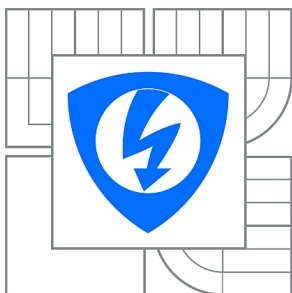


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

TERMOMECHANICKÁ SPOLEHLIVOST PÁJENÝCH PROPOJENÍ V ELEKTRONICE

TERMOMECHANICAL RELIABILITY SOLDERED CONNECTIONS IN ELECTRONIC

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

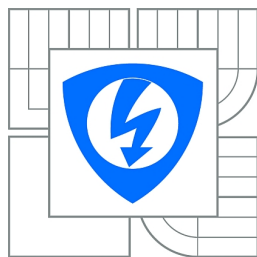
Bc. VÁCLAV NOVOTNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF ŠANDERA, Ph.D.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Václav Novotný

ID: 103275

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Termomechanická spolehlivost pájených propojení v elektronice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s teorií spolehlivosti pájených propojení v elektronice při cyklickém teplotním namáhání a s používanými únavovými modely.

Pro vybrané propojení simulujte spolehlivost v programu ANSYS. Realizujte simulaci a výsledky porovnejte s praktickým měřením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího diplomové práce.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 29.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 diplomová práce se zabývá oblastí spolehlivosti elektronických pájených propojení. Užším zaměřením je problematika využití bezolovnaté pájecí slitiny SAC305 ve výrobním procesu a parametry její spolehlivosti. V textu jsou popsány hlavní faktory, které mají vliv na spolehlivost pájených propojení při teplotním cyklování. S těmito faktory také souvisí volba substrátů a technologických procesů přípravy, které jsou charakterizovány a popsány. Další část práce se věnuje odhadu spolehlivosti pájených propojení a jsou uvedeny únavové modely pro odhad spolehlivosti. Tyto únavové modely jsou rozděleny na základě různých fyzikálních mechanismů, které působí v pájeném spoji při zátěži. Na základě porovnání jednotlivých možností únavových modelů je vybrán nejvhodnější únavový model a ve spojení se simulací v programu ANSYS je proveden odhad spolehlivosti. Pro tento účel je vybráno pájené propojení FR-4 substrátu a keramického substrátu přes SMD součástku, a jsou vyrobeny testovací sestavy, které jsou vystaveny podmínkám teplotního cyklování. Výsledky získané experimentálním měřením jsou porovnány s výsledky získanými simulací a výpočtem.

Abstract

The diploma thesis deals with the sphere of solder joints reliability. The narrower focus is use of lead-free solder alloy SAC305 in the manufacturing process and parameters of its reliability. The text describes the main factors, which have the influence on the reliability of solder joints under conditions of thermal cycling. These factors also relate with choice of substrates and technological processes of preparation, which are characterized and described. Another part is devoted to estimating the reliability of soldered connections and are listed the fatigue model to estimate reliability. These fatigue models are categorized based on different physical mechanisms that operate in the soldered joints during operation. Based on the comparison of different models is selected the most appropriate model and in conjunction with simulation in ANSYS is estimated reliability. For this purpose is selected soldered connection of the FR-4 substrate and ceramic substrate via SMD component. They are manufactured test kits and subjected to conditions of temperature cycling. Results obtained from experimental measurements are compared with results obtained by simulation and calculation.

Klíčová slova

ANSYS, bezolovnatá pájka, LTCC, pájený spoj, spolehlivost, únavový model

Keywords

ANSYS, lead-free solder, LTCC, solder joint, reliability, fatigue model

Bibliografická citace

NOVOTNÝ, V. *Termomechanická spolehlivost pájených propojení v elektronice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 97 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma **Termomechanická spolehlivost pájených propojení v elektronice** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce 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 29. května 2014

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Josefu Šanderovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Jakubu Somerovi, Ing. Michalu Štekovičovi, Ing. Alexandru Otáhalovi a Ing. Petru Vyroubalovi za ochotu a cenné rady při práci v laboratoři.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072
Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Obsah

ÚVOD	10
TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ŽIVOTNOST PÁJENÝCH SPOJŮ A JEJICH TESTOVÁNÍ	12
2 PŘEHLED SUBSTRÁTŮ PRO ELEKTROTECHNICKOU VÝROBU	14
2.1 ORGANICKÉ MATERIÁLY	15
2.2 KLASICKÉ KERAMICKÉ SUBSTRÁTY	17
2.3 KERAMIKA NÍZKÝCH TEPLOT (LTCC)	18
3 TECHNOLOGIE VÝROBY ELEKTRONICKÝCH OBVODŮ	22
3.1 PROCES VÝROBY PLOŠNÝCH SPOJŮ	23
3.2 VRSTVOVÉ TECHNOLOGIE	24
4 ZÁKLADNÍ TYPY ÚNAVOVÝCH MODELŮ	30
4.1 ÚNAVOVÉ MODEL Y ZALOŽENÉ NA PLASTICKÉ A ELASTICKÉ DEFORMACI	32
4.2 ÚNAVOVÉ MODEL Y ZALOŽENÉ NA DEFORMACI TEČENÍM	38
4.3 ÚNAVOVÉ MODEL Y ZALOŽENÉ NA AKUMULACI ENERGIE	41
PRAKTICKÁ ČÁST	43
5 TEORETICKÝ ODHAD SPOLEHLIVOSTI	44
6 ANALÝZA STRUKTUR V PROGRAMU ANSYS	46
6.1 NÁVRH MODELU	46
6.2 NASTAVENÍ PARAMETRŮ SIMULACE	49
6.3 VÝPOČET SPOLEHLIVOSTI POMOCÍ DARVEAUX MODELU	53
6.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZÍSKANÝCH SIMULACÍ	54
7 REALIZACE TESTOVACÍCH SESTAV	56
7.1 NÁVRH MOTIVŮ PRO TESTOVÁNÍ PÁJENÝCH PROPOJENÍ	58
7.2 VÝROBA SÍTA PRO TISK MOTIVŮ NA KERAMICKÉ SUBSTRÁTY	60
7.3 VÝROBA ŠABLONY PRO ZHOTOVENÍ PÁJENÝCH PROPOJENÍ	61
7.4 VÝROBA ZÁKLADNÍCH DESEK	63
7.5 VÝROBA MOTIVŮ NA Al_2O_3 SUBSTRÁTU	68
7.6 VÝROBA LTCC SUBSTRÁTŮ	71
7.7 KOMPLETACE SESTAV	75
8 ZAPOJENÍ TESTOVACÍ STRUKTURY	79
9 VYHODNOCENÍ TEPLOTNÍHO CYKLOVÁNÍ	81
10 DISKUSE NAD ZÍSKANÝMI VÝSLEDKY	85
ZÁVĚR	87
POUŽITÁ LITERATURA	89
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	93

Seznam obrázků

OBR. 1: ROZDÍLNÉ PARAMETRY JEDNOTLIVÝCH KOMPONENTŮ	12
OBR. 2: PROCES VÝROBY LTCC STRUKTURY	19
OBR. 3: STRUKTURA LTCC (A) PŘED VÝPALEM (B) PO VÝPALU [11].....	20
OBR. 4: TYPICKÝ PRŮBĚH VÝROBY PLOŠNÉHO SPOJE METODOU PATTERN-PLATING	23
OBR. 5: TYPICKÝ PROCES NANÁŠENÍ TLUSTÝCH VRSTEV NA SUBSTRÁT [2]	25
OBR. 6: PŘÍKLAD ZMĚNY VIZKOZITY U TIXOTROPNÍHO MATERIÁLU [46]	26
OBR. 7: VZORKY S VYPÁLENÝM VODIVÝM MOTIVEM UMÍSTĚNÉ NA VSÁZKOVÉM ROŠTU	27
OBR. 8: TYPICKÝ TEPLOTNÍ PROFIL VÝPALU TLUSTÝCH VRSTEV [44]	27
OBR. 9: SROVNÁNÍ VYPALOVACÍCH TEPLOTNÍCH PROFILŮ LTCC A ALUMINY [2] [17] [44].....	28
OBR. 10: TYPICKÝ POSTUP PŘI VÝROBĚ TENKÝCH VRSTEV [2].....	29
OBR. 11: PRINCIP ODHADU SPOLEHLIVOSTI POMOCÍ ÚNAVOVÝCH MODELŮ.....	30
OBR. 12: TAHOVÝ DIAGRAM - PRUŽNÁ (I) A PLASTICKÁ (II) DEFORMACE [9]	32
OBR. 13: A)MODUL PRUŽNOSTI V TAHU, MEZ PEVNOSTI V TAHU B) SMLUVNÍ MEZ KLUZU [9]....	33
OBR. 14: (A) SKLUZ ČÁSTÍ KRYSTALU (B) POHYB DISLOKACÍ VE SKLUZOVÝCH ROVINÁCH [9] ..	34
OBR. 15: RŮST TRVALÉ DEFORMACE E_{PL} A PRŮBĚH RYCHLOSTI TEČENÍ V V ČASE [23].....	38
OBR. 16: PRINCIP DIFUSE PO HRANICÍCH ZRN A OBJEMEM ZRNA [23].....	39
OBR. 17: PRINCIP DISLOKAČNÍHO TEČENÍ [23].....	39
OBR. 18: MODEL KONDENZÁTORU 0805 (A) CELKOVÝ POHLED (B) POHLED Z BOKU	46
OBR. 19: MODEL PÁJENÉHO SPOJE (A) CELKOVÝ POHLED (B) POHLED Z BOKU	47
OBR. 20: SESTAVA FR-4-KERAMICKÝ MODUL (A) CELKOVÝ POHLED (B) POHLED Z BOKU	47
OBR. 21: SCHÉMA SIMULACE V PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH	49
OBR. 22: (A) ZÁKLADNÍ SÍŤ UZLOVÝCH BODŮ (B) UPRAVENÁ SÍŤ UZLOVÝCH BODŮ.....	50
OBR. 23:PROFIL TEPLOTNÍ ANALÝZY V PROGRAMU ANSYS.....	51
OBR. 24: TEPLOTNÍ ANALÝZA SESTAVY (A) MAXIMÁLNÍ TEPLOTA (B) MINIMÁLNÍ TEPLOTA.....	51
OBR. 25: (A) EKVIVALENTNÍ NAPĚTÍ (B) OBLAST PŮSOBNÍ DEFORMAČNÍ ENERGIE V SESTAVĚ	54
OBR. 26: EKVIVALENTNÍ NAPĚTÍ SESTAV BEZ MASKY (A) Al_2O_3 (B) LTCC	55
OBR. 27: DEFORMAČNÍ ENERGIE (A) ALUMINA BEZ MASKY (B) ALUMINA S MASKOU	55
OBR. 28: PROCES REALIZACE TESTOVACÍCH STRUKTUR	56
OBR. 29: NÁVRH PLOŠNÝCH SPOJŮ A VODIVÝCH MOTIVŮ V PROGRAMU EAGLE	58
OBR. 30: NÁVRHY PRO VÝROBU VODIVÝCH MOTIVŮ NA SUBSTRÁTECH	59
OBR. 31: MOTIVY PRO VÝROBU NEPÁJIVÉ MASKY A ŠABLONY PRO TISK PASTY.....	59
OBR. 32: (A) FILMOVÁ PŘEDLOHA PRO VÝROBU SÍTA (B) MOTIV NA SÍTU	60
OBR. 33: FILMOVÁ PŘEDLOHA PRO VÝROBU MĚDĚNÉ ŠABLONY	61
OBR. 34: BLOKOVÉ SCHÉMA POSTUPU VÝROBY ŠABLONY	62
OBR. 35: (A) ŠABLONA – 35 μ M MEŘ (B) NATIŠTĚNÁ PASTA PŘES ŠABLONU NA FR-4	62
OBR. 36: BLOKOVÉ SCHÉMA VÝROBNÍHO POSTUPU ZÁKLADNÍCH DESEK	63
OBR. 37: FILMOVÁ PŘEDLOHA (A) ZÁKLADNÍ DESKY (B) NEPÁJIVÉ MASKY	63
OBR. 38: ZÁKLADNÍ DESKA FR-4 (A) BEZ NEPÁJIVÉ MASKY (B) S NEPÁJIVOU MASKOU A HAL.	64
OBR. 39: ROZDĚLENÉ PÁJECÍ PLOŠKY NA ZÁKLADNÍM MATERIÁLU FR-4	64
OBR.40: (A) OSAZOVACÍ POLOAUTOMAT SMT M01 (B) OSAZENÉ SOUČÁSTKY V PASTĚ.....	65
OBR. 41: PŘETAVOVACÍ PROFIL BEZOLOVNATÉ PÁJKY SAC305 KESTER EM 907 [24]	66
OBR. 42: DETAIL PÁJENÝCH PROPOJENÍ KONDENZÁTORŮ NA DESCE PLOŠNÉHO SPOJE.....	67
OBR. 43: ZÁKLADNÍ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ S OSAZENÝMI KONDENZÁTORY 0805.....	67

OBR. 44: MOTIV - PASTA ESL9912-K (A) DETAIL PÁJECÍ PLOŠKY (B) CELKOVÝ POHLED	68
OBR. 45: MOTIV - PASTA TC0306 (A) DETAIL PÁJECÍ PLOŠKY (B) CELKOVÝ POHLED	69
OBR. 46: (A) DETAIL VODIVÉHO MOTIVU ODLEPENÉHO Z KERAMICKÉHO SUBSTRÁTU (B) KERAMICKÝ SUBSTRÁT S NARUŠENÝM MOTIVEM	70
OBR. 47: ZÁKLADNÍ DESKY S PŘICHYCENÝMI MOTIVY Z KERAMICKÝCH SUBSTRÁTŮ	70
OBR. 48: VYPALOVACÍ PROFIL LTCC MATERIÁLU HERALOCK HL2000 [17]	71
OBR. 49: (A) LTCC STRUKTURA PŘED LAMINACÍ (B) MOTIV LTCC S PASTOU	72
OBR. 50: PRASKLINY V MOTIVECH LTCC STRUKTUR	73
OBR. 51: ZAŽLOUTNUTÍ MOTIVŮ A BUBLINY V MOTIVU LTCC STRUKTUR	74
OBR. 52: MOTIV NA LTCC – PASTA TC0306 (A) DETAIL PÁJECÍ PLOŠKY (B) CELKOVÝ POHLED	74
OBR. 53: TEPLTNÍ PROFIL PÁJENÍ V PARÁCH KAPALINY GALDEN LS230	75
OBR. 54: ZKOMPLETOVANÉ LTCC-FR4 MODULY	77
OBR. 55: ZKOMPLETOVANÉ LTCC-FR4 MODULY SE ZAPÁJENOU ZEMÍ	77
OBR. 56: VODIVÉ PROPOJENÍ ZEMĚ U ZÁKLADNÍCH DESEK FR-4	78
OBR. 57: PŘIPOJENÉ KABELY NA LTCC-FR4 MODULY	78
OBR. 58: BLOKOVÉ SCHÉMA TESTOVACÍ STRUKTURY [27]	79
OBR. 59: (A) TEPLTNÍ KOMORA CTS T-40/25 (B) PRINCIP FUNKCE INDIKAČNÍ JEDNOTKY [1].	79
OBR. 60: TESTOVACÍ SESTAVY	80
OBR. 61: INDIKAČNÍ DESKY TESTOVACÍCH SESTAV	80
OBR. 62: PROFIL TEPLTNÍHO CYKLOVÁNÍ V KOMOŘE CTS T-40/25	82
OBR. 63: RENTGENOVÝ SNÍMEK PÁJENÉHO SPOJE (A) PŘED CYKLOVÁNÍM (B) PO CYKLOVÁNÍ	83
OBR. 64: (A) SESTAVA S NEPÁJIVOU MASKOU A ODLOMENÝM KERAMICKÝM MODULEM PO TEPLTNÍM CYKLOVÁNÍ (B) SESTAVA BEZ NEPÁJIVÉ MASKY PO TEPLTNÍM CYKLOVÁNÍ ..	84
OBR. 65: (A) ODLOMENÝ KERAMICKÝ MODUL PO TEPLTNÍM CYKLOVÁNÍ (B) DETAILS ULOMENÉHO PÁJENÉHO SPOJE NA VODIVÉM MOTIVU KERAMICKÉ DESKY A NA KONDENZÁTORU	84
OBR. 66: RENTGENOVÝ SNÍMEK ZAPÁJENÉ SOUČÁSTKY (A) BEZ HAL (B) S HAL	86

Seznam tabulek

TAB. 1: KATEGORIE ELEKTROTECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ PODLE NORMY IPC-9701 [20]	13
TAB. 2: SLOŽENÍ E-SKLA [8].....	15
TAB. 3: TYPICKÉ SLOŽKY FR-4 LAMINÁTŮ [8]	16
TAB. 4: TYPICKÉ KERAMICKÉ SUBSTRÁTY A JEJICH VLASTNOSTI [2]	17
TAB. 5: POROVNÁNÍ HTCC A LTCC MATERIÁLŮ Z HLEDISKA TEPLOTNÍCH VLASTNOSTÍ [7]	18
TAB. 6: SROVNÁNÍ ZÁKLADNÍCH VLASTNOSTÍ LTCC A ALUMINY [47]	20
TAB. 7: PŘEHLED SLOŽENÍ A PARAMETRY LTCC MATERIÁLŮ U VYBRANÝCH VÝROBCŮ [7]	21
TAB. 8: PŘEHLED VYBRANÝCH PARAMETRŮ LTCC U KONKRÉTNÍCH TYPŮ [7]	21
TAB. 9: POROVNÁNÍ PARAMETRŮ TLUSTOVRSTVÉ A TENKOVRSVÉ TECHNOLOGIE [43]	24
TAB. 10: ZÁKLADNÍ PARAMETRY JEDNOTLIVÝCH METOD VÝROBY TENKÝCH VRSTEV [45]	29
TAB. 11: ZÁKLADNÍ PŘEHLED ÚNAVOVÝCH MODELŮ A JEJICH ROZDĚLENÍ DO SKUPIN [49]	31
TAB. 12: PŘEHLED KOEFICIENTŮ ÚNAVOVÉ TAŽNOSTI A TVÁRNOSTI PRO RŮZNÉ PÁJKY [3]	35
TAB. 13: PARAMETRY PRO VÝPOČET EXPONENTU TVÁRNOSTI PRO RŮZNÉ DRUHY PÁJEK [4]	37
TAB. 14: TEPLOTNÍ PARAMETRY PRO VÝPOČET PRŮMĚRNÉ CYKlickÉ TEPLoty	44
TAB. 15: PARAMETRY PRO VÝPOČET EXPONENTU TVÁRNOSTI PÁJKY [4]	44
TAB. 16: HODNOTY TEPLOTNÍ ROZTAŽNOSTI JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT [16] [17] [18] [19] ..	45
TAB. 17: PARAMETRY PRO VÝPOČET CYKlickÉHO ÚNAVOVÉHO POŠKOZENÍ	45
TAB. 18: PARAMETRY PRO VÝPOČET PODLE ENGELMAIER-WILD MODELU	45
TAB. 19: FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ PARAMETRY JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ	48
TAB. 20: TEPLOTNÍ PARAMETRY JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ	48
TAB. 21: MODELy SPOJENÍ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ V PROGRAMU ANSYS	52
TAB. 22: KONSTANTY PÁJKY PRO VÝPOČET PODLE DARVEAUX MODELU	53
TAB. 23: PARAMETRY JEDNOTLIVÝCH SESTAV PRO VÝPOČET PODLE DARVEAUXEHO MODELU ..	54
TAB. 24: DRUHY MATERIÁLŮ, TECHNOLOGIE VÝROBY A POČTY KUSŮ ČÁSTÍ SESTAV	57
TAB. 25: PARAMETRY A POČET KUSŮ REALIZOVANÝCH SESTAV	57
TAB. 26: TESTOVACÍ SESTAVY, MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ A POČET CYKLŮ DO PORUCHY	81
TAB. 27: PRŮMĚRNÝ POČET CYKLŮ DO PORUCHY U JEDNOTLIVÝCH KOMBINACÍ SESTAV	83
TAB. 28: SROVNÁNÍ METOD ODHADU SPOLEHLIVOSTI U JEDNOTLIVÝCH TYPŮ SESTAV	86

Úvod

Spolehlivost elektronických pájených propojení a spolehlivost v elektronice obecně, je dnes tématem, které je velmi diskutované. Nové a neustále se rozvíjející technologie přináší stále větší množství cílů a výzev, týkajících se zajištění spolehlivosti elektronických výrobků. Zvyšující se poptávka po elektronických zařízeních, které splňují náročná kritéria vysokého výkonu, minimálních rozměrů, hmotnosti a v neposlední řadě také nízké ceny. Tyto, proti sobě jdoucí faktory, zvyšují nároky na technologický proces vývoje těchto výrobků. Kvalitní odhad spolehlivosti pájených propojení získává vyšší prioritu také ve spojení s novými postupy a technologiemi v povrchové montáži. Na vzestupu je automobilový průmysl a letecká doprava, kde je spolehlivost komponent a systémů obzvlášť důležitá. Na odhad spolehlivosti elektronických pájených propojení je možné nahlédnout z mnoha směrů. V případě elektronického produktu, který je cílen na segment koncových zákazníků, je priorita spolehlivosti na nižších úrovních. Důležitou roli zde má hlavně cena produktu, a faktor spolehlivosti je hodnocen spíše z hlediska marketingových vlastností. Odlišná situace je v průmyslových odvětvích, kde je spolehlivost kritickou vlastností a vyžaduje se co nejvyšší jakost. Zde je požadavek spolehlivosti nadřazen nad cenu koncového produktu.

V poslední době začínají získávat na významu také vlastnosti výrobku, z pohledu vlivů na životní prostředí. Každý výrobek v průběhu jeho životnosti působí na životní prostředí, a to od výrobní po fáze až po jeho recyklaci. Z těchto důvodů, a s rostoucím množstvím průmyslové výroby se stává management životního prostředí ve výrobě čím dál důležitější. Z výroby lze vyloučit využívání nebezpečných látek a materiálů a omezit jejich vlivy na životní prostředí, pokud jsou zavedeny prvky managementu životního prostředí. Vyšší nároky na ekologické výrobní procesy a postupy s sebou nesou také zvýšené náklady na výrobu a výrobní prostředky. Proto je trendem zavádění nové legislativy, zejména v zemích EU, která dává větší prostor pro ekologičtější přístup k výrobě. Obsahem nové legislativy je ucelená řada doporučení a nařízení, které jsou definovány v příslušných směrnících.

Mezi zásadní nařízení, které mají největší vliv na výrobu elektronických pájených propojení lze zahrnout směrnice RoHS a WEEE. Směrnice RoHS byla vytvořena za účelem, omezit využívání nebezpečných látek v elektronických a elektrických zařízeních. Směrnice WEEE řeší redukci rostoucího množství odpadu z elektronických výrobků, a to snahou o recyklaci a opětovné zpracování ve výrobě. Se zavedením těchto směrnic přichází potřeba náhrady olovnatých pájek za pájky bezolovnaté. Tento fakt s sebou přináší velké množství problémů vzhledem k technologii výroby, spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů a zvýšení výrobních nákladů. Bezolovnaté pájení je obecně náročnější a do technologického procesu přispívá novými faktory. Je nutné zajistit stejnou kvalitu bezolovnatého pájeného spoje, jako v případě olovnatého pájení. Pro odhad spolehlivosti pájených spojů je dnes možné využít velké množství matematických či statických metod nebo simulačních programů. Každá z těchto oblastí má své specifické vlastnosti a výhody, respektive nevýhody. Cílem této diplomové práce je popsat základní fyzikální jevy, které probíhají během teplotního cyklování v pájeném spoji. Dále vybrat nejvhodnější model pro odhad či simulaci spolehlivosti a provést simulaci propojení v programu ANSYS. Toto propojení je vyrobeno a experimentální výsledky jsou porovnány s výsledky získanými simulací.

Teoretická část

V teoretické části je cílem v několika krocích popsat problematiku spolehlivosti elektronických pájených propojení z hlediska faktorů, které působí v průběhu jejich životnosti. Spolehlivost elektronických pájených propojení závisí v první řadě na prvcích návrhu, využitých materiálech a technologickém procesu výroby. Výsledné funkční celky jsou poté v průběhu jejich životnosti ovlivňovány dalšími faktory, mezi které lze zahrnout zejména provozní podmínky. Z těchto důvodů je nutné řídit výslednou spolehlivost zařízení od návrhu až po jeho provoz, jelikož je ovlivňována v každém jednotlivém bodu procesu. Z hlediska návrhu je důležité zvážit technologii výroby jednotlivých částí, rozměry uvažovaného zařízení a budoucí provozní podmínky. Kombinace rozměrů, materiálových parametrů a provozních podmínek je u pájených spojů kritická zejména v případě teplotní roztažnosti jednotlivých typů materiálů.

Kompletní elektronické zařízení je systémem složeným z mnoha organických a anorganických materiálů, z nichž každý disponuje různými mechanickými vlastnostmi. Nejcitlivější část lze hledat právě v oblasti spojení základní desky a součástky, kde dochází ke vzájemnému kontaktu keramických, kovových i polymerních materiálů. Rozdílná teplotní roztažnost substrátu, pájeného spoje a součástky je hlavním faktorem, který ovlivňuje spolehlivost pájeného propojení při provozu zařízení. Snaha o minimalizaci tohoto negativního faktoru začíná již při návrhu a výrobním procesu, kdy je potřeba zvolit kompatibilní materiály a technologii montáže. V přípravné fázi procesu hraje roli také odhad spolehlivosti pájených propojení, který může z mnoha pohledů ovlivnit budoucí výrobní proces. Nové výrobky jsou testovány z hlediska jejich spolehlivosti v závislosti na jejich budoucí aplikaci.

Experimentální testování je důležité zejména u výrobků, kde je spolehlivost kritickým faktorem a potvrzení kvality výrobního procesu je nezbytné. Nevýhodou každého experimentálního testování jsou jeho vysoké finanční náklady a v neposlední řadě je také časově náročné. Z tohoto důvodu je výhodné zabývat se odhadem spolehlivosti již při fázi návrhu, aby experimentálním měřením byly pouze ověřeny teoretické předpoklady a nemuselo být přistoupeno k dalším měřením. Nejjednodušší a nejlevnější cestou k odhadu spolehlivosti je využít některého z teoretických únavových modelů a zakomponováním geometrických a materiálových parametrů vypočítat předpokládaný čas do poruchy zařízení. Zvolením vhodného únavového modelu lze získat velmi přesné výsledky, které mohou být dále porovnány s praktickým měřením.

Největší nevýhodou teoretických výpočtů je značně obtížný popis geometrie pájeného propojení, kterou lze nadefinovat pouze přibližnými rozměry. To lze vyřešit vhodnou kombinací teoretického únavového modelu s některým simulačním programem, kde je možné z hlediska geometrie vytvořit velice kvalitní model. V následujících kapitolách jsou popsány základní technologické procesy při výrobě elektronických pájených propojení a technologické faktory, ovlivňující výslednou kvalitu pájených propojení a dále přehled fyzikálních procesů, které ovlivňují pájený spoj. Na základě těchto fyzikálních procesů jsou rozděleny jednotlivé únavové modely a diskutovány jejich výhody a nevýhody.

1 Životnost pájených spojů a jejich testování

Životnost pájených spojů je stále více sledovanou vlastností, přičemž zde hraje roli velké množství faktorů, které tuto životnost ovlivňují. Pájený spoj je součástí heterogenního dynamického systému a při posuzování spolehlivosti je nutné brát v úvahu všechny jeho části. Nejvýznamnější komponentou tohoto systému je materiál pájky, který se na celém systému podílí 75 %. Samotná pájka je dále v interakci s kontaktní plochou na substrátu, která představuje 20 % a vývod součástky 5 %. Tyto jednotlivé systémové složky na sebe vzájemně působí a mohou značně ovlivňovat spolehlivost pájeného propojení. Mezi hlavní faktory, které působí na systém pájeného spoje, lze zahrnout zejména mechanické namáhání, které může být způsobeno vnějšími vlivy, což jsou například vibrace a vnitřními vlivy, které jsou z hlediska spolehlivosti pájeného spoje významnější. Vnitřní mechanické vlivy jsou způsobeny rozdílnými koeficienty délkové roztažnosti jednotlivých spojovaných materiálů, což vede k pnutí ve spoji (viz obr. 1) [2].



Obr. 1: Rozdílné parametry jednotlivých komponentů

Pnutí ve spoji způsobuje únavu materiálů, která vede ke zhoršení mechanických a elektrických vlastností, přičemž začínají vznikat praskliny a trhliny v pájeném spoji. Dalším faktorem je tepelné namáhání, které může vznikat více způsoby. Tepelné působení z vnějších zdrojů může pocházet jednak vlivem okolní teploty a dále konkrétní aplikací daného elektronického zařízení, které může být integrováno v topných elektrospotřebičích nebo v aplikacích automobilového průmyslu. Vnitřní zdroje tepla vznikají v důsledku průchodu proudu obvodem nebo vyzařováním ztrátového výkonu, což se děje ve většině případů. Působení tepla způsobuje různé fyzikální a chemické děje v materiálu, které mohou být vratného a nevratného charakteru. V případě nevratných procesů dochází ke stárnutí materiálu v důsledku změny struktury a difuze. U vratných procesů probíhá mechanické prodlužování a smršťování nebo různé typy průhybů materiálu. Souhrn těchto procesů v důsledku vede k iniciaci a postupnému rozšiřování trhliny v pájeném spoji, která postupně směřuje k úplnému přerušení spoje, čímž je narušena funkce elektronického obvodu [2].

Vzhledem k tomu, že životnost většiny výrobků představuje několik let, používají se k testování spolehlivosti tzv. zrychlené zkoušky, které spočívají ve zrychlené změně určitých parametrů. Mezi tyto zkoušky lze zahrnout teplotní cyklování, teplotní šoky, vysokoteplotní rázy, zjišťování mechanických vlastností a vibrace. Nejtypičtějším a nejčastějším zkouškami jsou zkoušky teplotním cyklováním, kdy jsou desky s pájenými propojeními vystaveny cyklickým změnám teplot, přičemž s vyšším teplotním rozsahem a počtem cyklů stoupá pravděpodobnost poruchy v pájeném spoji. Teplotní cyklování se provádí podle standardů, které jsou dány příslušnými normami, mezi které lze zahrnout normy IPC-SM 785 a IPC-9701. Tyto normy definují parametry a podmínky teplotního cyklování a rozdělují jednotlivá elektrotechnická zařízení do skupin, kterým náleží příslušné testovací podmínky a nároky na spolehlivost v těchto podmínkách (viz tab. 1).

Tab. 1: Kategorie elektrotechnických zařízení podle normy IPC-9701 [20]

Kategorie	Oblast		Teplota		Krajní podmínky		
			Sklad	Provoz	T _D	Cyklů	Přípustná chybovost
			[°C]	[°C]	[h]	[Rok]	[%]
Spotřebitelský	Koncový zákazník		-40/85	0/55	12	365	1
Výpočetní	PC a Periferie		-40/85	0/55	2	1460	0,1
Telekomunikační			-40/85	-40/85	12	365	0,01
Letectví	Civilní		-40/85	-40/85	12	365	0,001
Automobilový	Kabina		-55/150	-40/85	12	185	0,1
		12			100		
		12			60		
		12			20		
Vojenský	Pozemní technika Lodní technika		-40/85	-40/85	12 12	100 265	0,1
Vesmírný			-40/85	-40/85			0,001
	LEO				1	8760	
	GEO				12	365	
Vojenský	Letecká technika		-55/125	-40/85	2	100	0,01
		a			2	100	
		b			2	65	
		c			1	120	
		údržba					
Automobilový	Ostatní prostory		-55/150	-40/125	1	100	0,1
		1			300		
		2			40		

2 Přehled substrátů pro elektrotechnickou výrobu

Vhodný výběr materiálu pro výrobu plošných spojů nebo aplikaci vrstevných technologií značně ovlivňuje budoucí spolehlivost pájených propojení na substrátu. Vhodný substrát pro elektrotechnickou výrobu je nosičem aktivních, pasivních a konstrukčních prvků, který musí zajišťovat izolaci mezi těmito jednotlivými prvky na substrátu. Dále by měl dobře odvádět teplo z elektronického obvodu tak, aby celý systém nebyl dlouhodobě přehříván. Kvalitní substrát je také mechanickou oporou pro elektronický obvod a základem integrity celého systému. Zajištěna musí být také odolnost substrátu proti vnějším i vnitřním vlivům, které mohou negativně ovlivnit funkci substrátu i bezpečnost výrobku. Základní substráty lze rozdělit do několika skupin na základě látek, z kterých se tyto substráty skládají. Těmito skupinami jsou organické, anorganické a polovodičové materiály. Mezi nejtypičtější základní materiály lze zařadit organické materiály, které jsou založeny na různých druzích polymerních pryskyřicových látek ve formě pojiva. Základem těchto materiálů je výztuž ve formě tvrzeného papíru nebo skelné tkaniny.

Pojivem této výztuže jsou nejčastěji epoxidové nebo fenofomaldehydové pryskyřice. Motiv se na organických materiálech nejčastěji vytváří substrativní metodou v naplátované mědi prostřednictvím leptání v lázni. Výhodami těchto substrátů je hlavně relativní jednoduchost technologie výroby vodivého motivu ve srovnání s anorganickými substráty a z hlediska teplotní roztažnosti jsou více kompatibilní s pájecími slitinami. Z hlediska nevýhod lze zmínit horší mechanické vlastnosti a chemickou odolnost proti vnějším vlivům. Další skupinou substrátů jsou anorganické keramické substráty, mezi které lze zahrnout korundovou keramiku s různým obsahem oxidu hlinitého, dále sklo a keramiku nízkých teplot, která se skládá z oxidu hlinitého a dalších oxidových látek. Tyto keramické substráty jsou určeny hlavně pro aplikace, kde jsou kladeny vysoké požadavky na spolehlivost realizovaného zařízení. Těmito aplikacemi mohou být využití v leteckém, kosmickém a automobilovém průmyslu a dále v lékařství, kde je spolehlivost hlavním požadavkem. Výhodou těchto substrátů je zejména velká odolnost proti vysokým teplotám a působení chemických látek. Problémem může být teplotní roztažnost těchto substrátů, jelikož hodnoty teplotní roztažnosti keramických substrátů se značně liší od parametrů většiny pájecích slitin.

Při provozu je substrát spolu s pájeným spojem a součástí teplotně namáhán a tento nesoulad negativně působí na strukturu pájeného spoje. Z tohoto důvodu je důležité u těchto druhů substrátů věnovat vyšší pozornost odhadu a ověření spolehlivosti elektronických propojení. Tisk vodivého motivu na anorganické substráty probíhá metodami sítotisku a šablonového tisku, což přináší zvýšené technologické nároky na výrobní proces. U struktur LTCC je důležité dbát na proces laminace jednotlivých struktur a použití kompatibilních past pro tvorbu vodivých motivů. Nízkoteplotní keramika je také znatelně méně odolná než jiné typy anorganických keramických substrátů, ale tato nevýhoda je vyvážena širokými možnostmi tvorby elektronických obvodů v jednotlivých strukturách. V následujících kapitolách jsou podrobněji popsány jednotlivé typy substrátů určených pro elektrotechnickou výrobu a diskutovány jejich vlastnosti a aplikační možnosti.

2.1 Organické materiály

Organické materiály patří mezi nejrozšířenější typy používaných substrátů při konstrukci elektronických obvodů a lze je také nazvat jako kompozitní materiály, jelikož se ve většině případů skládají ze dvou nebo více substancí, které mají rozdílné fyzikální, chemické a elektrické vlastnosti. Základem těchto kompozitních materiálů je výztuž typicky anorganické povahy a organické pojivo. Výztuž určuje a ovlivňuje široké spektrum vlastností materiálu, mezi které patří mechanické, elektrické, chemické a teplotní charakteristiky. Pojivová část materiálu tlumí působení negativních vnějších vlivů na výztuž a je ochranou před účinky nejrůznějších druhů chemikálií, se kterými může DPS přijít do kontaktu. Pojivo je založeno na polymerních materiálech, mezi které lze zahrnout zejména různé druhy organických pryskyřic.

Hlavními požadavky na pojivový materiál jsou stejně jako u výztuže, dobré elektrické, mechanické a chemické vlastnosti, které by se svými hodnotami měly co nejvíce blížit vlastnostem výztuže. Nejčastější typy pryskyřic jsou založeny fenolformaldehydovém a epoxidovém základu. Fenolformaldehydová pryskyřice se nejčastěji využívá ve spojení s celulóзовým pojivem u materiálů FR-1 a FR-2. Mezi oběma složkami dochází při vytvrzování k dílčím chemickým reakcím, během kterých dochází k zesíťování lineárních polymerů a fixaci plniva. Obsah pryskyřice se obvykle pohybuje mezi 35 – 60 %, a se stoupajícím podílem pryskyřicové složky roste také tvrdost materiálu. Materiály FR-1 a FR-2 se využívají pro méně náročné aplikace ve spotřební elektronice pro jednovrstvé a dvouvrstvé DPS [21] [2].

Mezi výhody těchto materiálů patří výborné vlastnosti z hlediska dalšího zpracování, nevýhodou je vysoký stupeň hygroskopicity, a dále horší mechanické vlastnosti. U materiálů s větším obsahem pryskyřice se projevuje vysoká křehkost. Z hlediska mechanických vlastností a elektrických vlastností lépe vycházejí materiály s pojivem ve formě epoxidové pryskyřice a skelné tkaniny jako výztuže. Epoxidové pryskyřice vynikají lepšími elektrickými, mechanickými, chemickými a teplotními charakteristikami, které jsou dále upravovány přidáváním aditiv. Aditiva v epoxidových pryskyřicích umožňují zvýšit teplotu skelného přechodu, což zvyšuje teplotní odolnost výztuže v podobě skelné tkaniny a dále snižují hodnotu součinitele délkové roztažnosti (CTE) a tím pádem je umožněna lepší aplikovatelnost materiálu. K substrátům založeným na epoxidových pryskyřicích lze zařadit FR-3, FR-4 a FR-5 materiály. Základem substrátu FR-3 je tvrzený papír a epoxidová pryskyřice a nahrazuje materiály FR-2 v náročnějších aplikacích. V porovnání s materiálem FR-2 disponuje lepšími mechanickými, elektrickými a tepelnými vlastnostmi [21].

Tab. 2: Složení E-skla [8]

Název	Vzorec	Podíl [%]	Název	Vzorec	Podíl [%]
oxid křemičitý	SiO ₂	52-56	oxid draselný	K ₂ O	0-2
oxid vápenitý	CaO ₂	16-25	oxid hořečnatý	MgO	0-5
oxid hlinitý	Al ₂ O ₃	12-16	oxid železitý	Fe ₂ O ₃	0.05-0.4
oxid boritý	B ₂ O ₃	5-10	oxid titaničitý	TiO ₂	0-0.8
oxid sodný	Na ₂ O	0-2	fluoridy	F	0-1

Modifikací materiálu FR-3 je skloepoxidový laminát FR-4, v současnosti nejvyužívanější materiál, který má velmi dobré vlastnosti z hlediska mechanické i chemické stability. Výztuží jsou zde vlákna skelné tkaniny, které se nazývají E-sklo (viz tab. 2). Elektrotechnické sklo má vynikající vlastnosti z hlediska izolačních parametrů a je složeno z několika oxidů. Největší oxidovou složkou je oxid křemičitý a dále je ve větší míře přítomen oxid vápenitý, oxid hlinitý a oxid boritý. Díky vysoké odolnosti skelné výztuže je FR-4 nejlepší materiál z hlediska navlhavosti a má nejvyšší teplotní odolnost v pájecí lázni, která se u materiálu pohybuje kolem 120 s, při teplotě 260 °C. Ve srovnání s materiálem FR-2 je tato odolnost šestkrát vyšší. Vedle výztuže a pojiva se v organických materiálech nacházejí ještě další důležité složky (viz tab. 3), které je vhodné zmínit. Mimo jiné to jsou spojovací činidla, tužidla, zpomalovače hoření, plniva a urychlovače [2] [21].

Organosilany jsou látky, které se využívají pro spojení anorganických materiálů s organickými, což je v případě FR-4 spojení skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice. Dále se přidává tužidlo, které zvyšuje stupeň zesíťování lineárních polymerů a je tak dosaženo vyšší strukturální integrity materiálu. Lze také zahrnout plniva, která redukují teplotní roztažnost materiálu. Příkladem využívaných plniv je oxid křemičitý. Samostatnou skupinou z hlediska organických materiálů jsou tzv. kompozitní organické materiály. Kompozitními materiály se nazývají z pohledu výztuže, která je tvořena více složkami. První složkou u materiálu CEM-1 je skelná tkanina stejně jako u materiálu FR-4 a druhou tvrzený papír jako u materiálu FR-3. Dá se říct, že i vlastnostmi se pohybuje mezi materiály FR-3 a FR-4. CEM-1 je levnější než FR-4, ale svými materiálovými charakteristikami stále dostačující a lze ho považovat za jistou alternativu k tomuto materiálu [21].

Tab. 3: Typické složky FR-4 laminátů [8]

Složka	Hlavní funkce	Typické látky
Výztuž	Definuje mechanické a elektrické vlastnosti	Skelná tkanina (E-Sklo)
Spojovací činidlo	Spojuje anorganické sklo s organickou pryskyřicí a přenáší mechanické napětí	Organosilany
Pryskyřice	Pojivo, zrovnoměňuje působení vnějších vlivů na výztuž	Bisfenol-Dyglycidyl-éter (DGEBA)
Tužidlo	Zvyšuje zesíťování lineárních polymerů	Dicyandiamide (DICY), Fenol Novolak
Zpomalovač hoření	Omezuje hořlavost materiálu	Halogenové – Tetrabrombisfenol A (TBBPA)
		Bez halogenu – Fosforové sloučeniny
Plnivo	Redukuje teplotní roztažnost	Oxid křemičitý
Urychlovač	Urychluje proces, snižuje vytvrzovací teplotu, řídí hustotu látky	Imidazole, Organofosfin

2.2 Klasické keramické substráty

Keramické materiály jsou anorganické materiály využívané v elektronice jako substráty pro tlustovrstvé a tenkovrstvé technologie. Keramické materiály mají oproti substrátům s organickými složkami velké množství výhod, mezi které patří zejména lepší mechanické a elektrické vlastnosti (viz tab. 4). Využívají se zejména díky své vysoké teplotní odolnosti. Nevýhody keramických substrátů se nacházejí zejména v relativně obtížnějším způsobu dělení, které lze provádět mechanicky, ostrým diamantovým nebo kovovým hrotem, což je jednoduchý a levný způsob, ale není dostatečně přesný, a proto může být pro některé aplikace nevhodný. Další nevýhodou je vysoká časová náročnost takového postupu a není možné ho využít v sériové výrobě. Lze jej tedy využít pouze při výrobě kusových výrobků.

Druhým způsobem je stříhání pomocí laseru, který umožňuje připravit v krátkém čase velké množství vzorků. Nevýhodou laseru je ale jeho technologická náročnost a zvyšuje se tak celková cena výroby. Mezi hlavní důvody pro volbu substrátů z keramických materiálů patří zejména vyšší nároky na spolehlivost obvodu, který bude na těchto substrátech realizován. Tyto vyšší nároky mohou souviset zejména s cílovým zaměřením výrobku, který může zahrnovat aplikaci v lékařství, v leteckém a kosmickém průmyslu. Keramické substráty jsou odlišné také technologií vytváření vodivých motivů, která je podstatně náročnější než u organických substrátů. Mezi základní technologie pro tvorbu vodivého motivu patří, nanášení tlustých vrstev přes apertury v sítu, a dále tenké vrstvy nanášené napařováním nebo napařováním.

Keramické substráty se vyrábí v různých rozměrech a tvarech. Mezi standardní provedení patří zejména čtvercová forma 50 mm x 50 mm, vyrábí se také 100 mm x 100 mm i větší rozměry. Specifických rozměrů keramických substrátů lze dosáhnout dělením pomocí laseru. Tloušťka anorganických keramických substrátů, která je využívána v elektronických aplikacích, se pohybuje od 0,5 mm k vyšším hodnotám. Nejpoužívanější provedení pro povrchovou montáž a hybridní integrované obvody se pohybuje kolem hodnoty 0,8 mm. Tento parametr je důležitý z hlediska odvodu tepla, s kterým souvisí chlazení pasivních i aktivních součástek [2].

Tab. 4: Typické keramické substráty a jejich vlastnosti [2]

Parametr / materiál	96% Al ₂ O ₃	99,5% Al ₂ O ₃	99% BeO	AlN
Tepelná vodivost [J.s ⁻¹ .m ⁻¹ .K ⁻¹]	35	37	250	175
Součinitel teplotní roztažnosti [ppm.K ⁻¹]	6,4	6,6	5	4,5
Elektrická pevnost [kV.mm ⁻¹]	8	9	14	12
Měrný odpor [Ω.mm]	7.10 ¹³	7.10 ¹³	10 ¹⁴	>10 ¹³
Tangenta ztrátového činitele [%]	0,55	0,08	0,04	7-20
Relativní permitivita ε _r	9	10	6,6	9-10

2.3 Keramika nízkých teplot (LTCC)

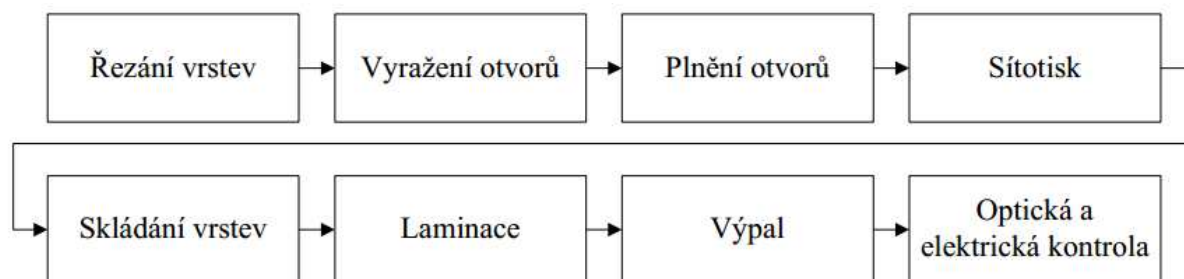
Základní desky založené na technologii LTCC jsou nízkoteplotně vypalované vícevrstvé keramické substráty, které umožňují na každé vrstvě propojování vodivých sítí a pasivních prvků. Jednotlivé vrstvy substrátu mohou mít různou relativní permitivitu a díky tomu sloužit i jako dielektrikum pro integrované kapacitory. Mezi hlavní výhody keramiky nízkých teplot patří zejména jejich nízké vypalovací teploty v porovnání s vysokoteplotně spékanou keramikou HTCC (viz tab. 5). Běžné vypalovací teploty LTCC keramických materiálů se pohybují v rozmezí 850 – 1000 °C, což jsou zhruba dvakrát menší hodnoty než u HTCC. Vzhledem k nízkým teplotám výpalu u LTCC, je možné využít také výhodnější spektrum materiálů pro vodivé cesty [2].

Tab. 5: Porovnání HTCC a LTCC materiálů z hlediska teplotních vlastností [7]

	Keramika		Vodivé cesty	
	Typ materiálu	Teplota výpalu [°C]	Typ materiálu	Teplota tavení [°C]
LTCC	Sklo/Keramické kompozity Krystalické sklo Krystalické sklo/Keramické kompozity	850-1000	Cu	1083
			Au	1063
			Ag	960
			Ag-Pd	960 - 1055
			Ag-Pt	960 - 1186
HTCC	Aluminiová keramika	1600 - 1800	Mo	2610
			W	3410
			Mo - Mn	1246 - 1500

U vysokoteplotní keramiky jsou typickými materiály wolfram a molybden. Mezi jejich nevýhody patří vysoká teplota tavení, která významně zvyšuje náklady na výrobní proces. Také mají tyto materiály znatelně nižší vodivost než materiály využitelné v LTCC technologii. Mezi ty lze zahrnout zejména měď, zlato, stříbro a slitiny stříbra a platiny nebo stříbra a paladia v různém poměru. Nízkoteplotní keramika patří mezi kompozitní materiály, typickým složením je 40 % Al_2O_3 , dále 45 % SiO_2 a 15 % organické složky. Složení se často liší podle typu výrobce a existuje široká škála nejrozličnějších typů materiálů (viz tab. 7, viz tab. 8). Vedle oxidu hlinitého a oxidu křemičitého jsou v mnoha případech i další keramické látky jako kordieritová keramika, jejíž předností jsou velmi nízké hodnoty teplotní roztažnosti.

Proto materiály s obsahem kordieritové keramiky vykazují velmi dobré vlastnosti z hlediska teplotní roztažnosti substrátu, která hraje roli ve spolehlivosti elektronických pájených propojení na substrátu. Výrobní proces struktury LTCC se skládá z několika kroků (viz obr. 2). Nejdříve je nutné vytvořit si motivy, které budou podkladem pro laser. Prostřednictvím laseru jsou poté tyto motivy vyřezány do připravené LTCC pásky, která je usazena na polyesterové fólii nebo jiném polymerním nosiči. Při řezání jednotlivých kusů pásek dochází zároveň i k ražení propojů. Propoje jsou v podstatě malé otvory v jednotlivých vrstvách substrátu. Tyto otvory se později vyplní vodivou pastou [2].



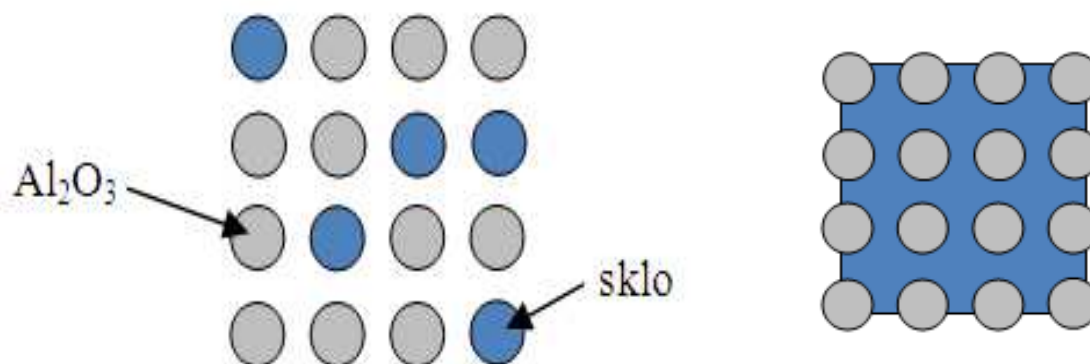
Obr. 2: Proces výroby LTCC struktury

Propoje lze vytvářet také ražením nebo vrtáním a jejich průměr se obvykle pohybuje mezi 0,1 až 0,2 mm. Dále následuje zhotovení vodivých vrstev a pasivních prvků prostřednictvím technologie sítotisku. Při sítotisku je na jednotlivé nařezané vrstvy přes síto tisknut daný motiv. Po natisknutí motivů na jednotlivé vrstvy následuje zasušení pasty a může dojít k zalaminování vrstev. Při procesu laminace se jednotlivé vrstvy s natištěnými motivy poskládají na sebe a následně jsou sesouhlaseny využitím technologických otvorů. V některých případech lze jednotlivé vrstvy sesouhlasit i bez technologických otvorů, ale tento postup je možné využít pouze velmi omezeně, jelikož přesné sesouhlasení je u složitých struktur velmi podstatné. Poté co jsou jednotlivé struktury sesouhlaseny, může dojít k samotnému procesu laminace.

Laminační proces probíhá za definované teploty, tlaku a při určitém čase. Pro správnou laminaci je nezbytné dodržet katalogové hodnoty pro daný materiál. Jednotlivé pásy působením tlaku a teploty v lisu začínají měknout a postupně dochází ke vzájemnému spojení. Existují dva základní typy laminací, prvním typem je anaxiální laminace, při které působí síla na šablonu v lisu pouze ze dvou směrů. Tento způsob laminace je vhodný především pro jednodušší struktury s menším počtem jednotlivých pásků. Mezi účinnější způsoby laminace patří izostatická metoda, při které hlavní proces laminace probíhá v kapalném prostředí a síla působí na materiál ve všech směrech. Metoda je výhodná zejména při laminaci velkého množství vrstev, většinou nad 15 kusů. LTCC pásy jsou ve většině výrobního procesu velmi náchylné k poškození a i po laminaci je nutné postupovat velmi opatrně se zhotovenými strukturami až do jejich výpalu. Při výpalu dochází k úplnému spojení a vytvrzení jednotlivých vrstev [11].

Laminaci lze také provádět způsobem, kdy jsou zalaminovány všechny vrstvy najednou nebo se k sobě laminují po částech. V případě zalaminování všech vrstev najednou může dojít k jejich nekvalitnímu spojení, což může vést až k prasklinám při výpalu. Pokud je laminován menší počet vrstev, je možné provést proces laminace najednou. Postupná laminace je vhodná zejména, jestliže jsou laminovány struktury s větším množstvím dutiny a s více vrstvami. V takovém případě se provádí laminace jednotlivých vrstev po dvojicích a tyto spojené dvojice jsou poté k sobě dále spojovány. Nevýhodou postupné laminace struktur je zejména jejich časová náročnost na technologický proces, jelikož je tímto značně prodlužován. Proces laminace lze rozdělit i z hlediska teploty, kdy při teplotní laminaci působí na laminovanou strukturu zároveň tlak i zvýšená teplota. Tento způsob je základní metodou laminace a je doporučován výrobcí jako správný postup ve výrobním procesu [11].

Alternativním způsobem je laminace za studena, kde je principem naleptání jednotlivých vrstev LTCC pásy, které se následně spojí k sobě. Laminace za studena se provádí při běžné pokojové teplotě. Výhodou teplotní laminace je její větší reprodukovatelnost ve výrobním procesu, jelikož při definované teplotě a tlaku se snáze dosahuje stejných výsledků, než při procesu leptání jednotlivých vrstev [11].



Obr. 3: Struktura LTCC (a) před výpalem (b) po výpalu [11]

Nízkoteplotní keramika se od klasických keramických substrátů, zastoupených zejména aluminou liší jednak procesem přípravy substrátu a také odlišným vypalovacím profilem, a je připravena pro výpal (viz obr. 3) společně s natisknutými tlustými vrstvami. Z hlediska mechanických vlastností LTCC struktury disponují horšími parametry než alumina (viz tab. 6), což je vidět zejména na hodnotách pevnosti v ohybu a pružnosti v tahu. Pevnost v ohybu má vypálená LTCC struktura zhruba o jednu třetinu menší než alumina a pružnost v tahu, tj. Youngův modul je dvakrát menší. Další parametry, mezi které lze zahrnout koeficient teplotní roztažnosti, hustotu a relativní permitivitu, se významně neliší a mění se v závislosti na složení materiálu LTCC (viz tab. 7 a viz tab. 8). Nízký koeficient teplotní roztažnosti mají zejména materiály s obsahem kordieritové keramiky. Jednotlivé složky LTCC materiálů také ovlivňují parametry teplotní vodivosti, které je ve většině případů podstatně nižší než u klasické keramiky a mění se v závislosti na složení materiálu [47].

Tab. 6: Srovnání základních vlastností LTCC a Aluminy [47]

Parametr	Jednotka	LTCC	Alumina
Koeficient teplotní roztažnosti (CTE)	ppm/°C	5,8-7	7,6-8,3
Hustota (ρ)	g/cm ³	2,5-3,2	3,7-3,9
Pevnost v ohybu (σ_0)	MPa	170-320	300
Youngův modul – pružnost v tahu (E)	GPa	90-110	215-415
Teplotní vodivost (λ)	W/mK	2-4,5	20-26
Relativní permitivita (ϵ)	(-)	7,5-7,8	9,2-9,8

Tab. 7: Přehled složení a parametry LTCC materiálů u vybraných výrobců [7]

Výrobce LTCC	Složení	ε	ρ	CTE	λ	σ_0
		[-]	[$\Omega \cdot \text{cm}$]	[ppm/°C]	[W/m.K]	[MPa]
Kyocera	BSG + SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Kordierit	5	$>10^{14}$	4,0	2	190
	Krystalické sklo + Al ₂ O ₃	6,2	$>10^{14}$	4,2	3	210
Dupont	Al ₂ O ₃ + CaZrO ₃ + Sklo	8	$>10^{12}$	7,9	4,5	200
Noritake	Al ₂ O ₃ + Forsterit + Sklo	7,4	$5 \cdot 10^{16}$	;7,6	8,4	140
Hitachi	(BaO- Al ₂ O ₃ -BSG) + Al ₂ O ₃ + ZrSiO ₄	7,0	10^{13}	5,5	1,7	200
NGK	ZnO-MgO- Al ₂ O ₃ -SiO ₂	5	$5 \cdot 10^{15}$	3,0	3,0	200
Taiyo-yuden	Al ₂ O ₃ -CaO-SiO ₂ -MgO-B ₂ O ₃	7	$>10^{14}$	4,8	8,4	250
Toshiba	BaSnB ₂ O ₆	8,5	$2 \cdot 10^{15}$	5,4	5,4	200
Murata	BaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	6,1	$>10^{14}$	8,0	2,0	200

Tab. 8: Přehled vybraných parametrů LTCC u konkrétních typů [7]

Výrobce LTCC	Typ materiálu	ε	CTE	λ	σ_0
		[-]	[ppm/°C]	[W/m.K]	[MPa]
Heraeus	CT2000	9,1	5,6	-	310
	CT700	7,5-7,9	6,7	4,3	210
Dupont	951	7,8	5,8	3,0	-
	943	7,8	-	-	-
MARUWA	HA-995	9,7	8,1	29,3	400
Ferro	A6M	5,9	7	-	-
ElectroScience Lab	41020-70C	7-8	7,4	2,5-3,5	-
Niko	NL-Ag II	7,8	5,2	3,6	294
	NL-Ag III	7,1	5,5	3,5	294
Kyocera	G55	5,7	5,5	2,5	200
	GL660	9,5	6,2	1,3	200
NGK	GC-11	7,9	6,3	3	240
NEC Vacuum glass	GCS78	7,8	-	3,5	250
	GCS71	7,1	-	3,2	250
	GCS60	6,0	-	1,3	250
Matsushita kotobuki	MKE-100	7,8	6,1	2,9	245

3 Technologie výroby elektronických obvodů

Technologie výroby elektronických obvodů úzce souvisí s volbou základního materiálu, na kterém budou osazeny aktivní a pasivní součástky. Základní a technologicky nejjednodušší metodou tvorby elektronického obvodu na substrátu je výroba plošných spojů prostřednictvím leptání v leptací lázni. Vodivý motiv je zde vyroben z měděného materiálu, který je nalaminován na organický základní materiál. Tyto organické materiály se vyrábí laminací výztuže a pojivového materiálu a následným vytvrzením. Na tento materiál je nanášena elektrolyticky vysoce čistá měď na nerezových bubnech. Jednotlivé vodivé spoje jsou na organickém materiálu vytvořeny leptáním naplátované měděné fólie, ve které je vyleptán měděný vodivý motiv [2].

Tato technologie výroby elektronických obvodů je výhodná svým relativně jednoduchým technologickým procesem a lze ji využít pro široké spektrum aplikací. Alternativou k substraktivní a aditivní tvorbě obvodu na organických materiálech je metoda sítotisku a šablonového tisku na široké spektrum materiálů, založených na anorganických látkách. Metody sítotisku a šablonového tisku jsou relativně nové a dynamicky se rozvíjející a z hlediska technologického procesu výroby jsou náročnější než výroba plošných spojů na organických materiálech. Tyto metody se obecně nazývají vrstvodými technologiemi, jelikož výsledkem tisku pasty prostřednictvím sítotisku a šablonového tisku je natištěná vrstva pasty na substrátu. Tlusté vrstvy se liší zásadním způsobem v charakteru a parametrech natištěného motivu od plošných spojů. Substraktivní a aditivní metodou výroby plošných spojů lze zhotovit pouze vodivé měděné motivy, přičemž metodou sítotisku a šablonového tisku je možné tisknout vedle vodivých motivů i odporové a dielektrické vrstvy. Proces tvorby motivu u jednotlivých anorganických materiálů začíná stříháním základních materiálů, aby bylo dosaženo požadovaných rozměrů výsledných substrátů. Na tyto upravené substráty je natisknut motiv prostřednictvím sítotisku nebo šablonového tisku a celá struktura je vypálena ve vsázkové nebo průběžné peci. Výjimkou je keramika nízkých teplot LTCC, která je složena z jednotlivých vrstev. Tyto vrstvy jsou připraveny vyřezáním prostřednictvím trimovacího laseru a na jednotlivé vrstvy je natištěn požadovaný motiv. Po zasušení vodivého motivu jsou v procesu laminace pevně spojeny k sobě a vypáleny v peci. Při tisku metodou sítotisku je důležité dodržet správné procesní parametry, mezi které lze zahrnout zejména správný odskok síta, tlak a rychlost stěrky. V případě šablonového tisku je parametrem rychlost pohybu stěrky a dostatečný přítlak šablony na substrát.

Příbuznou technologií metody tlustých vrstev jsou tenké vrstvy, které se liší způsobem nanášení a fyzikálními parametry. Fyzikální parametry jsou odlišné, jelikož jsou hodnoty tloušťky čáry zhruba desetkrát menší než u tlustých vrstev. Z tohoto důvodu platí pro tenké vrstvy jiné vlastnosti a parametry než u běžných objemů materiálů, a jsou tak k dispozici specifické vlastnosti, které v případě tlustých vrstev nelze dosáhnout. Mezi tyto vlastnosti lze zmínit například hodnoty vrstvodvého odporu a již zmíněnou tloušťku čáry. Technologický proces je relativně složitý ve srovnání s metodou sítotisku a šablonového tisku u tlustých vrstev a probíhá vakuovou depozicí materiálů napařováním nebo naprašováním na substrát. Mezi vrstvodvé technologie lze uvést ještě polymerní materiály, kterými jsou tvořeny polymerní tlusté vrstvy [2].

3.1 Proces výroby plošných spojů

Plošné spoje jsou tvořeny na organických základních materiálech využitím několika metod, z nichž nejtypičtější je substraktivní a aditivní metoda. Substraktivní způsob je založený na odleptání částí měděné fólie, která je naplátována na základním materiálu, přičemž odleptáním částí fólie vzniká vodivý motiv na základním materiálu, který je připraven pro osazení součástek. Vodivý motiv lze nanášet na základní materiál také aditivním způsobem, při kterém se nanáší chemicky nebo chemicko-galvanickým způsobem. Tento způsob se ovšem používá pouze v minimální míře v porovnání se substrativní technologií. Proces tvorby vodivých motivů prostřednictvím substrativní technologie se skládá z několika kroků (viz obr. 4). Nejdříve je připraven materiál v požadovaných rozměrech, který se dále dělí na potřebné části, do kterých jsou zhotoveny otvory nejčastěji vrtáním a ty jsou posléze galvanicky zesíleny mědí a pokoveny Sn nebo SnPb rezistem. Dále následuje kartáčování měděného povrchu materiálu, při kterém jsou odstraněny veškeré nečistoty, což je důležité pro správné nalamínování fotorezistu na měď. S charakterem fotorezistu je spojen potřebný typ filmové předlohy, který může být negativní nebo pozitivní. Nejčastějším typem je negativní fotorezist, který se používá ve spojení s negativní filmovou předlohou, na které jsou vodivé cesty na fólii průchodné pro světlo, a okolí je černé.

Průchodem UV světla přes průhledná místa fólie je vytvrzen fotorezist, který chrání vodivý motiv v leptací lázni a zbytek zakrytého nevytvrzeného fotorezistu černou fólií je odplaven v leptací lázni spolu s měděnou fólií. Po vytažení z leptací lázně je na základním materiálu zhotoven vodivý motiv na základě filmové předlohy. Zhotovený motiv na základním materiálu je dále podroben optické kontrole a elektrickému testování, po kterém následuje nanesení nepájivé masky. Nepájivá maska je velmi důležitou ochranou, která chrání DPS před okolními vlivy a měděné plošné spoje před působením vlhkosti a mechanickým poškozením. Typická nepájivá maska se nejčastěji zhotovuje prostřednictvím pozitivní filmové předlohy, kterou jsou zakryty pájecí plošky. Na základní desku je chemicky nanесena nepájivá maska a v průhledných místech fólie je vytvrzena UV zářením. V místech pájecích ploch je poté odstraněna nevytvrzená vrstva. Podle potřeby jsou dále pájecí plochy upraveny některou z metod pro zlepšení pájitelnosti, z nichž nejtypičtější je žárové pokovení pájkou metodou HAL.



Obr. 4: Typický průběh výroby plošného spoje metodou Pattern-Plating

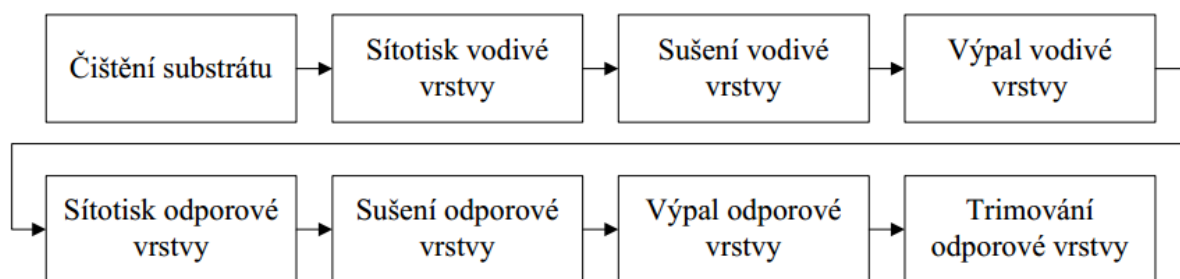
3.2 Vrstvové technologie

Tisk motivů elektronických obvodů prostřednictvím vrstevných technologií se nejčastěji provádí na anorganické keramické substráty, které jsou výhodné svými vlastnostmi, zejména z hlediska mechanické odolnosti a působení chemických látek. Základní vlastností vrstevných technologií je možnost nanášení více funkčních druhů jednotlivých vrstev, což dává širší možnosti využití oproti klasickým plošným spojům. Využitím subtraktivní technologie výroby plošných spojů, lze vyleptáním v měděné fólii vyrobit pouze vodivý motiv a například odporové prvky jsou realizovány prostřednictvím dalších elektronických součástek. Vrstvové technologie umožňují zhotovení také odporových a dielektrických vrstev. Technologii výroby vrstev na substrátu je možné rozdělit na dvě skupiny. První skupinou jsou technologie založené na tisku prostřednictvím síťotisku a šablonového tisku a výsledkem jsou tlusté vrstvy. Druhou skupinou je nanášení tenkých vrstev vakuovou depozicí materiálů.

Z hlediska technologie výroby jsou proto tlustovrstvé a tenkovrstvé technologie velmi odlišné (viz tab. 9). Technologicky jednodušší je výroba tlustých vrstev a proces výroby zahrnuje několik kroků (viz obr. 5), které ovlivňují výsledný motiv. Nejdříve je nutné rozhodnout, zda bude motiv zhotoven metodou síťotisku nebo metodou šablonového tisku, s čímž souvisí příprava síta nebo šablony. V případě síťotisku je potřeba vyrobit na sítu motiv elektronického obvodu, kterým bude protlačena pasta na substrát. Samotné výrobě síta předchází návrh motivu elektronického obvodu v příslušném návrhovém programu, kde jsou definovány veškeré prvky elektronického obvodu. Výstupem takového programu je obvykle černobílý motiv elektronického obvodu, kde jsou vodivé cesty charakterizovány černou barvou, a nevodivé okolí je bílé. Na základě digitálního výstupu návrhového programu je vyrobena filmová předloha pomocí technologie osvitů fólie prostřednictvím laseru, kdy laser vypaluje do průhledné fólie jednotlivé body, z kterých se skládá výsledný motiv.

Tab. 9: Porovnání parametrů tlustovrstvé a tenkovrstvé technologie [43]

Tlusté vrstvy	Tenké vrstvy
Přímý proces – maska, tisk, výpal	Nepřímý subtraktivní proces – napaření a leptání
V procesu nejsou leptací látky	Problémy s likvidací a manipulací chemických látek, leptadel a vyvíječů
Vícevrstvé struktury	Obvykle jednovrstvé struktury
Široký rozsah rezistorových hodnot díky velkému množství past, $1\Omega/\text{čtverec}$ – $1\text{M}\Omega/\text{čtverec}$	Nízký rozsah rezistorových hodnot vzhledem k omezené rezistivitě materiálů – NiCr, TaN, $100\text{--}300\Omega/\text{čtverec}$
Více robustní rezistory s vyšší odolností vůči okolnímu prostředí a vyšším teplotám	Rezistory jsou citlivé na chemickou korozi
Teplotní součinitel odporu (TCR) je mnohem vyšší, $100\text{--}300\text{ ppm}/^\circ\text{C}$	Menší teplotní součinitel odporu (TCR), $0\text{--}50\text{ ppm}/^\circ\text{C}$
Šířka čáry $100\text{--}250\mu\text{m}$	Šířka čáry $25\mu\text{m}$ a menší
Kontaktovatelnost drátku je ovlivněna nečistotami v pastě. Vodiče jsou heterogenní.	Lepší kontaktovatelnost. Vodiče jsou homogenní.



Obr. 5: Typický proces nanášení tlustých vrstev na substrát [2]

Tato metoda výroby filmové předlohy je velmi přesná a lze jejím využitím dosáhnout velmi přesných vyhotovení elektronických motivů. Výsledný motiv na filmové předloze, může být zhotoven v pozitivním a negativním provedení, podle toho jaký typ fotorezistu je využit při výrobě síta, přičemž nejpoužívanějším způsobem je pozitivní provedení fotorezistu. Na pozitivním fotorezistu je motiv elektronického obvodu vyhotoven černou barvou a na ostatní ploše je fólie průhledná. Při osvitu fotorezistu UV světlem dochází v průhledných místech k vytvrzení fotorezistu na sítu, a na místech, které jsou skryty účinkům záření, nedochází k vytvrzení fotorezistu. Při oplachu vodou je tento nevytvrzený fotorezist odstraněn, čímž vznikají apertury výsledného motivu.

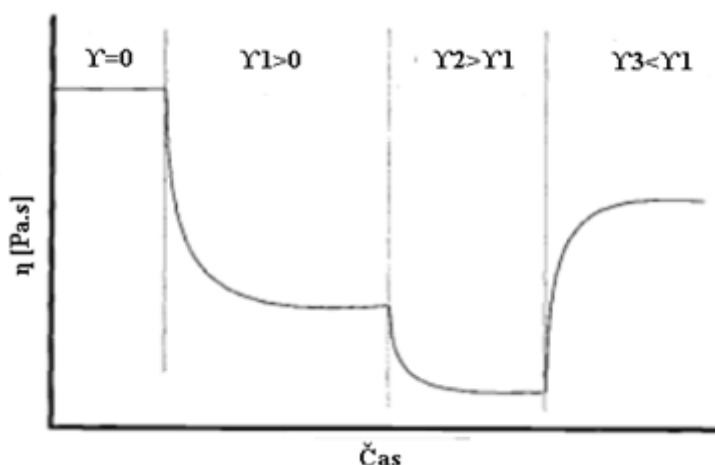
Samotnému osvitu fotorezistu předchází nanesení kapilárního filmu na síto prostřednictvím válečku, kterým je kapilární film vtlačen do jednotlivých ok síta. Před nanesením kapilárního filmu musí být v očích síta zachycená vrstva vody, tak aby kapilární film dostatečně přilnul k sítu. Síto s kapilárním filmem je poté vysušeno, a po vysušení je možné sejmut krycí fólii z filmu a umístit síto do UV komory s vývěvou. Na síto v UV komoře je přiložena filmová předloha a následně je z prostoru odčerpán vzduch, čímž je motiv pevně přitlačen k sítu a ke skleněné podložce, což umožňuje velmi kvalitní a přesný osvit UV lampou. V případě nedostatečného přitlačení motivu k sítu, by mohlo docházet k podsvětlení filmové předlohy a to by způsobilo značné nepřesnosti ve výsledném motivu. Při osvitu je velmi důležité dodržet dobu osvitu, jelikož v případě nedostatečné doby osvětlení kapilárního filmu může dojít k nedostatečnému vytvrzení, a naopak při přesvícení mohou být narušeny makromolekulární struktury kapilárního filmu.

Po vymytí zbytků kapilárního filmu z apertur je možné síto umístit do síťotiskového stroje a natisknout motivy na jednotlivé substráty. Před tiskem pasty pomocí síťotiskového stroje je nutné nastavit základní parametry, kterými jsou tlak, rychlost a úhel stěrky a odtrh síta. V případě tisku prostřednictvím síťotiskového automatu nebo poloautomatu, lze všechny zásadní parametry jednoduchým způsobem nastavit, což zajišťuje vysokou reprodukovatelnost výsledných motivů v porovnání s manuálním síťotiskem. Při využití manuálního síťotisku výsledná kvalita závisí značným způsobem na zkušenostech operátora, který manuálně ovlivňuje veškeré parametry tisku. S tiskem tlustých vrstev úzce souvisí také síťotiskové pasty, které se rozdělují do několika základních skupin. Jsou to pasty vodivé, odporové, dielektrické a izolační. Hlavní funkční složkou vodivých past jsou drahé kovy, mezi které lze zahrnout zlato, paladium, platinu a stříbro, jelikož disponují velkou stálostí a netečností vůči životnímu prostředí. Pro zhotovení odporových motivů, lze využít různé směsi drahých kovů, např. slitiny paladia a stříbra. Hodnota odporu se nastavuje jako poměr kovové

a skelné složky. Dále se používají systémy s oxidovou vazbou, kde je spojení se substrátem tvořeno oxidy, např. oxid rutheničitý (RuO_2). Tyto oxidové systémy disponují nižším teplotním součinitelem a vyšší stabilitou odporu, než systémy se skelnou vazbou. Poslední typem sítotiskových past jsou dielektrické pasty, jejichž funkční složku tvoří materiály, které se využívají pro keramické kondenzátory, což může být například titaničitan barnatý (BaTiO_3). Sítotiskové pasty jsou heterogenním systémem a vedle funkční složky obsahují ještě tavidlovou a pojivovou složku. Funkční složka definuje charakter pasty a je složena z již zmíněných částic drahých kovů velkých řádově v jednotkách mikrometrů. Tyto částice musí být dostatečně malé, aby byl zajištěn průchod jednotlivých částic přes oka v sítu.

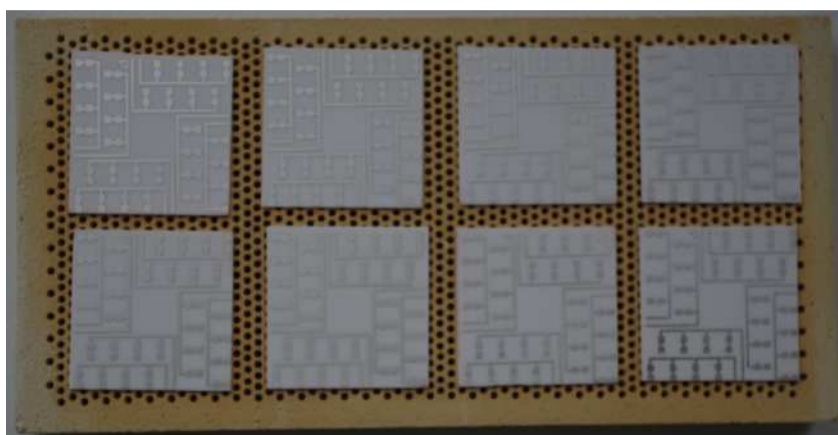
Vazbu mezi funkční složkou a substrátem zajišťuje tavivá složka, která je tvořena skleněnou fritou. Vzhledem k vysoké teplotě tavení některých druhů skel, je nutné použít nízkotavná skla, která jsou kompatibilní s teplotou, při které probíhá výpal tlustých vrstev. Při výpalu nesmí dojít k roztavení skla, ale pouze ke změknutí, aby byla vytvořena nosná matrice pro částice funkční složky. Vedle funkční a tavivé složky se v pastě nachází ještě pojivová složka, která zajišťuje kvalitní tiskové vlastnosti při tisku pasty na substrát, zejména její viskozitu, s čímž souvisí požadavky na tixotropnost. Tixotropní materiál by měl být schopen snížení viskozity při nanášení materiálu na substrát, za působení tlaku, tak aby mohla být kvalitně provedena depozice materiálu (viz obr. 6) [2].

V případě, že je materiál již nanesen na substrátu, je žádoucí, aby viskozita materiálu, byla co nejvyšší, pro udržení materiálu na definovaných pozicích. Sítotiskovou pastu je také nutné před samotným tiskem dostatečně rozmíchat, jelikož při uskladnění pasty jednotlivé částice funkční složky klesají pod tavivovou a pojivovou složku, což je dáno rozdílnými hmotnostmi jednotlivých složek a sítotisková pasta se stává nehomogenní. Z hlediska přípravy substrátu před výpalem je nutné rozlišovat, zda jde o klasický anorganický keramický materiál nebo keramiku nízkých teplot LTCC. Ve druhém případě výpalu vodivého motivu na substrát předchází laminace jednotlivých struktur (viz kap. 2.2). Při tisku na klasický anorganický substrát je natištěná pasta zasušena a následně vypálena v průběžné nebo vsázkové peci.



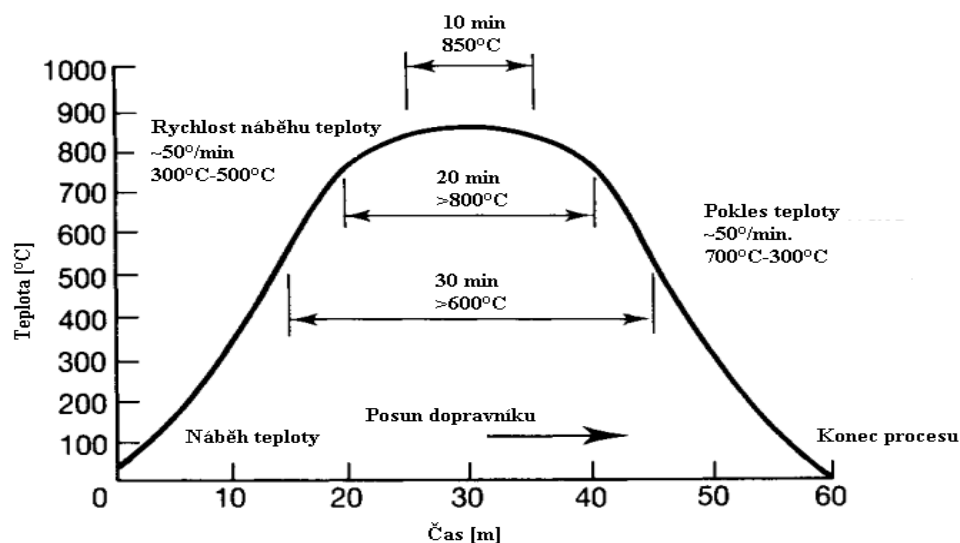
Obr. 6: Příklad změny viskozity u tixotropního materiálu [46]

V průběhu výpalu dochází k vytvoření vlastní struktury, kdy se funkční složka usadí v tavivé složce, která vytváří pevnou vazbu se substrátem. Samotný výpal probíhá v průběžné peci s dopravníkem, který nese substrát několika zónami s různou teplotou. Používají se také vsázkové pece s pevným roštem, kde mají substráty stabilní polohu, a teplota se mění v celém vnitřku pece. Vzorky jsou ve vsázkové peci umístěny na teplotně odolném kameninovém roštu, který je perforovaný z důvodu dostatečně homogenního vedení tepla k vypalovaným vzorkům (viz obr. 7) [2].



Obr. 7: Vzorky s vypáleným vodivým motivem umístěné na vsázkovém roštu

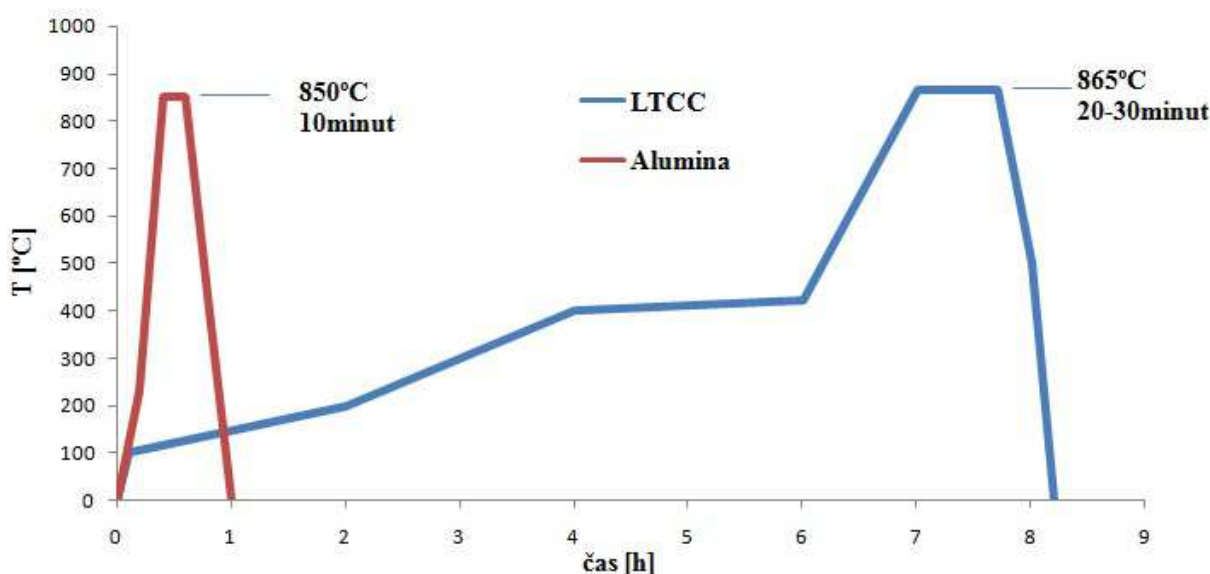
Typický vypalovací profil anorganických keramických substrátů (viz obr. 8) trvá jednu hodinu a nejčastěji se skládá ze čtyř zón s různou rychlostí náběhu a poklesu teploty. V první zóně je pomalý náběh teploty, který trvá zhruba deset minut k teplotám 200 - 250 °C. Při dosažení těchto teplot nastává druhá zóna, kdy teplota začíná stoupat rychlostí kolem 50 °C za minutu a za zhruba 10-15 minut touto rychlostí dosáhne třetí zóny, kdy nastává teplota žárového pásma. Tato teplota se pohybuje kolem 850 °C a dochází k měknutí tavivé části, přičemž funkční složka je v pevné fázi a bez výrazných změn.



Obr. 8: Typický teplotní profil výpalu tlustých vrstev [44]

Po usazení funkčních složek v tavivé části dochází k postupnému chlazení rychlostí cca 50 °C. Tato fáze vypalovacího profilu je nejdelší a trvá kolem cca 25 minut. Po výpalu je přeměněna pasta na funkční vrstvu s příslušnými elektrickými parametry, která je amorfního charakteru a je usazena v tavivé složce takovým způsobem, že tvoří na povrchu souvislou vrstvu. Tavivá složka vytváří matici pro funkční složku a zároveň spojuje vodivé částice se substrátem. V případě nízkoteplotní keramiky se vypalovací profil značně liší od vypalovacího profilu klasických keramických materiálů (viz obr. 8), přičemž samotná doba vypalovacího procesu při nejvyšší teplotě trvá zhruba stejnou dobu jako u klasických keramických materiálů. Největší rozdíl ve vypalovacích profilech se nachází ve velmi pomalém náběhu teploty, který je zhruba padesátkrát pomalejší než u vypalovacího profilu klasických keramických materiálů [2].

Náběh teploty u LTCC probíhá rychlostí 1 - 3 °C za minutu, z čehož vyplývá, že dosažení teploty 450 °C trvá až 6 hodin. Poté je náběh teploty zrychlen až k teplotě výpalu. Pozvolné ohřívání substrátu je nutné z toho důvodu, aby nedošlo k poškození natištěných motivů na substrátu, jelikož se kromě natištěného motivu vypaluje i LTCC struktura. Proto je nutné použít kompatibilní pastu, která bude mít stejnou teplotní roztažnost jako LTCC substrát.



Obr. 9: Srovnání vypalovacích teplotních profilů LTCC a Aluminy [2] [17] [44]

Mezi vrstvé technologie lze zahrnout také metody výroby, které se v souhrnu nazývají tenkými vrstvami. Tenké vrstvy jsou amorfni, polykrystalické nebo monokrystalické struktury, které se nanášejí v uzavřeném vakuovém prostoru a vyznačují se svými specifickými vlastnostmi ve srovnání s tlustovrstvými technologiemi. Vzhledem k velmi malé tloušťce tenkých vrstev neplatí pro tyto tenké vrstvy běžné fyzikální konstanty a vlastnosti, které jsou typické pro běžné objemy materiálů. Proto mají tenké vrstvy výborné elektrické vlastnosti, mezi které lze zahrnout zejména hodnoty vrstvého odporu a teplotního součinitele odporu [2].

Tenké vrstvy jsou zhotovovány stejně jako tlusté vrstvy na keramických substrátech a nejčastěji se realizují vodivé, odporové a dielektrické vrstvy, ale lze realizovat i vrstvy s polovodivými vlastnostmi. Typickými materiály pro tenké vrstvy jsou zlato, hliník a chromnikl pro napařování a tantal pro katodové naprašování. Tenké vrstvy jsou také specifické svými nároky na jakost substrátů, které jsou spojeny zejména s velmi malými objemy materiálu. Z toho vyplývá, že v případě značných nerovností na substrátu bude výsledná struktura velmi nehomogenní. Proto musí být drsnost povrchu keramického substrátu menší než $0,1\text{ }\mu\text{m}$. Postup výroby tenkých vrstev se skládá z několika kroků (viz obr. 10). Nejdříve je substrát upraven skelnou fritou, přičemž celý proces nanášení probíhá v uzavřeném systému [2].



Obr. 10: Typický postup při výrobě tenkých vrstev [2]

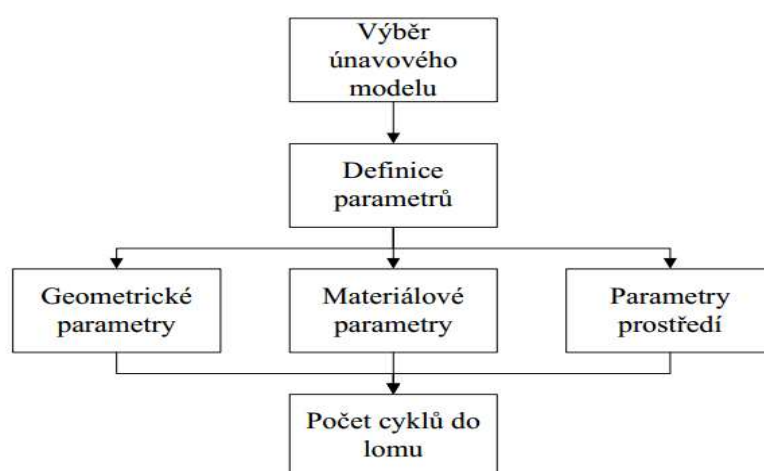
Tenké vrstvy lze nanášet na substrát třemi způsoby, z nichž nejběžnější je metoda vakuového napařování a katodového naprašování. Dále jsou aditivním způsobem naneseny vrstvy na substrát, na kterém je přiložena šablona s požadovaným motivem. Mezi aditivní metody výroby tenkých vrstev lze zahrnout vakuové napařování, katodové naprašování a metodu iontové implantace (viz tab. 10). Nejdříve jsou naneseny jednotlivé vrstvy a poté je celá struktura vložena do pece, kde probíhá teplotní stabilizace žíháním při teplotě kolem $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při teplotní stabilizaci se homogenizují jednotlivé vrstvy a tím získají požadované elektrické vlastnosti. Po teplotní stabilizaci vrstev probíhá selektivní leptání, při kterém jsou vytvářeny pasivní sítě. To znamená, že jsou postupně shora odleptávány jednotlivé nanesené a stabilizované vrstvy až do té doby, kdy je dosažena konečná konfigurace odpovídající požadované topologii pasivní sítě [2].

Tab. 10: Základní parametry jednotlivých metod výroby tenkých vrstev [45]

	Vakuové napařování	Katodové naprašování	Iontová implantace
Použití inertního plynu	ne	Argon	Argon
Pracovní tlak (Pa)	$<0,1\text{Pa}$	$<10\text{Pa}$	$<0,1\text{Pa}$
Síla vymrštění částic	špatná	dobrá	výborná
Míra rychlosti depozice $\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	vysoká >1	nízká <1	vysoká >1
Zahřívání substrátu	nízké	vysoké	vysoké
Homogenita povlaku (Tolerance, %)	velmi dobrá ± 1	dobrá ± 10	dobrá ± 10
Přilnavost povlaku	dobrá	velmi dobrá	výborná

4 Základní typy únavových modelů

Únavové modely jsou matematické nebo fyzikální a jejich cílem je odhadnout, respektive vypočítat počet cyklů do lomu v pájeném spoji (viz obr. 11). Únavové modely je možné rozdělit do několika základních bloků na základě fyzikálních mechanismů, podle kterých probíhá výpočet, a na charakteru zatěžování. Z hlediska velikosti zatěžování lze mluvit o vysokocyklové a nízkocyklové únavě. V případě vysokocyklové únavy se sleduje chování spoje při velkých frekvencích zatěžování a malých amplitudách. Napětí je udržováno při nízkých hodnotách a jevy plastické deformace zde nejsou dominantní. Vysokocyklová únava je charakterizována relativně vysokým počtem cyklů, při kterém dochází k porušení materiálu a pohybuje se kolem 10^4 cyklů do lomu.



Obr. 11: Princip odhadu spolehlivosti pomocí únavových modelů

Při nízkocyklové únavě dochází k plastické deformaci materiálu. Materiál je zatěžován menším počtem cyklů, tj. je podstatně menší frekvence, ale podstatně vyšší napětí zatěžování. Typický počet cyklů do porušení materiálu v případě nízkocyklové únavy se pohybuje mezi 10^2 - 10^3 cyklů do lomu. Většina zde popsaných únavových modelů se zaměřuje na nízkocyklovou únavu materiálu. Z hlediska fyzikálních mechanismů lze únavové modely rozdělit do následujících skupin. První skupinou jsou únavové modely založené na jevech plastické a elastické deformace v pájeném spoji během teplotního cyklování. Tyto únavové modely vychází z faktu, že při působení mechanické síly na strukturu materiálu dochází k jeho deformaci a těleso postupně mění tvar. Stupeň deformace materiálu závisí zejména na velikosti a typu namáhání. Zde se potom deformační jevy rozdělují na plastickou a elastickou deformaci. Projevy těchto typů deformací závisí zejména na tahovém diagramu, který je rozdělen do dvou oblastí. V užší první oblasti je charakterizována elastická deformace. V této oblasti se materiál chová jako pružina. Jakmile přestane působit mechanická síla na daný materiál, vrací do původního tvaru. Z hlediska atomární úrovně v materiálu je tento deformační mechanismus spojen pouze s minimálním vychýlením atomů z jejich rovnovážných poloh.

Elastická deformace z pohledu odhadu spolehlivosti pájených spojů není významná, jelikož při elastické deformaci nedochází ke značnému růstu trhlin v pájeném spoji. Plastické a elastické deformační mechanismy v pájeném spoji jsou způsobeny zejména různou roztažností materiálů při teplotním cyklování. To lze zohlednit v případě, pokud by všechny materiály v sestavě měly stejný teplotní koeficient teplotní roztažnosti. Většinou je ale v sestavě jeden nebo více spojených materiálů s rozdílnými teplotními koeficienty teplotní roztažnosti, které negativně působí proti sobě. Nejvíce se tento problém projevuje z hlediska koeficientu teplotní roztažnosti substrátu, na kterém je pájený spoj. Pájka tohoto pájeného spoje vzhledem k charakteru bude mít vždy odlišný koeficient teplotní roztažnosti. Tím, že existuje rozdílný koeficient teplotní roztažnosti, dochází při teplotním namáhání k pnutí ve spoji, které může přes elastickou deformaci vést až k plastické deformaci. Tento problém se ještě násobí v případě propojení dvou substrátů pájeným spojem.

V případě substrátů ze stejného materiálu je situace stejná jako v případě jednoho substrátu. Pokud je zavedeno propojení mezi deskami z odlišných materiálů, tak se v sestavě nachází již tři různé materiály, které působí proti sobě a spolehlivost celé sestavy se tak velmi snižuje. Příkladem takového propojení odlišných substrátů je zejména pájené propojení FR-4 substrátu a anorganických substrátů, mezi které lze zahrnout LTCC a další anorganické keramické materiály. Mezi typické modely (viz tab. 11), které jsou založeny na plastické a elastické deformaci patří Coffin-Manson, Engelmaier-Wild a Solomon model. Další skupina únavových modelů je založena na jevech deformačního tečení v pájeném spoji. Tyto únavové modely lze označit jako velmi přesné, jelikož se blíže zaměřují na dislokační mechanismy v pájeném spoji.

Deformace tečením nastává zejména v případě dlouhodobého působení vysokých teplot při konstantním zatížení. Nevýhodou této skupiny modelů je fakt, že se více hodí pro aplikace, kde je pájený spoj delší dobu vystaven vysokým teplotám, což není případ teplotního cyklování, které je založeno na širokém rozsahu změny teplot. Mezi základní modely založené na deformaci tečením patří model Knecht-Fox a Syed. Nejrozšířenější a pravděpodobně nejpresnější únavové modely sledují pohyby energie v pájeném spoji. V případě těchto modelů se sleduje poškození způsobené naakumulovanou hysterezní energií během teplotního cyklování.

Tab. 11: Základní přehled únavových modelů a jejich rozdělení do skupin [49]

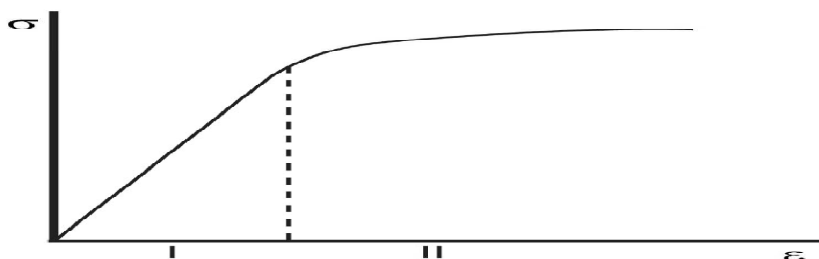
Únavový model	Číslo vztahu	Typ modelu	Možné využití
Coffin-Manson	1,2	tvárná deformace	Vše
Engelmaier-Wild	3,4,5,6,7	tvárná deformace	Vše
Solomon	8	tvárná deformace	Vše
Syed	9	deformace tečením	PBGA,SMD,NSMD
Knecht-Fox	10	deformace tečením	Vše
Darveaux	11,12,13,14	pohyb energie	Vše
Akay	15	pohyb energie	BGA
Heinrich	16	pohyb energie	PBGA
Jung	17	pohyb energie	Vše
Pan	18	pohyb energie	Vše

Velkou výhodou těchto únavových modelů je fakt, že není nutné v takové míře pracovat s materiálovými konstantami, jako v případě modelů, které jsou založeny na plastické a elastické deformaci. Na druhé straně je potřeba mít k dispozici mnoho experimentálně získaných konstant a proto nejsou tyto únavové modely vhodné k teoretickým výpočtům. Materiálové konstanty je většinou nutné získat prostředním experimentálního měření nebo prostřednictvím využití simulačních programů a následně získané údaje zahrnout do rovnice. Odhadnout spolehlivost pájených spojů lze také na základě únavových modelů založených na poškození. Většinou jsou základem lomové mechanismy nebo mechanismy tečení a únavy. Zmínit lze zejména Stolkart model, který je založen na konstitutivní derivaci, která zahrnuje tečení a plasticitu. Poslední skupinou jsou únavové modely pro zrychlené testování. Zrychlené testování se běžně provádí za působení zvláštních podmínek, které v běžném případě nenastanou.

V případě předchozích skupin únavových modelů se většinou také počítá s extrémními podmínkami cyklování, ale lze je aplikovat i pro běžné provozní podmínky. Existují dva nejběžnější typy zrychleného testování. Jde o zrychlené testy, při konstantním a postupném namáhání. Při zrychlených testech v případě konstantního namáhání se pozoruje šíření poruch v závislosti na čase na zkoumaném vzorku. Pokud jde o krokové testování, tak se postupně zvyšuje určitý druh namáhání vzorku a je zaznamenáván krok, při kterém dochází k poruše. Mezi typické aplikace zrychleného testování při konstantním namáhání patří zejména namáhání okolní mezní teplotou nebo stejnosměrné namáhání silou. Z hlediska mezní okolní teploty je nastavena určitá hodnota teploty, která je konstantně udržována. Stejného principu je i namáhání silou, kdy je udržován konstantní tlak. Po určitém čase se vyhodnocují účinky za dané konstantní teploty nebo tlaku na materiál.

4.1 Únavové modely založené na plastické a elastické deformaci

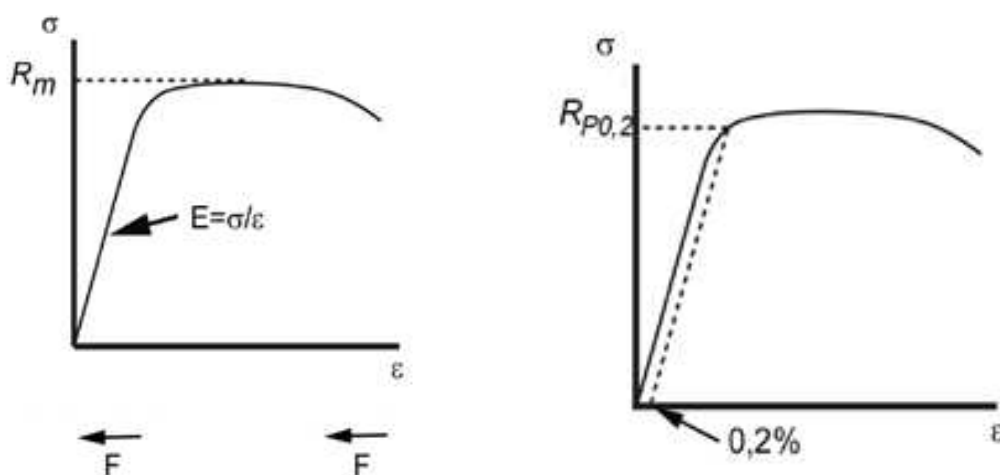
Únavové modely, jejichž základem jsou plastické a elastické deformační jevy patří mezi nejpoužívanější metody k odhadu spolehlivosti elektronických pájených propojení. Pokud je materiál zatěžován mechanickou silou, dochází k jeho tvarové deformaci. Stupeň deformace materiálu závisí na charakteru namáhání a také na jeho velikosti. Velikost působící síly na strukturu materiálu je hlavním faktorem, kterým určuje, zda se jedná o plastickou či elastickou deformaci. Plastické a elastické deformační síly v závislosti na napětí jsou definovány v tahovém diagramu, který je rozdělen na dvě části (viz obr. 12). V tahovém diagramu je na ose y znázorněno napětí v tahu, které působí na materiál a na ose x je uvedena relativní deformace materiálu ϵ [9].



Obr. 12: Tahový diagram - pružná (I) a plastická (II) deformace [9]

V první části tahového diagramu je vidět, že relativní deformace materiálu se lineárně zvětšuje spolu se zvětšujícím se napětím v tahu. V této části se projevuje v materiálu pouze elastická deformace. Z hlediska atomární struktury materiálu se atomy vychylují ze svých rovnovážných poloh na malou vzdálenost a materiál je možné popsat jako pružinu. V případě, že napětí v tahu přestane působit, se vychýlené atomy vrací do svých rovnovážných poloh a materiál je nezdeformován ve své původní podobě. Tento jev je popsán Hookovým zákonem, který definuje pružnou deformaci materiálů za působení síly. Předpokladem je, že jsou to malé síly a malé deformace. Tyto malé deformace po odlehčení přestanou existovat. Formulovat Hookův zákon, lze tak, že deformace je přímo úměrná napětí materiálu a proto je závislost relativní deformace materiálu na napětí v tahu lineární. Lineární závislost popsaná v Hookově zákoně s rostoucím napětím v tahu přestává být lineárního charakteru a v určitém stupni relativní deformace materiálu není přímo závislá na rostoucím tahovém napětí [9].

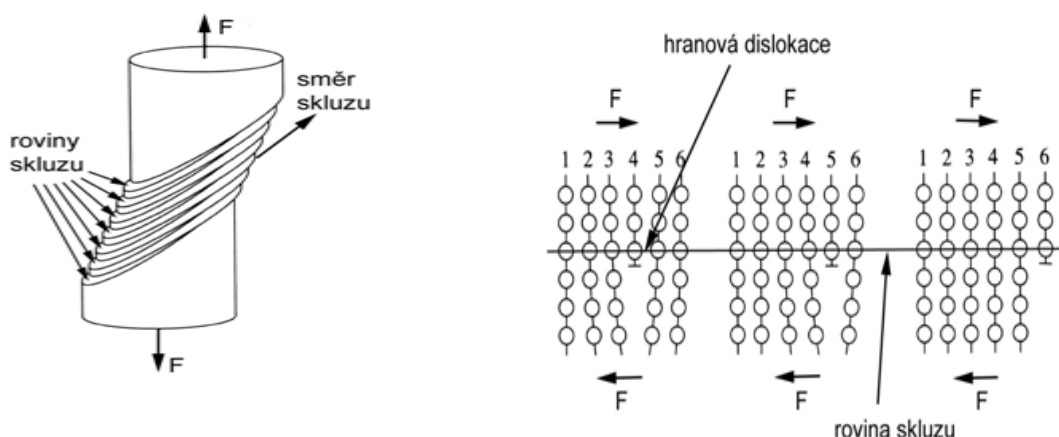
To je způsobem tím, že se v tomto bodě začínají projevovat v materiálu plastické deformační síly. Z atomárního pohledu lze plastickou deformaci popsat, takovým způsobem, že atomy vychýlené ze svých rovnovážných poloh již zůstávají ve svých nových polohách. Pokud přestane působit na materiál vnější napětí, zůstane zdeformovaný. Z nižší směrnice křivky vyplývá, že plastická deformace vyžaduje nižší nárůst zatížení než deformace elastická (viz obr. 13). Pokud napětí roste minimálně, v materiálu působí velké deformační síly. Tahový diagram, který charakterizuje materiál z hlediska působení elastických a plastických deformačních mechanismů, není pro každý materiál stejný. To znamená, že například u polymerních materiálů může na základě jejich mechanických vlastností docházet zejména k elastické deformaci a plastická deformace se vůbec nemusí projevovat. Jiná situace je u různých kovových materiálů, kdy je naopak elastická deformace v podstatě neexistující a projevují se pouze mechanismy plastické deformace. Ovšem opět je nutné dodat, že i u kovových materiálů záleží na charakteru látky [9].



Obr. 13: a) modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu b) smluvní mez kluzu [9]

Tahový diagram pro jakýkoliv materiál lze získat upevněním vzorku materiálu do zkušebního trhačního stroje. V tomto trhačním stroji je materiál natahován, přičemž se neustále zvyšuje napětí v tahu. V průběhu se sleduje závislost smluvního napětí v tahu σ , které působí na materiál na relativní deformaci materiálu ϵ . Experimentální měření je skončeno ve chvíli, kdy dojde k přetržení nebo k prasknutí zkoušeného materiálu. Tahové diagramy materiálů lze získat nejen pro relativní deformaci materiálu v závislosti na tahovém napětí, ale taky pro tlakové napětí, ohybové napětí a pro další typy namáhání. Z hlediska pájených spojů je nejdůležitější popsat plastické deformační mechanismy, které probíhají v kovech. Z důvodu, že předmětem deformace je vždy pájený spoj, který je většinou jednotvárný kov nebo slitina různých kovů. Nejběžnější a nejpoužívanější pájka SAC305 je slitinou cínu, stříbra a mědi. Proto je vhodné zaměřit se zejména na plastickou deformaci v kovových materiálech.

Plastická deformace kovů probíhá mechanismem, který lze nazvat skluz. Mechanismus skluzu je možné popsat jako vzájemné posunutí dvou částí krystalického materiálu podél roviny. Ke skluzovému mechanismu nedochází porušením a obnovením vazeb podél roviny skluzu najednou, ale pohybem mřížkových poruch. Tímto způsobem vznikají tzv. dislokace. Pohyb dislokací se nazývá rovněž skluz. Dislokace přítomné uvnitř krystalu (vznikají již během tuhnutí roztaveného kovu) jsou vlivem vnějšího napětí uvedeny do skluzového pohybu a dosáhnou-li povrchu krystalu, projeví se to jako stupínek. Makroskopická deformace je spojena s výstupem velkého počtu dislokací na povrchu krystalu. Posunutí částí krystalu průchodem dislokací je energeticky mnohem méně náročné než hromadné porušování všech vazeb podél skluzové roviny [9].



Obr. 14: (a) Skluz částí krystalu (b) pohyb dislokací ve skluzových rovinách [9]

Při skluzu dislokace totiž dochází k porušování vazeb jen mezi atomy v těsném okolí dislokace a vazby ve větší vzdálenosti zůstávají nezměněny. Takovým způsobem probíhá i skluz uvnitř jednotlivých zrn v polykrystalickém kovu, přičemž hranice zrn působí jako překážky pro pohyb dislokací. Přítomnost hranic zrn poté vede ke zpevnění materiálu. Čím je velikost zrn v materiálu menší, tím více hranic zrn se v něm nachází, a tím vyšší je odolnost materiálu vůči plastické deformaci (viz obr. 14) [9].

Mezi typické představitele únavových modelů založených na plastické a elastické deformaci je možné zmínit model Coffin-Manson, Engelmaier-Wild a Solomon. Coffin-Manson model se zaměřuje na oblast nízkocyklové únavy a tedy na tvrdé zatěžování. Jak již bylo řečeno, v případě nízkocyklové únavy dochází v materiálu k plastickým deformacím, materiál je zatěžován menší frekvencí cyklů ale vyšším napětím. Typický počet cyklů do poruchy pájeného spoje zatěžovaného nízkocyklovou únavou se nachází mezi 10^2 - 10^3 . Coffin-Manson model představuje pnutí ve spoji, které je způsobeno rozdílnými teplotními roztažnostmi materiálů zapojených v elektronickém propojení a je vyjádřen vztahem (1).

$$N_f(50\%) = \frac{1}{2} \left(\frac{2\varepsilon'_f}{\gamma_p} \right)^c \quad [-; -, Pa, -] \quad (1)$$

kde N_f je počet cyklů do poruchy, ε'_f je koeficient únavové tažnosti, γ_p je poměrné pnutí v spoji a c je koeficient tvárnosti pájky. Pro poměrné pnutí ve spoji je možné podle vztahu (2) psát

$$\gamma_p = \frac{L \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T}{2h} \quad [Pa; m, -, ^\circ C, m] \quad (2)$$

kde γ_p je poměrné pnutí ve spoji, L je délka součástky, $\Delta\alpha$ je rozdíl součinitelů teplotní roztažnosti, ΔT je rozdíl teploty a h lze psát pro výšku pájeného spoje. Lze uvažovat minimálně dva elementy s rozdílnými teplotními roztažnostmi v elektronickém propojení. Prvním elementem je substrát a druhým pájený kovový spoj. Substrát může být anorganického nebo organického charakteru. Mezi anorganické substráty lze zahrnout keramické základní desky a z hlediska organických lze brát v úvahu zejména FR4 substráty, jejichž základem je skelná tkanina jako výztuž a pojivo ve formě epoxidové pryskyřice. Z podstaty srovnání těchto substrátů a kovového pájeného spoje vyplývá, že rozdílná teplotní roztažnost těchto materiálů bude působit významným způsobem.

Hlavními parametry únavového modelu Coffin-Manson jsou koeficient únavové tažnosti (viz tab. 12), poměrné pnutí ve spoji a vlastnosti pájky jsou charakterizovány koeficientem tvárnosti pájky. Koeficient únavové tažnosti materiálu je jednou z veličin, která charakterizuje plastickou deformaci. Koeficient únavové tažnosti udává relativní plastickou deformaci materiálu v okamžiku po přetržení zkušební tyče, respektive zkušební vzorku. Tento koeficient nelze vypočítat pro kalkulaci spolehlivosti elektronického propojení, ale lze jej získat experimentálně tahovou zkouškou vzorku materiálu pájky. Další materiálovou veličinou, kterou lze získat pouze experimentálně, je koeficient tvárnosti pájky.

Tab. 12: Přehled koeficientů únavové tažnosti a tvárnosti pro různé pájky [3]

Složení pájky	ε'_f	c
Sn-3,5Ag	-0,50	0,6364
Sn-3,5Ag-0,5Cu	-0,73	3,0685
Sn-3,8Ag-0,7Cu	-0,5279	0,9181
Sn-3,5Ag-1Cu	-40,43	0,3031

Tvárnost lze popsat jako mechanickou vlastnost materiálu, která je důležitá zejména u kovů a slitin kovů, tedy hlavně pájených propojení. Tvárnost je míra schopnosti změnit tvar, při působení mechanického namáhání v oblasti plastické deformace, bez porušení celistvosti materiálu. Tvárnost má velkou souvislost s vnitřní strukturou látky, teplotou tvárného materiálu, chemickým složením a druhem tvářecího procesu. Poměrné pnutí ve spoji je jeden z parametrů Coffin-Manson modelu, který není nutné získávat experimentálním způsobem a je složen z několika údajů. Prvním je délka uvažované součástky. Touto součástí může být substrát, na kterém je umístěno elektronické pájené propojení. Dále je nutné započítat rozdíl teplotních součinitelů plošného spoje a součástky. Rozdíl teplot označuje teplotní podmínky cyklování, také jinak se jedná o rozdíl mezi dosaženou minimální a maximální teplotou při teplotním cyklování pájeného propojení. Dále je nutné uvést výšku pájeného spoje. Mezi nevýhody Coffin-Manson modelu lze zahrnout zejména nemožnost počítat ve vztahu s frekvencí cyklování. Z hlediska podmínek testování lze započítat pouze minimální a maximální teplotu.

Tento nedostatek je vyřešen v únavovém modelu, který se nazývá Engelmaier-Wild únavový model, jenž je zdokonalením Coffin-Manson únavového modelu. Zavedením frekvence cyklování do výpočtů je potom možné dosáhnout přesnějších výsledků. Model lze využít pro odhad spolehlivosti pájených propojení u všech možných typů pouzder a provedení spojů. Stejně jako předchozí vztah patří k modelům z oblasti nízkocyklového zatěžování materiálu. Přednostmi tohoto modelu je fakt, že bere v úvahu mechanismus deformace tečením, který může v elektronickém pájeném propojení nastávat při teplotním cyklování v rozsahu vyšších teplot. Hlavní výhodou je možnost zahrnout frekvenci teplotního cyklování do exponentu tvárnosti v tomto vztahu. Pro počet cyklů do poruchy podle Engelmaier-Wild modelu lze psát vzorec (3).

$$N_f(50\%) = \frac{1}{2} \left(\frac{2\varepsilon'_f}{\Delta D} \right)^c \quad [-; -, -, -] \quad (3)$$

kde N_f je počet cyklů do lomu v pájeném spoji, ΔD je cyklické únavové poškození, které nastane v pájeném spoji během jednoho cyklu, ε'_f je koeficient únavové tažnosti a c je koeficient tvárnosti pájky. Pro cyklické únavové poškození, které nastane za jeden cyklus lze psát podle vzorce (4):

$$\Delta D = \left[\frac{F \cdot DNP \cdot \Delta CTE \cdot \Delta T}{h} \right] \quad [-; -, m, \frac{ppm}{^\circ C}, ^\circ C, m] \quad (4)$$

kde ΔD je cyklické únavové poškození, F je empirický pracovní faktor, kterým je možné ve výpočtu korigovat odchylky od představy ideálního pájeného spoje a zároveň je v něm snaha zahrnout různé cyklické únavové mechanismy a deformace, se kterými není možné počítat v rámci běžných materiálových konstant, jelikož i materiálové konstanty jsou empirické a mohly být získávány za mírně odlišných podmínek a za různých situací. Typické hodnoty tohoto faktoru se nachází mezi 1 - 1,5 pro bezolovnaté kuličkové vývody BGA pouzder, dále pro většinu běžných vývodů bezolovnatých pájených spojů pouzder se doporučují hodnoty mezi 0,7 - 1,2. V případě výpočtu olovnatého pájeného spoje je pracovní faktor 1. DNP označuje vzdálenost od výchozího bodu desky. ΔCTE je rozdíl teplotní

roztlačnosti plošného spoje a součástky, ΔT je rozdíl teplot mezi minimální a maximální hodnotou při cyklickém namáhání a h je stejně jako u Coffin-Manson modelu výška pájeného spoje. Cyklické únavové poškození lze vypočítat podle vzorce (5) i pro olovnatý pájený spoj, který je mírně odlišný oproti vztahu pro odhad spolehlivosti bezolovnatého pájeného spoje.

$$\Delta D = \left[\frac{F \cdot K \cdot (DNP \cdot \Delta CTE \cdot \Delta T)^2}{(133 \text{psi}) \cdot A \cdot h} \right] \quad [-; -, -, m, \frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}}, ^\circ\text{C}, m] \quad (5)$$

kde F je stejně jako u předchozího vztahu pracovní faktor, který bude pro olovnatý pájený spoj 1, a proto v tomto vztahu není důležitý. Novým faktorem, který se u výpočtu bezolovnatého pájeného spoje nenachází, je K , které představuje diagonální ohybovou tuhost olova. Pro úplnost je ještě nutné uvést vztahy pro výpočet exponentu tvárnosti pájky v závislosti na cyklických podmínkách testování. Exponent tvárnosti pájky v sobě zahrnuje jednak průměrnou cyklickou teplotu pájeného spoje, do které lze zahrnout teplotní podmínky testování a frekvenci cyklování a dále započítáním experimentálních konstant beroucích v úvahu deformační mechanismy tečením, lze dosáhnout přesnějších výsledků. Pro výpočet exponentu tvárnosti lze psát podle vzorce (6)

$$\frac{1}{c} = c_0 + c_1 T_{sj} + c_2 \ln \left(1 + \frac{t_0}{t_D} \right) \quad [-; -, -, ^\circ\text{C}, -, -, t] \quad (6)$$

kde c_0 , c_1 , c_2 jsou experimentálně získané konstanty (viz tab. 13). c_0 vyjadřuje vztah mezi procesem tečení a výsledným počtem cyklů do chyby, dále c_1 charakterizuje závislost mezi teplotními podmínkami a rychlostí tečení a c_2 je faktor časové závislosti na celkovém procesu tečení. Tyto faktory výrazně zpřesňují konečný odhad životnosti pájeného spoje spolu se započtením podmínek cyklování. Dále T_{sj} je průměrná cyklická teplota pájeného spoje a T_D je poloviční údaj celkové doby trvání jednoho cyklu. Průměrnou cyklickou teplotu pájeného spoje T_{sj} lze vypočítat podle vzorce (7)

$$\bar{T}_{sj} = \frac{1}{4} (T_c + T_{c,0} + T_s + T_{s,0}) \quad [^\circ\text{C}] \quad (7)$$

kde, T_{sj} je průměrná cyklická teplota pájeného spoje během teplotního cyklování, T_c , $T_{s,0}$ a $T_{c,0}$ jsou rozdíly cyklické teploty na komponentě a na substrátu.

Tab. 13: Parametry pro výpočet exponentu tvárnosti pro různé druhy pájek [4]

Složení	Parametry pájky				
	ϵ'_f	c_0	c_1	c_2	T_0
SAC405/305	0,425	0,480	$9,30 \cdot 10^{-4}$	$-1,92 \cdot 10^{-2}$	500
SAC205	0,250	0,480	$9,30 \cdot 10^{-4}$	$-1,92 \cdot 10^{-2}$	500
SAC105	0,225	0,480	$9,30 \cdot 10^{-4}$	$-1,92 \cdot 10^{-2}$	500
SnPb	0,325	0,442	$6,00 \cdot 10^{-4}$	$-1,74 \cdot 10^{-2}$	360

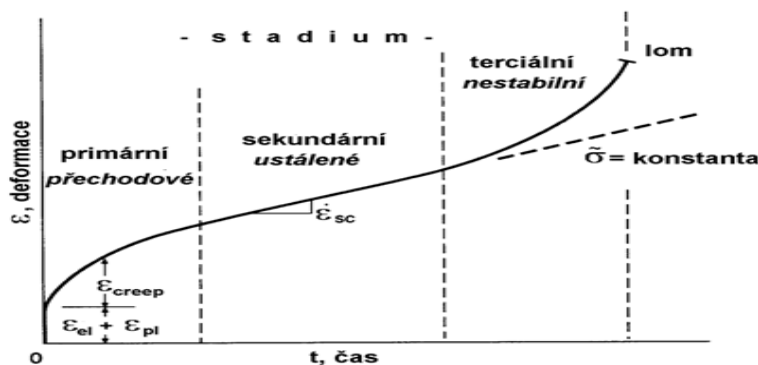
Z hlediska plastické deformace lze zmínit ještě Solomon model, který je stejně jako předchozí modely založený na plastické deformaci, avšak vzhledem ke své jednoduchosti nemá tak široké možnosti jako předešlé vztahy. Je spíše základním vztahem, ze kterého vychází Coffin-Manson model a Engelman-Wild model. Podle modelu Solomon lze vypočítat počet cyklů do chyby podle vzorce (8)

$$\Delta\gamma_p N_p^\alpha = \theta \quad [Pa, -; -] \quad (8)$$

kde N_p je počet cyklů do chyby, γ_p je poměrné pnutí ve spoji, θ je obrácený koeficient únavové tažnosti a α je materiálová konstanta vzhledem k vlastnostem materiálu pájky.

4.2 Únavové modely založené na deformaci tečením

Modely, jejichž základem jsou deformační mechanismy tečení, se zaměřují pouze na tento jev. Deformace tečením je relativně pomalá deformace a závisí na čase. K deformaci tečením dochází, pokud je materiál vystaven delší dobu vysokým teplotám za konstantního zatížení nebo při vystavení kontinuálnímu napětí nižšímu než je mez kluzu materiálu. Mechanismus tečení lze rozdělit do tří na sebe navazujících etap (viz. obr. 15). V každé z těchto etap je rozdílná rychlost plastické deformace materiálu. První primární etapa se nazývá také přechodovou etapou, kdy se pájený spoj mechanicky víc zpevňuje, než deformuje, rychlost tečení v této etapě má klesající tendenci. Následuje sekundární ustálené stadium tečení [23].

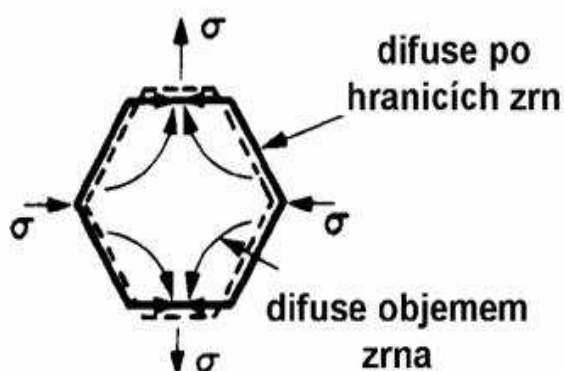


Obr. 15: Růst trvalé deformace ϵ_{pl} a průběh rychlosti tečení $\dot{\epsilon}$ v čase [23]

Toto je jediná etapa, kdy je křivka závislosti relativní deformace na čase lineární a je určována rychlostí tečení. V terciálním stádiu vznikají terciální poruchy soudržnosti, což může znamenat působení kavitačních mechanismů, případně mohou vznikat trhliny v materiálu. Po terciálním stádiu dochází k porušení celistvosti materiálu a následně k lomu pájeného spoje. Všechny zmíněné pochody probíhají při napětích menších než je mez kluzu. Z konstrukčního hlediska má nejvyšší prioritu a význam sekundární stadium tečení, které je definováno jako mez tečení, což je napětí, kdy je při definované teplotě v daném čase způsobena přípustná deformace.

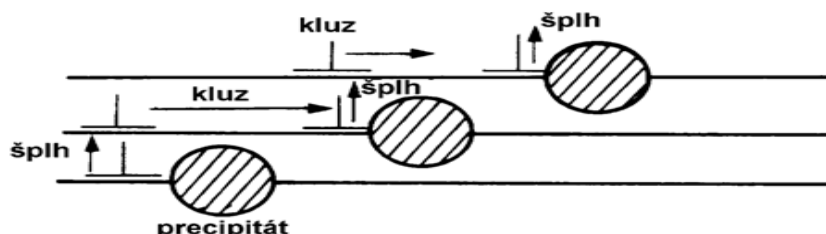
Právě čas a přípustná deformace jsou součástí požadavku na funkční životnost součástí. Pokud je rozhodující zachování celistvosti součásti bez ohledů na deformační poškození, určuje se pevnost při mechanismu tečení [23].

Tato pevnost se definuje jako napětí, které ve stanoveném čase způsobí lom v materiálu. Jako příčinu deformace tečením lze označit difuzi atomů mřížky způsobenou účinkem napětí a vysoké teploty. Z hlediska kovových materiálů se rozlišují dva typy deformace tečením. Prvním typem je difuzní tečení (viz obr. 16) a druhým typem je dislokační tečení (viz obr. 17). Difuzní tečení může probíhat zejména objemem zrn. Předpokladem pro tečení objemem zrn je nízké napětí a vysoká teplota. Difuzní tečení je mechanismem v materiálech s krystalickou strukturou. Do skupiny materiálů s krystalickou strukturou patří zejména kovy, slitiny kovů a keramické materiály. Sledovat difuzní tečení je tedy velmi důležité z hlediska pájených spojů, jelikož úzce souvisí se slitinami kovů, které využívají nejrůznější druhy pájek pro elektroniku a elektronickou výrobu [23].



Obr. 16: Princip difuze po hranicích zrn a objemem zrna [23]

Dále může difuzní tečení probíhat i po hranicích zrn. Tento jev je spojen s nízkými teplotami a nízkými napětími. Hranice, které se nalézají mezi krystalovými zrny, jsou neuspořádané oblasti a z těchto oblastí může probíhat difuze vakancí do krystalové mřížky zrna. Pokud je těleso zatíženo, tak v okolí hranic, které jsou natočeny kolmo k tahovému napětí, dochází k tahové deformaci. V okolí rovnoběžných hranic dochází k tlakové deformaci. V oblastech kde působí tahová deformace, vznikají vakance a v oblastech působení tlakové deformace vznikají intersticiální atomy, což odpovídá polohám mezi mřížkami. Koncentrace bodových poruch jsou vyrovnávány difuzí [23].



Obr. 17: Princip dislokačního tečení [23]

Ve směru tahového napětí se zrna prodlužují a dochází k permanentní deformaci tečením. Pokud se jedná o difuzi krystalovou mřížkou, což jde také nazvat difuzí objemem zrna, tak probíhá tzv. Nabarrovo- Herringovo tečení. V případě difuze podél hranic zrn se jedná o Cobleho tečení. Zmíněné mechanismy mají viskózní povahu. Plastická deformace materiálů s krystalovou mřížkou je podmíněna pohybem dislokací. Napětí pro pohyb dislokací musí překonat odpor krystalové mřížky nebo překonat překážky vyvolané distorsí krystalové mřížky. Difuze atomů může vyvolat uvolnění dislokací a tak usnadnit plastickou deformaci, což je v podstatě dislokační tečení. Síla, která působí na dislokaci ve skluzové rovině je v rovnováze s reakční silou od precipitátu. [23]

Pokud skluzová rovina neprochází středem precipitátu, potom se zde objevuje složka síly, která se snaží vytlačit dislokaci z její skluzové roviny. Dislokace se nemůže tímto směrem pohybovat přemísťováním atomů ve skluzové rovině, ale může k jejímu pohybu dojít tímto směrem v případě, že atomy které, tvoří hranu vložené poloroviny, difundují. Tento proces se nazývá šplh dislokací, a jelikož je podmíněn difuzí, dochází k němu pouze za vyšších teplot. Dislokační tečení je ovládáno zejména difuzními procesy. Z hlediska struktury v případě dislokačního tečení nehrají roli hranice zrna ale je zde velká závislost na napětí. [23]

Únavové modely, které jsou zaměřeny na mechanismy tečení jsou relativně úzkou skupinou únavových mechanismů a jejich využití je relativně omezené. Prvním modelem je Syed model, který popisuje mechanismy tečení, probíhající v tzv. sekundární etapě tečení. Zabývá se konkrétně tečením po hranicích zrn, které probíhá při nízkých napětí a na rozdíl od difuzních mechanismů, které probíhají objemem zrn, také při nižších teplotách. Dále zahrnuje difuzi krystalickou mřížkou. Ve vztahu jsou hlavními konstantami D_{gbs} a D_{mc} . Tyto konstanty představují nárůst deformačního tečení za jeden cyklus, prostřednictvím zmíněných mechanismů. Pro Syed model lze psát vzorec (9)

$$N_f = ([0.022D_{gbs}] + [0.063D_{mc}])^{-1} \quad [-; -, -] \quad (9)$$

kde N_f je počet cyklů do poruchy, D_{gbs} popisuje difuzi tečením po hranicích zrn a D_{mc} popisuje difuzi krystalickou mřížkou. Dalším modelem je Knecht-Fox model, který je také založený na principech deformace tečením. Hlavním parametrem u tohoto modelu je materiálová konstanta C , která se získává experimentálním způsobem a závisí na kritériích chybovosti a také na mikrostruktuře pájky. Pro tento model lze psát vzorec (10)

$$N_f = \frac{C}{\Delta\gamma_{mc}} \quad [-; -, Pa] \quad (10)$$

kde N_f je počet cyklů do poruchy, C je materiálová konstanta a $\Delta\gamma_{mc}$ je rozsah napětí v pájeném spoji, které způsobuje difuzi krystalickou mřížkou.

4.3 Únavové modely založené na akumulaci energie

Darveaux model je jedním ze vztahů, které se zakládají na přírůstku energie v pájeném spoji během cyklování. Výpočet podle tohoto vztahu je rozdělen na tři jednotlivé kroky. V prvním kroku je nutné vypočítat počet cyklů do okamžiku, kdy začne v pájeném spojit vznikat lom nebo trhлина. Ten počet cyklů lze vypočítat podle vzorce (11)

$$N_o = C_1 \Delta W^{C_2} \quad \left[-; \frac{\text{cykl}}{\text{MPa}}, \text{MPa}, -\right] \quad (11)$$

kde N_o je počet cyklů do vytvoření lomu, C_1 a C_2 jsou materiálové konstanty a ΔW je přírůstek energie v pájeném spoji během jednoho cyklu. Hodnotu změny energie v pájeném spoji ΔW lze získat několika způsoby. Lze vypočítat teoreticky na základě teplotních podmínek cyklování, dále je nutné vzít v úvahu strukturu materiálu a jeho geometrické parametry. Teoretický výpočet patří mezi relativně složitější metody. Rozdíl energie lze získat také na základě simulace pájeného spoje v některém z dostupných simulačních programů. Dalším vzorcem (12) je možné vypočítat rychlost rozšiřování lomu:

$$\frac{da}{dN} = C_3 \Delta W^{C_4} \quad \left[-; \frac{\text{mm}}{\text{cyklus}}, \text{MPa}, -\right] \quad (12)$$

kde, da/dN představuje míru růstu lomu během jednoho cyklu, C_3 a C_4 a jsou materiálové konstanty a ΔW je přírůstek energie v pájeném spoji během jednoho cyklu. Na základě získaných výsledků z předchozích dvou vztahů, které udávají počet cyklů do začátku lomu a míru rozšiřování lomu, lze vypočítat celkovou životnost pájeného spoje. Dosazením do vzorce (13) lze dostat:

$$N_f = N_o + \frac{a}{\frac{da}{dN}} \quad [-; -, \text{mm}, -] \quad (13)$$

kde N_f je počet cyklů do definitivního lomu v pájeném spoji, N_o je vypočtený počet cyklů do iniciace lomu, a je délka pájeného spoje, přes který se prasklina rozšiřuje a da/dN je míra růstu lomu v pájeném spoji. Na základě přírůstku energie lze vypočítat také průměrný objem energie v části systému podle vzorce (14), avšak výpočet již není významný pro odhad spolehlivosti pájeného spoje.

$$\Delta W_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n dW_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad [\text{MPa}; \text{MPa}, \text{mm}^3, \text{mm}^3] \quad (14)$$

kde dW_i je přírůstek energie části systému za jeden cyklus, n je celkový počet uvažovaných částí a V_i je objem části i . Darveauxeho model je velmi výhodný pro výpočet spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů u BGA pouzder, ale lze ho aplikovat i na další typy elektronických propojení.

Velmi podobným Darveaux modelu je také Akay vztah. Tímto modelem lze odhadnout počet cyklů do začátku lomu. Z toho důvodu se nehodí pro přesnější odhad spolehlivosti elektronických propojení, ale spíš pro popis typických jevů, které probíhají v pájeném spoji z hlediska pohybů energie. Model byl využit při odhadu spolehlivosti pájených spojů LTCC pouzder. Při dalších aplikacích nebyl testován. Model je založen na poměru celkové únavové energie absorbované v pájeném spoji během jednoho cyklu a experimentálně zjištěných koeficientů založených na struktuře pájky. Akay model je vyjádřen vzorcem (15)

$$N_f = \left(\frac{\Delta \bar{W}_{total}}{W_0} \right)^{\frac{1}{k}} \quad [-; MPa, MPa, -] \quad (15)$$

kde, N_f je počet cyklů do začátku lomu, ΔW_{total} je celková absorbovaná energie v pájeném spoji během jednoho cyklu, W_0 je experimentálně získaný koeficient pro bezolovnatou pájku a jeho hodnota se udává 0,1573. Posledním koeficientem je k , taktéž pro pro pájku SAC a hodnota je -0,6342. Podobným modelem je ještě Heinrich model, který taktéž uvažuje počet cyklů do počátku lomu a je vyjádřen vzorcem (16). Vztah byl úspěšně využíván pro odhad spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů BGA pouzder.

$$N_o = 18083 \Delta W^{-1,46} \quad [-; MPa] \quad (16)$$

kde, N_f je počet cyklů do začátku lomu a ΔW je hustota energie viskoplastické deformace v pájeném spoji za jeden cyklus. Uvedené číselné hodnoty byly získány experimentálně. Podobný vztah byl navržen i Jungem pro olovnatou pájku, a je vyjádřen vzorcem (17)

$$N_o = 7860 \Delta W^{-1,00} \quad [-; MPa] \quad (17)$$

kde, N_f je počet cyklů do začátku lomu a ΔW je hustota energie viskoplastické deformace. Uvedené číselné hodnoty byly získány experimentálně pro pájku 62Sn36Pb2Ag. Mírně odlišným modelem od předchozích modelů je model Pan vyjádřený vzorcem (18), jehož předmětem je sledovat kritickou hodnotu akumulované energie v pájeném spoji. Předpokladem v tomto případě je fakt, že se během teplotního cyklování akumuluje energie v pájeném spoji a eventuálně dosáhne kritické hodnoty C . Tato kritická hodnota pnutí ve spoji byla stanovena 4,55 MPa/mm³, při které by mělo dojít k lomu.

$$C = N_f^* (a E_p + b E_c) \quad \left[\frac{MPa}{mm^3}; -, -, MPa, -, MPa \right] \quad (18)$$

kde, C je kritická hodnota akumulované energie, N_f je počet cyklů do lomu, a , b jsou konstanty, které lze získat metodou konečných prvků. E_p a E_c představuje energii plastické a elastické deformace, ale je získat také metodou konečných prvků, například využitím nějakého simulačního programu.

Praktická část

V praktické části je cílem ověřit spolehlivost bezolovnatých pájených spojů kombinací několika metod. Pro odhad spolehlivosti lze využít různé přístupy, mezi které lze zahrnout teoretické únavové modely, simulační programy a experimentální měření. Nejjednodušším a nejrychlejším řešením je využití teoretického výpočtu, kterého lze dosáhnout aplikací některého z dostupných únavových modelů pro spolehlivostní výpočty. Tyto únavové modely jsou založeny na fyzikálním nebo matematickém principu a jejich cílem je co nejpřesnější výsledek, který by měl primárně udávat počet cyklů do lomu, respektive přerušení elektronického pájeného propojení. Těchto únavových modelů je velké množství a při odhadu spolehlivosti je třeba uvažovat velké množství proměnných v těchto modelech, aby byl výsledek získaný jejich aplikací velmi blízký realitě. Je potřeba přesně nadefinovat rozměry uvažovaných součástí, materiálové konstanty a podmínky, ve kterých bude uvažovaná elektronika pracovat. Slabou stránkou teoretických únavových modelů je zejména jejich závislost na některých parametrech materiálu, které nemusí být dostupné pro všechny kalkulované materiály.

Tyto parametry je potom nutné získat experimentálním způsobem, což nemusí být ve všech případech možné, a také to ztěžuje dynamickou aplikovatelnost únavového modelu. Kostru teoretických únavových modelů lze tedy charakterizovat třemi podmínkami, jejichž splněním je teoretický výpočet velmi přesný. Prvním podmínkou jsou správné rozměry všech zadaných součástí, dále přesné materiálové parametry a uvažované provozní podmínky. Dříve byly teoretické únavové modely jedinou alternativou k experimentálním měřením, jelikož nebyl k dispozici dostatečný výpočetní výkon a široká škála simulačních programů. Simulační programy jsou z hlediska struktury odhadu spolehlivosti velmi podobné teoretickým únavovým modelům, avšak zásadní rozdíl je v přesnosti získaných výsledků, kde se výsledky podstatně více blíží realitě. To je dané tím, že do teoretického výpočtu nelze zahrnout všechny fyzikální a chemické procesy, které probíhají při teplotním cyklování a proto výpočet teoretickým modelem nikdy nebude tak přesný jako při využití simulačního programu. V simulačním programu lze také přesněji nadefinovat geometrii pájeného spoje, kterou v teoretickém výpočtu nelze dostatečně zahrnout, jelikož se běžně počítá pouze s výškou spoje a s mechanickými vlastnostmi pájky.

Naproti tomu v simulačních programech, je možné spoj přesně vykreslit, i s nadefinovanými materiálovými konstantami. Spolehlivost bezolovnatých pájených spojů, lze také ověřit experimentálním způsobem, který lze charakterizovat jako nejspolehlivější metodu. Nejčastěji probíhá praktické ověření prostřednictvím zrychlených zkoušek. Při těchto zkouškách je pájený spoj vystaven vlivům prostředí, které nejsou za normálních podmínek běžné. Nejběžnější metodou je teplotní cyklování pájeného spoje, vystavení teplotním šokům, vibracím a dále vysokoteplotním rázům. Také lze pájený spoj testovat z pohledu mechanických vlastností v tahu stříhu a ohybu. V následujících kapitolách je spolehlivost bezolovnatých pájených spojů ověřena kombinací tří metod. Nejprve teoretickým výpočtem pomocí teoretických únavových modelů, dále simulací v programu ANSYS. Výsledky teoretického výpočtu a počítačové simulace jsou ověřeny experimentálním měřením.

5 Teoretický odhad spolehlivosti

Odhad spolehlivosti podle Engelmaier-Wild modelu je proveden u elektronických pájených propojení uvažovaných sestav. Tyto sestavy jsou vytvořeny ve čtyřech různých provedeních. Ve výpočtu se uvažuje bezolovnatá pájka SAC305, kterou jsou zapájeny keramické kondenzátory v jednotlivých sestavách. Prvním krokem při výpočtu spolehlivosti elektronických pájených propojení podle Engelmaier-Wild modelu je vypočítat průměrnou cyklickou teplotu pájeného spoje, která je dále nutná pro výpočet exponentu tvárnosti pájky. Průměrnou cyklickou teplotu pájeného spoje lze vypočítat podle vzorce (7) a dosazením do vzorce dostaneme:

$$\bar{T}_{sj} = \frac{1}{4}(T_c + T_{c,0} + T_s + T_{s,0}) = \frac{1}{4}(125 + (-40) + 125 + (-40)) = 42,5 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7)$$

Průměrná cyklická únavová teplota je vypočtena dosazením podmínek teplotního cyklování (viz tab. 14). Do výpočtu je dosazena minimální a maximální hodnota teploty na základním materiálu a dále minimální a maximální hodnota teploty na keramickém substrátu. Tyto hodnoty se mohou mírně lišit ale ve výpočtu je předpoklad, že na základním materiálu i na keramickém substrátu je stejná teplota.

Tab. 14: Teplotní parametry pro výpočet průměrné cyklické teploty

$T_c [^{\circ}\text{C}]$	$T_{c,0} [^{\circ}\text{C}]$	$T_s [^{\circ}\text{C}]$	$T_{s,0} [^{\circ}\text{C}]$
125	-40	125	-40

Získáním hodnoty průměrné cyklické teploty při definovaných podmínkách je možné dále vypočítat exponent tvárnosti pájky SAC305, který se skládá z experimentálně získaných materiálových konstant a teplotních podmínek (viz tab. 15), které jsou zohledněny průměrnou cyklickou teplotou. Exponent tvárnosti pájky je vypočítán podle vzorce (6).

$$\frac{1}{c} = c_0 + c_1 T_{sj} + c_2 \ln\left(1 + \frac{t_0}{t_D}\right) = 0,425 + 9,30 \cdot 10^{-4} \cdot 42,5^{\circ}\text{C} + (-1,92 \cdot 10^{-2}) \cdot \ln\left(1 + \frac{500}{900\text{s}}\right) = 0,511 ; c = \frac{1}{0,493} = 1,956 \quad [-; -, -, ^{\circ}\text{C}, -, -, t] \quad (6)$$

Tab. 15: Parametry pro výpočet exponentu tvárnosti pájky [4]

Typ pájky	C_0	C_1	C_2	t_0	$t_D [\text{s}]$	$T_{sj} [^{\circ}\text{C}]$
SAC 305	0,425	$9,30 \cdot 10^{-4}$	$-1,92 \cdot 10^{-2}$	500	900	42,5

V dalším kroku výpočtu podle Engelmaier-Wild modelu je nutné vypočítat cyklické únavové poškození. Při výpočtu cyklického únavového poškození je uvažován korekční parametr pájky, kterým je možné korigovat odchylky od představy ideálního pájeného spoje, dále parametr DNP, který charakterizuje vzdálenost od výchozího bodu keramického modulu k jeho hraně. Výchozí bod se nachází uprostřed keramického modulu. Dalšími parametry jsou teplotní roztažnost součástky a substrátu, rozdíl mezi maximální a minimální cyklovací teplotou a výška pájeného spoje. V případě spojení jednoho substrátu a jedné součástky lze

počítat pouze s dvěma hodnotami teplotní roztažnosti. V případě, že se jedná o spojení dvou substrátů přes součástku, tak je nejdříve nutné spočítat rozdíl teplotní roztažnosti mezi zvolenými substráty a následně rozdíl mezi celkovou teplotní roztažností obou substrátů a součástky (viz tab. 16).

Tab. 16: Hodnoty teplotní roztažnosti jednotlivých komponent [16] [17] [18] [19]

Komponenty sestav	CTE [ppm/°C]	Sestavy		CTE [ppm/°C]
FR-4	14			
Heralock HL2000	6,1	FR-4	Heralock HL2000	10,05
96% Al ₂ O ₃	7,1	FR-4	96% Al ₂ O ₃	10,55
C0805 BaTiO ₃	6,17			

Výška pájeného spoje je určena z rozdílu vzdálenosti mezi substrátem základní desky a keramického modulu. Dosazením klíčových parametrů lze vypočítat cyklické únavové poškození ze vzorce (4). Cyklické únavové poškození je vypočteno pro dva typy sestav. První sestavou je základní materiál FR-4 s osazeným keramickým materiálem Heraldock HL2000 a druhou základní materiál FR-4 s osazeným keramickým materiálem 96% Al₂O₃ (viz tab. 17).

$$\Delta D = \left[\frac{F \cdot DNP \cdot \Delta CTE \cdot \Delta T}{h} \right] = \left[\frac{0,7 \cdot 13,5 \cdot 3,88 \cdot 165}{0,45} \right] = 0,013 \left[-, mm, \frac{ppm}{^{\circ}C}, ^{\circ}C, mm \right] \quad (4)$$

Tab. 17: Parametry pro výpočet cyklického únavového poškození

Číslo sestavy	Složení sestavy	F [-]	DNP [mm]	ΔCTE [ppm/°C]	ΔT [°C]	h [mm]
1.	FR-4, Heraldock HL2000	0,7	13,5	3,88	165	0,45
2.	FR-4, 96% Al ₂ O ₃	0,7	13,5	4,38	165	0,45

Na základě parametrů získaných z předchozích výpočtů je možné vypočítat celkový počet cyklů do chyby pájeného spoje podle vzorce (3). Z těchto výpočtů jsou získány hodnoty pro dosazení exponentu tvárnosti pájky a cyklického únavového poškození. Hodnota koeficientu únavové tažnosti pro pájku SAC305 je získána experimentálně. [25]

$$N_f(50\%) = \frac{1}{2} \left(\frac{2\varepsilon'_f}{\Delta D} \right)^c = \frac{1}{2} \left(\frac{2 \cdot 0,425}{0,023} \right)^{1,956} = 1671 \quad [-; -, -] \quad (3)$$

Podle Engelmaier-Wild modelu je vypočten počet cyklů do poruchy pro definované sestavy (viz tab. 18). Dále je uveden koeficient únavové tažnosti, cyklické únavové poškození a exponent tvárnosti pájky. Z výpočtu vyplývá, že větší spolehlivost mají sestavy se základním materiálem FR-4 a keramickým substrátem Heraldock HL2000. Vyšší spolehlivost je způsobena menším rozdílem teplotní roztažnosti součástky a zvolených substrátů.

Tab. 18: Parametry pro výpočet podle Engelmaier-Wild modelu

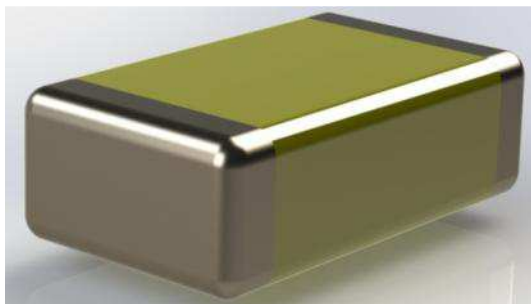
Sestava	Složení sestavy	ε'_f [-]	ΔD [-]	c [-]	$N_f(50\%)$ [cyklů]
1.	FR-4, Heraldock HL2000	0,425	0,013	1,956	1671
2.	FR-4, 96% Al ₂ O ₃	0,425	0,015	1,956	1317

6 Analýza struktur v programu ANSYS

Z hlediska provedení simulace v programu ANSYS je nejdůležitější vytvořit model, od kterého se odvíjí další kroky. Prvotní model je charakterizován pouze geometrickými parametry a není nutné v této fázi aplikovat materiálové parametry na jednotlivé části modelu. Tyto parametry jsou oddělenou částí přípravné fáze simulačního procesu a lze je nadefinovat před vytvořením modelu i po jeho vytvoření. Program ANSYS využívá pro vytváření modelu integrovaného prostředí s názvem DesignModeler, jenž je součástí hlavního systému ANSYS Workbench. Tento systém umožňuje vytvořit prostorový geometrický model objektu, součástky nebo sestavy určené pro simulaci. Výhodou prostředí DesignModeler je možnost propojení do většiny dalších dostupných CAD systémů, mezi které patří například program Solidworks nebo Autocad. Spolu s přesnou geometrií lze přenést i materiálové parametry a vlastnosti a další údaje. Tato vlastnost je velmi výhodná, jelikož lze využít pro vytvoření modelu CAD program, který je lépe uzpůsobený pro tvorbu geometrie. Geometrické prostředí ANSYSu je vhodné zejména pro zakreslení základních struktur, ale tvorba složitějších struktur zde není příliš komfortní. Z těchto důvodů byl hlavní model pro provedení simulace vytvořen v programu Solidworks 2012.

6.1 Návrh modelu

Program Solidworks je strojírenský 3D systém ve kterém je mimo jiné možné provádět také analýzy metodou konečných prvků, stejně jako v systému ANSYS. V tomto systému je proveden pouze návrh geometrie modelu bez simulačních procesů, jelikož prostředí ANSYS disponuje většími možnostmi pro aplikaci únavových modelů, které popisují fyzikální jevy a procesy v pájeném spoji během teplotního cyklování. Návrh modelu v programu Solidworks je velmi podobný návrhu v systému ANSYS a zásady tvorby se neliší výrazným způsobem. Návrh modelu probíhá v několika krocích. Nejprve jsou rozkresleny 2D skicy jednotlivých dílů, ze kterých jsou následně vytvořeny 3D struktury. Mezi základní díly lze zahrnout základní materiál FR-4, všechny typy keramických substrátů, měděné plošky na základním materiálu a dále plošky vytvořené na keramických substrátech prostřednictvím metody sítotisku. Samostatnou kategorií je geometrie keramického kondenzátoru (viz obr. 18) a geometrie pájeného spoje (viz obr. 19). Rozměry základních substrátů jsou přesně definovány a kopírují rozměry materiálů předpokládaných v praktickém měření. Tyto rozměry byly získány prostřednictvím měření posuvným měřítkem a mikrometrem.



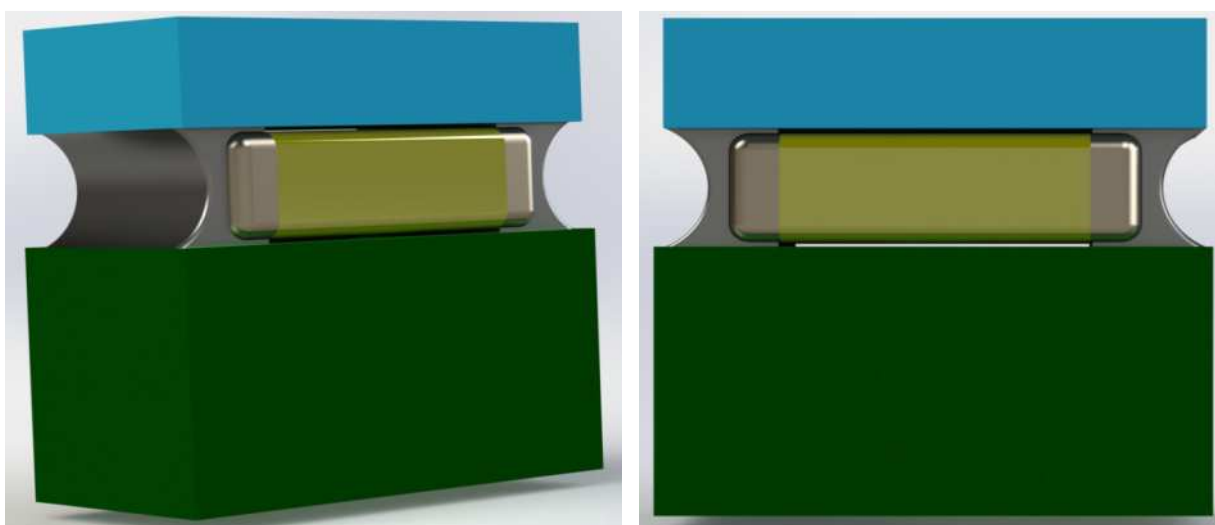
Obr. 18: Model kondenzátoru 0805 (a) celkový pohled (b) pohled z boku

Rozměry pájeného spoje je obtížné naměřit přesným způsobem, jelikož disponuje specifickou geometrií, která se navíc liší u jednotlivých pájených propojení. To může být způsobeno například nehomogenními teplotními podmínkami při pájení přetavením v pájecí peci. Dále mohou hrát roli lokální nečistoty na částech substrátu, díky kterým se dostatečně nesmočí pájka na pájecí plošce. Z tohoto důvodu je z hlediska simulace výhodnější nadefinovat spoj v optimální podobě, aby nebyly výsledky analýzy zkresleny parametry jednoho modelu, který nemusí vystihovat realitu u dalších pájených propojení.



Obr. 19: Model pájeného spoje (a) celkový pohled (b) pohled z boku

Pájený spoj je nadefinován svými parametry tak, aby vystihoval charakter pájeného propojení, který se předpokládá v případě kvalitně a dokonale zapájeného spoje. Geometrie keramického kondenzátoru je na pohled relativně složitá, jelikož není charakterizována ostrými hranami. Proto je geometrie tohoto kondenzátoru vytvořena jako kombinace měření reálných parametrů prostřednictvím mikrometru, dále katalogových hodnot od výrobce a posouzením skutečného vzhledu.



Obr. 20: Sestava FR-4-keramický modul (a) celkový pohled (b) pohled z boku

Po vytvoření všech dílů následuje zhotovení sestavy z těchto dílů. Proces tvorby sestavy spočívá v přidání jednotlivých dílů do sestavy a nastavení vazebných vztahů mezi jednotlivými díly (viz obr. 20). Tyto vazby je vhodné nastavit co nejdokonaleji, aby výsledný model byl věrný reálné sestavě. U jednotlivých dílů lze v programu Solidworks nastavit také různé reálné parametry, mezi které lze zahrnout fyzikální (viz tab. 19), chemické a tepelné (viz tab. 20) vlastnosti nebo vzhled součástí. Tyto parametry jsou přiřazeny k jednotlivým dílům. Z hlediska materiálových parametrů jsou nastaveny přesné parametry jednotlivých látek. Z hlediska vzhledu jsou nastaveny barvy více kontrastní, než reálné barvy, z důvodu přehlednosti. Výsledná sestava je následně uložena a je možné ji importováním přenést do DesignModeleru v programu ANSYS. Přenesením do programu ANSYS je vytvořen model, na který lze následně aplikovat další simulační procesy. Import není úspěšný z hlediska materiálových parametrů, které byly nadefinovány v programu Solidworks, a proto je nutné tyto parametry nadefinovat znovu v prostředí Workbench. Stejná situace je v i případě barev, které jsou modelu v DesignModeleru přiděleny náhodně a proto je nutné nastavit tyto barvy manuálně. Z hlediska přenosu geometrie import proběhl úspěšně.

Tab. 19:Fyzikální a mechanické parametry jednotlivých materiálů

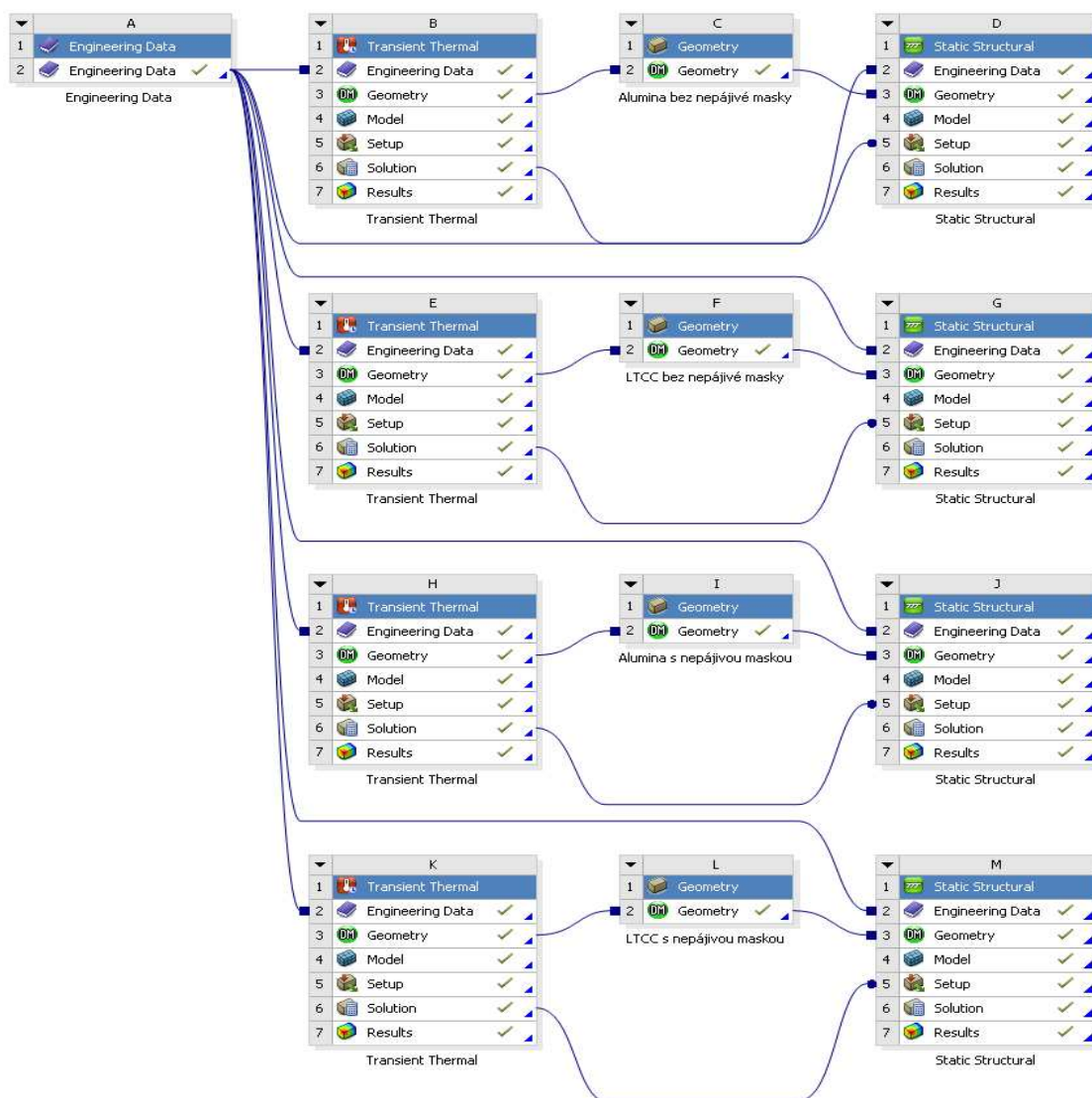
Materiál	Hustota [g/cm ³]	Youngův modul [GPa]		Poissonova konstanta [-]		Ref.
FR-4	2,1	x	25,8	xy	0,177	[16] [35]
		y	21,9	xz	0,171	
		z	25,8	yz	0,177	
96% Al ₂ O ₃	3,67	300		0,21		[18] [36]
Heralock 2000	2,9±0,5	240		0,32		[17] [47]
SAC305	7,5	51		0,36		[32] [33] [37]
Měď	8,93	76		0,35		[34]
Nepájivá maska	-	6,9		0,35		[34]
C0805 BaTiO3	6,02	67		0,32		[48]

Tab. 20:Tepelné parametry jednotlivých materiálů

Materiál	CTE [ppm/°C]	Tepelná vodivost [W/mK]	Měrné teplo [J/gK]	Ref.
FR-4	14	0,4	0,12	[16] [39]
96% Al ₂ O ₃	7,1	24	0,880	[18] [41]
Heralock 2000	6,1	3	-	[17]
SAC305	21,6	64	0,23	[33] [38]
Měď	17	401	0,385	[39]
C0805 BaTiO ₃	6,17	6	0,527	[48]
Nepájivá maska	19	0,4	0,12	[34]

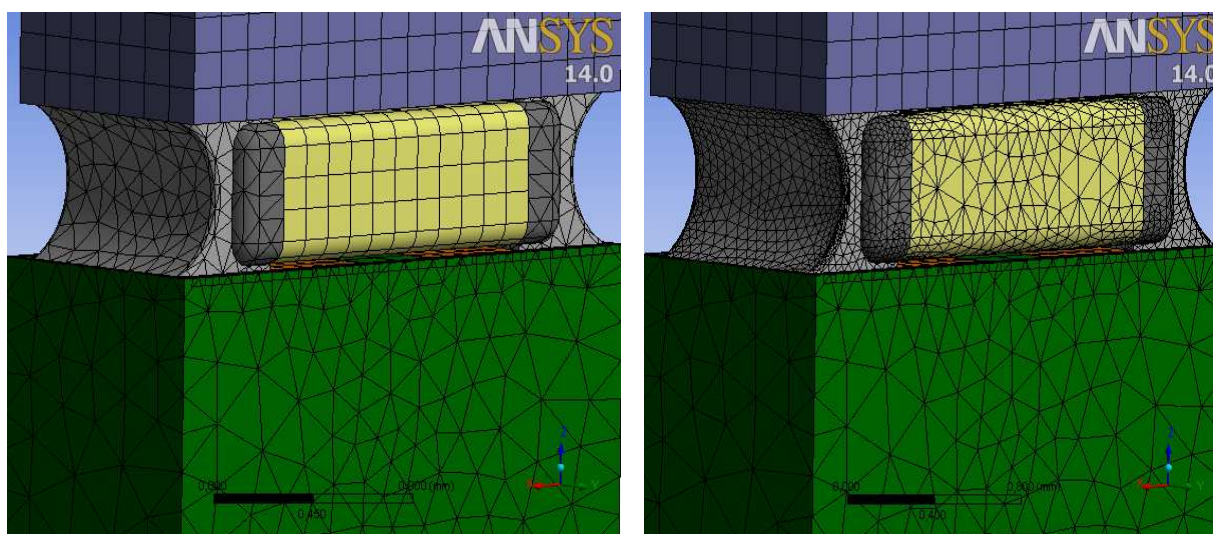
6.2 Nastavení parametrů simulace

Simulace v programu ANSYS je realizována v prostředí Workbench, kde lze z jednotlivých modulů sestavit výslednou analýzu, přičemž tyto moduly jsou vždy stejné pro každý typ analýzy (viz obr. 21). Mezi části pro provedení simulace lze zahrnout modul materiálových dat, geometrii modelu, nastavení modelu a nastavení podmínek výpočtu. Základními kroky před provedením vlastní simulace jsou vložení materiálových dat, geometrie modelu a nastavení parametrů modelu. Nejdříve je proveden import geometrie modelu, pro kterou je v programu ANSYS vytvořeno prostředí DesignModeler, ve kterém je možné také geometrii modelu vytvořit. Výsledkem tohoto importu je přesný geometrický model, jak byl navržen v programu SolidWorks. Vzhledem k tomu, že se nepodařilo importovat také materiálové parametry, je nutné znovu tyto parametry nadefinovat v programu ANSYS.



Obr. 21: Schéma simulace v prostředí ANSYS Workbench

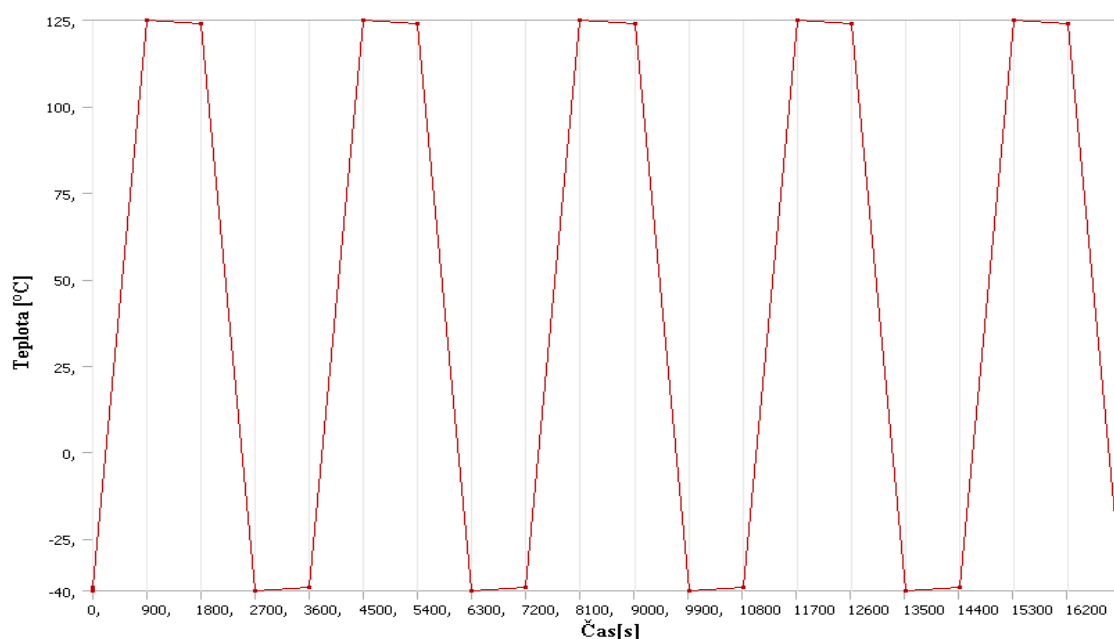
Po nadefinování materiálových parametrů je možné tyto parametry přiřadit k jednotlivým materiálům v prostředí Mechanical, kde následně probíhá i výsledná simulace. Součástí přípravy modelu je také nadefinování mechanických parametrů spojů mezi jednotlivými díly sestavy a vytvoření sítě uzlových bodů na modelu, ve kterých probíhá výpočet (viz obr. 22a). Základní síť uzlových bodů nemusí být dostatečně kvalitní pro výpočet z hlediska počtu uzlových bodů v síti a z toho důvodu je vhodné síť uzlových bodů upravit v kritických místech důležitých pro výpočet a případně v nerovných a zaoblených místech, kde může docházet k nepřesnostem ve výpočtu. Proto je základní síť upravena v oblasti pájených spojů a zaoblených míst kondenzátoru (viz obr. 22b). Po vygenerování sítě uzlových bodů na modelu jsou nastaveny podmínky simulace.



Obr. 22: (a) Základní síť uzlových bodů (b) Upravená síť uzlových bodů

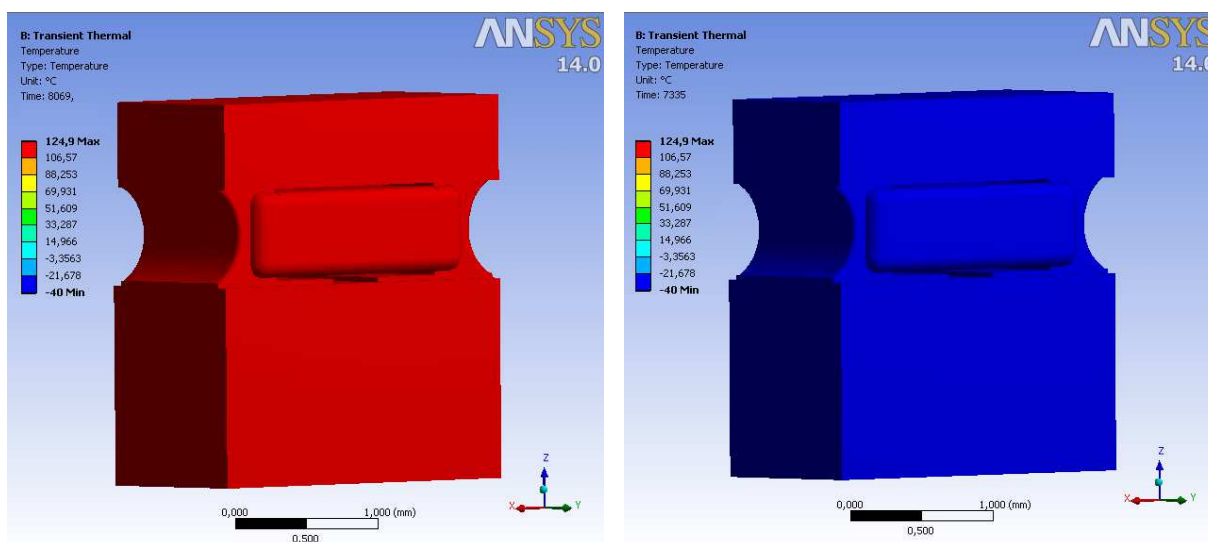
Analýza spolehlivosti se skládá ze dvou částí, nejdříve je provedena transienční teplotní analýza, kterou je určen prostup tepla sestavou v závislosti na čase a teplotních podmínkách a dále statická strukturní analýza, která vychází z teplotních podmínek, určených v transienční teplotní analýze. Teplotní analýza je transienční, jelikož jsou předmětem řešení přechodové děje, ke kterým dochází v systému v závislosti na změnách teploty při teplotním cyklování. Základními materiálovými parametry pro tento typ analýzy jsou hodnoty tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity a dále také hustota. Tepelná vodivost je fyzikální vlastnost, která určuje schopnosti látky z hlediska vedení tepla. Tyto schopnosti jsou vyjádřeny rychlostí, kterou se teplo šíří z jedné zahřáté části objektu do jiných částí.

Pro teplotní analýzu jsou nadefinovány totožné podmínky, které působí na sestavu v teplotní komoře během teplotního cyklování, prostřednictvím hodnot v tabulce. Teplotní cyklování je nadefinováno pro pět stejných cyklů (viz obr. 23), které postačují pro zjištění změny fyzikálních ukazatelů během jednoho cyklu ve statické strukturní analýze. Počet cyklů v programu ANSYS je také značně limitován vzhledem k výkonnostním a úložným kapacitám výpočetní jednotky, avšak pro výpočet je dostačující i menší počet cyklů. Výstupem teplotní analýzy (viz obr. 24) je soubor teplotních podmínek, který je následně převeden do nastavení statické strukturní analýzy.



Obr. 23: Profil teplotní analýzy v programu ANSYS

Po dokončení teplotní analýzy pro všechny typy testovaných sestav jsou vloženy moduly statické strukturní analýzy, na které je napojeno řešení získané z teplotní analýzy. Toto řešení se následně objeví v parametrech statické strukturní analýzy, kde je potřeba doplnit jednotlivé časy, ve kterých bude statická strukturní analýza probíhat. Pro statickou strukturní analýzu jsou nadefinovány jednotlivé materiály prostřednictvím Youngova modulu, Poissonovy konstanty a teplotní délkové roztažnosti.



Obr. 24: Teplotní analýza sestavy (a) maximální teplota (b) minimální teplota

Youngův modul je jedním z typů modulů pružnosti a nazývá se také modulem pružnosti v tahu. Mezi další typy modulů pružnosti lze zmínit modul pružnosti ve smyku a modul objemové pružnosti. Modul pružnosti v tahu je možné definovat jako poměr napětí a deformace, která je vyvolána tímto napětím, což je vyjádřeno vzorcem (19).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [Pa; Pa, -] \quad (19)$$

kde E je modul pružnosti v tahu, σ je napětí v tahu a ε je relativní deformace, která se určuje jako poměr mezi délkou prodloužení tělesa a původní délkou tělesa. Dále se určuje Poissonova konstanta, která je poměrem relativního zkrácení a relativního prodloužení vzorku, jenž je namáhán tlakem a pro většinu materiálů se hodnota pohybuje mezi 0 až 0,5. Z hlediska teplotního působení se definuje teplotní délková roztažnost, což je jev při kterém se mění délka tělesa v závislosti na teplotě. Po přiřazení jednotlivých materiálů k částem sestavy je ještě nutné nastavit chování jednotlivých spojení částí sestav, které se nastavuje podle charakteru spojení (viz tab. 21). Základním parametrem nastavení spojů je zejména forma průniku kontaktů a symetrie spojení.

Tab. 21: Modely spojení jednotlivých částí v programu ANSYS

	Pure penalty	Rozšířený Lagrange	Normální Lagrange	MPC
Průnik kontaktů	Přítomný, neřízený	Přítomný, řízený do určitého stupně	Přítomný, průnik je blízký nule	Bez průniku
Symetrie	Symetrický, asymetrický kontakt	Symetrický, asymetrický kontakt	Pouze asymetrický kontakt	Pouze asymetrický kontakt

Mezi součásti nastavení statické strukturní analýzy lze zahrnout teplotní podmínky získané z proměnné teplotní analýzy a dále možnosti fyzikální podpory proti pohybu sestavy v různých směrech. Výsledkem strukturní analýzy je deformační energie v pájeném spoji a ekvivalentní napětí, které jsou dále využity při výpočtu spolehlivosti. Nejdříve je provedena simulace ekvivalentního napětí v pájeném spoji u sestav bez nepájivé masky a výstupem této simulace je přírůstek ekvivalentního napětí během jednoho cyklu. Tato hodnota není přímým výstupem simulace, ale je získána z rozdílu jednotlivých hodnot v každém cyklu. Simulace je z hlediska časového rozpětí nadefinována pro pět teplotních cyklů, které svým průběhem kopírují podmínky cyklování v teplotní komoře, přičemž ANSYS poskytuje údaje o pnutí ve spoji pro každý nadefinovaný časový bod analýzy.

Z toho vyplývá, že simulace 5 reálných cyklů probíhá v 21 krocích, přičemž se mění teplota v každém kroku, který trvá 15 minut. Celkový přírůstek ekvivalentního napětí během jednoho cyklu je spočítán tím způsobem, že jsou nejdříve zjištěny hodnoty změny napětí během jednoho cyklu mezi každým cyklem a z těchto hodnot je následně vytvořen průměr. Průměrný přírůstek ekvivalentního pnutí ve spoji během jednoho cyklu je využit k výpočtu spolehlivosti elektronického pájeného propojení podle Darveauxeho modelu, kde je vypočten počet cyklů do začátku lomu, poté míra rychlosti růstu lomu a z těchto dvou hodnot konečný počet cyklů do poruchy pájeného propojení.

6.3 Výpočet spolehlivosti pomocí Darveaux modelu

Výpočet spolehlivosti podle Darveaux modelu probíhá v několika krocích, přičemž je nejdříve nutné ze simulace zjistit přírůstek ekvivalentního během jednoho cyklu a dosadit do vzorce (14).

$$\Delta W_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n dW_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{0,14 \cdot 0,12}{0,12} = 120 \quad [MPa; MPa, mm^3, mm^3] \quad (14)$$

kde dW_i je přírůstek energie části systému za jeden cyklus, n je celkový počet uvažovaných částí a V_i je objem části i . Objem pájeného spoje je zjištěn z modelu v programu Solidworks. Vypočtením průměrného přírůstku ekvivalentního napětí během jednoho cyklu lze vypočítat počet cyklů do okamžiku, kdy začne v pájeném spoji vznikat trhlinka. Tento počet cyklů lze získat ze vzorce (11).

$$N_0 = C_1 \Delta W^{C_2} = 11,6 \cdot 0,14^{-1,52} = 230 \quad [-; \frac{cykl}{MPa}, MPa, -] \quad (11)$$

kde N_0 je počet cyklů do vytvoření lomu, C_1 a C_2 jsou materiálové konstanty a ΔW je přírůstek ekvivalentního napětí v pájeném spoji během jednoho cyklu. Po vypočtení počtu cyklů do vytvoření lomu je vypočtena rychlost rozšiřování lomu podle vzorce (12).

$$\frac{da}{dN} = C_3 \Delta W^{C_4} = 1,954 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14^{0,98} = 0,0002845 \quad [-; \frac{mm}{cykl}, MPa, -] \quad (12)$$

kde, da/dN představuje míru růstu lomu během jednoho cyklu, C_3 a C_4 jsou materiálové konstanty a ΔW je přírůstek napětí v pájeném spoji během jednoho cyklu.

Tab. 22: Konstanty pájky pro výpočet podle Darveaux modelu

Konstanta	Význam	Hodnota	Jednotka
C1	Koeficient počátku lomu	11,6	cykl/MPa
C2	Exponent počátku lomu	-1,52	[-]
C3	Koeficient růstu lomu	$1,954 \cdot 10^{-3}$	mm/cykl/MPa
C4	Exponent růstu lomu	0,98	[-]

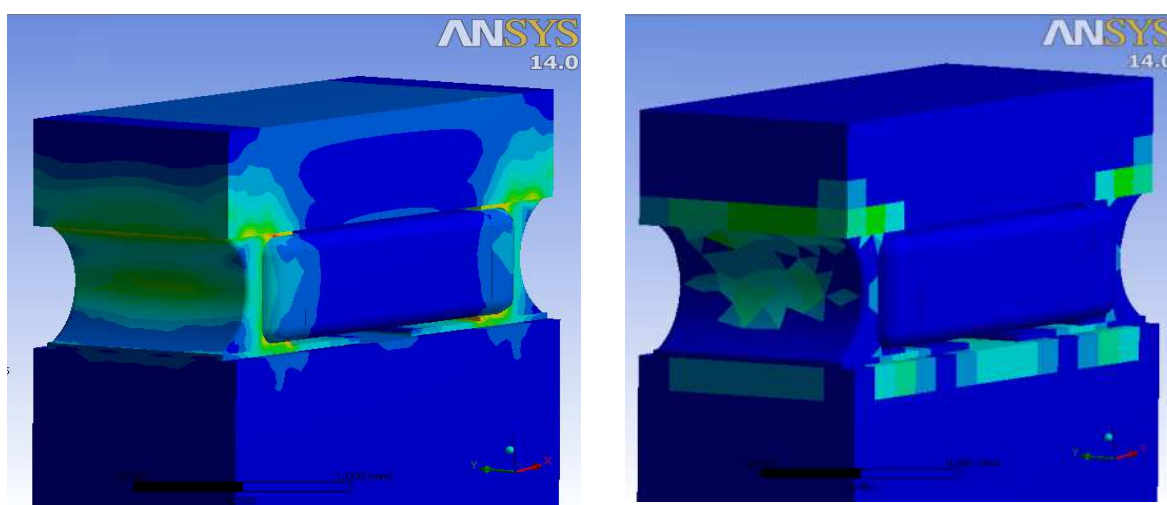
Na základě získaných výsledků z předchozích dvou vztahů, které udávají počet cyklů do začátku lomu a míru rozšiřování lomu, lze vypočítat celkovou životnost pájeného spoje. Dosazením do vzorce (13) lze získat

$$N_f = N_0 + \frac{a}{\frac{da}{dN}} = 230 + \frac{0,25}{0,0002845} = 1109 \quad [-; -, mm, -] \quad (13)$$

kde N_f je počet cyklů do definitivního lomu v pájeném spoji, N_0 je vypočtený počet cyklů do iniciace lomu, a je délka pájeného spoje, přes který se prasklina rozšiřuje a da/dN je míra růstu lomu v pájeném spoji.

6.4 Vyhodnocení výsledků získaných simulací

Simulace a následný výpočet spolehlivosti je proveden pro čtyři různé typy sestav, přičemž se hodnotí ekvivalentní napětí ve spoji a působení deformační energie, což jsou dva základní ukazatele, které lze využít pro výpočet spolehlivosti podle Darveaux modelu. Další výpočet závisí kromě hodnot ze simulace také na experimentálně získaných parametrech dané pájky (viz tab. 22). Z toho důvodu je ekvivalentní napětí ve spoji vybráno jako hlavní ukazatel, jelikož je pro tento parametr dostupný větší soubor experimentálně získaných dat pro nejpoužívanější pájky. Výpočet spolehlivosti je tedy proveden na základě ekvivalentního napětí (viz obr. 25a) ve spoji a působením deformační energie (viz obr. 25b) jsou pouze znázorněny kritické oblasti v pájeném spoji.



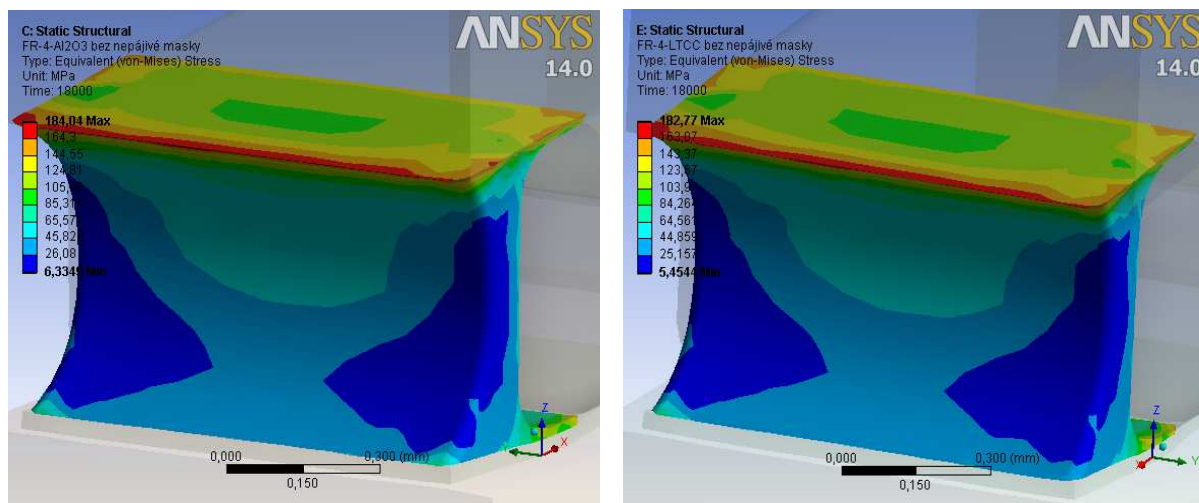
Obr. 25: (a) Ekvivalentní napětí (b) Oblast působení deformační energie v sestavě

Nejvyšší hodnoty přírůstku ekvivalentního napětí během jednoho cyklu jsou zjištěny u sestav s korundovými keramickými substráty a menší u sestav s nízkoteplotní keramikou LTCC, čímž je potvrzen teoretický předpoklad vycházející z materiálových vlastností těchto substrátů. Hodnoty ekvivalentního napětí jsou hlavním faktorem, na základě kterého se v případě Darveaux modelu pohybuje výsledná spolehlivost. To znamená, že při větších hodnotách tohoto napětí dochází k nižšímu výslednému počtu cyklů do poruchy (viz tab. 23). Z tabulky je vidět, že u sestavy s korundovou keramikou začíná lom ve spoji vznikat již při dosažení 230 teplotních cyklů a konečná porucha pájeného spoje je zjištěna při 1109 cyklech.

Tab. 23: Parametry jednotlivých sestav pro výpočet podle Darveauxeho modelu

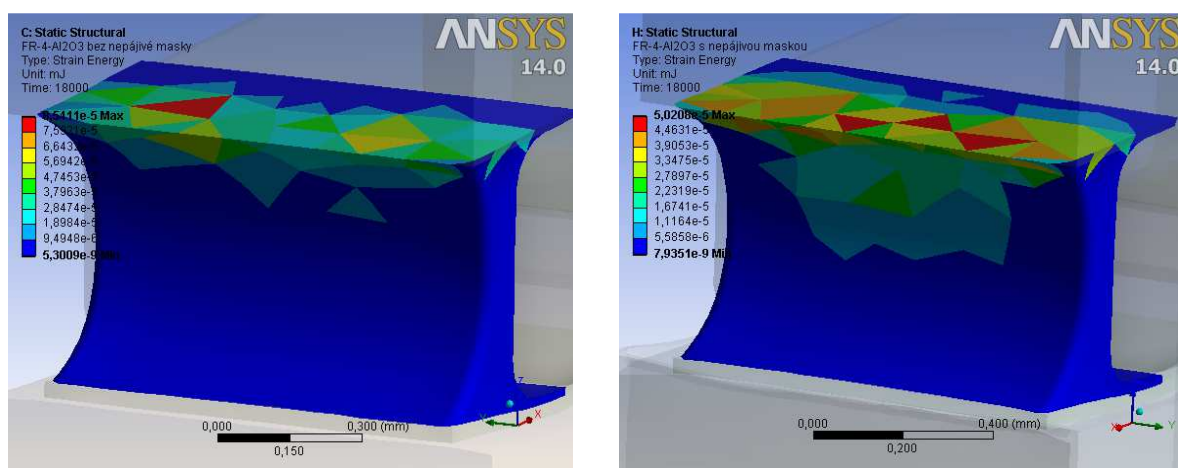
Sestava			ΔW_{ave} [MPa]	N_0 [cyklů]	da/dN [-]	N_f [cyklů]
Základní materiál	Keramický modul	Nepájivá maska				
FR-4	Alumina	Ne	0,140	230	0,0002845	1109
FR-4	LTCC	Ne	0,120	291	0,0002446	1313
FR-4	Alumina	Ano	0,135	243	0,0002746	1154
FR-4	LTCC	Ano	0,125	273	0,0002550	1255

Dále je zjištěno ekvivalentní napětí na modelu s nadefinovanou nízkoteplotní keramikou, kde je hodnota změny tohoto napětí během jednoho cyklu nižší, a proto je také zjištěna vyšší spolehlivost této sestavy. Lom u této sestavy začíná vznikat při 291 cyklech a ke konečné poruše dochází při 1313 cyklech, což je také podpořeno nižší mírou rychlosti růstu lomu.



Obr. 26: Ekvivalentní napětí sestav bez masky (a) Al_2O_3 (b) LTCC

Simulace je provedena také pro sestavy s nepájivou maskou, kde je cílem zhodnotit vliv nepájivé masky na integritu sestav a výslednou spolehlivost. Z výsledků simulace vyplývá, že u sestav s nepájivou maskou je menší přírůstek ekvivalentního napětí v pájeném spoji, než u sestav bez nepájivé masky a je tak zjištěna vyšší spolehlivost těchto sestav. To je vidět také v případě zhodnocení z hlediska působení deformační energie, která je vyšší u sestav bez nepájivé masky (viz obr. 27). V případě zobrazení oblastí působení deformační energie je využito základní sítě uzlových bodů, jelikož je lépe vidět rozložení energie. Výsledné zjemnění je provedeno pro výpočet přírůstku ekvivalentního napětí ve spoji.

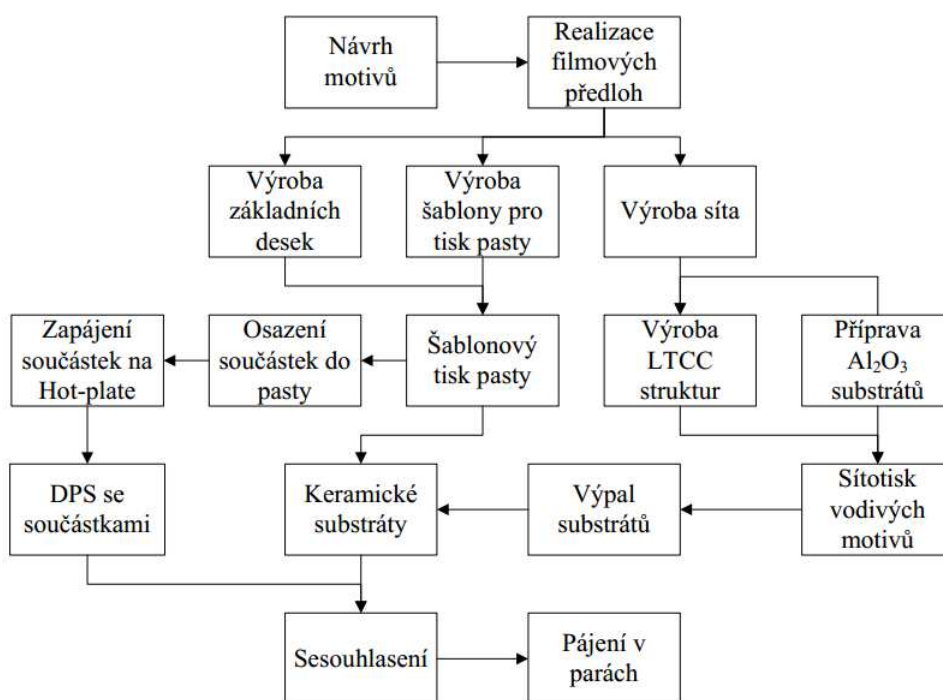


Obr. 27: Deformační energie (a) Alumina bez masky (b) Alumina s maskou

7 Realizace testovacích sestav

Pro účely ověření výsledků, které jsou získány teoretickými výpočty a následně simulací v programu ANSYS, jsou navrženy a vyrobeny testovací struktury (viz obr. 28). Účelem těchto testovacích struktur je získat prakticky naměřené hodnoty prostřednictvím reálného cyklování v teplotní komoře. Simulační část je s praktickou částí do jisté míry v průniku a v určité části jednotlivých procesů se tyto metody rozcházejí a opět pronikají. Z hlediska simulace je nejdříve nutné nakreslit model testované struktury a jednotlivým dílům této struktury přiřadit materiálové parametry, což se z části rozchází a z části koresponduje s praktickým modelem. V případě tvorby praktické struktury je nutné také začít kreslením požadovaných rozměrů a motivů, které jsou následně technologickými procesy přeneseny do reálného stavu.

Cílem je realizace maximálně shodných testovacích struktur se strukturami vytvořenými v simulaci a opačně v simulaci vytvořit struktury maximálně shodné s vyrobenými strukturami. Pro účely experimentu jsou nejdříve v programu Eagle navrženy motivy, na základě kterých jsou vyrobeny filmové předlohy pro výrobu základních desek a dále pro výrobu šablony pro tisk pasty a síta pro zhotovení vodivého motivu na keramických substrátech. Výsledné testovací struktury zahrnují základní desku plošných spojů a keramický substrát s vodivým motivem (viz tab. 24). Tyto dvě části jsou k sobě spojeny prostřednictvím keramických kondenzátorů 0805 zapájených na měděný motiv na základní desce a na vodivý stříbrný motiv vytištěný na keramickém substrátu. Popisované spojení substrátu základního materiálu a keramického modulu přes SMD součástku je registrováno jako užitný vzor PUV 2008-20682 – Elektronická sestava DPS.



Obr. 28: Proces realizace testovacích struktur

Základní deska i keramické substráty jsou zhotoveny v různých provedeních z hlediska povrchové úpravy, ale při zachování stejných rozměrů. Kompletní proces realizace testovacích struktur lze rozdělit na dvě části, jelikož je proces výroby vodivého motivu na předpokládaných materiálech odlišný. Základní desky plošného spoje jsou vyrobeny prostřednictvím substrativní technologie, kdy je motiv plošného spoje vyleptán do základního materiálu plátovaného měděnou fólií. Základní desky jsou po vyleptání motivu uloženy do suchého boxu, aby na vzduchu nedošlo k oxidaci měděných spojů na desce.

Tab. 24: Druhy materiálů, technologie výroby a počty kusů částí sestav

	Materiál	Proces	Počet kusů
Základní deska	FR-4	Substrativní metoda	18
	FR-4, nepájivá maska, HAL	Substrativní metoda	4
LTCC substráty	Heralock HL2000 + TC0306	Laminace, Sítotisk	9
Al₂O₃ substráty	96% Al ₂ O ₃ + ESL9912-K	Sítotisk	13
Pájené propojení	Kester EM907 SAC305	Šablonový tisk Hot-plate Pájení přetavením	64/deska
Keramické kondenzátory	C0805 – BaTiO ₃	Osazení do pasty	32/deska

Na čtyřech těchto deskách je vyrobena nepájivá maska a ošetření pájecích ploch povrchovou úpravou HAL, pro účely porovnání s deskami bez úprav. Na hotové desky je natištěna pasta prostřednictvím šablony vytvořené z měděné fólie. Touto pastou je bezolovnatá pájecí pasta Kester EM907 SAC305. Na pájecí plošky do natištěné pasty jsou dále osazeny keramické kondenzátory 0805 a jednotlivé desky jsou zapájeny přetavením na horké desce. Druhou částí realizace struktur je vytvoření LTCC struktur a příprava Al₂O₃ substrátů. Pro tisk vodivých motivů na keramické substráty je vyrobeno síto a prostřednictvím sítotisku je na jednotlivé substráty vytisknuta struktura vodivého motivu a substráty jsou vypáleny ve vsázkové peci. Po vypálení keramických substrátů je na tyto substráty natisknuta pasta prostřednictvím šablonového tisku, podobně jako v případě tisku pasty na základní desky. Zkompletování základních desek a keramických modulů je provedeno prostřednictvím opravárenské stanice Fritsch a sesouhlasené sestavy jsou zapájeny parami v pájecí peci (viz tab. 25).

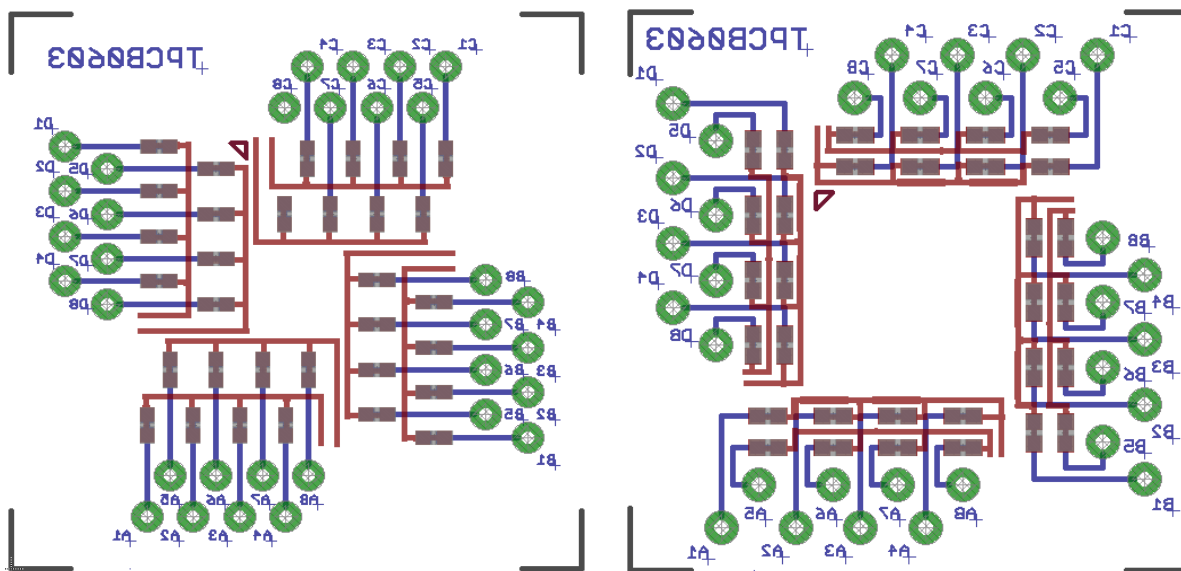
Tab. 25: Parametry a počet kusů realizovaných sestav

DPS		Keramický substrát		Pájka	Počet
Materiál	Povrchová úprava	Materiál	Vodivý motiv	-	[ks]
FR-4	Nepájivá maska, HAL	Heralock HL2000	TC0306	SAC305	2
FR-4	Nepájivá maska, HAL	96% Al ₂ O ₃	ESL9912-K	SAC305	1
FR-4	Nepájivá maska, HAL	96% Al ₂ O ₃	TC0306	SAC305	1
FR-4	Bez úpravy	Heralock HL2000	TC0306	SAC305	7
FR-4	Bez úpravy	96% Al ₂ O ₃	ESL9912-K	SAC305	6
FR-4	Bez úpravy	96% Al ₂ O ₃	TC0306	SAC305	5

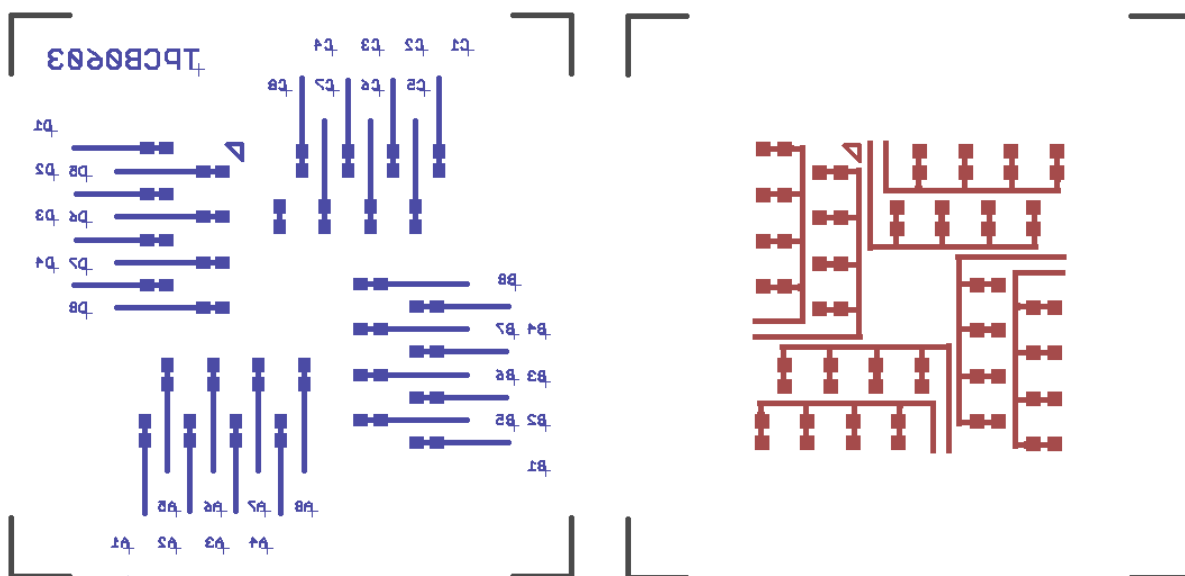
7.1 Návrh motivů pro testování pájených propojení

Návrh motivů pro testování elektronických pájených propojení je proveden v programu Eagle. Jsou navrženy dva základní motivy pro zhotovení sestav (viz obr. 28). Na prvním motivu jsou SMD součástky umístěny kolmo ke hraně základního substrátu a na druhém jsou umístěny podélně ke hraně materiálu. Pro konečnou výrobu je využito pouze návrhu, kde jsou součástky umístěny kolmo ke hraně substrátu. Omezení na jediný návrh je provedeno z hlediska relativně malého počtu testovaných vzorků vzhledem k normě a při zanesení více druhů návrhů by výsledky měření nebyly dostatečně relevantní. Základem provedených návrhů je provedení plošných spojů pro více druhů substrátů a pro více technologií zhotovení těchto plošných spojů.

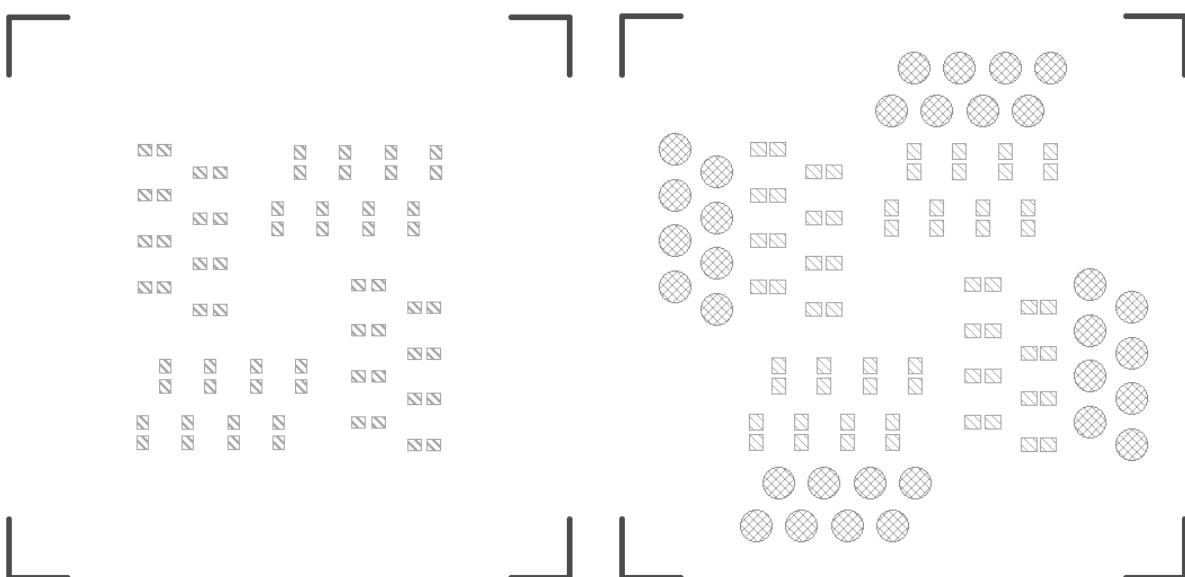
Dále jsou v návrhu umístěny pájecí plošky pro uchycení 32 SMD součástek 0805, na kterých je provedeno experimentální měření spolehlivosti pájených propojení. Cesty plošných spojů jsou zakresleny v jednom návrhu pro více druhů substrátů v jednotlivých vrstvách, tak aby rozdílné substráty mohly být přesně zapojeny k sobě (viz obr. 29). Plošné spoje vytvořené modrou barvou představují vodivé cesty vytvořené substrativní metodou v mědi naplátované na základní materiál FR-4. V červené barvě jsou vidět vodivé cesty, které jsou předlohou pro vytvoření filmu, na základě kterého je zhotoveno síto pro tisk vodivé cesty na keramické substráty (viz obr. 30). Podle pájecích plošek jsou vytvořeny i motivy pro filmové předlohy šablony, kterou je natisknuta pasta pájených propojení a předloha pro nepájivou masku (viz obr. 31).



Obr. 29: Návrh plošných spojů a vodivých motivů v programu Eagle



Obr. 30: Návrhy pro výrobu vodivých motivů na substrátech



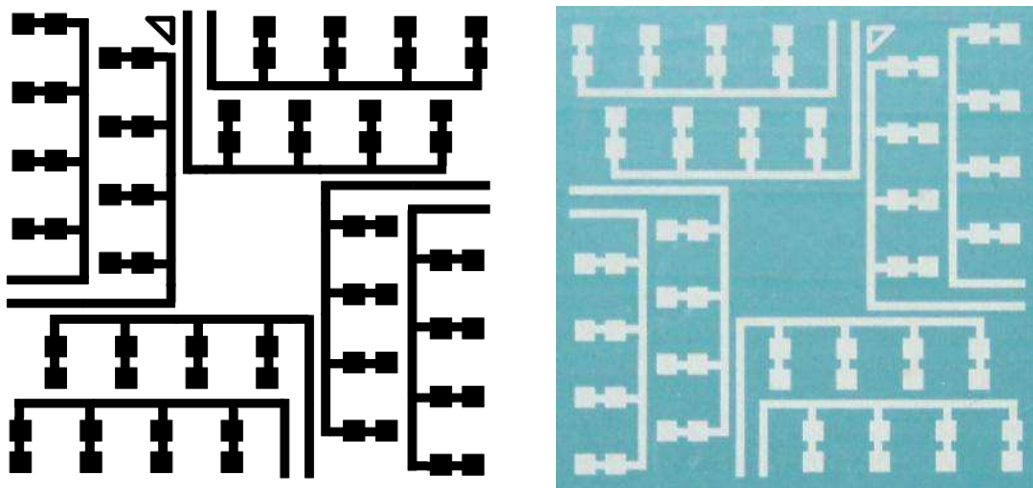
Obr. 31: Motivy pro výrobu nepájkivé masky a šablony pro tisk pasty

7.2 Výroba síta pro tisk motivů na keramické substráty

Pro natisknutí vodivých motivů na korundových substrátech a na LTCC substrátech je zhotoveno síto pro tisk vodivé pasty prostřednictvím sítotiskového stroje. K vytvoření motivu na sítu je využito již hotové síto napnuté v rámu. Připravené síto je očištěno prostřednictvím emulze. Síto je následně vysušeno a opatrně ponořeno do vody. S vody je nutné síto jemně vytáhnout tak, aby mezi jednotlivými oky síta byla zachycena tekutina. Na připravené ovlhčené síto je nanesen film pro výrobu vysoce jakostních sítotiskových šablon KIWO FILM DS-25, který je odolný proti ředidlům i vodě. Po odstranění nosné fólie šablonového filmu, je tento film vtlačen válečkem do ok síta. Následuje sušení síta po jeho dokonalém přichycení.

Po vysušení tkaniny na sítu je síto vloženo do UV komory, která je zároveň vybavena vývěvou pro odčerpání vzduchu z prostoru pro osvětlení síta. To je z důvodu pevného a rovnoměrného přitlačení předlohy na síto. Pokud by nebyla předloha pevně přiložena na síto, mohlo by dojít ke zkreslení motivu, vlivem podsvícení černých míst na filmové předloze. Takové podsvícení by mohlo velmi výrazně pozměnit výsledné rozměry motivu, který bude natisknut na substráty. Osvit filmové předlohy na sítu trvá po dobu 30 sekund. Je nezbytné dodržet tento čas, jelikož při kratším osvitu je kapilární film nedostatečně vytvrzen a při jeho omytí vodou se odplaví i s motivem. Naopak při delším osvitu dochází opět k porušení integrity kapilárního filmu.

Motiv pro filmovou předlohu je vytvořen v programu Eagle a podle této předlohy je vyrobena osvitem na fólii filmová předloha (viz obr. 32). Filmová předloha je vyrobena v pozitivním provedení tak, že při přiložení této pozitivní fólie na kapilární film, dochází k vytvrzení kapilárního filmu mimo vodivé cesty. V místech, kde se předpokládají vodivé cesty, je kapilární film odplaven a oka na sítu jsou volná. Těmito aperturami následně probíhá tisk vodivé pasty na keramické substráty.

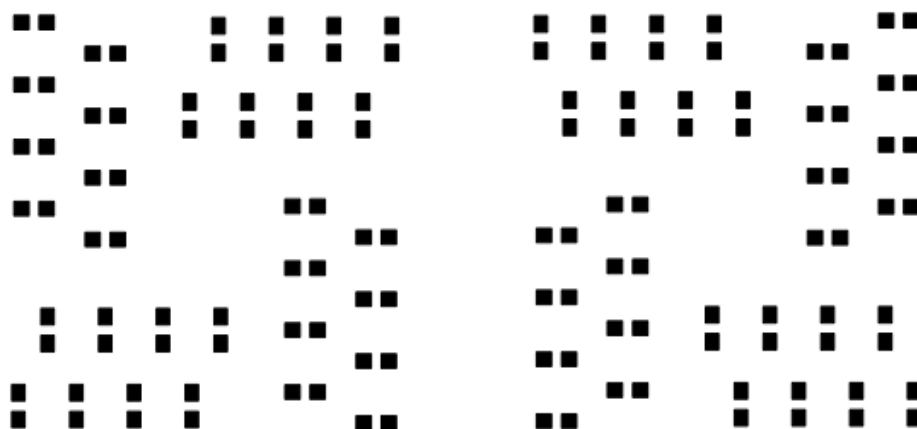


Obr. 32: (a) Filmová předloha pro výrobu síta (b) Motiv na sítu

7.3 Výroba šablony pro zhotovení pájených propojení

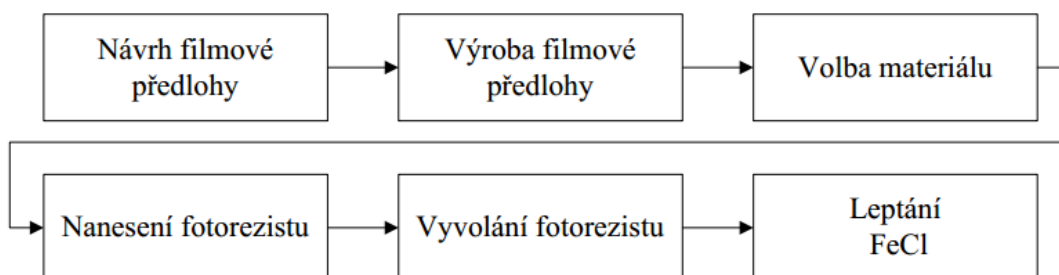
Při testování spolehlivosti elektronických pájených propojení je důležité zajistit, aby výsledky testování mohly být aplikovatelné i ve skutečném výrobním procesu. Mezi hlavní faktory, které ovlivňují strukturu pájeného spoje, patří mnoho parametrů výrobního procesu. Tyto parametry zahrnují množství natisknuté pasty na pájecí plošky, způsob přetavení, typ pájecí pasty a také atmosféra, při které probíhá pájení. U všech těchto faktorů je vhodné zajistit dobrou reprodukovatelnost, aby výsledky teplotního cyklování pájeného spoje byly maximálním způsobem relevantní. Pastu na pájecí plochy lze nanášet několika možnými způsoby, mezi které patří zejména sítotisk, šablonový tisk a tisk prostřednictvím dávkovacího zařízení. Sítotisk je pro nanesení pájecí pasty relativně složitým, náročným a nevýhodným procesem, jelikož je nutné vyrobit síto pro tisk šablony, uchytit síto do sítotiskového stroje a nastavovat další množství parametrů.

Dalším možným způsobem je nanést pastu pomocí dispenzeru, ale zde je hlavní nevýhodou špatná reprodukovatelnost pájeného spoje, jelikož je vždy nanášeno na pájecí plošku odlišné množství pájecí pasty. Toto odlišné množství pájecí pasty má posléze vliv na spolehlivost pájeného propojení, která se může lišit značným způsobem. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto využít pro tisk pájecí pasty šablonového tisku. Šablonový tisk je nenáročný a velmi přesný způsob tisku pájecí pasty. K výrobě šablony je prostředním programem Eagle navržen motiv (viz obr. 33), který jev podstatě přesným obrazem lokalit s pájecími ploškami na substrátu FR4, Al_2O_3 a LTCC. Šablonu je možné vytvořit několika možnými způsoby, mezi které patří chemické leptání, elektrogalyvanické vytváření šablony, šablony řezané laserem a polymerní šablony. Nejjednodušším způsobem je vytvoření šablony prostřednictvím chemického leptání (viz obr. 34). Při návrhu je nutné počítat s korekcí podleptání, jelikož při technologii výroby šablony leptáním dochází ke zvětšení otvoru o 7 až 10 procent proti původnímu návrhu.



Obr. 33: Filmová předloha pro výrobu měděné šablony

Z tohoto důvodu je nutné, aby výsledné lokality na pozitivní filmové předloze pro tvorbu apertur měly o 7 až 10 procent menší rozměry, než pájecí plošky, na které bude probíhat tisk pájecí pasty. Šablona je vyrobena z měděné fólie o tloušťce 35 μm . Na tuto měděnou fólii je z obou stran nanesen fotorezist. Dále následuje nasunutí zrcadlově spojených dvou kusů pozitivní filmové předlohy na na leptaný materiál.

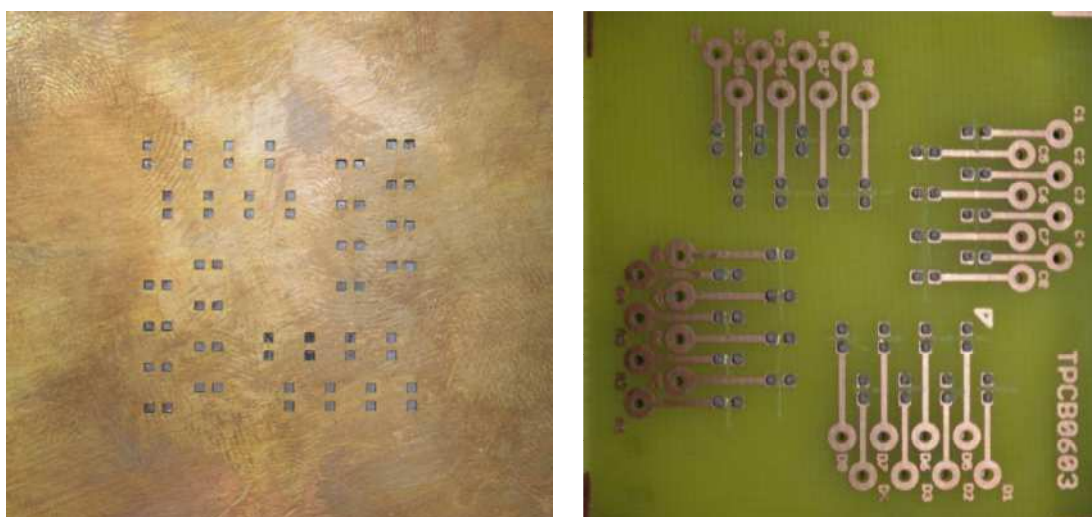


Obr. 34: Blokové schéma postupu výroby šablony

Osvětlením UV světlem dochází k vytvrzení fotorezistu v průhledných částech, tmavá místa zůstávají nevytvrzena. Tato nevytvrzená místa jsou odleptána v lázni prostřednictvím FeCl – chloridu železitého nebo jiné leptací sloučeniny. Po odleptání mědi a vytvoření apertur v materiálu je šablona opláchnuta vodou a očištěna (viz obr. 35a). Objem pájecí pasty, které je nanесena jednou aperturou na substrát, lze vypočítat podle vztahu (15).

$$V = a \cdot b \cdot c = 0,1 \cdot 0,09 \cdot 0,035 = 3,15 \cdot 10^{-4} \quad [\text{mm}^3; \text{mm}] \quad (11)$$

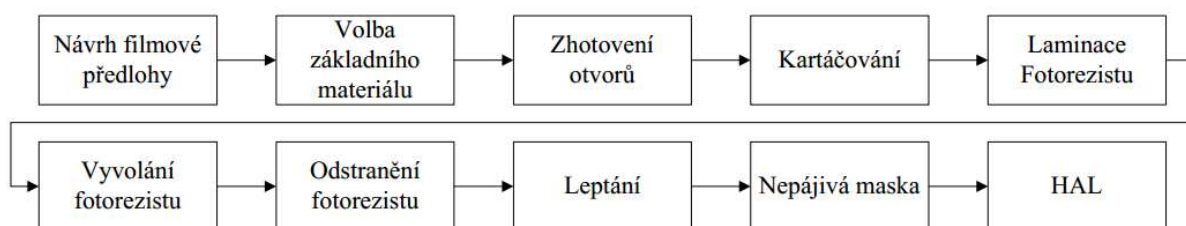
kde a , b jsou rozměry jedné pájecí plošky a c je tloušťka měděné fólie, ze které je vyrobena šablona pro tisk pájecí pasty.



Obr. 35: (a) Šablona – 35 μm měď (b) Natištěná pasta přes šablonu na FR-4

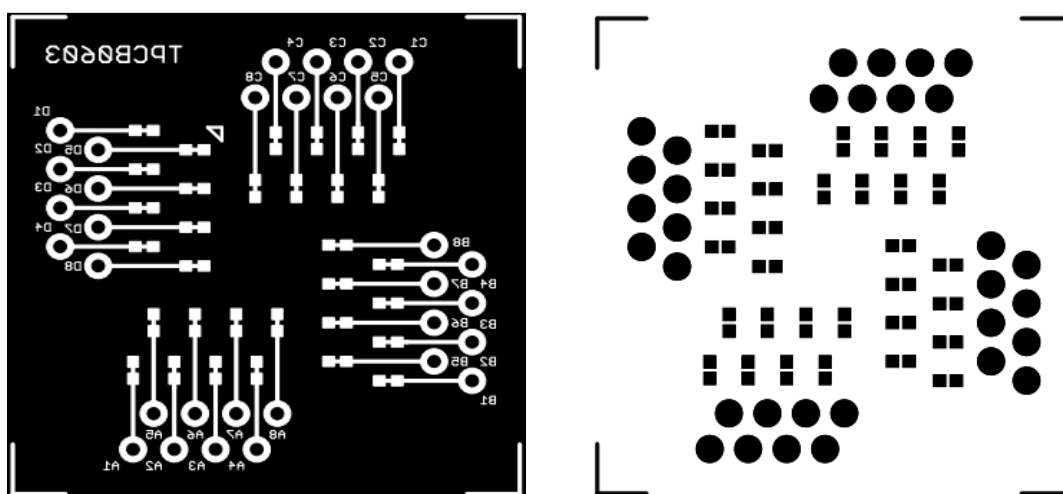
7.4 Výroba základních desek

Na základě návrhu v programu Eagle je vyrobeno několik testovacích desek, které jsou základním nosným substrátem testovacích součástek a keramických modulů. Základním materiálem pro tyto testovací desky je FR-4 skelný laminát, který je v základním provedení plátovaný měděnou fólií o tloušťce 35 μm . Na tomto základním materiálu je poté substraktivní metodou (viz obr. 36) vyleptán vodivý motiv. Nejdříve se nastříhá základní materiál s definovanými rozměry a následně je do tohoto materiálu provedeno vrtání otvorů pro připojení plochých kabelů. Po provedení vrtání následuje kartáčování materiálu, aby mohl být správně nalaminován fotorezist. Před laminováním fotorezistu se běžně provádí také zvodivění vyvrtaných odporů, což v tomto případě nebylo nutné.

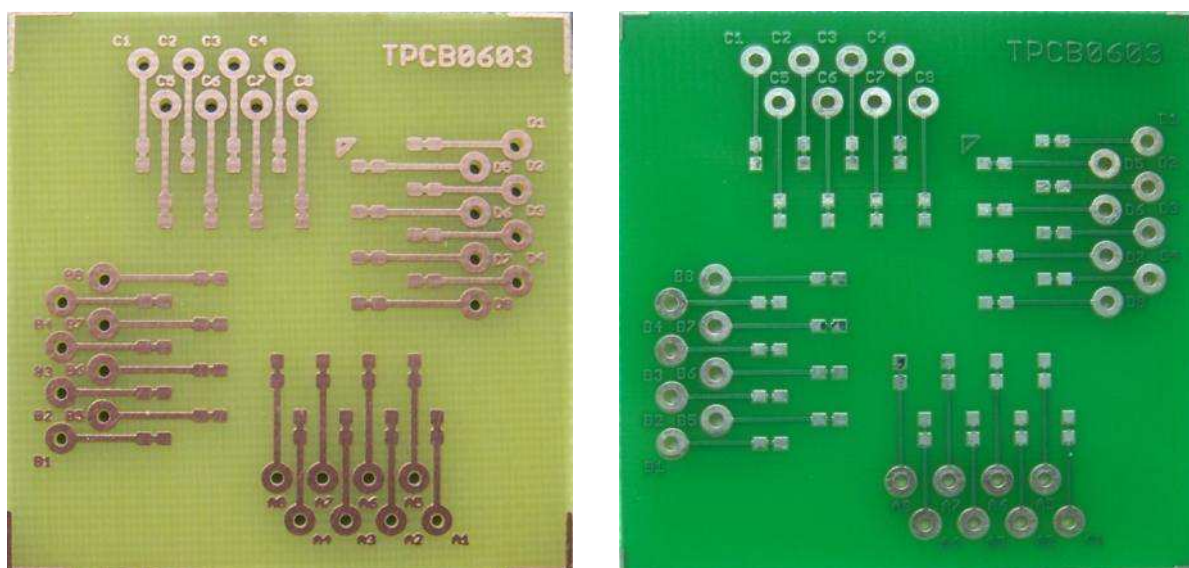


Obr. 36: Blokové schéma výrobního postupu základních desek

Po nalaminování fotorezistu je na materiál přiložen negativní filmový motiv (viz obr. 37a). Na negativním filmovém motivu jsou vodivé cesty průsvitné a zbytek desky je černé barvy. Vyvoláním fotorezistu UV světlem dochází k vytvrzení fotorezistu v místech, kde se fotorezist exponuje UV světlem. Při leptání v lázni vytvrzený fotorezist chrání vodivé cesty motivu, zatímco nevytvrzený fotorezist v ostatních částech desky nechrání měděnou fólii a ta je odleptána. Základní deska je provedena ve dvou variantách. Nejdříve jsou vyrobeny testovací desky v základním provedení bez povrchových úprav a tyto testovací desky jsou ještě doplněny deskami se stejným motivem a upraveny nepájivou maskou (viz obr. 37b) a provedením HAL.

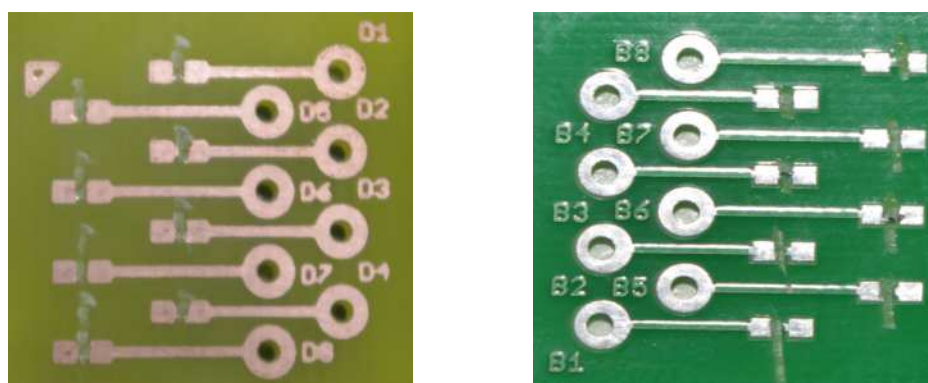


Obr. 37: Filmová předloha (a) základní desky (b) nepájivé masky



Obr. 38: Základní deska FR-4 (a) bez nepájivé masky (b) s nepájivou maskou a HAL

Dvě varianty provedení základních desek (viz obr. 38) jsou zvoleny z důvodu porovnání vlivu povrchové úpravy na spolehlivost pájených propojení. Desky jsou před tiskem pasty na pájecí plošky ošetřeny ochranou neosazených desek plošných spojů ve spreji. Tato ochrana je na bázi přírodní pryskyřice a po aplikaci vytváří na DPS průhlednou vrstvu. Nanesením přírodní pryskyřice na plošné spoje dochází ke zlepšení smáčivosti pájky natištěné na plošných spojkách a také chrání plošné měděné spoje neošetřené nepájivou maskou před oxidací. Dále byly všechny desky plošných spojů upraveny, jelikož bylo v původním návrhu počítáno s více variantami sledování pájených propojení na desce plošného spoje. Původní desky plošných spojů mají propojené pájecí plošky, jelikož se předpokládalo možné propojení vodivé cesty přes tyto plošky, mimo součástky nebo keramické moduly. V novém zapojení je vodivá cesta pro testování plošného spoje předpokládána přes první pájecí plošku a dále je přímo vedena na keramický modul, jelikož vedení přes spodní pájecí plošky, by nebylo výhodné z hlediska relevantnosti testování. Z tohoto důvodu byly spojené pájecí plošky na základních deskách přerušeny (viz obr. 39) pomocí frézky s tenkým kovovým kotoučem.

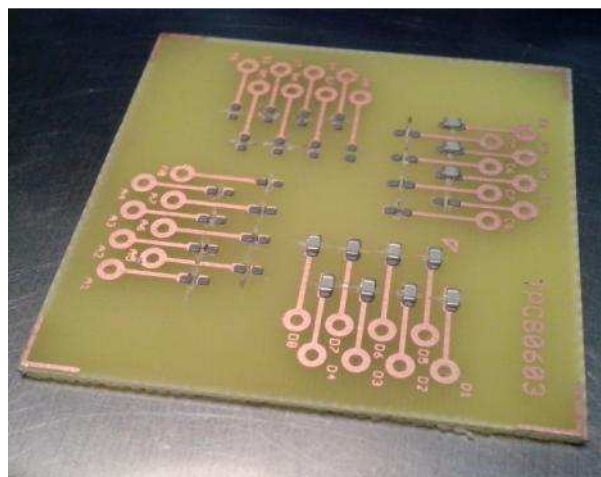
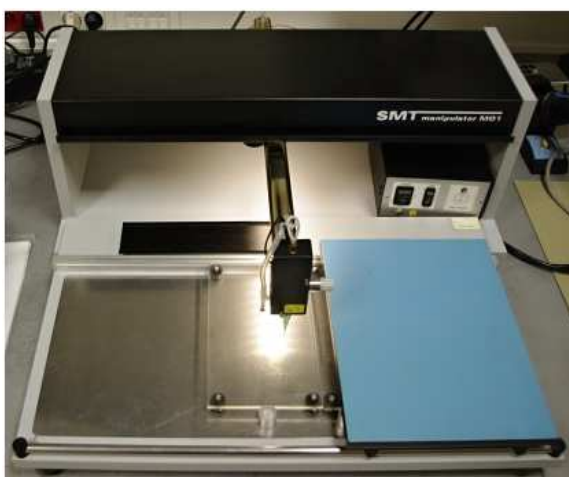


Obr. 39: Rozdělené pájecí plošky na základním materiálu FR-4

Na hotové desky jsou nyní osazeny součástky, kterými jsou keramické SMD kondenzátory 0805. Před osazením kondenzátorů je nanесena bezolovnatá pájecí pasta KESTER EM907 prostřednictvím šablonového tisku. Při šablonovém tisku jsou jednotlivé desky uchycovány do formy, která je určena pro tisk přes šablonu. Do uchycovacího zařízení formy je upnuta zhotovená měděná šablona a přes tuto šablonu je proveden tisk pájecí pasty na plošky desek. Před tiskem pájecí pasty je důležité tuto pastu nechat několik hodin temperovat při pokojové teplotě, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností pájecí pasty. Po temperování je pastu nutné dokonale rozmíchat, jelikož částice kovových materiálů mají vyšší hmotnost než směs tavidel a rozpouštědel a postupem času se začínají svou vahou posunovat pod ostatní směsí v pájce.

Při nedostatečném rozmíchání by mohla být aplikována na pájecí plošky málo kvalitní směs pájky, která by posléze měla vliv na vodivost a spolehlivost pájeného propojení. Při tisku pasty je nutné dodržet hlavní zásady šablonového tisku, mezi které patří zejména správné sesouhlasení pájecích plošek na desce a apertur v šabloně, úhel natočení stěrky, nanесení dostatečného množství pájecí pasty a správná rychlost třerky. Těrka s nastaveným úhlem, tedy ve směru kolmém k základní desce je přitlačena k šabloně a při definované rychlosti se pod těrku roluje pájecí pasta. Kinetická energie pohybující se šablony je dále předávána do hmoty pájecí pasty, kde je generován hydraulický tlak. Za pomoci tohoto hydraulického tlaku je pasta protlačována přes apertury v šabloně.

Před začátkem procesu je důležité nanést pájecí pastu v přiměřeném množství. V případě menšího množství pasty nejsou vyplněny pastou apertury v zadní části šablony a je nutné proces opakovat. Je také důležité šablonu dostatečně přitlačit k desce, aby hodnota odtrhu byla po celou dobu tisku rovna nule. V opačném případě se zvyšuje objem apertury o světlý prostor pod aperturou a dochází k nanесení nespecifikovaného objemu pájecí pasty, který může být i několikrát vyšší, než v případě dodržení nulového odtrhu. Po nanесení pájecí pasty jsou na jednotlivé základní desky s nanесenou pastou osazeny keramické SMD kondenzátory 0805. Na každé desce se nachází keramické kondenzátory v počtu 32 kusů.

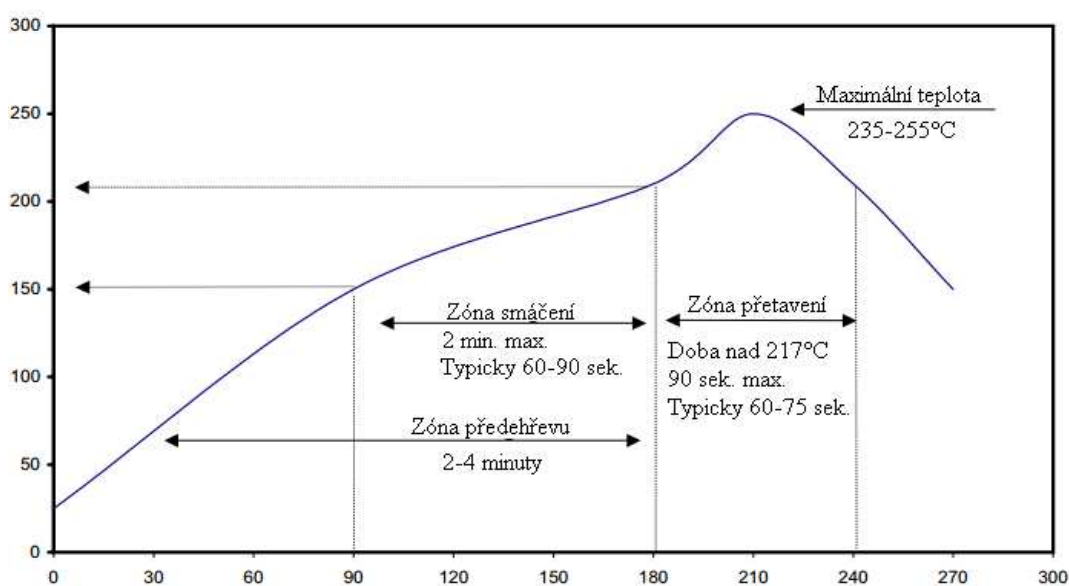


Obr.40: (a) Osazovací poloautomat SMT M01 (b) Osazené součástky v pastě

Pro osazení kondenzátorů na desky plošného spoje je využit SMT Manipulator M01 (viz obr. 40a), který umožňuje osazení kusových součástek na substrát. Mezi hlavní součásti tohoto zařízení patří systém poskytující zdroj vakua pro uchopení jednotlivých součástek, uchopovací hlavice pro manipulaci se součástkou a manipulační stolek s magnetickými držáky pro uchycení desky plošných spojů, na kterou jsou usazovány součástky. Vlastní usazení probíhá uchycením připravené SMD součástky, která je držena silou podtlaku na manipulační jehlici.

Podtlak je vytvořen přitlačením součástky jehlicí k manipulačnímu stolku, při kterém se sepne vakuová vývěva. Následuje manipulace se součástkou a natočení součástky co nejpřesněji, nad pájecí ploškou. Tento proces probíhá v osách x a y. Při správném nastavení součástky v těchto osách je posunem v ose z, jehlou se součástkou, směrem k desce plošného spoje, osazena součástka. Přitlačením součástky k desce plošného spoje dochází k vypnutí vývěvy a součástka zůstává osazena na desce v pastě. Důležité je sledovat, zda je vývěva skutečně vypnuta při zpětném pohybu jehly od desky plošného spoje. V případě nedostatečného sepnutí může dojít k zachování podtlaku a při pohybu součástky směrem od desky je rozmazána pasta, a je třeba opakovat proces.

Poté, co jsou osazeny všechny součástky do pasty na desce plošného spoje (viz obr. 40b), dochází k zapájení těchto součástek. Pájení součástek je provedeno prostřednictvím jedné z metod pájení přetavením. Mezi složitější metody pájení přetavením patří přetavením prostřednictvím infračerveného záření, pájení horkým vzduchem nebo plynem. V případě pájení horkým vzduchem v peci je pájecí profil regulován rychlostí přepravníku a rozdělenými zónami, s různou teplotou horkého vzduchu. Využití pájení přetavením v peci je nutné zejména v případě složitějších struktur s více vrstvami a složitějšími typy pouzder na substrátu.



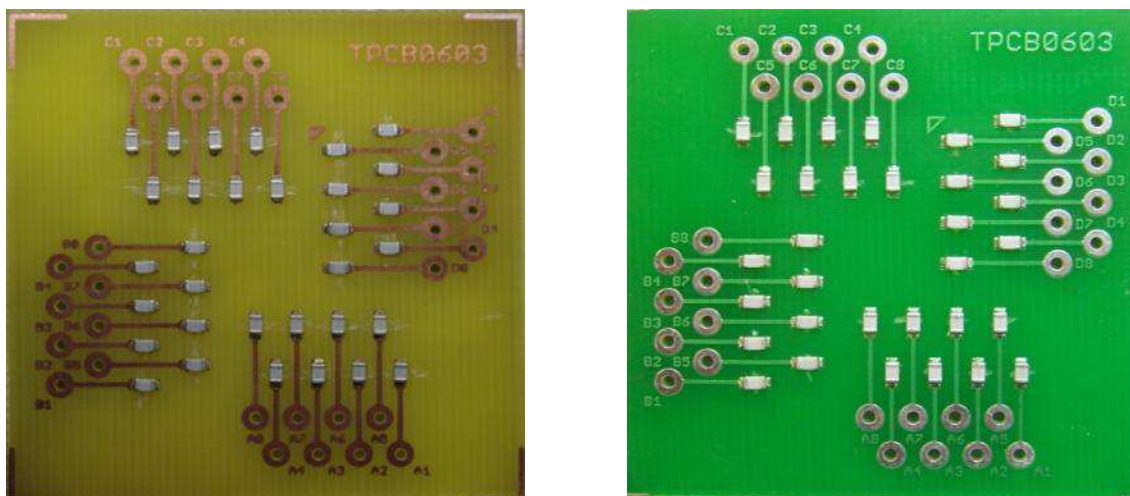
Obr. 41: Přetavovací profil bezolovnaté pájky SAC305 Kester EM 907 [24]

V aplikacích, kde je zajištěno dobré vedení tepla, lze využít pájení přetavením prostřednictvím umístění plošného spoje s nepřetavenou pájkou a součástkami na horkou desku. Tato metoda je využita pro zapájení kondenzátorových součástek na desky plošného spoje pastou KESTER EM 907. Přetavovací profil (viz obr. 41) této pájecí pasty se na horké desce reguluje pomocí otočného regulátoru teploty při sledování času procesu a chování pájky. Teplota na horké desce je sledována pomocí upevněného termočlánku na tuto horkou desku a na základě jejích změn je regulována.



Obr. 42: Detail pájených propojení kondenzátorů na desce plošného spoje

Po zapájení keramických kondenzátorů na desky plošných spojů je opticky vyhodnocena kvalita těchto pájených spojů (viz obr. 42). V případě součástek zapájených na desky bez povrchové úpravy metodou HAL, je možné konstatovat velmi dobrou smáčivost. Při dokonalém smočení povrchu pájkou se pájka nachází na celém prostoru pájecí plošky, zejména v případě pájení vlnou, kdy roztavená pájka obtéká kovový povrch. V případě pájení přetavením se pájka rozprostírá po povrchu, jelikož lokálně působí síly povrchového napětí. Z tohoto důvodu je stoprocentní smáčivost pájecí plošky omezena. Porovnáním pájených spojů na desce bez povrchové úpravy a na desce s povrchovou úpravou HAL, lze konstatovat mírně lepší smáčivost pájených spojů na upravené desce, avšak i na desce bez úpravy je smáčivost dostatečně kvalitní vzhledem k pájecím ploškám součástek (viz obr. 43).



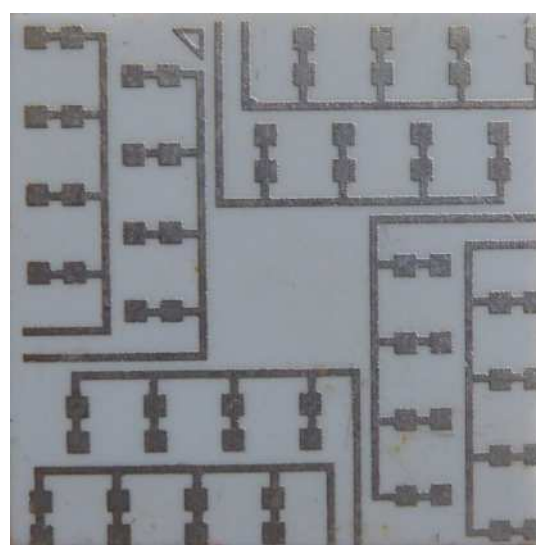
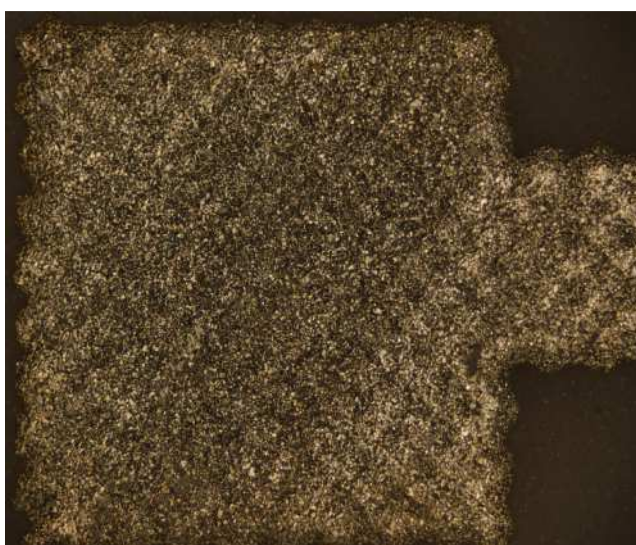
Obr. 43: Základní desky plošných spojů s osazenými kondenzátory 0805

7.5 Výroba motivů na Al_2O_3 substrátu

Pro porovnání s LTCC substráty jsou vytvořeny keramické moduly na základě korundových substrátů. Tyto korundové keramické substráty jsou dostupné v rozměrech 5 x 5 cm a proto je nutná úprava těchto substrátů, vzhledem k návrhu, kde se počítá s motivy velkými 2,7 x 2,7 cm. Upravit rozměry substrátů je relativně obtížné, jelikož disponují oproti ostatním typům substrátů velkou pevností. Typickým postupem je nějakým způsobem povrchově narušit mechanickou integritu a v místě narušení napětím v ohybu přelomit materiál na dvě části. Nejpresnější metodou je vytvořit do keramického materiálu rýhy prostřednictvím laseru jako v případě LTCC. Tato metoda je velmi přesná ale z hlediska charakteru aplikace není nutné postupovat tímto způsobem.

V korundové keramice je možné provést rýhy i mechanickým způsobem prostřednictvím přípravku, který je určený pro dělení těchto typů materiálů. Tento přípravek se skládá z posuvné části, na které je umístěn substrát a z pevné části, ve které je na pružině přichycena kovová jehlice s ostrým hrotem. Otočným šroubem je nastaveno posunutí jehlice a pružina tuto jehlici tlačí na keramický substrát, který je umístěný na posuvném dopravníku. Jehlice nesmí být přitlačena na substrát velkou silou, neboť v opačném případě může dojít k rozlomení substrátu. Posunutím dopravníku s keramickým substrátem proti jehlici s kovovým hrotem dochází k vytvoření relativně přesné rýhy v substrátu. Před provedením tohoto úkonu je vhodné na substrát naznačit tužkou požadovanou hranici pro posun jehlice, jelikož může dojít k mírnému posunutí jehlice proti dopravníku s keramickým substrátem, nebo se naopak může pohnout dopravník proti jehlici.

Systém posuvné části také neumožňuje keramický substrát připevnit, proto je nutné při posuvu vytvářet zároveň tlak na keramický substrát, aby bylo dosaženo přesného řezu. Po vytvoření rýhy v substrátu je možné keramický materiál vyjmout z přípravku a přistoupit k jeho rozdělení na dvě části. V tomto bodě je nutné postupovat velmi opatrně, jelikož kvalita provedení velmi ovlivní výslednou přesnost lomu.

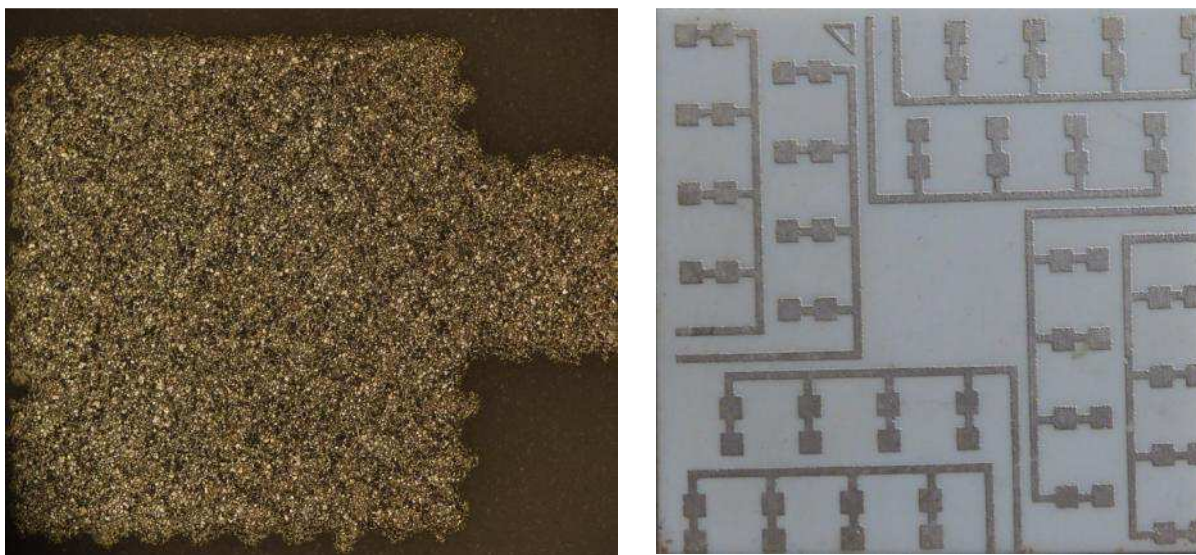


Obr. 44: Motiv - pasta ESL9912-K (a) detail pájecí plošky (b) celkový pohled

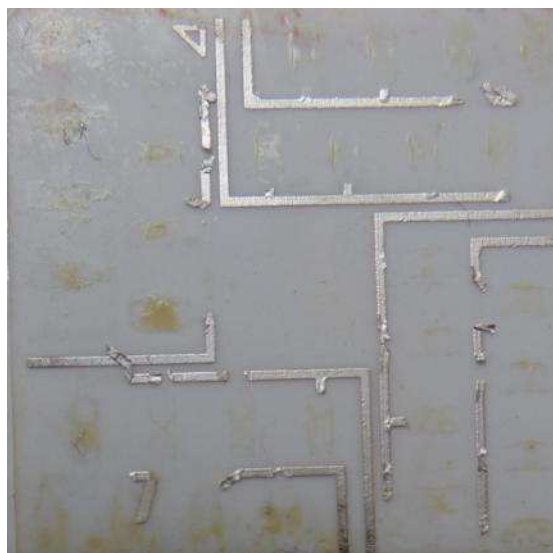
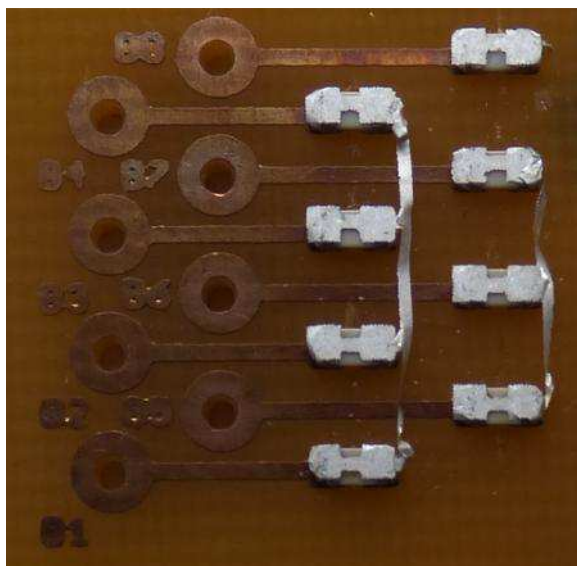
Nejlepší metodou je vsunout keramický materiál v místech vytvořené rýhy mezi dva těžké předměty s ostrými hranami a tuto sestavu zatížit tlakem. Působením tlaku v ose Z na keramický materiál dochází ke zlomení materiálu. Předměty pro zatížení musí mít ostré hrany, tak aby působení tlaku bylo aplikováno na celé kontaktní ploše. V opačném případě při zaoblených hranách dochází k velmi nepřesnému lomu. Na připravené substráty o definovaných rozměrech jsou následně natisknuty vodivé motivy prostřednictvím metody sítotisku. Na polovinu připravených substrátů je natisknuta tixotropní stříbrná vodivá pasta ESL 9912-K, která je určena pro tisk vodivých motivů na širokém spektru substrátů. Na druhou polovinu je natisknuta pasta TC0306, jenž je běžně určena pro tisk na nízkoteplotní keramiku LTCC a vypálena podle vypalovacího profilu pasty ESL 9912-K [30].

Vypalovací profil jednotlivých past se mírně liší v jednotlivých parametrech z hlediska rychlosti nárůstu teploty, maximální teploty výpalu a doby trvání vypalovacího cyklu. Výpal natištěných motivů probíhá při vypalovacím profilu, kdy 5 - 10 minut probíhá vyrovnání teplot při 20 °C, poté následuje sušení při teplotě 125 °C po dobu 10 - 15 minut. Dále teplota stoupá až k maximální teplotě výpalu, které u korundové keramiky probíhá při teplotě 850 °C po dobu 10 minut. Celkový cyklus výpalu trvá jednu hodinu. Výsledné vypálené motivy jsou po vypalovacím profilu kvalitní u keramických substrátů s pastou ESL 9912-K (viz obr. 44) i u keramických substrátů s pastou TC0306, vypálenou podle vypalovacího profilu ESL 9912-K (viz obr. 45).

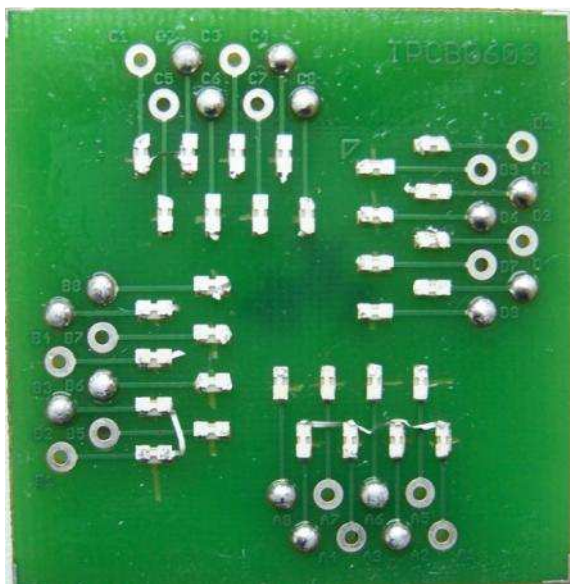
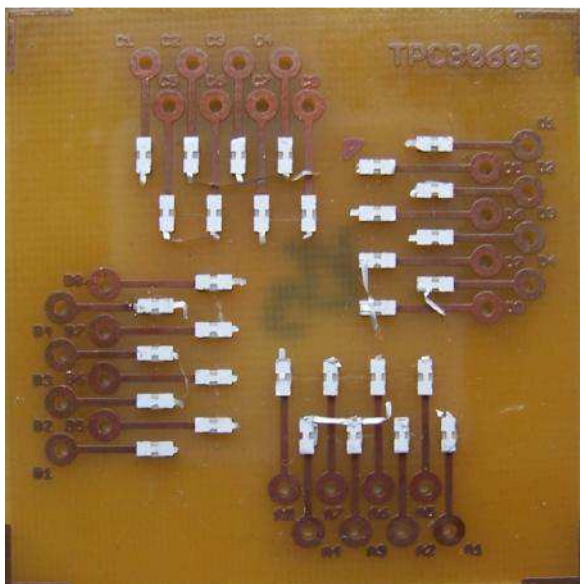
Přestože se nejdříve zdálo, že se podařilo vypálit korundové substráty s pastou TC0306 kvalitně, při procesu pájení sestav v parách došlo k odlepení motivů z keramických substrátů (viz obr. 46), a tyto motivy zůstaly připájené spodní stranou na keramických kondenzátorech základní desky (viz obr. 47). Z tohoto důvodu byly všechny sestavy s pastou TC0306 na korundových substrátech vyřazeny z testování.



Obr. 45: Motiv - pasta TC0306 (a) detail pájecí plošky (b) celkový pohled



Obr. 46: (a) Detail vodivého motivu odlepeného z keramického substrátu (b) Keramický substrát s narušeným motivem



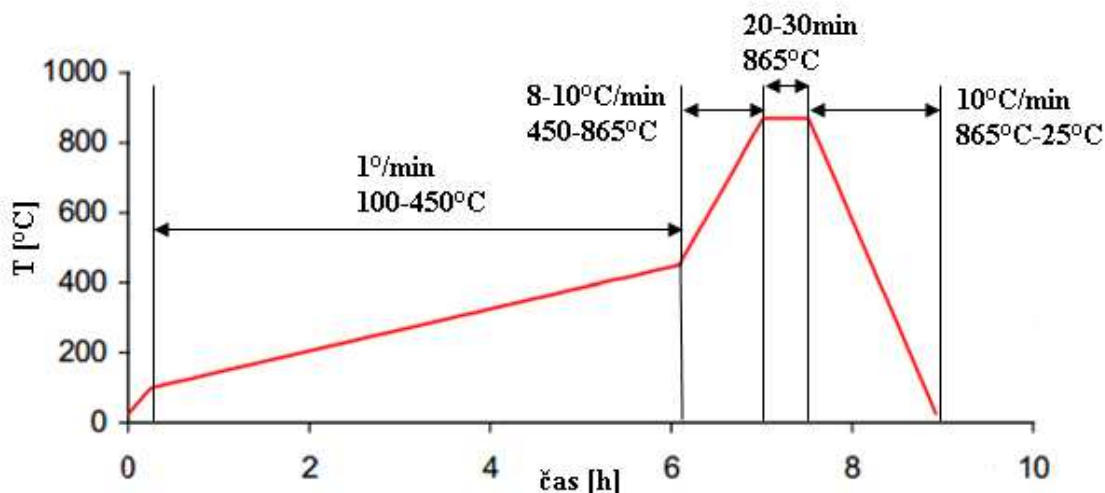
Obr. 47: Základní desky s přichycenými motivy z keramických substrátů

7.6 Výroba LTCC substrátů

Podklady pro realizaci substrátů založených na nízkoteplotně vypalovatelné keramice byly stejně jako u předchozích substrátů zpracovány v programu Eagle a na základě těchto podkladů je vyrobeno síto pro tisk motivů na LTCC substráty. Realizace LTCC substrátů a tisk motivů spočívá v několika krocích. Nejdříve jsou na laseru ALS300 od firmy Aurel vyřezány jednotlivé vrstvy keramické LTCC fólie Heraeus Heraclon LT2000, která je umístěna na polymerním nosiči. Data, podle kterých laser rozdělí keramické plátno na jednotlivé kusy, jsou navržena také v programu Eagle. Vhodným postupem je nejdříve keramickou fólii sejmut z polymerního fóliového nosiče a následně provést další kroky. Laserovým paprskem jsou v keramickém materiálu provedeny tenké linie a v těchto místech je možné keramický materiál opatrně rozdělit. K rozdělení dochází působením mírného tlaku, takže dochází k postupnému ohnutí dvou částí až do úhlu 90°, ve kterém je materiál rozdělen.

Je nutné postupovat velmi opatrně, jelikož při větším tlaku na materiál dochází k jeho zlomení, případně jiným typům znehodnocení. Materiál je také velmi náchylný na veškeré druhy nečistot a mastnotu. Z tohoto důvodu je nezbytné po celou dobu pracovat s rukavicemi. Po odstranění keramického materiálu z fólie, a rozdělení na jednotlivé kusy, mohou být na vrchní vrstvy natištěny motivy prostřednictvím metody sítotisku. Natisknutí motivů je provedeno na sítotiskovém poloautomatu AUREL C880. Nejdříve je nutné správně upnout do sítotiskového stroje rám, který nese šablonu s vytvořeným motivem. Úspěšného tisku lze dosáhnout správným nastavením parametrů tisku, mezi které patří, zejména odtrh, rychlost a tlak stěrky. Pro testování spolehlivosti pájených propojení s LTCC substráty je předpokládáno vytvoření osmi struktur, z nichž každá má šest vrstev.

Těchto osm struktur je doplněno o další dvě záložní struktury, jelikož při výpalu může dojít k popraskání a znehodnocení vodivých motivů. Z těchto počtů vyplývá, že je nutné na každých pět vrstev bez motivu natisknout jednu vrstvu s motivem plošného spoje. Celkově je tedy využito 50 vrstev bez motivu a 10 vrstev, na které je natisknut vodivý motiv. Pro tisk vodivého motivu je využito tixotropní stříbrné vodivé pasty Heraeus TC0306 [29].

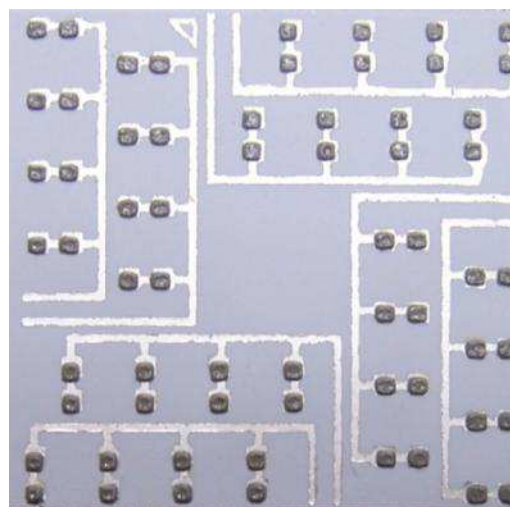
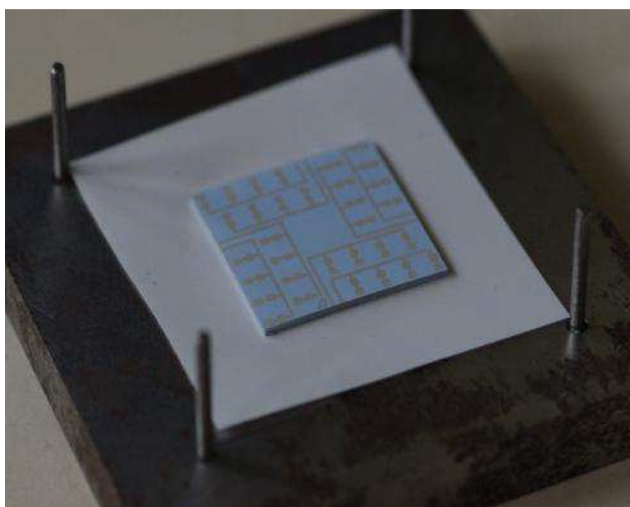


Obr. 48: Vypalovací profil LTCC materiálu Heraclon HL2000 [17]

Tato pasta disponuje velmi nízkou rezistivitou, a je určena pro tisk vodivých plošných spojů na substrát. Mezi její zásadní vlastnost, lze uvést zejména kompatibilitu s materiálem Heralock HL2000. U LTCC materiálů je velmi důležité využít kompatibilní pasty, jelikož mezi specifické vlastnosti těchto materiálů patří značné smršťování při výpalu, které se v osách x a y může pohybovat mezi 12 – 15 procenty. Z tohoto důvodu je nutné použít pastu, která se bude v procesu výpalu smršťovat stejně jako keramický materiál. Z předešlých faktů také vyplývá, že pasta TC 0306 má stejný vypalovací profil jako použitý keramický materiál Heralock HL2000 (viz obr. 48). Pásky nízkoteplotní keramiky jsou při tisku fixovány vakuem, které je rovnoměrně přivedeno k substrátu přes porézní kámen.

Tento systém by měl zajistit, aby substrát při natištění pasty nezůstal vlivem zvýšení viskozity po odskoku síta, přilepený na síto. Po natištění pasty na vrchní vrstvy budoucí struktury je potřeba zasušit natištěnou pastu, aby při procesu laminace nedošlo k jejímu rozmazání. Procedurou sušení může substrát před výpalem projít více než jednou, například v případě zasušení vodivé pasty, kterou jsou vyplněny otvory, jenž propojují jednotlivé struktury. V tomto případě nebylo nutné vyplňovat otvory ve struktuře, jelikož se jediná aktivní vrstva s vodivým motivem nachází nahoře. Substráty s pastou jsou zasušeny při teplotě 80 °C po dobu 10 minut. Po zasušení vrstev s vodivým motivem je možné přistoupit k laminaci jednotlivých vrstev.

Laminační proces probíhá při definované teplotě, tlaku a při určitém čase. Jednotlivé vrstvy, které jsou laminovány, je nejdříve nutné zbavit různých viditelných nečistot a prachu, které se mohly na keramický materiál dostat při odstraňování polymerního nosiče. Také se může jednat o miniaturní částčky keramického materiálu, který se odlomí z rýhy vyrobené laserem při dělení materiálu a přilepí se na vrstvu materiálu určeného k laminaci. Tyto částčky při laminaci mohou narušit strukturu materiálu, případně v místě nečistoty může dojít k nekvalitní laminaci vrstev. Nečistota také může způsobit přítomnost vzduchové bubliny, jelikož materiály v místech s nečistotou nepřilnou dostatečně blízko k sobě. Tyto negativní jevy se dále mohou projevit a znásobit při výpalu, kdy může dojít k roztržení nebo popraskání substrátu, který je tímto znehodnocen.

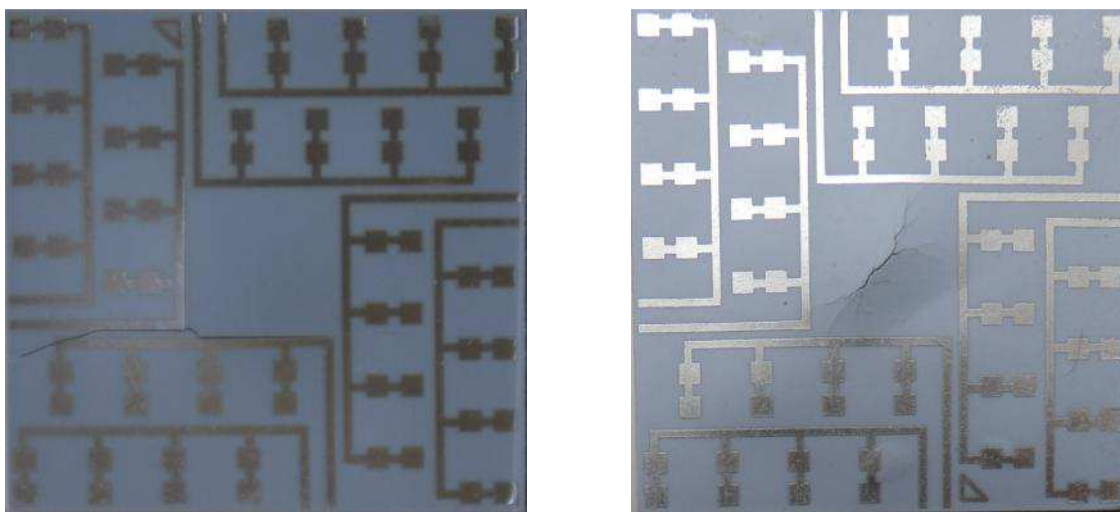


Obr. 49: (a) LTCC struktura před laminací (b) Motiv LTCC s pastou

Po očištění motivů následuje naskládání motivů do laminační šablony a sesouhlasení vrstev (viz obr. 49a). Ve vrstvách jsou běžně vyrobeny otvory, díky kterým je možné jednotlivé vrstvy velmi přesně sesouhlasit. V tomto případě nebylo možné otvory zhotovit, jelikož výsledné velikosti struktur nejsou kompatibilní s žádným laminačním přípravkem. Následuje proto sesouhlasení pomocí jemných technických kovových přípravků. Tento způsob sesouhlasení je i při velké snaze značně nepřesný a pro reálné využití LTCC technologie je v podstatě nepoužitelný. Z hlediska testování spolehlivosti pájených propojení jde hlavně o fyzikální podstatu struktury LTCC, kde se nenachází vodivé motivy a otvory i v dalších vrstvách, a proto je tento způsob možné použít. Po sesouhlasení vrstev jsou tyto vrstvy zalaminovány k sobě, anaxiálním způsobem v lisu.

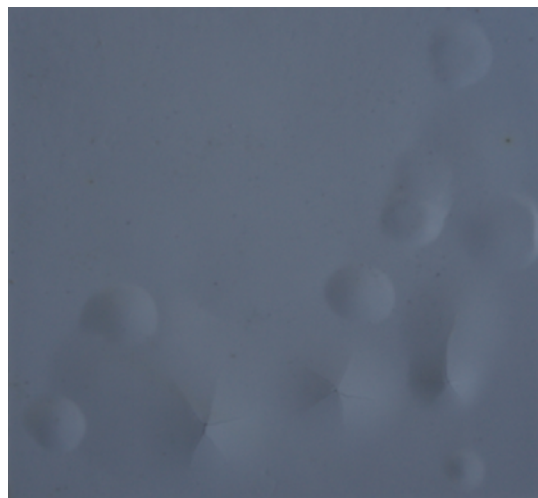
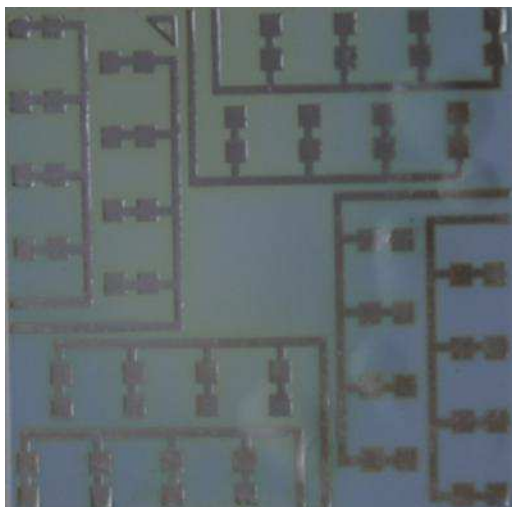
Při anaxiální laminaci působí síla na šablonu ze dvou směrů. Tento způsob je vhodný zejména pro případy s menším počtem laminovaných vrstev. Proces laminace probíhá na základě katalogových hodnot doporučených výrobcem keramického materiálu. Základními parametry procesu laminace jsou tlak, teplota a čas trvání laminace. Výrobcem Heraeus je pro materiál Heraclon 2000 doporučováno provádět laminaci při teplotě 80 °C, tlaku 1500 psi a době trvání deseti minut. Na základě zkušeností s tímto materiálem bylo zjištěno, že optimální teplotu lze nastavit mezi 70 - 80 °C. Na lisu lze nastavit pouze sílu a proto je nutné hodnotu tlaku doporučenou výrobcem přepočítat na sílu. Síla potřebná pro laminaci šestivrstvých keramických modulů se pohybuje mezi 15 – 20 kN. Laminace materiálu je při procesu tvorby LTCC struktury největším potenciálním zdrojem chyb a proto je důležité věnovat parametrům laminace mimořádnou pozornost.

Hotové struktury jsou po laminaci vypáleny ve vsázkové peci. V peci je nastaven teplotní profil výpalu pro materiál Heraeus Heraclon 2000 a kompatibilní vodivou pastu TC0306. Z teplotního profilu je vidět, že při správném průběhu procesu stoupá teplota v peci rychlostí 3 °C za minutu až do dosažení 100 °C. Následuje zpomalení růstu teploty o dva stupně a rychlostí 1 °C za minutu, roste teplota až k hodnotě 450 °C. Od teploty 450 °C začne růst teplota velmi rychle až k maximální teplotě 865 °C. Horní maximální teplota výpalu trvá 20 - 30 minut a poté následuje chlazení rychlostí 10 °C za minutu.



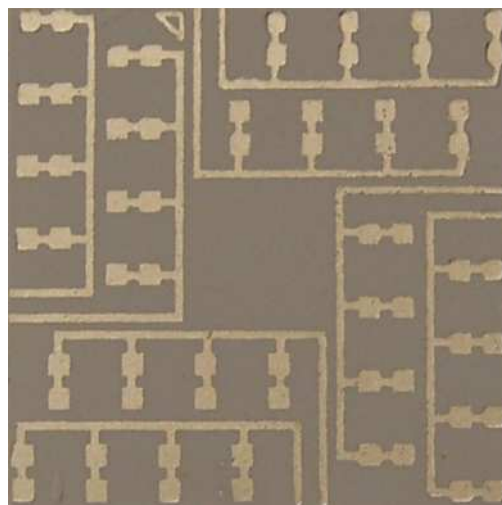
Obr. 50: Praskliny v motivech LTCC struktur

Při prvním procesu výpalu pravděpodobně nebylo dosaženo správného vypalovacího profilu z hlediska rychlosti růstu teploty a dosažení maximální teploty a z tohoto důvodu dochází k nekvalitně vypáleným vzorkům. Na většině vypálených vzorků jsou vidět praskliny a trhliny v motivu (viz obr. 50). Dále se na vzorcích vyskytovaly bubliny a zažloutnutí materiálu (viz obr. 51). Z tohoto důvodu bylo nutné celý proces opakovat a vyrobit nové vzorky (viz obr. 52). Při dalším sítotisku vodivých motivů na keramické materiály byly opět natištěny vodivé motivy na keramické substráty a opakován proces laminace a výpalu. Nové motivy se již nepodařilo natisknout se stejnou přesností jako v prvním případě, jelikož síto po vícenásobném tisku nebylo dokonale čisté a výsledné vypálené motivy jsou mírně rozmazané a s vyskytujícími se defekty v natištěných spojích.



Obr. 51: Zažloutnutí motivů a bubliny v motivu LTCC struktur

Vzhledem k těmto skutečnostem se u některých spojů vyskytují chyby ještě před začátkem testování pájených propojení. Příčinou těchto chyb je nevodivost některých vodivých motivů zhotovených na keramickém materiálu. Tyto chyby se ovšem vyskytují velmi omezeně a proto není nutné opakovat proces výroby LTCC modulů.



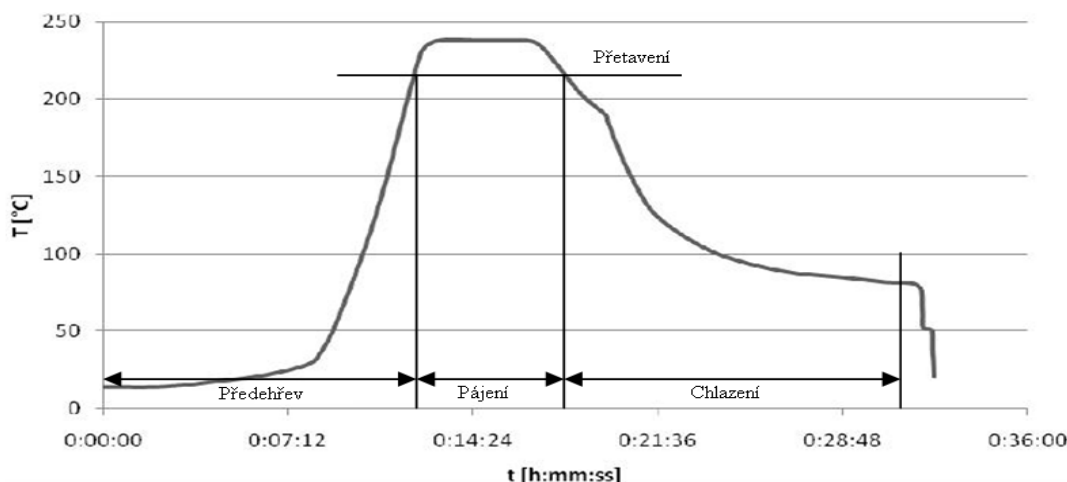
Obr. 52: Motiv na LTCC – pasta TC0306 (a) detail pájecí plošky (b) celkový pohled

7.7 Kompletace sestav

Po zhotovení základních desek a výpalu keramických substrátů jsou zkompletovány výsledné moduly. První částí sestav jsou základní desky z materiálu FR4 ve variantě bez nepájivé masky a bez povrchové úpravy HAL, druhou variantou jsou desky s nepájivou maskou a s povrchovou úpravou HAL. Tyto základní desky jsou již připraveny se zapájenými součástkami, kterými jsou keramické kondenzátory 0805. Zapájení je provedeno přetavením základních desek na horké desce. Součástky jsou zapájeny nejdříve na základní desky, jelikož by mohlo při osazování keramického substrátu na nezapájené součástky dojít k vzájemnému posunutí motivů. Proces kompletace sestav následuje natisknutím bezolovnaté pájecí pasty Kester EM907, prostřednictvím šablonového tisku, na jednotlivé keramické substráty.

Po natisknutí pájecí pasty jsou základní desky a keramické moduly připraveny ke spojení. Toto spojení je provedeno prostřednictvím opravárenské stanice Fritsch. Opravárenská stanice Fritsch je primárně určena pro práci s BGA pouzdry a jejich kuličkovými vývody, kde lze provádět opravy těchto kuličkových vývodů. Charakter spojení základního materiálu FR4 a keramických substrátů se velmi podobá právě zapojení BGA pouzder, které jsou taktéž usazeny na nějakém druhu substrátu. Z tohoto důvodu je možné využití opravárenské stanice Fritsch, kdy osazení keramického substrátu probíhá stejným způsobem jako osazení BGA pouzdra na kuličkové vývody. Do spodní části opravárenské stanice je uchycena základní deska FR4 se zapájenými součástkami, na kterou je následně osazen keramický substrát, který je přichycen působením vakuového podtlaku na osazovací hlavici opravárenské stanice.

Před osazením keramického substrátu na základní desku je nutné dosáhnout co nejpřesnějšího sesouhlasení vodivých motivů na základní desce a na keramickém substrátu. Toho je docíleno využitím kamery na osazovací hlavici, která zobrazuje na monitoru v jednom obraze prosvícený motiv keramického substrátu a motiv na základním materiálu. Přesného sesouhlasení je dosaženo pohybem spodní části, na které je uchycen základní materiál. Pohyb a ukotvení této spodní části je umožněn prostřednictvím působení vzduchového polštáře.

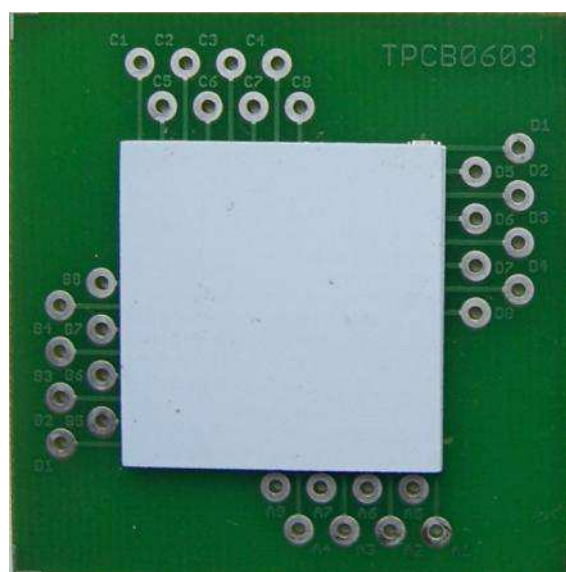
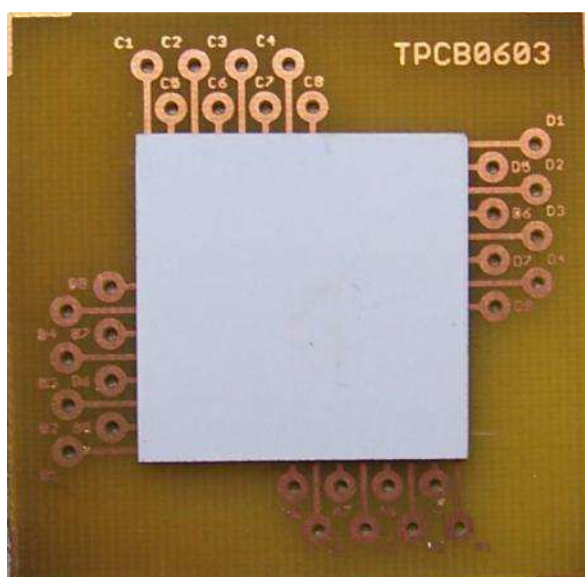


Obr. 53: Teplotní profil pájení v parách kapaliny Galden LS230

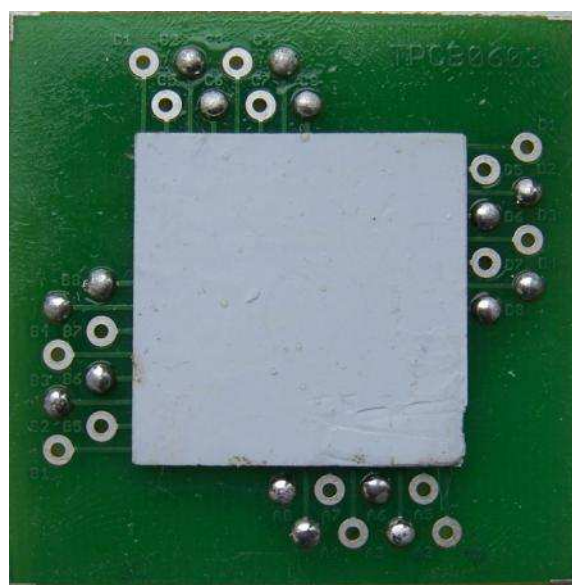
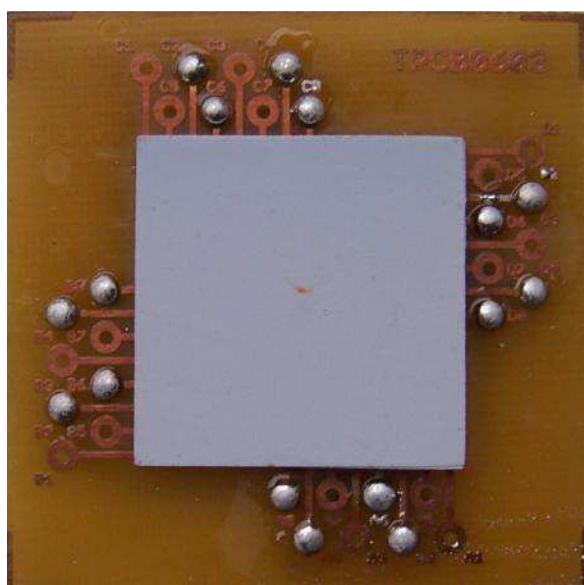
Sesouhlasení nemusí být dokonale přesné, jelikož se při pájení projevuje tzv. schopnost samostatného vystředění, kdy dynamické síly povrchového napětí pájky, vystředí jednotlivé součástky usazené na pájecích ploškách s vrchním keramickým modulem, který může být mírně natočený. K osazení dochází manuálním pohybem osazovací hlavičky s přisátým keramickým substrátem směrem dolů, v ose Z, k základnímu materiálu. Přitlačením keramického substrátu k součástkám na základním materiálu je vypnut podtlak a oba moduly jsou spojeny dohromady. Sesouhlasené moduly jsou zapájeny metodou pájení přetavením v parách prostřednictvím pájecího systému Asscon Quicky 300. Mezi výhody pájení v parách patří zejména rovnoměrné rozložení teploty v pájecí komoře, což je u spojení více substrátů velmi důležité.

Metoda pájení v parách patří z hlediska rovnoměrnosti teploty v peci k nejlepším metodám. Konstantní pájecí teplotu v celém prostoru zajišťuje definovaný bod varu pájecí kapaliny. V pájecí peci Asscon Quicky 300 je využito pájecí kapaliny Galden LS 230, která je složena z perfluoropolyéterů (PFPE). Bod varu této kapaliny se nachází při 230 °C, takže pájení probíhá po celou dobu při konstantní teplotě a není překročena maximální teplota bodu varu pájecí kapaliny. Na pájecím profilu kapaliny Galden LS230 (viz obr. 53) je vidět relativně dlouhá doba trvání tohoto pájecího profilu. Proces pájení je rozdělen zhruba na tři části. V první části probíhá po dobu deseti minut předehřev, dále následuje desetiminutová doba přetavení a po stejnou dobu je ochlazován prostor pece. Pro správné zapájení u této pece je vhodné nejdříve pec zapnout naprázdno a vlastní proces pájení provést až při druhém cyklu, jelikož při prvním cyklu nemusí být dosaženo správného pájecího profilu a může dojít k nekvalitnímu zapájení součástek. Před započítáním pájecího profilu je také nutné do systému doplnit destilovanou vodu, kterou je ohřívána a chlazena pájecí kapalina. Destilovaná voda a pájecí kapalina cirkulují v oddělených částech systému a proto destilovaná voda není v přímém styku s pájecí kapalinou. Nevýhodou této pece je nemožnost nastavení rozdílných průběhů pájecích profilů a proto je možné pájet pouze při jednom definovaném pájecím profilu. Tento pájecí profil je nevhodný z hlediska délky doby přetavení, která dosahuje až deset minut. V pájecí peci je postupně zapájeno 22 vyrobených testovacích struktur.

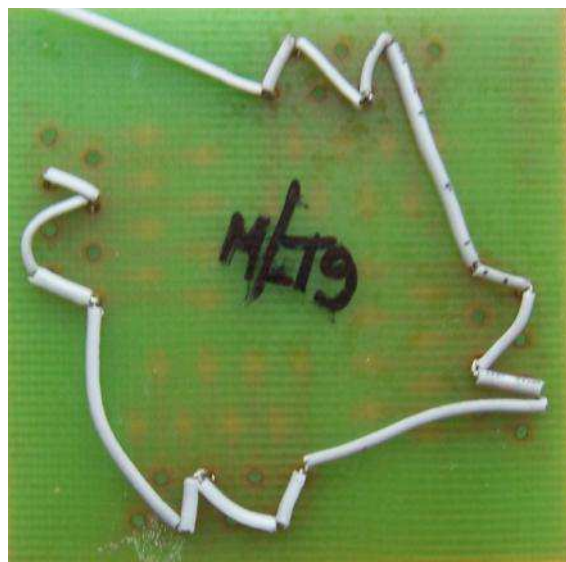
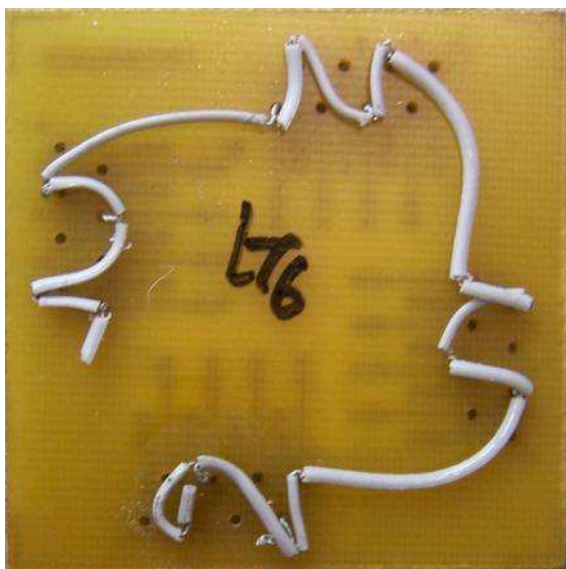
U všech vyrobených testovacích struktur je základním materiálem FR4 ve variantě bez nepáživé masky a s nepáživou maskou a povrchovou úpravou HAL. Keramickými moduly jsou korundové keramiky s většinovým obsahem oxidu hlinitého a keramika nízkých teplot Heraeus Heraclon 2000. Při procesu pájení přetavením byly poškozeny vrstvy vodivého motivu u korundových substrátů, které byly zhotoveny pastou TC0306 a vypáleny podle vypalovacího profilu pasty ESL 9912-K. U těchto motivů došlo k depozici motivu z keramického substrátu, přestože byl po vypálení ohodnocen jako stabilní a dobré integrity. Z tohoto důvodu jsou tyto znehodnocené testovací sestavy vyřazeny z testování. Pro test spolehlivosti pájených propojení jsou vyhrazeny tři sestavy s povrchovou úpravou HAL, z nichž dvě jsou s keramickým materiálem LTCC (viz obr. 54) a jedna s korundovou keramikou Al_2O_3 . Bez povrchové úpravy je vyrobeno 7 sestav s keramickým materiálem LTCC a 6 sestav s korundovou keramikou Al_2O_3 . U jednotlivých sestav je následně provedeno vodivé spojení propojení, která jsou připojena na společnou zem (viz obr. 55). Na obrázku (viz obr. 56) je vidět způsobem vodivého propojení společné země ze spodní strany sestav. Následuje zapojení testovacích desek na desetižilové ploché testovací kabely (viz obr. 57).



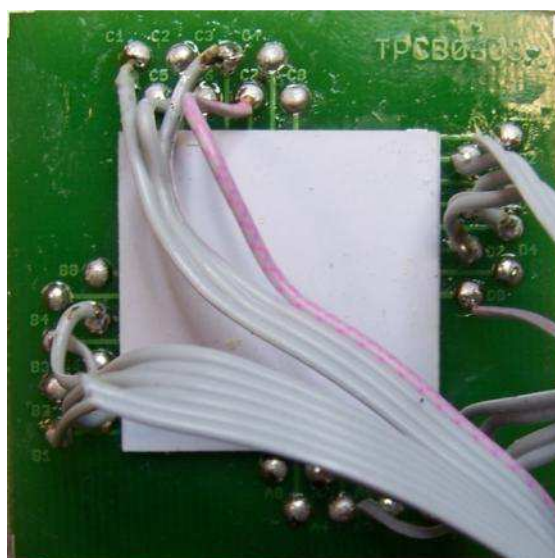
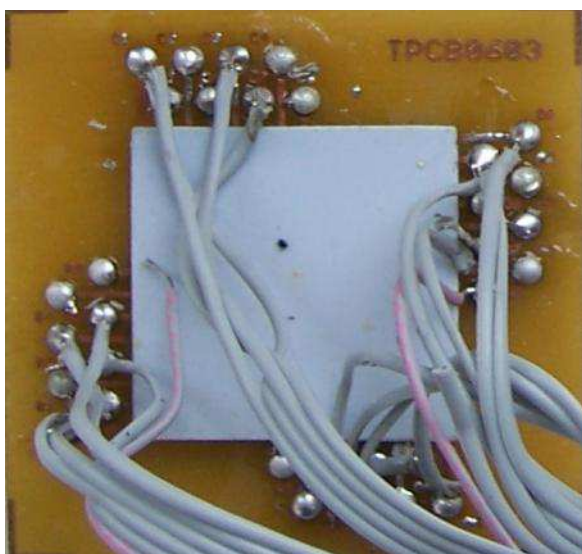
Obr. 54: Zkompletované LTCC-FR4 moduly



Obr. 55: Zkompletované LTCC-FR4 moduly se zapájenou zemí



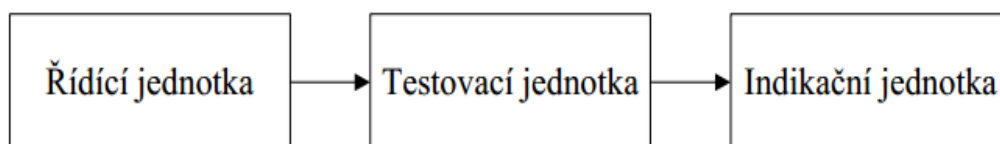
Obr. 56: Vodivé propojení země u základních desek FR-4



Obr. 57: Připojené kabely na LTCC-FR4 moduly

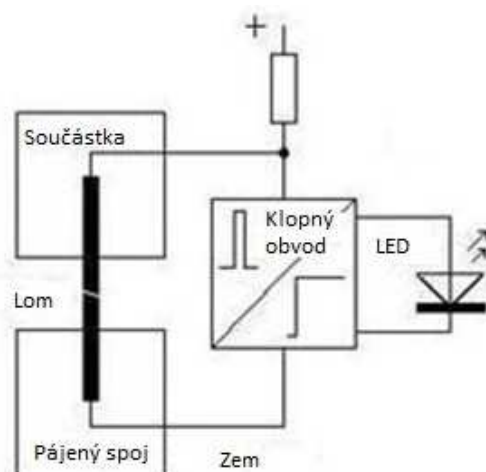
8 Zapojení testovací struktury

Experiment týkající se reálné spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů FR4-keramických modulů, je proveden na testovací struktuře (viz obr. 58), která se skládá ze tří částí. Těmito částmi jsou řídicí jednotka, testovací jednotka a indikační jednotka. Teplotní komoru je možné ovládat i prostřednictvím kontrolního panelu umístěného na těle komory, avšak výhodnější je využít možností rozhraní RS 232 a teplotní komoru ovládat pomocí počítače. To přináší rozšířené možnosti, které jsou podpořeny širším programovým vybavením. Testovací jednotkou je teplotní komora CTS T-40-25 (viz obr. 59a), která je řízena integrovaným mikroprocesorem a umožňuje zrychlené cyklování teplot v širokém rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž jsou testovací sestavy reálně cyklovány v rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1].



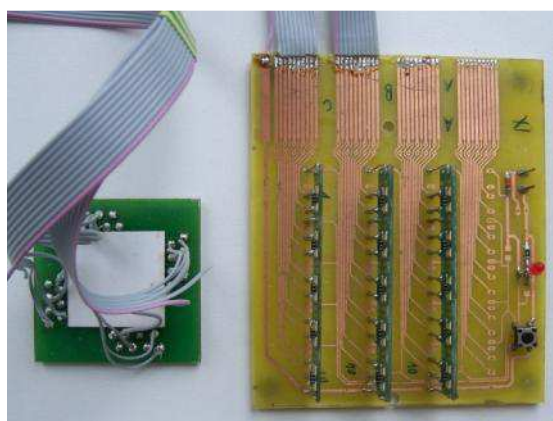
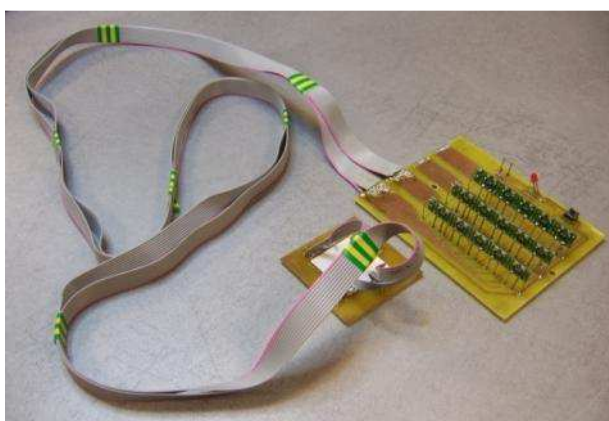
Obr. 58: Blokové schéma testovací struktury [27]

Problematické je dosažení zejména spodních hodnot teplotního profilu, které se ustalují v průměru dvakrát déle než v případě horních teplot. To je způsobeno vyššími nároky na izolaci pracovního prostoru, která je narušena průchodem velkého množství testovacích kabelů otvorem teplotní komory. Jednotlivé testovací sestavy jsou umístěny uvnitř teplotní komory na kovovém roštu. Před vložením testovacích desek a započítáním cyklování je vhodné odstranit z těchto desek přebytek tavidla, které se následně usazuje na stěnách teplotní komory.



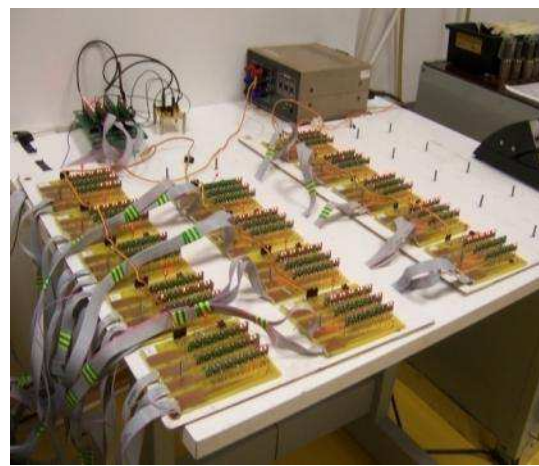
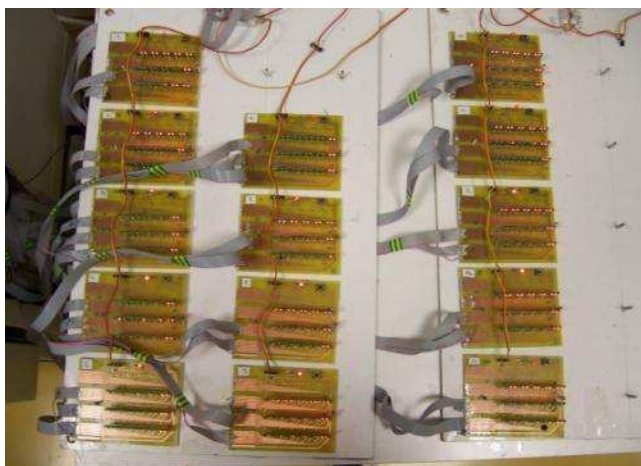
Obr. 59: (a) Teplotní komora CTS T-40/25 (b) Princip funkce indikační jednotky [1]

Poslední částí testovací struktury je indikační jednotka, kterou je deska plošného spoje, osazená LED diodami (viz obr. 59b, obr. 60). Tyto LED diody jsou řízeny klopnými obvody. V případě, že dojde k přerušení spoje, je rozsvícena LED dioda, která indikuje lom ve spoji, resp. přerušení elektrického obvodu. Testovací deska je napájena z externího zdroje. Bylo experimentálně zjištěno, že porucha je charakterizována časově proměnným charakterem ve formě impulsů [1].



Obr. 60: Testovací sestavy

Tyto impulsy se s přibývajícím počtem cyklů prodlužují. Impulsy jsou zaznamenávány paměťovým elementem, který se na testovací desce nachází ve formě klopného obvodu. Poruchu je možné indikovat pro každý spoj samostatně nebo využít sériového propojení pro několik pájených spojů dohromady, dále pro určitý logický blok nebo místo na testovaném modulu. Takové sériové propojení se nazývá Daisy Chain propojení. V testovaných vzorcích se jisté formy takového zapojení využívá, jelikož na jednu diodu jsou zapojeny dvě různé součástky v jednom logickém segmentu a v případě poruchy na jedné z těchto součástek je indikována porucha i v případě, že na druhé součástce ještě nenastala. Samotný klopný obvod je naprogramován tak, aby indikoval přerušení, které trvá déle než 100 ms. Kratší přerušení je problematické indikovat, jelikož by klopný obvod mohl být spouštěn náhodnými impulsy z jeho okolí. Pro testování pájených spojů je 100 ms přerušení dostatečné [1].



Obr. 61: Indikační desky testovacích sestav

9 Vyhodnocení teplotního cyklování

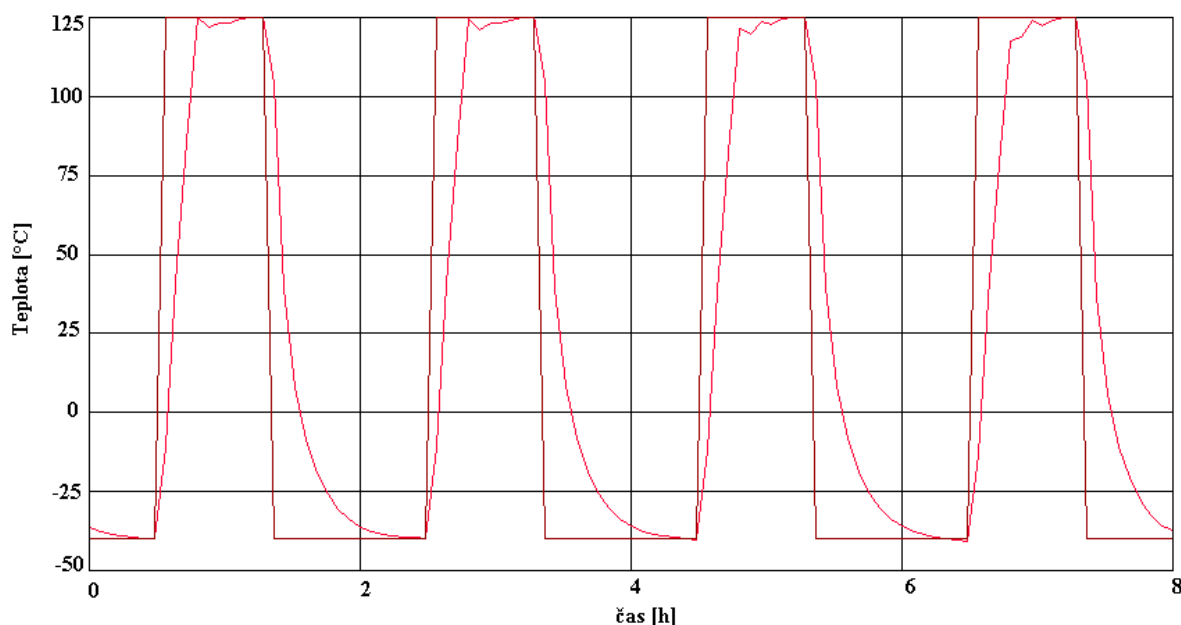
Vyrobené testovací sestavy (viz tab. 26) jsou vystaveny podmínkám teplotního cyklování podle normy IPC-9701, která je standardem pro testování spolehlivosti elektronických pájených propojení. Tato norma rozděluje elektronické výrobky do několika kategorií na základě skladovacích a provozních teplot dané skupiny výrobků a dále zahrnuje krajní provozní podmínky jednotlivých skupin výrobků, mezi které lze zahrnout průměrnou dobu jejich provozního cyklu, předpokládaný počet cyklů za rok, typickou životnost a akceptovatelnou chybovost. Pro testované struktury je nastaven teplotní profil, který odpovídá svými parametry nejnáročnější kategorii automobilového průmyslu se zaměřením na prostory mimo kabinu. Tato kategorie je definována skladovacími teplotními podmínkami -55/125 °C a provozními podmínkami -40/125 °C, které odpovídají podmínkám cyklování v teplotní komoře. Z hlediska krajních provozních podmínek se tato kategorie rozděluje do dalších tří skupin.

Tab. 26: Testovací sestavy, materiálové složení a počet cyklů do poruchy

Číslo sestavy	Složení sestavy				
	Základní deska	Keramický materiál	Součástka	Pájka	CTF
1	FR4, maska, HAL	LTCC	C0805	SAC305	510
2	FR4, maska, HAL	LTCC	C0805	SAC305	744
3	FR4, maska, HAL	96% Al ₂ O ₃	C0805	SAC305	466
4	FR4	LTCC	C0805	SAC305	653
5	FR4	LTCC	C0805	SAC305	545
6	FR4	LTCC	C0805	SAC305	552
7	FR4	LTCC	C0805	SAC305	492
8	FR4	LTCC	C0805	SAC305	703
9	FR4	LTCC	C0805	SAC305	656
10	FR4	LTCC	C0805	SAC305	658
11	FR4	96% Al ₂ O ₃	C0805	SAC305	514
12	FR4	96% Al ₂ O ₃	C0805	SAC305	479
13	FR4	96% Al ₂ O ₃	C0805	SAC305	453
14	FR4	96% Al ₂ O ₃	C0805	SAC305	508
15	FR4	96% Al ₂ O ₃	C0805	SAC305	117
16	FR4	96% Al ₂ O ₃	Bez součástek	SAC305	729

Typický čas jednoho cyklu se udává v rozmezí 1 - 2 hodiny, přičemž v závislosti na typu kategorie musí výrobek vydržet 40 - 1000 cyklů za rok po dobu 10 - 15 let. Z hlediska přípustné chybovosti norma definuje maximální přípustnou chybovost 0,1 %, což znamená menší nároky ve srovnání se sférou komerčních letadel nebo produktů určených pro provoz ve vesmíru, kde je definována přípustná chybovost 0,001 %. Předmětem teplotního cyklování je 16 sestav, z nichž tři sestavy jsou s nepájivou maskou a s povrchovou úpravou HAL a 13 bez nepájivé masky a bez povrchové úpravy HAL. Dále lze výsledné sestavy charakterizovat z hlediska použitých keramických materiálů, kdy je součástí 7 sestav s korundovou keramikou a 9 sestav s nízkoteplotní keramikou LTCC. Teplotní profil byl nastaven pomocí řídicí

jednotky teplotní komory CTS T-40/25 podle zmíněné normy IPC-9701 v rozmezí teplot -40/125 °C, s tím že by měla být v každém cyklu prodleva 15 minut na minimální a maximální teplotě (viz obr. 62). Ve skutečnosti se nastavený profil na řídicí jednotce mírně liší od reálného teplotního profilu zejména při nízkých teplotách, kde dochází k dosažení nejnižší teploty při dvojnásobném zpoždění oproti nastavenému profilu. To je způsobeno velkou měrou netěsností prostoru teplotní komory, která není dostatečně odizolována od okolního prostředí v oblasti průchodu testovacích kabelů od indikačních desek k testovaným sestavám.



Obr. 62: Profil teplotního cyklování v komoře CTS T-40/25

Výsledkem teplotního cyklování v teplotní komoře je počet cyklů do chyby u jednotlivých pájených propojení na testovaných deskách. Na desce je možné hodnotit 4 hlavní segmenty pájených propojení, z nichž dva se nachází blíž ke hraně testovací desky a dva blíže středu testovací desky. Z výsledků je vidět, že nejčastěji začínají vznikat chyby v oblasti blízké rohu desky, kde se projevuje nejvyšší délková roztažnost materiálu při cyklickém namáhání. Poté následuje segment, který se nachází také na kraji desky, ale je více vzdálený od rohu sestavy. Nejvyšší počet cyklů do poruchy byl zjištěn v oblastech blízkých středu základní desky, kde se nejméně projevuje roztažnost materiálu. Z hlediska počtu cyklů do poruchy lze vyhodnotit experiment pro čtyři různé sestavy (viz tab. 27), které rozdělit na sestavy s keramickým modulem ve formě nízkoteplotní keramiky LTCC a klasického korundového substrátu s obsahem 96% Al_2O_3 .

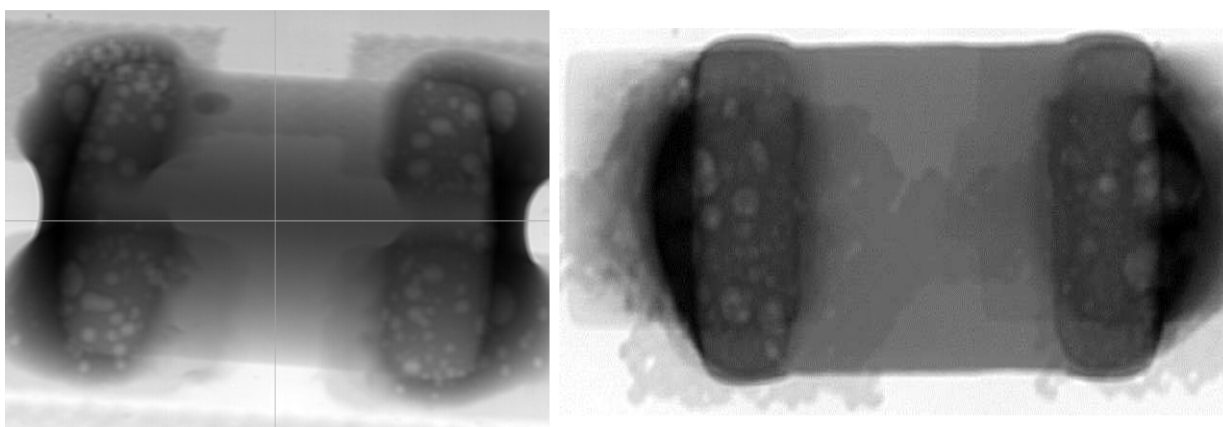
Sestavy jsou dále hodnoceny z hlediska vlivu působení nepájivé masky na jejich spolehlivost. Výsledky jsou nejvíce relevantní pro sestavy s nízkoteplotní keramikou a s korundovou keramikou bez nepájivé masky, jelikož je proveden test ve větším množství kusů. Podle normy IPC-9701 je nutné pro spolehlivé ověření životnosti dané sestavy testovat soubor 33 vzorků, což je náročné zejména z pohledu ekonomických a kapacitních parametrů, kde je testování limitováno počtem indikačních desek. Proto je test proveden pouze na 16 vzorcích sestav v různých konfiguracích, kde je zjištěn průměrný počet cyklů do poruchy celé

sestavy a následně průměrný počet cyklů do poruchy u sestav stejné konfigurace. Nejvyšší spolehlivost pájených propojení je zaznamenána u sestav s keramickými moduly v podobě nízkoteplotní keramiky LTCC, kde je dosaženo průměrně 608 cyklů do poruchy, ve srovnání s 488 cykly do poruchy s klasickou korundovou keramikou. Rozdíl v počtu cyklů do poruchy u těchto materiálů je pravděpodobně způsoben zejména rozdílnými materiálovými parametry keramických modulů, kde lze zmínit zejména modul pružnosti v tahu, koeficient délkové teplotní roztažnosti a teplotní vodivost.

Tab. 27: Průměrný počet cyklů do poruchy u jednotlivých kombinací sestav

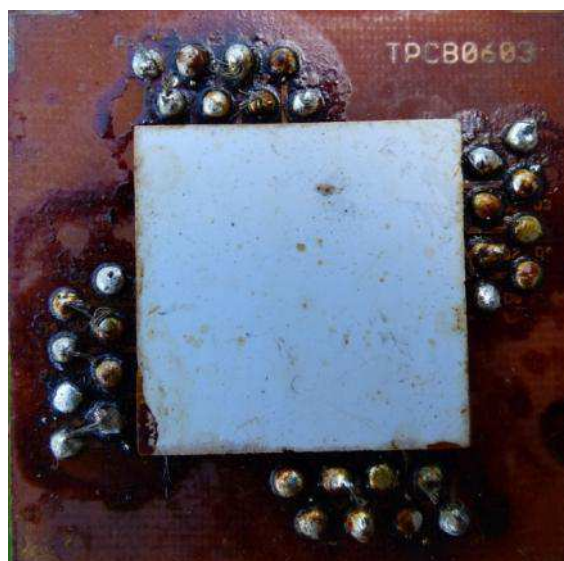
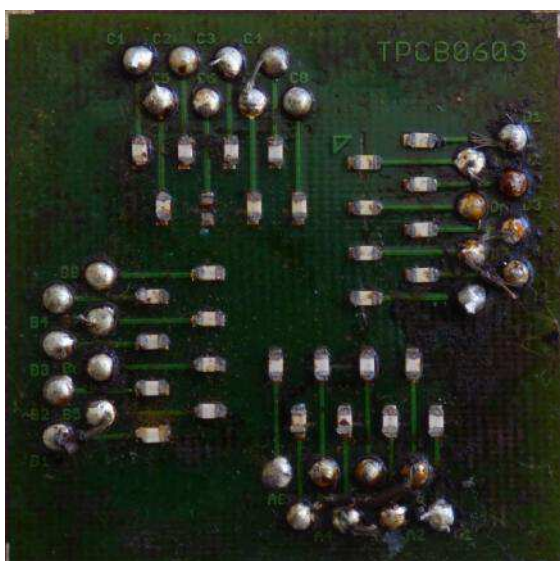
Sestava			Průměrný počet cyklů do poruchy
Základní materiál	Keramický materiál	Nepájivá maska	
FR-4	96% Al ₂ O ₃	Ne	488
FR-4	LTCC	Ne	608
FR-4	96% Al ₂ O ₃	Ano	466
FR-4	LTCC	Ano	627

Velkou roli hraje zejména hodnota modulu pružnosti u korundové keramiky, která je vyšší než u nízkoteplotní keramiky LTCC. Menší pružnost korundové keramiky způsobuje vyšší pnutí v pájeném spoji, což vede k nižší spolehlivosti tohoto pájeného propojení. Dále korundová keramika disponuje vyšším koeficientem délkové teplotní roztažnosti, což také vede k vyššímu pnutí ve spoji. Testované sestavy jsou také hodnoceny z hlediska vlivu nepájivé masky na spolehlivost pájeného spoje. Vzhledem k nízkému počtu základních desek s nepájivou maskou a povrchovou úpravou nejsou výsledky testování dostatečně relevantní, ale zejména u sestav s keramickými moduly je potvrzen teoretický předpoklad vyšší spolehlivosti. U těchto sestav je zjištěn průměrný počet 627 cyklů do poruchy, což je mírně vyšší číslo než u sestav bez nepájivé masky. Na sestavy s nepájivou maskou a povrchovou úpravou HAL, lze nahlížet z pohledu několika přidáných faktorů, které zvyšují spolehlivost. Prvním faktorem je zvýšená mechanická integrita základního materiálu FR-4, což může způsobovat menší pnutí v pájeném spoji a dále povrchová úprava HAL zlepšuje smáčivost pájecí pasty a tím je dosaženo vyšší mechanické integrity pájeného propojení. Kvalita pájených spojů je vyhodnocena pomocí rentgenu před započítáním cyklování a po cyklování u vybraného vzorku bez nepájivé masky (viz obr. 63).

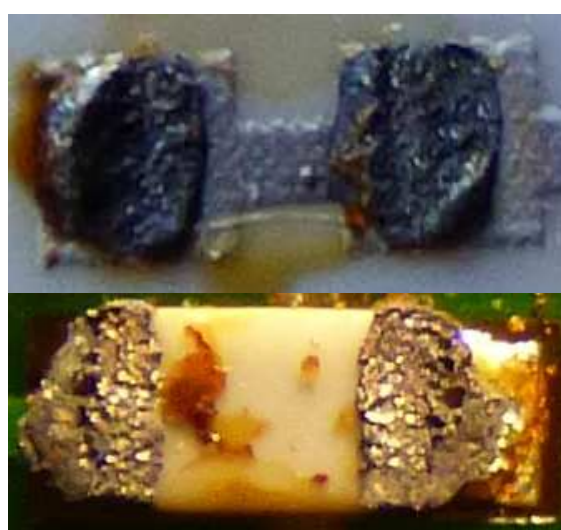
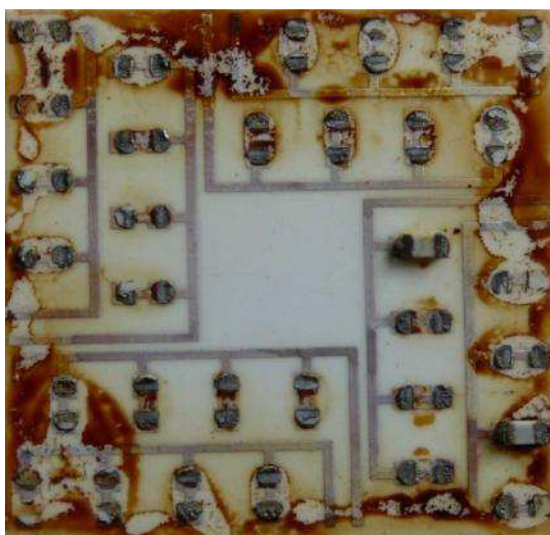


Obr. 63: Rentgenový snímek pájeného spoje (a) před cyklováním (b) po cyklování

Z obrázků získaných na rentgenu je vidět, že objem pájky je o něco menší na ploškách vodivého motivu na keramickém substrátu a větší na základním materiálu FR-4. To je způsobeno hlavně technologií výroby tohoto typu pájeného propojení, kdy je sestava zapájena přetavením pájecí pasty v parách. Přestože působí dynamické síly povrchového napětí pájky, tak dochází ke stečení části objemu pájky natisknuté na keramickém modulu na pájecí plošku základního materiálu FR-4. Z toho důvodu pájený spoj disponuje větším objemem na ploškách základního materiálu FR-4 a menším na ploškách vodivého motivu keramického materiálu. Proto dochází k poruchám při cyklování sestav nejdříve v oblasti keramického modulu, což je navíc podpořeno vyšším pnutím v této oblasti, které je způsobeno vlastnostmi keramických materiálů (viz obr. 64, obr. 65).



Obr. 64: (a) Sestava s nepájivou maskou a odlomeným keramickým modulem po teplotním cyklování (b) Sestava bez nepájivé masky po teplotním cyklování



Obr. 65: (a) Odlomený keramický modul po teplotním cyklování (b) Detaily ulomeného pájeného spoje na vodivém motivu keramické desky a na kondenzátoru

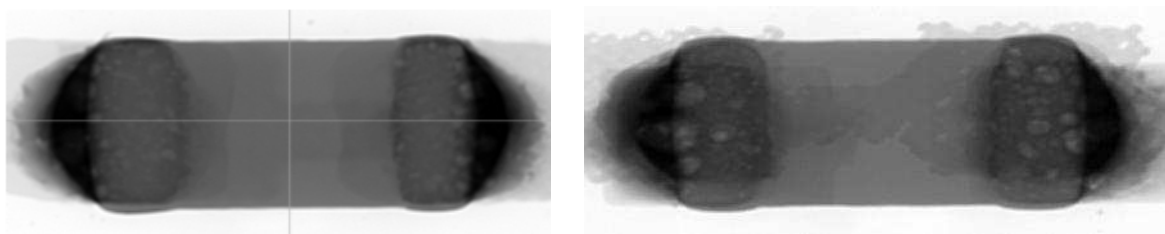
10 Diskuse nad získanými výsledky

Odhad spolehlivosti je proveden kombinací tří různých metod, které zahrnují teoretický výpočet pomocí zvoleného únavového modelu, simulaci v programu ANSYS a praktické měření. Pro teoretický výpočet je využit Engelmaier-Wild únavový model, který je zdokonalením obecnějšího Coffin-Manson modelu, přičemž oba tyto modely patří do oblasti nízkocyklového zatěžování materiálu. Velkou předností Engelmaier-Wild únavového modelu je velmi rychlý a přesný odhad spolehlivosti uvažovaného pájeného propojení, jenž je ulehčen velkým množstvím experimentálně získaných materiálových dat pro široké spektrum pájecích slitin. Model také kombinuje více druhů mechanismů, které působí v pájeném spoji během teplotního zatěžování. Vedle plastické a elastické deformace je to také deformace tečením, která může v pájeném spoji nastávat při vyšších teplotách. Pomocí únavového modelu Engelmaier-Wild je vypočten teoretický počet cyklů do poruchy v pájeném spoji pro uvažované sestavy, přičemž je výpočet proveden pouze pro sestavy bez nepájivé masky. Tj. se dá říct, že vlivy nepájivé masky nelze v případě teoretického výpočtu přesně zohlednit vzhledem k jejímu specifickému spojení se základním materiálem. Stejně tak není možné zohlednit ani měděné pájecí plochy vodivého motivu, jejichž délková teplotní roztažnost může hrát roli ve spolehlivosti elektronických propojení.

Tyto nedostatky jsou vyřešeny odhadem spolehlivosti prostřednictvím simulačního programu ANSYS, kde lze do modelu sestavy s pájeným spojem zahrnout velmi přesným způsobem nepájivou masku, měděné plochy vodivého motivu a v neposlední řadě i složitou geometrii pájeného spoje. Poté lze k jednotlivým částem sestavy přiřadit jejich materiálové parametry. Vhodnou kombinací získaných dat změn fyzikálních parametrů během zatěžování a únavového modelu je získán velmi přesný výsledek počtu cyklů do poruchy. Simulaci v programu ANSYS a výpočtem pomocí Darveuax modelu je vypočten počet cyklů do poruchy pro jednotlivé sestavy. Získané výsledky teoretickým výpočtem a simulací jsou následně porovnány s praktickým měřením. Při porovnání jednotlivých výsledků (viz tab. 28) je vidět, že nejméně přesný je odhad v případě teoretického výpočtu, kdy je zjištěno 1317 cyklů do chyby v případě sestav s korundovými keramikami a 1671 cyklů do chyby u sestav s nízkoteplotní keramikou LTCC. Dále nejsou zahrnuty výpočty sestav s nepájivou maskou, jelikož nelze parametry nepájivé masky uvažovat ve výpočtu. Teoretickým výpočtem je potvrzena vyšší spolehlivost sestav s nízkoteplotní keramikou, která byla zjištěna v případě praktického měření, avšak z hlediska počtu cyklů do chyby je odhad značně nepřesný.

To je způsobeno zejména tím, že při teoretickém výpočtu nelze lépe specifikovat geometrii pájeného spoje, který je charakterizován u Engelmaier-Wild únavového modelu pouze výškou a dále ve výpočtu není zahrnuta teplotní roztažnost měděných pájecích ploch. S výpočtem je spojeno také využití experimentálně získaných parametrů a konstant, které je nutné brát s rezervou, vzhledem k neznámým podmínkám, ve kterých byly tyto parametry získány. Při porovnání teoretických výsledků a výsledků získaných pomocí simulace v programu ANSYS je vidět, že výsledky získané simulací jsou přesnější než teoretické výpočty. Nejvíce se blíží výsledky realitě v případě sestav bez nepájivé masky, kdy je zjištěno 1109 cyklů do chyby v programu ANSYS u korundové keramiky a 488 cyklů praktickým měřením. Dále u nízkoteplotní keramiky je zjištěno simulací 1313 cyklů do poruchy a

v případě praktického měření 608 cyklů. Rozdílné výsledky jsou způsobeny několika faktory, mezi které lze zahrnout zejména nehomogenitu pájených spojů v reálných sestavách, ve kterých se nachází dutiny a pájený spoj tak není homogenní komponentou (viz obr. 66).



Obr. 66: Rentgenový snímek zapájené součástky (a) bez HAL (b) s HAL

Tyto dutiny se objevují i v případě olovnatých pájek, ale u bezolovnatých pájek se objevují v podstatně větší míře. To je dáno zejména vyššími teplotami přetavení, větším povrchovým napětím a sníženou rychlostí smáčení. Na snímcích získaných pomocí rentgenu je vidět, že se dutiny ve větším množství a rozměrech nacházejí u sestav s povrchovou úpravou HAL, přičemž na deskách bez povrchové úpravy se dutiny vyskytují v menší míře. To je pravděpodobně způsobeno technologií nanášení roztaveného kovu na pájecí plošky, který je nejprve nanesen v lázni na celou desku a následně je ofukován přebytečný materiál horkým vzduchem. Při tomto ofukování mohou v pájecích ploškách zůstat mikroskopické dutiny s obsahem plynu, který následně způsobuje dutiny v pájeném spoji při dalším pájení.

Dále má na přítomnost dutin ve spoji vliv také přetavovací profil, kde má vliv teplota přetavení, strmost teplotního profilu a doba nad teplotou přetavení. Z hlediska teploty přetavení je teplota u pájení v parách relativně vysoká při hodnotě 230 °C a také pájecí profil probíhá relativně dlouhou dobu, což přispívá k tvorbě dutin ve spoji. Rentgenem je dále zjištěno, že objem pájky u sestav je menší na ploškách keramického materiálu, jelikož při pájení přetavením dochází ke stečení části objemu pájky na spodní plošku na základním materiálu. To je také faktor, který přispívá k většímu počtu cyklů do poruchy u výpočtu pomocí simulace, jelikož u simulace odpovídá geometrie pájeného spoje ideálnímu pájenému spoji u tohoto typu sestavy. Z hlediska faktoru tvorby dutin je výsledek simulace přesnější u sestav bez nepájivé masky, jelikož se homogenita pájeného spoje více blíží homogennímu pájenému spoji v simulaci. U sestav s nepájivou maskou jsou proto výsledky simulace více vzdáleny od výsledků získaných praktickým měřením.

Tab. 28: Srovnání metod odhadu spolehlivosti u jednotlivých typů sestav

Sestava			Teoretický výpočet	Simulace v programu ANSYS	Praktické měření
Základní materiál	Keramický materiál	Nepájivá maska	[CTF]	[CTF]	[CTF]
FR-4	96% Al ₂ O ₃	Ne	1317	1109	488
FR-4	LTCC	Ne	1671	1313	608
FR-4	96% Al ₂ O ₃	Ano	-	1154	466
FR-4	LTCC	Ano	-	1255	627

Závěr

Cílem diplomové práce bylo popsat problematiku odhadu spolehlivosti pájených spojů při cyklickém teplotním namáhání, vybrat vhodné elektronické propojení a provést simulaci tohoto propojení v programu ANSYS. Výsledky získané prostřednictvím simulace jsou poté porovnány s praktickým měřením. V práci je popsána problematika životnosti pájených propojení a faktory, které mají vliv na správnou funkčnost pájených spojů. Velkou roli hrají také vlastnosti nejpoužívanějších substrátů v elektronické výrobě, jejichž vlastnosti a technologické postupy výroby jsou hodnoceny. Z hlediska odhadu spolehlivosti jsou uvedeny a charakterizovány jednotlivé typy únavových modelů, které lze využít pro odhad spolehlivosti. Tyto únavové modely jsou rozděleny do skupin na základě fyzikálních mechanismů, které jsou sledovány v pájeném spoji během cyklického teplotního namáhání. Pro účely teoretického odhadu spolehlivosti, simulace v programu ANSYS a praktické měření je vybráno pájené propojení mezi substrátem FR-4 a keramickým substrátem přes SMD součástky, které představuje kondenzátor 0805. FR-4 materiál je uvažován v provedení bez nepájivé masky a s nepájivou maskou pro zjištění vlivu nepájivé masky na spolehlivost sestav.

Pro zhotovení keramického modulu je zvolena nízkoteplotní keramika LTCC, která je porovnána s klasickou korundovou keramikou s obsahem 96 % Al_2O_3 . Uvažované sestavy jsou nejdříve předmětem teoretického odhadu spolehlivosti prostřednictvím vhodného únavového modelu. Tímto únavovým modelem je zvolen Engelman-Wild model, který je založen na plastických deformačních mechanismech v pájeném spoji během cyklického zatěžování. Výpočet spolehlivosti podle tohoto únavového modelu je proveden pro uvažované sestavy s výjimkou vlivu nepájivé masky, který nelze zahrnout do výpočtu a jsou aplikovány totožné teplotní parametry s praktickým měřením a simulací v programu ANSYS. Výsledkem výpočtu spolehlivosti je 1671 cyklů do poruchy pájeného spoje v případě sestavy FR-4 a nízkoteplotní keramiky Heraclon HL2000, dále je proveden výpočet pro sestavu FR-4 a korundové keramiky 96 % Al_2O_3 , kde je zjištěno 1317 cyklů do poruchy. Rozdíl ve spolehlivosti u uvažovaných sestav je v případě teoretického výpočtu způsoben odlišnými parametry teplotní délkové roztažnosti jednotlivých keramických materiálů.

Dále je proveden odhad spolehlivosti prostřednictvím spojení simulace v programu ANSYS a vhodného únavového modelu, do kterého jsou dosazeny výstupy získané simulací. Simulace v programu ANSYS je složena z několika kroků, přičemž je nejdříve vytvořena geometrie modelu v programu Solidworks a následně importována do prostředí ANSYS. Geometrie modelu je zhotovena v provedení bez nepájivé masky a s nepájivou maskou na substrátu FR-4, dále jsou uvažovány keramické moduly LTCC a korundová keramika. Keramické moduly jsou z hlediska geometrie totožné, a proto jsou definovány pouze odlišnými materiálovými parametry. Simulace je provedena pro stejné teplotní podmínky uvažované během cyklování v teplotní komoře, avšak pouze v pěti cyklech, které jsou dostatečné pro zhodnocení pnutí ve spoji během jednoho cyklu. Výstupem simulace je přírůstek pnutí ve spoji během jednoho cyklu, který je dosazen do Darveaux modelu. Darveaux model se zakládá na přírůstku napětí ve spoji během teplotního cyklování a celkový výpočet se skládá z několika kroků.

Nejdříve je vypočten počet cyklů do okamžiku, kdy začne v pájeném spoji vznikat trhlinka, poté je vypočtena míra rychlosti rozšiřování lomu a na základě předchozích parametrů je vypočten celkový počet cyklů do definitivní poruchy pájeného spoje. Simulací a dosazením do Darveaux modelu je zjištěn počet cyklů do poruchy pro všechny typy uvažovaných sestav. Pro ověření výsledků získaných teoretickým výpočtem a simulací jsou realizovány testovací moduly, které mají stejné parametry jako moduly uvažované v teoretických výpočtech a v simulaci. Základním materiálem testovacích modulů je substrát FR-4, na kterém je substrativní technologií zhotoven motiv, přičemž je zhotoveno 18 základních desek bez povrchové úpravy a nepájivé masky a 4 základní desky s nepájivou maskou a povrchovou úpravou HAL. Dále je vyrobeno 9 kusů LTCC substrátů a 13 kusů korundových substrátů, na které je stejně jako na základní materiály natisknuta bezolovnatá pájecí pasta SAC305 prostřednictvím šablonového tisku. Mezi zhotovenými základními deskami a keramickými materiály je u každé sestavy zapájeno 32 SMD kondenzátorů 0805 a výsledné sestavy jsou zapájeny přetavením v parách.

Zhotovené sestavy jsou vystaveny zhoršeným podmínkám v teplotní komoře při teplotním cyklování a je sledován celkový počet cyklů do poruchy. Experimentálním měřením je nejvyšší počet cyklů do poruchy zjištěn pro sestavy s nepájivou maskou a bez nepájivé masky, přičemž výsledky jsou vzhledem k počtu testovaných kusů průkazné zejména u desek bez nepájivé masky. U těchto sestav je zjištěno praktickým měřením průměrně 488 cyklů do poruchy u korundové keramiky a u nízkoteplotní keramiky 608 cyklů do poruchy. Simulací a výpočtem podle Darveaux modelu je potvrzena vyšší spolehlivost nízkoteplotní keramiky, jelikož je zjištěno 1313 cyklů do poruchy a u korundové keramiky 1109 cyklů do poruchy. Vyšší počet cyklů do poruchy zjištěných prostřednictvím simulace je způsoben zejména přítomností dutin v pájeném spoji, což se projevuje zejména u vzorků s nepájivou maskou a dále geometrií pájeného spoje u modelu v ANSYS a u reálných sestav. Simulací je také potvrzena vyšší spolehlivost sestav s nízkoteplotní keramikou v praktickém měření, což je dáno zejména odlišnými materiálovými parametry daných keramických modulů. U sestav s nepájivou maskou je simulací zjištěn nižší přírůstek napětí v pájeném spoji během jednoho cyklu, k čemuž zřejmě přispívá přítomnost nepájivé masky.

Tento fakt hraje roli ve vyšší spolehlivosti sestav s nepájivou maskou, avšak je nutné uvažovat i další faktory, které simulací nelze zjistit, přičemž lze mluvit zejména o vytvoření kvalitnější intermetalické vrstvy v případě využití povrchové úpravy žárovým pokovením roztavenou pájkou. Simulací modelu s nepájivou maskou a výpočtem podle Darveaux modelu je zjištěno u korundové keramiky 1154 cyklů do poruchy, ačkoliv experimentem je zjištěno pouze 466. Lepšího výsledku je dosaženo u nízkoteplotní keramiky, kdy je experimentem zjištěno 627 cyklů a simulací 1255 cyklů. Vyšší rozdíly vyplývají hlavně z vyšších nehomogenit v pájených spojkách sestav, které jsou dány zejména použitou povrchovou úpravou HAL a nepříliš ideálním pájecím teplotním profilem v parách, který je nepříznivý z důvodu relativně dlouhé doby teploty přetavení. Simulací je také potvrzeno nejvyšší napětí v pájeném spoji v oblasti pájecích ploch na keramickém modulu, kde docházelo u experimentálních sestav nejčastěji k lomu.

Použitá literatura

- [1] ŠANDERA, J., HEJÁTKOVÁ, E. Termomechanické namáhání SMD součástek. [cit. 2013-02-02]. Dostupné z WWW: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02057>
- [2] SZENDIUCH, I., E. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno, Vutium, 2006, ISBN 80-214-3292-6 [cit. 2014-02-02]
- [3] SUBRAMANIAN, K. *Lead-free electronic solders: a special issue of Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. New York: Springer Science Business, vi, 375 p. ISBN 978-038-7484-310.
- [4] ENGELMAIER, W. *Pb-free solder creep-fatigue reliability models updated and extended*, Global SMT & Packaging, Říjen 2009. [cit. 2013-01-02]. 36-38s.
- [5] PUTTLITZ, Karl J a Kathleen A STALTER. *Handbook of lead-free solder technology for microelectronic assemblies: a special issue of Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. New York: Marcel Dekker, 2007, xi, 1026 p. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 170. ISBN 08-247-4870-0.
- [6] MURTHY, D, Marvin RAUSAND a Trond ØSTERÅS. *Product reliability: specification and performance*. London: Springer, c2008. ISBN 978-184-8002-715.
- [7] IMANAKA, Yoshihiko. *Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology*. New York: Springer, 2005, 229 s. ISBN 03-872-3130-7.
- [8] SANAPALA, R. *Characterization of FR-4 Printed Circuit Board Laminates Before and After Exposure to Lead-free Soldering Conditions*. ProQuest, 2008. [cit. 2014-04-17]. 75s. ISBN 054966193X, 9780549661931
- [9] BATH, Jasbir. *Lead-free soldering*. New York: Springer, xiv, 299 p. ISBN 9780387684222-.
- [10] LEVITIN, Valim. *High temperature strain of metals and alloys: physical fundamentals*. Weinheim: Wiley-VCH, vii, 171 p. ISBN 978-352-7313-389.
- [11] KOSINA, P., ŠANDERA, J., HEJÁTKOVÁ, E. *Perspektiva LTCC technologie. Bulletin of SMT/ISHM Int.Conference „New Trends in Microelectronics“*, 2009, roč.2009, č.64, s. 4-5. ISSN: 1211-6947
- [12] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.
- [13] ŠVECOVÁ, Olga. *Spolehlivost bezolovnatých pájek a vybrané způsoby odhadu jejich životnosti*. Brno, 2012. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Šandera, PhD.
- [14] SOCIETY OF PLASTICS ENGINEERS, SPE. *Imaging and image analysis for plastics: physical fundamentals*. Weinheim: Plastics Design Library, 1999, vii, 171 p. ISBN 18-842-0781-2.

- [15] LEE, W.W, L.T NGUYEN a G.S SELVADURAY. *Solder joint fatigue models: review and applicability to chip scale packages: review and applicability to chip scale packages*.
- [16] *370H Laminate nad Prepreg* [online]. Isola corp. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.isola-group.com/wp-content/uploads/2014/04/370HR-Laminate-and-Prepreg-Data-Sheet-Isola.pdf>
- [17] *Heraeus HeraLock® Tape HL2000* [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/media/webmedia_local/media/datasheets/ltccmaterials/HL2000.pdf
- [18] MARKETECH International Inc. *Aluminum Oxide (Alumina) & Alumina Products* [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://mkt-intl.com/materials/engineered-ceramics/aluminum-oxide/>
- [19] HE, Yi. Heat capacity, thermal conductivity, and thermal expansion of barium titanate-based ceramics. www.sciencedirect.com: Elsevier, 2004, *Thermochimica acta* 419, s. 135-141.
- [20] IPC-9701. *Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments*. Northbrook, Illinois, 2002.
- [21] STARÝ, J. *Plošné spoje a povrchová montáž* [online]. Brno, 1999 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/METMEL/studijni-pomucky/METMEL_11_L_BPSM_Plosne_spoje_a_povrchova_montaz.pdf
- [22] IPC-SM 785. *Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments*. Northbrook, Illinois: Association Connecting Electronics Industries, 1992.
- [23] VLACH, B. Creep a lom při creepu [online]. [cit. 2014-03-03]. Dostupný z [www](http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/09%20-%20Creep.doc): <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/09%20-%20Creep.doc>
- [24] KESTER®. *EnviroMark 907™: Lead-Free No-Clean Solder Paste*. Itasca, Illinois, USA: Kester, 2009, 2 s.
- [25] ŠVECOVÁ, O, NOVOTNÝ, V. *The Use Of Creep-Fatigue Models For Solder Joints Reliability Prediction*. SECOND FORUM OF YOUNG RESEARCHERS In the framework of International Forum „Education Quality 2010“. Izhevsk, Russia: Publishing House of ISTU, 2010. s. 406-411. ISBN: 978-5-7526-0442-3.
- [26] ENGELMAIER, W. *Surface Mount Solder Joint Long-term Reliability: Design, Testing, Prediction. Soldering*. 1989, vol. 1, issue 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/eb037660>.
- [27] ŠANDERA, Josef. *Technologie a spolehlivost pájeného připojení elektronických modulů a součástek pro povrchovou montáž: Technology and reliability of solder connection electronic modules and components [i.e. components] in surface mount assembly : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTIUUM, 2010, 31 s. ISBN 978-80-214-4221-4. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-4221-4.pdf>

- [28] ŠANDERA, Josef. *Měření termomechanické spolehlivosti pájených spojů*. [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.smtplus.cz/pdf/termomechspolspoju.pdf>
- [29] *Heraeus TC0306: Co-Firing Silver Conductor* [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/media/webmedia_local/media/datasheets/lccmaterials/TC0306.pdf
- [30] *ESL 9912-K: Cermet Silver Conductor*. [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.electroscience.com/pdf/9912-K.pdf>
- [31] JOHNSON, Zane E. *A Compilation of Anand Parameters for Selected SnPb and Pb-Free Solder Alloys*. [online]. 2012, s. 3 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://ansys.net/ansys/papers/zej-2012-anand-2.pdf>
- [32] AMTECH Advanced SMT Solder Products. *Premium Cast Bar Solder AMT105: Product Data Sheet* [online]. 2006, s. 1 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://amtechsolder.com/pdf/BarSolderAMT105.pdf>
- [33] SAWAMURA, T., IGARASHI T. *Difference Between Various Sn/Ag/Cu Solder Compositions*. [online]. 2005, Nihon Almit, Co., Ltd., s. 37 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.almit.com/dloads/Agents/SAC%20Alloy%20Comparison.pdf>
- [34] SIEWERT, Thomas, Stephen LIU, David R. SMITH a Juan Carlos MADENI. *Database for Solder Properties With Emphasis of New Lead-free Solders: Properties of Lead-free Solders* [online]. 2002, Colorado, National Institute of Standards and Technology & C, s. 77 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: http://www.msed.nist.gov/solder/NIST_LeadfreeSolder_v4.pdf
- [35] *Laminate Sheeting: FR4-10* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.bew.com.au/files/LAMINATE-SHEETING-g10.pdf>
- [36] STC: Superior Technical Ceramics. *Alumina AL95B* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.ceramics.net/services/materials-engineering-expertise/alumina>
- [37] Lieferprogramm: product range. *SAC305* [online]. Balve, Balver Zinn, Cobar, s. 72 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: [http://www.balverzinn.com/catalogues.html?file=tl_files/balverzinn/downloads/kataloge_en/Product range.pdf](http://www.balverzinn.com/catalogues.html?file=tl_files/balverzinn/downloads/kataloge_en/Product%20range.pdf)
- [38] Metallic Resources: *SAC305 Lead Free No Clean Wire Solder Product Bulletin*. [online]. s.2 [cit.2014-04-25]. Dostupné z: <http://metallicresources.com/documents/SAC305LeadFreeNoClean.pdf>
- [39] Matweb: Material property data. [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/>
- [40] LI, S., HUANG, Z., WANG, J., GAO, S. *Temperature Cycling Analysis of Lead-Free Solder Joints in Electronic Packaging*. [cit. 2013-03-04]. Dostupný z [www: http://www.simulia.com/forms/world/pdf2007/Li.pdf](http://www.simulia.com/forms/world/pdf2007/Li.pdf)
- [41] *Aluminum Oxide, Al₂O₃ Ceramic Properties*. [online]. 2013, Accuratus [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://accuratus.com/alumox.html>

- [42] Multilayer SMD Ceramic Capacitors: General purpose series(10V to 100V) NPO, X7R & Y5V Dielectrics. [online]. Multicomp, s. 42 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1723208.pdf>
- [43] LICARI, James J a Leonard R ENLOW. *Hybrid microcircuit technology handbook: materials, processes, design, testing, and production*. 2nd ed. Westwood, N.J.: Noyes Publications, c1998, xxi, 579s. ISBN 08-155-1423-9
- [44] CHUNG, Deborah D.L. *Materials for electronic packaging*. Boston: Butterworth-Heinemann, c1995, xiv, 386s. ISBN 07-506-9314-2.
- [45] SIMPSON, Gordon. *Plastics: surface and finish*. 2nd ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1995. ISBN 08-540-4516-3.
- [46] KOLESKE, J. *Paint and coating testing manual: fourteenth edition of the Gardner-Sward handbook* Philadelphia, PA: ASTM, c1995, xvii, 925s. ISBN 08-031-2060-5.
- [47] PRUDENZIATI, M., HORMADALY, J. *Printed films: materials science and applications in sensors, electronics and photonics*. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2012, xxii, 586s. ISBN 08-570-9621-4.
- [48] Barium Titanate (BaTiO_3): Properties and Applications. [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2280>
- [49] NOVOTNÝ, V. *Únavové modely pro vyhodnocování spolehlivosti pájených spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Olga Švecová

Seznam použitých zkratk a symbolů

Al ₂ O ₃	Oxid Hlinitý
AlN	Nitrid Hlinitý
BGA	Ball Grid Array
BaTiO ₃	Titaničitan Barnatý
CAD	Computer-Aided Drafting
CEM-1	Composite epoxy material
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
CTF	Počet cyklů do chyby
DPS	Deska plošných spojů
EU	Evropská Unie
GEO	Geostationary Orbit
HAL	Hot Air Leveling
HTCC	High temperature co-fired ceramic
IPC	The industry association for printed circuit board and electronics manufacturing
LED	Light Emitted Diode
LEO	Low Earth Orbit
LCCC	Leaded Ceramic Chip Carrier
LLCC	Leadless Ceramic Chip Carrier
LTCC	Low temperature co-fired ceramic
MKP	Metoda konečných prvků
NSMD	Non Solder Mask Defined
PBGA	Plastic Ball Grid Array
ppm	jedna miliontina celku
PUV	Užitný vzor
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
SAC305	Bezolovnatá pájka s obsahem Sn96,5Ag3Cu0,5
SMD	Surface Mount Device
T _D	Průměrná doba jednoho cyklu
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment

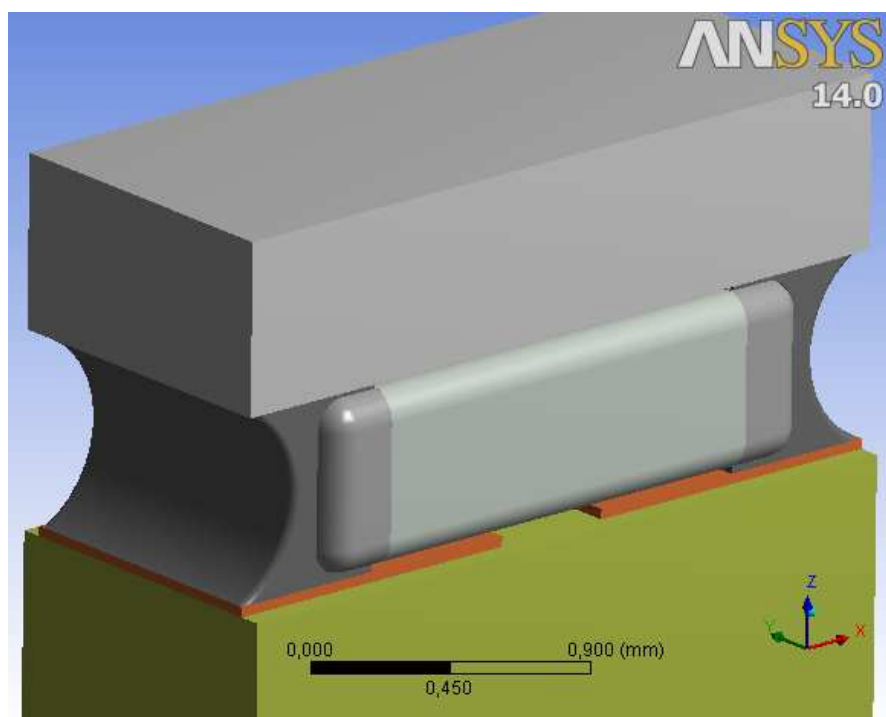
Příloha

Tab.1: Přehled naměřených cyklů do chyby u sestav 1-8

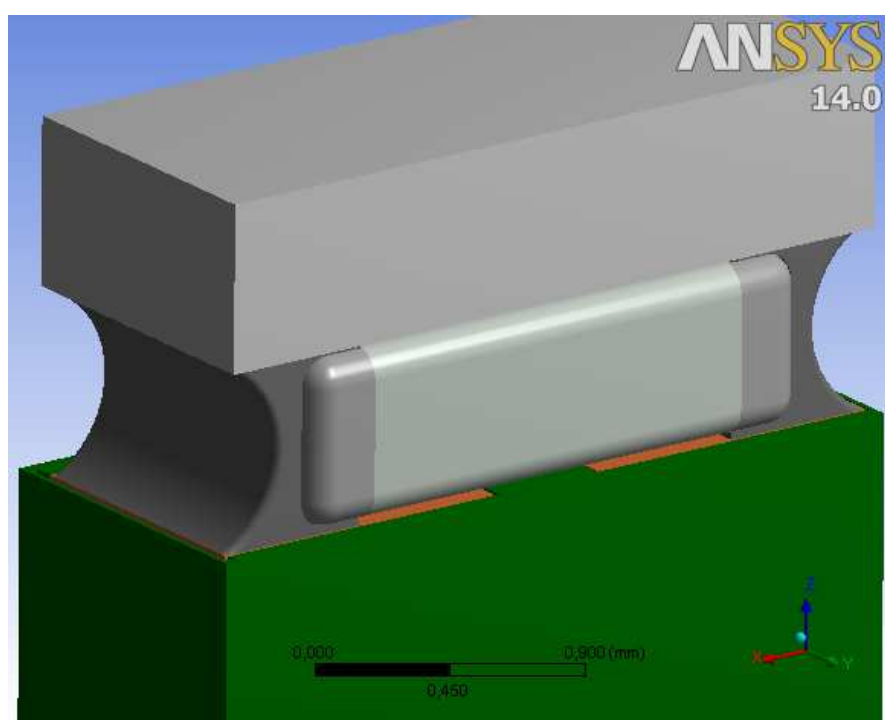
1.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	446	B1-B2	435	C1-C2	-	D1-D2	N
	A3-A4	567	B3-B4	330	C3-C4	-	D3-D4	N
	A5-A6	567	B5-B6	483	C5-C6	-	D5-D6	N
	A7-A8	842	B7-B8	330	C7-C8	-	D7-D8	592
2.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	817	B1-B2	319	C1-C2	-	D1-D2	817
	A3-A4	842	B3-B4	-	C3-C4	817	D3-D4	-
	A5-A6	832	B5-B6	567	C5-C6	843	D5-D6	-
	A7-A8	842	B7-B8	-	C7-C8	-	D7-D8	-
3.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	423	B1-B2	430	C1-C2	419	D1-D2	442
	A3-A4	430	B3-B4	419	C3-C4	430	D3-D4	467
	A5-A6	485	B5-B6	419	C5-C6	485	D5-D6	485
	A7-A8	419	B7-B8	736	C7-C8	448	D7-D8	532
4.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	676	B1-B2	483	C1-C2	736	D1-D2	385
	A3-A4	817	B3-B4	-	C3-C4	-	D3-D4	651
	A5-A6	-	B5-B6	-	C5-C6	817	D5-D6	736
	A7-A8	412	B7-B8	-	C7-C8	-	D7-D8	817
5.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	483	B1-B2	N	C1-C2	412	D1-D2	281
	A3-A4	758	B3-B4	446	C3-C4	518	D3-D4	567
	A5-A6	592	B5-B6	736	C5-C6	592	D5-D6	-
	A7-A8	592	B7-B8	N	C7-C8	N	D7-D8	567
6.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	353	B1-B2	434	C1-C2	260	D1-D2	385
	A3-A4	-	B3-B4	-	C3-C4	506	D3-D4	817
	A5-A6	676	B5-B6	-	C5-C6	506	D5-D6	676
	A7-A8	-	B7-B8	-	C7-C8	567	D7-D8	901
7.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	247	B1-B2	567	C1-C2	236	D1-D2	353
	A3-A4	770	B3-B4	676	C3-C4	758	D3-D4	616
	A5-A6	-	B5-B6	-	C5-C6	602	D5-D6	-
	A7-A8	-	B7-B8	-	C7-C8	736	D7-D8	842
8.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	616	B1-B2	N	C1-C2	N	D1-D2	434
	A3-A4	635	B3-B4	742	C3-C4	817	D3-D4	592
	A5-A6	651	B5-B6	758	C5-C6	842	D5-D6	772
	A7-A8	682	B7-B8	781	C7-C8	762	D7-D8	758

Tab.2: Přehled naměřených cyklů do chyby u sestav 9-16

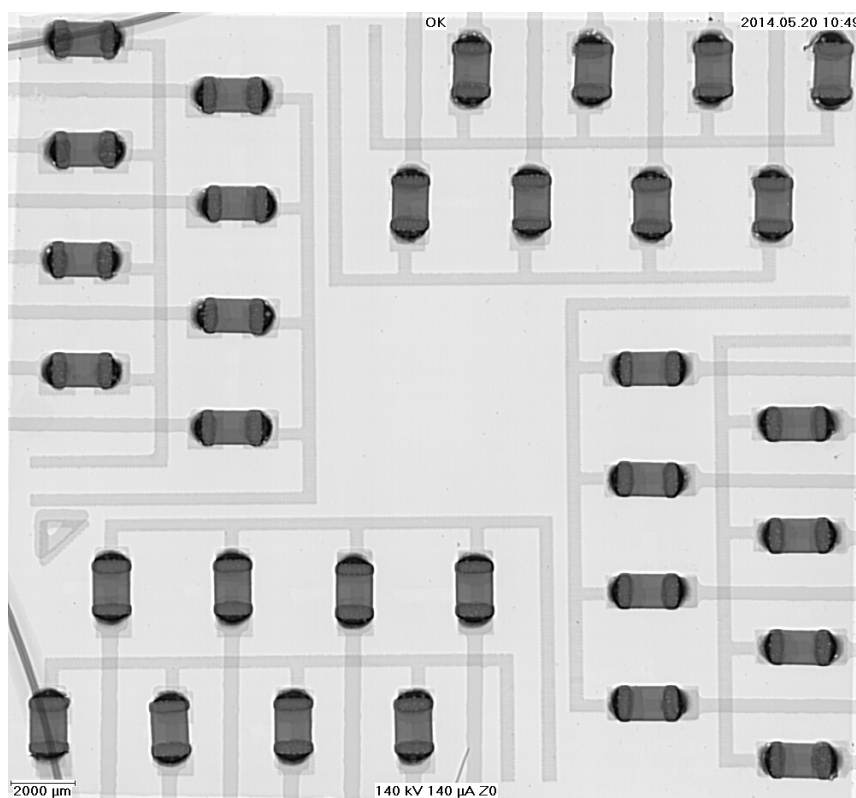
9.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	676	B1-B2	651	C1-C2	698	D1-D2	676
	A3-A4	330	B3-B4	622	C3-C4	651	D3-D4	901
	A5-A6	618	B5-B6	601	C5-C6	654	D5-D6	802
	A7-A8	-	B7-B8	-	C7-C8	-	D7-D8	-
10.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	438	B1-B2	-	C1-C2	651	D1-D2	781
	A3-A4	506	B3-B4	901	C3-C4	-	D3-D4	-
	A5-A6	-	B5-B6	567	C5-C6	770	D5-D6	-
	A7-A8	651	B7-B8	-	C7-C8	-	D7-D8	-
11.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	367	B1-B2	483	C1-C2	385	D1-D2	330
	A3-A4	434	B3-B4	385	C3-C4	506	D3-D4	342
	A5-A6	483	B5-B6	736	C5-C6	483	D5-D6	506
	A7-A8	758	B7-B8	764	C7-C8	736	D7-D8	532
12.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	319	B1-B2	319	C1-C2	281	D1-D2	412
	A3-A4	295	B3-B4	319	C3-C4	367	D3-D4	483
	A5-A6	385	B5-B6	385	C5-C6	616	D5-D6	483
	A7-A8	506	B7-B8	736	C7-C8	781	D7-D8	678
13.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	385	B1-B2	342	C1-C2	295	D1-D2	247
	A3-A4	319	B3-B4	367	C3-C4	281	D3-D4	342
	A5-A6	781	B5-B6	518	C5-C6	353	D5-D6	522
	A7-A8	736	B7-B8	616	C7-C8	532	D7-D8	618
14.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	330	B1-B2	567	C1-C2	434	D1-D2	423
	A3-A4	200	B3-B4	616	C3-C4	758	D3-D4	446
	A5-A6	518	B5-B6	872	C5-C6	842	D5-D6	506
	A7-A8	200	B7-B8	320	C7-C8	490	D7-D8	616
15.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	-	B1-B2	-	C1-C2	-	D1-D2	-
	A3-A4	-	B3-B4	117	C3-C4	-	D3-D4	-
	A5-A6	117	B5-B6	-	C5-C6	-	D5-D6	-
	A7-A8	-	B7-B8	-	C7-C8	-	D7-D8	-
16.	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF	Spoj	CTF
	A1-A2	295	B1-B2	446	C1-C2	187	D1-D2	567
	A3-A4	385	B3-B4	817	C3-C4	483	D3-D4	616
	A5-A6	676	B5-B6	332	C5-C6	435	D5-D6	645
	A7-A8	817	B7-B8	745	C7-C8	579	D7-D8	726



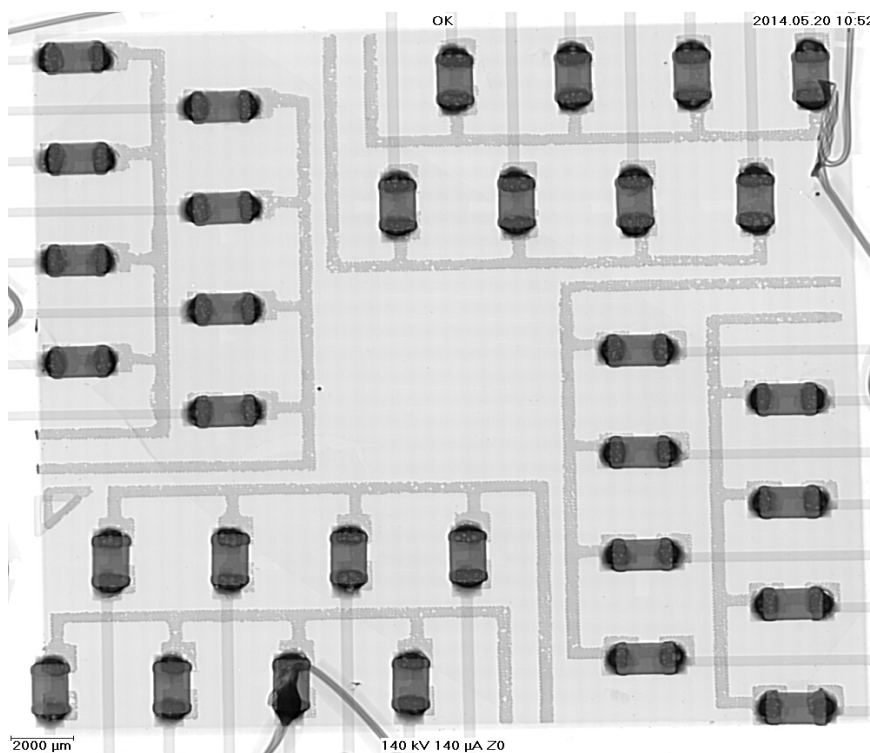
Obr.1: Model sestavy v simulaci bez nepájivé masky



Obr.2: Model sestavy v simulaci s nepájivou maskou



Obr.3: Rentgenový snímek sestavy bez nepájkivé masky po teplotním cyklování



Obr.4: Rentgenový snímek sestavy s nepájkivou maskou po teplotním cyklování