových materiálů můžeme setkat se všemi výše uvedenými vlastnostmi kapalin, musíme s nimi počítat při výběru typu nanášení.

2.1. Termické analýzy

Termogravimetrie

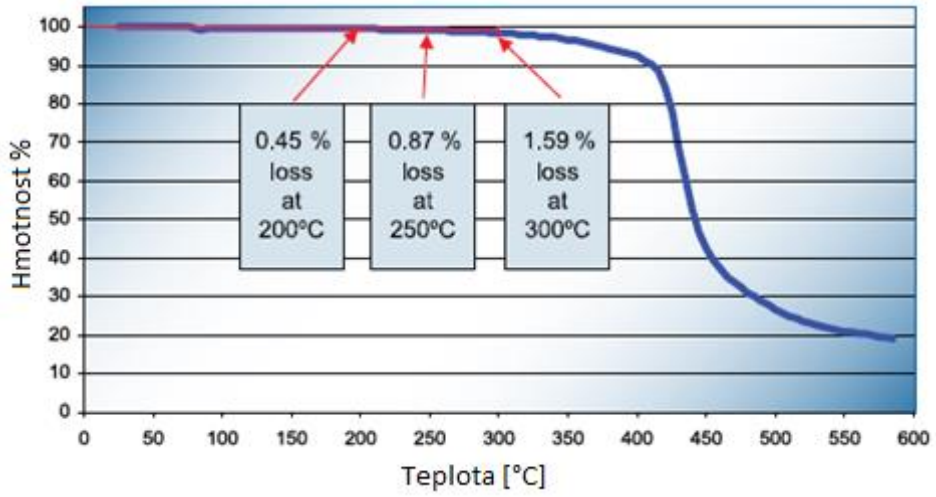
Termogravimetrie je základní metoda termické analýzy. Studuje malé změny hmotnosti probíhající v měřeném systému v závislosti na teplotě. Výstupem je termogravimetrická křivka, která znázorňuje závislost hmotnosti na teplotě. Během měření nesmí dojít k znečištění prostředí, proto probíhá měření v inertní nebo oxidační atmosféře. Tato analýza je používána pro měření stárnutí a degradace materiálů a také teplotní stability s množstvím uvolněných plynů.

Výstupní analýza degradace materiálu je na obr. 13. První metodou zjištění degradační teploty materiálu z grafu je proložení křivek. Výsledný průsečík udává teplotu, při níž dochází k degradaci. Druhou metodou je vyznačení teploty, která způsobuje pokles hmotnosti o 10 %. Hodnota procesního okna je pro pracovní teplotu o 150 °C menší oproti naměřené hodnot a v této části je možné se pohybovat dlouhodobě bez rizika degradace. Procesní okno pro krátkodobé překročení je o 50 °C vyšší a je v něm časově omezený pohyb materiálu.



Obr. 15: Graf teplotní degradace materiálu [1]

Teplotní stabilita udává hodnotu úbytku hmotnosti materiálu při zahřátí na 200 °C, 250 °C a 300 °C. S rostoucí teplotou dochází k většímu uvolňování plynů z materiálu a dochází ke snižování hmotnosti. Nejvyšší normy dovolují úbytek hmotnosti při teplotě 200 °C maximálně 1 %.



Obr. 16: Graf snížení hmotnosti v důsledku uvolňování plynů při rostoucí teplotě

Termomechanická analýza (TMA)

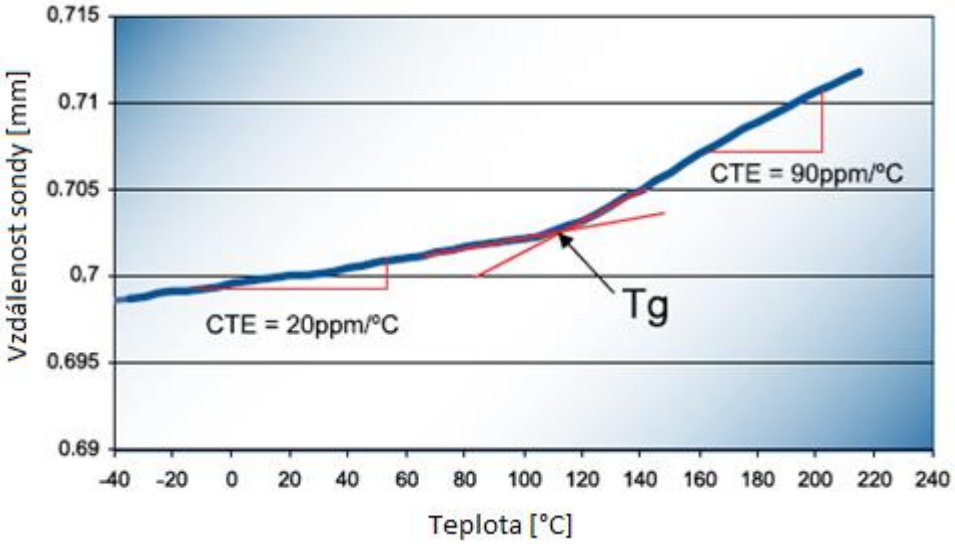
Používá se pro měření velmi malých rozměrových změn materiálu jako funkce teploty, zatímco je materiál vystaven řízenému teplotnímu režimu. TMA umožňuje stanovení lineární expanze materiálu v závislosti na teplotě, kterou známe jako koeficient tepelné roztažnosti (CTE). Metoda se také používá k charakterizaci bodu skelného přechodu a měknutí materiálů s použitím konstantní síly při různých teplotách. Pro měření roztažnosti je sonda přiložena na vzorek s minimálním tlakem. Měření s konstantní silou umožňují stanovení penetrace, ohybu, napětí, smršťování, a bobtnání.

Hodnota CTE v daném teplotním intervalu lze ze sklonu křivky spočítat pomocí vztahu:

$\alpha = \frac{1}{h_0} * \frac{dh}{dT}$ [ppm $* °C^{-1}$], kde

h_0 je původní výška vzorku před měřením, $\frac{dh}{dT}$ je sklon termomechanické křivky.

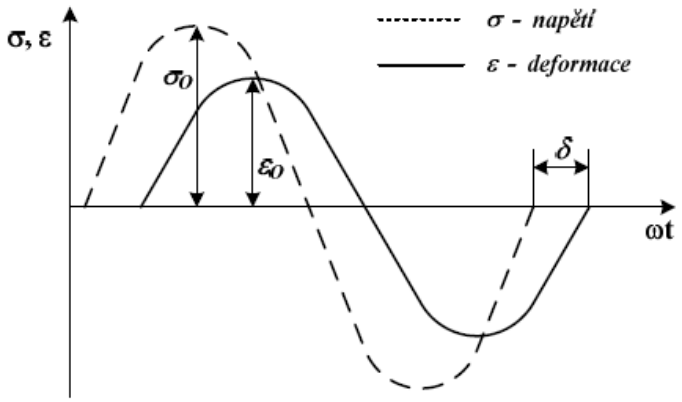
Ze vztahu i křivky na obr. 15 vidíme, že lineární koeficient tepelné roztažnosti vždy vyhodnocujeme v určitém teplotním intervalu. Teplota skelného přechodu se nachází ve zlomu křivky. Tento zlom odpovídá změně lineárního koeficientu tepelné roztažnosti, kdy má polymerní řetězec dostatek tepelné energie k přechodu do vyššího stupně expanze.



Obr. 17: Koeficient tepelné roztažnosti [1]

2.2. Dynamická mechanická analýza (DMA)

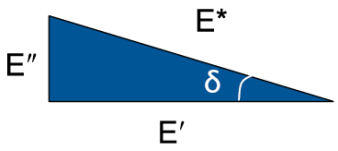
Lepidla jsou během provozu vystavena mechanickému a tepelnému namáhání, která mohou mít vliv na jejich vlastnosti. Mechanické zatížení vyvolává ve vnitřní struktuře materiálu mnoho různorodých jevů. Nejpřesnější metodou pro jejich analýzu je dynamická mechanická analýza. Tato technika sleduje viskoelastické chování materiálu zatíženého oscilující silou jako funkci teploty, během kterého je látka vystavena řízenému teplotnímu režimu. Touto analýzou lze měřit teplotu skelného přechodu, teplotu tavení, koeficienty teplotní roztažnosti, krystalitu a další materiálové vlastnosti. DMA můžeme popsat jako aplikaci kmitající síly na vzorek a sledování zpětné vazby materiálu na tuto sílu. Ze získaných údajů o dynamické oscilační síle a statické upínací síle lze odvodit vlastnosti materiálu jako je viskozita, fázové zpoždění a modul pružnosti.



Obr. 18: Průběh napětí a deformace s fázovým zpožděním [9]

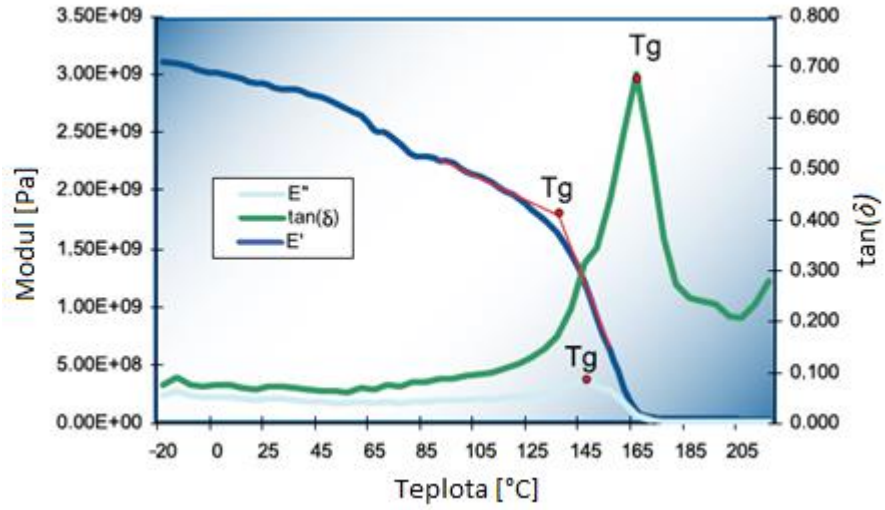
Ztrátový modul se vypočítá z pružnosti a tuhosti. S rostoucí pružností materiálu klesá fázový úhel δ a E* se přibližuje E´. Pomocí ztrátového faktoru a fázového úhlu lze určit typ materiálu. Viskózní materiály mají ztrátový faktor nekonečně velký (δ = 90°) a elastické materiály mají ztrátový faktor nulový (δ = 0°).

$$\tan(\delta) = E'' / E'$$



Obr. 19: Vzájemný vztah mezi moduly E*,E´ a E“ [1]

Obr. 18 je ukázkou častého výstupu DMA měření. U každého z měřených parametrů dochází k výrazné změně křivky. Tato změna je způsobena dosažením teploty skelného přechodu a po vyhodnocení všech tří parametrů dostaneme pro Tg tři různé hodnoty. Každá z nich má svou fyzikální podstatu. U elastického modulu E´ definuje odklon křivky od dosavadního směru teplota, při které dochází ke ztrátě pevnosti materiálu. Materiál tedy není již schopen vydržet zatížení bez následku deformace. Nejvyšší vrchol ztrátového modulu E“ představuje teplotu, při které polymerní materiál podstupuje maximální změnu v pohyblivosti polymerních řetězců. Metoda měření Tg pomocí ztrátového činitele *tan δ* byla prvním měřitelným parametrem dynamické mechanické analýzy. Vrchol *tan δ* charakterizuje tlumící vlastnosti materiálu.



Obr. 20: Výstup DMA [1]

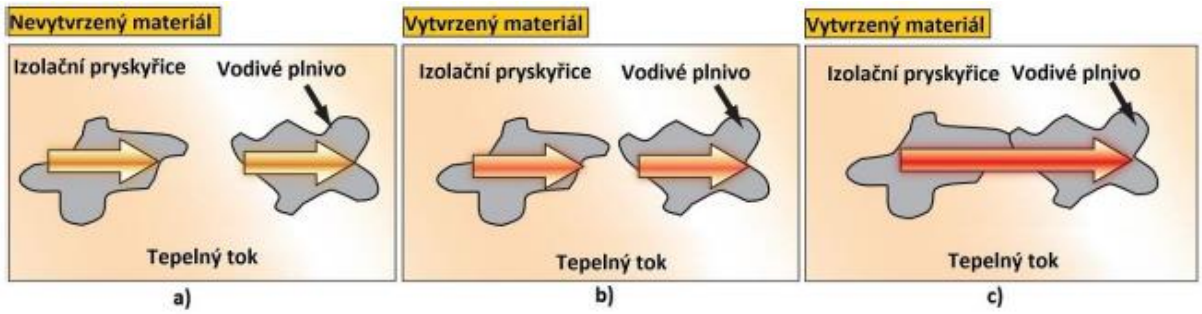
3. Vodivá lepidla

3.1. Tepelně vodivá lepidla

V pokračujícím úsilí o miniaturizaci čipů a jejich pouzder má tepelná vodivost stále vyšší význam. I přes menší rozměry polovodičových čipů roste počet obsažených tranzistorů, přičemž každý spotřebovává část dodané energie na teplo. Aby vlivem tepla nedošlo k poškození součástky je zapotřebí řešit odvod tepla od samého začátku návrhu. Z rozměrových důvodů nemůžeme vždy použít chladič, proto je zapotřebí hledat nové možnosti chlazení sestavy, mezi nimiž je i odvod tepla pomocí tepelně vodivých lepidel. Pro přenos tepla je důležitým parametrem tepelná vodivost materiálu, která definuje množství tepla převedeného mezi shodnými plochami s rozdílnými teplotami za jednotku času.

$$\lambda = \frac{d * Q}{t * S * \Delta T} \; [W * m^{-1} * K^{-1}]$$

Na obr. 28 můžeme vidět princip nastavení teplotního odporu adhesivních materiálů. Část a) znázorňuje nevytvrzený materiál, kdy jsou od sebe tyto dvě složky vzdáleny tak, že tepelný tok je velmi malý. Na části b) lze vidět vytvrzený materiál, kde došlo ke smrštění a materiál lépe vede. V části c) je dokonale vytvrzený materiál, který dosahuje největšího možného teplotního toku.



Obr. 21: Teplotní odpor v závislosti na vytvrzení [14]

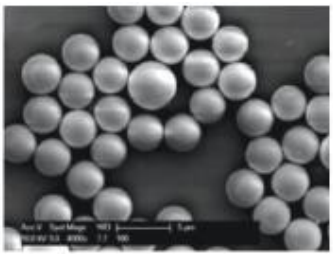
Přilepením součástky k substrátu teplo-vodivým lepidlem zajistíme fixaci, kterou oceníme při pájení, ale především odvod tepla z pouzdra součástky na DPS. Důležité využití má lepidlo v pouzdře flip-chip, kde má funkci underfillu.

Underfill slouží jako výplň mezi kuličkami pájky a čipem pouzdra flip chip. Důvodem jeho použití je rozdílná hodnota teplotní roztažnosti spojovaných materiálů, kdy čip má 2,6 ppm/°C a nosný substrát 12-16 ppm/°C. Pro zajištění spolehlivosti je potřeba tyto síly vyrovnat. Underfill je možné nanášet pomocí dispenzeru, kdy nanesené lepidlo pronikne mezi kapiláry kuličkové pájky. Nevýhodou této metody je čas potřebný k prostoupení underfillu pod součástkou. Proto se spíše využívá nanesení lepidla před montáží a následného zatlačení pouzdra.

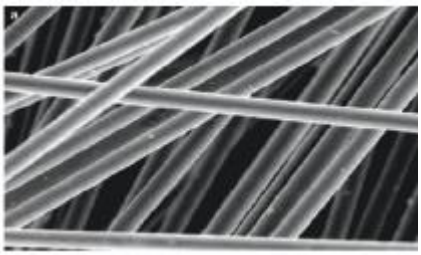
3.2. Elektricky vodivá lepidla

Elektricky vodivá lepidla se skládají ze dvou složek, kdy každá plní určitou funkci. Vodivou složku tvoří vodivé částice různých tvarů zajišťující elektrické vlastnosti lepidla. Vazební složka má funkci izolační matrice, která tyto částice chrání před mechanickým a klimatickým namáháním. Odpor lepeného spoje se skládá z odporu částic plniva, odporu tunelování a přeskokového odporu.

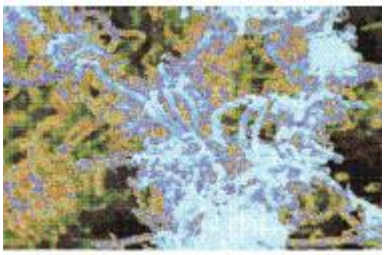
Pro dosažení vyšší elektrické vodivosti lepených spojů se vazební složka doplňuje nanočásticemi tvarů kuliček, drátků, nebo trubiček. Mezi mikročásticemi a nanočásticemi vzniknou dodatečné můstky, čímž vzroste hustota vodivé sítě a klesne její elektrický odpor. Lepší vodivost může taky způsobit intenzivní míchání lepidla před aplikací. Mícháním vznikají smykové síly, které uvolní ionty rozpouštědla, které obklopují vodivé částice. Tím vzroste pravděpodobnost spojení částic.



Obr. 22: Stříbrné nanokuličky [12]



Obr. 23: Stříbrná nanovlákna [12]



Obr. 24: Uhlíkové nanotrubičky [12]

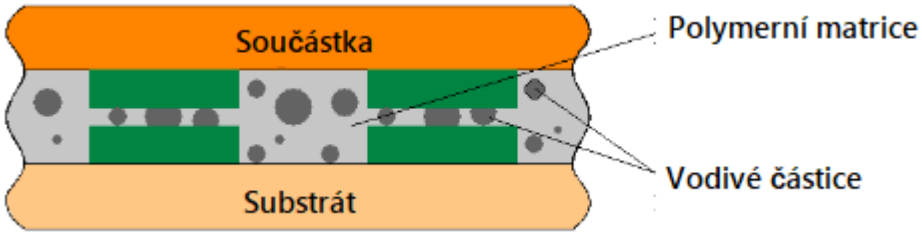
Izotropní vodivá lepidla (ICA)

Základním rysem, pomocí kterého rozlišujeme izotropní vodivá lepidla od anizotropních vodivých lepidel, je objem elektricky vodivých částic uvnitř vazební složky. Hranicí mezi těmito dvěma lepidly určuje perkolační práh. Je to obsah vodivých částic, při kterém se začne materiál chovat jako vodič. U takto vysoké koncentrace se částice dotýkají a tvoří tak vodivou síť. Koncentrace částic v okolí prahu se pohybuje mezi 25-30 %. Izotropní vodivá lepidla mají podíl vodivé složky nad perkolačním prahem, což jim poskytuje vodivost ve všech směrech. Tato lepidla se využívají pro montáž jednoduchých dvou vývodových součástek na desku plošného spoje, i pro pouzdra integrovaných obvodu s větší roztečí vývodů. Lepidlo se nanáší pouze na místo spojení, kontaktní plošku.

Obr. 25: Struktura izotropního lepidla [2]

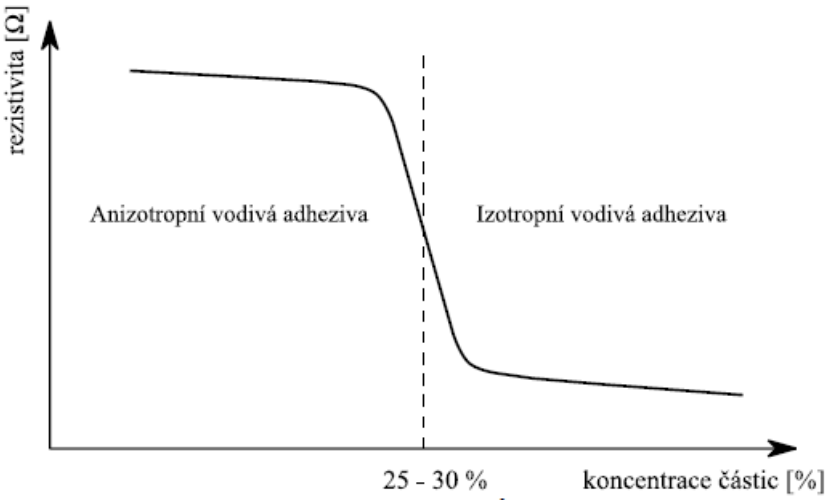
Anizotropní vodivá lepidla (ACA)

Anizotropní vodivá lepidla a anizotropní vodivé filmy vykazují jen jednosměrnou vodivost, a to ve směru osy Z, tedy vertikálním. Dle perkolační teorie je tato směrová vodivost dosažena nízkým podílem vodivých částic v izolační matrici. Jedná se o 10-25 % celkového objemu lepidla. Při takto nízkém podílu pojiva nedochází k vytvoření souvislé vodivostní sítě, a tudíž elektrické vodivosti v ostatních směrech. Vazební složka těchto lepidel bývá většinou z termoplastických pryskyřic. Jelikož není lepidlo vodivé v horizontálním směru, může se nanést po celé délce spojovaných kontaktů, aniž by došlo ke zkratu mezi vývody součástky. Tím se usnadní aplikace lepidla a lze dosáhnout propojení i mezi vývody vzdálenými <0,4mm. Vzdálenost vývodů od sebe je omezena velikostí vodivých částic.



Obr. 26: Struktura anizotropního lepidla [2]

Anizotropní vodivé lepidlo ve formě pasty je tvořeno polymery tvaru kuliček s nanesenou stříbrnou vrstvou zajišťující vodivost. Vodivé kuličky jsou pokryté tenkou izolační vrstvou. Na lepidlo nanesené na kontaktních ploškách substrátu jsou přitlačeny vývody osazované součástky. Tlakem vývodů na lepidlo se izolační vrstva poruší a během současného vytvrzení probíhajícího za zvýšené teploty dojde k elektrickému vodivému spojení.



Obr. 27: Perkolační teorie [13]

Pro připojení pouzder s poduškovými vývody se také používá fólie z anizotropního vodivého lepidla, která se vloží mezi součástku a nosný substrát. Přitlačením součástky a vytvrzením lepidla dojde k vodivému propojení vývodů součástky a kontaktních plošek. Folie jsou vyráběny ve velikostech odpovídajících vyráběných pouzder.

Z důvodu nízkého obsahu vodivých částic v lepidle, existuje pravděpodobnost, že se v místě spoje nebudou nalézat tyto částice a nedojde k vodivému spojení. Za předpokladu, že částice jsou v lepidle uspořádány dle Poissonova rozdělení, je při obsahu částic 3-15 % a velikosti kontaktních plošek 100μm pravděpodobnost tohoto jevu 10^{-13}-10^{-3}. Setkat se můžeme i s případem, kdy je obsah částic mezi vývody součástky, tak vysoký, že dojde ke zkratu. Pravděpodobnost zkratu při 7-15 % podílu vodivé složky v lepidlu je okolo 10^{-15}.

Vlastnosti elektricky vodivých lepidel

V tabulce 2 můžeme vidět srovnání elektricky vodivých lepidel s bezolovnatými pájkami. Ve většině sledovaných vlastností jsou lepidla horší. Mechanický odpor mají jen zanedbatelně větší a mechanické vlastnosti jsou podobné, lepené spoje mají ovšem vyšší šum a nelinearitu voltampérové charakteristiky. Při nanášení lepidel musíme dbát na čistotu a zajistit, aby povrch substrátu byl suchý, protože vlhkost se během vytvrzování mění v páru, což má za následek horší elektrické i mechanické vlastnosti lepeného spoje. Ale i přes vyšší cenu jsou specifické aplikace, kdy se lepidla před pájkami upřednostňují. Díky nižší teplotě vytvrzení nedochází k teplotnímu namáhání osazených součástek i substrátu jako u procesu pájení. Možností propojovat kontakty s velmi malou roztečí našly lepidla uplatnění v připojování pouzder čipů k desce plošných spojů. V některých aplikacích ACA slouží k propojení čipu s pouzdrem.

Tabulka 2: Porovnání pájek s elektricky vodivými lepidly

Vlastnosti spoje	**Elektricky vodivé lepidlo**	**Pájka**
Vodivost	izotropní	izotropní
	anizotropní	
Odpor	srovnatelný	srovnatelný
Šum	vyšší	nižší
Nelinearita	vyšší	nižší
Stabilita	nižší	vyšší
Odolnost proti navlhání	nižší	vyšší
Vliv materiálu spojovaných částí	srovnatelný	srovnatelný
Vliv kvality spojovaných povrchů	vyšší	nižší
Adheze	nižší	vyšší
Iontová migrace	je možná	ne
Spolehlivost	nižší	vyšší
Životnost	nižší	vyšší
Cena	vyšší	nižší

4. Metody zkoušení lepených spojů

Od samotné výroby lepidla, přes jeho uskladnění, nanášení a finální vytvrzení může docházet ke změnám vlastností lepidel, tedy degradačním mechanismům, které snižují životnost a spolehlivost vytvořeného lepeného spoje. K těmto změnám materiálu nedochází jen během výrobního procesu, ale i doby, kdy již jako celek, elektronické zařízení funguje. Pro dosažení vyšší spolehlivosti vznikly metody pro měření a testování různých vlivů právě na kvalitu lepeného spoje.

Rozdělení podle poškození, nepoškození lepeného spoje:

- destruktivní
- nedestruktivní

Metoda destruktivního zkoušení určuje hranici, kdy dojde k nevratnému poškození. U lepených spojů se využívá především namáhání spoje v tahu, střihu, odlupování, či vibracemi. Při nedestruktivním namáhání je nastavena pevná hodnota, do které zařízení působí na testovanou součástku, aniž by došlo k jejímu poškození.

Rozdělení podle metody testování:

- mechanické
- vlhkostní
- tepelné cyklování
- kombinace teplotní a vlhkostní

Mechanické testování může být doplněno podmínkami, během kterého probíhá. Například za zvýšených klimatických podmínek, jako je teplota a vlhkost, které slouží k simulaci zrychlené životnosti.

Rozdělení podle délky trvání testování:

- dlouhodobé
- středně dlouhé
- krátkodobé

Dlouhodobé testování se provádí za pokojové teploty a délka testování je v řádu několika let. U středně dlouhého testování se teplota velmi pomalu zvyšuje a trvá několik měsíců. Zde patří zkouška teplotním cyklováním, teplotním šokem a vibracemi. Zkoušky ohýbání, odtržení a odlupování se řadí mezi krátkodobé testování.

4.1. Mechanické namáhání

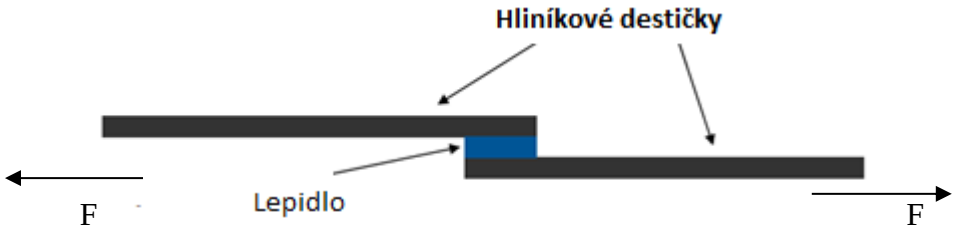
Zkouška pevnosti v tahu

Pevnost lepidel v tahu se testuje z důvodu měření pevnosti spoje. Lepidlo je umístěné mezi dvě hliníkové destičky, které jsou konstantní rychlostí taženy od sebe. Tažná síla roste, dokud se spoj nerozlepí. Pevnost v tahu se počítá pomocí vzorce:

$P = F / S$ [psi],

kde S je plocha lepeného spoje, F je síla v tahu.

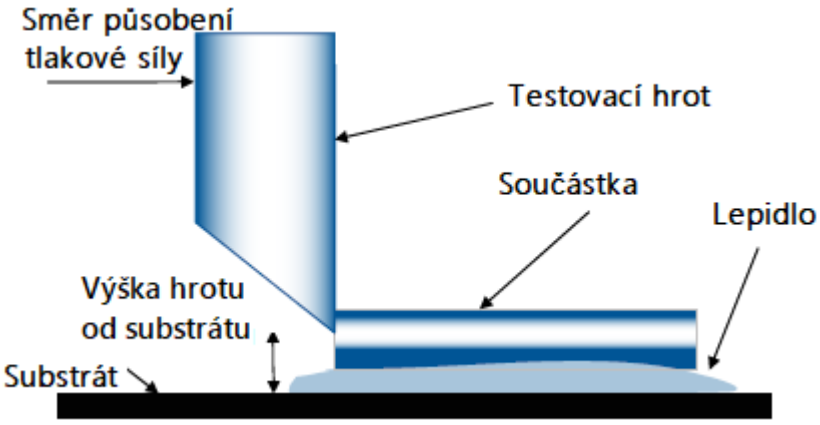
Krom hodnot pevnosti, jsou důležité i poznatky o způsobu rozlepení. Při adhesivním rozlepení zůstane lepidlo jen na jedné z destiček. V případě, kdy je síla lepeného spoje nižší, dochází ke kohezivnímu rozlepení, u kterého lepidlo zůstane na obou destičkách.



Obr. 28: Měření pevnosti v tahu [1]

Zkouška pevnosti ve střihu

Význam tohoto testování spočívá v určení soudržnosti materiálu použitého ke spojení SMD součástky nebo čipu k substrátu. Určení zmíněné soudržnosti je založeno na měření síly působící na součástku, až do jejího odtržení, z lepeného spoje umístěného na substrátu. Síla působí na součástku prostřednictvím části zařízení nazývaná hrot. Hrot působí pouze na danou součástku a její tvar a velikost by měla odpovídat testované součástce. Podmínka pro úhel, pod kterým působí kontaktní hlavice na hranu součástky je 90°.



Obr. 29: Měření pevnosti ve střihu [1]

Zkouška pevnosti v odlupování

Tato metoda testování je možná, pokud je jeden ze spojovaných materiálů ohebný. Úhel odlupování se určuje podle tuhosti spojovaných materiálů, nejčastěji 90 a 180°. Na obr. je příklad znázornění pro testování pevnosti lepeného spoje v odlupování. V tomto případě se jedná o odlupování pod úhlem 90°, kde je čip k flexibilnímu substrátu přilepen vodivým lepidlem a F znázorňuje sílu, kterou je tažena hlava uchycená k mechanismu ve svislém směru.

Zkouška vibracemi

Tato zkouška slouží ke zjištění doby únavy lepeného spoje. Testování odhaluje potencionální risk poruchy, která by mohla být zapříčiněna malými prasklinami nebo trhlinami v lepeném spoji, a právě z toho určit dobu životnosti spoje. Doba testování vibracemi zabírá řádově týdny až měsíce, místo několika let testování v provozu. Toto zrychlené testování slouží hlavně ke snížení časového horizontu a finanční nákladnosti. Frekvenční rozsah pro tyto zkoušky bývá od několika hertzů do několika kilo-hertzů při nízkých amplitudách vibrací, je možné využít jednotky giga-hertzů. Celý vibrační systém se skládá ze zařízení, které simuluje otřesy, svorek pro uchycení testovaného vzorku, generátoru vstupního signálu a příslušný software pro zachycení měření.

4.2. Klimatické namáhání

Zkouška tepelného cyklování

Pro testování teplotního cyklování dochází k přechodu z jedné extrémní teploty do druhé. Mezi nejpoužívanější rozsah tepelného cyklování je od -40 °C do +125 °C. Průběh změn teplot probíhá ve velmi pomalém časovém intervalu (až stovky minut). Celý cyklus může trvat až několik hodin. Počet cyklů u tohoto testování je od jednotek stovek do jednotek tisíců a je většinou nižší než pro zkoušení tepelným šokem.

Zkouška teplotním šokem

Teplotní šok je pro lepené spoje velmi agresivní metoda testování. V průběhu tohoto testu dochází k rychlým změnám teplot z jedné extrémní teploty do druhé mnohem rychleji, než je tomu u tepelného cyklování. Přechod mezi extrémními teplotami může trvat 1 minutu. Teplota se na 14 minut ustálí v jedné krajní teplotě a následuje jednominutový přechod do druhé krajní hodnoty na 14 minut. Celková doba jednoho cyklu tedy trvá 30 minut s počtem cyklů až 10 000.

Zkouška kombinací teploty a vlhkosti

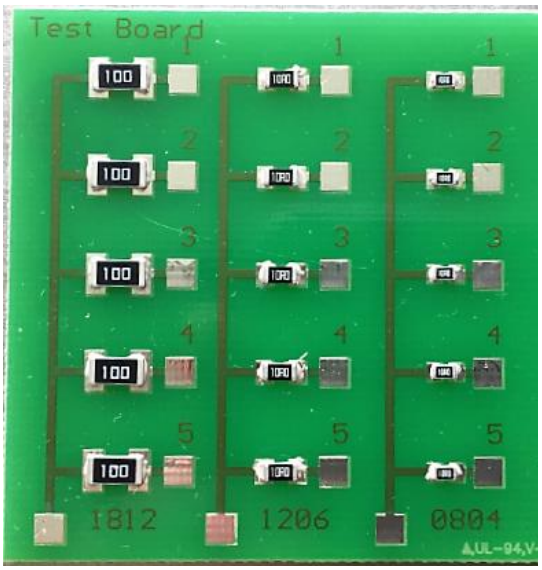
Elektricky vodivá lepidla jsou na prostředí se zvýšenou vlhkostí velmi citlivá. Proto se tato metoda testování provádí poměrně často. Polymerní materiály absorbují vlhkost a v důsledku toho může dojít k degradaci materiálů. Dále při tomto testu hrozí, že dojde k deformaci matrice lepidla, což může zapříčinit zhoršení kontaktu mezi jednotlivými vodivými částicemi lepidla a dojde tedy k nárůstu měrného odporu. Jednou z možných metod ochrany je použití krycího materiálu, který chrání lepený spoj proti nepříznivým vlivům prostředí, a to hlavně proti vlhkosti a korozi. Jako jeden z ochranných materiálů se používá epoxidová pryskyřice, ta ale časem také propouští vlhkost a nemůže tedy v tomto směru poskytnout plnohodnotnou ochranu.

5. Experimentální část

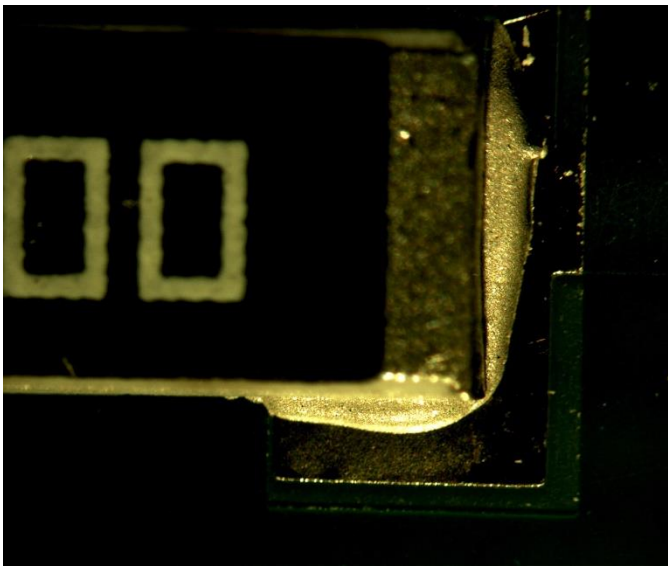
Cílem praktické části bylo zjistit, zda má zvýšena teplota a vlhkost vliv na elektrické a mechanické vlastnosti lepeného spoje. Jako vzorek byly použity testovací DPS s rozměry pájecích plošek pro SMD rezistory o velikostech 2010, 1206, 0805. Destičky byla navrženy pro umístění pěti rezistorů každého typu. Bylo tedy osazeno 90 rezistorů, což je pro relevantnost testování dostačující množství. Testované vzorky byly zatíženy klimatickým namáháním, které se řídilo normou ČSN EN 60068-2-67. Pro určení mechanické pevnosti spoje bylo použito zařízení Dage PC2400 umožňující měřit sílu ve střihu SMD součástek. Při nastavování tohoto zařízení jsme se drželi normy IEC 62137-1-2.

5.1. Příprava experimentu

Testovací desky plošných spojů jsou vyrobeny z materiálu FR-4 tvořeného epoxidovou pryskyřicí a skelným laminátem plátovaným měděnou folií. Tento materiál se vyznačuje nízkou navlhavostí, vyšší teplotou skelného přechodu a nízkou hodnotou tepelné roztažnosti. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších materiál pro výrobu DPS. Pájecí plošky jsou upraveny technologií HAL (Hot Air Levelling), kdy je měď povrchově upravena vrstvou PbSn, která slouží jako ochrana mědi před oxidací.



Obr. 30: Testovací DPS



Obr. 31: Detail lepeného spoje po vytvrzení

Pro tuto práci bylo použito elektricky vodivé izotropní lepidlo H31D od firmy EPO-TEK. Jedná se o hladké tixotropní jednosložkové lepidlo. Jeho elektrickou vodivost zaručují částice stříbra a je vhodné pro spojování polovodičů, rezistorů, kondenzátorů, tranzistorů a diod. Přehled vlastností lepidla je zobrazen v tabulce 3. Lepidlo se vytvrzuje při teplotě 150 °C po dobu jedné

hodiny. Doba zpracovatelnosti, která definuje dobu uskladnění, po kterou se podstatně nezmění viskozita lepidla je tři měsíce.

Tabulka 3: Vlastnosti elektricky vodivého lepidla EPO-TEK H31D

EPO-TEK H31D		
Teplota skelného přechodu (Tg) [°C]		110
Koeficient tepelné roztažnosti (CTE) [ppm/°C]		178
Teplota degradace (TGA) [°C]		350
Index tixotropnosti		3,9
Hmotnostní úbytek [%]	200 °C	0,08
	250 °C	0,18
	300 °C	0,43
Pevnost v tahu [psi]		1,152
Pevnost ve střihu [psi]		1,7
Objemový odpor [Ohm-cm]		0,0005
Tepelná vodivost [W/mK]		3,48

Před samotným nanášením bylo zapotřebí lepidlo temperovat a pro dosažení požadované viskozity i promíchat. Lepidlo bylo nanášenou pomocí hrotu. Jedná se o technologicky nejméně náročný způsob aplikace a její výsledek je silně ovlivněn přesností obsluhy. Konec hrotu byl namočen do nádoby s lepidlem a následně přenesen na požadovanou kontaktní plochu DPS. Tato metoda je v porovnání s šablonovým tiskem pomalá, a především není možné dosáhnout nanesení přesného množství lepidla. Proto může docházet po osazení součástek ke zkratu, při příliš vysokém množství, a naopak k odloupnutí součástky, při nízkém množství naneseného lepidla.

K osazení SMD rezistorů byla použita pinzeta, pomocí které byl rezistor umístěn na kontaktní plošky s již naneseným lepidlem, vycentrován a pro zlepšení adheze mezi ploškou a rezistorem i přitlačen směrem k substrátu. V rámci tohoto experimentu se použily SMD rezistory firmy Yageo o velikosti 10 Ω, jejichž hodnota je garantována s odchylkou 1 %. Vytvrzení lepidla probíhalo při 150 °C po dobu jedné hodiny v sušičce Memmert UF.

Pro klimatické namáhání lepeného spoje byla vybrána testovací metoda se zvýšenou teplotou a vlhkostí. Pro simulování těchto klimatických podmínek byla k dispozici komora Shjianheng SDH01, která umožňuje nastavení teploty v rozsahu 0–100 °C a vlhkost 20–98 %. Testování se řídilo normou ČSN EN 60068-2-67, která uvádí testování vzorků při teplotě 85 °C a 85 % relativní vlhkosti po dobu 168 a 504 hodin. Pro tvorbu vlhkosti se musí použít destilovaná voda. Jelikož se komora chová jako otevřený systém, bylo zapotřebí udržovat dostatečné množství destilované vody v zásobníku, aniž by se hladina nedostala pod úroveň čerpadla.

Obr. 32: Sušička Memmert UF

Obr. 33: Klimatická komora SDH01

Formát testování byl nastaven následovně: Dvě osazené DPS, tedy 30 vzorků, sloužily jako referenční vzorky bez klimatického zatížení. Dalších 30 vzorků bylo namáháno v komoře po dobu 168 hodin a poslední sada třiceti vzorků byla namáhána po dobu 504 hodin.

5.2. Měření elektrického odporu lepeného spoje

Pro měření byly vybrány rezistory s nízkou hodnotou odporu, tedy 10 Ω, aby případné změny velikosti odporu lepeného spoje vzniklé vlivem klimatického namáhání bylo možné rozpoznat. Odpor byl měřen multimetrem UNI-T UT804 dvoubodovou metodou. Hlavní parametry multimetru, které určují přesnost měření jsou při rozsahu 400 Ω následující: rozlišení 0,01 Ω, přesnost měřené hodnoty 0,3 % a počet digitů 40. Každý rezistor byl změřen před i po klimatickém namáhání. Naměřené hodnoty elektrického odporu jsou zobrazeny v tabulkách v příloze A a jejich průměrné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4. Do výpočtu průměru nebyly zařazeny součástky, u nichž došlo ke zkratu, a jejich naměřené hodnoty tedy značně ovlivňovaly výsledek.

Tabulka 4: Průměrné hodnoty elektrického odporu lepených spojů

Doba namáhání [hod]	0			168		
Součástka	2010	1206	0805	2010	1206	0805
Průměr [Ω]	10,154	10,200	10,160	10,210	10,222	10,180
Směrodatná odchylka [Ω]	0,053	0,047	0,049	0,054	0,048	0,056
Doba namáhání [hod]	0			504		
Součástka	2010	1206	0805	2010	1206	0805
Průměr [Ω]	10,124	10,314	10,070	10,168	10,340	10,103
Směrodatná odchylka [Ω]	0,035	0,200	0,033	0,058	0,218	0,037

5.3. Měření mechanické pevnosti lepeného spoje

Pro měření mechanické pevnosti lepených spojů bylo použito zařízení Dage PC2400, pomocí kterého se měří zkouška pevnosti ve střihu. K nastavení zařízení i následnému měření byly použity poznatky z normy IEC 62137-1-2. Parametry nastavení stroje se lišily v závislosti na typu součástky.

Nastavení parametrů pro rezistory typu 2010:

- Rychlost hrotu při testování výšky od substrátu: 325 µm/s
- Výška hrotu od substrátu při testu: 150 µm
- Rychlost posuvu testovacího hrotu: 20 µm/s
- Vzdálenost, kterou hrot ujede po odtržení součástky: 500 µm
- Rozsah zatížení: 10 kg
- Procentní pokles z hodnoty rozsahu, při kterém dojde k ukončení testu: 10 %
- Test: destruktivní

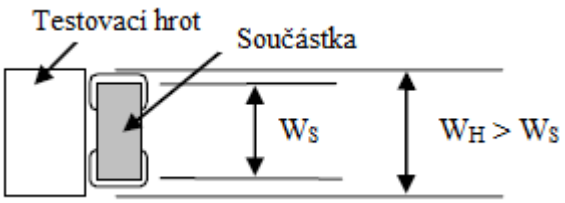
Pro rezistory typu 1206 byly upraveny tyto parametry:

- Výška hrotu od substrátu při testu: 100 µm
- Rozsah zatížení: 8 kg

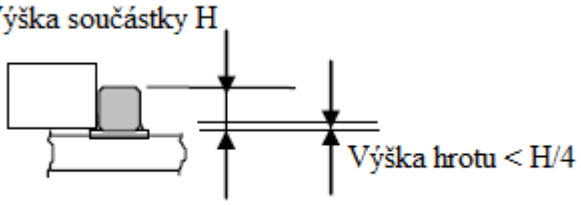
Pro rezistory typu 0805 byly upraveny tyto parametry:

- Výška hrotu od substrátu při testu: 100 µm
- Rozsah zatížení: 6 kg

Jelikož se jedná o destruktivní testování, působí zařízení prostřednictvím hrotu na součástku, až do jejího odtržení. Testovací hlavice by měla vůči součástce svírat uhel 90 ° a její šířka musí být větší než šířka součástky. Z tohoto důvodu je nutné měnit hrot v závislosti na aktuálně trhaném typu rezistoru. Během nastavení výšky střihového hrotu od substrátu se musí dbát, aby hrot tlačil do co největší boční plochy součástky, dle normy minimálně do ¾, avšak zároveň dostatečně vysoko, aby přesahoval výšku naneseného lepidla. Po nastavení parametrů v softwaru určenému pro zařízení Dage PC2400 byl hrot pomocí joysticku umístěn do normou požadované polohy. Následovalo spuštění testu pro jednotlivé SMD součástky.



Obr. 34: Velikost testovacího hrotu vůči součástce



Obr. 35: Nastavení polohy testovacího hrotu

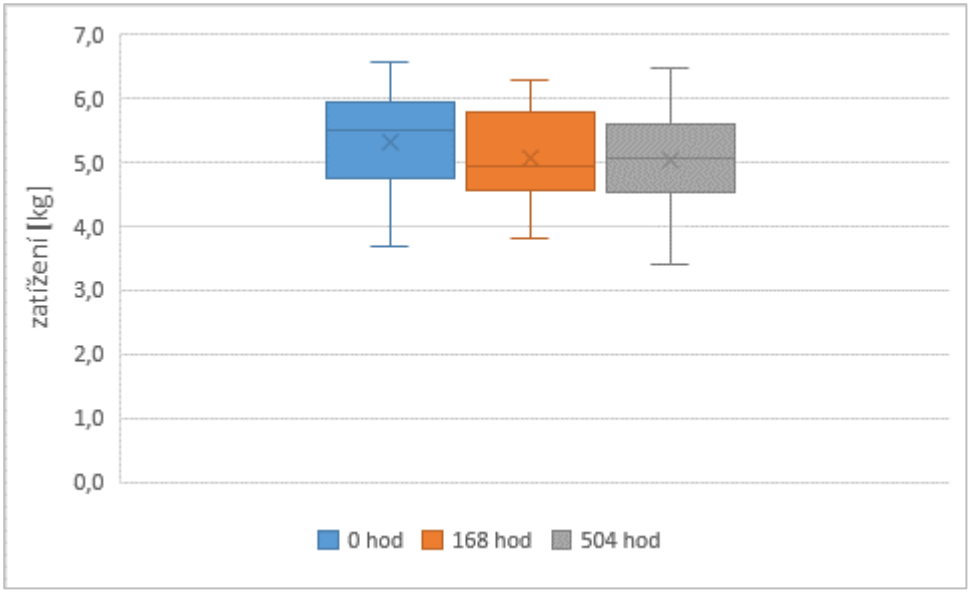
Naměřené hodnoty pevnosti lepených spojů ve střihu

Průměrné hodnoty pevnosti lepených spojů ve střihu pro všechny typy součástek jsou uvedeny v tabulce 5, která je zkrácenou verzí tabulek uvedených v příloze B. Směrodatná odchylka určuje průměr hodnot rozptýlených od aritmetického průměru. Z naměřených hodnot byly sestrojeny grafy, které jsou na obrázcích 36, 37 a 38.

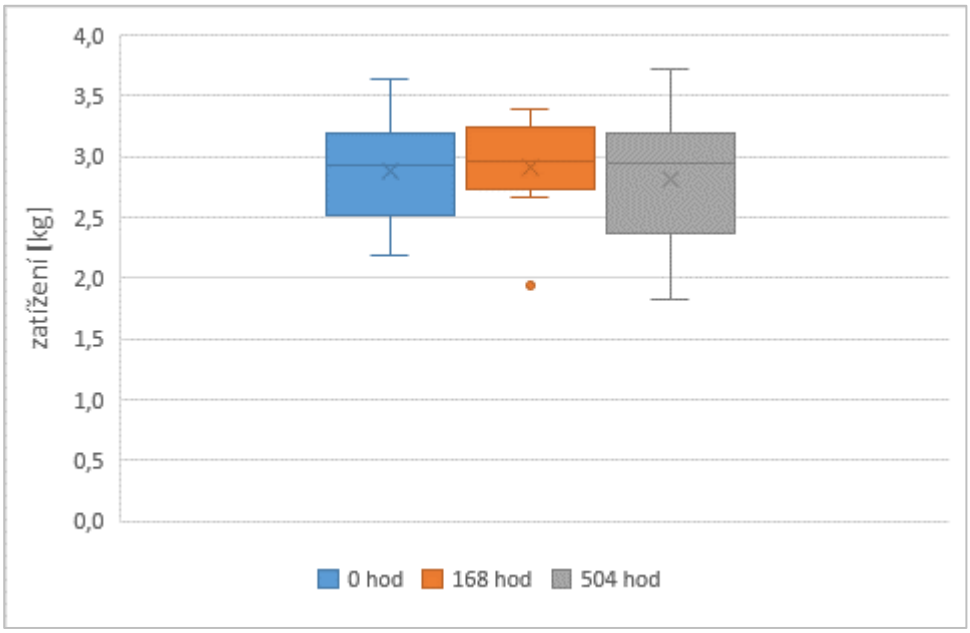
Tabulka 5: Průměrné hodnoty pevnosti ve střihu lepených spojů

Doba namáhání [hod]	0	168	504
Součástka		2010	
Průměr [kg]	5,325	5,066	5,014
Směrodatná odchylka [kg]	0,798	0,733	0,853
Součástka		1206	
Průměr [kg]	2,876	2,914	2,820
Směrodatná odchylka [kg]	0,420	0,391	0,537
Součástka		0805	
Průměr [kg]	2,428	2,385	2,143
Směrodatná odchylka [kg]	0,547	0,566	0,504

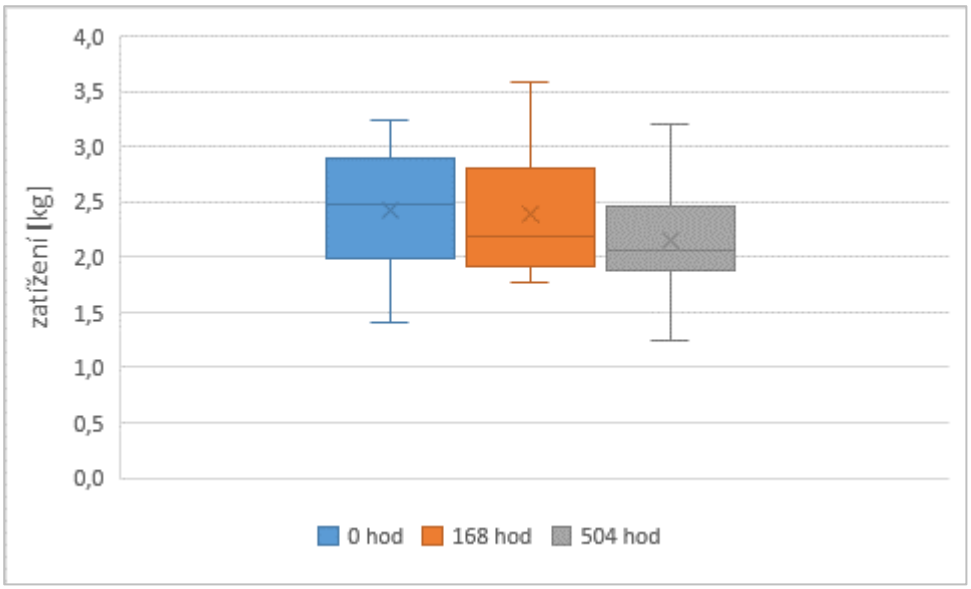
Z vytvořených krabicových grafů lze pozorovat, že 85°C teplota a 85% relativní vlhkost, při kterých byly součástky zatěžovány, nemají negativní vliv na pevnost lepeného spoje. Důležitým parametrem, který určuje pevnost spoje, je množství naneseného lepidla. U součástky s největším rozměrem, typ 2010, tedy lze vidět, že spoj dosahuje nejvyšší hodnoty síly potřebné k odtržení součástky.



Obr. 36: Graf naměřených pevností lepených spojů pro typ součástky 2010

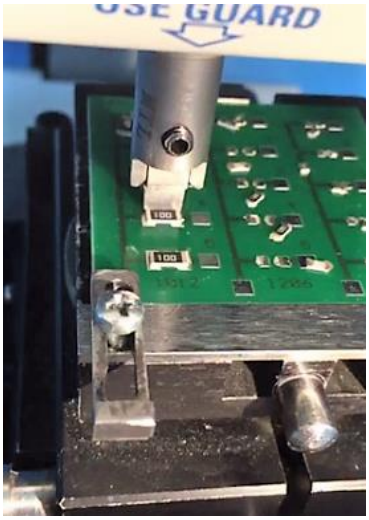


Obr. 37: Graf naměřených pevností lepených spojů pro typ součástky 1208



Obr. 38: Graf naměřených pevností lepených spojů pro typ součástky 0805

Obr. 39: Zařízení Dage PC2400



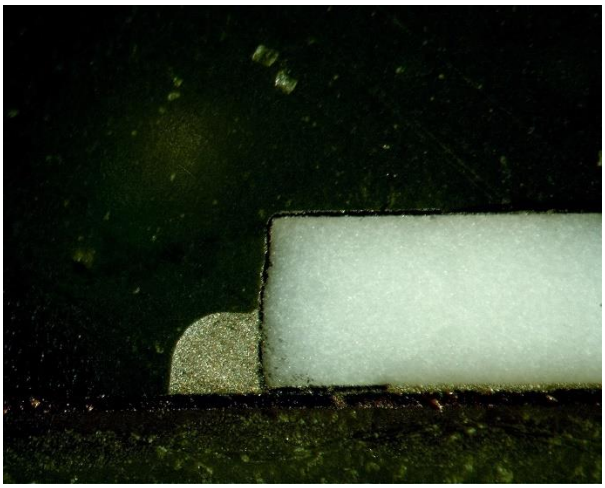
Obr. 40: Detail odtrhu součástky

5.4. Mikrovýbrus

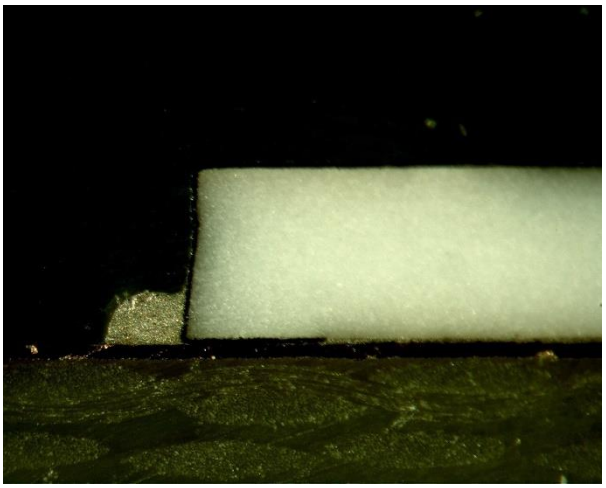
Strukturu a tvar lepeného spoje pozorujeme na mikrovýbrusu pomocí optického mikroskopu. Je to vhodný nástroj pro sledování možné tvorby a růstu dutinek, vlivem zvýšené vlhkosti, uvnitř lepeného spoje. Byly zhotoveny tři mikrovýbrusy rezistoru typu 2010, o délce klimatického zatížení 0, 168 a 504 hodin.

Postup přípravy mikrovýbrusu:

- Oddělení sledované části DPS pilkou a diamantovým kotoučem.
- Nanesení tenké vrstvy separátoru na dno a stěny zalévací formy.
- Smíchání složek dentacrylu v odpovídajícím poměru a jejich homogenizace.
- Upevnění vzorku do zalévací formy a zalití dentacrylem.
- Proces polymerace trvající 10 hodin při pokojové teplotě.
- Po vytvrzení následuje vyjmutí vzorku z formy a opláchnutí vlažnou vodou.
- Pod proudem tekoucí vody probíhá broušení nejdříve na hrubozrnném papíru, typ 220, a následně na jemnozrnném, typ 500 a 1000.
- Leštění probíhá na plstěném kotouči pomocí diamantových leštících past a IPA.
- Čištění výbrusu se provádí v deionizované vodě s ultrazvukem.



Obr. 41: Detail mikrovýbrusu, zatížení rezistoru 168 hodin



Obr. 42: Detail mikrovýbrusu, zatížení rezistoru 504 hodin

Obr. 43: Mikrovýbrus, rezistor bez zatížení

5.5. Vyhodnocení výsledků

Z naměřených výsledků je patrné, že klimatické zatížení v komoře s teplotou 85 °C a relativní vlhkostí 85 % nemá podstatný vliv na mechanické, ani elektrické vlastnosti lepidla EPO-TEK H31D. Pro vyhodnocení výsledků pevnosti lepeného spoje ve střihu byl použit krabicový graf, znázorňující celkový rozsah naměřených hodnot, medián i průměr. Tvar a rozložení grafu poukazuje na široký rozptyl naměřených hodnot. K největšímu poklesu průměrné hodnoty pevnosti lepeného spoje došlo u součástky typu 2010, a to o 0,306 kg potřebným k odtržení součástky, což je zřejmě ovlivněno množstvím naneseného lepidla. Všechny naměřené hodnoty jsou k nahlédnutí v příloze B a jejich průměrné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.

Při měření změny elektrického odporu byly vzorky za účelem porovnání měřeny před i po klimatickém namáhání. Dle naměřených průměrných hodnot z tabulky 4, došlo k mírnému nárůstu velikosti odporu lepeného spoje. Všechny výsledky měření jsou k dispozici v příloze A.

Výbrus byl zhotoven za účelem pozorování změny struktury lepidla vlivem stárnutí. Podle vizuální kontroly pomocí optického mikroskopu nedošlo ke změnám lepeného spoje, popřípadě zvětšení plynných vměstků vlivem vlhkosti. Pořízené fotografie mikrovýbrusu jsou na obrázcch 41, 42 a 43.

6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešerši v oblasti využívání vodivých lepidel při montáži elektronických sestav a navrhnout a realizovat experiment pro ověření vlivu zvýšené vlhkosti a teploty na vlastnosti spoje vytvořeného elektricky vodivým lepidlem.

První část práce slouží jako teoretický souhrn znalostí o problematice vodivých lepidel, který tvoří potřebný základ pro následnou experimentální činnost. V první kapitole je rozebrána struktura vodivého lepidla, jednotlivé typy nanášení a vytvrzení. Druhá kapitola popisuje termické a dynamické analýzy, které slouží pro měření malých změn hmotnosti materiálu vlivem teplotní degradace a uvolňování plynů, jejich viskozitu, či součinitel teplotní roztažnosti. Třetí kapitola se zabývá typem vodivých lepidel a aplikacemi, ve kterých si našlo své uplatnění. Teoretická část je ukončena kapitolou popisující možnosti testování a typy vhodných zkoušek pro lepené spoje.

Experimentální část byla zaměřena na zjištění, zda je elektricky vodivé, izotropní lepidlo EPO-TEK H31D vhodné k použití v aplikacích podléhajících zhoršenými klimatickými podmínkami, jako je například automobilový průmysl. Pro simulaci těchto podmínek byla použita vlhkostní komora a pro vyhodnocení tester pevnosti DAGE PC2400. Nastavení komory i formát měření podléhal normě ČSN EN 60068-2-67. Z naměřených hodnot elektrického odporu a pevnosti lepeného spoje ve střihu bylo zjištěno, že zvýšená teplota a vlhkost nemá negativní vliv na elektrické a mechanické vlastnosti tohoto lepidla. Byly provedeny rovněž výbrusy, které neprokázaly závažnější změny lepidel po vlhkostním a teplotním namáhání.

Důležitými faktory ovlivňující mechanickou pevnost spoje jsou množství naneseného lepidla, velikost lepené součástky a typ lepidla. Právě množství naneseného lepidla v tomto experimentu hrálo velkou roli. Při ručním nanášení jehlou není možné nanést na všechny plošky stejné množství lepidla, a proto došlo při měření pevnosti ve střihu k relativně velkému rozptylu naměřených hodnot. Měřením byla potvrzena i závislost velikosti součástky na pevnosti, kdy rezistor typu 2010 dosahoval nejvyšší hodnoty síly potřebné k odtržení.

Seznam literatury

[1] EPOTEK. Epoxy Adhesive Application Guide [online]. 2014 [cit. 2016-12-4]. Dostupné z: http://www.epotek.com/site/files/brochures/pdfs/adhe-sive_application_guide.pdf

[2] Szendiuch, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů.* Brno : Akademické nakladatelství, VUTIUM, 2006. 80214432926.

[3] Mach, Pavel. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje.* Praha : ČVUT, 2001. str. 440. 8001023923.

[4] Alam, M. O., Bailey, C. *Advanced adhesives in electronics.* : Woodhead Publish limited, 2011. 978-0-85709-2.

[5] Psota, B., Szendiuch, I. *Simulace tepelných vlastností pouzder QFN a BGA.* Brno :, 2014.

[6] Prokopová, I. *Makromolekulární chemie.* Praha : VŠCHT Praha, 2007. 978-80-7080-662-3.

[7] Kloužková, A., Zemanová, P., Kloužek, J., Pabst, W. *Termická analýza.* : VŠCHT Praha, 2012.

[8] Polanský, R. *Teoretické a praktické termomechanické analýzy.* 18. 4 2008. 1213-1539.

[9] Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J., *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vydavatelství CVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.

[10] Licari, James, J., Swanson, D. *Adhesives technology for electronic applications: materials, processing, reliability.* 2. Boston : s.n., 2011. p. 403. 978-143-7778-892.

[11] Hof, M., Bravený, T. *Typické parametry lepidel v elektrotechnice a mikroelektronice.* červen 2013.

[12] Mach, P*; Modifikovaná elektricky vodivá lepidla.*. 2, 2009, electroscope.[13] Krčmář, O. *Elektricky vodivá adheziva pro flexibilní substráty.* Plzeň : 2015.

[14] SKÁCEL, J. Studie srovnání vlastností pouzder QFN a BGA. Brno: VUT 2015. 55 s., Diplomová práce.

[15] Starý, J., Zatloukal, M., Stejskal, P. *Montážní a propojovací technologie. pracovní verze 90503.* 2009.

[16] Placek, Martin. *Teplotně-mechanická analýza elektricky vodivých lepidel*. Praha: 2012. Diplomová práce. CVUT FEL, Katedra elektrotechnologie.

[17] ŽÁK, Pavel. *Experimenty s nanášení epoxidových pryskyřic*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva c. SCH Lab SP 2/2011. 2011. s. 49.

[18] WEIGAND, D.W. a S.V. CARUSO. INTL. J. HYBRID MICROELECTRON. *Development of qualification standard for adhesives used in hybrid microcircuits*. Proc. ISHM, 1983.

[19] POLSTEROVÁ, H. *Základy spolehlivosti elektrotechnických výrob – skripta*. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006, 127 s.

[20] *EPO-TEK H31D Technical Data Sheet* [online]. , 1 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: http://www.epotek.com/site/administrator/components/com_products/assets/files/Style_Uploads/H31D.pdf

Příloha A: Naměřené hodnoty elektrického odporu

Tabulka 6: Naměřené hodnoty elektrického odporu lepených spojů před klimatickým namáháním

t = 22 °C	vlhkost 62 %		0 hod
desky 3, 4	odpor [Ω]		
rezistor	2010	1206	0805
1	10,15	10,15	10,15
2	10,15	10,25	10,15
3	10,09	10,25	10,15
4	10,15	10,25	10,10
5	10,05	10,15	10,15
6	10,25	2,34	10,15
7	10,20	10,15	10,15
8	10,15	10,20	10,15
9	10,20	10,25	10,15
10	10,15	10,15	10,30
Průměr	10,154	10,200	10,160
Směrodatná odchylka	0,053	0,047	0,049

Tabulka 7: Naměřené hodnoty elektrického odporu lepených spojů po 168 hod klimatického namáhání

t = 85 °C	vlhkost 85 %		168 hod
desky 3, 4	odpor [Ω]		
rezistor	2010	1206	0805
1	10,25	10,20	10,15
2	10,25	10,25	10,20
3	10,15	10,30	10,25
4	10,15	10,25	10,10
5	10,25	10,15	10,15
6	10,30	2,40	10,15
7	10,25	10,25	10,15
8	10,15	10,20	10,20
9	10,20	10,25	10,15
10	10,15	10,15	10,30
Průměr	10,210	10,222	10,180
Směrodatná odchylka	0,054	0,048	0,056

Tabulka 8: Naměřené hodnoty elektrického odporu lepených spojů před klimatickým namáháním

t = 22 °C	vlhkost 62 %		0 hod
desky 5, 6	odpor [Ω]		
rezistor	2010	1206	0805
1	10,15	10,25	10,09
2	10,15	10,15	0,31
3	10,15	10,15	10,15
4	10,11	10,15	10,05
5	10,09	10,35	10,05
6	10,15	10,35	10,09
7	10,15	10,15	10,05
8	10,09	10,25	10,05
9	10,15	10,79	10,05
10	10,05	10,55	10,05
Průměr	10,124	10,314	10,070
Směrodatná odchylka	0,035	0,200	0,033

Tabulka 9: Naměřené hodnoty elektrického odporu lepených spojů po 504 hod klimatického namáhání

t = 85 °C	vlhkost 85 %		504 hod
desky 5, 6	odpor [Ω]		
rezistor	2010	1206	0805
1	10,20	10,25	10,09
2	10,15	10,20	0,35
3	10,15	10,15	10,15
4	10,15	10,20	10,05
5	10,09	10,35	10,10
6	10,15	10,40	10,09
7	10,20	10,15	10,15
8	10,09	10,25	10,15
9	10,30	10,85	10,05
10	10,20	10,60	10,10
Průměr	10,168	10,340	10,103
Směrodatná odchylka	0,058	0,214	0,037

Příloha B: Naměřené hodnoty pevnosti lepených spojů ve střihu

Tabulka 10: Naměřené hodnoty pevnosti lepených spojů před klimatickým namáháním

t = 22 °C	vlhkost 62 %		0 hod
desky 1, 2	zatížení [kg]		
rezistor	2010	1206	805
1	3,689	3,215	2,454
2	4,591	2,717	2,398
3	5,766	2,180	1,402
4	6,027	2,590	2,620
5	4,930	3,641	2,093
6	6,555	3,185	3,049
7	4,781	2,305	2,841
8	5,268	2,873	1,676
9	5,891	3,074	2,510
10	5,754	2,982	3,240
Průměr	5,325	2,876	2,428
Směrodatná odchylka	0,798	0,420	0,547

Tabulka 11: Naměřené hodnoty pevnosti lepených spojů po 168 hod klimatického namáhání

t = 85 °C	vlhkost 85 %		168 hod
desky 3, 4	zatížení [kg]		
rezistor	2010	1206	805
1	5,194	3,102	2,058
2	5,657	2,754	1,847
3	4,613	3,269	3,145
4	6,287	2,960	2,697
5	3,794	1,944	1,942
6	4,596	2,971	3,591
7	5,011	3,235	1,769
8	6,122	2,849	2,271
9	4,498	2,663	2,410
10	4,890	3,389	2,092
Průměr	5,066	2,914	2,382
Směrodatná odchylka	0,733	0,391	0,566

Tabulka 12: Naměřené hodnoty pevnosti lepených spojů po 504 hod klimatického namáhání

t = 85 °C	vlhkost 85 %		168 hod
desky 3, 4	zatížení [kg]		
rezistor	2010	1206	805
1	5,194	3,102	2,058
2	5,657	2,754	1,847
3	4,613	3,269	3,145
4	6,287	2,960	2,697
5	3,794	1,944	1,942
6	4,596	2,971	3,591
7	5,011	3,235	1,769
8	6,122	2,849	2,271
9	4,498	2,663	2,410
10	4,890	3,389	2,092
Průměr	5,066	2,914	2,382
Směrodatná odchylka	0,733	0,391	0,566