

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav mikroelektroniky

Ing. Olga ŠVECOVÁ

**SPOLEHLIVOST BEZOLOVNATÝCH PÁJEK A VYBRANÉ
ZPŮSOBY ODHADU JEJICH ŽIVOTNOSTI**

**RELIABILITY OF LEAD-FREE SOLDERS AND THE SELECTED
METHODS TO ESTIMATE ITS LIFETIME**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Mikroelektronika a technologie
Školitel: Doc. Ing. Josef ŠANDERA, Ph.D.
Oponenti: Doc. Ing. Jan URBÁNEK, CSc.
Doc. Ing. Vladimír KOLAŘÍK, Ph.D.
Datum obhajoby: 20. 08. 2012

KLÍČOVÁ SLOVA:

Bezolovnatá pájka, pájený spoj, spolehlivost, Weibullovo rozdělení, simulace ANSYS, povrchová úprava, pájecí plochy, zrychlené testování, životnost.

KEYWORDS:

Lead-free solder, solder joint, reliability, Weibull distribution, ANSYS simulation, surfacing, solder pads, accelerated testing, life-time.

Místo uložení rukopisu:

Vědecké oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně Technická 3058/10, 61600 Brno.

© Olga Švecová, 2012

ISBN 978-80-214-4608-3

ISSN 1213-4198

OBSAH

1. ÚVOD.....	5
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	7
3. PŘEDMLUVA O ŘEŠENÉ PROBLEMATICE.....	9
4. PRAKTICKÝ EXPERIMENT	11
4.1 Experimentální část	11
4.1.1 <i>Vyhodnocování experimentu pomocí Weibullova rozdělení.....</i>	<i>13</i>
4.2 Teoretický výpočet podle únavového modelu	14
4.3 Výpočet životnosti za použití programu ANSYS.....	15
4.3.1 <i>Stanovení životnosti podle únavového modelu založeného na energii</i>	<i>15</i>
4.3.2 <i>Stanovení životnosti podle únavového modelu založeného na tečení</i>	<i>19</i>
4.4 Stanovení koeficientů pro únavový model	20
5. DISKUZE O DOSAŽENÝCH VÝSLEDČÍCH.....	25
6. ZÁVĚR	28
7. POUŽITÁ LITERATURA	30

1 ÚVOD

Neoddělitelnou součástí elektrotechnických zařízení jsou pájené spoje, které našly své uplatnění v různých odvětvích průmyslu, a to jak ve spotřební elektronice, tak i ve vojenské nebo kosmické technice.

Při současných objemech průmyslové produkce se obsah škodlivých látek stává vážnou hrozbou pro životní prostředí. Podle odhadů Evropské komise každý občan EU ročně vyprodukuje 17 až 20 kilogramů elektronického odpadu. Proto byla Evropskou komisí zpracována směrnice 2002/95/EC RoHS o omezení používání nebezpečných přísad v elektronických a elektrických zařízeních.

Olovo se v pájkách pro měkké pájení v elektrotechnice vyskytuje v množství přibližně 40 %. Problémem je obtížná recyklace použitých elektrotechnických zařízení. Řada z nich končí na běžných skládkách komunálního odpadu, a takto uložený elektrotechnický odpad se postupem času stává zdrojem znečištění olovem.

Uvedená směrnice Evropské komise nutí výrobce, aby postupně zaváděli do výrobního procesu používání bezolovnatých pájek. Olovo se v bezolovnatých pájkách nahrazuje cínem s přidáním takových přísad, jako je stříbro, měď, zinek, bizmut či indium. Vhodné přísady musí být netoxické, dostupné, stejně jako cenově přiměřené, dostatečně smáčivé a musí vytvářet kvalitní spoje. V současnosti je možné za nejrozšířenější bezolovnatou pájecí slitinu považovat ternární sloučeninu Sn100C.

Testy životnosti bezolovnatých pájek ukazují, že bezolovnaté pájky mají srovnatelné mechanické vlastnosti, a také se výrazně neliší z hlediska vlastností elektrických. Přestože se z prvních výzkumů srovnávacích vlastností bezolovnatých a olovnatých pájek zdá, že mezi nimi nejsou větší rozdíly (s čímž ostatně byly bezolovnaté pájecí slitiny také vyvíjeny), jedná se o slitiny rozdílného složení s různými teplotami tavení a není ještě patrné, jak se bezolovnaté slitiny budou chovat po delší době reálného nasazení v extrémních podmínkách. To jen potvrzuje fakt, že výrobci vysoce citlivých a rizikových zařízení (např. medicínský, biomedicínský, vojenský a kosmický průmysl) váhají s používáním bezolovnatých slitin a dokonce Evropská komise, která se obává možných negativních dopadů, udělila těmto segmentům průmyslu výjimku z výše uvedené směrnice a umožňuje zde olovnaté slitiny (s již dobře známými a ověřenými vlastnostmi a spolehlivostí) využívat.

Zkoumat spolehlivost bezolovnatých pájek je možné různými způsoby a metodami. Disertační práce se bude konkrétněji zabývat spolehlivostí pájeného spoje realizovaného bezolovnatou pájkou SAC 305.

Životnost pájeného spoje lze chápat jako dobu, po kterou je zaručena jeho spolehlivá funkce. Stárnutí, mechanické a tepelné namáhání, to jsou tři základní faktory ovlivňující životnost pájených spojů. [2]

Základní materiály používané pro výrobu desek plošných spojů (DPS) jsou buď na organické, anorganické nebo kombinované bázi. Desky plošných spojů se nejčastěji vyrábějí z organických materiálů, například skelného laminátu (FR4,

FR5). Pro výrobu odporových a kondenzátorových pouzder čipů se používají keramické materiály. Je patrné, že vlastnosti používaných materiálů jsou různé. Mezi důležité faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje patří také koeficient tepelné roztažnosti (CTE). Rozdíl CTE výše zmíněných materiálů dosahuje hodnoty 7 až 10 ppm•K⁻¹.

Během výroby a provozu je deska plošného spoje teplotně namáhána, a to jak teplem z okolí, tak i teplem, které vzniká v samotném obvodu jako vedlejší produkt v důsledku vyzařovaného ztrátového výkonu. Z těchto důvodů se hodnota pnutí v systému neustále mění, což má za důsledek snížení životnosti systému a pájeného spoje.

U klasické montáže s vývodovými součástkami se vliv mechanického namáhání výrazně neprojevuje (což je způsobeno dostatečnou ohebností vývodů součástek), ale v případě SMD součástek je pružnost vývodů minimální. Vznikající síly jsou značné a mohou způsobit prasknutí spoje, utržení pájecí plošky či poškození součástky. Proto je výzkum zaměřen na spolehlivost pájeného spoje právě u čipových součástek. [1]

Disertační práce se zabývá zjišťováním spolehlivosti spojů pájených ternární bezolovnatou pájecí slitinou SAC 305, simulací životnosti provedenou v simulačním programu ANSYS pomocí různých únavových modelů, porovnáním údajů získaných z experimentů a simulacemi a stanovením koeficientů pro únavový model založený na deformaci vyvolané tečením pájky. V dané disertační práci se zkoumá pájecí slitina SAC 305 z toho důvodu, že v době počátku výzkumu byla nejrozšířenější bezolovnatou pájecí slitinou. Zjištěné závěry přinesou nové informace o dané pájecí slitině, pomohou průmyslu ve fázi návrhu elektrotechnických zařízení a bude díky nim také možné přesněji předpovídat životnost/poruchovost elektrotechnických zařízení, kde se zkoumaná bezolovnatá pájka vyskytuje.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Problematika spolehlivosti bezolovnatých pájek je stále aktuální, přičemž nejčastěji používanými a zkoumanými jsou bezolovnaté slitiny následujícího složení: SnAg₃Cu_{0,5}, SnAg_{3,8}Cu_{0,7}, Sn_{3,5}Ag, Sn₁₀₀. Především pájka SAC 305 se svými vlastnostmi, takovými jako teplota tavení, smáčivost povrchu za použití inertní atmosféry, mechanická pevnost a dalších, blíží k olovnaté pájce SnPb. I přestože se slitina SAC 305 řadí mezi nejvíce používané bezolovnaté pájky, její vlastnosti nejsou z hlediska spolehlivosti stále náležitě definovány a prozkoumány.

Pro určování a definování životnosti pájených spojů vytvořených bezolovnatou pájkou, se používá celá řada metod. Vedoucí pozici zaujaly metody experimentální. Výsledky experimentálních metod odpovídají realitě, ale samotné testování vyžaduje velkou časovou náročnost. Druhou pozici zaujaly výpočetně-analytické metody. Kombinované metody jsou z části závislé na experimentálních metodách a vyžadují velké množství vstupních parametrů.

Na základě provedeného rozboru jsem rozhodla, že výzkum životnosti pájených spojů bude zaměřen na bezolovnatou pájku SAC 305, která byla v době realizace experimentů u firem v ČR nejvíce používaná, a že se budu orientovat na výše zmíněné kombinované metody výpočtu životnosti pájených spojů. Pro tuto pájku na základě experimentálních výsledků stanovím pomocí lineární regresní analýzy empirické koeficienty pro definovaný únavový model. Toto je hlavní cíl disertační práce.

Důležitými kroky pro dosažení stanoveného cíle jsou:

- provedení experimentů za účelem získání potřebných vstupních parametrů,
- stanovení únavových modelů pro výpočet životnosti pájeného spoje,
- provedení simulací v programu ANSYS,
- výpočet dosud neznámých empirických koeficientů pro zvolený únavový model,
- ověření správnosti výpočtů zpětnou simulací,
- vyhodnocení získaných údajů a tvorba závěrů.

Experimentální část bude zaměřena na testování a měření počtu cyklů do poruchy. Životnost pájených spojů budu zjišťovat pomocí zrychlených zkoušek spolehlivosti. Tyto zkoušky představují simulaci prostředí, kde dochází ke střídání teplot. Tímto způsobem jsou v pájeném spoji vyvolány urychlené mechanismy stárnutí, namáhání a tečení bezolovnaté pájky, které vedou ke vzniku poruch v pájených spojích. Podkladem pro realizaci praktické části výzkumu bude norma IPC-SM 785, která podrobně popisuje provedení zrychlených zkoušek spolehlivosti. Výsledky získané z experimentální části budou použity pro výpočet empirických koeficientů.

Výpočetně-analytická část je hlavní částí celé práce vzhledem k nadefinovanému cíli. Ze tří vybraných únavových modelů budu dva implementovat do prostředí simulačního programu ANSYS (třetí model je polo-empirický a používá analytický výpočet). Potřebné materiálové konstanty pro zvolené únavové modely, které popisují chování materiálu za definovaných podmínek, převezmu z odborné literatury. Studium odborné literatury ovšem ukázalo, že další k výpočtu potřebné

konstanty pro zkoumanou pájku nejsou známy, proto se rovněž zaměřím na jejich zjištění v rámci této disertační práce, pomocí lineární regresní analýzy stanovím empirické koeficienty pro předem definovaný únavový model a následně získaný počet cyklů do poruchy ověřím s experimentálními hodnotami. Poslední (třetí) únavový model je polo-empirický a výpočet životnosti provedu analyticky. Neoddělitelnou součástí práce bude vyhodnocení a porovnání získaných výsledků (jak experimentálních, tak i výpočetně-analytických) a tvorba závěrů.

Konečným výstupem a vědeckým přínosem práce bude stanovení empirických koeficientů pro vybraný únavový model, ověření různých metod zjišťování životnosti pájeného spoje pro bezolovnatou pájku SAC 305 s ohledem na různé povrchové úpravy a doporučení k metodice určování spolehlivosti pájených spojů.

3 PŘEDMLUVA O ŘEŠENÉ PROBLEMATICE

Na základě rozboru současného stavu řešené problematiky je možné konstatovat, že existuje celá řada metod zjišťování spolehlivosti pájených spojů vytvořených na bázi bezolovnatých slitin. Z rozmanitých testovacích metod je možné zdůraznit následující: experimentální a výpočetně-analytické. V dané disertační práci se autorka bude zabývat výše uvedenými skupinami testovacích metod na předem definované testovací sestavě. Testovací sestava sama o sobě představuje soubor bezvývodových součástí pro povrchovou montáž a desek plošných spojů s různými parametry. Zkoumaným prvkem daného výzkumu bude bezolovnatá pájecí ternární slitina SAC 305.

Z experimentálních metod bylo zvoleno teplotní cyklování, které jak se ukázalo, je velmi využíváno pro stanovování životnosti pájených spojů. Zmíněná metoda patří ke skupině zrychlených testovacích metod. Teplotní zatěžovací profil byl nadefinován podle standardu IPC-SM 785 a je doporučen pro spotřební elektroniku. Experimentální metoda těsně souvisí se statistickými metodami. Pro případ únavy, stárnutí a určování životnosti se používá Weibullovo jedno-parametrické, dvou-parametrické anebo tří-parametrické rozdělení. Pomocí daného statistického rozdělení je možno určit Weibullův charakteristický život pro testovací pájecí slitinu.

Získaný experimentální výsledek je nutno ověřit. Pro tento účel byl použit Engelmanův únavový model, jehož základem je smyková deformace. Tento model není zcela teoretický, protože pro výpočet potřebuje empirické parametry, takové jako výška pájeného spoje, vzdálenost od neutrálního bodu, a také materiálové konstanty pro zkoumanou slitinu. Model byl použit pro výpočet životnosti z důvodu doporučení standardem IPC-9701A a v odborné literatuře je pro něj také již možno získat potřebné materiálové konstanty. Existuje rovněž možnost využití jiných únavových modelů, založených na různých mechanismech vzniku poruch, ale vždy zůstávají otázkou vstupní data, tudíž materiálové konstanty pro konkrétní pájecí slitiny, empirické konstanty a nadefinování a změření samotného mechanismu, který způsobuje poruchu. Při studiu odborné literatury se ukázalo, že se nejčastěji vyskytují materiálové konstanty pro takové bezolovnaté slitiny jako SAC 378 nebo SA 35, a to pro většinu výpočetně-analytických metod.

Základní mechanismus poruch je možné zjistit dvěma způsoby: experimentálně změřit anebo za použití simulačních programů. V současné době je na trhu představen velký výběr software pro tento účel (ANSYS, ABAQUS, COMSOL a další). Většina simulačních programů využívá pro výpočty metodu konečných prvků. V představené práci byl pro výpočet použit program ANSYS umožňující široké spektrum statických a transientních analýz. Na začátku byla vytvořena geometrie testovací sestavy a následně byly pomocí simulací získány hodnoty mechanismů poruch pro dva únavové modely. První model je založen na akumulování hustoty deformační energie v pájeném spoji (plastická práce v jednotce objemu za teplotní cyklus) a druhý na akumulování deformace tečením. Chování materiálu (zkoumané pájecí slitiny) se definuje pomocí materiálových modelů, které

samy o sobě představují určitou zákonitost v chování materiálu za definovaných okrajových podmínek. V případě výpočetně-analytických metod je potřeba na vstupu přesně nadefinovat materiálové konstanty (Youngův modul pružnosti, Poissonovu konstantu, měrné teplo, koeficient tepelné roztažnosti a další), a také materiálové konstanty popisující chování zkoumaného materiálu. I zde se ukázalo, že nejčastěji jsou uváděny v odborné literatuře koeficienty pro takové pájky jako SAC 396, SAC 378, SA 35 a další. Proto bylo dalším výzkumem dané práce stanovení empirických koeficientů pro únavový model založený na akumulování deformace tečením pomocí lineární regrese pro pájku SAC 305, a také následně ověření nadefinovaných koeficientů pomocí programu ANSYS.

Všechny experimentální výsledky a výpočetně-analytické poznatky byly proanalyzovány a ukázalo, že každá z metod přináší určité poznatky do problematiky souvisící se spolehlivostí pájených spojů. Podrobnější rozbor problematiky spolehlivosti se zaměřením na praktickou část je uveden v následující kapitole.

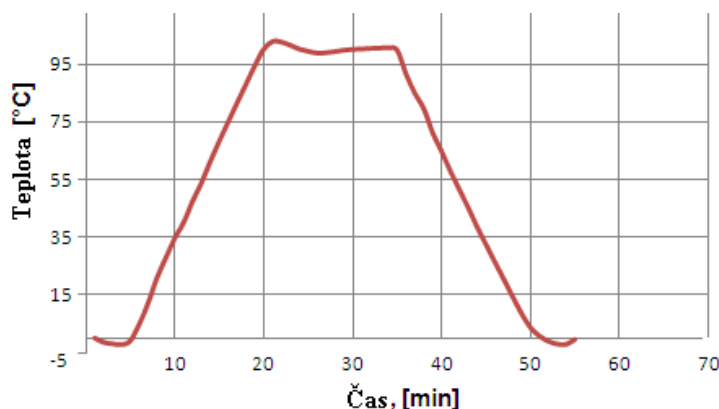
4 PRAKTICKÝ EXPERIMENT

Daná kapitola práce pojednává o experimentálních a výpočetně-analytických výsledcích, jejich analýze a metodách, kterými byly dosaženy.

4.1 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro experimentální zjištění životnosti pájených spojů bylo v dané studii použito teplotní cyklování, které patří mezi zrychlené zkoušky spolehlivosti. Daná zrychlená zkouška byla sestavena podle standardu IPC-SM 785, který udává potřebné nezbytné parametry pro provedení teplotního cyklování.

Před teplotním zatěžováním je podle doporučení standardu IPC-SM 785 testovací desky potřeba podrobit stárnutí za konstantní teploty po dobu 300 hodin na teplotě 100°C. V průběhu stárnutí se mění struktura a vlastnosti pájky. Poté mohou být zkoumané vzorky (pájené spoje) vystaveny teplotním cyklům definované amplitudy a frekvence. Na obrázku č. 1 je znázorněn změřený teplotní profil v průběhu testování. Teplotní cyklus trval cca 55 min včetně prodlevy, která činila 15 min od celkového času teplotního cyklu na maximální teplotě. Rozsah teplot byl zvolen podle standardu IPC-SM 785, a to od 0 °C do 100 °C.

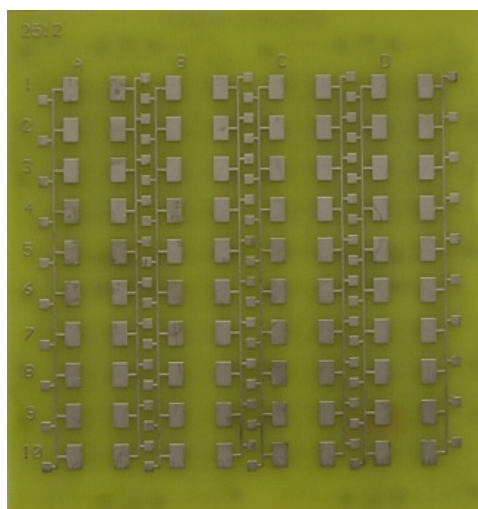


Obr. 1: Teplotní profil testování

Při maximální teplotě zahrnuje deformace nejen procesy způsobující elastickou (vratnou) deformaci, ale také plastickou deformaci (kdy dochází k trvalému poměrnému prodloužení) a deformaci tečením. V průběhu prodlevy je elastické pnutí oslabeno tečením pájky, proto je potřeba vhodně zvolit délku prodlevy v testovacím cyklu, což je velice důležité před započítáním dalšího teplotního přechodu. Opakované cyklické namáhání může vést k mikroskopickému poškození materiálu.

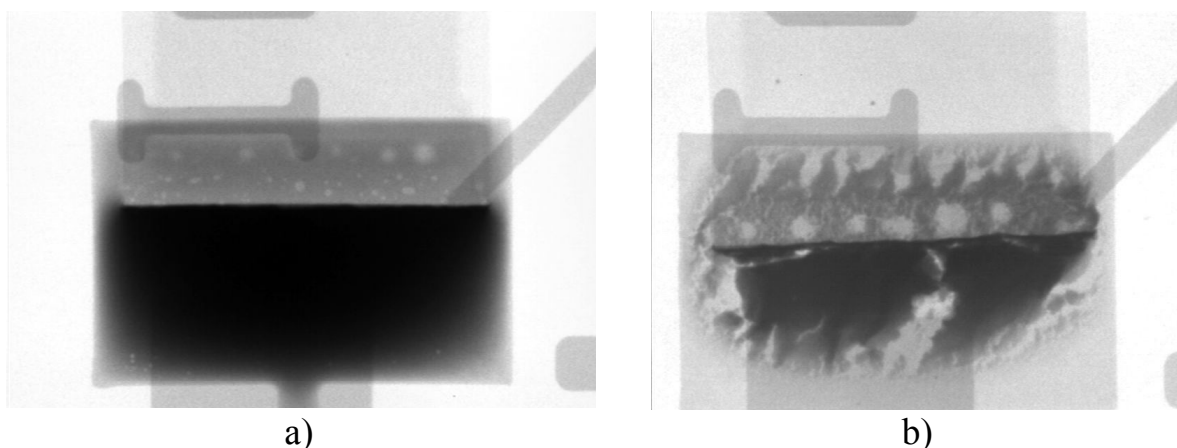
Po určení testovacích podmínek byla navržena testovací deska plošných spojů (viz obr. 2) pro předem vybranou součástku. Pro testování byly použity čipové odpory o velikosti pouzdra 6,325 mm x 3,036 mm. Jedná se o jednu z největších sériově používaných keramických součástek, na kterých se tedy porucha projeví nejdříve (a s největší pravděpodobností). Vzhledem k tomu, že je testování

prováděno „na nejhorším případě“, můžeme zjištěnou spolehlivost vztahovat i na součástky odolnější – tedy s menším rozměrem pouzdra.



Obr. 2: Testovací deska plošných spojů

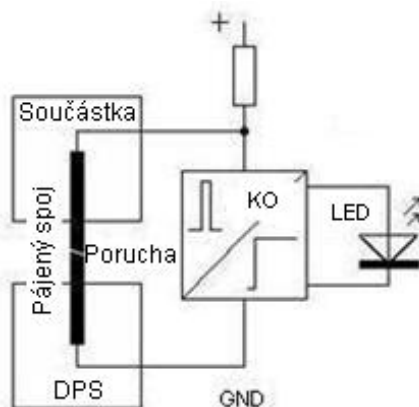
Poté, co byly na testovací desky osazeny a zapájeny keramické součástky, došlo k náhodnému výběru několika pájených spojů z každé desky a byla provedena analýza pomocí rentgenového záření (viz obr. 3a).



Obr. 3: Rentgenová analýza pájeného spoje, a – před testováním, b – po testování (12181 cyklů)

Po ukončení experimentu byla opět provedena analýza pomocí rentgenového záření (viz obr. 3b), která umožňuje sledovat změny vzniklé v pájeném spoji v průběhu testování.

Během cyklování se měří případné přerušování pájeného spoje. Princip indikace poruchy je uveden na obrázku č. 4. Pokud dojde k přerušování spoje, rozsvítí se indikační LED dioda, která je napájena z proudového zdroje. Software klopného obvodu je sestaven tak, aby klopný obvod indikoval přerušování delší než 100 ms. Indikace kratších napěťových impulsů byla problematická, klopný obvod by byl spouštěn také náhodnými impulsy z okolí.



Obr. 4: Princip indikace poruchy [53]

4.1.1 Vyhodnocování experimentu pomocí Weibullova rozdělení

V průběhu experimentu byly zaznamenávány počty cyklů do poruchy. Získaná experimentální data byla vyhodnocena pomocí Weibullova rozdělení v grafické podobě ve statistickém programu STATISTICA.

Weibullovo rozdělení je tří-parametrické rozdělení. Distribuční funkci je možné popsat vztahem č. 1: [8]

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x-c}{a} \right)^b \right], \quad (1)$$

kde

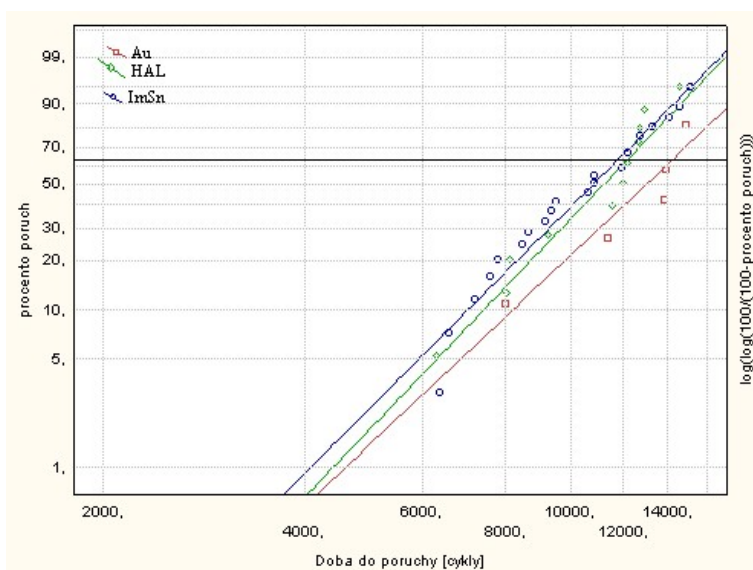
α – parametr měřítka udává dobu (tj. např. počet hodin/cyklů), při kterých došlo k poruše u 63,2 procenta výrobků (jinými slovy tuto dobu přežije 36,8 procenta výrobků). Parametr měřítka bývá proto někdy nazýván Weibullovým charakteristickým životem.

β – parametr tvaru, typicky nabývá hodnoty mezi 0,5 a 8, ovlivňuje tvar (průběh) funkce hustoty pravděpodobnosti.

c – parametr polohy udává minimální hodnotu náhodné veličiny t (tj. minimální dobu, po jejíž uplynutí může nastat porucha), v praxi se nejčastěji používá $c = 0$.

Před začátkem vyhodnocování je nejprve zapotřebí určit vhodnost použití Weibullova rozdělení. K testování hypotézy o tvaru rozdělení zkoumané náhodné veličiny byl použit Kolmogorov-Smirnovův test dobré shody. Kolmogorov-Smirnovův test je metoda matematické statistiky, která umožňuje testovat, zda dvě jednorozměrné náhodné proměnné pocházejí ze stejného rozdělení pravděpodobnosti, případně zda jedna jednorozměrná náhodná proměnná má předpokládané (teoretické) rozdělení. [12] Kolmogorov-Smirnovův test dobré shody je možné použít i v případě malých náhodných výběrů, což by u χ^2 -testu dobré shody nešlo, protože by třídy byly velmi málo četné, nebo by jich bylo extrémně málo.

Z grafů (viz disertační práce), které znázorňují výsledky testování hypotézy je patrné, že všechna experimentální data mohou být vyhodnocena pomocí Weibullova rozdělení. Na obrázku č. 5 je znázorněn výsledek vyhodnocování pomocí Weibullova rozdělení.



Obr. 5: Weibullův pravděpodobnostní graf

Po ukončení experimentu se vyhodnocovala životnost pájeného spoje z hlediska použité povrchové úpravy desek plošných spojů. Z výše uvedených grafů je patrné, že větší životnost prokázaly pájené spoje realizované na povrchové úpravě galvanické Au.

4.2 TEORETICKÝ VÝPOČET PODLE ÚNAVOVÉHO MODELU

Pro analytický výpočet byl použit Engelmaierův únavový model. Použitá formulace modelu je založena na předpokladu smykové deformace vyplývající z lehké měřitelných parametrů, takových jako výška pájeného spoje a vzdálenost od neutrálního bodu. Tento model je polo-empirický. Engelmaierův model (viz rovnice 2) [33] se skládá ze dvou částí. První část je fyzikální, kde se udává počet cyklů do 50% od celkového počtu součástek, které budou v poruše. Druhá část je statistická a prezentuje celkové kolísání v rámci reprezentativního výběru podle dvou-parametrického Weibullova rozdělení.

$$N_f(50\%) = \frac{1}{2} \left[\frac{2\varepsilon_f'}{\Delta D} \right]^m \left(\frac{\ln(1-0,01x)}{\ln 0,5} \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (2)$$

kde ε_f' – je koeficient únavové tažnosti, ΔD – je cyklické únavové poškození, m – je exponent tvárnosti, β – je parametr tvaru Weibullova rozdělení.

V daném výpočtu se používá zjednodušená forma Engelmaierova modelu, která se skládá jen z jeho fyzikální části. Pro jednoduchost byly klíčové hodnoty potřebné pro výpočet vyneseny do tabulky. Tabulky č. 1 a 2 udávají provozní podmínky

a základní fyzikální vlastnosti jednotlivých částí vstupujících do experimentu. Výsledky výpočtu jsou znázorněny v tabulce č. 3.

Tab. 1: Základní fyzikální vlastnosti součástek a DPS

Druh prvku	F	DNP [mm]	CTE [ppm/°C ⁻¹]	h [mm]
2512 RC	1,2	3,1	7	0,273
PCB (FR4)	-	-	14	-

Tab. 2: Podmínky experimentu

Typ pouzdra	T _{min} [°C]	T _{max} [°C]	T _{sj} [°C]	ΔT [°C]	t _D [min]
2512 RC	0	100	50	100	7,5

Tab. 3: Výsledky výpočtu

Typ pouzdra	m	ΔD	N _f (50%) [cyklů]
2512 RC	2,244	0,009	11695

Nevýhodou výpočtů podle Engeltaierova vztahu je, že nebere v úvahu jednotlivé technologické parametry (například povrchová úprava DPS, velikost pájecích plošek, tloušťku mědi základního materiálu DPS a další).

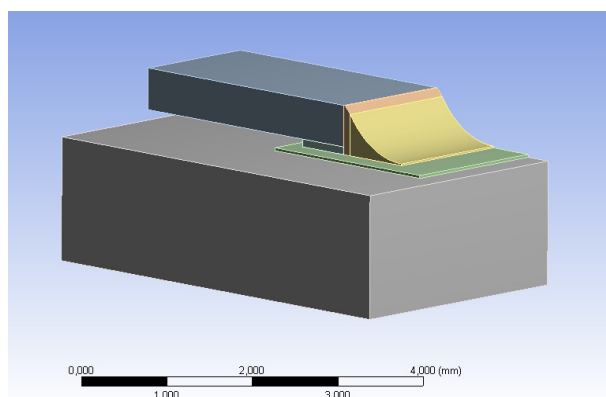
4.3 VÝPOČET ŽIVOTNOSTI ZA POUŽITÍ PROGRAMU ANSYS

V současné době, díky dostupnosti a vyspělosti CAD a FEM programů, lze nahradit fyzický výrobek kvalitním virtuálním prototypem, provést jeho statické, dynamické, frekvenční i tepelné analýzy, simulovat jeho chování a optimalizovat funkci v reálných zátěžových podmínkách bez nutnosti výroby množství fyzických prototypů. [14]

4.3.1 Stanovení životnosti podle únavového modelu založeného na energii

V simulačním programu ANSYS je pro realizaci teplotních a mechanických analýz potřeba nejprve nadefinovat chování zkoumaného materiálu. Pro tento účel byl použit Anandův model, který popisuje viskózně-plastické chování materiálu. Tento model využívá devět materiálových konstant, které se zjišťují experimentálně. V dané práci byly materiálové konstanty pro bezolovnatou pájku SAC 305 převzaty z [19]. Pomocí materiálových konstant bylo chování materiálu desky plošných spojů nadefinováno jako ortotropní lineárně-elastické a zbývající materiály sestavy jako izotropní lineárně-elastické materiály, ale pomocí Anandova bylo modelu chování pájecího materiálu nadefinováno jako viskózně-plastické.

V simulačním programu ANSYS byla vytvořena geometrie pro pájené spoje testovací sestavy (viz obr. 6).

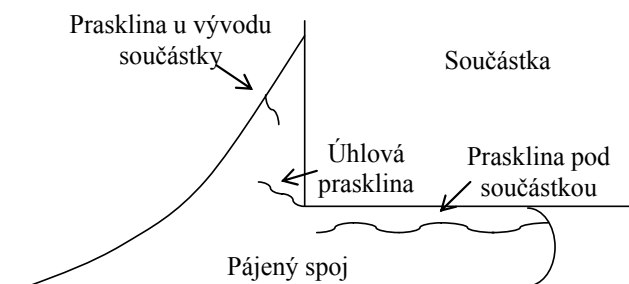


Obr. 6: Model $\frac{1}{4}$ pájeného spoje

Pro usnadnění a urychlení výpočtu v DesignModeleru byl navržen symetrický model (čtvrtina pájeného spoje), což znamená, že při daném způsobu definování okrajových podmínek budou výsledky deformace získané při simulaci v souladu se symetrií tělesa.

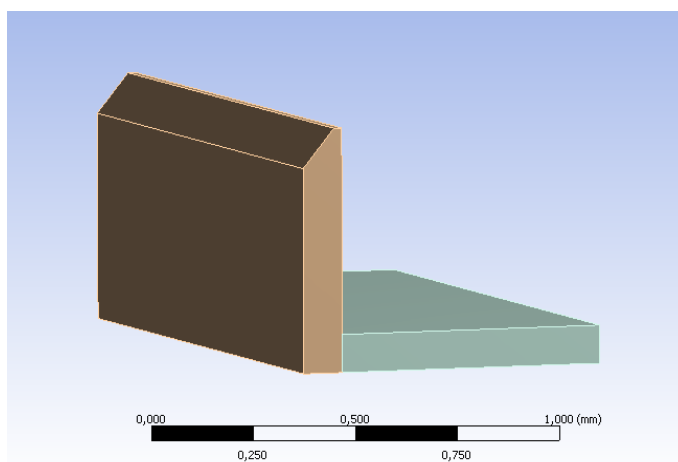
Jako počáteční okrajová podmínka pro teplotní analýzu byla nastavena konvekce, která se aplikuje na povrchy soustavy. Pro přesnější nadefinování okrajových podmínek po celou dobu experimentu byla měřena teplota na pájeném spoji, na pouzdře součástky a desce plošných spojů. Navržená struktura byla zkoumána po dobu čtyř plných teplotních cyklů, které odpovídají naměřenému teplotnímu cyklu v prostředí testovací teplotní komory (viz obr. 1). Pro výpočet byly použity čtyři teplotní cykly z důvodu vytvoření stabilní hysterezní smyčky napětí-deformace.

V pájených spojích se při cyklickém teplotním namáhání po určité době začínají tvořit praskliny ve třech primárních oblastech (viz obr. 7). První oblastí je prostor kolem vývodu součástky. Prasklina vzniká na povrchu a rozšiřuje se dovnitř pájeného spoje. Jiný zdroj vzniku prasklin je ostrý roh součástky. Směr šíření praskliny je podél diagonály pájeného spoje. Poslední a nejčastější oblast vzniku praskliny je oblast pod součástkou. Zde prasklina vzniká na okraji a šíří se směrem k vývodu součástky podél komponenty.



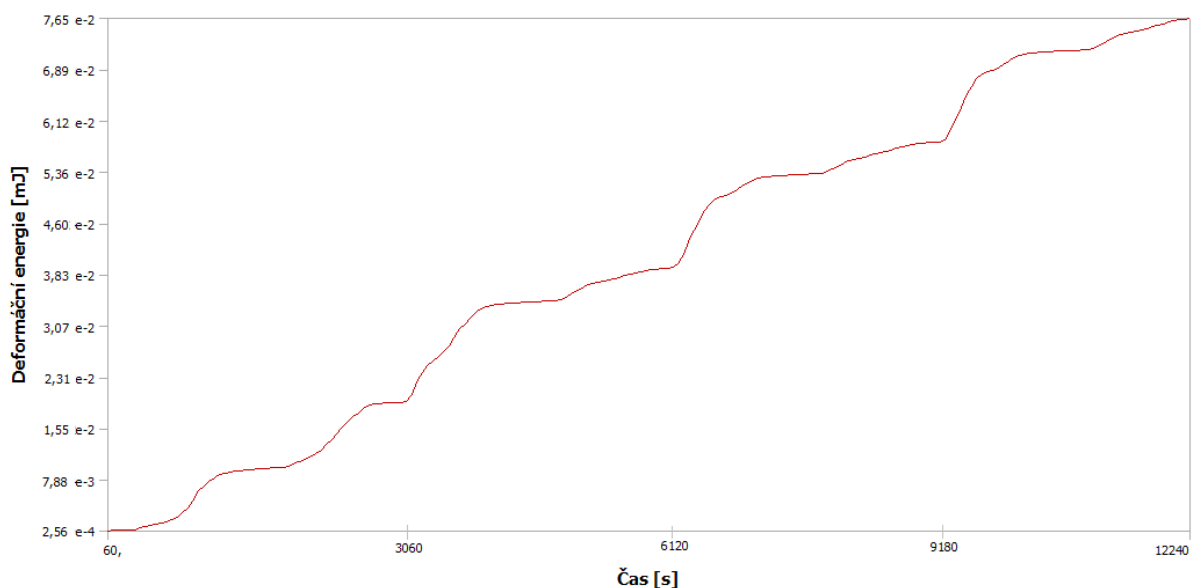
Obr. 7: Oblasti vzniku prasklin [32]

Z výše uvedených důvodů se výpočet hustoty deformační energie bude provádět jen na vybrané části pájeného spoje (viz obr. 8).



Obr. 8: Pájený spoj z celkového modelu

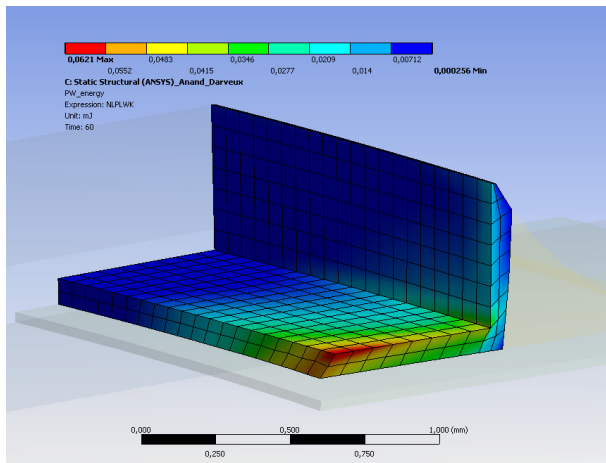
Po dosažení požadovaného rozložení teploty byla provedena simulace, na základě které byla získána plastická práce v jednotce objemu za teplotní cyklus (viz obr. 9).



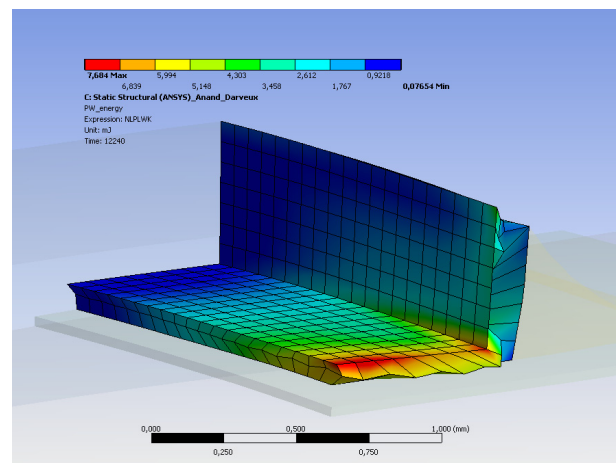
Obr. 9: Zprůměrovaná hustota deformační energie za cyklus

Na obrázcích č. 10a a 10b¹ jsou znázorněny změny hustoty deformační energie v prvním a čtvrtém teplotním cyklu.

¹ Pro níže uvedené výstupy jsou zobrazované výsledky několikrát zvětšeny z důvodu lepší ilustrace působících sil a dějů, které se odehrávají v pájeném spoji.



a)



b)

Obr. 10: Změna hustoty deformační energie: a – první, b – čtvrtý teplotní cyklus

Z obrázků je patrné, že v průběhu cyklického teplotního namáhání se zvětšuje hustota deformační energie. Její hodnota se v prvním teplotním cyklu rovná hodnotě 0,052 mJ, a ve čtvrtém teplotním cyklu je rovna 7,684 mJ. V průběhu čtyř teplotních cyklů se hodnota hustoty deformační energie zvětšila 100 násobně.

Vztahy č. 3 a 4 reprezentují únavový model pro výpočet počtu cyklů do vzniku praskliny – N_0 a rychlost šíření praskliny za jeden teplotní cyklus – $\frac{da}{dN}$. [18]

$$N_0 = K_1 (\Delta W_{ave})^{K_2} \quad (3)$$

$$\frac{da}{dN} = K_3 (\Delta W_{ave})^{K_4} \quad (4)$$

Životnost pájeného spoje může být spočítána sečtením počtu cyklů do vzniku praskliny a počtu cyklů v průběhu jejího šíření přes pájený spoj (viz rovnice 5): [18]

$$N = N_0 + \frac{a}{da/dN}, \quad (5)$$

kde a je délka pájeného spoje, přes který se šíří prasklina (konečná délka praskliny). Tabulka č. 4 znázorňuje výsledky výpočtů.

Tab. 4: Výsledky výpočtů

ΔW	N_0 [cyklů]	da/dN [mm/cyklus]	$a/(da/dN)$ [cyklů]	N [cyklů]	První experimentální porucha [cyklů]
0,441	8162	$8,53 \cdot 10^{-5}$	11724	19886	8008

4.3.2 Stanovení životnosti podle únavového modelu založeného na tečení

Základní hypotézou pro vybraný výpočetní únavový model je, že poškození v pájeném spoji během teplotního cyklování vznikají kvůli akumulaci ustálené deformace tečením. Tečení je považováno za primární poškozovací mechanismus pro SnAgCu slitiny v průběhu teplotního cyklování. Proto je teoretický základ únavového modelu, který bude použit pro odhad životnosti, založen právě na mechanismu deformace tečením. [15]

Namísto tradiční používané definice únavy, cyklické namáhání je považováno za speciální případ, kde se tečení projevuje v důsledku série zatěžování, které se opakují cyklickým způsobem, a z toho plynou parametry pro predikční únavový model. Pro popis výše zmíněného děje je možné použít dvě rovnice. První je Monkman-Grantův vztah (viz rovnice 6) [15] tažnosti v důsledku tečení, kde t_r je doba potřebná pro dosažení lomu. Tato hodnota je nepřímo úměrná rychlosti deformace ustáleného tečení ($\dot{\epsilon}_{cr}$) během testování a přímo úměrná tažnosti při tečení (ϵ_f).

$$t_r = \frac{\epsilon_f}{\dot{\epsilon}_{cr}} \quad (6)$$

V případě opakovaných kolísajících namáhání cyklickým způsobem, může být pro odhad počtu cyklů do poruchy použita zvláštní forma časově-poruchového pravidla (time-fraction rule) (viz rovnice 7). [15] Daná rovnice připomíná velmi známé Palmgren-Minerovo pravidlo pro cyklické poškození.

$$N_f \left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i}{t_{ri}} \right) = 1, \quad (7)$$

kde N_f – počet cyklů do poruchy, n – počet kroků během cyklu, Δt_i – doba při úrovni zátěže σ_i v průběhu cyklu, t_{ri} – lomový čas pod úrovní zátěže σ_i .

Při použití Monkman-Grantova vztahu, získává vztah č. 7 následující podobu (viz rovnice 8): [15]

$$N_f \left(\frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i \dot{\epsilon}_{cri}}{\epsilon_f} \right) = 1, \quad (8)$$

kde $\dot{\epsilon}_{cri}$ je rychlost ustáleného tečení pro napětíovou úroveň σ_i . Čitatelem rovnice je akumulování deformace tečením během doby Δt_i . Sumarizace všech kroků n během cyklu udává akumulovanou deformaci tečením ϵ_{acc} v průběhu celého cyklu. Vztah č. 8 může být zjednodušeně popsán jako (viz rovnice 9): [15]

$$N_f = (C' \epsilon_{acc})^{-1}, \quad (9)$$

kde: N_f – počet cyklů do poruchy, ε_{acc} – akumulovaná deformace tečením, $C' = 1/\varepsilon_f$ opačná hodnota deformace při lomu.

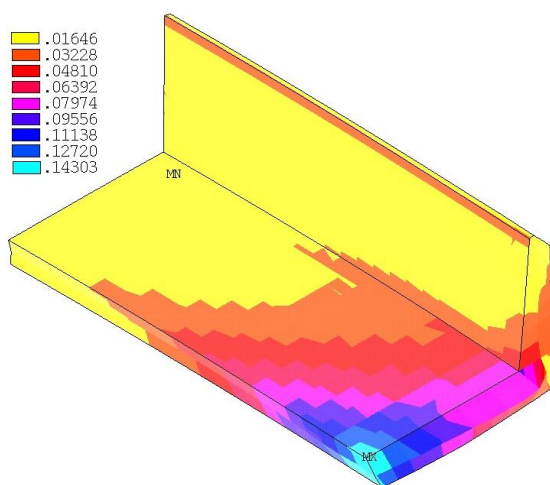
Pro tento únavový model se deformační exponent rovná -1 . [15] Dále se pro výpočet akumulované deformace tečením používá základní rovnice hyperbolického sinusu (viz rovnice 10): [15]

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = A_1 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(\frac{-H_1}{kT}\right). \quad (10)$$

Základní rovnice hyperbolického sinusu (Hyperbolic Sine Constitutive Equation), pomocí které se počítá akumulovaná deformace tečením, byla implementována do prostředí simulačního programu za pomoci rovnice standardního implicitního creepu (TBOPT = 8). V prostředí ANSYS popisuje příkaz TBOPT = 8 chování materiálu podle Garofalova modelu.

Pro danou simulaci byla použita geometrie a nastaveny okrajové podmínky pro teplotní a mechanickou analýzu stejné, jako u simulace za použití únavového modelu založeného na změně hustoty deformační energie, o kterém pojednává předchozí kapitola.

Na obrázku č. 11 je znázorněno místo koncentrace tečení, které vzniká v pájeném spoji v průběhu čtyř testovacích teplotních cyklů.



Obr. 11: Tečení v pájeném spoji po 4 teplotních cyklech

Pro výpočet počtu cyklů do poruchy byla použita rovnice č. 9, která představuje únavový model, kde deformační exponent a konstanta C' byli vypočítáni v kapitole 4.4 a rovnají se hodnotám 0,96 a 0,0225.

Po skončení simulací se prokázalo, že životnost pájeného spoje podle zvoleného únavového modelu se rovná hodnotě 11655 cyklů, což se přibližně shoduje s experimentálním výsledkem.

4.4 STANOVENÍ KOEFICIENTŮ PRO ÚNAVOVÝ MODEL

Dále se práce zaměřuje na způsob a metodiku výpočtu koeficientů pro únavový model založený na deformaci tečením za použití experimentálních výsledků

a výsledků získaných pomocí simulačního programu pro bezolovnatou pájku SAC 305.

Zjednodušeně je možné určovací postup popsat následně. Pro stanovení koeficientů byl zvolen únavový model založený na deformaci v důsledku tečení pájky, který byl podrobně popsán v předchozí kapitole. Tento model byl implementován do prostředí simulačního programu ANSYS, pomocí kterého se počítá nezávislá hodnota y z hledané křivky a závislá hodnota x se zjišťuje experimentálně. Po zjištění vstupních a výstupních hodnot byla použita lineární regresní analýza. Základní úkol regresní analýzy spočívá v nalezení vhodné teoretické regresní funkce k vystižení sledované závislosti. Zjednodušeně je to možno popsat tak, že regresní analýza má za cíl proložit množinu bodů A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 hladkou matematickou křivkou a najít vzájemné souvislosti. [17]

Určení závislé hodnoty (počet cyklů do poruchy) matematické křivky se podle doporučení [15] provádělo experimentálně – teplotním namáháním.

Pro přehlednost byly jednotlivé testovací sestavy označeny následně (viz tab. 5):

Tab. 5: Označení testovacích sestav

Označení	Typ součástky	Druh teplotního cyklu
A	čipový rezistor	0 °C až 100 °C, prodleva 15 min
B	čipový rezistor	-20 °C až 120 °C, prodleva 15 min
C	BGA, materiál substrátu – Al ₂ O ₃	-20 °C až 100 °C, prodleva 10 min
D	BGA, materiál substrátu – LTCC	-20 °C až 100 °C, prodleva 10 min

V průběhu experimentu byly zaznamenávány počty cyklů do poruchy. V tabulce č. 6 jsou znázorněna zprůměrovaná experimentální data.

Tab. 6: Zprůměrovaná experimentální data

Označení testovací sestavy	Průměrný počet cyklů do poruchy
A	11926
B	3784
C	955
D	1870

Určení nezávislé hodnoty (akumulace deformace vyvolané tečením za teplotní cyklus) matematické křivky se podle doporučení [15] provádělo pomocí simulací v programu ANSYS. Pro získání hodnoty akumulované deformace vyvolané tečením, byla použita stejná metodika nastavení okrajových podmínek pro teplotní a mechanickou analýzu, která je popsána v kapitole 4.3.1 a byl použit stejný únavový model, o kterém se pojednává v kapitole 4.3.2. Výsledky ze simulace (akumulovaná deformace vyvolaná tečením) jsou znázorněny v tabulce č. 7.

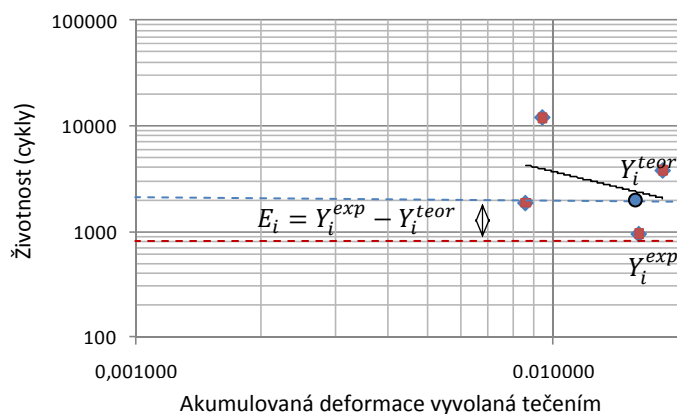
Tab. 7: Akumulovaná deformace vyvolaná tečením za teplotní cyklus

Označení testovací sestavy	Změna akumulované deformace vyvolaná tečením
A	0,009444
B	0,018281
C	0,016028
D	0,008607

Po získání všech potřebných hodnot je možno provést regresní analýzu. Postup regresní analýzy spočívá v tom, že si je zkoumaný objekt či proces možno představit jako „černé pouzdro“, o kterém není nic známo, a které má jen vstupy a výstupy, jež je možné měřit. Na počátku analýzy se předpokládá, že pouzdro má jeden vstup a jeden výstup. Pro jednoduchost se má za to, že závislost mezi vstupem a výstupem je lineární nebo téměř lineární. V daném případě se vytvořený model bude nazývat jednoduchý lineární regresní model. Dále se postupuje následovně:

1. Stanovení hypotézy o struktuře pouzdra

Prozkoumáním experimentálních bodů (viz obr. 12), které jsou vyneseny do souřadnicového systému (životnost vs. akumulovaná deformace vyvolaná tečením) se předpokládá, že experimentální body jsou podřízeny lineární hypotéze. To znamená, že výstup Y je lineárně závislý na vstupu X a hypotéza má tvar: $Y = A_1X + A_0$.

**Obr. 12:** Graf vypočtených bodů

Naměřené body byly vyneseny do souhrnné tabulky (viz tab. 8), která bude použita pro následný výpočet.

Tab. 8: Souhrnná tabulka výpočetních hodnot

i	Y_i	X_i
1.	11926	0,009444
2.	3784	0,018281
3.	955	0,016028
4.	1870	0,008607

2. Stanovení neznámých koeficientů A_0 a A_1 modelu

Pro každý z n naměřených experimentálních bodů se vypočítává odchylka E_i mezi experimentální hodnotou Y_i^{exp} a teoretickou hodnotou Y_i^{teor} ležící na hypotetické přímce (viz obr. 12). Cílem metody je minimalizovat souhrnnou odchylku F (viz rovnice 11) [35] na základě vybírání koeficientů A_0 a A_1 . To znamená, že je potřeba najít takové koeficienty A_0 a A_1 lineární funkce $Y = A_1X + A_0$, aby její graf procházel najednou co neblíže ke všem experimentálním bodům. Daná metoda se nazývá metodou nejmenších čtverců.

$$F(A_0, A_1) = \sum_{i=1}^n E_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - A_0 - A_1 \cdot X_i)^2 \Rightarrow \min_{A_0, A_1} \quad (11)$$

Pro minimalizování souhrnné odchylky je potřeba najít parciální derivace funkce F pro každou proměnnou a dát je rovny nule (podmínka extrému funkce), potom se získá soustava lineárních rovnic a pro výpočet koeficientů A_0 a A_1 se použije Kramerova metoda, pomocí které se soustava lineárních rovnic přepíše do maticového tvaru.

3. Ověření zvolené hypotézy

Při rozhodování o přijetí či nepřijetí hypotézy je potřeba nejprve vypočítat odchylku mezi body stanovené experimentální a získané teoretické závislosti a souhrnnou odchylku a poté je potřeba vypočítat hodnotu σ (viz rovnice 12): [35]

$$\sigma = \sqrt{\frac{F}{n}} \quad (12)$$

kde F je souhrnná odchylka a n je celkový počet výpočetních hodnot.

Pokud do predikčního intervalu omezeného přímkami $Y^{teor} - S$ a $Y^{teor} + S$, spadá 68,26 % a více experimentálních bodů Y_i^{exp} , potom se předpokládána hypotéza přijímá. V opačném případě se vybírá složitější hypotéza nebo se ověřují vstupní hodnoty. Jestli je potřebná vyšší jistota správnosti získaných výsledků, pak se použije doplňková podmínka, že do predikčního intervalu omezeného přímkami $Y^{teor} - 2S$ a $Y^{teor} + 2S$ musí spadat 95,44 % a více experimentálních bodů.

Konečné výpočty ukazují, že do predikčního intervalu spadá 100 % experimentálních bodů, což znamená, že nadefinovaná hypotéza je správná, a že výstup Y je lineárně závislý na vstupu X .

Po ověření hypotézy a zjištění závislosti mezi počtem cyklů do poruchy a akumulovanou deformací vyvolanou tečením je možné přepsat rovnici regrese do tvaru rovnice pro výpočet životnosti (viz rovnice 9). To znamená, že rovnice regrese má následující tvar (viz rovnice 13):

$$Y = 44,455X^{-0,96}. \quad (13)$$

Jestliže Y přepíšeme na N_f a X označíme jako ε_{acc} , pak rovnice únavového modelu získá následující tvar (viz rovnice 14):

$$N_f = (0,0225\varepsilon_{acc})^{-0,96}. \quad (14)$$

Pro analyzovanou rovnici regrese je patrné, že deformační exponent se rovná hodnotě, která se blíží teoretické a konstanta C' , která je opačnou hodnotou deformace při lomu (viz kapitola 4.3.2) se rovná hodnotě 0,0225.

Po vypočtení hodnoty deformačního exponentu a konstanty C' byly znovu provedeny simulace pro každou testovací sestavu. Porovnání experimentálně získaných počtu cyklů do poruchy a údajů vypočítaných pomocí programu ANSYS jsou znázorněny v tabule č. 9.

Tab. 9: Porovnání experimentálních dat a simulací

Označení testovací sestavy	Průměrný počet cyklů do poruchy (experimentálně)	Počet cyklů do poruchy (vypočteno v ANSYS)
A	11926	11655
B	3784	6772
C	955	9711
D	1870	17747

Z tabulky č. 9 je patrné, že ve dvou případech je hodnota experimentální 10 krát menší než hodnota, která byla získána pomocí programu ANSYS a jen v jednom případě je menší 2 krát. Odchytky mezi experimentálně naměřenými hodnotami a hodnotami, které byly vypočítány v programu ANSYS za použitím koeficientů získaného pomocí lineární regrese, mohou vznikat z následujících příčin. Za prvé je potřeba si uvědomit, že experimentální hodnoty jsou statisticky vyhodnocované, proto se uvádí průměr ze všech získaných experimentálních bodů, zatímco simulační program provádí pouze analýzu jednoho konkrétního případu. Za druhé při realizaci experimentálních vzorků není možné dosáhnout stejných podmínek technologického procesu a tato skutečnost ve velké míře ovlivňuje konečný výsledek. Za třetí pro přesnější výpočet nadeřinování sklonu prokládané přímky mezi experimentálními body je potřeba zvýšit počet experimentů. Pokud budou respektována výše uvedená doporučení, je možné dosáhnout přesnějších výsledků, které ovšem souvisí i s vyšší časovou náročností.

5 DISKUZE O DOSAŽENÝCH VÝSLEDKÁCH

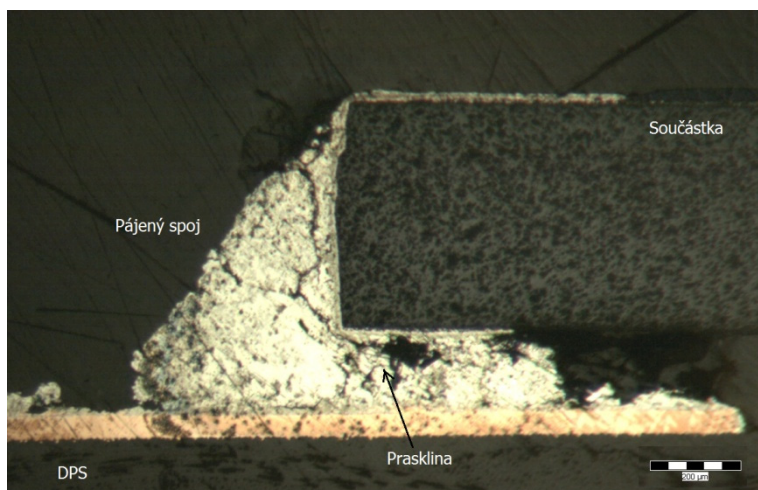
Hlavním cílem disertační práce bylo stanovení empirických koeficientů pro únavový model, kde hlavním poškozovacím mechanismem je akumulovaná deformace tečením. Pro dosažení hlavního cíle bylo potřeba provést řadu experimentálních zkoušek, pomocí kterých byla získána důležitá data pro následující výpočet empirických koeficientů.

Kapitola 5 (viz disertační práce) podrobně popisuje průběh experimentů. Testovací metodou pro sběr experimentálních údajů byly zrychlené zkoušky spolehlivosti. Pomocí teplotního namáhání byly v pájených spojích vyvolány poruchové mechanismy a následně se zapisovaly počty cyklů do poruchy jednotlivých testovacích sestav. Součástí experimentu byl také výzkum povrchových úprav desek plošných spojů z hlediska ovlivňování spolehlivosti pájených spojů na nich vytvořených. Daný výzkum pomůže zodpovědět otázku, která z povrchových úprav DPS je vhodnější pro bezolovnatou pájku z hlediska její spolehlivosti. Testováním byly ověřeny tři povrchové úpravy: imersní cín, galvanické zlato a HAL. Po ukončení experimentu byl v programu STATISTICA sestaven pravděpodobnostní graf Weibullova rozdělení, ze kterého byl odečten Weibullův charakteristický život (označován jako α). Tento parametr udává doby (tj. např. počet hodin/cyklů), při kterých došlo k poruše u 63,2 procent výrobků (jinými slovy tuto dobu přežije 36,8 procent výrobků). Experimentálním závěrem je, že nejvhodnější povrchovou úpravou z hlediska životnosti pájeného spoje je povrchová úprava galvanické zlato (α se zde rovná hodnotě 14220 cyklů).

Aby bylo možné s jistotou konstatovat, že je získaný výsledek statistického vyhodnocování správný, je potřeba jej ověřit pomocí jiné metody nebo znovu opakovat experiment, který je z časového hlediska velmi náročný. Proto bylo autorkou rozhodnuto provést ověření experimentálního výsledku výpočetně-analytickou metodou. Pro tento účel byl použit polo-empirický Engelmaierův únavový model. Tento model patří ke skupině únavových modelů, které ve svém výpočtu uvažují s elastickou deformací. Jak bylo zmíněno výše, tento model pro výpočet potřebuje materiálové konstanty a základní fyzikální a geometrické vlastnosti všech součástí testovací sestavy (DPS, součástka, pájený spoj). Po dosazení všech hodnot do únavového modelu je získána hodnota, která udává počet cyklů do 50% od celkového počtu součástek, které budou v poruše. Závěrem analytického výpočtu je, že počet cyklů do poruchy je pro zkoumanou bezolovnatou slitinu roven hodnotě 11695 cyklů. Nevýhodou dané metody je, že nezohledňuje všechny vstupní parametry (například povrchovou úpravu DPS).

V současné době jsou velmi populární počítačové simulace, pomocí kterých je také možné predikovat životnost pájených spojů. Tento nástroj byl využit autorkou i v dané práci. Za tímto účelem byl nasazen program ANSYS, který pro výpočet používá metodu konečných prvků. Získáním výsledků ze simulace byly zároveň ověřeny i experimentální výsledky a výsledky první z použitých početně-analytických metod. Do prostředí simulačního programu byly implementovány dva únavové modely s různými mechanismy poruch. První model využívá pro výpočet

životnosti akumulovanou hustotu deformační energie za jeden teplotní cyklus a druhý akumulovanou deformaci tečením. Provedené simulace ukázaly, že místem největšího pnutí a následně i místem iniciace praskliny, je vnější roh pájeného spoje pod součástkou. Výsledek ze simulace koresponduje i s experimentálním výsledkem (viz obr. 13).



Obr. 13: Místo vzniku praskliny

Pro uskutečnění výpočtu podle druhého únavového modelu, který ve výpočtu uvažuje s akumulovanou deformací tečením, bylo provedeno stanovení koeficientů potřebných pro provedení simulace. Studium odborné literatury bylo zjištěno, že pro daný model jsou k dispozici materiálové konstanty pro různé složení bezolovnatých pájek. Pro určení empirických koeficientů byla použita lineární regresní analýza, která umožňuje nalézt závislost mezi experimentálními hodnotami (počet cyklů do poruchy) a výpočetními hodnotami, získanými pomocí simulací v programu ANSYS (akumulace deformace v důsledku tečení pájky). Získané empirické koeficienty byly implementovány do únavového modelu. Pomocí programu ANSYS byl proveden výpočet životnosti pro oba dva modely a výsledky byly porovnány s experimentálními. Počet cyklů do poruchy vypočítaný pomocí prvního únavového modelu je roven hodnotě 19886 cyklů. Model, který používá pro výpočet akumulovanou deformaci tečením, měl výsledek roven počtu 11655 cyklů. Zde je potřeba brát v úvahu ten fakt, že zmíněné výpočetně-analytické modely neumožňují zohlednění některých vstupních dat takových, jako tloušťka intermetalické vrstvy, změny v krystalické struktuře pájky v důsledku izotermického stárnutí (podle doporučení standardu), dutiny (voids) v pájeném spoji atd.

V tabulce č. 10 jsou shrnuty výstupy (počet cyklů do poruchy) ze všech metod použitých v disertační práci. Pro metody Weibullovo rozdělení a Engelmaierův únavový model byl proveden přepočítání počtu cyklů do poruchy na 100 % z důvodu sjednocení výstupů mezi všemi použitými modely.

Tab. 10: Souhrn výstupů ze všech únavových modelů

Experimentální výsledek (průměr)	Weibullovo rozdělení	Engelmaierův únavový model	Únavový model (akumulace deformací tečením)	Únavový model (akumulace hustoty deformační energie)
11926	22500	23390	11655	19886

Analýza výsledků dosažených v práci ukázala, že výsledky všech metod (počet cyklů do poruchy) si nejsou příliš vzdálené. Na základě provedené analýzy je tedy možno konstatovat, že každá ze zmíněných metod může být aplikována pro modelování odhadu životnosti pájeného spoje vytvořeného bezolovnatou pájkou.

Rozdíl ve výsledcích mezi únavovými modely, které byly implementovány do programu ANSYS, je způsoben tím, že se zde uplatňují různé mechanismy poruch. Také je potřeba zmínit složitost nalezení všech potřebných vstupních dat a empirických koeficientů používaných ve výpočtech pomocí únavových modelů implementovaných do programu ANSYS. Engelmaierův únavový model je spíše orientační, protože je zčásti závislý na geometrii pájeného spoje a na správně zvoleném technickém faktoru. Weibullovo rozdělení je založeno jen na experimentálních výsledcích a jedná se o čistě statistickou metodu.

6 ZÁVĚR

V blízké budoucnosti skončí platnost výjimek stanovených pro používání olovnatých pájek v takových odvětvích průmyslů jako je vojenský, kosmický, medicínský a další. Stále však zůstává otázkou, která z bezolovnatých pájecích slitin nahradí pájecí slitinu obsahující olovo a její mechanické a elektrické vlastnosti, které jsou prozkoumané a dobře známé, na rozdíl od bezolovnatých slitin.

Představená disertační práce měla za cíl stanovení dosud neznámých empirických koeficientů pro únavový model. Pomocí zvoleného únavového modelu je možné provádět predikaci životnosti pájených spojů za předpokladu znalosti potřebných materiálových a empirických konstant. V dané práci byly také experimentálně ověřeny životnosti pájených spojů vytvořených bezolovnatou pájecí slitinou SAC 305 a určena nejlepší povrchová úprava z hlediska životnosti pájeného spoje. Stanovený cíl disertační práce byl dosažen.

Rešerší odborné literatury byly vybrány vhodné únavové modely: Engelmaierův únavový model (*A*), únavový model založený na akumulaci deformací tečením (*B*) a model, který využívá pro výpočet životnosti akumulovanou hustotu deformační energie (*C*). Dva z posledně zmíněných modelů byly implementovány do prostředí simulačního programu ANSYS. Pro únavový model *B*, kde základním mechanismem vzniku poruchy v pájeném spoji je akumulace deformace tečením, byla autorkou zjištěna závislost mezi počtem cyklů do poruchy (určuje se experimentálně) a změnou akumulované deformace za jeden teplotní cyklus (určuje se pomocí programu ANSYS), která je vyvolána tečením v průběhu teplotního namáhání. Závislost mezi experimentálními hodnotami a hodnotami vypočítanými pomocí simulačního programu ANSYS byla popsána matematicky s použitím lineární regresní analýzy. Výsledkem regresní analýzy je rovnice, která umožnila stanovení chybějících empirických koeficientů nutných pro teoretický výpočet životnosti pájených spojů vytvořených bezolovnatou pájkou SAC 305. Správnost zjištěných koeficientů byla ověřena opětovou simulací a srovnáním s experimentálními výsledky. Tento postup se ve světě běžně používá (viz. [15]).

Pro dosažení definovaného cíle bylo realizováno i experimentální predikování životnosti (počet cyklů do poruchy) pájených spojů vytvořených zkoumanou bezolovnatou pájkou. Jako základ pro experimentální určení životnosti pájeného spoje byly použity zrychlené zkoušky spolehlivosti, jejichž průběh se řídí standardem IPC-SM 785. Experimentální výsledky (počet cyklů do poruchy) posloužily jako orientační bod pro všechny únavové modely, které byly v dané práci použity ke stanovení životnosti pájených spojů. Pomocí experimentálních výsledků byla nalezena závislost mezi počtem cyklů do poruchy a příčinou vzniku samotné poruchy a následně i určeny doposud neznámé empirické koeficienty pro únavový model *B* pro pájku SAC 305.

Nejdůležitějším přínosem práce je stanovení empirických koeficientů pro únavový model, kde základním mechanismem vzniku poruchy je kumulace deformace vyvolané tečením, a to vzhledem k tomu, že tečení pájky se projevuje již

při teplotách 0,3–0,6 homologické teploty (což je poměr pracovní teploty a teploty tavení) a tím urychluje únavové procesy.

Analýza výsledků získaných pomocí únavových modelů pro odhad životnosti pájených spojů vytvořených bezolovnatou pájkou ukázala, že dosažené hodnoty (počet cyklů do poruchy) si nejsou příliš vzdálené (jsou stejného řádu, viz tab. 10). Rozdíly ve výsledcích jsou způsobeny celou řadou faktorů, které se velice obtížně definují, a které výrazně ovlivňují konečný výsledek životnosti pájeného spoje. Jedná se hlavně o dutiny ve spoji, o tvorbu intermetalického rozhraní spoje, obtížně definovaný tvar spoje, materiálové konstanty, změny v krystalické struktuře pájky v důsledku izotermického stárnutí (podle doporučení standardu), použití inertní atmosféry v průběhu procesu pájení a další.

V experimentální části práce bylo zjištěno, že nejvhodnější povrchovou úpravou DPS pro zkoumanou bezolovnatou pájku SAC 305 je povrchová úprava „galvanické zlato“.

V otázce spolehlivosti bezolovnatých pájek stále existuje velký prostor pro pokračování ve výzkumu a nalezení té optimální kombinace podmínek pro dosažení kvalitního a hlavně spolehlivého pájeného spoje s vysokou životností. Výsledky předložené disertační práce přispěly k lepšímu pochopení vlastností pájky SAC 305, vzniku mechanismů poruch v pájených spojkách a rozšířily znalosti v aplikaci únavových modelů při analýze životnosti pájených spojů a jejich následné implementaci do simulačního programu ANSYS, který se v současné době k těmto účelům velmi často využívá.

V dané oblasti je potřeba pokračovat ve výzkumu a vyzkoušet i jiné typy pájecích slitin (například Sn 100) a pouzder než použité SMD pouzdro 2512 (například nové „bezvývodové“ pouzdro SON).

7 POUŽITÁ LITERATURA²

- [1] ŠANDERA, J., HEJÁTKOVÁ, E. Termomechanické namáhání SMD součástek. *Elektrorevue* [online]. [cit. 2009-02-12]. Dostupné z WWW: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02057/>
- [2] SZENDIUCH, I., Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Brno, 2006, ISBN 80-214-3292-6.
- [8] NOVOTNÝ, R., *Weibullovo rozdělení při analýzách bezporuchovosti*. *Elektrorevue* [online]. 2002, 17, [cit. 2011-04-28]. Dostupný z WWW: <www.elektrorevue.cz/clanky/02017>, ISSN 1213-1539.
- [12] BAŠTINEC J. *Statistika, operační výzkum, stochastické procesy*. Skripta FEKT VUT v Brně, Brno 2009.
- [14] MILER, O. *FEM Analysis* [cit. 2011-05-10]. Dostupné z WWW: http://download.sczm.t-systems.de/t-systems.cz/cs/StaticPage/74/07/36/740736_pdf3-ps.pdf
- [15] SYED, A. *Accumulated Creep Strain and Energy Density Based Thermal Fatigue Life Prediction Models for SnAgCu Solder Joint*. Proceedings Paper ECTC 2004, s. 737-746. ISBN 0-7803-8365-6
- [17] HYPLOVÁ, L. *Regresní a korelační analýza*. Vysoká škola finanční a správní. 2005. 3 s. Učební text. [cit. 2011-06-26] Dostupné z WWW: http://is.vsfs.cz/el/6410/zima2005/BK_StB/Regresni_a_korelacni_analyza.pdf
- [18] DARVEAUX, R. *Effect of Simulation Methodology on Solder Joint Crack Growth Correlation*. Proceedings of 50th Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas, 2000, s. 1048-1058.
- [19] HERKOMMER, D., PUNCH, J., REID, M. *A reliability model for SAC solder covering isothermal mechanical cycling and thermal cycling conditions*. *Microelectronics Reliability*. Vol. 50 (2010), s. 116-126. ISSN 0026-2714
- [32] HARPER, C. A. *Electronic Packaging and Interconnection Handbook*. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2000. 1453 s. ISBN 0-07-134745-3
- [33] SALMELA, O., ANDERSSON, K., PERTTULA, A., SÄRKKÄ, J., TAMMENMAA, M. *Modified Engelmaier's model taking account of different stress levels*. *Microelectronics Reliability*. Vol. 48 (2008), s. 773-780. ISSN 0026-2714
- [35] МУХИН, О. И. *Моделирование систем*. Электронный учебник [cit. 2011-07-09]
- [53] ŠANDERA, J., RUSSKIKH, O. *Měření termomechanické spolehlivosti bezolovnatého pájeného spoje v povrchové montáži*. Sborník příspěvků k projektu MIKROSIN. Brno: 2008. s. 34-39. ISBN: 978-80-214-3534-6.

² Z důvodu lepší orientace je zde zachováno číslování použité literatury podle plné verze disertační práce.

CURRICULUM VITAE

Osobní údaje	
Jméno:	Ing. Olga Švecová
Místo narození:	Balezino, Ruská federace
Korespondenční adresa:	Sychrov 22, 621 00 Brno
Telefon:	+ 420 603 795 522
E-mail:	svecovaolga@gmail.com
VZDĚLÁNÍ	
2007 – současnost	Doktorské studium. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Obor mikroelektronika a technologie.
2005 –2007	Magisterské studium. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Obor elektrotechnická výroba a management.
2002 –2007	Magisterské studium. Iževská státní technická univerzita, Fakulta přístrojové techniky. Obor projektování a technologie radioelektronických zařízení.
1999 – 2002	Průmyslová škola při Iževské státní technické univerzitě, Fakulta přístrojové techniky.
Řešené projekty	
2011	Projekt financovaný Fondem rozvoje vysokých škol „Pracoviště pro testování pevnosti pájených spojů.“ evidenční číslo 2738/2011/G1
2010	Projekt financovaný Fondem rozvoje vysokých škol „Měřicí pracoviště pro testování spolehlivosti bezolovnatých pájek.“ evidenční číslo 2493/2010/G1
2009-2011	„Aplikace moderních montážních technologií a materiálů v elektrotechnickém průmyslu.“, evidenční číslo FR-TI1/072

ABSTRACT

The doctoral thesis is focused on reliability of lead-free solder SAC 305. Knowledge in the field of fatigue models used in determining the lifetime of solder joints are observed in this thesis. Also such methods of predicting reliability as numerically-analytical methods or reliability experimental tests are mentioned. Practical results of reliability measurement are presented. Experimental data served as the foundation for determining empirical coefficients for the fatigue model based on deformation induced by creep of the solder, which was implemented in the ANSYS environment. Results from different methods were compared and conclusions discussing the suitability of the presented prediction methods are formulated.