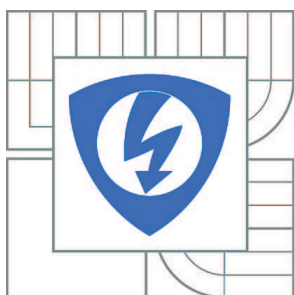


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ELEKTRICKÉ A TEPELNÉ VLASTNOSTI BEZOLOVNATÝCH PÁJENÝCH SPOJŮ

ELECTRICAL AND THERMAL CHARACTERISTICS OF LEAD-FREE SOLDER JOINTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

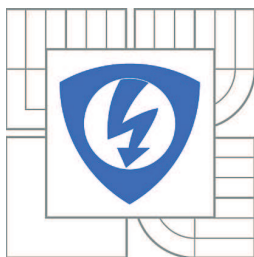
MATĚJ JURÁSEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR SCHNEDERLE

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Matěj Jurásek

ID: 106509

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Elektrické a tepelné vlastnosti bezolovnatých pájených spojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technologií bezolovnatého pájení a proveďte na toto téma rešerži. Na základě Vámi vytvořeného přehledu metod vyberte vhodné přístupy a měřené veličiny k zjištění elektrických a tepelných vlastností bezolovnatého pájeného spoje. Vytvořte experimentální vzorky a vybrané metody na ně uplatněte. Zhodnoťte a porovnejte různé materiálové kombinace z hlediska elektrických i tepelných vlastností a doporučte vhodnou kombinaci materiálů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Petr Schnederle

Konzultanti bakalářské práce:

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:

Tato práce je zaměřena na problematiku pájení. V teoretické části popisuje základní požadavky na materiály a pájecí slitiny, které do tohoto procesu vstupují. Dále také faktory, které mají zásadní vliv na jakost spoje a metody, které se využívají pro testování konečných elektrických a optických vlastností. Cílem praktické části této práce bude sledování změn elektrických vlastností v závislosti na použitém základním materiálu, povrchových úpravách kontaktních ploch DPS, na druhu pájecí slitiny a zbytkové koncentraci kyslíku v atmosféře. Výsledné hodnoty jsou porovnány a z nich budou vyvozena výsledná doporučení pro způsob pájení použitých slitin.

Abstract:

This work is focused on the issue of soldering. The theoretical part describes the basic requirements for materials and solder alloys, which enter into this process. Further also factors that have a major impact on the quality of joints and methods, that are used for final testing of electrical and optical properties. The aim of the practical part of this work will be monitoring changes in electrical properties depending on the base material, surface finish PCB contact surfaces, the type of solder alloy and residual oxygen concentration in the atmosphere. The resulting values are compared, and they will draw the final recommendations for the method of soldering used alloys

Klíčová slova:

Bezolovnaté spoje, bezolovnaté pájení, odpor pájených spojů, dusíková atmosféra, elektrické vlastnosti

Keywords:

Lead-free joints, lead-free soldering, resistance of solder joints, nitrogen atmosphere, electrical properties

Bibliografická citace díla:

JURÁSEK, M. *Elektrické a tepelné vlastnosti bezolovnatých pájek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Schnederle.

Prohlášení autora o původnosti:

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma elektrické a tepelné vlastnosti bezolovnatých pájek 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 uvedeného semestrálního projektu 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 31.května 2012

.....
podpis autora

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Schnederlemu za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování této práce.

V Brně dne 31.května 2012

.....
podpis autora

OBSAH

1	ZÁKLADNÍ MATERIÁLY A SOUČÁSTKY	9
1.1	ORGANICKÉ ZÁKLADNÍ MATERIÁLY	9
1.1.1	<i>Funkční části organických základních materiálů</i>	<i>9</i>
1.1.2	<i>Základní typy ZM pro neohebné a ohebné DPS:.....</i>	<i>10</i>
1.2	ANORGANICKÉ ZÁKLADNÍ MATERIÁLY	10
1.3	POVRCHOVÉ ÚPRAVY DPS	11
1.4	SOUČÁSTKY PRO POVRCHOVOU MONTÁŽ (SMD)	12
2	PÁJENÍ V ELEKTROTECHNICE.....	14
2.1	FORMOVÁNÍ PÁJENÉHO SPOJE.....	14
2.1.1	<i>Smáčivost povrchů</i>	<i>15</i>
2.1.2	<i>Difúze</i>	<i>15</i>
2.2	PÁJECÍ SLITINY V ELEKTROTECHNICE	16
2.2.1	<i>Olovnaté pájky.....</i>	<i>16</i>
2.2.2	<i>Bezolovnaté pájky</i>	<i>17</i>
2.2.3	<i>Nejčastěji používané bezolovnaté pájky.....</i>	<i>18</i>
2.2.4	<i>Příměsi a jejich funkce v pájce</i>	<i>19</i>
2.3	TAVIDLA	20
2.3.1	<i>Funkce a složení tavidla</i>	<i>20</i>
2.3.2	<i>Klasifikace tavidel.....</i>	<i>21</i>
2.4	DRUHY PÁJENÍ	22
2.4.1	<i>Pájení přetavením</i>	<i>22</i>
2.4.2	<i>Pájení vlnou.....</i>	<i>24</i>
2.4.3	<i>Speciální techniky pájení.....</i>	<i>24</i>
2.5	PÁJENÍ V OCHRANNÉ ATMOSFÉŘE.....	25
2.5.1	<i>Oxidační vlastnosti pájecích slitin</i>	<i>25</i>
2.5.2	<i>Pájení v dusíkové atmosféře</i>	<i>26</i>
3	SPOLEHLIVOST PÁJENÝCH SPOJŮ A METODY TESTOVÁNÍ.....	27
3.1	METODY TESTOVÁNÍ PÁJENÝCH SPOJŮ.....	27
3.1.1	<i>Stárnutí materiálu</i>	<i>28</i>
3.1.2	<i>Elektrické zkoušky.....</i>	<i>29</i>
3.1.3	<i>Mechanické zkoušky</i>	<i>30</i>
3.1.4	<i>Optická kontrola.....</i>	<i>30</i>
4	PRAKTICKÁ ČÁST	31
4.1	POSTUP VÝROBY TESTOVACÍHO VZORKU	31
4.1.1	<i>Popis použitých pájecích slitin</i>	<i>31</i>
4.1.2	<i>Návrh vzorku</i>	<i>33</i>
4.1.3	<i>Výroba testovacího vzorku</i>	<i>33</i>
4.1.4	<i>Popis pájecí aparatury.....</i>	<i>35</i>
4.1.5	<i>Postup při pájení.....</i>	<i>36</i>
4.2	ZPŮSOB VYHODNOCENÍ TESTOVACÍCH VZORKŮ	37
4.2.1	<i>Metody měření a vnesené chyby.....</i>	<i>37</i>
4.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	39
4.3.1	<i>Korundová keramika.....</i>	<i>39</i>

4.3.2	<i>FR-4</i>	44
4.3.3	<i>Přehled naměřených hodnot</i>	49
5	ZÁVĚR	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Možnosti provedení pasivních součástek SMD	12
Obr. 2 Příklady pouzder aktivních součástek a druhy vývodů	13
Obr. 3 Fázový diagram slitiny Sn/Pb [5].....	17
Obr. 4 Fázový diagram SAC slitiny [6]	18
Obr. 5 Ishikavův diagram pro proces pájení [10].....	27
Obr. 6 Zleva: Senju M40, Kester R256, Almit SAC305, Cobar SN100C	32
Obr. 7 Požadované a použité teplotní profily pro použité pasty	32
Obr. 8 a) Návrh testovacího vzorku FR-4 b) Návrh testovacího vzorku na korundovou.....	33
Obr. 9 Podložka pro ruční tisk pasty s měděnou šablonou.....	34
Obr. 10 SMT manipulátor	34
Obr. 11 Pájecí aparatura	35
Obr. 12 Rozložení teplot na pájeném substrátu.....	36
Obr. 13 Schéma exsikátoru a popis jeho částí.....	36
Obr. 14 Porovnání naměřených hodnot při použití 2. a 4. vodičové metody	38
Obr. 15 a) Použitý multimetr Agilent 34411A b) spojení měřících kontaktů	39
Obr. 16 Porovnání vzorků s nejnižším a nejvyšším naměřeným odporem spojů.....	39
Obr. 17 Celkové vyhodnocení vlivu ROL na odpor pájených spojů.....	40
Obr. 18 Rozptyl hodnot naměřených odporů spojů v závislosti na velikosti součástky	41
Obr. 19 Závislost odporu spojů na ROL před a po stárnutí (R256, SAC305).....	42
Obr. 20 Závislost odporu spojů na ROL před a po stárnutí (SN100C, M40).....	42
Obr. 21 Závislost změny hodnoty odporu na počtu provedení cyklů umělého	43
Obr. 21 Celkové vyhodnocení vlivu ROL na odpor pájených spojů (FR-4, imerzní cín).....	44
Obr. 22 Hodnota odporu v závislosti na ROL před a po stárnutí (FR-4, R256, imerzní cín).....	45
Obr. 23 Celkové vyhodnocení vlivu ROL na odpor pájených spojů (FR-4, ENIG)	46
Obr. 24 Hodnota odporu v závislosti na ROL před a po stárnutí (FR-4, SAC305, ENIG)	46
Obr. 25 Závislost odporu spojů pájecí slitiny M40 na koncentraci O ₂	47
Obr. 26 Změny naměřených hodnot odporů spojů způsobené stárnutím vzorků	48
Obr. 27 Změny naměřených hodnot odporů spojů způsobené stárnutím vzorků	48

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozdělení tavidel podle normy ČSN EN ISO 29454-1	21
Tab. 2 Rozdělení tavidel podle normy ANSI J-STD-004.....	21
Tab. 3 Odporů použitých součástek.....	38
Tab. 4 Nejnížší naměřené odporů na korundové keramice pro jednotlivé pasty.....	40
Tab. 5 Příklad výpočtu sumy rozdílů naměřených odporů spojů	43
Tab. 6 Nejnížší naměřené odporů spojů součástek na substrátu FR-4	47
Tab. 7 Přehled hodnot naměřených odporů spojů na součástkách 0603 a 2512	49

Úvod

Vzhledem k rychlému rozvoji elektrotechnického průmyslu začaly být požadavky na pájené spoje vyšší, než tomu bylo v minulosti. Nové technologie s sebou přinášejí zmenšování rozměrů součástek i desek plošných spojů (DPS) za účelem dosažení minimálních rozměrů výsledných elektronických obvodů a zvýšení možnosti jejich využití pro nejrůznější aplikace. Tato tendence zmenšování s sebou přináší technologické problémy ve smyslu přesnosti pájecích procesů, osazení a výsledné kontroly. Další komplikace jsou spojené s výběrem vhodné pájecí slitiny, tavidla a metody pájení.

Rozvíjející ochrana životního prostředí probíhající na celém světě se zaměřila na eliminaci používání olova v elektrotechnickém průmyslu kvůli jeho toxicitě a 1.7.2006 byla vydána legislativa zamezující používání kovů s negativním dopadem na lidské zdraví [1], [2]. Toto nařízení vycházející z ekologických norem WEEE 2002/95/EC a RoHS 2002/95/EC nutně vedlo k zaměření se na vývoj bezolovnatých pájek. Výjimkou zůstaly pouze firmy produkující výrobky pro letectví, automobilový průmysl a další důležité oblasti, ve kterých je spolehlivost pájených spojů kriticky důležitá [2], [3].

Vývoj bezolovnatých slitin neustále pokračuje, a proto se v dnešní době už daří realizovat slitiny, které mají některé ze svých vlastností obdobné jako olovnaté pájky (např. smáčecí charakteristiky, teploty tavení, elektrické a mechanické vlastnosti). Zatím se však nepovedlo vynalézt slitinu, která by se vyrovnala ve všech svých vlastnostech olovnatým pájkám. Nejčastější rozdíly jsou v jejich ceně, která je podstatně vyšší nebo s sebou přináší změny v technickém vybavení kvůli vyšší teplotě tání.

Cílem této práce je porovnání pasty R256, SAC305, SN100C a M40 za účelem stanovení hodnoty odporu v pájeném spoji v závislosti na koncentraci atmosféry, ve které bylo pájení provedeno. Dále také prověřit různé materiálové kombinace a vyhodnotit, vhodnost použití korundové keramiky a substrátu FR-4 pro jednotlivé pasty. Z této skutečnosti bude stanoveno doporučení pro způsob pájení těmito pastami, k dosažení nejnižších hodnot odporu spojů. Dále byla provedena zkušební metoda umělého stárnutí za účelem zjištění, jak se budou hodnoty odporu spojů na zapájených součástkách měnit v závislosti na počtu cyklů metody umělého stárnutí. Z výsledků této metody budou následně vypočteny změny hodnot odporů spojů pro jednotlivé druhy pájek zapájených v atmosférách s odlišnou hodnotou obsahu zbytkového kyslíku..

1 Základní materiály a součástky

Základní materiály, neboli substráty, jsou nosiči vodivých motivů a součástek jak elektronických tak i elektromechanických a pasivních prvků, jakými jsou např. chladiče. Tyto materiály zároveň udávají i výsledné vlastnosti osazené DPS, proto se vyrábějí ve formě pevné, pružné nebo kombinované, aby co nejvíce vyhověly požadavkům na konečnou funkci obvodu. Vyrábějí se ve tvaru podložky, která má dobré elektroizolační vlastnosti a je tvořena buď izolovaným kovovým jádrem, nebo dielektrickým materiálem. [5]

1.1 Organické základní materiály

Tyto materiály pro výrobu DPS jsou složeny z organických pryskyřic a výztuže (může být i bez výztuže) a vytvářejí tak elektroizolační nosný substrát, na který se zpravidla naplátuje měděná fólie pro zhotovení vodivých motivů metodou odleptání části měděné vrstvy (subtraktivní technologie). Pro vytváření motivů chemickou cestou (aditivní technologie) se používají základní materiály s přísadou speciálních složek a bez naplátované mědi.

Podle tuhosti dělíme tyto základní materiály na ohebné a neohebné. U ohebných se většinou nepoužívá výztuž a jako pojivo se zde zpravidla používají termoplasty. Tato skupina materiálů (např. PTFE, PET, PEN) je pružná, a proto má velkou odolnost proti ohybové únavě. Využití těchto materiálů je pro aplikace TAB, HDI, vícevrstvé DPS a v neposlední řadě také pro BGA substráty. Neohebné základní materiály zpravidla jako pojivo používají termosety, které se vyznačují velkou tvrdostí vzhledem k vysoce zesíťným polymerním řetězcům.

1.1.1 Funkční části organických základních materiálů

Tyto materiály se skládají z výztuže a pojiva. Výztuž nám zajišťuje mechanické vlastnosti (pevnost v ohybu, tlaku, tahu) a rozměrovou stálost v požadovaném teplotním profilu. Dále se ve velké míře podílí i na elektrických, chemických a teplotních charakteristikách.

Aby se vyhovělo požadavkům, které jsou kladeny na výslednou DPS, používají se jako výztuž tyto materiály [5]:

- tvrzený papír,
- skleněné vlákno,
- aramidové vlákno,
- křemenné vlákno,
- uhlíkové vlákno.

Pojivo nám zajišťuje ochranu výztuže před působením chemikálií a také proti mechanickému poškození. Navíc musí mít výborné dielektrické vlastnosti, nízkou hodnotu relativní permitivity a co nejmenší ztrátový činitel. Požadavkem je malá navlhavost materiálů, aby nedocházelo ke snižování povrchového odporu [5].

1.1.2 Základní typy ZM pro neohebné a ohebné DPS:

FR-2 – U tohoto základního materiálu je jako výztuž použit celulóзовý papír a jako pojivo fenolformaldehydová pryskyřice. Tento materiál má největší sklon k navlhavosti a používá se pro méně náročné aplikace [12].

FR-3 – Tento materiál dosahuje lepších elektrických a mechanických vlastností než FR-2. Jako výztuž je zde použit tvrzený papír a epoxidová pryskyřice, díky které má tento materiál i menší navlhavost.

FR-4 – Další vývojový stupeň těchto materiálů nese označení FR-4. V tomto případě je jako výztuž použita skleněná tkanina popř. skleněná rohož, které mají vynikající mechanické vlastnosti a jako pojivo je použita epoxidová pryskyřice. Výhodou tohoto materiálu je vysoká rozměrová stabilita, pevnost v ohybu, vysoká rovinnost povrchu a její odolnost vůči teplotním šokům vzniklých při pájení. Cena je z uvedených materiálů nejvyšší, ale využití FR-4 je možné pro všechny aplikace, ve kterých klademe vyšší požadavky na základní materiál [12].

CEM-1 – Jádro výztuže je tvořeno papírem s vrstvou skelné tkaniny, která slouží jako krycí vrstva. Vlastnosti tohoto základního materiálu se vyrovnají FR-4 při poloviční ceně.

Základní typy ZM pro ohebné DPS jsou:

- Polytertafluorethilen (PTFE),
- Polyethilennaftalát (PEN),
- Polyethilentereftalát (PET).

1.2 Anorganické základní materiály

Tyto základní materiály jsou nejčastěji představovány jako keramické elektroizolační materiály, jakými jsou například korundová keramika, ale mohou být tvořeny i ovrstveným kovovým jádrem.

Ve srovnání s organickými materiály mají anorganické řadu předností, jako třeba velmi dobrou tepelnou vodivost, dobrou chemickou odolnost a malý koeficient teplotní roztažnosti

TCE. Naopak mezi hlavní nevýhody se řadí vyšší cena i hmotnost substrátu, toxicita některých typů beryliových keramik a také křehkost používaných materiálů [5].

Základní typy anorganických ZM [5]:

- **Korundový substrát:** Se hojně používají v multičipových modulech, pro vytváření tlustovrstvých i tenkovrstvých vodivých i odporových motivů a pro speciální hybridní aplikace (HIO). Jejich hlavní nevýhodou je jejich křehkost a omezení rozměry substrátu.
- **Beryliový substrát:** Základem je polykrystalický oxid berylnatý a malým množstvím kovových oxidů pro nastavení požadovaných parametrů (obdobně je tomu i u korundového substrátu jen s rozdílem oxidu). Vzhledem k jeho toxicitě se nepoužívá, i když má tepelnou vodivost asi 7x vyšší než je tomu u korundu.
- **Ovrstvené kovové jádro:** Tento substrát se nejvíce používá pro aplikace, u kterých je potřeba zajistit mezi součástkami co nejlepší teplotní přizpůsobení TCE. Tyto typy vykazují vynikající mechanické vlastnosti a zajišťují dobrý odvod tepla.

Dalšími typy substrátů jsou například sklo-keramické materiály tzv. LTCC, křemenné a skleněné substráty. U obou technologií se jedná o nové způsoby, které jsou zatím spíše ve vývoji.

1.3 Povrchové úpravy DPS

Tyto úpravy mají za následek zvýšení pájitelnosti kontaktních ploch, a to zlepšením jejich smáčivosti. Zároveň zabráňují vytváření oxidů. Při volbě povrchové úpravy je nutné zajistit její kompatibilitu s metodou pájení. Mezi nejvíce rozšířené metody úprav můžeme zařadit:

- **HAL** (Hot Air Leveling) – Tato technologie je založena na ponoření DPS do lázně s roztavenou pájkou, následně je vytažena a horkovzdušnými noži se odstraní přebytečné množství roztavené pájky. Hlavní nevýhodou je malá rovinnost povrchu a teplotní šok DPS.
- **OSP** (Organic Surface Protectives) – U této metody je využito skutečnosti, že na odhaleném měděném povrchu DPS se díky Van der Waalsovým silám zachytávají organické inhibitory oxidace mědi. Tato metoda se vyznačuje výbornou rovností povrchu, není zde použito olovo (tudíž je v dnešní době perspektivnější) a nedochází k teplotnímu šoku DPS.
- **Ni/Au** – Princip je založen na nanesení vrstvy niklu na odhalený měděný povrch DPS a následné nanesení vrstvy zlata. Tato metoda vyhovuje díky vynikající rovnosti povrchu a možnosti následného kontaktování i pro náročné aplikace.

Nevýhoda této úpravy je značná hlavně pro použití u bezolovnatého pájení, jelikož zde dochází k silné difúzi materiálů a vytváření intermetalických vrstev.

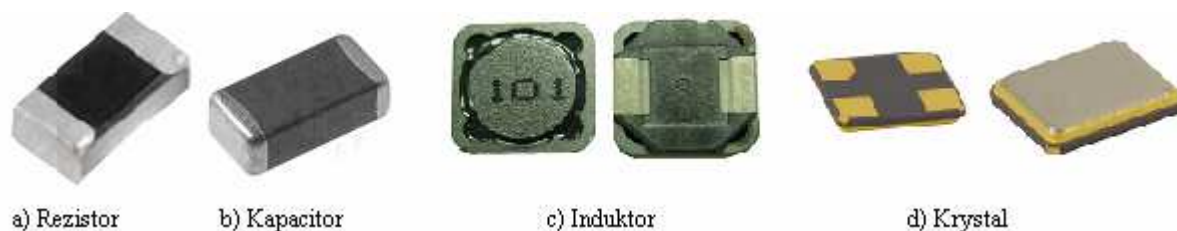
- **Sn, Ag, Ni** – Základem je vytvoření vrstvy cínu, zlata nebo niklu na odhalený měděný povrch DPS, a to buď chemickou nebo galvanickou metodou. Hlavní nevýhodou tohoto způsobu je horší pájitelnost oproti Ni/Au [5].

1.4 Součástky pro povrchovou montáž (SMD)

Součástky SMD (Surface Mount Device) představují vývojový pokrok ve výrobě elektronických prvků. Umožňují zásadní redukci rozměrů výsledných DPS, které mohou být zároveň mnohem složitější a přitom i spolehlivější než tomu bylo u technologie THT z anglického Through-hole technology (montáž do otvorů). Také s sebou přinesly výhody vyššího stupně automatizace výroby DPS a nižší výrobní cenu [4].

Základní rozdělení součástek SMD:

Pasivní součástky (rezistory, kapacitory a induktory) – Z celkového počtu vyrobených součástek pro SMT (Surface mount technology) je více než 80% zastoupeno rezistory a kapacitory [4]. Příklady vzhledu pasivních součástek a jejich kontaktů jsou na obrázku 1. Rozměry jsou udávány v palcovém označení. (Např. R1206 => R znamená rezistor a 1206 je označení v setinách palců, ekvivalentní metrické označení je 3216 což udává rozměry 3,2 x 1,6 mm).



Obr. 1 Možnosti provedení pasivních součástek SMD

Aktivní součástky (většinou polovodičové) - Tyto součástky se vyrábí ve formě zapouzdřeného čipu s vývody pro kontaktování na DPS. Typ pouzdra se volí s ohledem na požadavky aplikace, pro kterou je součástka určena. Obecně je dělíme na pouzdra s páskovými vývody, s vývody gull wing (pro pouzdra QFP, SO), s tzv. vývody J-lead (pouzdra PLCC), s kulovými vývody (pouzdra BGA) a s kontaktními ploškami viz obr 2.



Obr. 2 Příklady pouzder aktivních součástek a druhy vývodů

Povrchová úprava a materiály přívodů součástek

Jako nejčastěji používané materiály pro přívody součástek se používá slitina z niklu a oceli (obsahuje 42% Ni). Tato se vyznačuje vynikající mechanickou odolností a vysokou tuhostí. Novější konstrukce využívají slitinu z mědi a niklu (98% Cu a 2% Ni), v porovnání s předchozí slitinou je zde nižší tuhost i mechanická odolnost, ale má lepší odvod tepla tzn. lepší chlazení součástky a kontakty nejsou magnetické. Navíc je měď „měkčí“ než ocel, tudíž pnutí v oblasti pájeného spoje bude nižší a tím i jeho mechanické namáhání bude nižší [14].

2 Pájení v elektrotechnice

Pájení je metalurgický proces, u něhož dochází ke spojení dvou kovových částí pájecí slitinou. Atomy, které jsou na povrchu spojovaných kovů, se při tomto procesu promísí s atomy roztavené pájky a dostávají se do jejich těsné blízkosti, čímž se projeví adhezní a kohezní síly. Během pájení vzniká na rozhraní mezi pájeným povrchem a pájkou tzv. intermetalická oblast, která má jak kladný, tak i záporný vliv na spolehlivost pájeného spoje. Výhodná je tato oblast v procesu chemického smáčení, kdy nám pomáhají zajistit lepší pevnost spoje, naopak nevýhodná je z pohledu jejich pevnosti, jelikož jsou křehčí a v důsledku toho nám oslabují pájený spoj. Výsledkem pájecího procesu by měl být spoj, který bude plnit nároky na elektrické i mechanické propojení součástek. Obecné rozdělení pájecího procesu je podle teploty tavení pájky na pájení měkké (do 450°C) a tvrdé (nad 450°C) [6],[3].

Požadavky na pájený spoj podle [5]:

Mechanická integrita spoje:

- správný konstrukční návrh spoje,
- správná volba pájecí slitiny,
- správný tvar menisků spoje a spoj s minimem dutin,
- odpovídající pevnost a tažnost spoje.

Tepelné a elektrické vlastnosti spoje:

- odpovídající elektrický kontakt,
- odpovídající tepelný kontakt.

Metalurgická stabilita:

- reakční mechanismy mezi spojovanými kovy a pájkou,
- sledování reakčních mechanismů v samotné pájce během provozních podmínek.

Environmentální trvanlivost:

- odolnost vůči korozi,
- odolnost vůči oxidaci spoje.

2.1 Formování pájeného spoje

Pro vytvoření spolehlivého a mechanicky dostatečně pevného pájeného spoje je důležité, abychom se při volbě parametrů pájecího procesu zabývali otázkou správné volby materiálové kombinace (zahrnuje povrchovou úpravu, použité tavidla a pájky), parametrů procesu (charakter pájecího procesu, maximální teplota, doba přetavení) a druhu atmosféry při pájení (vzduch, dusík nebo vakuum). Při špatném návrhu některého z těchto faktorů může být

následkem špatná pájitelnost. Jeden z prvních předpokladů pro vytvoření kvalitního pájeného spoje je dobrá smáčivost povrchu.

2.1.1 Smáčivost povrchů

První fáze, při které na sebe začínají vzájemně působit atomy roztavené pájky a povrchové atomy spojovaného materiálu, se nazývá smáčení. Při tomto procesu se roztavená pájka roztéká po povrchu tuhého spojovaného materiálu a postupně zaujme tvar, který odpovídá minimální povrchové energii. Na rozhraní povrchů mezi těmito materiály vznikají po celé ploše vazby, čímž dochází ke snižování povrchové energie a oba povrchy začínají tvořit jedno mezifázové rozhraní. To znamená, že atomy roztaveného kovu přechází do mřížky tuhého kovu a dochází ke spojování mezi valenčními elektrony, a tím k vytvoření kovové vazby [7].

Pro zajištění co nejlepší smáčivosti povrchu je důležité, aby povrchy vstupující do procesu byly čisté, zbavené mastnoty a suché. Dále je smáčivost závislá na následujících faktorech:

- druh použité pájecí slitiny,
- povrchová úprava a materiál substrátu,
- povrchová úprava a materiál součástky,
- druh použitého tavidla,
- zvolený druh a parametry pájecího procesu, způsob přenosu tepla,
- pájecí atmosféra.

2.1.2 Difúze

Druhou fází při vytváření pájeného spoje je difúze spojovaných kovů. Tento mechanismus souvisí s pohybem atomů, z čehož vyplývá jeho závislost na teplotě. Při absolutní nule, která je rovna 0 K, se pohyb atomů zastaví a jejich kinetická energie je minimální. Pokud budeme teplotu zvyšovat, bude nám narůstat i kinetická energie atomů a ty začnou kmitat kolem svých poloh v mřížce. Jestliže dodáme tolik tepla, že se energie atomů zvýší dostatečně na to, aby začaly překonávat mezi sebou vazebné síly, začnou se atomy pohybovat po náhodných drahách a materiál tak změní skupenství.

Vysvětlení si uvedeme na příkladu: Pozorovaný materiál uzavřeme do nádoby s víkem a do víka naděláme otvory. Vlivem difúze se některé atomy začnou pohybovat skrz víko ven a zpět dovnitř. Po určité době by se hodnota atomů venku i uvnitř nádoby ustálila na určité průměrné hodnotě. Míru propustnosti tohoto víka lze charakterizovat jako počet atomů, které projdou určitým průřezem za jednotku času [7].

Ve třetí fázi dochází ke krystalizaci pájky způsobeného chladnutím vytvořeného spoje. Začínají se vytvářet krystalizační zárodky a začíná růst počet zrn v pájce. Velikost zrn závisí

na rychlosti chlazení, přičemž při pomalém chlazení se vytváří větší zrna, která snižují spolehlivost spoje [7].

2.2 Pájecí slitiny v elektrotechnice

Pájecí slitiny v elektrotechnice jsou využívány pro připojování součástek k elektronickému obvodu. Prakticky všechny mikroelektronické soustavy, až na výjimky, používaly do roku 2006 olovnaté pájky pro propojení, resp. pro pájené spoje, které jsou jedny z nejdůležitějších částí elektronických zařízení. Zajišťují nám mechanické připevnění součástky k desce a její elektrické připojení do obvodu, proto je zde kladen velký důraz na spolehlivost. S rozvojem čipových pouzder se zvýšila i potřeba pájených spojů, přičemž jako nejvíce rozšířená pájka byla používána eutektická Pb-Sn ve specifikaci Sn63Pb37 (63% cínu a 37% olova) [1],[2]. Rozvíjející se ochrana životního prostředí se zaměřila na omezení spotřeby olova, a tím dala popud k vývoji nových bezolovnatých slitin. Vývoj těchto slitin je i v dnešních dnech stále aktuální téma, jelikož plnohodnotná náhrada za olovo musí splňovat požadavky z pohledu technického i ekonomického [6]. Požadavky na pájecí slitiny jsou uvedeny výše.

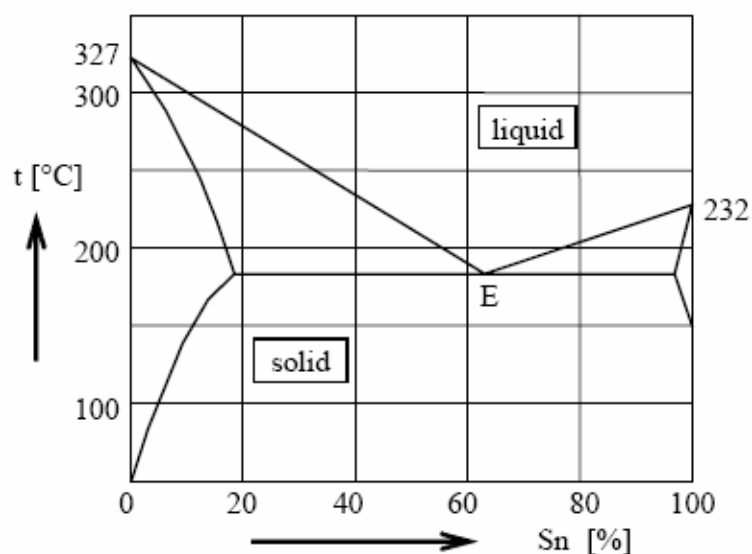
Z pohledu spolehlivosti pájeného spoje, jeho smáčivosti, výsledné ceny a toxicity, hraje klíčovou roli volba pájecí slitiny.

Důležité parametry slitiny [5]:

- teplotní rozsah a teplotního průběhu,
- křivky solidus-liquidus,
- stav pájeného povrchu po procesu, kvalita pájeného spoje, lesklost spoje,
- spolehlivost a pevnost spoje, tvorba prasklin v pájeném spoji,
- opravitelnost a opracovatelnost,
- smáčivost (smáčecí doba, smáčecí síla, smáčecí stres, roztečení při smáčení).

2.2.1 Olovnaté pájky

Vzhledem k zásadnímu požadavku na pájecí slitinu, kterým je co nejnižší teplota tavení, byly v minulosti nejvíce využívány eutektické pájky obsahující cín a olovo (SnPb). Tento požadavek minimalizuje teplotní namáhání pájené součástky a soustavy, do které je součástka zapájena. Fázový diagram je znázorněn na obrázku 3[6].



Obr. 3 Fázový diagram slitiny Sn/Pb [5]

Jednou z charakteristických vlastností pro tyto slitiny jsou lamelové struktury v průběhu chladnutí, přičemž pájka nejprve přejde do plastického stavu a teprve při dosažení teploty pevné fáze dojde ke ztuhnutí.[5] Na obrázku 1 lze pozorovat fáze skupenství látek v závislosti na teplotě. U olovnatých eutektických binárních slitin nabývá křivka, která rozděluje pevné skupenství od kapalného, typického tvaru písmene V. Přičemž nejnižší bod této křivky vyznačuje eutektický bod slitiny, což je bod s nejnižší teplotou tání. Tato teplota je nižší než teploty tání obou vstupujících materiálů.

2.2.2 Bezolovnaté pájky

Hledání vhodné náhrady za olovo je velice nelehký úkol. Aby náhrada byla plnohodnotná, musí splňovat kritéria, která jsou rozdělena do dvou oblastí: technické požadavky (elektrické a mechanické parametry) a ekonomické požadavky (náklady nesmí být vyšší než u olovnatých pájek nejen v materiálové oblasti, ale i z hlediska provedení pájecího procesu) [3].

Jedny z hlavních faktorů, které ovlivňují výběr slitiny z technického pohledu, je bod tání, protože to bude mít zásadní vliv na další polymerní materiály použité při montáži mikroelektronických soustav. Další důležité otázky jsou výrobní náklady, které jsou nutně spojeny s materiály použitými jako příměsi a udávají konečnou cenu pájky, dostupnost a smáčecí vlastnosti. Z hlediska spolehlivosti nás zajímají parametry jako je mechanická pevnost, odolnost proti únavě, koeficient tepelné roztažnosti a tvorba intermetalické sloučeniny [1].

Bezolovnaté pájecí slitiny musí splňovat tyto požadavky:

- kompatibilita s používanými zařízeními i postupy (vlnové pájení, HAL, vhodnost pro ruční pájení ve formě trubičkového drátu i použitelnost pro pájecí pastu zejména no-clean aplikace),
- ekvivalentní nebo lepší materiálové charakteristiky než stávající olovnaté slitiny,
- vhodná teplota tavení
- minimální rozsah plastického stavu, optimálně 4 - 15°C.

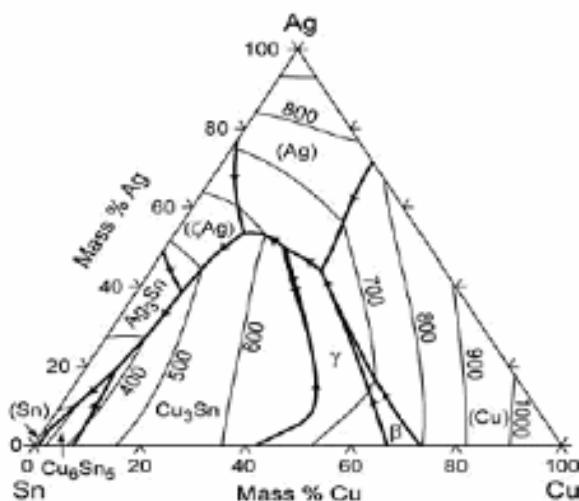
Vzhledem k odlišným vlastnostem bezolovnatých pájek se musí při jejich použití v pájecím procesu řešit otázky:

- volba typu slitiny a odpovídajícího procesu (horší smáčení povrchu, vzhled, tekutost pájky aj.),
- eliminace halogenovaných retardantů ze základních organických substrátů, teplotní odolnost ZM,
- volba součástí, používaných plastů, povrchových úprav i chemie, jejich slučitelnost i vhodnost pro vyšší teploty [5].

2.2.3 Nejčastěji používané bezolovnaté pájky

Slitina SnAg je známa již řadu let, neboť se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, ale dosavadní výzkumy prozatím naznačují, že nejvíce používaným druhem slitiny pro bezolovnaté pájky se stane ternární sloučenina SnAgCu.

SnAgCu - Tyto slitiny se vyznačují kromě dobrých mechanických vlastností také vysokou spolehlivostí a pro použití v elektronice také přijatelným bodem tavení 217°C – 219°C. Proto lze tuto slitinu prozatím považovat za jakousi referenční kompozici pro hodnocení a porovnávání bezolovnatých pájek. Nejpoužívanějším typem je SAC305 (Sn96,5Ag3,0Cu0,5). Změnou poměru jednotlivých složek dosahujeme u SAC slitin rozdílných mechanických vlastností [6].



Obr. 4 Fázový diagram SAC slitiny [6]

SnCu - Tyto slitiny cínu a mědi mají bod tavení v rozsahu 216 – 238°C. Nejpoužívanější zástupce tohoto druhu slitin má složení 99,3% Sn a 0,7 Cu. Jedná se o perspektivní bezolovnatou slitinu [13].

SnAg - Jedná se o slitinu cínu a stříbra, u které dosahujeme bod tavení okolo 221°C. Nejčastěji používaný druh této pájecí slitiny je v poměru 96% Sn a 4% Ag.

SnBi - Tyto slitiny jsou charakteristické nízkým bodem tavení, který se pohybuje u těchto pájek okolo 139°C. Další výhodou je, že u tohoto druhu nedochází ke vzniku intermetalických sloučenin, struktura pájeného spoje se podobá struktuře olovnatých pájek. Jedná se o slitinu cínu a bismutu a pro dosažení eutektické slitiny musíme zajistit poměr 57% Sn a 43% Bi. Tyto pájky mají oproti předchozím typům horší mechanické vlastnosti, proto jsou levnější [7].

SnCuNi – Obsahy prvků v této pájce se pohybují pro cín mezi 92,5 – 99%, pro měď 0,4 – 5% a pro nikl 0,05 – 2%. Tato pájka rovněž obsahuje stopové prvky jako jsou např. germanium či stříbro. Jejich množství v pájce se pohybuje řádově v setinách až tisícinách procenta. Tyto prvky nám napomáhají zlepšit vlastnosti pájecího procesu (viz. kapitola 3.2.4) [13].

2.2.4 Příměsi a jejich funkce v pájce

Přechod k bezolovnatému pájení s sebou nese řadu problémů s výběrem plnohodnotné náhrady za olovnaté pájky. Jelikož bezolovnaté pájky mají v drtivé většině vyšší teplotu tavení a odlišné materiálové vlastnosti oproti olovnatým pájkám, používají se pro zlepšení výsledných vlastností pájky příměsi v podobě drahých kovů. Tyto příměsi pomáhají zlepšit např. smáčivost, snížit bod tání nebo zlepšit mechanickou pevnost. [3]

Používané substituty olova v pájce podle [8]:

- **stříbro (Ag)** – Drahý kov, který je používán i jako složka v olovnatých pájkách, pro dobré elektrické vlastnosti se používá u bezolovnatých pájek i přes svou vysokou cenu, dále také snižuje bod tání a zlepšuje smáčivost a pevnost.
- **bismut (Bi)** – Snižuje bod tání, smáčivost je spíše průměrná.
- **měď (Cu)** – V elektrotechnice hojně používaný prvek, zvláště pro výrobu vodičů, má dobrou smáčivost povrchu i mechanickou pevnost, ale rozpouští se ve slitinách s vysokým obsahem cínu, a tím se ovlivňuje jakost spoje.
- **indium (In)** – Využívá se ke snížení bodu tání slitiny, má teplotu tavení 156°C, má dobrou smáčivost povrchu, ale mechanické vlastnosti nejsou příliš vhodné pro pájení.
- **antimon (Sb)** – Zvyšuje pevnost, snižuje povrchové napětí, částečně toxický.
- **zinek (Zn)** – nízký bod tání, nízká cena
- **nikl (Ni)** – zabraňuje odsmáčení
- **germanium (Ge)** – zabraňuje oxidaci

2.3 Tavidla

Tyto látky si v elektrotechnickém průmyslu vydobýly nepostradatelnou pozici v oblasti pájení. Je tomu tak kvůli jejich zásadnímu vlivu na výslednou kvalitu pájeného spoje. Jak už bylo řečeno v předcházejících kapitolách, jedním z hlavních požadavků pro vytvoření kvalitního pájeného spoje je zajištění dobré smáčivosti spojovaných povrchů a to se neobejde bez dokonalého očištění spojů od nečistot, jakými jsou např. mastnota nebo oxidy. Jedná se tedy o látku, která při zahřátí napomáhá k dosažení rychlejšího a kvalitnějšího smáčení. S ohledem na požadované použití se tyto látky vyrábí ve formě plynné, kapalné i pevné.

2.3.1 Funkce a složení tavidla

Pro zajištění vyšší kvality pájeného spoje jsou požadavky na funkci tavidla podle [5] následující:

- reaguje s oxidy a nečistotami na spojovaném povrchu i pájce a brání reoxidaci povrchů – tj. chemická funkce,
- odstraňuje reakční produkty z pájeného povrchu a umožňuje pájce dostat se do pracovní vzdálenosti s kovovými povrchy – tj. fyzikální funkce,
- snižuje povrchové napětí pájecí slitiny a zvyšuje povrchové napětí pájeného povrchu; umožní tak pájce, aby se dobře roztekla,
- zlepšuje přenos tepla od tepelného zdroje k pájenému místu – tj. tepelná funkce
- v pájecí pastě suspenduje kuličky pájky, řídí tixotropní a reologické vlastnosti a „zapouzdřuje“ pohyblivé ionizovatelné zbytky po procesu pájení.

Složení:

Tavidlo se skládá ze 4 základních složek (tavidlová složka, aktivátory, aditiva a rozpouštědla), z nichž každá má specifické vlastnosti. Pro výběr nejvhodnějšího tavidla pak volíme typ s ohledem na faktory, jakými jsou např. způsob nanášení, odstranitelnost zbytků po pájení, pájitelnost DPS a součástek aj..

Dělení tavidel podle tavidlové složky:

- na bázi přírodních i syntetických pryskyřic,
- na organické bázi,
- na anorganické bázi.

Dělení používaných rozpouštědel:

- na organické bázi (VOC),
- na anorganické bázi (VOC-free).

Dělení používaných aktivátorů:

- organické kyseliny R-COOH,
- na bázi aminů R-NH₂,
- organických halogenidů (Cl⁻, Br⁻, F⁻, J⁻).

2.3.2 Klasifikace tavidel

Jako nejrozšířenější členění tavidel pro měkké pájení si můžeme uvést rozdělení podle normy ČSN EN ISO 29454-1.

Tab. 1 Rozdělení tavidel podle normy ČSN EN ISO 29454-1

TYP TAVIDLA	ZÁKLADNÍ SLOŽKA	AKTIVÁTOR	FORMA TAVIDLA
1. pryskyřicové	1. kalafuna 2. bez kalafuny	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	1. tekuté 2. tuhé 3. pasta
2. organické	1. rozpustné ve vodě 2. nerozpustné ve vodě	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	1. tekuté 2. tuhé 3. pasta
3. anorganické	1. soli 2. kyseliny 3. zásady	1. NH_4Cl 2. bez NH_4Cl 1. kyselina fosforečná 2. jiné kyseliny 1. aminy nebo amoniak	1. tekuté 2. tuhé 3. pasta

Nejnovější členění tavidel (ANSI J-STD-004) je založeno na rozdělení podle druhu pryskyřice (přírodní, syntetická) nebo jestli je na bázi organických nebo anorganických kyselin. Dále nám značí úroveň aktivity tavidla.

Tab. 2 Rozdělení tavidel podle normy ANSI J-STD-004

ZAKLAD TAVIDLA	ZKRATKA	UROVEŇ AKTIVACE					
		[% halidů]					
		L0	L1	M0	M1	H0	H1
		0	0	0,5-2	0,5-2	nad 2	nad 2
Přírodní pryskyřice	ROSIN RO	A	B	C	D	E	F
Syntetická pryskyřice	RESIN RE	G	H	I	J	K	L
Organické kyseliny	ORANIC OR	M	N	P	Q	R	S
Anorganické kyseliny	INORGANIC IR	T	U	V	W	X	Y

Příklady tavidel:

KINGBO RMA-218 – Toto tavidlo je vysoce viskózní a nevyžaduje čištění (tzv. No-clean). Lze ho použít na opravy pinů, připojení BGA a CSP pouzder nebo na montáž metodou Flip – Chip.

Tavidlo 979T – Opět se jedná o tavidlo nevyžadující čištění a zároveň toto tavidlo je VOC-free, což znamená, že neobsahuje organické těkavé látky.

2.4 Druhy pájení

Vzhledem k rozmanitosti elektrotechnického průmyslu jsou i požadavky na pájené spoje v různých odvětvích značně odlišné. To vedlo k vývoji již celé řady pájecích metod, které se odlišují např. rychlostí výroby a její kvalitou, flexibilitou procesu, ztrátami v podobě zbytků pájky atd.

2.4.1 Pájení přetavením

U tohoto způsobu pájení se součástky osazují do pájecí pasty, která je předem nanesena na požadované kontaktní plochy. Tato pasta se následně přetaví, tj. zahřeje se na teplotu vyšší než je teplota tavení pájky. Při roztavení pájky dochází pomocí povrchového napětí k vystředění součástky na kontaktní ploše. Dříve byl nejvíce používaný způsob přetavení pomocí IR zářičů, v dnešní době je nejrozšířenější způsob pájení pomocí horkého vzduchu nebo plynu [5].

Pro pájení přetavením můžeme využít tyto způsoby přenosu tepla:

- vedením (kondukcí),
- prouděním (konvekcí),
- zářením (radiací).

Vedení - Při kontaktu dvou látek o rozdílných teplotách předávají částice teplejší látky svou kinetickou energii látce s nižší teplotou.

Proudění – Zde dochází k přenosu tepla pohybem souboru molekul kapaliny nebo plynu. Konvekce je buď přirozená nebo nucená. U přirozené se jedná o proudění vzniklé pomocí gravitační síly, naopak nucená konvekce je vytvářena např. ventilátory.

Záření – Zde je pájení založeno na přenosu tepla pomocí elektromagnetického vlnění.

Metody pájení přetavením

Tento způsob má velkou výhodu v minimálních ztrátách v podobě zbytků pájky nebo tavidla. K tomu dochází tak, že nanese předem definované množství pájky a tavidla na předem určená místa a poté se substrát zahřívá až na teplotu přetavení pájecí slitiny.

Díky tomu má metoda pájení přetavením ve srovnání s pájením vlnou následující výhody:

- úspora materiálu,
- je vyloučená kontaminace pájeného spoje nečistotami,
- můžeme dosáhnout vyššího stupně hustoty montáže,
- nedochází zde k teplotním rázům,
- je možná oboustranná montáž SMD [5].

Podle způsobu, jakým dodáváme teplo do soustavy, dělíme metody pájení přetavením na:

- konvekční pájení,
- infraohřev,
- pájení pomocí laseru,
- kondenzační metoda,
- kontaktní metody, a) vyhřátým nástrojem,
 b) vyhřátým pásem.

Konvekční pájení

Konvekční pece (reflow pece) používají při své funkci hlavně nucené konvekce, v malé míře přirozené konvekce a infračerveného záření. Toto záření musí mít takovou vlnovou délku, aby zajistilo dobré prohřátí všech částí pájené soustavy. U konvekčních pecí získáváme potřebnou energii k přetavení pájecí pasty z plynu, který je ohříván topnými elementy. Poté jej dmychadla dopravují přes směšovací boxy a disperzní desku s tryskami do prostoru, kde probíhá pájení. V praxi se používají dva druhy pecí:

- Vsázková - Tyto pece mají pouze 1 zónu, proto je u nich horší regulace teplotního profilu, jsou levnější, vhodné pro malovýrobu.
- Inline - Minimální počet zón jsou 4, to nám umožňuje lepší regulaci teplotního profilu, a tím i dosáhnout lepší kvality pájeného spoje.

Výhody:

Výhodou konvekčních pecí je malé zastínění jednotlivých pájených součástí, snadná změna pájecího profilu pouhou změnou rychlosti dopravníkového pásu a většinou mají i velmi nízkou hodnotu příčného teplotního gradientu. Preferují se při pájení pouzder BGA a jsou vhodné i pro pájení vícevrstevných DPS [13].

Nevýhody:

Tyto pece se vyznačují větší energetickou spotřebou v důsledku nízké účinnosti (20-30%) a při pájení ve vzduchu je zde vyšší úroveň oxidace.

Pájení infračerveným zářením

Při tomto způsobu pájení dochází k přetavení pájecí pasty pomocí energie, která se dostává z IR zářičů. Míra absorbovaného tepla závisí na koeficientu, který vyplývá z vlnové délky záření a barvy povrchu součástí. Obecně je známo, že součástky s tmavším povrchem absorbují více tepla než místa, kde je nanесena pájecí pasta. Tím dochází k nerovnoměrnému zahřívání soustavy, a to má vliv jak na součástky (jsou tepelně namáhány), tak na výslednou kvalitu pájeného spoje.

Výhody:

Jednou z předních výhod je vysoká účinnost procesu (60-70%)

Nevýhody:

Hlavní nevýhodou tohoto způsobu ohřevu je jeho nehomogenita, která se odvíjí od materiálových vlastností jak součástek tak i DPS [5].

2.4.2 Pájení vlnou

Využívá se pro pájení součástek SMD, THT nebo jejich vzájemné kombinace. Základem zařízení pro pájení vlnou je dopravníkový pás, na který jsou upevněny DPS. Tento dopravník pak posouvá desky mezi jednotlivými sekcemi stroje. V první fázi se na desku nanese tavidlo buď sprejovou tryskou nebo pomocí difuzoru. Poté se deska dostane do předehřívací zóny, kde se odpaří část rozpouštědla z tavidla a deska se zahřeje na teplotu blízkou roztavené pájce. Pak se deska dostane k pájecí vlně, ta musí být navržena tak, aby se při průchodu DPS roztavená pájka nedostala na stranu součástek. Výhodami systému jsou nižší cena a vysoká spolehlivost.

2.4.3 Speciální techniky pájení

Mimo běžně využívané metody se pro pájení vyvinuly různé speciální techniky. U těchto metod se setkáváme se specifickými rysy, jakými může být např. přesné dávkování energie na přesně definovaná místa (pájení laserem) nebo extrémní rovnoměrností přehřátí bez přítomnosti kyslíku (kondenzační metoda).

Plazmové beztavidlové pájení v dusíkové atmosféře

Přečištění součástek a spojovaného povrchu se zde provádí v plazmovém rektoru bez tavidla. Působením plazmy dojde k odstranění nečistot a oxidů. Po předehřevu se DPS pájí vlnou v dusíkové atmosféře.

Ultrazvukové pájení v dusíkové atmosféře

Přečištění se provádí ultrazvukem. Poté se opět pájí vlnou v dusíkové atmosféře.

Selektivní pájení

Nejvíce se pro tento způsob osvědčila metoda pájení vlnou pomocí speciálních trysek, které umožňují provádět pájení plošně, ale i lokálně, což nám dává možnost nastavit pro jednotlivé pájené spoje rozdílné parametry pájení.

Kondenzační pájení

Zde nám jde především o předání tepla změnou skupenství inertního média. Způsob předání tepla se nazývá kondenzace. Při tomto procesu se součástky i DPS zahřívají až na teplotu přetavení pájecí pasty

Pájení laserem

Přehřátí pasty nám zde zajišťuje laserově řízený paprsek. Z principu vyplývá, že tento způsob můžeme zařadit mezi pájení infračerveným zářením. Díky přesnému dávkování množství použité energie vykazuje pájení laserem vynikající výsledky.

Pájení horkým nástrojem

V dnešní době se využívá už spíše jen pro opravy z důvodu nízké produktivity této metody. [5]

2.5 Pájení v ochranné atmosféře

Mezi další faktory, které se podílí na výsledné kvalitě pájeného spoje, můžeme s jistotou zařadit vliv atmosféry, ve které pájení probíhá. Vzhledem k nákladnosti pájecích zařízení s kontrolovanou atmosférou, kterou může tvořit např. dusík nebo vakuum, jsou nejběžněji používané pájecí metody založeny na principu pájení na vzduchu. V důsledku toho je celý proces pájení ovlivněn oxidační reakcí, která probíhá na povrchu pájky, vývodů součástek i na kontaktních plochách DPS. Tento negativní vliv se snažíme co nejvíce omezit a to právě použitím kontrolované atmosféry. Ta nám zajišťuje zpomalení oxidačních procesů a také lepší pájitelnost součástek. Pro náročnější aplikace se využívá vzácných inertních plynů jako argon či helium.

2.5.1 Oxidační vlastnosti pájecích slitin

Obecně lze říci, že největší sklon k oxidaci je u bezolovnatých slitin, které neobsahují měď nebo zlato resp. u slitin Sn/Sb, Sn/In a Sn/Bi. Naopak jako nejvíce odolné se nám jeví slitiny Sn/Ag a Sn/Cu. Úroveň oxidace klasické pájky je někde mezi těmito extrémy.

Oxidy, které vzniknou na povrchu kontaktních ploch nebo pájky, se dají poměrně snadno odstranit použitím tavidla, větší problém nastane, pokud se oxidy vytvoří na rozhraních zrn pájky. Tyto oxidy jsou totiž mnohem stabilnější než použitá pájka, proto mají i vyšší bod tavení a to může mít za následek odsmačení, vytvoření kuliček nebo intermetalických struktur v pájce. Oxidace na olovnaté pájecí slitině Sn/Pb se začíná tvořit nejdříve na cínu a její tloušťka bývá při pájení ve vzduchu cca 13nm, při použití dusíkové atmosféry se nám tato hodnota zmenší asi 100 x což odpovídá 0,13nm [5].

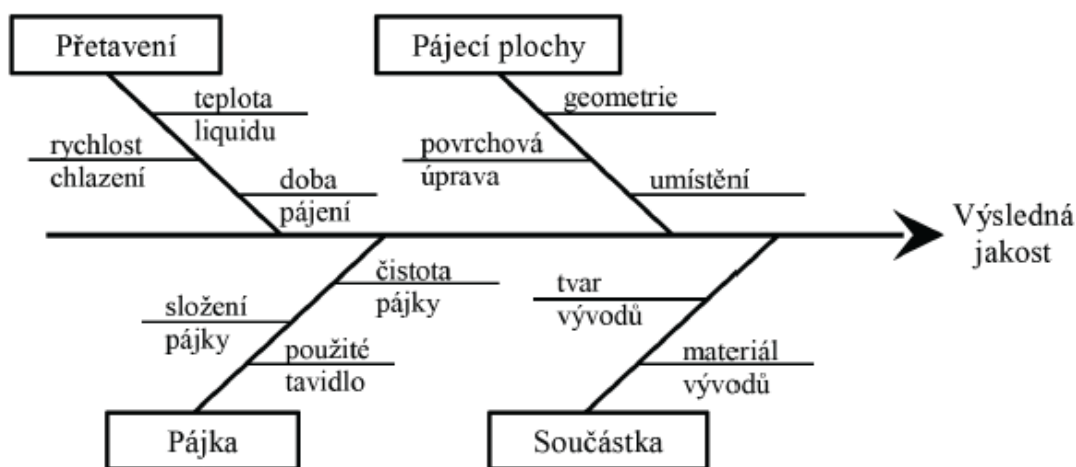
2.5.2 Pájení v dusíkové atmosféře

Dusíková atmosféra se nám jeví výhodná hlavně kvůli pozitivnímu vlivu ve smyslu zlepšení kvality pájecího procesu a výsledné kvality spojů. Projevuje se výrazným snížením oxidace, v menší míře i zlepšením přenosu tepla a také nám redukuje množství zkratů díky většímu povrchovému napětí pájky. Rovněž reziduí je za použití dusíku podstatně méně (uvádí se snížení o 60%) [5] kvůli jejich snazšímu odpařování, zároveň se snadněji čistí, jelikož dusík zabrání jejich oxidaci.

Minimální obsah kyslíku v pájecí atmosféře napomáhá zvýšit tzv. procesní okno (např. ve volbě tavidla a pájecí slitiny, v chybovosti, zvyšuje smáčivost aj.) a přináší sebou také řadu úspor ve výrobním procesu jako jsou spotřeba pájky (o 30 - 40% méně oproti pájení na vzduchu), náklady na údržbu zařízení nebo opravy. Tyto výhody se neobejdou bez složitějšího technického řešení pájecích zařízení s kontrolovanou atmosférou a z toho je patrná nevýhoda vyšší pořizovací ceny a spotřeby dusíku (v průmyslových aplikacích se uvádí (15 - 25) m³/hod při zbytkové hladině kyslíku okolo 25ppm) [13], [5].

3 Spolehlivost pájených spojů a metody testování

Definice spolehlivosti podle normy ČSN 010102 zní: „Obecná vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek“ [10]. Z této definice je zřejmé, že spolehlivost závisí na stálosti funkce pájeného spoje v čase. Vzhledem k tomu, že pájený spoj je tvořen přibližně ze 75% pájky, 15 - 20% kontaktních ploch substrátu a zbylých 5 - 10% tvoří kontaktní plocha součástky, je jasné, že vliv na jeho výslednou spolehlivost bude záviset na mnoha faktorech [11]. Uvést všechny faktory ovlivňující proces pájení je ne snadné, alespoň ty nejdůležitější jsou uvedeny níže na obr. 5.



Obr. 5 Ishikavův diagram pro proces pájení [10]

Z diagramu je patrné, že na výslednou jakost spoje budou mít největší vliv metoda pájení, typ a povrchová úprava kontaktních ploch, samotná součástka i použitá pájecí slitina. Při dodržení postupů při procesu pájení a hodnot všech výše zmíněných faktorů by měl být výsledkem kvalitní spoj s požadovanými elektrickými i mechanickými vlastnostmi.

3.1 Metody testování pájených spojů

Vzhledem k rychlému vývoji elektrotechnického průmyslu, zahrnujícímu vývoj nových materiálů pro pájení a metod pájení, je na důležitost testování elektronických součástek a jejich vodivého a mechanického spojení s elektronickým obvodem kladen velký důraz. Tyto metody nám pomáhají získat jakýsi model chování materiálů v podmínkách aplikací, ve kterých mají být použity. Tím napomáhají dosáhnout vyšší kvality a životnosti elektronických sestav, jelikož můžeme přepokládat, jakým způsobem se budou měnit jejich chemické, mechanické a elektrické vlastnosti. Způsob testování elektronických sestav závisí na požadavcích, které stanovují výslednou kvalitu a oblast určení výrobku.

Testování můžeme rozdělit do několika skupin:

- zrychlené stárnutí,
- elektrické zkoušky,
- mechanické zkoušky,
- optická kontrola.

3.1.1 Stárnutí materiálu

Abychom dostali skutečně věrohodná data týkající se životnosti pájených spojů, musíme sledovat změny vlastností těchto spojů dlouhodobě. V praxi tato skutečnost znamená, že pro naměření dostatečného množství hodnot k vytvoření závěrů o chování spojů, bychom mohli čekat i několik desítek let. Tato doba je ovšem příliš dlouhá, proto se vytvořila metoda umělého stárnutí, která nám umožňuje sledovat tyto změny v mnohem kratším časovém úseku. Principiálně spočívá v simulování dlouhodobého vlivu vnějších podmínek na změny vlastností látek (změny teploty, vyšší intenzita záření či zvýšené koncentrace ozónu).

Životnost si můžeme definovat jako dobu, po kterou je pájený spoj schopen spolehlivě splňovat požadovanou funkci, přičemž vliv na jeho spolehlivost má v zásadní míře stárnutí materiálu. Vliv procesu stárnutí má za následek změnu chemických a mechanických vlastností spoje. To se projevuje zvýšením odporu spoje nebo dokonce mechanickým narušením v důsledku nárůstu intermetalických vrstev [16].

Jeden z příkladů provedení zkoušky zrychleného stárnutí je uveden níže. Metoda musí být navrhována tak, aby vyhovovala typu elektronické soustavy (např. jestli se jedná o SMD nebo THT), podmínkám prostředí do kterých je součástka určena a v neposlední řadě příslušným normám.

Zkouška suchým teplem a chladem

Tato zkouška bude provedena v souladu s normou ČSN 60068-2-2, která popisuje zkušební metody suchým teplem použitelné jak pro vzorky uvolňující teplo, tak i pro vzorky neuvolňující teplo. Tuto metodu rovněž zahrnuje norma ČSN 60068-2-20 zabývající se zrychleným stárnutím. Hlavním cílem je této zkoušky je stanovení schopnosti zařízení, součástek či jiných předmětů být používány či skladovány při vysoké teplotě [17], [18].

Obecný popis metody

Vzorek se vloží do komory o teplotě laboratoře. Konečná teplota se nastaví na teplotu odpovídající stupni příslušnosti. Po dosažení teplotní rovnováhy vzorku se vzorek vystaví

těmto podmínkám po specifickou dobu. Vzorky jsou obvykle v neprovozním stavu. U této zkoušky se používá proudění vzduchu s nízkou rychlostí [17], [18].

Provedení zkoušky teplem:

- 72 nebo 96 hodin při teplotě 100, 125, 155°C,
- relativní vlhkost nesmí překročit 50%.

Provedení zkoušky chladem:

- 72 nebo 96 hodin při teplotě -20, -10 nebo -5°C

3.1.2 Elektrické zkoušky

Aby byla zaručená 100% funkčnost vyrobených desek, je nutné je podrobit elektrickým testům, které prověří funkčnost obvodu. Dále se tyto testy využívají pro zkoumání míry maximálního napětí, které obvod snese bez projevů výbojů (např. povrchový výboj nebo průraz), velikosti izolačního odporu (mezivrstevového nebo povrchového) a mnoho dalších parametrů jako jsou proudová zatížitelnost, ztrátový činitel, elektromigrace atd.

Mezi hojně rozšířené elektrické kontroly patří automatické testery ICT (in circuit test), které testují obvod pomocí kontaktního pole jehel. Kontakty vytváří koncové body vodivých motivů a jsou přepojovány na kontakty testru podle programu. Tyto testy jsou velice rychlé, proto jsou vhodné do velkovýroby, ale jejich nevýhodou je malá flexibilita resp. vytváření specifických programů pro každou desku.

Norma ČSN 61189-3 ed. 2 popisuje metody neautomatizovaných testů elektrických parametrů. Tyto testy určují schopnost odolávat vysokému napětí, spojitost obvodu či změny odporu. Jeden z příkladů testu je uveden níže.

Zkoušky vysokým napětím

Cílem je stanovit schopnost desek s plošnými spoji odolávat zkušebnímu napětí bez rušivých výbojů které se mohou projevit jako sršení (povrchový výboj), přeskok jisker (vzdušný výboj) nebo průraz. Sledování výboje se provádí vizuálně. Zkouška se provádí na určených částech obrazce [18].

Obecný popis metody

Musí se použít zdroj ss nebo st napětí se stejnou vrcholovou hodnotou, sinusového průběhu a frekvenci od 40 až 60 Hz a musí dodávat dostatečně vysoké napětí. Vzorek musí být skladován nejméně 24hod předem za normálních klimatických podmínek.

Mezi stanovené zkušební body se přikládá napětí, které postupně narůstá během 5s z nuly až na požadovanou hodnotu na které se ponechá po dobu 1min [18].

3.1.3 Mechanické zkoušky

Mechanické zkoušky mají za účel ověřit s jakou pevností jsou součástky připájeny k substrátu, odolnost měděné fólie proti loupání, pružnost substrátu a mnoho dalších parametrů, které souvisí s pevnostním charakterem některé z částí elektronických sestav.

Jeden ze způsobů, jakým se dá věřit pevnost spojení mezi součástkou a substrátem je podrobení zapájené sestavy testu na přístroji DAGE PC2400. Tento přístroj je uzpůsoben tak, že dokáže provádět zkoušku stříhem nebo trhem. Pro porovnání vlastností pájených spojů je vhodné použít zkoušku stříhem. Ta je realizována pomocí stříhací hlavy, která tlačí na součástku do doby než dojde k odtržení. Síla, která je naměřena při odtrhnutí, je zaznamenána v kilogramech. Tato metoda vykazuje destruktivní charakter [7].

3.1.4 Optická kontrola

Tyto kontroly mohou sloužit k určení kvality pájených spojů nebo pro kontrolu kvality zapájení pouzder čipů. Automatické testery dokáží porovnat naskenované obrazy desek s předlohou a tím určit jestli se na desce nevyskytují zkratky, míru tolerance otvorů nebo absenci některé ze součástek. Rentgenová kontrola dokáže odhalit případné skryté vady v zapájeném spoji, které mohou zapříčinit i úplnou nefunkčnost obvodu, například nedokonale zapájený nebo prasklý spoj u pouzdra BGA. Jednou z hojně rozšířených metod je metalografický výbrus, jehož realizace je uvedena níže jako jeden z příkladu optické kontroly.

Metalografický výbrus

Jednou z kontrol prováděných v procesu výroby desek plošných spojů je metalografický výbrus, dále jen mikrovýbrus. Pomocí této testovací metody pozorujeme řadu faktorů, které předcházely samotnému pokovení jakými jsou např. kvalita vrtání, kvalita galvanického pokovení, znečištění stěn vyvrtaných otvorů, napojení vnitřních vrstev mědi na pokovení v otvorech nebo tloušťka vrstvy nepáživé masky [15]. Pokud jsou na desce již napájeny součástky, můžeme sledovat parametry, jako jsou voidy (dutiny) v pájce nebo intermetalické vrstvy resp. faktory ovlivňující kvalitu pájených spojů. Výroba testovacího vzorku spočívá v zalití předem nařezaných vybraných lokací pro zkoumání do metylmetakrylátové pryskyřice nazývané Dentakryl. Tato pryskyřice se skládá z tekuté a pevné složky. Po smíchání obou složek a dosažení požadované konzistence se nařezané vzorky vloží do formy a zalijí. Zhruba po uplynutí 4 až 5 hodin dochází k vytvrzení [2]. Na takto nachystaném zkušebním vzorku může být proveden mikrovýbrus. Jeho princip spočívá na mechanickém broušení plochy vzorku za mokra na kotoučových bruskách. Po dosažení požadovaného stupně zbroušení následuje leštění vzorku na kotouči potaženém sametem v kombinaci s diamantovou pastou. Takto vybroušený a naleštěný vzorek je nachystán na optickou kontrolu pod mikroskopem.

4 Praktická část

Tato část je věnována návrhu testovacího vzorku, použitých pájecích past a výběru vhodné metody pro vyhodnocení výsledné kvality pájeného spoje. Jako referenční pájka bude v našem případě olovnatá pájka R256, jelikož její vlastnosti jsou prověřeny dlouholetým používáním, a s ní budou porovnávány bezolovnaté pájky Sn100C, SAC305 a M40.

4.1 Postup výroby testovacího vzorku

Postup výroby testovacího vzorku zahrnoval výběr použitých pájecích slitin podle určitého systému. Tento systém bylo nutno konzultovat s vedoucím práce za účelem správného výběru typu referenční pasty a porovnávaných past. Dále bylo nutno navrhnout vhodný vodivý motiv tak, aby bylo možno provést požadovaná měření resp. aby vyhovoval všem kontrolám, které měly být na vzorcích provedeny. Další etapou bylo osazení a zapájení testovacích vzorků, postupy těchto úkonů budou uvedeny v následujících kapitolách.

4.1.1 Popis použitých pájecích slitin

Použité pájecí slitiny byly vybrány tak, aby bylo možno provést porovnání vlastností hojně používaných past jako je olovnatá Sn/Pb, bezolovnaté pájky SN100C a SAC305 s novým druhem pájecí pasty Senju M40. Vyhodnocení výsledků bude uvedeno v příslušné kapitole (Výsledky měření).

R256 (Kester R256)

Jedná se o olovnatou pájku vyvinutou firmou Kester, která nevyžaduje čištění a vyrábí se ve složení Sn62/Pb36/Ag2, určenou pro pájení na vzduchu i v dusíkové atmosféře. Tato pasta byla navržena speciálně pro šablonový tisk. Její velkou výhodou je široké pracovní okno, možnost 90 minutových přestávek v tisku při zachování přesnosti tisku a v neposlední řadě vysoká aktivita na všech substrátech včetně OSP [20].

SN100C (Cobar SN100C-XF3)

Pasta SN100C je jedním z hojně užívaných druhů bezolovnatých pájek, která je vyráběna firmou Cobar ve složení Sn99,25/Cu0,7/Ni0,05. Při pájení není vyžadována dusíková atmosféra a oproti pastám SAC je méně agresivní vůči pájecím lázním při pájení vlnou. Odolnost vůči tepelné únavě je vyšší než u pájky Sn/Pb při nižší tvorbě strusky [21].

SAC305 (Almit LFM 48W RM-HP)

Opět se jedná o bezolovnatou pájku od firmy Almit s označením LFM 48W a složením Sn96,5/Ag3/Cu0,5. U této pasty je udaná teplota přetavení 230 – 245°C. Tato slitina spadá pod doporučení JEIDA pro bezolovnaté pájení a její vlastnosti jsou blízké olovnaté pájce Sn/Pb. Tato pasta se osvědčila v aplikacích SMT a je vhodná pro ruční pájení i pro pájení

vlnou. Produkuje méně strusky než jiné bezolovnaté pájky a vyznačuje se vynikající pevností pájeného spoje [21].

M40 (Senju M40 - LS720 - PX Type4)

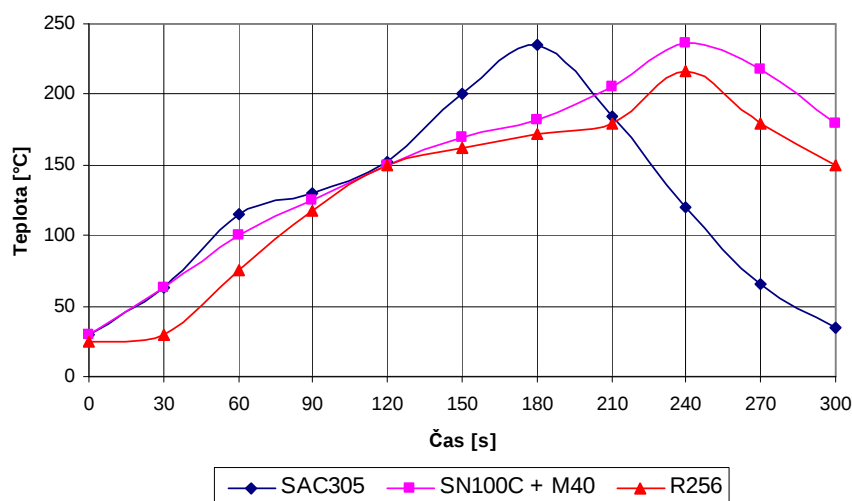
Jedná se o nový druh pájecí pasty od firmy Senju, která obsahuje pouze nízkou úroveň příměsi stříbra a neobsahuje olovo. Vyrábí se ve složení $\text{Sn/Ag}_{1,0}/\text{Cu}_{0,7}/\text{Bi}/\text{In}$, a je určena pro pájení na vzduchu. Tato pasta je podle výrobce oproti SAC305 lepší v několika ohledech [22]:

- šetří náklady spojené se zbytky pasty,
- stejná kvalita pájených spojů při lepší životnosti,
- redukce defektu „tombstoning“.
- nižší teplota přetavení (225°C) [22].



Obr. 6 Zleva: Senju M40, Kester R256, Almit SAC305, Cobar SN100C

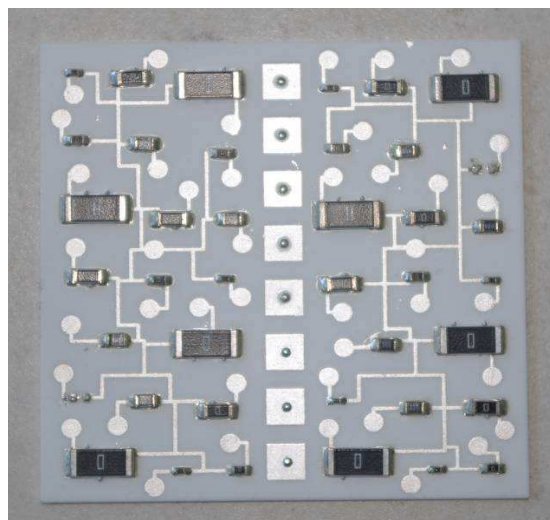
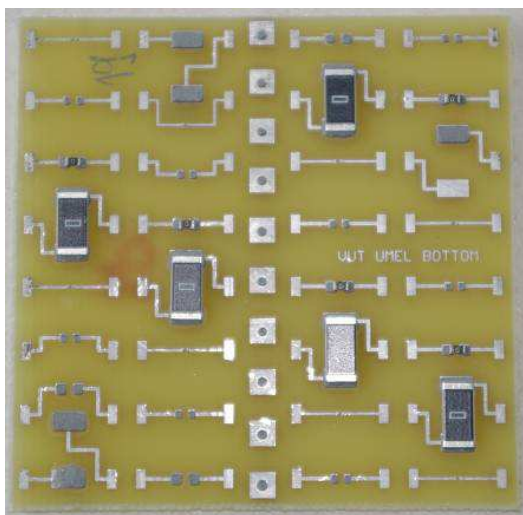
Pro zapájení jednotlivých druhů past byly zvoleny teplotní profily stanovené výrobcí (obr. 7).



Obr. 7 Požadované a použité teplotní profily pro použité pasty

4.1.2 Návrh vzorku

Při navrhování motivu bylo důležité dosáhnout testu u co nejvíce rozměrových typů součástek (2512, 1206, 0402). Dále se počítalo s rozložením více motivů na jeden substrát 50 x 50mm. Každý z těchto motivů měl být navržen pro testování odlišných vlastností (elektrické, mechanické a optické v poměru 1:2:1). Tento se však nepovedlo realizovat kvůli poruchám na pájecí aparatuře a nefunkčnosti laseru pro zhotovení šablony. Proto se muselo od tohoto záměru upustit a byl použit již dříve zhotovený motiv na substrátu FR-4 s povrchovou úpravou Au/Ni a imersním cínem (obr. 8 a). Díky realizaci desek s odlišnými povrchovými úpravami bude možno porovnat výsledné vlastnosti v závislosti na druhu pájky, tak i na způsobu úpravy. Tento motiv byl zhotoven při zkoumání vlivu atmosféry a jiných vlivů, které ovlivňují výslednou spolehlivost spoje, proto je vhodný i pro naše účely. Motiv na korundové keramice byl zhotoven od začátku (obr. 8 b). Jako vodivá pasta byla použita stříbrná pasta CSP 1381 s teplotou výpalu 850°C.



Obr. 8 a) Návrh testovacího vzorku FR-4 b) Návrh testovacího vzorku na korund. keramiku

4.1.3 Výroba testovacího vzorku

Při výrobě testovacího vzorku se v první fázi musel neosazený substrát očistit lihem pro odstranění mastnot a nečistot. Dále se musel rozdělit na menší desky o rozměrech 50 x 50mm, jelikož byl z důvodu snazší a hlavně praktičtější výroby zhotoven na panelech 200 x 250mm. Takto nachystané substráty byly umístěny do přípravku pro ruční tisk pasty skrze měděnou šablonu tloušťky 0,125mm, která zastávala funkci šablony pro tisk pasty viz obr. 9. Tento přípravek je vybaven třemi ovladači polohy pracovní pro dosažení co nejdokonalejšího sesouhlasení šablony a substrátu.



Obr. 9 Podložka pro ruční tisk pasty s měděnou šablonou

Po sesouhlasení byl proveden tisk pasty skrze šablonu. Pasta by měla být před použitím vytažena z lednice, ve které je trvale uskladněna, nejlépe 24 hodin před použitím. Tato skutečnost je dána nutností temperovat pastu na teplotu okolí, aby bylo dosaženo vlastností stanovených výrobcem. V okamžiku, kdy je pasta připravena k použití, nanese pruh této pasty přibližně o šířce stěrky na šablonu a pod konstantním tlakem a úhlem rozetřeme stěrkou tento pruh přes zhotovený motiv a tím vtlačíme pastu do otvorů v šabloně. Následně nadzvedneme šablonu a opatrně vyjmeme substrát s natisknutým motivem.

Další fáze výroby je osazení součástek na desku. K tomuto úkonu byl použit SMT manipulátor viz obr. 10. Tento manipulátor usnadňuje práci s SMD součástkami pomocí posuvného ramene zakončeného jehlou vytvářející na svém hrotu podtlak. Síla sání je dostatečná k udržení součástky na hrotu jehly. Orientaci součástky lze provádět pomocí natáčení jehly.



Obr. 10 SMT manipulátor

Pro otestování rozdílných vlastností byly natisknuty 4 série korundových substrátů, každá s jiným druhem pájecí pasty. Počet vzorků v jedné sérii byl zvolen na 6 testovacích substrátů, z nichž byl každý přetaven pro s jinou koncentrací zbytkového kyslíku kontrolované atmosféry (<10ppm, 100ppm, 500ppm, 1000ppm, 5000ppm a na vzduchu), za záměrem porovnat naměřené hodnoty a stanovit, při které koncentraci bylo dosaženo nejlepších výsledků. V případě substrátu FR-4 byly natisknuty 4 série s povrchovou úpravou imerzní cín a 4 série s povrchovou úpravou ENIG. Každá ze sérií čítala 3 vzorky při koncentracích zbytkového kyslíku v atmosféře 100ppm, 5000ppm a na vzduchu.

4.1.4 Popis pájecí aparatury

Zapájení testovacích vzorků bylo provedeno v exsikátoru, který byl již dříve upraven pro pájení v kontrolované atmosféře. Zařízení se skládá ze dvou částí. Spodní část obsahuje prostupy pro napájecí kabel topné desky, napájecí kabel pro ventilátor, vedení pro tlakové čidlo a vedení pro teplotní čidla. Dále jsou zde namontovány dva ventily pro vpouštění dusíku a vypouštění přetlaku (vpouštění vakua) z prostoru pro pájení a prostup pro analyzátor koncentrace atmosféry. V této části se také nachází namontována topná deska, která je tvořena kovovým tělesem s naneseným topným motivem tvořeným odporovou pastou. Napájecí zdroj pro chladicí ventilátory a pro čidlo tlaku je zastoupen zdrojem Agilent E3631A. Pro kontrolu tlaku v prostoru pro pájení je slouží voltmetr Agilent 34401A, jelikož na výstup tlakového čidla není připojen převodník. Fotografie exsikátoru je uvedena na obrázku 11.

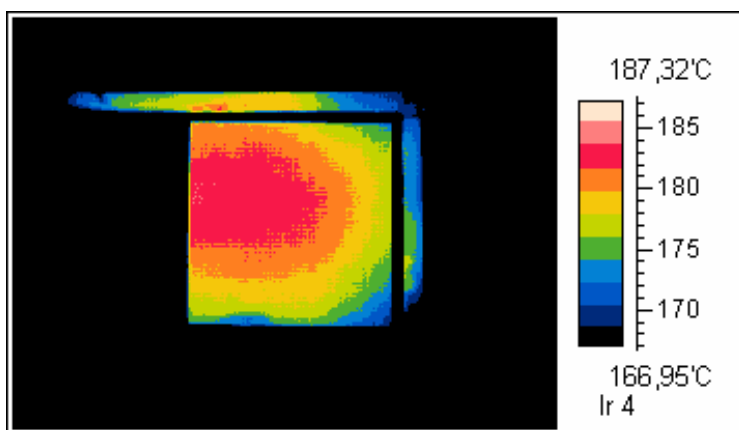
Ve vrchní části exsikátoru je umístěn větrák o rozměrech 120 x 120mm, který slouží ke chlazení vzorků po přetavení. V neposlední řadě je k topnému tělesu připojena jednotka pro řízení pájecího profilu pasty. Nastavení profilu probíhalo experimentálně, jelikož programátor Smart R251 umožňuje nastavení nejkratšího časového úseku 1min a cílovou teplotu. Požadovaná teplota je dosažena na konci námi zvoleného časového úseku, touto skutečností byla nastavena i rychlost růstu teploty resp. strmost nárůstu teploty.



Obr. 11 Pájecí aparatura

4.1.5 Postup při pájení

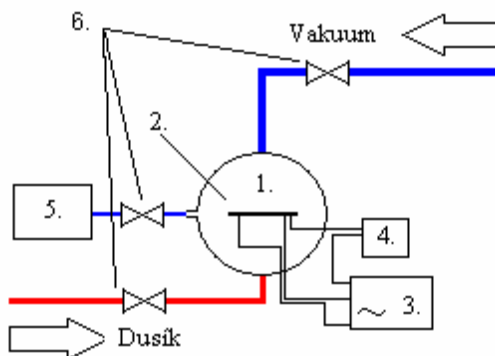
Pro dosažení co nejlepší tepelné vodivosti mezi pájeným substrátem a topným tělesem byla použita teplo vodivá pasta. Ta byla nanесena na předem určenou oblast topného tělesa, která byla vybrána na základě snímků pořízených IR kamerou viz obr. 12. Tato oblast byla vybrána na základě potřeby dosáhnout co nejlepší homogenity ohřevu substrátu. Bohužel se nepodařilo dosáhnout rovnoměrného rozložení teplot, což mělo za následek mírnou odchylku měřených hodnot v nejchladnější části resp. v pravém spodním rohu substrátu.



Obr. 12 Rozložení teplot na pájeném substrátu

Osazený substrát se umístil do oblasti s nanесenou vodivou pastou a exsikátor byl uzavřen. Jako další krok bylo nastavení požadované atmosféry. K tomu sloužila dvojice ventilů pro vpouštění dusíku a vpouštění vakua do pájecího prostoru. Při vpouštění dusíku byla kontrolována hodnota tlaku atmosféry v exsikátoru, aby nepřekročila hodnotu atmosférického tlaku. Zároveň na analyzáru od firmy Ridzewski byla pozorována zbytková koncentrace kyslíku v atmosféře. Při dosažení požadované hodnoty mohl započít proces pájení. Tento proces byl řízen výše zmíněným programátorem, na kterém byl vybrán program resp. pájecí profil pasty podle druhu pasty použité na vzorku (např. u R256 byly použity hodnoty pro pájecí profil 1.min T=75°C, 2.min T=158°C, 3.min T=178°C, 4.min T=226°C po dokončení 4.min bylo spuštěno chlazení). Po dosažení konce pájecího profilu bylo zapnuto chlazení vzorku tvořené ventilátorem, který byl spouštěn manuálně.

1. Exsikátor,
2. topné těleso,
3. regulátor teploty (programátor),
4. termočlánek,
5. analyzátor koncentrace O₂,
6. regulační ventily.



Obr. 13 Schéma exsikátoru a popis jeho částí

4.2 Způsob vyhodnocení testovacích vzorků

Při vyhodnocování elektrických vlastností pájecích past byly porovnávány hodnoty odporů pájených spojů na zkušebních vzorcích. Pro osazení vzorku byly použity součástky o velikostech 2512, 1206, 0805, 0603 a 0402 s hodnotou odporu stanovenou výrobcem 0 Ω . Tyto vzorky byly podrobeny několikanásobnému zrychlenému stárnutí. Jednalo se o metodu zkoušky suchým teplem podle normy ČSN 60068-2-2 s vybranými parametry:

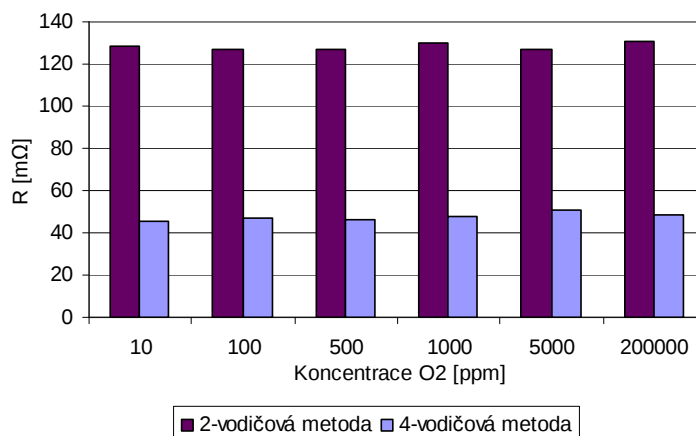
- doba působení tepla: 48 hod,
- teplota: 155°C - korundová keramika,
100°C - FR-4.

Tato zkušební metoda byla provedena na všech zapájených vzorcích za záměrem porovnání změn v naměřených hodnotách odporů spojů před a po stárnutí. Pro větší kontrast porovnávání hodnot byla tato metoda stárnutí provedena 3x na vzorcích s korundovou keramikou a 1x na testovaných vzorcích FR-4. Tato metoda byla provedena v peci od společnosti LAC s.r.o. typ LMH C7/12. Následně byl vyhodnocen vzorek, u kterého byl měřený odpor spojů:

- nejnižší a nejvyšší,
- s nejvyšší a nejnižší závislostí na koncentraci atmosféry,
- s největší a nejmenší změnou (po stárnutí).

4.2.1 Metody měření a vnesené chyby

Pro měření byla nejdříve zvolena přímá 2-vodičová metoda měření odporu. Tato metoda je přesná pro měření středních a velkých hodnot odporu, ale není vhodná pro měření v řádech desítek m Ω . Při takto malých odporech je do výsledku měření implementována chyba, která je rovna odporu styku kontaktů a vodivé cesty. Tato vodivá cesta má také určitý odpor, proto se kontakty vždy přikládaly cca 2mm od součástky, aby byla vnesená chyba tvořená odporem vodivé cesty u všech součástek stejná (± 1 m Ω). Po naměření vzorků před stárnutím bylo od této metody upuštěno kvůli vysoké hodnotě vnesené chyby viz obr. 14.



Obr. 14 Porovnání naměřených hodnot při použití 2. a 4. vodičové metody na součástce 2512 a sérii vzorků zapájených pájecí pastou R256

Protože bylo hlavní prioritou docílit co nejpřesnějšího měření, provádělo se po každých 6. změřených součástkách měření hodnoty zkratového odporu. Tato hodnota při použití 2 - vodičové metody byla v rozmezí 90 – 110 mΩ, což odpovídalo při naměřené hodnotě odporu 137 mΩ cca 250 – 300% vnesené chyby, a to bez zohlednění odporu samotné součástky. Takto vysoká chyba je pro měření odporů nepřijatelná, proto se přešlo na metodu 4-vodičovou. U této metody byla hodnota zkratového odporu 3 – 10 mΩ, což odpovídalo při naměření 36 mΩ na součástce 8 – 30% vnesené chyby. Jelikož nebyla k dispozici přesnější metoda, museli jsme spokojit s touto přesností.

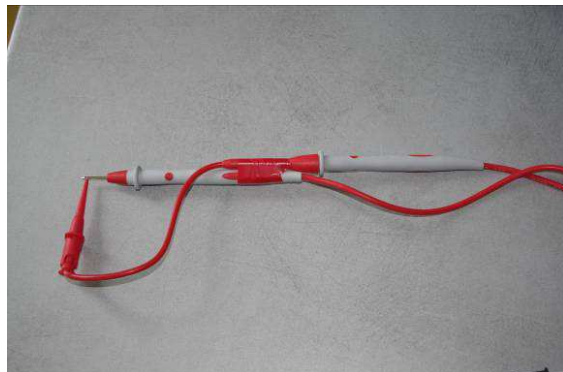
Jako další z vnesených chyb při měření odporu pájených spojů je hodnota odporu samotných součástek. Pro stanovení hodnoty odporu bylo od každého typu vybráno 10 součástek a jako vnesená chyba se považovala jejich průměrná hodnota. Od této hodnoty byla odečtena hodnota zkratového odporu viz tab. 3 (R součástky). Pro ukázkou toho, že změny v hodnotách po stárnutí nejsou způsobeny součástkami, jsou v tabulce uvedeny i hodnoty nezapájených součástek po stárnutí.

Tab. 3 Hodnoty odporů použitých součástek

Označení součástky	R naměřený [mΩ]	R součástky [mΩ]	R součástky po stárnutí [mΩ]
2512	33,87	23,87	24,33
1206	32,47	19,47	20
805	19,93	9,93	10,67
603	32,80	20,80	21,33
402	33,33	21,33	22,67

Obě metody měření byly provedeny na multimetru Agilent 34411A (obr. 15 a). Tento multimetr umožňuje měření s přesností na 6,5 digitu. Pro měření 4-vodičovou metodou byly

na multimetr připojeny vodiče pro proudové a napěťové kontakty. Tyto kontakty byly spojeny přes sadu dvou svorek, které byly připojeny na hroty kontaktů viz obr. 15 b.



Obr. 15 a) Použitý multimetr Agilent 34411A

b) spojení měřících kontaktů

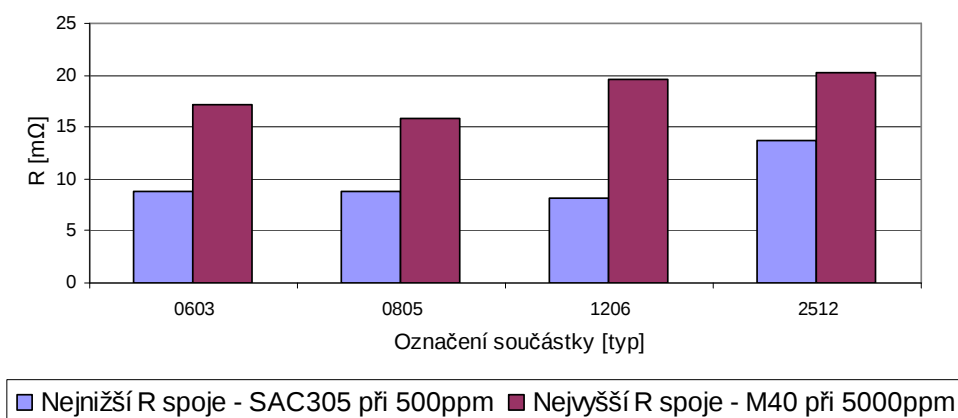
4.3 Výsledky měření

4.3.1 Korundová keramika

V první části této kapitoly budou vyhodnocovány výsledky naměřené na vzorcích (vzorek = zapájené součástky s vodivým motivem na nosném substrátu), kde byla jako substrát použita korundová keramika. Snahou bylo dosáhnout co nejlepší výsledné kvality pájeného spoje tak, že jednotlivé vzorky byly pájeny v kontrolované atmosféře při odlišné zbytkové koncentraci kyslíku a následně podrobeny metodě umělého stárnutí.

Porovnávání vlivu kontrolované atmosféry

Po zapájení byly jednotlivé vzorky proměřeny a výsledné hodnoty mezi sebou porovnány. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 6 – 21. Nejnižších hodnot odporů spojení v závislosti na velikosti součástky a použité atmosféře se podařilo dosáhnout při použití pasty SAC305 a zbytkové koncentraci O^2 500ppm. Naopak nejvyšší hodnoty odporu pájených spojení byly naměřeny při použití pasty M40 a zbytkové koncentraci O^2 5000ppm. Porovnání těchto dvou vzorků je na obrázku 16.



Obr. 16 Porovnání vzorků s nejnižším a nejvyšším naměřeným odporem spojení

Jelikož se v případě pasty M40 jedná o nový druh pájecí slitiny, není kolem této pasty mnoho informací. Proto je možné, že při pájení pasty M40 nebyl přesně dodržen pájecí profil a kvůli této skutečnosti jsou hodnoty odporů vyšší než v případě SAC305. V tabulce 4 je porovnání hodnot nejnižších naměřených odporů spojů, kterých se povedlo dosáhnout jednotlivými druhy pájek. Zde můžeme pozorovat, že při hodnotě 1000ppm zbytkové koncentrace O_2 v kontrolované atmosféře dosahuje pájecí slitina M40 obdobných hodnot odporů spojů na součástkách o velikostech 0805, 1206 a 2512 jako R256.

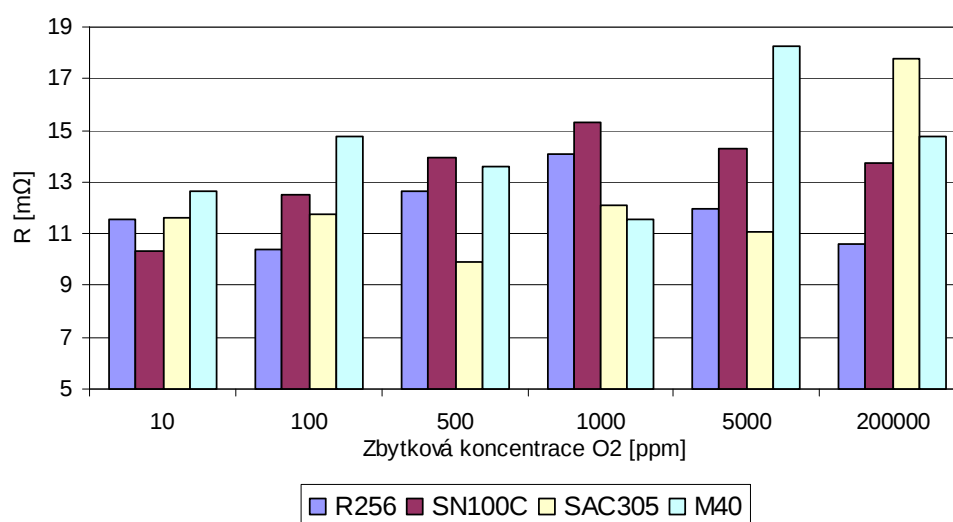
Tab. 4 Nejnižší naměřené odpory na korundové keramice pro jednotlivé pasty

Pájecí slitina	Koncentrace O_2 v kontrolované [ppm]	0402 [mΩ]	0603 [mΩ]	0805 [mΩ]	1205 [mΩ]	2512 [mΩ]	Suma R [mΩ]	Průměrný R [mΩ]
SAC305	500	9,47	8,87	8,90	8,20	13,67	39,64	9,91
R256	100	*	9,28	8,57	9,20	14,50	41,55	10,3875
SN100C	>10	8,13	11,87	7,40	8,87	13,17	41,31	10,3275
M40	1000	9,47	13,03	8,73	9,53	14,83	46,12	11,53

* Značí hodnoty, které se nepodařilo změřit

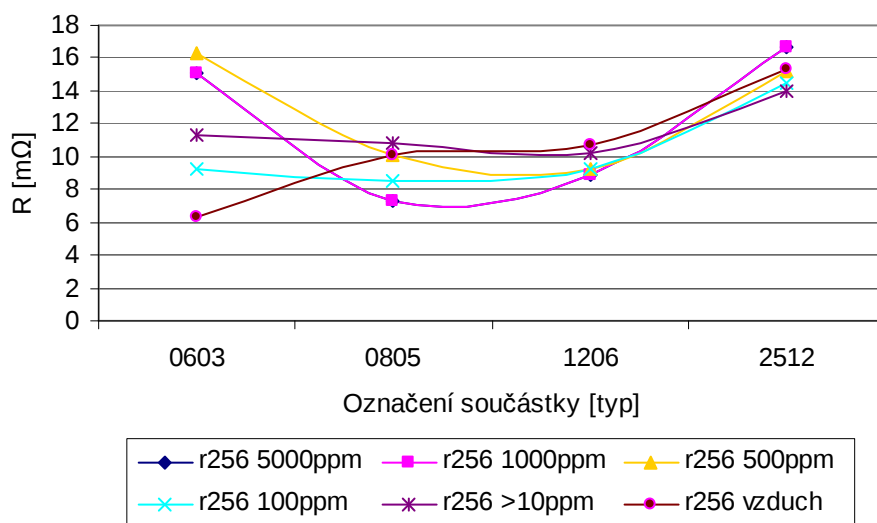
V kolonce suma R a průměrný R není započtena součástka 0402.

Na obrázku 17 je zobrazen průměr z naměřených hodnot odporů spojů pro jednotlivé koncentrace. Z této závislosti je patrné, že nejmenší odpor při použití pasty SAC305 byl naměřen na vzorku zapájeného při koncentraci zbytkového kyslíku 500ppm. U pájky R256 při 100ppm, M40 při 1000ppm a u SN100C při koncentraci > 10ppm. Naopak nevyšší hodnoty odporů byly naměřeny na SAC305 při pájení na vzduchu, u R256 a SN100C při 1000ppm a u M40 při 5000ppm.



Obr. 17 Celkové vyhodnocení vlivu ROL na odpor pájených spojů (korundová keramika)

Jako další zkoumaný parametr byla zvolena závislost změny odporu pájeného spoje na velikosti součástky a zbytkové koncentraci kyslíku v kontrolované atmosféře. Zjednodušeně se dá říct, že se hledala pájka, na kterou bude mít změna koncentrace kontrolované atmosféry nejmenší a největší vliv. Po vyhodnocení naměřených hodnot vykazovala nejmenší změnu naměřených hodnot opět olovnatá pájka R256. Z grafu na obrázku 18 je vidět, že k největší změně hodnot došlo na součástce 0603 a rozdíl činil $10\text{m}\Omega$, ale v případě ostatních součástek se hodnota rozptylu pohybovala kolem $3\text{m}\Omega \pm 0,5\text{m}\Omega$. U ostatních pájecích past byl vliv na hodnotu odporu znatelnější a bez ohledu na složení docházelo ke změnám naměřených hodnot v rozmezí $9 - 11\text{m}\Omega$ na všech součástkách. Tyto závislosti jsou uvedeny pro názornost v příloze 4 a 5. Grafy v příloze obsahují rovněž lineární spojnici trendu pro koncentraci, při které byly naměřené odpory spojů nejnižší.



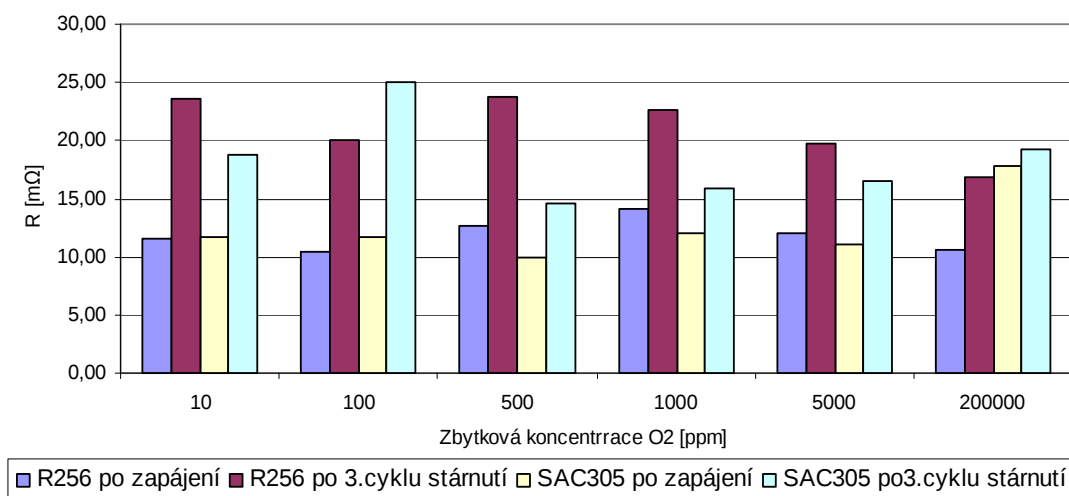
Obr. 18 Rozptyl hodnot naměřených odporů spojů v závislosti na velikosti součástky při různé koncentraci kontrolované atmosféry (R256)

Z výsledného porovnání a vyhodnocení nejnižších hodnot odporů by mohlo vyplývat doporučení pro použití konkrétní koncentrace kontrolované atmosféry tak, aby bylo dosaženo nejnižších hodnot odporu na pájených spojkách. Problém je ovšem v tom, že je nutno ověřit, jak se takto zapájené spoje budou chovat v čase. Proto bylo nutno otestovat, jak se budou hodnoty odporu spoje měnit při stárnutí vzorku působením tepla.

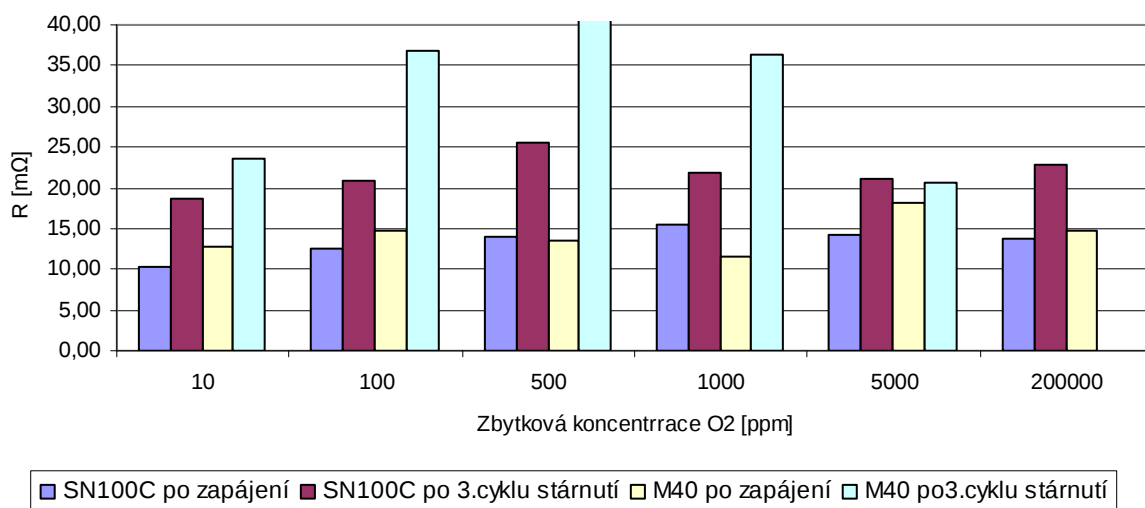
Porovnání vlivu stárnutí

V této fázi byly vzorky podrobeny tzv. umělému stárnutí. Při této metodě byla zkoumána stálost elektrických parametrů (elektrického odporu pájených spojů) v závislosti na době, po kterou na vzorek působila teplota (1.cykus 48h/155°C, 2.cykus 48h/155°C, 3.cykus 48h/100°C). Této metodě byly zkoumané vzorky podrobeny 3x, aby se stárnutí resp. změny hodnot projevíly co nejvíce. Po každém cyklu byly všechny vzorky přeměřeny a podle rozdílů naměřených hodnot mezi 3x „stárnutými“ vzorky a vzorky po zapájení byly určeny pasty, u kterých docházelo k nejmenším a největším změnám hodnot odporu spoje. Z obrázků 19 a 20,

ve kterých jsou vyneseny změny hodnot odporu před použitím metody stárnutí a po jednotlivých cyklech této metody, se jeví jako nejstálější hodnoty odporů spojů při použití pasty SAC305.



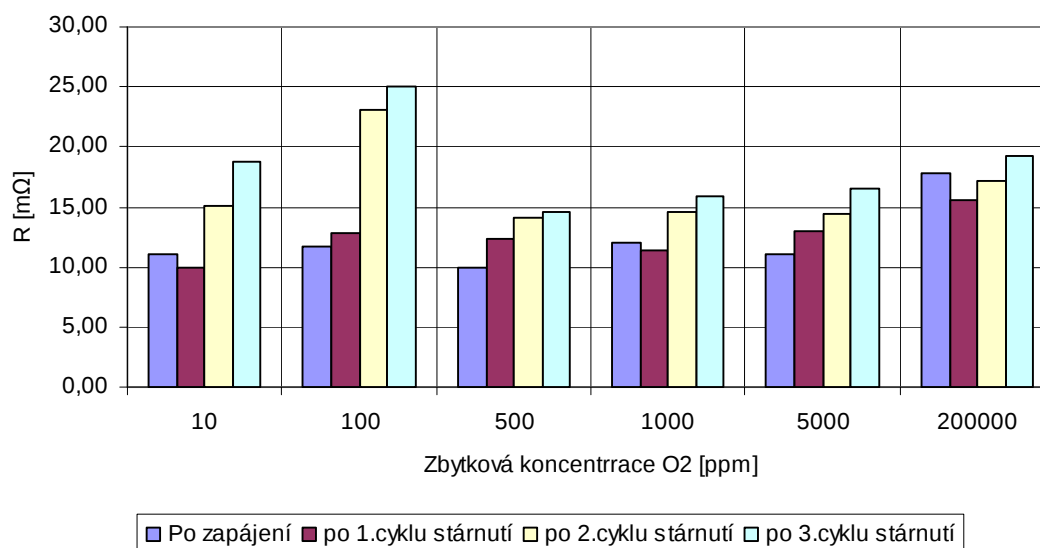
Obr. 19 Závislost odporu spojů na ROL před a po stárnutí (R256, SAC305)



Obr. 20 Závislost odporu spojů na ROL před a po stárnutí (SN100C, M40)

V obrázku 20 je snižená maximální hodnota rozsahu, protože na pastě M40 dosahovala hodnota odporu spojů při 500ppm 72,2mΩ a graf by se po jejím vynesení stal nepřehledným.

Závislost pájky SAC305 po jednotlivých cyklech stárnutí je uvedena na obrázku 21. Zde můžeme pozorovat nárůst hodnoty odporu po 2. a 3. cyklu stárnutí u všech koncentrací, pouze po 1. cyklu je vidět u koncentrace 10ppm a 1000ppm mírný pokles hodnoty odporu oproti hodnotě po zapájení. Tento rozdíl může být zapříčiněn chybou měření, jelikož se jedná o maximální chybu 1mΩ. Grafy závislostí pro zbylé pájky jsou uvedeny v příloze.



Obr. 21 Závislost změny hodnoty odporu na počtu provedení cyklů umělého stárnutí (SAC305)

Nejmenší změnu hodnot potvrdil i výpočet, při kterém byly odečteny od hodnot naměřených po 3.cyklu stárnutí velikosti odporu spojů naměřených po zapájení. Tyto rozdíly byly sečteny a jejich sumy mezi sebou porovnány. Příklad výpočtu velikosti rozdílů mezi hodnotami odporu spojů pro pájecí slitinu SAC305 je uveden v tabulce 5.

Tab. 5 Příklad výpočtu sumy rozdílů naměřených odporů spojů

Pájecí slitina	SAC305						Suma ΔR
Koncentrace O2 v kontrolované [ppm]	vzduch	5000	1000	500	100	10	
Po zapájení 0603 [mΩ]	17,37	13,2	14,53	8,87	13,03	10,7	
Po stárnutí 0603 [mΩ]	18,53	16,37	14,7	16,53	19,13	21,03	
ΔR	1,16	3,17	0,17	7,66	6,1	10,33	28,59
Po zapájení 0805 [mΩ]	16,73	11,4	9,07	8,9	10,73	14,9	
Po stárnutí 0805 [mΩ]	16,27	11,9	14,23	13,23	26,87	17,57	
ΔR	-0,46	0,5	5,16	4,33	16,14	2,67	28,34
Po zapájení 1205 [mΩ]	17,37	8,03	10,03	8,2	11,7	8,2	
Po stárnutí 1205 [mΩ]	16,6	15,7	14	11,37	21,2	15,37	
ΔR	-0,77	7,67	3,97	3,17	9,5	7,17	30,71
Po zapájení 2512 [mΩ]	19,5	11,67	14,67	13,67	11,67	12,83	
Po stárnutí 2512 [mΩ]	25,92	22,33	20,83	17	29,17	21,17	
ΔR	6,42	10,66	6,16	3,33	17,5	8,34	52,41
							140,05

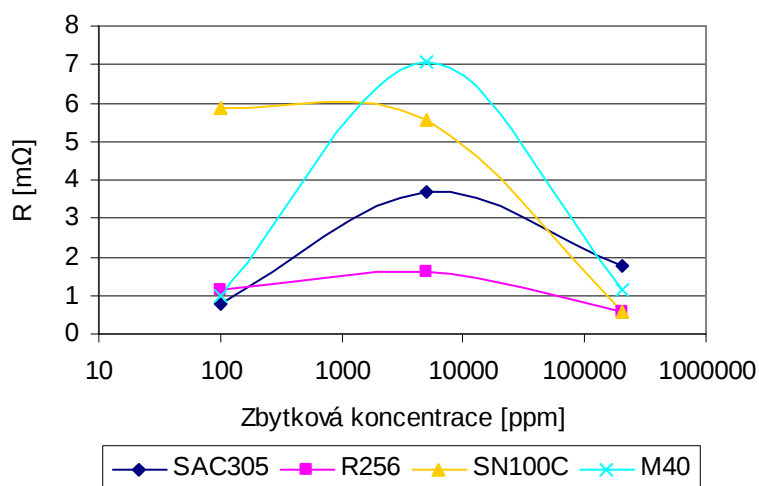
Pořadí past seřazených dle velikosti změn hodnot odporů spojů před a po 3. cyklu metody stárnutí je následující: SAC305 ($\Sigma \Delta R = 140,05 \text{ m}\Omega$), SN100C ($\Sigma \Delta R = 201,6 \text{ m}\Omega$), R256 ($\Sigma \Delta R = 221,2 \text{ m}\Omega$) a M40 ($\Sigma \Delta R = 476,09 \text{ m}\Omega$). U pasty M40 docházelo ke změnám naměřených hodnot až o 55mΩ. Vyobrazení závislostí pro slitiny SN100C, R256 a M40 bude uvedeno v příloze. V grafech jsou uvedeny pouze hodnoty součástek 2512, jelikož při uvedení více typů se kvůli velkému množství dat stává jakékoliv grafické vyjádření nepřehledné.

4.3.2 FR-4

Vyhodnocování testovacích vzorků (zapájené součástky s vodivým motivem na nosném substrátu FR-4) s povrchovými úpravami ENIG a imerzní cín probíhalo obdobně jako u měření s korundovou keramikou. Bylo zapájeno 8 sérií (4 druhy pájek x 2 typy PÚ), přičemž každá série obsahovala 3 testovací vzorky. Tyto vzorky byly opět zapájeny při odlišné koncentraci kontrolované atmosféry. Použity byly součástky o velikostech 0603 a 2512. Bylo tak učiněno kvůli časové náročnosti měření. Při vyhodnocování byl proveden pouze jeden cyklus metody umělého stárnutí, ale změny hodnot jsou dobře patrné. Při pohledu na naměřené hodnoty uvedené v příloze 22 - 25 nebo na obrázek 21 či 23 je patrné snížení odporu spojů na součástkách oproti korundové keramice.

Porovnávání vlivu kontrolované atmosféry

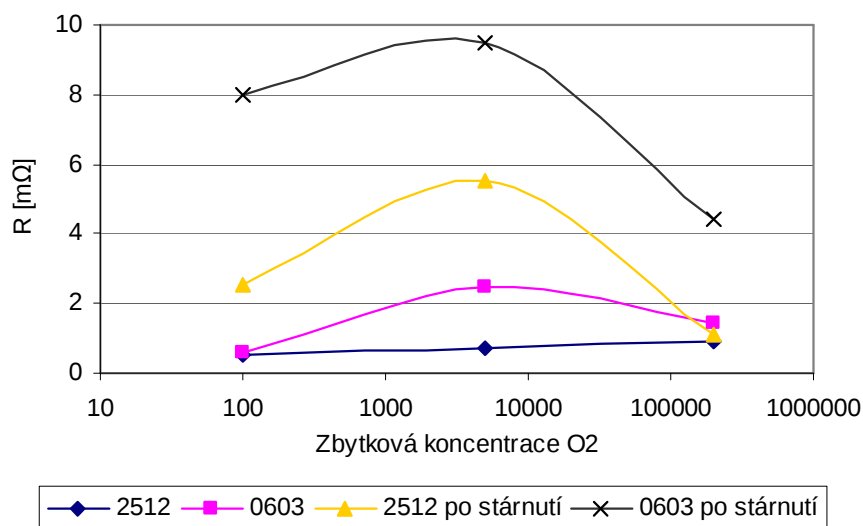
Nejnižších hodnot odporu bylo dosaženo za použití pasty R256 a povrchové úpravy imerzního cínu při zapájení na vzduchu. Naopak nejvyšší průměrné naměřené hodnoty byly na vzorku s použitou pastou M40 opět s povrchovou úpravou imerzní cín a při koncentraci zbytkového kyslíku 5000ppm. Porovnávané hodnoty na obrázku 21 jsou opět tvořeny průměrem hodnot naměřených odporů spojů na vzorcích za použití jednotlivých past a koncentrací.



Obr. 22 Celkové vyhodnocení vlivu ROL na odpor pájených spojů (FR-4, imerzní cín)

Vzhledem ke skutečnosti, že posloupnost měření byla vždy stejná a probíhala postupně po jednotlivých vzorcích v sériích (např: R256-vzduch, R256-5000ppm, R256-100ppm) je možnost vnesené chyby o stejné hodnotě pouze do vzorků zapájených při koncentraci O_2 5000ppm v atmosféře minimální. Je důležité si tuto skutečnost uvědomit, jelikož platí stejně i pro vzorky na korundové keramice a FR-4 s povrchovou úpravou ENIG.

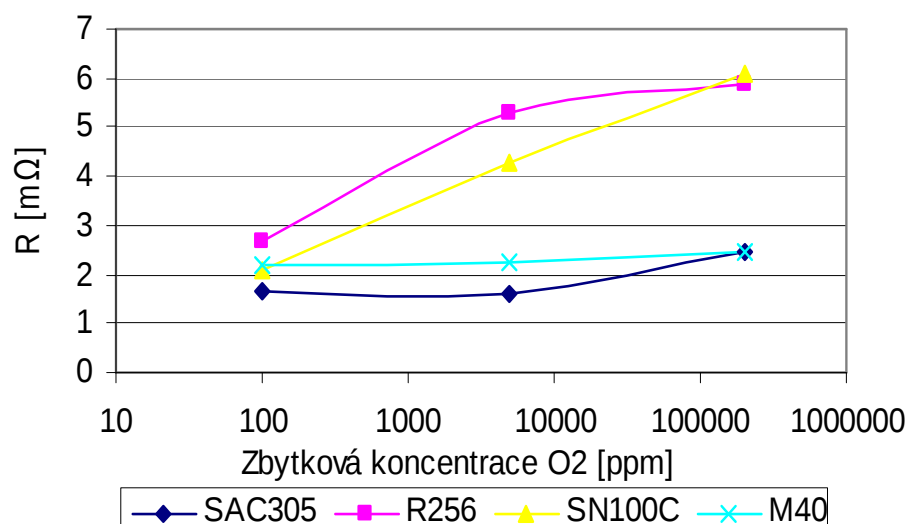
Jako pájka s nejmenší změnou odporu v závislosti na zbytkové koncentraci při koncentraci zbytkového kyslíku v atmosféře byla v tomto případě vyhodnocena pájka R256. Charakter změn hodnot odporů v závislosti na koncentraci atmosféry při použití této pájky je uveden na obrázku 22. V grafu jsou vyneseny i hodnoty odporů spojů naměřené po provedení metody stárnutí. Zbylé závislosti hodnot odporů spojů na koncentraci atmosféry pro povrchovou úpravu imerzní cín jsou uvedeny v příloze 3.



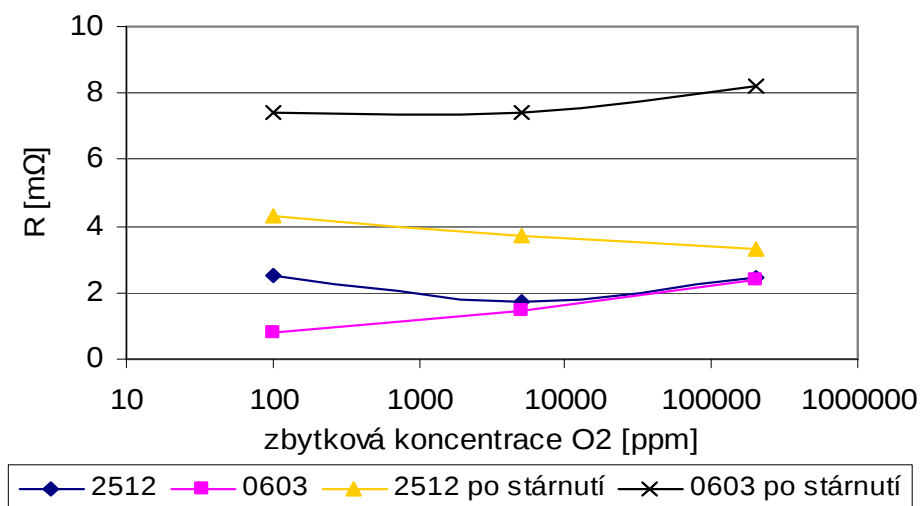
Obr. 23 Hodnota odporu v závislosti na ROL před a po stárnutí (FR-4, R256, imerzní cín)

Na obrázku 23 jsou uvedeny výsledné charakteristiky změn hodnot odporu spojů pro substrát FR-4 při použití povrchové úpravy ENIG. Zde se hodnoty odporů spojů (opět tvořeny průměrem hodnot naměřených odporů spojů na jednotlivých vzorcích při použití jednotlivých past a koncentrací) u všech pájek měnily s podobným vzrůstajícím trendem v závislosti na zvyšující se koncentraci zbytkového kyslíku v kontrolované atmosféře.

Nejnižších hodnot se povedlo dosáhnout při použití pájky SAC305, a to při všech koncentracích atmosféry. Charakter změn této slitiny je uveden na obrázku 24. Jako druhá pájka s nejnižším odporem spojů byla vyhodnocena pájecí slitina M40, následovala R256 a nejvyšší hodnoty odporů spojů byly naměřeny na vzorku zapájeného slitinou SN100C.



Obr. 24 Celkové vyhodnocení vlivu ROL na odpor pájených spojů (FR-4, ENIG)



Obr. 25 Hodnota odporu v závislosti na ROL před a po stárnutí (FR-4, SAC305, ENIG)

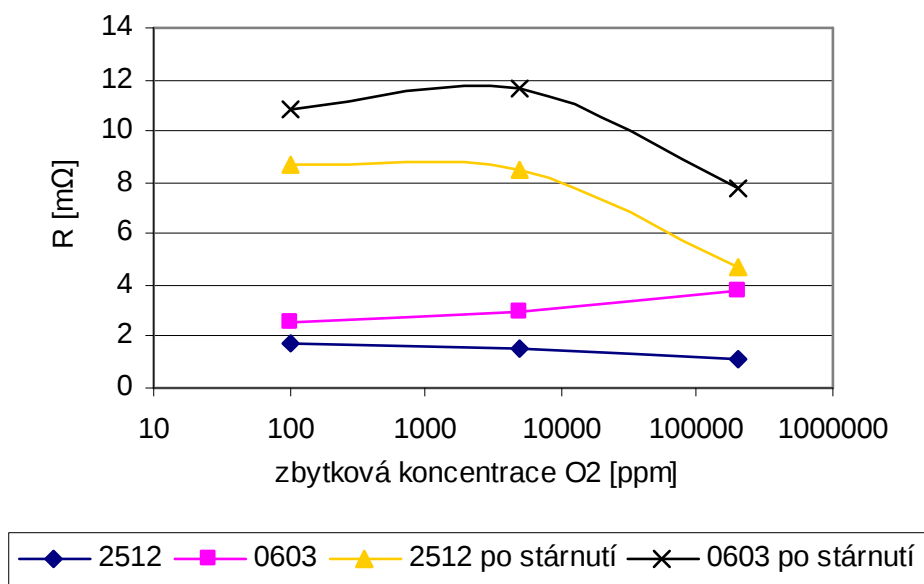
Pro pájecí slitinu SAC3005 (ENIG) je ze závislosti hodnoty odporu spojů na koncentraci O₂ v kontrolované atmosféře (obr. 24) patrná nejmenší změna hodnot při zapájení na vzduchu a při 5000ppm. Vzhledem k rozdílům 0,8mΩ jsou tyto změny nepatrné. Vyhodnocení vlivu koncentrace O₂ v atmosféře pro zbylé pájecí slitiny je uvedeno v příloze 2. Porovnání vzorků zapájených na substrátu FR-4 s nejnižším naměřeným odporem spojů je uvedeno v tabulce 6.

Tab. 6 Nejnižší naměřené odpory spojů součástek na substrátu FR-4

Zbytková koncentrace O ₂ [ppm]		vzduch		5000		100	
Pájecí slitina	povrchová úprava	0603	2512	0603	2512	0603	2512
SAC305	ENIG	2,40	2,47	1,45	1,73	0,80	2,53
R256	ímerzní cín	1,40	0,88	2,45	0,73	0,60	0,53
SN100C	ímerzní cín	6,60	5,13	7,80	3,33	0,80	0,33
M40	ENIG	2,80	1,13	2,95	1,53	2,60	1,73

Při vyhodnocení změn hodnot odporů spojů již nedocházelo jednoznačně k nejmenším změnám na vzorcích zapájených na vzduchu jako v případě povrchové úpravy ímezním cínem. Tento trend byl zachován u pájky M40 a pájky SAC305 (obr. 24). U pájky R256 byla naměřena nejmenší hodnota změny odporu spojů při koncentraci O₂ v atmosféře 5000ppm a stejně tomu budou pájecí slitiny SN100C.

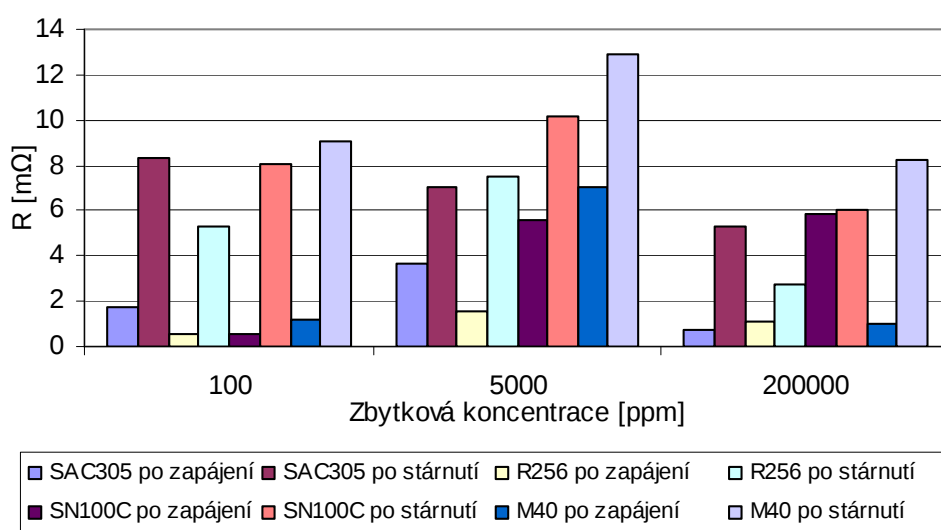
Nepředpokládaný průběh byl zaznamenán u pájky M40. Tato pájka je od výrobce určena pro pájení na vzduchu a z výsledné charakteristiky změny odporů pájených spojů součástek to jen dokazuje. Sice lze pozorovat nárůst hodnoty odporu na spojích součástky 0603 před aplikací metody umělého stárnutí a při zvyšování koncentrace O₂, ovšem na součástce 2512 tato hodnota klesá. Dále je z obrázku 25 patrné, že po aplikaci metody umělého stárnutí dochází k nejmenšímu nárůstu odporu spojů právě na vzorku, který byl zapájen na vzduchu.



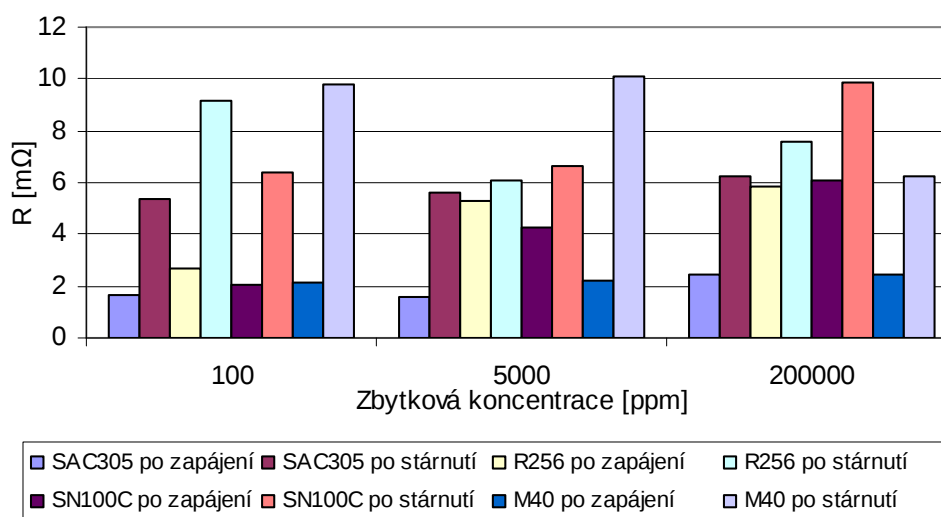
Obr. 26 Závislost odporu spojů pájecí slitiny M40 na koncentraci O₂ v kontrolované atmosféře

Porovnání vlivu stárnutí

Na obrázcích 26 (FR-4, imerzní cín) a 27 (FR-4, ENIG) jsou zobrazeny průměrné hodnoty odporů spojů pro jednotlivé pájky a koncentrace atmosféry před a po stárnutí. Takto vzniklé grafy ukazují, jakým způsobem se měnil odpor spojů pájecích slitin v důsledku aplikace metody umělého stárnutí. Nejmenší změny vykazovala při povrchové úpravě imerzním cínem pájka SN100C zapájená na vzduchu (obr. 26). Je nutno podotknout, že i přes větší změny v odporu spojů důsledkem metody stárnutí, byly na pájce R256 naměřeny nejnižší hodnoty odporu po zapájení a v průměru i po stárnutí. Největší rozdíly hodnot odporů lze pozorovat na pájecí slitině M40.



Obr. 27 Změny naměřených hodnot odporů spojů způsobené stárnutím vzorků (FR-4, imerzní cín)



Obr. 28 Změny naměřených hodnot odporů spojů způsobené stárnutím vzorků (FR-4, ENIG)

V případě použití povrchové úpravy ENIG tomu bylo jinak. Nejmenší změny odporu spojů vykazovala pájecí slitina R256 zapájená na vzduchu a při 5000ppm. Avšak nejnižších hodnot se podařilo dosáhnout za použití pájky SA305. Při této povrchové úpravě byly hodnoty odporů naměřené na pájecí slitině M40 před stárnutím vyhodnoceny jako druhé nejnižší ze všech čtyř slitin. Ovšem při výsledném zhodnocení po stárnutí zde byly naměřeny hodnoty odporů nejvyšší. V důsledku toho tato slitina opět vykazovala nejvyšší změny v naměřených hodnotách.

4.3.3 Přehled naměřených hodnot

Přehled všech naměřených odporů spojů na součástkách 0603 a 2512 je uveden v tabulce 7. Nejsou zde uvedeny hodnoty pro spoje na zbylých velikostech součástek, jelikož na substrátu FR-4 nebyly použity a tabulka by se tak stala nepřehlednou. Všechny hodnoty naměřené na korundu jsou uvedeny v příloze. Z této tabulky je jasný přehled změn hodnot pro jednotlivé materiálové kombinace a koncentrace atmosféry.

Tab. 7 Přehled hodnot naměřených odporů spojů na součástkách 0603 a 2512 před stárnutím (za účelem vyhodnocení vlivu dusíku v atmosféře)

Pájecí slitin	Druh substrátu	Povrchová úprava	Koncentrace atmosféry [ppm]	0603 [mΩ]	2512 [mΩ]
R256	FR-4	imerzní cín	vzduch	1,40	0,88
R256	FR-4	imerzní cín	5000	2,45	0,73
R256	FR-4	imerzní cín	100	0,60	0,53
R256	FR-4	ENIG	vzduch	6,20	5,53
R256	FR-4	ENIG	5000	6,00	4,53
R256	FR-4	ENIG	100	4,00	1,33
R256	korundová k.		vzduch	6,28	15,33
R256	korundová k.		5000	15,03	16,67
R256	korundová k.		1000	11,03	17,17
R256	korundová k.		500	16,28	15,17
R256	korundová k.		100	9,28	14,50
R256	korundová k.		10	11,28	14,00
SN100C	FR-4	imerzní cín	vzduch	6,60	5,13
SN100C	FR-4	imerzní cín	5000	7,80	3,33
SN100C	FR-4	imerzní cín	100	0,80	2,87
SN100C	FR-4	ENIG	vzduch	7,60	4,63
SN100C	FR-4	ENIG	5000	4,80	3,73
SN100C	FR-4	ENIG	100	1,20	2,93
SN100C	korundová k.		vzduch	12,53	18,92
SN100C	korundová k.		5000	6,30	14,67
SN100C	korundová k.		1000	6,13	19,92
SN100C	korundová k.		500	8,80	15,42

SN100C	korundová k.		100	5,47	14,67
SN100C	korundová k.		10	8,13	13,17
SAC305	FR-4	imerzní cín	vzduch	0,60	0,93
SAC305	FR-4	imerzní cín	5000	5,00	2,33
SAC305	FR-4	imerzní cín	100	2,60	0,93
SAC305	FR-4	ENIG	vzduch	2,40	2,93
SAC305	FR-4	ENIG	5000	1,45	1,73
SAC305	FR-4	ENIG	100	0,80	2,53
SAC305	korundová k.		vzduch	9,13	19,50
SAC305	korundová k.		5000	7,30	11,67
SAC305	korundová k.		1000	10,13	14,67
SAC305	korundová k.		500	9,47	13,67
SAC305	korundová k.		100	6,30	11,67
SAC305	korundová k.		10	6,97	12,83
M40	FR-4	imerzní cín	vzduch	1,60	0,33
M40	FR-4	imerzní cín	5000	8,60	5,53
M40	FR-4	imerzní cín	100	1,60	0,73
M40	FR-4	ENIG	vzduch	3,80	1,13
M40	FR-4	ENIG	5000	2,95	1,53
M40	FR-4	ENIG	100	2,60	1,73
M40	korundová k.		vzduch	13,47	17,07
M40	korundová k.		5000	16,47	20,33
M40	korundová k.		1000	9,47	14,83
M40	korundová k.		500	10,49	13,50
M40	korundová k.		100	13,47	15,50
M40	korundová k.		10	6,63	21,17

Z přehledové tabulky můžeme vypořizovat, pro které pájecí slitiny a materiálové kombinace byly naměřeny nejnížší a nejvyšší odpory spojů vůbec. Při porovnání základních materiálů je patrný rozdíl v hodnotě odporů spojů. Tento rozdíl má u všech slitin stejný charakter. V důsledku tato skutečnost znamená nárůst hodnoty odporů spojů provedených na korundové keramice oproti FR-4 o cca 9 – 15mΩ.

Vzájemné porovnání povrchových úprav již není tak jednoduché, jelikož v tomto případě měla každá z těchto úprav jiný charakter vlivu na použité slitiny. Pokud se třeba zaměříme na pastu R256, tak je vidět z tabulky 7, že při povrchové úpravě imerzním cínem byly naměřeny nejnížší hodnoty odporu a dosaženo poměrně stálých hodnot odporu pro všechny koncentrace kontrolované atmosféry. U ostatních pájecích slitin byl naměřen vzestup hodnot pro zbytkovou koncentraci O₂ v atmosféře u 5000ppm. V případě povrchové úpravy ENIG se tendence zachování hodnot vytratila a je patrná závislost hodnoty odporu spojů na zbytkové koncentraci O₂ stejná pro všechny pájecí slitiny (pro nejnížší koncentraci O₂ v atmosféře byl naměřen nejnížší odpor spoje).

5 Závěr

Teoretická část této práce je zaměřena na problematiku pájení. V této části byly popsány druhy základních materiálů a jejich povrchových úprav, které s v dnešní době používají pro výrobu DPS. Dále pojednává o typech pájecích slitin a způsobech, kterými je v dnešní době pájení realizováno. Konec této části tvoří nastínění provedení a účelu kontrolních metod pro určení výsledné kvality pájených spojů.

Na takto položených základech byl pro praktickou část zvolen způsob pájení přetavením kontaktní metodou. Jako faktory, které nejvíce ovlivňují výslednou jakost, byly zvoleny takové, jejichž změna vyžadovala složité zásahy do pájecí aparatury. Jsou to druh pájecí pasty (olovnatá, bezolovnatá), druh základního materiálu (korundová keramika, FR - 4), povrchová úprava kontaktních ploch na FR-4 (imerzní cín, ENIG) a vliv kontrolované dusíkové atmosféry. Poté, co jsme vybrali faktory, které budeme měnit, bylo důležité zvolit systém, jakým bude pájení probíhat. Jelikož byl položen cíl prověřit co nejvíce materiálových kombinací v závislosti na koncentraci kontrolované atmosféry použité při pájení, byl zvolen systém zapájení 4 sérií vzorků na korundovou keramiku (vzorek - zapájené součástky s vodivým motivem na nosném substrátu; 4 série = 4 pasty) a 8 sérií na substrát FR-4 (4 pasty x 2 povrchové úpravy). Série (řada vzorků zapájené jedním druhem pasy na určitý druh substrátu) na korundové keramice čítala 6 testovacích vzorků, na substrátu FR-4 vzorky 3. Každý z jednotlivých vzorků v sérii byl zapájen při odlišné koncentraci zbytkového kyslíku v kontrolované atmosféře. Po konzultaci s vedoucím práce byl jako sledovaný parametr zvolen odpor spojů součástek a kontaktních ploch na substrátu. Pro měření byla zvolena 4-vodičová metoda měření odporu, jelikož klasická 2-vodičová metoda vykazovala chybu neúměrnou velikosti měřených hodnot. Pro získání porovnání, jak se budou zapájené spoje chovat v čase, byla zvolena metoda umělého stárnutí.

Ze všech naměřených hodnot na vzorcích, kde byla použita jako základní materiál korundová keramika, vykazovala nejnižší hodnotu odporu spojů pájka SAC305 zapájená při zbytkové koncentraci O_2 500ppm. Nejvyšších hodnot odporu bylo dosaženo na pájecí slitině M40 při 5000ppm O_2 . Rozdíly mezi hodnotami u těchto pájek byly v průměru 17mΩ. Nejmenší změna hodnot odporu spojů v závislosti na koncentraci atmosféry při pájení byla sledována u pájky SAC305 a R256. Naopak nejvyšších hodnot rozdílu dosáhly spoje zapájené slitinou M40. Při porovnávání stálosti hodnoty odporu spojů v závislosti na počtu cyklů metody stárnutí, vykazovala nejmenší změny opět slitina SAC305.

Při vyhodnocování vzorků s použitým substrátem FR-4 bylo naměřeno pro každou povrchovou úpravu odlišné chování hodnot odporu spojů. Při použití úpravy imerzním cínem vykazovaly vzorky nejvyšších hodnot při koncentraci 5000ppm u všech slitin s výjimkou SN100C, kde byla tato hodnota zaznamenána u koncentrace zbytkového kyslíku 100ppm. Vzhledem k posloupnosti měření vzorků v jedné sérii (např. R256-vzduch, R256-5000ppm, R256-100ppm, poté následoval další typ slitiny a stejný postup) je nepravděpodobné vnesení

chyby o stejné hodnotě do všech vzorků zapájených při koncentraci 5000ppm O_2 s povrchovou úpravou imerzní cín. Tento trend však nebyl zachován v případě úpravy ENIG. Zde se hodnota odporu měnila s rostoucí tendencí v závislosti na zvyšující se koncentraci O_2 . Z obou povrchových úprav vykazovala nejnižší hodnoty odporů pájecí slitina R256. Při vyhodnocování vlivu kontrolované atmosféry na odpor spojů, byly naměřeny nejnižší změny hodnot na pájce R256 pro PÚ imerzní cín ($\pm 1,72m\Omega$) a SAC305 pro PÚ ENIG ($\pm 1,6m\Omega$). Největší hodnota změny pak byla naměřena u M40 v obou případech povrchových úprav. Nejmenší změnu hodnot odporů spojů v závislosti na stárnutí vykazovala pájka R256 s povrchovou úpravou imerzním cínem.

Z uvedených výsledků by mohla být vyvozena doporučení pro pájení jednotlivými pájkami. Vzhledem k nepřesnosti měřicí metody dané dostupným vybavením při měření je nutné, aby se tyto hodnoty braly s určitou tolerancí při vyhodnocování chování odporů spojů v závislosti na koncentraci atmosféry a počtu provedení cyklu stárnutí. Aby mohly být skutečně vypovídající a uvedena zaručená doporučení, musel by být použit nejen přesnější přístroj pro měření odporů (např. Mikroohm-metr Chauvin Arnoux C.A. 6250), vhodný přípravek a musely by být provedeny další testy. Z pohledu elektrických vlastností například odolnost jednotlivých vzorků vůči vysokému napětí či proudu. Vhodné by bylo i provedení proudového cyklování a po této metodě sledovat nárůst intermetalických struktur a změny ve vodivosti. Avšak stihnout provést všechny tyto testy v rámci bakalářské práce je vzhledem k počtu vzorků a vybavení laboratoří nemožné.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

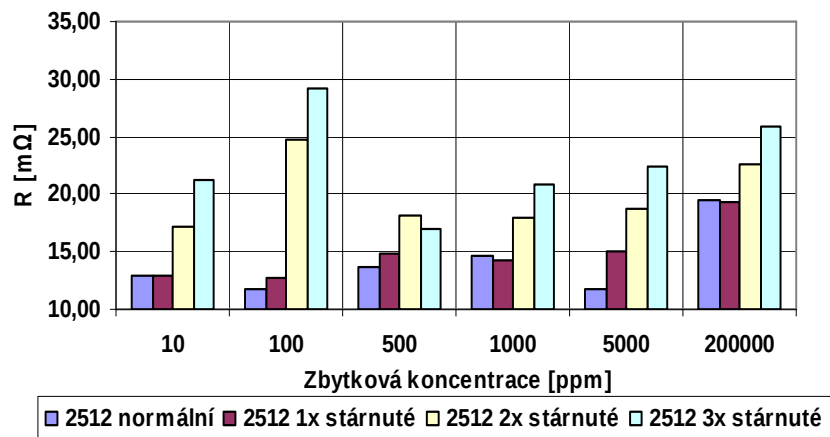
- [1] ABTEW, M.; SELVADURAY, G *Materials science and engineering r-reports* Volume: 27 Issue: 5-6 Pages: 95-141 2000.
- [2] PAŠKO, M. *Spolehlivost bezolovnatého pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Stejskal.
- [3] LAČNÝ, R. *Elektrická vodivost pájeného spoje a vliv na spolehlivost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [4] SZENDIUCH, I.a kol. *Technologie elektronických obvodů a systémů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002. 237 s. ISBN 80-214-2072-3.
- [5] STARÝ, J.; ZATLOUKAL, M.; STEJSKAL, P. *Montážní a propojovací technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. [skripta] Nedatováno. 262 s.
- [6] SZENDIUCH, I. *Mikroelektronika a technologie součástek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2003. 118 s.
- [7] PÍCHA, J. *Studium spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 82 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..
- [8] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektroniky a komunikačních technologií 2006. ISBN 80-214-3292-6.
- [9] PELC, M. *Výzkum spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 80 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [10] STARÝ, J.; ŠANDERA, J.; KAHLE , P. *Plošné spoje a povrchová montáž*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2003. 80s
- [11] SZENDIUCH I. *Pájení bezolovnaté pájky*. [online].Nedatováno. 10 s. Dostupné z <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>.
- [12] SCHNEDERLE, P. *Optimalizace procesu výroby DPS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

- [13] SZENDIUCH, I.; PÍCHA, J.; JANKOVSKÝ, J.; BURŠÍK, M.; ŘEZNÍČEK, M.; ADÁMEK, M. *Pájení přetavením v elektrotechnice – fenomén doby*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. 40 s. ISBN 978-80-214-4233-7.
- [14] ŠANDERA, J. *Součástky pro SMT, moderní technologie pouzdření*. [online]. Nedatováno. 37 s. Dostupné z <http://www.smtplus.cz/litSMT/souc/Maxsouc1pr.pdf>.
- [15] TOBOLA, M. *Metalografický výbrus DPS, inspekční a vývojová metoda*. [online]. 2011. 1s. Dostupné z <http://dps-az.cz/media/pdf/ukazky/vyroba-inspekce-dps.pdf>.
- [16] DZIK, P. *Urychlené stárnutí*. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2011. 1s. Dostupné z <http://www.chempoint.cz/urychlene-starnuti>
- [17] ČSN 60068-2-2. *Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-2: Zkoušky - Zkouška B: Suché teplo*. Praha: ÚNMZ, 2008.
- [18] ČSN 60068-2-20. *Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-20: Zkoušky - Zkouška T: Zkušební metody na pájitelnost a na odolnost proti teple při pájení*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [19] ČSN 61189-3 ed. 2. *Zkušební metody pro elektrotechnické materiály, desky s plošnými spoji a jiné propojovací struktury a sestavy - Část 3: Zkušební metody pro propojovací struktury (desky s plošnými spoji)*. Praha: ÚNMZ, 2008.
- [20] AMTEST-SMT; *Tin lead R256*. [online]. 2010. 1 s. Dostupné z <http://www.amtest-smt.com/en/our-products/materials/solder-paste/tin-lead-r256,19.html>.
- [21] SMTCENTRUM; *Srovnání pájecích slitin SAC a Sn100*. [online]. 2009. 1 s. Dostupné z <http://www.smtcentrum.cz/vyber-pajecich-slitin/srovnani-pajecich-slitin-sac-a-sn100/>.
- [22] SENU MANUFACTURING (EUROPE) LTD. *Low Silver SMT Solder Paste (Presentation)*. Dostupné z <http://dc184.4shared.com/doc/4vTYFGB7/preview.html>.

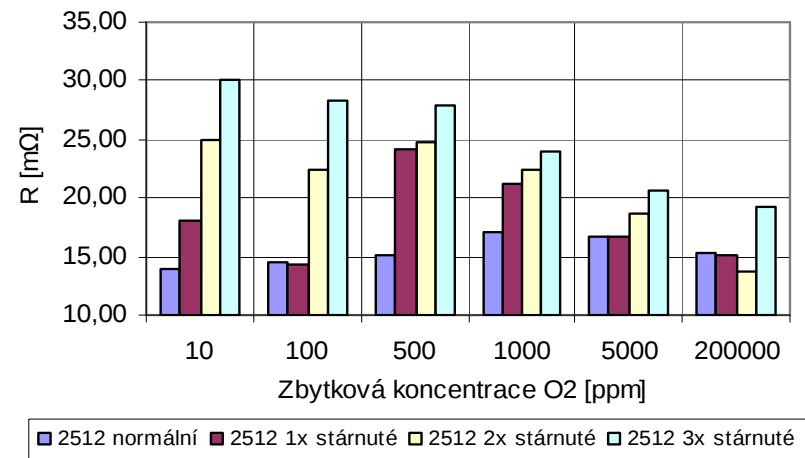
SEZNAM ZKRATEK

BGA	-	ball grid array
DPS	-	deska plošných spojů
FR	-	flame retardantů
HAL	-	hot air leveling
HDI	-	hight density interconnect
OSP	-	organic surface protectives
PEN	-	polyethylen naftalát
PET	-	polyethylen tereftalát
PLCC	-	plastic leaded chip carrier
PTFE	-	polytetrafluorethylen
SMD	-	surface mount device
SMT	-	surface mount technology
SSOP	-	shrink small-outline package
TAB	-	tape automated bonding
THT	-	through-hole technology
ICT	-	in-circuit test
PÚ	-	povrchová úprava

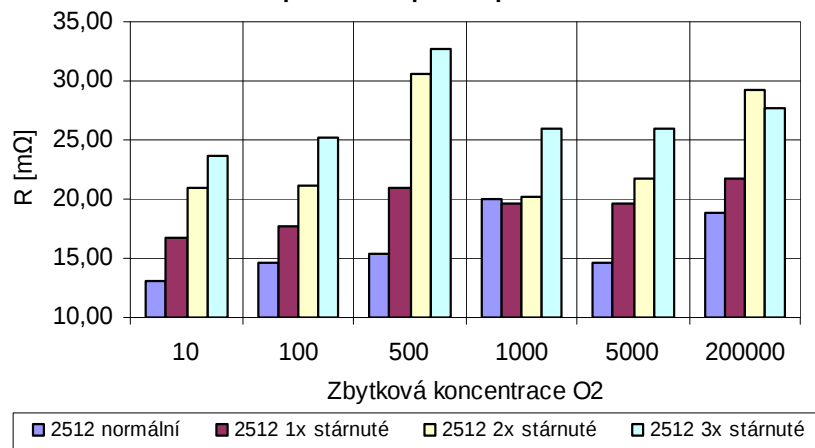
SAC305 porovnání před a po stárnutí



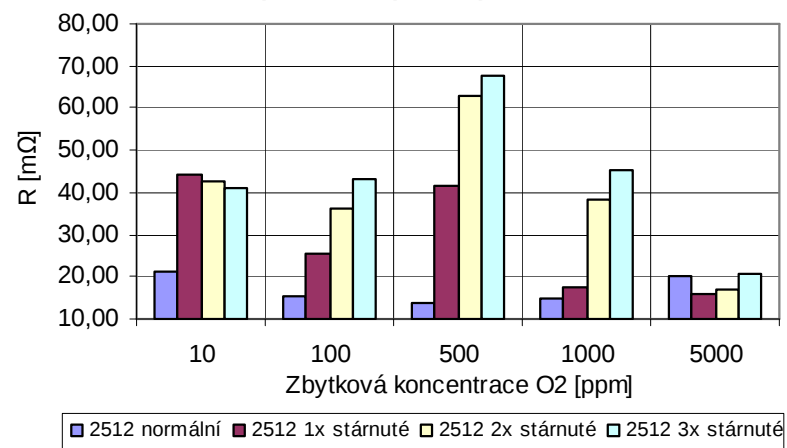
R256 porovnání před a po stárnutí



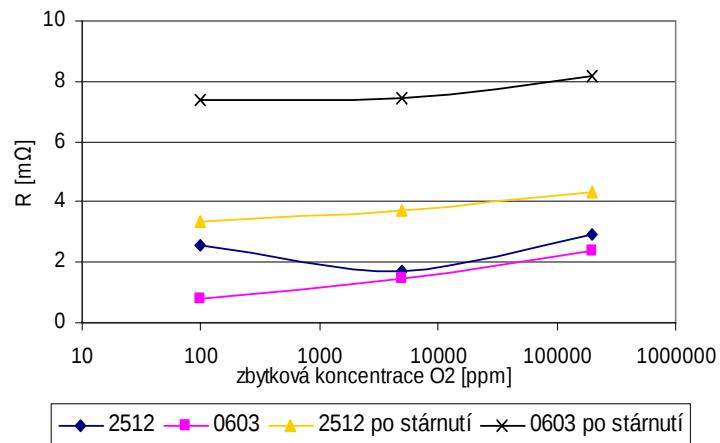
SN100C porovnání před a po stárnutí



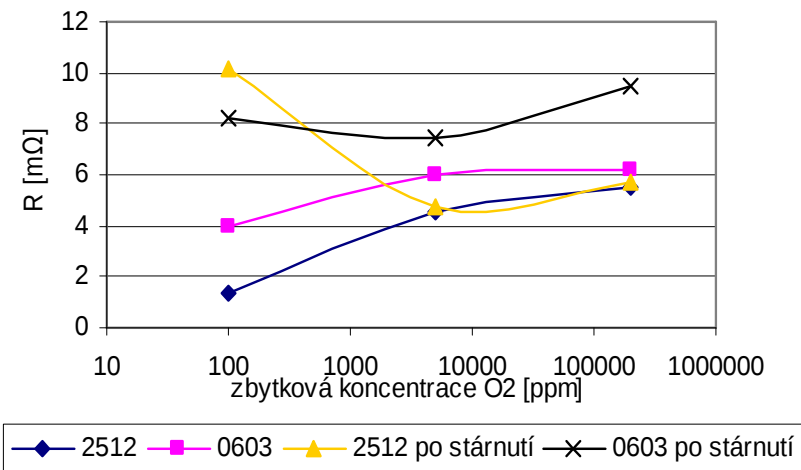
M40 porovnání před a po stárnutí



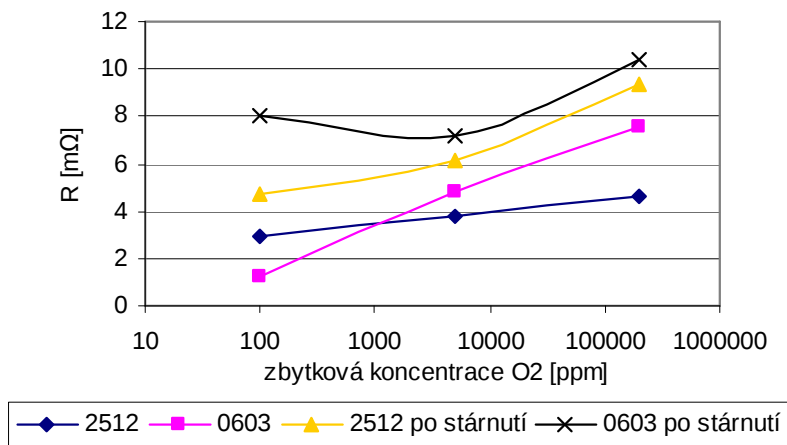
SAC305 před a po stárnutí



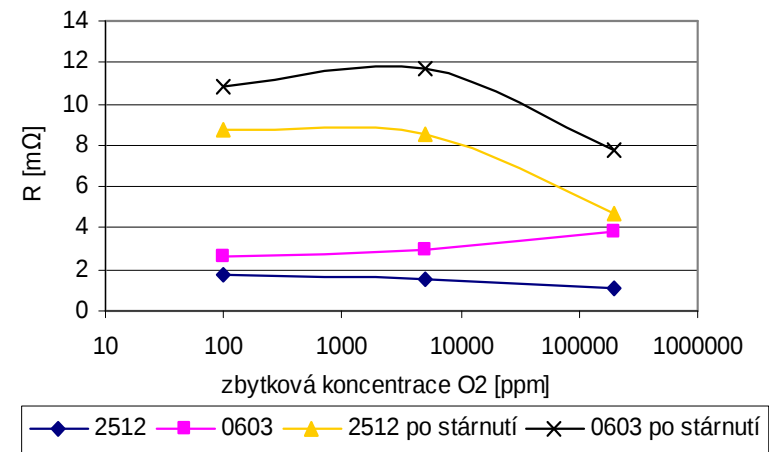
R 256 před a po stárnutí

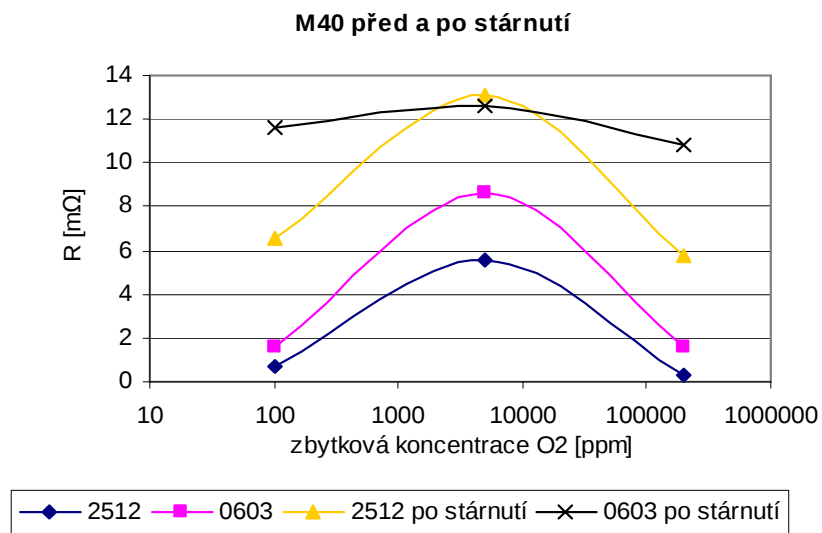
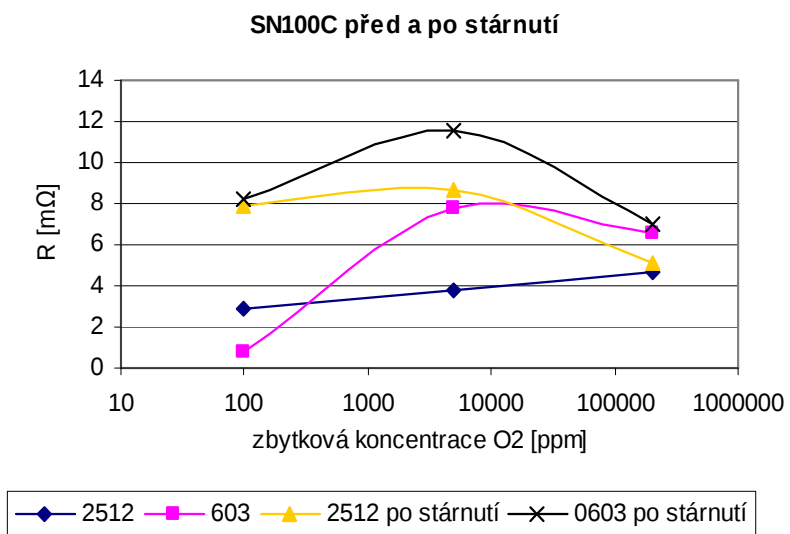
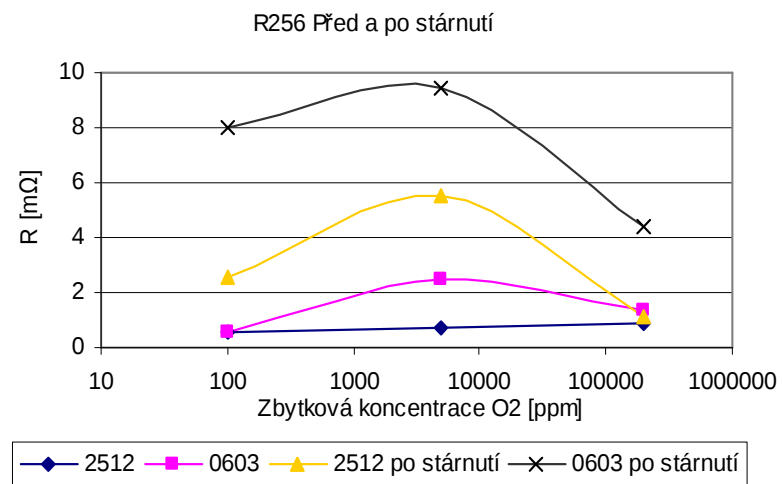
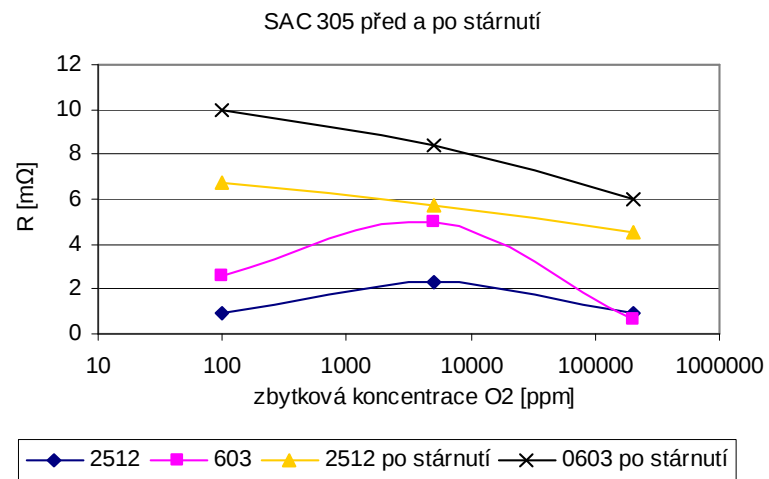


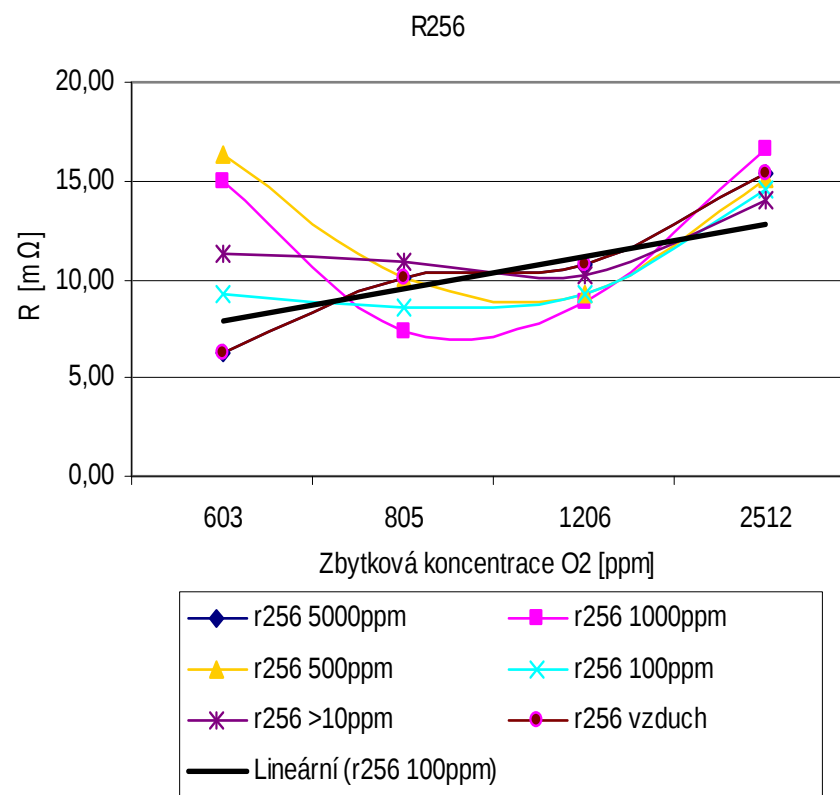
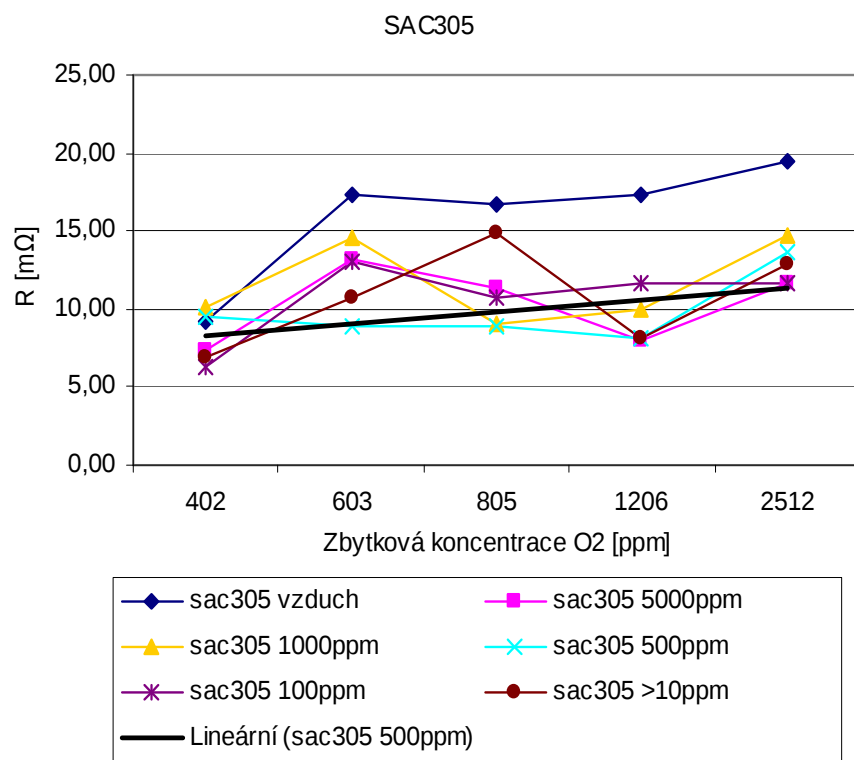
SN100C před a po stárnutí



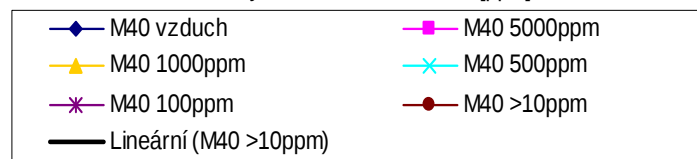
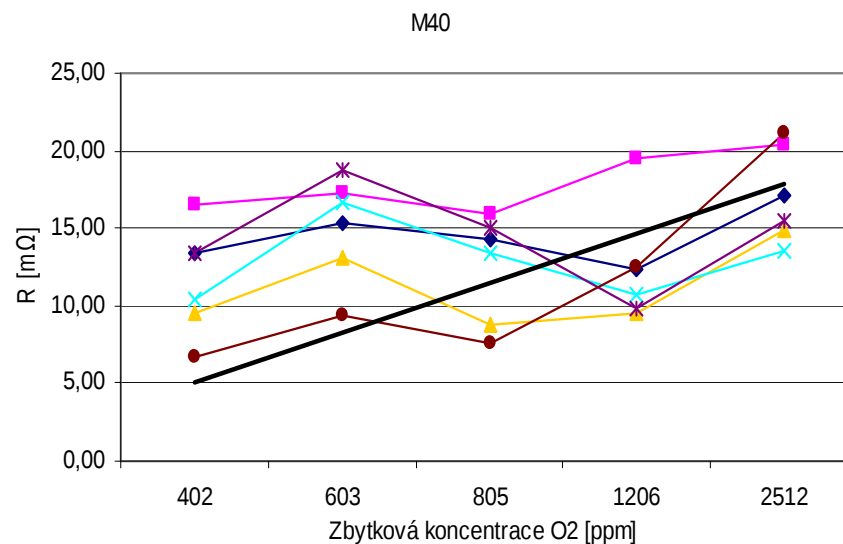
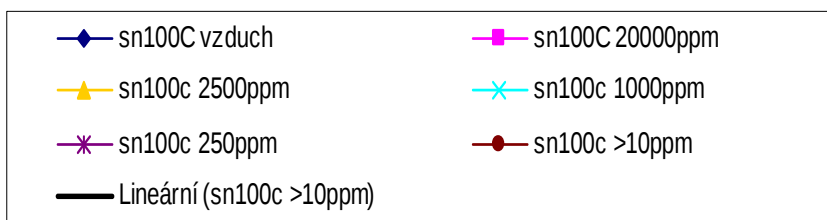
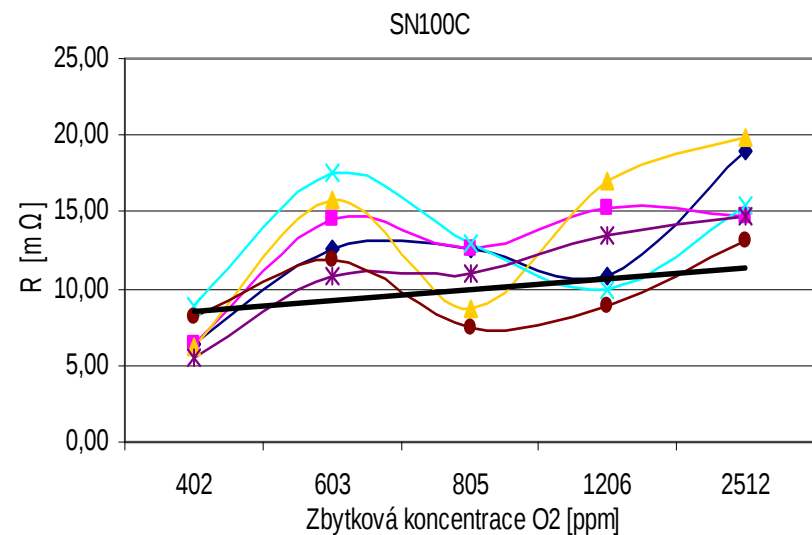
M40 před a po stárnutí







Příloha 5 Rozptyl hodnot naměřených odporů spojů v závislosti na velikosti součástky při různé koncentraci kontrolované atmosféry



Rzkr	r256 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	603	35	31	40	37	!	!	35,75	36	25,75	6,28
10	805	28	31	30	31	!	!	30,00	30,5	20,00	10,07
11	1206	40	39	43	43	47	43	42,50	43	31,50	10,70
12	2512	44	43	45	45	66	49	48,67	45	36,67	15,33
Rzkr	r256 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
13	603	40	49	52	49	!	!	47,50	49	34,50	15,03
15	805	30	30	33	36	!	!	32,25	31,5	17,25	7,32
15	1206	42	46	47	42	43	48	44,67	44,5	29,67	8,87
13	2512	51	44	50	65	48	48	51,00	49	38,00	16,67
Rzkr	r256 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
11	603	41	44	40	41	!	!	41,50	41	30,50	11,03
8	805	30	36	27	30	!	!	30,75	30	22,75	12,82
9	1206	43	43	48	46	46	41	45,20	44,5	36,20	15,40
9	2512	47	44	47	63	43	41	47,50	45,5	38,50	17,17
Rzkr	r256 500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	603	46	46	47	44	!	!	45,75	46	35,75	16,28
12	805	33	31	31	33	!	!	32,00	32	20,00	10,07
11	1206	37	42	41	41	40	45	41,00	41	30,00	9,20
10	2512	45	42	45	64	43	40	46,50	44	36,50	15,17
Rzkr	r256 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
12	603	40	40	44	39	!	!	40,75	40	28,75	9,28
10	805	25	27	35	27	!	!	28,50	27	18,50	8,57
10	1206	39	38	39	42	39	43	40,00	39	30,00	9,20
11	2512	45	43	45	62	43	43	46,83	44	35,83	14,50
Rzkr	r256 >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	603	41	42	39	41	!	!	40,75	41	30,75	11,28
10	805	27	32	32	32	!	!	30,75	32	20,75	10,82
11	1206	44	43	43	42	42	38	42,00	42,5	31,00	10,20
10	2512	44	41	46	56	44	41	45,33	44	35,33	14,00

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	r256 vzduch	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	603	34	36	38	33	35,25	35	30,25	10,78
3	805	26	26	21	19	23,00	23,5	20,00	10,07
4	1206	54	40	39	35	42,00	39,5	38,00	17,20
5	2512	39	37	55	35	41,50	38	36,50	15,17
Rzkr	r256 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	34	33	40	38	36,25	36	32,25	12,78
5	805	24	24	24	25	24,25	24	19,25	9,32
9	1206	38	38	41	43	40,00	39,5	31,00	10,20
9	2512	42	43	59	44	47,00	43,5	38,00	16,67
Rzkr	r256 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
12	603	54	42	48	44	47,00	46	35,00	15,53
10	805	33	35	36	30	33,50	34	23,50	13,57
9	1206	59	61	54	56	57,50	57,5	48,50	27,70
13	2512	52	54	67	49	55,50	53	42,50	21,17
Rzkr	r256 500ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
9	603	42	38	42	41	40,75	41,5	31,75	12,28
10	805	43	36	39	37	38,75	38	28,75	18,82
9	1206	50	50	43	52	48,75	50	39,75	18,95
10	2512	48	53	70	51	55,50	52	45,50	24,17
Rzkr	r256 100ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
8	603	40	37	43	41	40,25	40,5	30,97	11,50
9	805	30	29	26	27	28,00	28	19,43	9,50
10	1206	53	44	39	43	44,75	43,5	35,55	14,75
9	2512	53	54	50	44	50,25	51,5	35,75	14,42
Rzkr	r256 >10ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
8	603	40	36	45	43	41,00	41,5	29,72	10,25
9	805	42	29	30	35	34,00	32,5	23,18	13,25
8	1206	53	52	65	50	55,00	52,5	44,80	24,00
7	2512	60	50	55	49	53,50	52,5	39,50	18,17

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	r256 vzduch	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	603	39	36	38	37	37,50	37,5	26,72	7,25
4	805	39	28	21	26	28,50	27	18,43	8,50
5	1206	64	50	54	50	54,50	52	37,30	16,50
6	2512	45	47	70	39	50,25	46	35,08	13,75
Rzkr	r256 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	603	37	37	43	40	39,25	38,5	34,25	14,78
4	805	24	28	30	27	27,25	27,5	23,25	13,32
4	1206	48	49	50	48	48,75	48,5	44,75	23,95
5	2512	39	39	62	40	45,00	39,5	40,00	18,67
Rzkr	r256 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	603	44	40	48	41	43,25	42,5	38,25	18,78
5	805	37	33	27	25	30,50	30	25,50	15,57
5	1206	56	62	55	52	56,25	55,5	51,25	30,45
4	2512	43	45	62	41	47,75	44	43,75	22,42
Rzkr	r256 500ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	603	40	39	41	37	39,25	39,5	34,25	14,78
4	805	32	32	28	27	29,75	30	25,75	15,82
3	1206	56	54	47	52	52,25	53	49,25	28,45
3	2512	45	44	59	48	49,00	46,5	46,00	24,67
Rzkr	r256 100ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
6	603	40	35	39	46	40,00	39,5	34,00	14,53
5	805	31	32	28	25	29,00	29,5	24,00	14,07
4	1206	52	44	44	45	46,25	44,5	42,25	21,45
3	2512	40	45	63	39	46,75	42,5	43,75	22,42
Rzkr	r256 >10ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	603	38	30	42	36	36,50	37	33,50	14,03
3	805	28	28	28	34	29,50	28	26,50	16,57
4	1206	62	47	82	49	60,00	55,5	56,00	35,20
2	2512	53	41	60	39	48,25	47	46,25	24,92

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	r256 vzduch	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
7	603	43	39	43	40	41,25	41,5	34,00	10,13
6	805	45	30	32	32	34,75	32	26,25	6,78
6	1206	66	56	52	56	57,50	56	41,00	31,07
7	2512	52	50	73	40	53,75	51	40,00	19,20
Rzkr	r256 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	38	41	44	45	42,00	42,5	38,00	14,13
4	805	27	33	35	26	30,25	30	26,25	6,78
5	1206	58	51	58	42	52,25	54,5	47,25	37,32
7	2512	48	44	61	41	48,50	46	41,50	20,70
Rzkr	r256 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
8	603	50	54	50	38	48,00	50	40,00	16,13
6	805	35	36	32	34	34,25	34,5	28,25	8,78
5	1206	56	59	56	55	56,50	56	51,50	41,57
6	2512	50	45	65	43	50,75	47,5	44,75	23,95
Rzkr	r256 500ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
2	603	43	42	43	37	41,25	42,5	39,25	15,38
4	805	33	35	32	33	33,25	33	29,25	9,78
3	1206	57	60	49	54	55,00	55,5	52,00	42,07
4	2512	50	48	61	52	52,75	51	48,75	27,95
Rzkr	r256 100ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
6	603	44	46	45	39	43,50	44,5	37,50	18,03
6	805	37	37	34	34	35,50	35,5	29,50	10,03
7	1206	52	55	43	52	50,50	52	43,50	24,03
6	2512	45	47	75	48	53,75	47,5	47,75	28,28
Rzkr	r256 >10ppm	R1	R2	R3	R4	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
7	603	54	38	48	41	45,25	44,5	38,25	18,78
6	805	35	36	36	32	34,75	35,5	28,75	9,28
7	1206	55	55	89	52	62,75	55	55,75	36,28
4	2512	59	47	61	47	53,50	53	49,50	30,03

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	sn100C vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
1	402	29	30	32	31	33	32	31,17	31,50	30,17	6,30
4	603	36	34	43	34	36	33	36,00	35,00	32,00	12,53
4	805	25	25	28	28	27	27	26,60	27,00	22,60	12,67
5	1206	34	34	36	37	42	43	36,60	36,50	31,60	10,80
5	2512	40	40	61	40	!	!	45,25	40,00	40,25	18,92
Rzkr	sn100C 20000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
8	402	37	36	39	42	37	38	38,17	37,50	30,17	6,30
7	603	39	37	36	45	47	42	41,00	40,50	34,00	14,53
8	805	34	30	27	32	30	33	30,60	31,00	22,60	12,67
9	1206	45	42	50	43	45	46	45,00	45,00	36,00	15,20
9	2512	40	38	57	45	!	!	45,00	42,50	36,00	14,67
Rzkr	sn100c 2500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
11	402	41	44	38	40	42	41	41,00	41,00	30,00	6,13
12	603	43	42	40	52	54	52	47,17	47,50	35,17	15,70
9	805	33	24	28	28	31	22	27,67	28,00	18,67	8,73
6	1206	44	46	43	44	46	40	43,83	44,00	37,83	17,03
8	2512	45	38	70	44	!	!	49,25	44,50	41,25	19,92
Rzkr	sn100c 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
9	402	40	42	45	45	35	43	41,67	42,50	32,67	8,80
9	603	43	50	45	46	45	47	46,00	45,50	37,00	17,53
10	805	33	33	30	32	34	35	32,83	33,00	22,83	12,90
9	1206	37	39	43	43	37	38	39,80	38,50	30,80	10,00
10	2512	44	38	67	38	!	!	46,75	41,00	36,75	15,42
Rzkr	sn100c 250ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
8	402	41	39	35	35	36	38	37,33	37,00	29,33	5,47
8	603	36	42	42	38	37	35	38,33	37,50	30,33	10,87
8	805	30	27	27	32	30	28	29,00	29,00	21,00	11,07
9	1206	47	48	48	35	38	44	43,33	45,50	34,33	13,53
9	2512	43	41	56	40	!	!	45,00	42,00	36,00	14,67
Rzkr	sn100c >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	ØR	Medián R	ØR - ØRzkr	ØRnam - ØRzkr -ØR
7	402	42	42	39	40	38	33	39,00	39,50	32,00	8,13
8	603	37	44	41	42	39	33	39,33	40,00	31,33	11,87
8	805	27	30	20	28	24	23	25,33	25,50	17,33	7,40
7	1206	32	36	36	38	35	43	36,67	36,00	29,67	8,87
6	2512	38	35	54	35	!	!	40,50	36,50	34,50	13,17

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	sn100C vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
6	402	38	38	38	44	37	44	39,83	38	33,83	9,97
6	603	35	36	28	42	36	43	36,67	36	30,67	11,20
4	805	27	23	26	26	28	30	26,00	26,5	22,00	12,07
4	1206	34	42	39	37	43	44	39,00	40,5	35,00	14,20
5	2512	38	40	70	44	!	!	48,00	42	43,00	21,67
Rzkr	sn100c 20000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	402	37	34	36	38	37	39	36,83	37	33,83	9,97
2	603	38	35	30	35	35	35	34,67	35	32,67	13,20
2	805	20	18	18	25	26	21	21,33	20,5	19,33	9,40
2	1206	33	39	41	38	38	38	37,83	38	35,83	15,03
2	2512	38	35	58	41	!	!	43,00	39,5	41,00	19,67
Rzkr	sn100c 2500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	402	40	41	36	34	35	35	36,83	35,5	33,83	9,97
2	603	38	33	36	30	40	33	35,00	34,5	33,00	13,53
2	805	30	24	23	25	28	19	24,83	24,5	22,83	12,90
2	1206	32	34	38	45	43	30	38,40	36	36,40	15,60
2	2512	45	40	52	35	!	!	43,00	42,5	41,00	19,67
Rzkr	sn100c 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	402	38	36	35	37	33	38	36,17	36,5	33,17	9,30
2	603	34	38	34	37	37	36	36,00	36,5	34,00	14,53
3	805	30	25	24	27	28	25	26,50	26	23,50	13,57
4	1206	37	39	37	38	39	42	38,67	38,5	34,67	13,87
4	2512	43	41	63	38	!	!	46,25	42	42,25	20,92
Rzkr	sn100c 250ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	402	37	38	37	38	39	38	37,83	38	33,83	9,97
4	603	34	37	37	33	36	33	35,00	35	31,00	11,53
4	805	24	23	21	25	27	20	23,33	23,5	19,33	9,40
4	1206	33	37	37	35	37	33	35,33	36	31,33	10,53
5	2512	43	43	53	37	!	!	44,00	43	39,00	17,67
Rzkr	sn100c >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	402	38	36	35	41	38	30	36,33	37	32,33	8,47
2	603	34	38	35	36	40	37	36,67	36,5	34,67	15,20
3	805	24	23	24	26	26	24	24,50	24	21,50	11,57
3	1206	30	35	44	35	36	36	36,00	35,5	33,00	12,20
3	2512	40	36	54	34	!	!	41,00	38	38,00	16,67

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	sn100C vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
9	402	41	42	42	58	53	58	49,00	47,5	40,00	16,13
11	603	43	46	63	59	49	60	53,33	54	42,33	22,87
12	805	39	35	33	35	41	42	37,50	37	25,50	15,57
9	1206	40	48	53	47	49	54	48,50	48,5	39,50	18,70
9	2512	49	47	82	60	!	!	59,50	54,5	50,50	29,17
Rzkr	sn100c 20000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
12	402	45	43	43	48	46	52	46,17	45,5	34,17	10,30
11	603	46	42	43	50	45	53	46,50	45,5	35,50	16,03
10	805	33	30	30	36	43	32	34,00	32,5	24,00	14,07
12	1206	45	42	48	58	50	59	50,33	49	38,33	17,53
10	2512	48	48	63	53	!	!	53,00	50,5	43,00	21,67
Rzkr	sn100c 2500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
12	402	55	63	44	45	53	52	52,00	52,5	40,00	16,13
10	603	52	42	46	36	53	49	46,33	47,5	36,33	16,87
12	805	40	35	32	46	45	28	37,67	37,5	25,67	15,73
11	1206	49	45	47	43	50	38	46,80	46	35,80	15,00
12	2512	58	55	60	41	!	!	53,50	56,5	41,50	20,17
Rzkr	sn100c 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
12	402	49	49	52	55	50	57	52,00	51	40,00	16,13
11	603	53	52	48	51	50	52	51,00	51,5	40,00	20,53
13	805	44	38	35	40	48	44	41,50	42	28,50	18,57
12	1206	53	59	59	53	55	56	55,83	55,5	43,83	23,03
13	2512	62	59	80	59	!	!	65,00	60,5	52,00	30,67
Rzkr	sn100c 250ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	402	45	45	45	48	44	49	46,00	45	36,00	12,13
11	603	37	41	51	39	41	46	42,50	41	31,50	12,03
9	805	29	29	35	37	35	37	33,67	35	24,67	14,73
6	1206	39	45	45	39	42	45	42,50	43,5	36,50	15,70
7	2512	49	43	61	45	!	!	49,50	47	42,50	21,17
Rzkr	sn100c >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
7	402	40	39	39	40	39	39	39,33	39	32,33	8,47
5	603	37	42	37	38	48	41	40,50	39,5	35,50	16,03
5	805	29	29	26	30	31	28	28,83	29	23,83	13,90
6	1206	36	39	39	39	44	43	40,00	39	34,00	13,20
6	2512	43	43	65	42	!	!	48,25	43	42,25	20,92

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	sn100C vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	402	43	44	40	51	55	57	48,33	47,5	44,33	20,47
6	603	40	45	63	55	45	55	50,50	50	44,50	25,03
7	805	36	32	32	38	37	43	35,00	36,5	28,00	18,07
4	1206	41	47	48	45	44	54	45,00	46	41,00	20,20
2	2512	52	53	51	48	!	!	51,00	51,5	49,00	27,67
Rzkr	sn100c 20000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	402	46	40	44	47	46	54	46,17	46	42,17	18,30
5	603	40	43	38	45	46	48	43,33	44	38,33	18,87
5	805	34	30	29	37	33	32	32,50	32,5	27,50	17,57
5	1206	56	49	49	43	44	49	48,33	49	43,33	22,53
5	2512	48	45	66	50	!	!	52,25	49	47,25	25,92
Rzkr	sn100c 2500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
6	402	59	61	42	39	50	46	49,50	48	43,50	19,63
5	603	50	43	42	37	54	41	44,50	42,5	39,50	20,03
4	805	37	31	30	30	45	27	33,33	30,5	29,33	19,40
4	1206	46	45	49	43	50	38	46,60	45,5	42,60	21,80
5	2512	56	56	59	38	!	!	52,25	56	47,25	25,92
Rzkr	sn100c 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	402	48	45	45	56	49	52	49,17	48,5	44,17	20,30
6	603	43	55	50	46	50	47	48,50	48,5	42,50	23,03
5	805	37	30	39	41	41	39	37,83	39	32,83	22,90
5	1206	45	53	50	47	48	51	49,00	49	44,00	23,20
4	2512	54	57	70	51	!	!	58,00	55,5	54,00	32,67
Rzkr	sn100c 250ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	402	44	42	43	48	42	50	44,83	43,5	39,83	15,97
5	603	39	45	51	41	42	42	43,33	42	38,33	18,87
4	805	32	34	37	39	36	38	36,00	36,5	32,00	22,07
4	1206	41	45	41	40	41	42	41,67	41	37,67	16,87
5	2512	48	45	65	48	!	!	51,50	48	46,50	25,17
Rzkr	sn100c >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	402	44	45	40	44	43	43	43,17	43,5	39,17	15,30
5	603	43	47	42	40	40	42	42,33	42	37,33	17,87
5	805	35	29	32	40	32	32	33,33	32	28,33	18,40
8	1206	41	44	47	40	43	45	43,33	43,5	35,33	14,53
6	2512	49	45	65	45	!	!	51,00	47	45,00	23,67

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	sac305 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	402	40	39	38	51	45	45	43,00	42,5	33,00	9,13
7	603	46	45	43	46	37	46	43,83	45,5	36,83	17,37
12	805	39	39	35	38	42	39	38,67	39	26,67	16,73
13	1206	53	52	48	55	49	50	51,17	51	38,17	17,37
16	2512	55	53	57	70	54	52	56,83	54,5	40,83	19,50
Rzkr	sac305 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
13	402	44	39	45	54	40	43	44,17	43,5	31,17	7,30
15	603	42	42	49	48	52	53	47,67	48,5	32,67	13,20
14	805	32	38	35	35	33	39	35,33	35	21,33	11,40
16	1206	44	53	45	43	37	47	44,83	44,5	28,83	8,03
16	2512	42	43	55	53	50	51	49,00	50,5	33,00	11,67
Rzkr	sac305 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
15	402	43	45	48	54	53	51	49,00	49,5	34,00	10,13
12	603	48	52	50	38	43	45	46,00	46,5	34,00	14,53
12	805	31	31	37	33	28	26	31,00	31	19,00	9,07
12	1206	38	42	43	44	40	50	42,83	42,5	30,83	10,03
16	2512	56	53	52	57	49	45	52,00	52,5	36,00	14,67
Rzkr	sac305 500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
12	402	40	40	39	52	43	58	45,33	41,5	33,33	9,47
13	603	41	49	46	37	40	35	41,33	40,5	28,33	8,87
9	805	29	25	29	29	27	28	27,83	28,5	18,83	8,90
13	1206	52	36	40	45	41	38	42,00	40,5	29,00	8,20
12	2512	50	45	47	53	47	40	47,00	47	35,00	13,67
Rzkr	sac305 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
13	402	40	51	42	45	42	39	43,17	42	30,17	6,30
10	603	38	38	48	45	38	48	42,50	41,5	32,50	13,03
8	805	28	26	32	33	27	26	28,67	27,5	20,67	10,73
10	1206	40	46	48	38	40	43	42,50	41,5	32,50	11,70
13	2512	48	41	51	60	38	38	46,00	44,5	33,00	11,67
Rzkr	sac305 >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
9	402	35	35	40	44	44	41	39,83	40,5	30,83	6,97
13	603	40	44	40	45	44	46	43,17	44	30,17	10,70
9	805	37	27	36	38	38	27	33,83	36,5	24,83	14,90
10	1206	35	36	39	43	42	39	39,00	39	29,00	8,20
11	2512	48	42	44	54	37	46	45,17	45	34,17	12,83

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	sac305 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	402	43	45	40	43	45	40	42,67	43	37,67	13,80
6	603	42	43	45	37	40	38	40,83	41	34,83	15,37
6	805	28	28	29	28	31	27	28,50	28	22,50	12,57
5	1206	39	41	44	43	39	39	40,83	40	35,83	15,03
6	2512	42	42	42	71	44	39	46,67	42	40,67	19,33
Rzkr	sac305 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	402	36	36	38	37	36	36	36,50	36	32,50	8,63
2	603	35	33	30	31	32	38	33,17	32,5	31,17	11,70
2	805	23	20	23	25	20	27	23,00	23	21,00	11,07
3	1206	35	36	45	35	32	45	38,00	35,5	35,00	14,20
4	2512	37	41	37	49	33	45	40,33	39	36,33	15,00
Rzkr	sac305 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
2	402	34	35	40	36	33	32	35,00	34,5	33,00	9,13
5	603	36	40	31	40	34	31	35,33	35	30,33	10,87
5	805	25	21	25	27	22	21	23,50	23,5	18,50	8,57
5	1206	37	34	40	37	34	34	36,00	35,5	31,00	10,20
5	2512	42	43	38	50	35	36	40,67	40	35,67	14,33
Rzkr	sac305 500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
2	402	34	34	33	31	38	31	33,50	33,5	31,50	7,63
2	603	35	32	33	32	35	33	33,33	33	31,33	11,87
2	805	26	22	25	27	23	20	23,83	24	21,83	11,90
3	1206	35	30	38	35	38	31	34,50	35	31,50	10,70
3	2512	42	34	40	49	37	33	39,17	38,5	36,17	14,83
Rzkr	sac305 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	402	39	35	36	34	37	36	36,17	36	33,17	9,30
2	603	37	37	35	30	36	37	35,33	36,5	33,33	13,87
2	805	28	22	27	22	24	21	24,00	23	22,00	12,07
2	1206	39	35	34	37	35	32	35,33	35	33,33	12,53
2	2512	32	37	34	50	33	30	36,00	33,5	34,00	12,67
Rzkr	sac305 >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
2	402	30	32	39	36	34	31	33,67	33	31,67	7,80
3	603	29	32	31	28	34	32	31,00	31,5	28,00	8,53
4	805	20	19	21	24	21	18	20,50	20,5	16,50	6,57
4	1206	34	31	32	34	35	36	33,67	34	29,67	8,87
2	2512	39	35	33	45	32	33	36,17	34	34,17	12,83

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	sac305 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
6	402	45	47	40	45	45	43	44,17	45	38,17	14,30
6	603	45	44	49	37	41	40	42,67	42,5	36,67	17,20
7	805	35	28	27	32	35	25	30,33	30	23,33	13,40
7	1206	44	42	45	51	39	39	43,33	43	36,33	15,53
6	2512	45	47	46	75	42	45	50,00	45,5	44,00	22,67
Rzkr	sac305 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
7	402	40	37	40	37	34	51	39,83	38,5	32,83	8,97
7	603	42	37	37	37	39	43	39,17	38	32,17	12,70
5	805	25	22	27	30	25	27	26,00	26	21,00	11,07
6	1206	41	42	48	38	34	48	41,83	41,5	35,83	15,03
4	2512	40	45	41	52	33	53	44,00	43	40,00	18,67
Rzkr	sac305 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	402	36	36	40	36	35	34	36,17	36	33,17	9,30
5	603	41	40	35	36	38	35	37,50	37	32,50	13,03
4	805	26	23	28	27	28	26	26,33	26,5	22,33	12,40
3	1206	40	37	39	40	39	36	39,00	39	36,00	15,20
5	2512	49	45	44	54	38	36	44,33	44,5	39,33	18,00
Rzkr	sac305 500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	402	42	39	37	35	42	35	38,33	38	33,33	9,47
6	603	43	40	43	38	43	35	40,33	41,5	34,33	14,87
5	805	27	23	26	29	28	25	26,33	26,5	21,33	11,40
5	1206	39	39	40	36	38	36	38,00	38,5	33,00	12,20
3	2512	45	40	42	57	36	35	42,50	41	39,50	18,17
Rzkr	sac305 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	402	46	45	46	44	49	48	46,33	46	41,33	17,47
3	603	44	49	46	41	52	40	45,33	45	42,33	22,87
3	805	32	29	39	43	41	36	36,67	37,5	33,67	23,73
2	1206	43	43	44	43	42	47	43,67	43	41,67	20,87
4	2512	44	47	46	63	43	48	50,00	46,5	46,00	24,67
Rzkr	sac305 >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
2	402	36	36	41	38	37	39	37,83	37,5	35,83	11,97
3	603	38	39	40	37	36	41	38,50	38,5	35,50	16,03
3	805	27	20	28	30	24	29	26,33	27,5	23,33	13,40
4	1206	40	36	38	37	36	45	38,67	37,5	34,67	13,87
4	2512	40	42	39	52	37	45	42,50	41	38,50	17,17

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	sac305 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	402	51	45	39	44	45	43	44,50	44,5	40,50	16,63
6	603	45	42	47	44	43	43	44,00	43,5	38,00	18,53
7	805	39	32	32	29	34	33	33,20	32,5	26,20	16,27
8	1206	45	42	45	52	43	39	45,40	44	37,40	16,60
7	2512	46	44	48	79	48	45	54,25	47	47,25	25,92
Rzkr	sac305 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
9	402	40	40	43	42	43	59	44,50	42,5	35,50	11,63
9	603	44	39	39	45	46	56	44,83	44,5	35,83	16,37
7	805	28	24	28	35	28	30	28,83	28	21,83	11,90
8	1206	40	42	52	43	42	48	44,50	42,5	36,50	15,70
5	2512	47	50	45	58	42	50	48,67	48,5	43,67	22,33
Rzkr	sac305 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
9	402	42	42	45	44	45	40	43,00	43	34,00	10,13
9	603	42	42	38	41	45	39	41,17	41,5	32,17	12,70
9	805	34	29	33	32	34	37	33,17	33,5	24,17	14,23
10	1206	44	47	48	44	41	43	44,80	44	34,80	14,00
9	2512	57	54	47	65	43	41	51,17	50,5	42,17	20,83
Rzkr	sac305 500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	402	46	45	42	43	49	39	44,00	44	39,00	15,13
6	603	45	42	43	42	42	38	42,00	42	36,00	16,53
5	805	28	25	28	30	31	27	28,17	28	23,17	13,23
8	1206	39	37	45	40	42	38	40,17	39,5	32,17	11,37
8	2512	43	42	45	60	45	43	46,33	44	38,33	17,00
Rzkr	sac305 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
6	402	48	!	48	48	52	49	49,00	48	43,00	19,13
7	603	50	50	49	47	57	42	49,17	49,5	42,17	22,70
5	805	!	32	45	45	42	45	41,80	45	36,80	26,87
6	1206	44	48	53	43	43	57	48,00	46	42,00	21,20
5	2512	50	48	51	73	48	52	55,50	50,5	50,50	29,17
Rzkr	sac305 >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
6	402	42	40	48	44	42	45	43,50	43	37,50	13,63
5	603	43	45	50	41	49	45	45,50	45	40,50	21,03
6	805	33	25	33	38	33	39	33,50	33	27,50	17,57
5	1206	43	39	44	38	40	43	41,17	41,5	36,17	15,37
5	2512	45	46	43	62	41	48	47,50	45,5	42,50	21,17

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	M40 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
22	402	55	60	61	62	69	49	59,33	60,5	37,33	13,47
22	603	55	60	55	58	58	55	56,83	56,5	34,83	15,37
21	805	48	43	47	46	45	42	45,17	45,5	24,17	14,23
21	1206	54	52	54	57	53	55	54,17	54	33,17	12,37
20	2512	56	54	!	73	56	53	58,40	56	38,40	17,07
Rzkr	M40 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
19	402	60	58	55	64	65	54	59,33	59	40,33	16,47
20	603	52	57	56	59	59	57	56,67	57	36,67	17,20
18	805	43	42	45	43	45	45	43,83	44	25,83	15,90
19	1206	59	58	66	58	55	60	59,33	58,5	40,33	19,53
20	2512	57	57	58	78	60	60	61,67	59	41,67	20,33
Rzkr	M40 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
19	402	54	54	52	52	54	48	52,33	53	33,33	9,47
19	603	51	52	51	54	53	48	51,50	51,5	32,50	13,03
20	805	40	34	36	41	39	42	38,67	39,5	18,67	8,73
18	1206	49	45	48	51	52	45	48,33	48,5	30,33	9,53
17	2512	50	48	50	68	50	53	53,17	50	36,17	14,83
Rzkr	M40 500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
19	402	50	53	54	49	59	55	53,33	53,5	34,33	10,47
19	603	50	56	63	49	57	56	55,17	56	36,17	16,70
19	805	43	43	40	41	45	42	42,33	42,5	23,33	13,40
19	1206	45	55	53	53	48	49	50,50	51	31,50	10,70
19	2512	53	54	49	65	50	52	53,83	52,5	34,83	13,50
Rzkr	M40 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
11	402	41	40	45	49	56	59	48,33	47	37,33	13,47
10	603	45	51	50	45	48	50	48,17	49	38,17	18,70
13	805	38	35	35	44	33	43	38,00	36,5	25,00	15,07
13	1206	40	44	40	45	45	48	43,67	44,5	30,67	9,87
11	2512	44	43	47	64	42	47	47,83	45,5	36,83	15,50
Rzkr	M40 >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
12	402	43	42	42	43	42	43	42,50	42,5	30,50	6,63
12	603	38	43	49	37	40	38	40,83	39	28,83	9,37
12	805	32	28	32	32	28	25	29,50	30	17,50	7,57
13	1206	40	45	50	40	55	48	46,33	46,5	33,33	12,53
12	2512	45	50	51	72	60	49	54,50	50,5	42,50	21,17

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	M40 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	402	39	38	40	38	36	39	38,33	38,5	35,33	11,47
3	603	35	36	43	30	37	42	37,17	36,5	34,17	14,70
5	805	27	24	31	28	24	24	26,33	25,5	21,33	11,40
3	1206	36	38	38	39	35	35	36,83	37	33,83	13,03
5	2512	47	42	46	52	32	34	42,17	44	37,17	15,83
Rzkr	M40 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	402	41	42	37	42	38	41	40,17	41	37,17	13,30
3	603	37	37	43	41	38	42	39,67	39,5	36,67	17,20
5	805	24	27	24	28	26	27	26,00	26,5	21,00	11,07
4	1206	35	42	37	47	38	39	39,67	38,5	35,67	14,87
4	2512	39	40	38	54	44	43	43,00	41,5	39,00	17,67
Rzkr	M40 500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	402	70	56	59	42	63	50	56,67	57,5	52,67	28,80
5	603	52	65	65	40	59	45	54,33	55,5	49,33	29,87
6	805	54	43	46	39	47	38	44,50	44,5	38,50	28,57
6	1206	63	66	64	44	54	43	55,67	58,5	49,67	28,87
3	2512	60	62	62	85	61	65	65,83	62	62,83	41,50
Rzkr	M40 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	402	52	44	41	41	42	50	45,00	43	41,00	17,13
3	603	54	43	37	40	58	44	46,00	43,5	43,00	23,53
4	805	30	30	25	27	40	27	29,83	28,5	25,83	15,90
4	1206	44	44	41	42	42	49	43,67	43	39,67	18,87
3	2512	58	43	40	69	39	50	49,83	46,5	46,83	25,50
Rzkr	M40 >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	402	61	53	60	42	57	58	55,17	57,5	50,17	26,30
3	603	63	54	72	48	59	56	58,67	57,5	55,67	36,20
4	805	61	53	38	32	54	41	46,50	47	42,50	32,57
4	1206	76	83	50	37	50	44	56,67	50	52,67	31,87
4	2512	65	73	75	83	63	58	69,50	69	65,50	44,17

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	M40 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
15	402	52	48	52	57	56	53	53,00	52,5	38,00	14,13
13	603	55	52	57	49	50	49	52,00	51	39,00	19,53
16	805	46	43	48	41	40	35	42,17	42	26,17	16,23
14	1206	48	50	53	59	52	49	51,83	51	37,83	17,03
16	2512	57	49	48	66	57	48	54,17	53	38,17	16,83
Rzkr	M40 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
13	402	70	70	66	68	63	70	67,83	69	54,83	30,97
12	603	67	70	63	60	58	62	63,33	62,5	51,33	31,87
15	805	58	55	62	60	52	46	55,50	56,5	40,50	30,57
15	1206	73	70	65	72	57	71	67,40	70,5	52,40	31,60
14	2512	64	69	75	92	62	79	73,50	72	59,50	38,17
Rzkr	M40 500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
12	402	90	88	75	84	108	91	89,33	89	77,33	53,47
14	603	79	89	189	85	109	92	107,17	90,5	93,17	73,70
13	805	74	72	71	78	82	65	73,67	73	60,67	50,73
12	1206	79	92	260	108	95	100	122,33	97,5	110,33	89,53
14	2512	89	92	130	112	89	79	98,50	90,5	84,50	63,17
Rzkr	M40 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
15	402	67	73	66	72	65	77	70,00	69,5	55,00	31,13
14	603	76	50	54	80	62	84	67,67	69	53,67	34,20
15	805	43	39	42	43	66	52	47,50	43	32,50	22,57
12	1206	66	61	62	63	60	75	64,50	62,5	52,50	31,70
11	2512	68	66	51	89	73	83	68,50	70,5	57,50	36,17
Rzkr	M40 >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
13	402	78	79	68	55	63	67	68,33	67,5	55,33	31,47
12	603	68	63	82	50	69	69	66,83	68,5	54,83	35,37
10	805	71	64	43	40	40	63	53,50	53	43,50	33,57
11	1206	75	83	58	42	49	72	63,17	65	52,17	31,37
9	2512	75	65	80	88	70	59	72,83	72,5	63,83	42,50

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

Rzkr	M40 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
6	402	47	50	46	45	45	44	46,17	45,5	40,17	16,30
5	603	45	45	53	43	46	43	45,83	45	40,83	21,37
4	805	35	29	37	35	32	42	35,00	35	31,00	21,07
3	1206	40	43	47	44	42	44	43,33	43,5	40,33	19,53
4	2512	50	43	47	55	40	41	46,00	45	42,00	20,67
Rzkr	M40 1000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	402	64	68	55	85	56	72	66,67	66	61,67	37,80
5	603	58	60	45	52	53	53	53,50	53	48,50	29,03
6	805	55	48	51	54	50	41	49,83	50,5	43,83	33,90
6	1206	65	65	65	71	51	68	64,17	65	58,17	37,37
6	2512	62	68	60	90	75	81	72,67	71,5	66,67	45,33
Rzkr	M40 500ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
7	402	88	80	67	86	118	93	88,67	87	81,67	57,80
6	603	73	97	198	75	109	89	106,83	93	100,83	81,37
7	805	64	63	62	80	86	58	68,83	63,5	61,83	51,90
5	1206	74	100	245	80	105	93	116,17	96,5	111,17	90,37
6	2512	81	71	130	114	94	79	94,83	87,5	88,83	67,50
Rzkr	M40 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
6	402	56	67	63	82	57	60	64,17	61,5	58,17	34,30
4	603	60	62	48	55	54	56	55,83	55,5	51,83	32,37
5	805	56	49	50	55	40	40	48,33	49,5	43,33	33,40
5	1206	63	63	62	74	50	70	63,67	63	58,67	37,87
7	2512	60	65	72	96	55	82	71,67	68,5	64,67	43,33
Rzkr	M40 >10ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R	Medián R	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
5	402	42	41	40	41	41	43	41,33	41	36,33	12,47
3	603	44	42	43	40	38	45	42,00	42,5	39,00	19,53
3	805	32	26	34	34	28	25	29,83	30	26,83	16,90
3	1206	37	39	43	43	40	42	40,67	41	37,67	16,87
2	2512	60	58	69	80	59	60	64,33	60	62,33	41,00

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

SAC305

Rzkr	4. SAC305 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
7	603	30	31	31	29	30	30,20	30,00	23,20	2,40
9	2512	37	36	35	35	36	35,80	36,00	26,80	2,47
Rzkr	5. SAC305 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
7	603	30	30	29	28		29,25	29,50	22,25	1,45
8	2512	33	32	35	34	34	33,60	34,00	25,60	1,73
Rzkr	6. SAC305 100pm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
15	603	33	36	38	38	38	36,60	38,00	21,60	0,80
10	2512	34	35	35	38	40	36,40	35,00	26,40	2,53

R256

Rzkr	1. R256 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
8	603	34	37	35	35	34	35,00	35,00	27,00	6,20
9	2512	40	39	38	36	39	38,40	39,00	29,40	5,53
Rzkr	2. R256 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	603	43	36	39	35	31	36,80	36,00	26,80	6,00
9	2512	38	36	36	39	38	37,40	38,00	28,40	4,53
Rzkr	3. R256 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	603	32	38	36	36	32	34,80	36,00	24,80	4,00
10	2512	35	35	35	36	35	35,20	35,00	25,20	1,33

SN100C

Rzkr	7. SN100C vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
12	603	35	40	44	43	40	40,40	40,00	28,40	7,60
13	2512	40	42	41	43	!	41,50	41,50	28,50	4,63
Rzkr	8. SN100C 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
14	603	43	39	40	38	38	39,60	39,00	25,60	4,80
14	2512	41	42	43	40	42	41,60	42,00	27,60	3,73
Rzkr	9. SN100C 10>ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
11	603	35	32	34	32	32	33,00	32,00	22,00	1,20
14	2512	41	41	40	40	42	40,80	41,00	26,80	2,93

M40

Rzkr	13. M40 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
6	603	29	30	31	33	30	30,60	30,00	24,60	3,80
8	2512	33	32	35	32	33	33,00	33,00	25,00	1,13
Rzkr	14. M40 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	603	34	35	33	33		33,75	33,50	23,75	2,95
9	2512	35	32	34	36	35	34,40	35,00	25,40	1,53
Rzkr	15. M40 10>ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	603	32	35	34	33	33	33,40	33,00	23,40	2,60
10	2512	38	35	35	34	36	35,60	35,00	25,60	1,73

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

SAC305

Rzkr	4. SAC305 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	31	32	35	35	32	33,00	32,00	29,00	8,20
5	2512	35	33	32	32	34	33,20	33,00	28,20	4,33
Rzkr	5. SAC305 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	33	35	32	29	!	32,25	32,50	28,25	7,45
4	2512	34	33	32	30	29	31,60	32,00	27,60	3,73
Rzkr	6. SAC305 100pm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	603	27	30	32	37	30	31,20	30,00	28,20	7,40
3	2512	30	30	29	31	31	30,20	30,00	27,20	3,33

R256

Rzkr	1. R256 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	31	36	36	34	!	34,25	35,00	30,25	9,45
3	2512	34	30	32	36	31	32,60	32,00	29,60	5,73
Rzkr	2. R256 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	31	30	33	35		32,25	32,00	28,25	7,45
3	2512	31	32	32	31	32	31,60	32,00	28,60	4,73
Rzkr	3. R256 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	31	32	32	35	35	33,00	32,00	29,00	8,20
3	2512	37	33	39	41	35	37,00	37,00	34,00	10,13

SN100C

Rzkr	7. SN100C vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	35	38	37	33	33	35,20	35,00	31,20	10,40
3	2512	39	38	34	34	!	36,25	36,00	33,25	9,38
Rzkr	8. SN100C 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	30	35	32	32	31	32,00	32,00	28,00	7,20
4	2512	32	34	38	35	31	34,00	34,00	30,00	6,13
Rzkr	9. SN100C 10>ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	603	32	34	33	30	30	31,80	32,00	28,80	8,00
4	2512	30	34	33	32	34	32,60	33,00	28,60	4,73

M40

Rzkr	13. M40 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	603	35	30	31	32	30	31,60	31,00	28,60	7,80
3	2512	29	32	32	32	33	31,60	32,00	28,60	4,73
Rzkr	14. M40 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
2	603	34	37	!	32	35	34,50	34,50	32,50	11,70
1	2512	34	34	34	33	32	33,40	34,00	32,40	8,53
Rzkr	15. M40 10>ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
2	603	32	32	36	35	33	33,60	33,00	31,60	10,80
2	2512	35	35	34	35	34	34,60	35,00	32,60	8,73

Rzkr Hodnota zkratového odporu

! Značí součástky, které byly neměřitelné

SAC305

Rzkr	4. SAC305 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
7	603	30	31	31	29	30	30,20	30,00	23,20	2,40
9	2512	37	36	35	35	36	35,80	36,00	26,80	2,47
Rzkr	5. SAC305 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
7	603	30	30	29	28		29,25	29,50	22,25	1,45
8	2512	33	32	35	34	34	33,60	34,00	25,60	1,73
Rzkr	6. SAC305 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
15	603	33	36	38	38	38	36,60	38,00	21,60	0,80
10	2512	34	35	35	38	40	36,40	35,00	26,40	2,53

R256

Rzkr	1. R256 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
8	603	34	37	35	35	34	35,00	35,00	27,00	6,20
9	2512	40	39	38	36	39	38,40	39,00	29,40	5,53
Rzkr	2. R256 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	603	43	36	39	35	31	36,80	36,00	26,80	6,00
9	2512	38	36	36	39	38	37,40	38,00	28,40	4,53
Rzkr	3. R256 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	603	32	38	36	36	32	34,80	36,00	24,80	4,00
10	2512	35	35	35	36	35	35,20	35,00	25,20	1,33

SN100c

Rzkr	7. SN100C vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
12	603	35	40	44	43	40	40,40	40,00	28,40	7,60
13	2512	40	42	41	43	!	41,50	41,50	28,50	4,63
Rzkr	8. SN100C 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
14	603	43	39	40	38	38	39,60	39,00	25,60	4,80
14	2512	41	42	43	40	42	41,60	42,00	27,60	3,73
Rzkr	9. SN100C 10>ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
11	603	35	32	34	32	32	33,00	32,00	22,00	1,20
14	2512	41	41	40	40	42	40,80	41,00	26,80	2,93

M40

Rzkr	13. M40 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
6	603	29	30	31	33	30	30,60	30,00	24,60	3,80
8	2512	33	32	35	32	33	33,00	33,00	25,00	1,13
Rzkr	14. M40 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	603	34	35	33	33		33,75	33,50	23,75	2,95
9	2512	35	32	34	36	35	34,40	35,00	25,40	1,53
Rzkr	15. M40 10>ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
10	603	32	35	34	33	33	33,40	33,00	23,40	2,60
10	2512	38	35	35	34	36	35,60	35,00	25,60	1,73

Rzkr.....Hodnota zkratového odporu; !..... Značí součástky, které byly neměřitelné

SAC 305

Rzkr	4. SAC305 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	31	32	35	35	32	33,00	32,00	29,00	8,20
5	2512	35	33	32	32	34	33,20	33,00	28,20	4,33
Rzkr	5. SAC305 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	33	35	32	29	!	32,25	32,50	28,25	7,45
4	2512	34	33	32	30	29	31,60	32,00	27,60	3,73
Rzkr	6. SAC305 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	603	27	30	32	37	30	31,20	30,00	28,20	7,40
3	2512	30	30	29	31	31	30,20	30,00	27,20	3,33

R256

Rzkr	1. R256 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	31	36	36	34	!	34,25	35,00	30,25	9,45
3	2512	34	30	32	36	31	32,60	32,00	29,60	5,73
Rzkr	2. R256 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	31	30	33	35		32,25	32,00	28,25	7,45
3	2512	31	32	32	31	32	31,60	32,00	28,60	4,73
Rzkr	3. R256 100ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	31	32	32	35	35	33,00	32,00	29,00	8,20
3	2512	37	33	39	41	35	37,00	37,00	34,00	10,13

R256

Rzkr	7. SN100C vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	35	38	37	33	33	35,20	35,00	31,20	10,40
3	2512	39	38	34	34	!	36,25	36,00	33,25	9,38
Rzkr	8. SN100C 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
4	603	30	35	32	32	31	32,00	32,00	28,00	7,20
4	2512	32	34	38	35	31	34,00	34,00	30,00	6,13
Rzkr	9. SN100C 10>ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	603	32	34	33	30	30	31,80	32,00	28,80	8,00
4	2512	30	34	33	32	34	32,60	33,00	28,60	4,73

M40

Rzkr	13. M40 vzduch	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
3	603	35	30	31	32	30	31,60	31,00	28,60	7,80
3	2512	29	32	32	32	33	31,60	32,00	28,60	4,73
Rzkr	14. M40 5000ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
2	603	34	37	!	32	35	34,50	34,50	32,50	11,70
1	2512	34	34	34	33	32	33,40	34,00	32,40	8,53
Rzkr	15. M40 10>ppm	R1	R2	R3	R4	R5	R	Medián	R - Rzkr	Rnam - Rzkr -R
2	603	32	32	36	35	33	33,60	33,00	31,60	10,80
2	2512	35	35	34	35	34	34,60	35,00	32,60	8,73

Rzkr.....Hodnota zkratového odporu; !..... Značí součástky, které byly neměřitelné