



Estimating Low-Cycle Fatigue Life and Calculating the Probability of Failure for the Space Electronic Board Under Thermal Cyclic Loading

Amirhosein Rahbar¹, Seyed Mohammad Navid Ghoreishi^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology (SUT), Tehran, Iran

Rahbaramirhosein75@gmail.com

² *Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran
smn.ghoreishi@isrc.ac.ir

Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science,
Technology & Applications
(Persian)

Vol. 5, No. 2, pp.: 34-53
2026

DOI:
10.22034/jssta.2025.486362.1213

Article Info

Received: 2024-10-25
Accepted: 2024-12-18

Keywords

Life estimation; Fatigue;
Probability of failure;
Electronic board

How to Cite this article

A. Rahbar, S. M. N. Ghoreishi,
“Estimating Low-Cycle Fatigue
Life and Calculating the
Probability of Failure for the
Space Electronic Board Under
Thermal Cyclic Loading”,
*Journal of Space Science,
Technology & Applications*, Vol.
5, No. 2, pp. 34-53, 2026.

Abstract

One of the most challenging issues in designing and manufacturing space electronic boards is the fatigue caused by thermal-mechanical stresses in solder joints. Thermal-mechanical fatigue occurs due to the stresses caused by frequent temperature changes and differences in the thermal and mechanical properties of different materials and can cause failure or degradation of the solder joints on the electronic board. Any degradation or failure in solder joints can cause the electronic board to lose its functionality, and therefore, this phenomenon should be fully considered in the design of electronic boards. In this paper, a six-layer electronic board with two hundred electronic components and BGA, Leaded, and LCCC packages has been investigated, and the estimation of its fatigue life and failure probability under the influence of space thermal profiles has been calculated both analytically and numerically. In the life estimation calculations, three types of solder materials, PB90SN10, SAC305, and SN100C, have been considered, and the life of the electronic board and the failure probability have been calculated for each of these materials. This paper uses a strain energy-based model for the numerical life estimation calculations. The main factors affecting fatigue in solder joints, including thermal profiles, part design, material properties, and printed circuit board (PCB) characteristics, have been fully investigated and their impact on the electronic board's life has been studied. The results show that resistance to cracking and the distribution of mechanical stresses in different configurations significantly affect the system's life. Numerical and statistical analyses performed with the two-variable Weibull model reveal the relationship between the thermal expansion coefficient, PCB layer structure, and mechanical resistance of solders. Finally, it is shown that SAC305 solder in the BGA configuration provides the best performance in terms of thermal cycle counts to failure, while LCCC is more sensitive to fatigue. The numerical results obtained in this paper were verified with analytical results, and it was observed that the numerical method used has a very high accuracy in estimating the fatigue life of electronic boards. These findings can facilitate the improvement of electronic board design in space applications.



دسترس پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دوفصلنامه علوم، فناوری و

کاربردهای فضایی

سال پنجم، شماره ۲، صفحه ۵۳-۳۴

پاییز و زمستان ۱۴۰۴

DOI:

10.22034/jस्ता.2025.486362.1213

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

واژه‌های کلیدی

تخمین عمر، خستگی، احتمال

واماندگی، برد الکترونیکی

نحوه استناد به این مقاله

امیرحسین رهبر و سید محمد نوید قریشی، "تخمین عمر خستگی کم چرخه و محاسبه احتمال واماندگی برد الکترونیکی فضایی تحت بارگذاری چرخه‌ی حرارتی"، دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد پنجم، شماره دوم، صفحات ۳۴-۵۳، ۱۴۰۴.

مقاله پژوهشی

تخمین عمر خستگی کم چرخه و محاسبه احتمال واماندگی برد الکترونیکی فضایی تحت بارگذاری چرخه‌ی حرارتی

امیرحسین رهبر^۱ و سید محمد نوید قریشی^{۲*}

۱- دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران، ایران - Rahbaramirhosein75@gmail.com

۲- پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران - smn.ghoreishi@isrc.ac.ir

نویسنده مسئول *

چکیده

یکی از چالش برانگیزترین مسائل در طراحی و ساخت بوردهای الکترونیکی فضایی، پدیده خستگی ناشی از تنش‌های حرارتی- مکانیکی در اتصالات لحیم است. خستگی حرارتی- مکانیکی به دلیل تنش‌های ناشی از تغییرات مکرر دما و تفاوت در خواص حرارتی و مکانیکی مواد مختلف رخ می‌دهد و می‌تواند باعث شکست یا واماندگی قسمتی از لحیم برد الکترونیکی شود. هرگونه واماندگی و شکست در اتصالات لحیمی می‌تواند باعث از دست رفتن عملکرد برد الکترونیکی شود و لذا بایستی این پدیده به صورت کامل در طراحی بوردهای الکترونیکی لحاظ شود. در پژوهش حاضر، یک برد الکترونیکی شش لایه با دویست المان الکترونیکی و پکیج‌های BGA، Leaded و LCCC مورد بررسی قرار گرفته است و تخمین عمر خستگی و احتمال واماندگی آن تحت تاثیر پروفیل‌های حرارتی فضایی به صورت تحلیلی و عددی محاسبه شده است. در محاسبات تخمین عمر سه نوع جنس لحیم $SN100C$ ، $SAC305$ ، $PB90SN10$ ، مورد بررسی قرار گرفته است و عمر برد الکترونیکی و احتمال واماندگی برای هر یک از این جنس‌ها محاسبه شده است. در این مقاله از مدل مبتنی بر انرژی کرنشی جهت محاسبات عددی تخمین عمر استفاده شده است. عوامل اصلی موثر بر خستگی در اتصالات لحیم از جمله پروفیل‌های حرارتی، طراحی قطعه، خواص مواد و ویژگی‌های برد مدار چاپی به‌طور کامل بررسی و تاثیر آن‌ها در عمر برد الکترونیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و توزیع تنش‌های مکانیکی در پیکربندی‌های بررسی شده به شدت بر عمر سیستم تأثیرگذار است. تحلیل‌های عددی و آماری انجام‌شده با مدل ویبول دو متغیره، رابطه میان ضریب انبساط حرارتی، ساختار لایه‌ای برد مدار چاپی و مقاومت مکانیکی لحیم‌ها را آشکار می‌سازد. در نهایت، نشان داده می‌شود که لحیم $SAC305$ در پیکربندی BGA بهترین عملکرد را از لحاظ تعداد چرخه‌های حرارتی تا شکست ارائه می‌دهد، در حالی که LCCC دارای حساسیت بالاتری به خستگی است. نتایج عددی استخراج شده در این پژوهش با نتایج تحلیلی مورد صحت سنجی قرار گرفت و مشاهده شد که روش عددی استفاده شده با دقت بسیار بالای قابلیت تخمین عمر خستگی بوردهای الکترونیکی را دارد. این یافته‌ها می‌توانند بهبود طراحی بوردهای الکترونیکی در کاربردهای فضایی را تسهیل کنند.

۱- مقدمه

و همچنین هزینه‌های بالای انجام آزمایشات در چنین شرایطی، بسیار دشوار است. این موضوع باعث شده است تا تنظیم و بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی برای محیط‌های فضایی به یکی از چالش‌های اصلی مهندسان تبدیل شود [۱۱-۱۴]. در این راستا غفاریان [۱۵، ۱۶]، لامبرت و همکاران [۱۷] به کمک نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به تخمین عمر ادوات الکترونیکی با کاربری فضایی پرداخته‌اند. پارک و همکاران محدودیت‌های نرم‌افزارهای شبیه‌سازی از جمله تأثیر همزمان چندین عامل را بررسی کرده‌اند [۱۸]. در راستای حل این چالش، پری و همکاران [۱۹]، وانگ و همکاران [۲۰]، وانگ ژن و همکاران [۲۱] همچنین کوک و همکاران [۲۲] به صورت مستقل در بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ مدل‌های که توانایی شبیه‌سازی همزمان اثرات حرارتی، مکانیکی و الکتریکی را دارند توسعه داده‌اند. این مدل‌ها امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر اثرات همزمان تنش‌های حرارتی و مکانیکی را فراهم می‌کنند و به مهندسان کمک می‌کنند تا مشکلات احتمالی را قبل از وقوع شناسایی برطرف کنند. با این وجود، پیچیدگی و تغییرپذیری محیط فضایی می‌تواند تأثیرات غیرمنتظره‌ای بر عملکرد و عمر سیستم‌های الکترونیکی داشته باشد. علی‌رغم تحقیقات قبلی انجام شده در این زمینه، نیاز به توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر و دقیق‌تر که با سرعت و دقت بالا توانایی شبیه‌سازی تمامی عوامل محیطی مؤثر به صورت همزمان را دارا باشد همچنان احساس می‌شود. در این راستا در مطالعه حاضر با استفاده از روش‌های عددی به محاسبه تخمین عمر و احتمال اماندگی ادوات الکترونیکی با در نظر گرفتن همزمان متغیرهای مختلف نظیر پروفیل‌های حرارتی، طراحی قطعه، جنس لحیم مورد استفاده و ویژگی‌های بورد مدار چاپی^۲ پرداخته شده است.

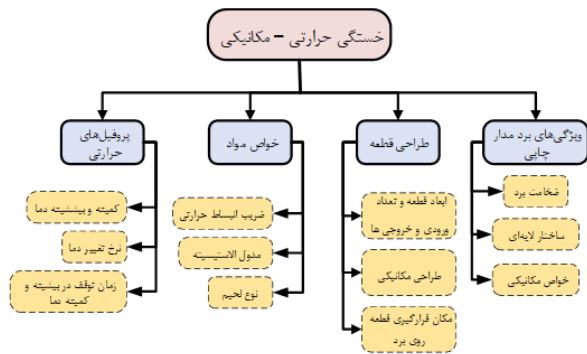
۲- پدیده خستگی در اتصالات لحیم

خستگی لحیم یکی از مشکلات اساسی در اتصالات الکترونیکی است که می‌تواند منجر به خرابی زودرس و کاهش عمر مفید بوردهای الکترونیکی شود. اتصالات لحیم به عنوان رابط‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیکی بین اجزای مختلف الکترونیکی و بردهای مدار چاپی عمل می‌کنند. این اتصالات ممکن است تحت تأثیر تغییرات مکرر دما، بارهای مکانیکی و عوامل محیطی دیگر قرار گیرند که در نتیجه به تدریج دچار خستگی و شکست شوند. خستگی لحیم به تغییرات و آسیب‌های تجمعی اشاره دارد که در اثر تکرار چرخه‌های بارگذاری حرارتی-مکانیکی در اتصالات لحیم

سیستم‌های الکترونیکی که در مأموریت‌های فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، نقش حیاتی در عملکرد موفقیت‌آمیز این مأموریت‌ها دارند. این سیستم‌ها باید در شرایط محیطی بسیار شدید و ناپایدار، از جمله تغییرات دمایی ناگهانی، تشعشعات کیهانی و تنش‌های مکانیکی که در فضا وجود دارند، به‌درستی عمل کنند [۱]. اهمیت تخمین عمر مفید این سیستم‌ها به دلیل عدم دسترسی آسان به تعمیر و نگهداری آن‌ها در فضا به شدت افزایش می‌یابد. به همین دلیل، پیش‌بینی دقیق عمر این سیستم‌ها به یکی از چالش‌های اساسی در طراحی و بهره‌برداری از تجهیزات فضایی تبدیل شده است [۲-۴]. یکی از عوامل اصلی که بر عمر سیستم‌های الکترونیکی در فضا تأثیر می‌گذارد، تنش‌های حرارتی است. تغییرات دمایی در محیط فضا، که ناشی از عبور مکرر بین سایه و نور خورشید است، باعث ایجاد تنش‌های حرارتی در مواد و اجزای سیستم‌های الکترونیکی می‌شود. این تغییرات دمایی می‌توانند منجر به خستگی حرارتی، ترک‌های ریز در ساختار مواد و در نهایت، خرابی‌های زودرس شوند [۵، ۶]. مدل آرنیوس که بر اساس رابطه بین دما و نرخ واکنش شیمیایی توسعه یافته است، یکی از نخستین مدل‌هایی است که برای تخمین عمر مفید قطعات الکترونیکی مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. این مدل به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف به کار گرفته شده است، اما در شرایط خاص فضایی که شامل عوامل متعدد و پیچیده‌ای است، محدودیت‌هایی دارد. تحلیل المان محدود^۱ یکی از روش‌های پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی و حرارتی سیستم‌های الکترونیکی در محیط‌های فضایی معرفی شده است. تحلیل المان محدود به مهندسان اجازه می‌دهد تا تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی را که بوردهای الکترونیکی در شرایط مختلف تجربه می‌کنند، به‌طور دقیق شبیه‌سازی و تحلیل کنند. استفاده از تحلیل المان محدود در پیش‌بینی نقاط ضعف بالقوه در ساختار سیستم‌های الکترونیکی و ارائه راه‌حل‌های مهندسی برای بهبود طراحی‌ها بسیار تأثیرگذار بوده است. مطالعات انجام شده بیانگر توانایی تحلیل المان محدود در شبیه‌سازی دقیق رفتار حرارتی و مکانیکی سیستم‌های الکترونیکی در شرایط فضایی است [۸-۱۰]. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از تحلیل المان محدود برای تخمین عمر سیستم‌های الکترونیکی فضایی، نیازمندی به داده‌های دقیق و معتبر برای ورودی به مدل‌های شبیه‌سازی است. جمع‌آوری داده‌های تجربی معتبر از محیط فضایی به دلیل پیچیدگی‌های آن

^۲ PCB

^۱ FEM



شکل (۲): عوامل تأثیرگذار در ایجاد خستگی حرارتی - مکانیکی [۲۳-۲۶]

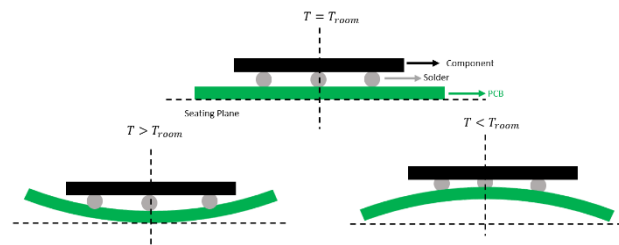
۱-۱-۲- پروفیل‌های حرارتی

پروفیل حرارتی به توالی و شرایط حرارتی که قطعه یا سیستم در طول عمر کاری خود تجربه می‌کند، اطلاق می‌شود. این پروفیل‌ها شامل تغییرات دما، مدت زمان نگهداری در دماهای بالا و پایین و نرخ تغییر دما هستند. این عوامل نقش بسیار مهمی در ایجاد و تشدید خستگی حرارتی-مکانیکی دارند که در ادامه بررسی شده‌اند:

۱. حداکثر و حداقل دما: تغییرات دمایی در طی عملیات معمول یک سیستم الکترونیکی می‌تواند از چندین درجه تا صدها درجه سانتی‌گراد متغیر باشد. زمانی که قطعه‌ای از دمای بالا به دمای پایین (یا بالعکس) منتقل می‌شود، اختلاف در انبساط حرارتی مواد مختلف منجر به ایجاد تنش‌های مکانیکی شود. هرچه اختلاف دما بیشتر باشد، میزان این تنش‌ها بیشتر خواهد بود و در نتیجه احتمال ایجاد ترک و شکست در اتصالات لحیم افزایش می‌یابد. این پدیده به‌ویژه در چرخه‌های دمایی که شامل تغییرات شدید دما هستند، بسیار مشهود است.

۲. نرخ تغییر دما (شوک): نرخ تغییر دما نیز از عوامل مهم در خستگی حرارتی - مکانیکی است. شوک حرارتی به تغییرات سریع و ناگهانی دما اشاره دارد که می‌تواند تنش‌های شدیدی را در اتصالات لحیم ایجاد کند. هر چه نرخ تغییر دما افزایش یابد، فشار بیشتری بر لحیم وارد می‌شود. به عنوان مثال، در شرایطی که دمای یک سیستم به سرعت از حالت سرد به گرم (یا بالعکس) تغییر کند، لحیم ممکن است به دلیل تنش‌های شدید، دچار شکست زودهنگام شود.

ایجاد می‌شود. این نوع خستگی ناشی از تغییرات دما است که باعث انبساط و انقباض نابرابر اجزا می‌شود. به طور خاص، به دلیل تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی^۳ بین مواد مختلف (مانند برد مدار چاپی و قطعات متصل به آن)، تنش‌های برشی در اتصالات لحیم ایجاد می‌شود که با گذشت زمان باعث ترک خوردگی و در نهایت شکست این اتصالات می‌شود. مطابق با شکل ۱ اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی مدار چاپی و المان‌های الکترونیکی لحیم شده روی آن منجر به تفاوت در مقدار کرنش مدار چاپی و المان‌ها می‌شود. به دلیل تغییرات دمایی مختلف سیستم‌های الکترونیکی در طول مأموریت خود و تکرار تغییر شکل‌های ذکر شده، پدیده خستگی در اتصالات لحیم شده منجر به آسیب به سیستم و ادوات الکترونیکی می‌شود.



شکل (۱): تأثیر اختلاف ضریب انبساط حرارتی [۱]

۱-۲- عوامل تأثیرگذار بر ایجاد خستگی حرارتی-مکانیکی

خستگی حرارتی-مکانیکی در اتصالات لحیم یک پدیده پیچیده است که تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. این پدیده، یکی از مهم‌ترین سازوکارهای خرابی در قطعات الکترونیکی است که به علت تنش‌های ناشی از تغییرات دما و تفاوت در خواص مکانیکی و حرارتی مواد به وجود می‌آید. عوامل مختلفی می‌تواند در ایجاد خستگی حرارتی - مکانیکی در اتصالات لحیم تأثیرگذار باشد. در شکل ۲ عوامل اصلی تأثیرگذار بر خستگی حرارتی-مکانیکی در اتصالات لحیم به طور کامل شناسایی و طبقه بندی شده است که در ادامه به تشریح هر یک از آنها پرداخته می‌شود [۲۳-۲۶].

³ CTE

مردن SAC به دلیل داشتن خواص مکانیکی بهتر در دماهای بالا، معمولاً نسبت به لحیم‌های سنتی SnPb مقاومت بیشتری در برابر خستگی حرارتی- مکانیکی دارند. با این حال، انتخاب نوع لحیم باید با توجه به شرایط عملیاتی و مشخصات قطعه انجام شود.

۲-۱-۳- طراحی قطعه

طراحی مکانیکی و فیزیکی قطعه نیز به طور مستقیم بر خستگی حرارتی - مکانیکی تأثیر می‌گذارد. عواملی مانند ابعاد قطعه، تعداد ورودی/خروجی‌ها، نحوه اتصال قطعات به برد مدار چاپی و توزیع حرارتی در سراسر قطعه از جمله عواملی هستند که باید در طراحی مدنظر قرار گیرند.

۱. ابعاد و تعداد ورودی/خروجی‌ها: ابعاد قطعه و تعداد ورودی/خروجی‌های آن نقش مهمی در تعیین رفتار حرارتی و مکانیکی قطعه دارند. قطعات بزرگ‌تر و پیچیده‌تر معمولاً دارای اختلاف دمای بیشتری بین نقاط مختلف خود هستند. این اختلاف‌ها می‌توانند منجر به توزیع غیر یکنواخت تنش‌های حرارتی شوند و در نتیجه احتمال ایجاد خستگی و ترک در لحیم را افزایش دهند. به‌ویژه در قطعاتی که دارای تعداد زیادی ورودی/خروجی هستند، این موضوع اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا هر ورودی/خروجی یک نقطه بالقوه برای تمرکز تنش‌های مکانیکی است.

۲. طراحی مکانیکی: طراحی مکانیکی قطعات و نحوه قرارگیری آنها روی برد مدار چاپی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. در قطعاتی که به صورت نامتقارن روی برد نصب می‌شوند، یا قطعاتی که در نزدیکی مرزهای برد قرار دارند، توزیع حرارتی ممکن است غیر یکنواخت باشد. این توزیع غیر یکنواخت می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های مکانیکی بیشتری در برخی نقاط شود که احتمال خستگی و شکست لحیم در این نقاط را افزایش می‌دهد.

۳. مکان قرارگیری قطعه روی برد: موقعیت مکانی قطعه روی برد مدار چاپی نیز می‌تواند بر میزان تنش‌های وارده به اتصالات لحیم تأثیرگذار باشد. به عنوان مثال، قطعاتی که در نزدیکی نقاط نصب یا گوشه‌های برد قرار دارند، به دلیل تنش‌های ناشی از انعطاف‌پذیری برد، در معرض خطر بیشتری برای خستگی حرارتی- مکانیکی قرار دارند.

۳. زمان توقف در دماهای حداکثر و حداقل: مدت زمانی که یک قطعه در دماهای بالا یا پایین باقی می‌ماند نیز بر میزان خستگی تأثیر می‌گذارد. اگر قطعه برای مدت طولانی در دمای حداکثر یا حداقل بماند، تنش‌های حرارتی ایجاد شده در اتصالات لحیم تثبیت می‌شوند و احتمال آسیب به ساختار کریستالی لحیم افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی، ترک‌های کوچک ممکن است در لحیم ایجاد شوند که با گذشت زمان و افزایش تعداد چرخه‌های حرارتی به ترک‌های بزرگ‌تر و در نهایت به شکست کامل منجر می‌شوند.

۲-۱-۲- خواص مواد

خواص مکانیکی و حرارتی مواد مورد استفاده در لحیم، برد مدار چاپی و قطعات الکترونیکی نقش بسیار مهمی در رفتار خستگی حرارتی- مکانیکی دارند. برخی از این خواص شامل ضریب انبساط حرارتی، مدول الاستیسیته و نوع لحیم است.

۱. ضریب انبساط حرارتی: ضریب انبساط حرارتی یکی از مهم‌ترین خواص مواد است که بر خستگی حرارتی- مکانیکی تأثیر می‌گذارد. تفاوت در ضریب انبساط حرارتی بین مواد مختلف می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های مکانیکی در اتصالات لحیم شود. به عنوان مثال، اگر اختلاف ضریب انبساط حرارتی لحیم و برد مدار چاپی متفاوت باشد، در هنگام تغییر دما، این دو ماده به میزان متفاوتی منبسط یا منقبض می‌شوند که این امر باعث ایجاد تنش‌های برشی در محل اتصال لحیم می‌شود. در طول زمان، این تنش‌های مکرر می‌توانند به ایجاد ترک و در نهایت شکست لحیم منجر شوند.

۲. مدول الاستیسیته: مدول الاستیسیته، میزان مقاومت ماده در برابر تغییر شکل را مشخص می‌کند. مواد با مدول الاستیسیته بالا معمولاً مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دارند، اما این ویژگی می‌تواند منجر به انتقال تنش‌های بیشتر به اتصالات لحیم شود. از سوی دیگر، مواد با مدول الاستیسیته پایین‌تر ممکن است در مقابله با تنش‌ها به راحتی تغییر شکل دهند که این موضوع می‌تواند به کاهش تنش‌های انتقال یافته به لحیم کمک کند. بنابراین، انتخاب صحیح مواد با توجه به شرایط کاری و پروفایل حرارتی بسیار مهم است.

۳. نوع لحیم: نوع لحیم و ترکیب شیمیایی آن نیز تأثیر زیادی بر رفتار خستگی حرارتی- مکانیکی دارد. لحیم‌های مختلف دارای خواص حرارتی و مکانیکی متفاوتی هستند. به عنوان مثال، لحیم‌های SnPb و SAC (ساختاری از قلع، نقره و مس) دارای رفتارهای متفاوتی در برابر تغییرات حرارتی هستند. لحیم‌های

۴-۱-۲- ویژگی‌های برد مدار چاپی^۴

ویژگی‌های برد مدار چاپی نیز از جمله عواملی است که بر خستگی حرارتی-مکانیکی تأثیرگذار است. خواصی مانند ضخامت برد، ساختار لایه‌ای و خواص مکانیکی برد مدار چاپی از جمله مواردی هستند که باید مورد توجه قرار گیرند.

۱- ضخامت برد: ضخامت برد مدار چاپی می‌تواند تأثیر زیادی بر رفتار حرارتی و مکانیکی آن داشته باشد. بردهای نازک‌تر ممکن است بیشتر تحت تأثیر تغییرات دما قرار گیرند و به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر، تنش‌های بیشتری را به اتصالات لحیم منتقل کنند. از سوی دیگر، بردهای ضخیم‌تر ممکن است پایدارتر باشند اما در عین حال ممکن است تنش‌های حرارتی بیشتری ایجاد کنند.

۲- ساختار لایه‌ای: ساختار لایه‌ای برد مدار چاپی نیز می‌تواند بر میزان تنش‌های انتقالی به لحیم بگذارد. بردهایی که از چندین لایه تشکیل شده‌اند، ممکن است به دلیل تفاوت در خواص حرارتی لایه‌ها، تنش‌های غیر یکنواختی را تجربه کنند که این تنش‌ها می‌توانند به اتصالات لحیم منتقل شوند و احتمال خستگی را افزایش دهند.

۳- خواص مکانیکی برد چاپی: خواصی مانند مدول الاستیسیته و ضریب انبساط حرارتی برد مدار چاپی نیز باید در نظر گرفته شوند. بردهایی با مدول الاستیسیته بالا ممکن است در برابر تغییر شکل مقاومت بیشتری داشته باشند اما تنش‌های بیشتری را به لحیم منتقل کنند. از سوی دیگر، بردهایی با ضریب انبساط حرارتی پایین ممکن است به طور یکنواخت‌تری منبسط یا منقبض شوند که این موضوع می‌تواند به کاهش تنش‌های مکانیکی کمک کند.

۳- مبانی نظری مدل‌های توسعه یافته جهت

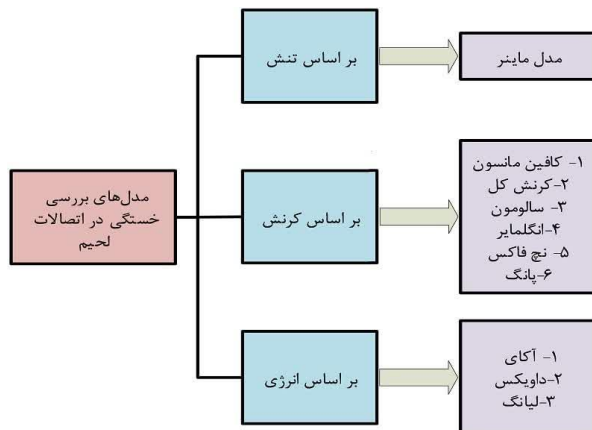
تخمین عمر اتصالات لحیم

مدل‌های کلاسیک مختلفی در اتصالات لحیم برای پیش‌بینی طول عمر خستگی و قابلیت اطمینان اتصالات لحیم در شرایط بارگذاری حرارتی و مکانیکی استفاده می‌شوند. این مدل‌ها بر اساس روابط تجربی و تئوری‌های مکانیک شکست توسعه یافته‌اند و به مهندسان این امکان را می‌دهند که خستگی اتصالات لحیم را در شرایط مختلف ارزیابی کنند [۲۷، ۲۸]. در شکل ۳، مدل‌های

^۵ Low-Cycle Fatigue

^۴ PCB

مختلف توسعه یافته در اتصالات لحیم برای محاسبه طول عمر خستگی نشان داده شده است.



شکل (۳): مدل‌های خستگی توسعه یافته در اتصالات لحیم

۳-۱-۱- مدل ماینر

قانون ماینر یک مدل تجمعی برای خستگی است که فرض می‌کند آسیب در هر چرخه متناسب با نسبت تعداد چرخه‌های اعمال شده به تعداد چرخه‌های لازم برای شکست است. این مدل به صورت معادله ۱ بیان می‌شود [۲۹]. در این معادله C مقدار ثابت است که یک در نظر گرفته می‌شود، n_i تعداد چرخه‌های سیستم تحت تنش S_i و N_i تعداد چرخه‌های سیستم تحت تنش S_i تا شکست است.

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = C \quad (1)$$

قانون ماینر بر این فرض استوار است که وقتی مجموع کسری از عمر در هر چرخه به یک برسد، شکست رخ می‌دهد. این مدل برای بارگذاری‌های متغیر بسیار کاربردی است، زیرا می‌تواند اثرات آسیب‌های وارده از چرخه‌های مختلف را به صورت تجمعی محاسبه کند. در سیستم‌های فضایی، این مدل برای تحلیل خستگی لحیم در شرایطی که پروفایل‌های حرارتی پیچیده و چندگانه وجود دارد، بسیار مفید است.

۳-۲-۲- مدل کافین - مانسون

مدل کافین - مانسون یکی از اولین و پرکاربردترین مدل‌ها برای تحلیل خستگی کم چرخه^۵ است. این مدل بر اساس رابطه بین کرنش پلاستیک و تعداد چرخه‌های شکست بیان می‌شود

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \gamma}{2 \varepsilon_f} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (5)$$

$$C = -0.442 - 0.0006 T_{sj} + 0.0147 \left(1 + \frac{360}{T_H} \right) \quad (6)$$

۶-۳-۶ مدل نچ-فاکس و پانگ

با توجه به وجود تغییرات دما در محیط کاری و احتمال وجود گرادین دمای در یک سیستم الکترونیکی پدیده خزش نیز موجب آسیب به اتصالات لحیم می‌شود. هر دو مدل مذکور با در نظر گرفتن کرنش ناشی از خزش، همبستگی پدیده خزش و خستگی را بررسی کرده‌اند [۳۴].

۳-۲-۳ مدل آکای^{۱۱}

مدل آکای یکی از مدل‌های اساسی برای تخمین عمر خستگی است که بر اساس انرژی کرنشی کل طراحی شده است. این مدل ساده و کاربردی است و تلاش می‌کند تا با استفاده از مقدار انرژی که در حین یک چرخه اعمالی ذخیره یا تلف می‌شود، تعداد چرخه‌های شکست را پیش‌بینی کند. اجزای اصلی مدل آکای عبارتند از:

۱. انرژی کرنشی کل: انرژی کرنشی کل شامل ترکیبی از انرژی الاستیک و پلاستیک است که در یک ماده در طول یک چرخه تنش-کرنش جذب می‌شود. این انرژی می‌تواند از تحلیل‌های تجربی یا عددی (مانند تحلیل اجزای محدود) به دست آید.

۲. مقدار مرجع انرژی: یک مقدار ثابت که به عنوان معیار یا مرجع برای مقایسه انرژی کرنش استفاده می‌شود. این مقدار معمولاً از داده‌های تجربی به دست می‌آید و به مشخصات ماده و شرایط آزمایش وابسته است.

۳. ضریب خستگی: این ضریب که معمولاً به صورت تجربی تعیین می‌شود، نشان‌دهنده حساسیت ماده به آسیب خستگی است. مقدار آن بستگی به ویژگی‌های مکانیکی ماده و نوع بارگذاری دارد.

۴. تعداد چرخه‌های شکست: خروجی مدل است که نشان می‌دهد یک ماده یا سازه تحت چرخه‌های تنش و کرنش چه زمانی دچار شکست می‌شود.

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta w}{w_0} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (7)$$

[۳۰]. این مدل برای شرایطی که تغییرات کرنش پلاستیک غالب هستند و بارگذاری‌های چرخه‌ای به کرنش‌های بزرگ منجر می‌شوند، بسیار مناسب است. در کاربردهای فضایی، این مدل می‌تواند برای تحلیل اتصالات لحیم در شرایطی که تغییرات شدید دما و کرنش‌های بزرگ رخ می‌دهد، استفاده شود. مدل کافین-مانسون به دلیل سادگی و کاربرد گسترده‌ای که دارد، همچنان یکی از مدل‌های اصلی برای تحلیل خستگی لحیم است. معادله ۲، رابطه اصلاح شده مدل کافین - مانسون برای بررسی خستگی اتصالات لحیم را نشان می‌دهد.

$$N_f = \left(\frac{A}{\Delta \gamma} \right)^m \times f^n \times e^{-\beta / k T_{max}} \quad (2)$$

۳-۳-۳ مدل کرنش کلی^۶

این مدل تلفیقی از مدل کافین - مانسون و مدل بسکوین^۷ است و در این مدل تأثیر کرنش الاستیک و پلاستیک در تخمین عمر تحت پدیده خستگی بررسی شده است. معادله (۳) این مدل را بیان می‌کند [۳۱].

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2 N_f)^b + \varepsilon_f (2 N_f)^c \quad (3)$$

۴-۳-۴ مدل سالومون^۸

مدل سالومون تأثیر کرنش برشی در ناحیه پلاستیک برای اتصالات لحیمی را مورد بررسی قرار داده است. یکی از مشکلات مدل سالومون عدم در نظر گرفتن تأثیر کرنش ناشی از خزش در تخمین عمر اتصالات لحیم است. معادله (۴) مدل سالومون را نشان می‌دهد. در این معادله $\Delta \gamma_p$ کرنش برشی پلاستیک، N_p تعداد چرخه‌های اتصال لحیم تا شکست، θ ضریب شکل پذیری خستگی^۹ و α ثابت وابسته به خواص لحیم است [۳۲].

$$\Delta \gamma_p N_p^\alpha = \theta \quad (4)$$

۵-۳-۵ مدل انگلمایر^{۱۰}

این مدل با در نظر گرفتن چرخه‌های حرارتی و تأثیر دما در کرنش‌های ایجاد شده در اتصالات لحیم، مدل کافین - مانسون را بهبود بخشیده است. معادله (۵) و (۶) ارتباط بین متغیرهای تأثیرگذار در این مدل را نشان می‌دهد [۳۳].

¹⁰ Engelmaier

¹¹ Akay

⁶ Total Strain model

⁷ Basquin

⁸ Solomon model

⁹ Fatigue Ductility Coefficient

۳-۷-۳- جمع‌بندی طول عمر خستگی

در نهایت، طول عمر کلی خستگی ماده با جمع تعداد چرخه‌های مرحله شروع ترک و مرحله انتشار ترک محاسبه می‌شود.

مدل داویکس با تمرکز بر مراحل شروع و رشد ترک، یک ابزار پیشرفته برای تحلیل دقیق طول عمر خستگی در مواد حساس به آسیب پلاستیک است. این مدل در شرایطی که رفتار ترک عامل اصلی شکست باشد، به دلیل جزئیات دقیقی که ارائه می‌دهد، از مدل‌های ساده‌تر بسیار کاربردی‌تر است [۲۸].

۳-۸- مدل لیانگ^{۱۳}

مدل خستگی لیانگ بر اساس انرژی طراحی شده و به طور خاص به تحلیل اتصالات لحیم و تأثیر هندسه آن‌ها می‌پردازد. این مدل به شکل ساده‌ای تعداد چرخه‌های شکست را با توجه به چگالی انرژی پسماند (یعنی انرژی ذخیره‌شده در یک چرخه بارگذاری) تخمین می‌زند. همچنین، اثر تغییر شکل‌های الاستیک و خزش را در نظر می‌گیرد، که آن را برای تحلیل موادی که تحت بارهای متناوب هستند، مناسب می‌کند. نحوه عملکرد مدل به شرح زیر است:

۱. محاسبه چگالی انرژی پسماند: حلقه هیستریزس برای ماده یا اتصال لحیم تحت بارگذاری چرخه‌ای مشخص شده و مساحت آن محاسبه می‌شود. این مساحت نشان‌دهنده مقدار انرژی اتلاف‌شده در هر چرخه است و به عنوان چگالی انرژی هیستریزس مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲. محاسبه تعداد چرخه‌های شکست: با استفاده از مقدار چگالی انرژی هیستریزس محاسبه شده همچنین ضرایب ماده طبق رابطه ۸ محاسبه می‌شود [۲۸].

$$N_f = c(w_{ss})^{-m} \quad (۸)$$

مدل‌های مبتنی بر انرژی به دلیل در نظر گرفتن اثرات جامع‌تر، مانند انرژی تجمع‌یافته در چرخه‌های پسماند^{۱۴} تنش-کرنش، خزش و تغییرات پلاستیک، از دقت بالاتری در پیش‌بینی عمر خستگی برخوردار هستند. این مدل‌ها امکان ارزیابی رفتارهای پیچیده مواد را در شرایط چند محوره و محیط‌های حرارتی-مکانیکی فراهم می‌کنند و برای تحلیل سیستم‌های پیچیده و مواد پیشرفته بسیار مناسب هستند. اما این مدل‌ها به تحلیل‌های المان

مدل آکای در مواردی استفاده می‌شود که اطلاعات اولیه از رفتار خستگی ماده یا سیستم مورد نظر در دسترس است. این مدل برای تحلیل کلی طول عمر خستگی در مواد فلزی، کامپوزیت‌ها و برخی سیستم‌های ساده مکانیکی مناسب است [۳۵].

۳-۷-۳- مدل داویکس^{۱۲}

این مدل برای تحلیل طول عمر خستگی در مواد، به ویژه اتصالات لحیم، طراحی شده است. این مدل با تمرکز بر جزئیات رفتار خستگی، دو مرحله اصلی را در نظر می‌گیرد: مرحله اول شروع ترک و مرحله دوم انتشار ترک است. هدف این مدل تعداد چرخه‌هایی است که یک ماده می‌تواند قبل از شکست کامل تحمل کند را پیش‌بینی می‌کند. مراحل تحلیل در این مدل:

۳-۷-۱- مرحله اول: شروع ترک

- در این مرحله، ماده تحت بارگذاری‌های متناوب دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود.

- انرژی پلاستیک تجمع‌یافته در هر چرخه محاسبه می‌شود. این مقدار نشان‌دهنده انرژی مصرف‌شده در تغییر شکل‌های دائمی ماده است.

- با استفاده از این انرژی و ضرایب خاص ماده، تعداد چرخه‌هایی که قبل از ایجاد اولین ترک داخلی در ماده رخ می‌دهد، پیش‌بینی می‌شود.

۳-۷-۲- مرحله دوم: انتشار ترک

- پس از شروع ترک، این ترک در هر چرخه رشد می‌کند. نرخ رشد ترک، یعنی اینکه ترک در هر چرخه چقدر طولانی‌تر می‌شود، با توجه به انرژی پلاستیک تجمع‌یافته محاسبه می‌شود.

- با استفاده از این نرخ رشد، تعداد چرخه‌هایی که برای گسترش ترک تا مرحله شکست کامل ماده لازم است، تعیین می‌شود.

^{۱۴} Hysteresis

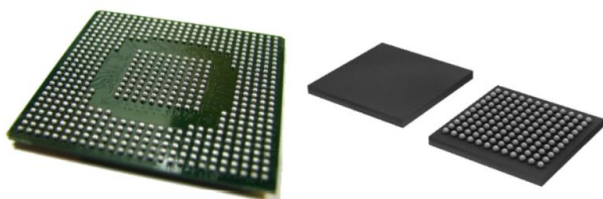
^{۱۲} Darveaux

^{۱۳} Liang

در اتصال المان‌های الکترونیکی به برد چاپی با توجه به نوع المان، پیکربندی‌های مختلفی استفاده می‌شود. به دلیل تنوع این پیکربندی‌ها، در این مقاله پیکربندی BGA و همچنین پیکربندی‌های LCCC و Leaded model در شبیه‌سازی‌ها بررسی و تحلیل شده‌اند.

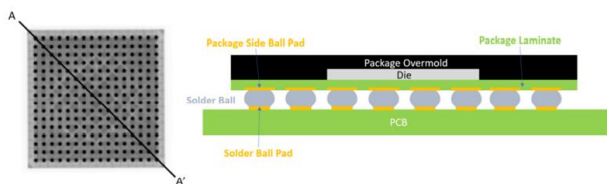
۴-۱- مدل‌سازی خستگی در پیکربندی BGA

پیکربندی Ball Grid Array (BGA) از جمله پرکاربردترین تکنولوژی‌های پیکربندی در صنعت الکترونیک هستند که برای ایجاد اتصالات مکانیکی و الکتریکی بین تراشه‌های الکترونیکی و برد مدار چاپی استفاده می‌شوند (شکل ۵). این پیکربندی‌ها به دلیل تراکم بالا، عملکرد مناسب در فرکانس‌های بالا و پایداری مکانیکی، به‌طور گسترده‌ای در محصولات الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، اتصالات لحیم در BGA به دلیل قرار گرفتن در معرض تنش‌های حرارتی و مکانیکی مکرر، به‌ویژه در کاربردهای فضایی، به شدت تحت تأثیر پدیده خستگی قرار می‌گیرند [۳۷].



شکل (۵): نمونه پیکربندی الکترونیکی BGA [۳۸]

در پیکربندی BGA دو ناحیه وجود دارد که احتمال وجود شکست در این دو ناحیه بیشتر از سایر بخش‌هاست (شکل ۶).



شکل (۶): نمای برش خورده از بسته الکترونیکی BGA [۳۸]

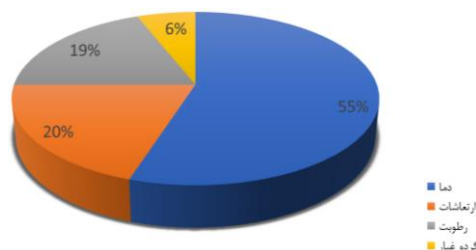
۱- ناحیه Die Shadow: ناحیه Die shadow به منطقه‌ای از برد مدار چاپی اشاره دارد که مستقیماً در زیر die (تراشه) قرار گرفته است. این ناحیه دقیقاً مطابق با ابعاد die و به دلیل نزدیکی به تراشه، معمولاً بیش‌ترین مقدار تنش‌های حرارتی و مکانیکی را تجربه می‌کند به همین دلیل احتمال شکست در این ناحیه بالاتر است (شکل ۷).

محدود دقیق، داده‌های پیشرفته مواد (مانند چگالی انرژی هیستریزس یا متغیرهای خزش) و انجام آزمایش‌های پرهزینه نیاز دارند. از سوی دیگر، مدل‌های مبتنی بر تنش و کرنش ساده‌تر است و از لحاظ محاسباتی سریع‌تر و برای کاربردهای اولیه یا شرایط خطی مناسب هستند. این مدل‌ها غالباً رفتارهای غیرخطی مواد، اثرات تجمعی خزش یا تعامل تنش-کرنش را به‌خوبی مدل‌سازی نمی‌کنند و دقت پایین‌تری در شرایط پیچیده دارند. بنابراین به دلیل در نظر گرفتن تمامی تأثیرات تغییرات کرنش و تنش، ترکیب اثرات پلاستیک، خزش و الاستیک به صورت یکجا همچنین لحاظ کردن رفتار واقعی مواد در شرایط عملیاتی، مدل‌های مبتنی بر انرژی برای تحلیل سیستم‌های پیچیده مناسب‌تر هستند.

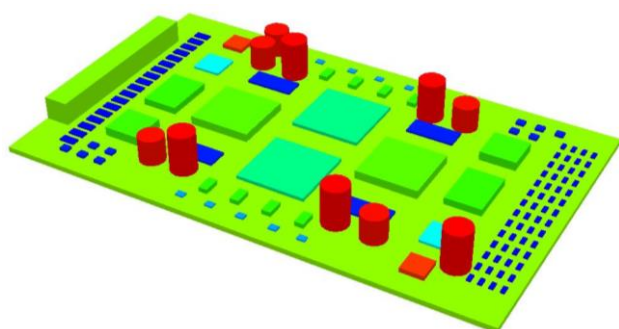
۴-۲ خستگی اتصالات لحیم برای بسته‌های

الکترونیکی مختلف

خستگی لحیم یکی از مسائل کلیدی در طراحی و تولید بسته‌های الکترونیکی است که تأثیر مستقیم در قابلیت اطمینان و عمر سیستم‌های الکترونیکی دارد. این پدیده در سیستم‌های الکترونیکی فضایی که در شرایط سخت محیطی قرار دارند اهمیت بیشتری خواهد داشت. با توجه به تفاوت ساختاری و مکانیکی بسته‌های الکترونیکی مختلف، تحلیل و مدل‌سازی خستگی لحیم باید به‌طور دقیق و متناسب با هر نوع پیکربندی انجام شود. مطالعات انجام شده روی عوامل تأثیرگذار بر ایجاد پدیده خستگی و شکست در پیکربندی‌های الکترونیکی و در نتیجه المان‌های الکترونیکی نشان می‌دهد که بیش‌ترین تأثیر ناشی از چرخه‌های دمایی و تنش‌های ناشی از آن است. عوامل دیگری همچون ارتعاشات، رطوبت و گرد و غبار سهم کمتری در ایجاد شکست در سیستم‌های الکترونیکی دارند [۳۶، ۳۷]. در شکل ۴، عوامل تأثیرگذار بر شکست بسته‌های الکترونیکی و سهم هر یک از آنها در شکست نشان داده شده است.

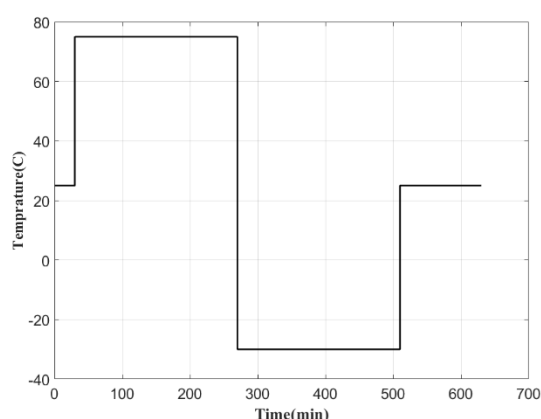


شکل (۴): عوامل تأثیرگذار در شکست بسته‌های الکترونیکی [۳۷]



شکل (۹): برد الکترونیکی تحت بررسی

برد الکترونیکی مورد بررسی تحت بارگذاری چرخه‌ای حرارتی ناشی از محیط فضا قرار گرفته است. در شکل ۱۰ بارگذاری چرخه‌ای حرارتی اعمال شده به برد الکترونیکی نشان داده شده است.



شکل (۱۰): چرخه حرارتی اعمال شده به برد الکترونیکی

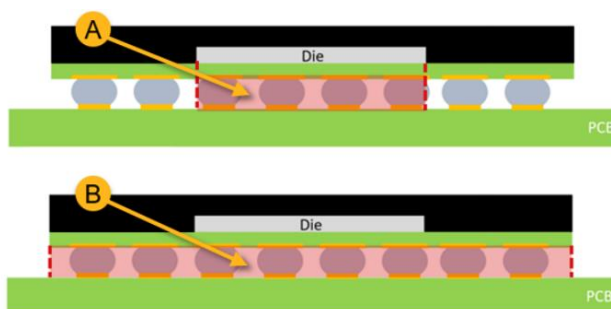
با توجه به اینکه المان‌های مختلف دارای پیکربندی‌های مختلف هستند، بنابراین به تفکیک پیکربندی‌ها، محاسبات و تحلیل‌های تخمین عمر برد انجام می‌شود و در نهایت با تجمیع نتایج بدست آمده و استفاده از نظریه ماینر، عمر کلی برد محاسبه خواهد شد.

۵-۱- تخمین عمر تحلیلی المان‌های الکترونیکی با

پیکربندی BGA

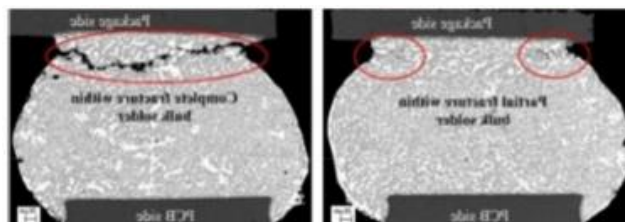
در این بخش، با استفاده از نظریه انرژی کرنشی، تعداد چرخه‌های اتفاق افتاده تا شکست تحت بارگذاری حرارتی به صورت تحلیلی محاسبه می‌شود. در این راستا، متغیر B با هدف تعیین تنش در ناحیه Die Shadow به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود:

۲- ناحیه Package Shadow: ناحیه‌ی Package Shadow به منطقه‌ای وسیع‌تری اشاره دارد که کل پیکربندی BGA را پوشش می‌دهد. این ناحیه شامل کل ناحیه‌ی die shadow و همچنین سایر بخش‌های پیکربندی است که توپ‌های لحیم به برد مدار چاپی متصل می‌شوند. این ناحیه تمام نواحی تحت تأثیر تنش‌های حرارتی و مکانیکی پیکربندی را شامل می‌شود، اما به دلیل گستردگی آن، تنش‌ها به صورت یکنواخت‌تری توزیع می‌شوند (شکل ۷).



شکل (۷): نواحی Die Shadow و Package Shadow

در شکل ۸ یک نمونه اتصال لحیم با پیکربندی BGA را نشان می‌دهد که تحت تنش‌های حرارتی مکرر دچار پدیده خستگی و در نهایت شکست شده است. مطابق با این شکل در اتصال لحیم در پیکربندی BGA دو ناحیه مستعد شکست وجود دارد.



شکل (۸): شکست اتصالات لحیم با پیکربندی BGA [۳۷]

۵- تخمین عمر یک برد الکترونیکی تحت چرخه

حرارتی

جهت بررسی تئوری‌های مطرح شده، یک برد الکترونیکی با ۲۰۰ المان الکترونیکی شامل مقاومت، خازن، ترانزیستور و تراشه در نظر گرفته شده است. این برد متشکل از ۶ لایه مس با ضخامت‌های نیم و یک انس همچنین پنج لایه عایق از جنس FR-4 است. شماتیک برد مذکور در شکل ۹ نشان داده می‌شود.

$$B = \sqrt{\frac{\text{Effective Shear Modulus}}{\left(\frac{1 - \nu_{corner}}{E_{corner} \times t_{sum}} + \frac{1 - \nu_{pcb}}{E_{pcb} \times t_{pcb}}\right)}} \quad (16)$$

در ادامه با استفاده از متغیر کمکی B که در رابطه ۱۶ تعریف گردید، مقدار تنش در ناحیه مذکور به کمک روابط ۱۷ و ۱۸ قابل محاسبه خواهد بود:

$$S_{corner} = d_{\text{correction factor, pad size}} \times d_{\text{correction factor, pad diameter}} \times S2_{shadow} \quad (17)$$

$$S2_{corner} = 2(CTE_{corner} - CTE_{pcb}) \times \frac{\text{Effective Shear Modulus}}{B \times h_{ball}} \times \tanh\left(B - 0.4142 \times \left(\frac{L}{2}\right)_{\text{lam}}\right) \times \Delta T \quad (18)$$

در ادامه بیشینه کرنش اتفاق افتاده در ناحیه Package Shadow از طریق روابط ۱۹ و ۲۰ محاسبه می‌شود:

$$\text{Strain Range max} = \frac{|CTE_{corner} - CTE_{pcb}| \times \Delta T \times \left(\frac{L}{2}\right)_{\text{lam}}}{h_{ball}} \quad (19)$$

$$\text{Adj strain Range}_{\text{corner}} = \text{Strain Range max} \times \left(\frac{t_{\text{max dwell}}}{\text{critical dwell time}}\right)^{0.136} \times e^{\text{Activation Energy} \times \left(\frac{1}{\text{critical max temp}} - \frac{1}{T_{\text{Max}}}\right)} \quad (20)$$

سپس با استفاده از رابطه زیر که توسعه یافته نظریه انرژی کرنشی در محاسبات عمر خستگی است، عمر اتصالات لحیم با پیکربندی BGA در ناحیه Package Shadow به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۹]:

$$\text{Strain Energy} = \text{Adj strain Range}_{\text{corner}} \times S_{\text{corner}} \quad (21)$$

$$\text{cycle to failure} = \frac{1}{\text{Strain Energy Coff.} \times \text{Strain Energy}} \quad (22)$$

۲-۵- روش مدل سازی در ماژول شرلوک نرم افزار

انسیس^{۱۵}

ماژول شرلوک^{۱۶} یکی از ابزارهای پیشرفته نرم افزار انسیس است که به طور ویژه برای پیش بینی عمر و قابلیت اطمینان قطعات و بوردهای الکترونیکی طراحی شده است. این ابزار به مهندسان کمک می‌کند تا تحلیل های پیشگیرانه انجام داده و مشکلات احتمالی طراحی را در مراحل اولیه شناسایی کنند. برای تخمین عمر بردهای الکترونیکی که تحت بارگذاری های دمایی (مانند

$$B = \sqrt{\frac{\text{Effective Shear Modulus}}{\left(\frac{1 - \nu_{inside}}{E_{inside} \times t_{sum}} + \frac{1 - \nu_{pcb}}{E_{pcb} \times t_{pcb}}\right)}} \quad (9)$$

در ادامه با استفاده از متغیر کمکی B که در رابطه ۹ تعریف شد مقدار تنش در ناحیه مذکور به کمک روابط ۱۰ و ۱۱ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{shadow} = d_{\text{correction factor, pad size}} \times d_{\text{correction factor, pad diameter}} \times S2_{shadow} \quad (10)$$

$$S2_{shadow} = 2(CTE_{inside} - CTE_{pcb}) \times \frac{\text{Effective Shear Modulus}}{B \times h_{ball}} \times \tanh\left(B - 0.4142 \times \left(\frac{L}{2}\right)_{\text{die}}\right) \times \Delta T \quad (11)$$

در ادامه بیشینه کرنش اتفاق افتاده در ناحیه Die Shadow از طریق معادلات ۱۲ و ۱۳ قابل محاسبه خواهد بود:

$$\text{Strain Range max} = \frac{|CTE_{inside} - CTE_{pcb}| \times \Delta T \times \left(\frac{L}{2}\right)_{\text{die}}}{h_{ball}} \quad (12)$$

$$\text{Adj strain Range}_{\text{shadow}} = \text{Strain Range max} \times \left(\frac{t_{\text{max dwell}}}{\text{critical dwell time}}\right)^{0.136} \times e^{\text{Activation Energy} \times \left(\frac{1}{\text{critical max temp}} - \frac{1}{T_{\text{Max}}}\right)} \quad (13)$$

در نهایت با استفاده از رابطه زیر که توسعه یافته نظریه انرژی کرنشی در محاسبات عمر خستگی است، عمر اتصالات لحیم با پیکربندی BGA در ناحیه Die Shadow به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Strain Energy} = \text{Adj strain Range}_{\text{shadow}} \times S_{\text{shadow}} \quad (14)$$

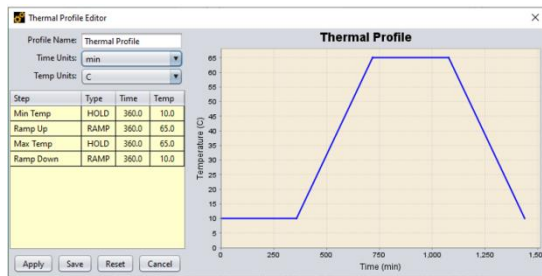
$$\text{cycle to failure} = \frac{1}{\text{Strain Energy Coff.} \times \text{Strain Energy}} \quad (15)$$

با توجه به وجود دو ناحیه مستعد شکست در اتصالات لحیم، لازم است در ناحیه Package Shadow نیز معادلات تعیین عمر استخراج گردد. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، گوشه های اتصال لحیم در این ناحیه، بیشترین احتمال رخداد شکست را دارند، بنابراین محاسبات بر این اساس انجام شده است.

طبق روند ارائه شده مربوط به ناحیه Die Shadow در ابتدا متغیر B با هدف تعیین تنش طبق رابطه ۱۶ تعریف می‌شود [۳۹]:

¹⁶ Sherlock

¹⁵ Ansys

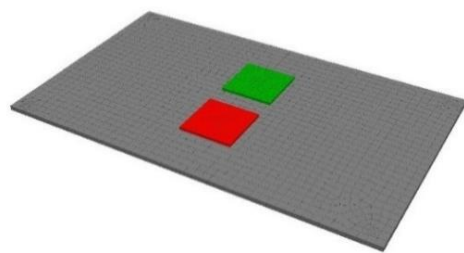


شکل (۱۴): تعریف پروفیل دمایی

۲. تحلیل خستگی حرارتی: با استفاده از قابلیت خستگی لحیم^{۱۷} قرار داده شده در بخش Analysis قرار داده شده در این ماژول، می‌توان عمر برد مدار چاپی به همراه المان‌های الکترونیکی بر حسب قابلیت اطمینان مورد نظر مشاهده کرد.

۳-۵- تخمین عمر عددی المان‌های الکترونیکی با پیکربندی BGA

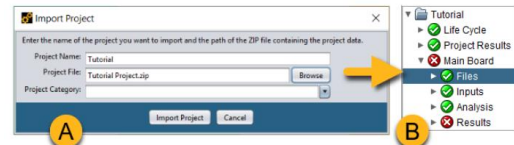
در این بخش تخمین عمر عددی المان‌های الکترونیکی با پیکربندی BGA ارائه می‌شود. در این راستا، مدل المان محدود این دو تراشه در نرم افزار انسیس ماژول شرلوک مطابق با شکل ۱۵ ایجاد شده است. این قطعات تحت چرخه حرارتی مطابق با شکل ۱۰ قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در جدول ۱ و شکل ۱۶ آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی انجام شده نشان می‌دهد که تراشه‌ها در چرخه ۵۴۰۹ دچار شکست از ناحیه لحیم‌ها خواهند شد.



شکل (۱۵): مدل اجزاء محدود تراشه‌ها

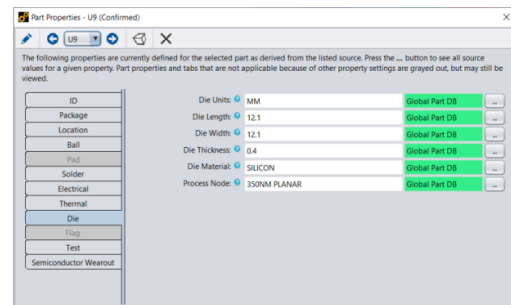
چرخه‌های دمایی یا گرمایش و سرمایش مکرر) قرار دارند، ماژول شرلوک از مراحل زیر استفاده می‌کند:

۱. وارد کردن طراحی برد مدار چاپی به همراه المان‌های الکترونیکی و پیکربندی قطعات به نرم‌افزار (شکل ۱۱).



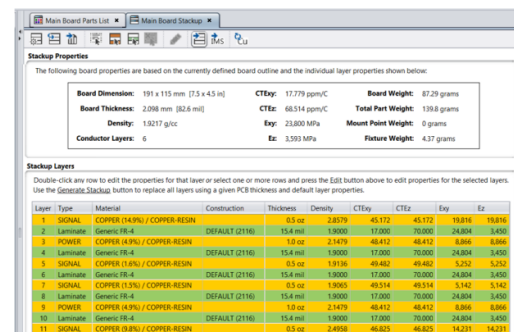
شکل (۱۱): وارد کردن برد مدار چاپی به ماژول شرلوک

در ادامه، ویژگی‌های الکترونیکی، مکانیکی و هندسی تمامی پیکربندی‌ها طبق شکل ۱۲ تعریف می‌شود.



شکل (۱۲): تعریف مشخصات هر المان الکترونیکی

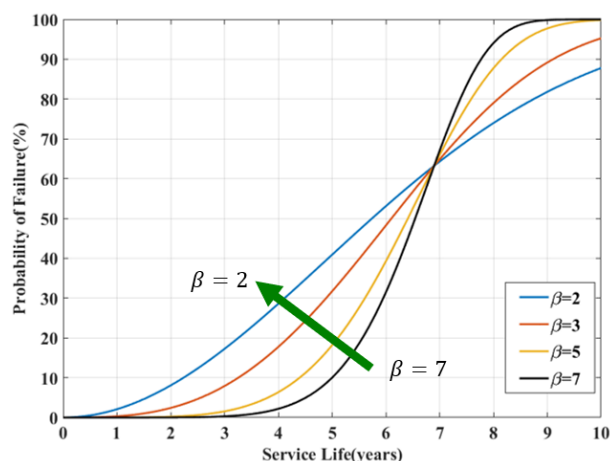
چیدمان لایه‌های برد و مشخصات مکانیکی و هندسی آن طبق شکل ۱۳ مشخص می‌شود.



شکل (۱۳): تعریف مشخصات لایه‌های برد مدار چاپی

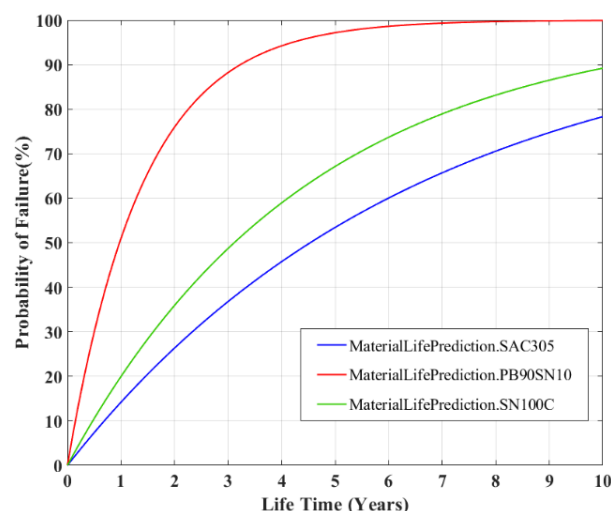
۱. تعریف شرایط بارگذاری: کاربر مشخص می‌کند که برد تحت چه نوع چرخه دمایی یا شرایط محیطی (مانند دامنه دما، تعداد چرخه‌ها، و نرخ تغییر دما) قرار دارد. لذا طبق شکل ۱۴ چرخه حرارتی مطلوب به نرم‌افزار وارد می‌شود.

17 Solder Fatigue



شکل (۱۷): تأثیر تغییر شیب ویبول در تخمین عمر با جنس SAC305

در ادامه جهت بررسی تأثیر تغییر جنس ماده به کار رفته در فرآیند لحیم کاری در عمر تراشه‌ها، سه نوع ماده مختلف برای لحیم در نظر گرفته شده است. نتایج عددی حاصل از بررسی تأثیر جنس لحیم در شکل ۱۸ و جدول ۲ ارائه شده است.

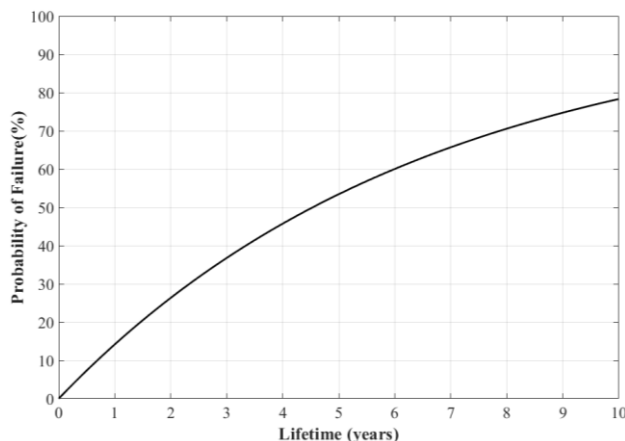


شکل (۱۸): تأثیر جنس ماده لحیم در عمر تراشه‌ها

جدول (۲): تخمین عمر بر اساس جنس ماده لحیم

ردیف	جنس لحیم	عمر (چرخه)
۱	SAC305	5404
۲	PB90SN10	1160
۳	SN100C	3716

با توجه به شکل ۱۸ و جدول ۲ مشاهده می‌شود که ماده PB90SN10 کمترین عمر و ماده SAC305 بیشترین عمر چرخه کاری پیش‌بینی شده را دارد. علت این امر از دو دیدگاه بررسی می‌شود:



شکل (۱۶): تخمین عمر پیکربندی BGA

جدول (۱): نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک نرم افزار انسیس

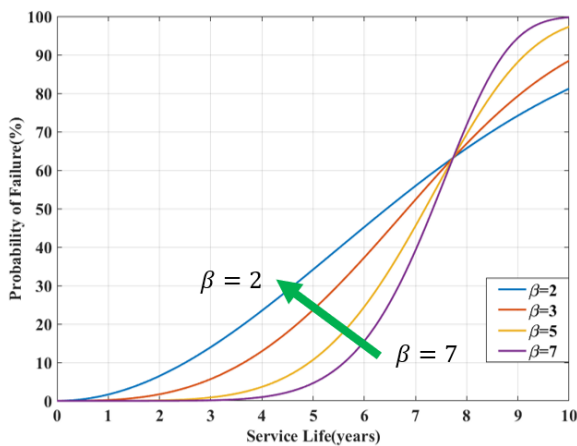
ردیف	پارمتر	مقدار
۱	Damage	0.764435
۲	Cycles To Fail	5408.985
۳	TTF (years)	6.54
۴	β	1

به منظور بررسی تغییرات نرخ احتمال شکست در طول زمان از توزیع ویبول^{۱۸} استفاده می‌شود. در این مقاله از توزیع ویبول دو متغیره مطابق با رابطه ۲۳ استفاده شده است. شیب ویبول β یک متغیر آماری است که به توصیف توزیع شکست‌های احتمالی در طول زمان می‌پردازد. همچنین در بررسی تغییر نرخ احتمال شکست قابل استفاده است. برای مثال اگر $\beta < 1$ باشد به این معنی است که نرخ احتمال شکست در حال کاهش است.

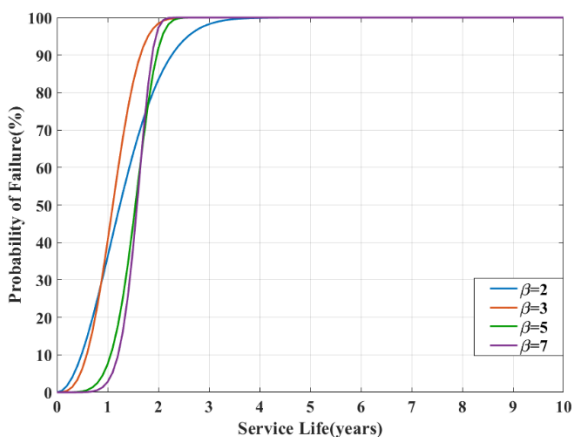
$$F(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (23)$$

با استفاده از ماژول شرلوک در نرم‌افزار انسیس تأثیر تغییر شیب ویبول در تخمین عمر تراشه‌ها شبیه‌سازی شده است. نتیجه این شبیه‌سازی در شکل ۱۷ آورده شده است. مطابق با شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که در احتمال شکست کمتر از ۶۳ درصد با افزایش β عمر تخمین زده افزایش می‌یابد، اما با افزایش درصد احتمال شکست این روند برعکس شده است.

تغییرات نرخ احتمال شکست در طول زمان با استفاده توزیع ویبول^{۱۹} برای اتصال لحیم با جنس SN100C و PB90SN10 نیز در شکل ۱۹ و ۲۰ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نرخ احتمال شکست وابسته به جنس ماده لحیم است و با تغییر جنس، نمودار نرخ احتمال شکست نیز متفاوت می‌شود.



شکل (۱۹): تأثیر تغییر شیب ویبول در تخمین عمر با جنس SN100C



شکل (۲۰): تأثیر تغییر شیب ویبول در تخمین عمر با جنس PB90SN10

۴-۵- بررسی پیکربندی LCCC^{۲۰} و تخمین عمر آن

پیکربندی LCCC از سرامیک ساخته شده است و دارای اتصالات بدون پایه است که به صورت مستقیم به برد مدار چاپی متصل می‌شوند و انعطاف پذیری کمتری دارند. در پیکربندی LCCC، اختلاف ضریب انبساط حرارتی سرامیک و برد مدار چاپی منجر به ایجاد تنش‌های حرارتی می‌شود که این تنش‌ها به‌طور خاص در پدهای اتصال، متمرکز می‌شوند [۴۲، ۴۳]. نحوه اتصال پیکربندی LCCC به برد مدار چاپی در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

۵-۳-۱- دیدگاه چقرمگی شکست مود I

چقرمگی شکست نشان‌دهنده مقاومت ماده در برابر گسترش ترک است و می‌تواند بر تعداد چرخه‌های تا شکست در اتصالات لحیم تأثیر بگذارد:

• SAC305: دارای چقرمگی شکست نسبتاً بالا (در حدود ۲۰-۲۵ MPa√m) است. این ویژگی به آن اجازه می‌دهد تا در برابر گسترش ترک تحت چرخه‌های دمایی مقاومت بیشتری نشان دهد. بنابراین، عمر کاری بیشتری را نسبت به دو نوع لحیم دیگر در بارگذاری حرارتی ارائه می‌دهد [۴۰، ۴۱].

• SN100C: چقرمگی شکست آن کمتر از SAC305 ولی بالاتر از SnPb است. SN100C ترکیبی از خواص مکانیکی مناسب و مقاومت حرارتی بالا را نشان می‌دهد و در برابر رشد ترک در محیط‌های دمایی شدید عملکرد مطلوبی دارد [۴۰، ۴۱].

• PB90SN10: با چقرمگی شکست کمتر (حدود ۱۰-۱۵ MPa√m) نسبت به دو لحیم دیگر، به طور معمول در برابر گسترش ترک ضعیف‌تر عمل می‌کند، که این موضوع منجر به کاهش تعداد چرخه‌های تا شکست می‌شود [۴۰، ۴۱].

۵-۳-۲- دیدگاه استحکام مکانیکی

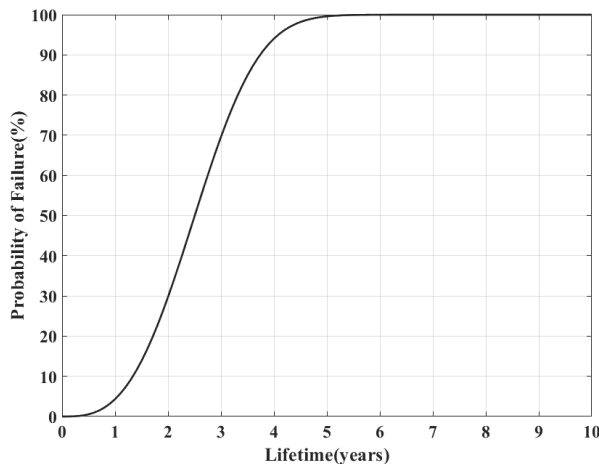
• SAC305: استحکام مکانیکی بالا و مقاومت در برابر خستگی حرارتی از مزایای این لحیم است. این ویژگی‌ها موجب کاهش سرعت تشکیل ترک و افزایش عمر کاری می‌شوند، خصوصاً در کاربردهایی با چرخه‌های دمایی گسترده قابل استفاده است [۴۰، ۴۱].

• SN100C: این لحیم، با داشتن ترکیبات خاص (مانند نیکل و ژرمانیم)، در برابر خستگی حرارتی و ضربه مقاومت بالایی دارد و عملکردی نزدیک به SAC305 ارائه می‌دهد. هرچند استحکام کلی آن ممکن است کمی کمتر باشد، اما به دلیل چقرمگی مطلوب و تشکیل لایه‌های بین‌فلزی یکنواخت، عملکردی پایدار دارد [۴۰، ۴۱].

• PB90SN10: به دلیل خواص مکانیکی و حرارتی پایین‌تر، در برابر بارگذاری‌های چرخه‌ای به سرعت دچار خستگی می‌شود. نرخ تشکیل ترک‌های اولیه در آن بالاست، که موجب کاهش عمر مفید می‌شود [۴۰، ۴۱].

²⁰ Leadless ceramic chip carrier

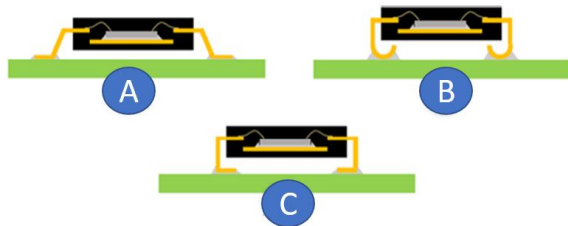
¹⁹ Weibull



شکل (۲۳): تخمین عمر پیکره بندی LCCC

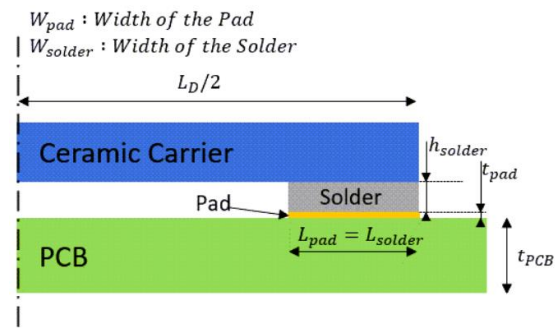
۵-۵- بررسی پیکربندی Leaded و تخمین عمر آن

در این بخش به محاسبه تخمین عمر و احتمال واماندگی برای پیکربندی Leaded پرداخته می‌شود. نحوه اتصال پیکربندی Leaded به برد مدار چاپی در شکل ۲۴ نشان داده شده است. زمانی که المان تحت چرخه حرارتی قرار بگیرد، در پیکربندی Leaded به دلیل تفاوت بین ضریب انبساط حرارتی اتصال لحیم، المان و برد مدار چاپی، پایه‌های المان تحت خمش قرار گرفته و اتصال لحیم تحت تنش برشی قرار می‌گیرد. به دلیل ماهیت چرخه‌ای تنش حرارتی اعمال شده، در محل اتصال لحیم به برد مدار چاپی ترک ایجاد و شروع به رشد می‌کند و در نهایت دچار واماندگی می‌شود.



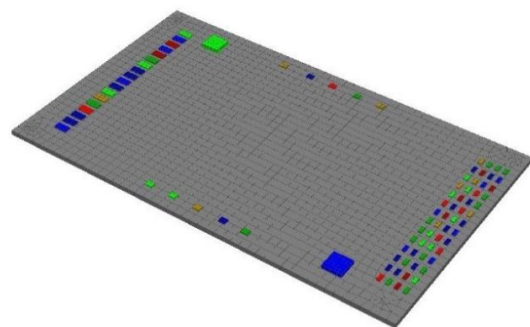
شکل (۲۴): اتصال پیکربندی Leaded به برد مدار چاپی [43]

نتایج تخمین عمر و محاسبه احتمال واماندگی پیکربندی Leaded در شکل ۲۵ ارائه شده است. همچنین تأثیر تغییر شیب ویبول در تخمین عمر پیکره بندی Leaded در شکل ۲۶ نشان داده شده است. با توجه به تحلیل‌های عددی انجام شده مشخص شد که طول عمر خستگی کل برد تحلیل شده، در اثر بارگذاری چرخه‌ای وارد شده برابر با ۳۶۴۳ چرخه است.



شکل (۲۱): نحوه اتصال پیکربندی LCCC به برد مدار چاپی [۴۳]

به منظور تخمین عمر پیکربندی LCCC از نرم افزار انسیس استفاده شده است. در این راستا المان‌هایی شامل مقاومت، خازن و تراشه الکترونیکی که در طراحی الکترونیکی برد با پیکربندی LCCC مورد استفاده قرار می‌گیرند، در ماژول شرلوک مدل‌سازی شدند و تحت چرخه حرارتی مطابق با شکل ۱۰ قرار گرفتند. مدل المان محدود پیکربندی LCCC در ماژول شرلوک نرم افزار انسیس در شکل ۲۲ نشان داده شده است.



شکل (۲۲): مدل المان محدود آماده شده برای پیکره بندی LCCC

نتایج تخمین عمر و محاسبه احتمال واماندگی پیکربندی LCCC در شکل ۲۳ ارائه شده است. در تحلیل‌های عددی انجام شده، جنس لحیم SAC305 و شیب ویبول برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. با توجه به تحلیل‌های عددی انجام شده مشخص شد که تراشه‌های الکترونیکی مدل‌سازی شده کمترین عمر را بین سایر تجهیزات الکترونیکی موجود بر روی برد، شامل مقاومت و خازن‌ها دارا بودند و طول عمر خستگی کل برد تحلیل شده در اثر بارگذاری چرخه‌ای وارد شده برابر با ۲۷۵۴ چرخه است.

• عمر: طبق تحلیل ارائه شده، BGA چرخه‌های بیشتری تا شکست را نشان می‌دهد، زیرا توپ‌های لحیم به طور یکنواخت تنش‌ها را توزیع می‌کنند، هرچند نقاط ضعف خاصی مانند گوشه‌ها مستعد شکست هستند.

۲-۶-۵- پیکربندی Leaded

• ویژگی‌ها: این پیکربندی دارای اتصالات لحیم به صورت پایه‌های سربی است که به برد مدار چاپی متصل می‌شوند.

• مشکلات: به دلیل طول بلندتر پایه‌ها، تنش‌های بیشتری در طول پایه ایجاد می‌شود که ترک‌خوردگی را تسریع می‌کند. همچنین، خستگی حرارتی به دلیل انعطاف‌پذیری کمتر لحیم در این نوع پیکربندی سریع‌تر ظاهر می‌شود.

• عمر: این پیکربندی معمولاً عمر کمتری نسبت به BGA دارد زیرا تنش‌ها در طول پایه‌ها متمرکزتر هستند.

۳-۶-۵- پیکربندی LCCC

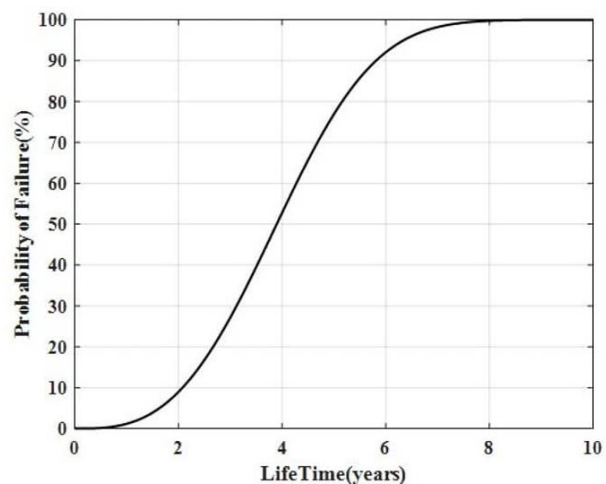
• ویژگی‌ها: این پیکربندی فاقد پایه‌های سربی است و به صورت مستقیم به برد مدار چاپی متصل می‌شود. اتصالات لحیم بسیار کوچک و متمرکز هستند.

• مشکلات: به دلیل اتصالات کوچک و متمرکز، تمرکز تنش بالا در این نقاط باعث ترک‌خوردگی زود هنگام می‌شود. همچنین، انبساط و انقباض نابرابر بین سرامیک و برد چاپی به ترک‌های حرارتی منجر می‌شود.

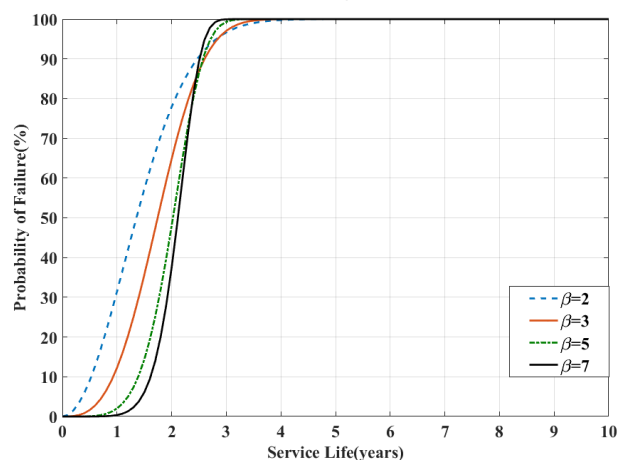
• عمر: کمترین چرخه‌های تا شکست را دارد، زیرا توزیع تنش مناسب نیست و اتصالات بسیار حساس به ترک‌خوردگی هستند. دلایل تفاوت عمر در پیکربندی‌ها عبارتند از:

۴-۶-۵- اختلاف ضریب انبساط حرارتی

• مواد مختلف مانند لحیم، برد مدار چاپی (FR-4)، و سرامیک ضریب انبساط حرارتی متفاوتی دارند. این اختلاف‌ها تنش‌های برشی در اتصالات ایجاد می‌کند که بسته به طراحی پیکربندی متفاوت است. پیکربندی BGA به دلیل توزیع متقارن توپ‌های لحیم، تنش حرارتی کمتری نسبت به LCCC و Leaded تحمل می‌کند.



شکل (۲۵): تخمین عمر پیکربندی Leaded



شکل (۲۶): تأثیر تغییر شیب ویبول در تخمین عمر پیکربندی Leaded

۵-۶-۱- تحلیل عمر و ترک‌خوردگی در پیکربندی‌های مختلف

برای بررسی دقیق عمر و ترک‌خوردگی در پیکربندی‌های مختلف مطرح شده در مطالعه حاضر، ابتدا لازم است به تفاوت‌های ساختاری و عملکردی در هر پیکربندی پرداخته شود.

۱-۶-۵- پیکربندی BGA

• ویژگی‌ها: پیکربندی BGA از مجموعه‌ای از توپ‌های لحیم زیر تراشه استفاده می‌کند که به صورت متراکم به برد مدار چاپی متصل می‌شوند. این پیکربندی به دلیل افزایش چگالی و کاهش فضای اشغال شده بسیار پرکاربرد است.

• مشکلات: در ناحیه‌های Die Shadow و Package Shadow، تنش‌های حرارتی به دلیل اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین مواد رخ می‌دهد که منجر به ترک‌خوردگی می‌شود.

۵-۶-۵- تمرکز تنش

• در پیکربندی Leaded و LCCC، تمرکز تنش در ناحیه‌های خاصی رخ می‌دهد که باعث ترک خوردگی سریع‌تر می‌شود. در مقابل، BGA تنش را بهتر توزیع می‌کند.

۵-۶-۶- طراحی مکانیکی و استحکام لحیم

• طراحی Leaded به دلیل طول بلند پایه‌ها، پایداری کمتری در برابر تنش‌های چرخه‌ای دارد. LCCC به دلیل اتصالات کوچک و متمرکز مستعد آسیب بیشتری است. پیکربندی BGA به دلیل طراحی کروی توپ‌های لحیم، بیشترین مقاومت را ارائه می‌دهد.

۵-۶-۷- اندازه و توزیع اتصالات لحیم

• در پیکربندی BGA، اندازه بزرگ‌تر توپ‌های لحیم و فاصله یکنواخت بین آن‌ها، امکان توزیع یکنواخت‌تر تنش را فراهم می‌کند.

باتوجه به مطالب ذکر شده، پیکربندی BGA عمر طولانی‌تری به دلیل توزیع متوازن تنش و مقاومت مکانیکی بالاتر نسبت به دو پیکربندی دیگر دارد. پیکربندی Leaded عمر متوسط با حساسیت بیشتر به خستگی در طول پایه‌ها دارد و پیکربندی LCCC کوتاه‌ترین عمر بین سه پیکربندی مطرح شده در مقاله حاضر به دلیل تمرکز تنش بالا و حساسیت مواد سرامیکی را دارد.

۶- صحت سنجی نتایج عددی

در این بخش برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی‌های نرم افزاری، نتایج عددی با نتایج تحلیلی ارائه شده در بخش ۵-۲ مقایسه می‌شوند. در این راستا یک برد الکترونیکی با بسته بندی BGA حاوی دو قطعه تراشه در نظر گرفته می‌شود و عمر آن به صورت عددی و تحلیلی محاسبه می‌شود. مشخصات بسته بندی BGA در نظر گرفته شده برای صحت‌سنجی نتایج، در جدول ۳ درج شده است. همچنین مشخصات مکانیکی مورد استفاده در جدول ۴ درج شده است. همچنین مشخصات مکانیکی مورد استفاده در جدول ۴ درج شده است. گرفته شده به ترتیب در جداول ۵ و ۶ درج شده است.

جدول (۳): مشخصات بسته بندی BGA جهت انجام صحت سنجی

مقدار/نوع	متغیر	مقدار/نوع	متغیر
mm 0.65	mold Over thickness	mm 27	Package length
mm 1.95	Laminate thickness	mm 27	Package width

Substrate material	Epoxy encapsulant	mold Over material	Epoxy encapsulant
--------------------	-------------------	--------------------	-------------------

جدول (۴): مشخصات لحیم مورد استفاده جهت انجام صحت سنجی

مقدار/نوع	متغیر	مقدار/نوع	متغیر
mm 0.8	Ball Pad Diameter	280	Ball Count
mm 0.75	Ball Package Diameter	mm 2	Ball Pitch
mm 1	Ball Height	mm 1	Ball Diameter
SAC305	Ball Material		

جدول (۵): مشخصات مکانیکی مورد استفاده جهت انجام صحت سنجی

مقدار/نوع	متغیر	مقدار/نوع	متغیر
29GPa	Board Modulus	2.11mm	Board Thickness
17ppm/c	Board CTE		

جدول (۶): مشخصات ناحیه Die جهت انجام صحت سنجی

مقدار/نوع	متغیر	مقدار/نوع	متغیر
12.1mm	Die width	12.1mm	Die Length
silicon	Die material	0.4mm	Die thickness

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی در جدول ۷ درج شده است. مطابق با جدول ۷ مشخص می‌شود، در صورتی که برد الکترونیکی مدل‌سازی شده تحت چرخه حرارتی مطابق با شکل ۱۱ قرار گیرد، طول عمر آن برابر با ۵۴۱۴ چرخه خواهد بود.

جدول (۷): نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی

مقدار/نوع	متغیر	مقدار/نوع	متغیر
0.1847 j	Strain Energy	24.79 Pa	Stress
5414	Cycles to Failure		

مقایسه میان نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و محاسبات تحلیلی در جدول ۸ ارائه شده است. باتوجه به این جدول مشاهده می‌شود که تطابق بسیار خوبی میان نتایج عددی با نتایج تحلیلی وجود دارد که این امر نشانگر صحت شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده در نرم‌افزار انسیس است. بنابراین با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله می‌توان طول عمر خستگی قطعات الکترونیکی را با دقت بسیار بالایی به صورت عددی محاسبه کرد.

جدول (۸): مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و محاسبات تحلیلی

عمر	روش حل
۵۴۱۴	تحلیلی
۵۴۰۹	عددی
۰٪/۰۹	خطا

۳- نتیجه گیری

باتوجه به رشد پرشتاب صنعت فضایی در جهان، اهمیت دستیابی به قابلیت اطمینان بالا در عملکرد بردها و تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده در سامانه‌های فضایی دوچندان می‌شود. یکی از اصلی‌ترین عوامل در واماندگی بردهای الکترونیکی در طول عمر مأموریت فضایی آن‌ها، ایجاد پدیده خستگی ناشی از چرخه‌های حرارتی اعمال شده به تجهیزات الکترونیکی است. بنابراین بررسی پدیده خستگی و محاسبه طول عمر تجهیزات الکترونیکی تحت بارگذاری چرخه‌ی حرارتی بسیار حائز اهمیت است. در مطالعه حاضر از مدل انرژی کرنشی به‌عنوان یک رویکرد عددی دقیق برای تحلیل و تخمین عمر اتصالات لحیم در شرایط چرخه‌ای حرارتی استفاده شده است. این رویکرد، دقت بالاتری نسبت به مدل‌های مبتنی بر تنش یا کرنش دارد و می‌تواند به تحلیل سازوکارهای شکست کمک کند. سه نوع لحیم به‌طور کامل از نظر چرخه‌های خستگی تا شکست، چقرمگی شکست، و مقاومت در برابر تنش‌های مکانیکی تحلیل و مقایسه شده‌اند. تأثیر این لحیم‌ها در پیکربندی‌های مختلف بررسی شد. طول عمر خستگی و احتمال واماندگی برای سه نوع پیکربندی متفاوت جهت اتصال تجهیزات الکترونیکی بر روی برد مدار چاپی تحت بارگذاری چرخه‌ای حرارتی به صورت تحلیلی و عددی با استفاده از مدل توسعه یافته انرژی کرنشی محاسبه شده است. نتایج استخراج شده در این پژوهش نشان می‌دهد که در بین پیکربندی‌های متفاوت جهت اتصال تجهیزات الکترونیکی بر روی برد مدار چاپی، پیکربندی BGA از بقیه مقاوم‌تر بوده و طول عمر خستگی بالاتری در برابر چرخه‌های حرارتی اعمال شده دارد. کمترین عمر خستگی نیز مربوط به پیکربندی LCCC است به دلیل طراحی سرامیکی و بدون پایه که باعث تمرکز تنش در اتصالات می‌شود. بنابراین در طراحی بردهای الکترونیکی فضایی پیکربندی BGA جهت اتصال تجهیزات بر روی برد برای افزایش طول عمر خستگی در برابر بارگذاری‌های حرارتی چرخه‌ای پیشنهاد می‌شود. به دلیل تأثیر جنس ماده به کار رفته در اتصالات لحیم، تأثیر این عامل بر طول عمر خستگی و احتمال واماندگی بررسی شد و نتایج نشان می‌دهد که هر چقدر تنش تسلیم لحیم بیشتر باشد، عمر خستگی اتصال نیز بیشتر خواهد بود. همچنین توزیع ویبول دو متغیره برای مدل‌سازی احتمال خرابی و تغییر نرخ واماندگی در طول زمان به کار رفته است. این رویکرد امکان پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار طول عمر را فراهم می‌آورد. بر این اساس تأثیر تغییر شیب ویبول در

عمر بردهای الکترونیکی محاسبه شد. نتایج عددی استخراج شده در مطالعه حاضر با نتایج تحلیلی نیز مقایسه شد و مشاهده شد که تطابق بسیار خوبی میان نتایج عددی با نتایج تحلیلی وجود دارد که این امر نشانگر صحت شبیه‌سازی‌های عددی ارائه شده در این مقاله است. بنابراین با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله می‌توان طول عمر خستگی کم چرخه قطعات الکترونیکی با پیکربندی‌های مختلف اتصال را با دقت بسیار بالایی به صورت عددی محاسبه کرد.

۷- جدول علائم و اختصارات

علائم اختصاری

ردیف	متغیر	توضیحات
۱	N_i	تعداد چرخه تا شکست
۲	n_i	تعداد چرخه تحت تنش
۳	S_i	تنش
۴	$\Delta\gamma$	کرنش برشی
۵	α, C, A, m	ثوابت معادلات
۶	f	فرکانس چرخه‌های حرارتی
۷	β	انرژی فعال‌سازی
۸	n, k	ثوابت بولتزمن
۹	T_{max}	بیشینه دما
۱۰	$\Delta\epsilon$	کرنش سیستم
۱۱	σ_f	استحکام حالت خستگی
۱۲	ϵ_f	ضریب انعطاف پذیری خستگی
۱۳	E	مدول الاستیسیته
۱۴	c	ثابت انعطاف پذیری خستگی
۱۵	b	ضریب استحکام خستگی
۱۶	θ	ضریب شکل پذیری
۱۷	T_H	مدت زمان انجام یک چرخه حرارتی
۱۸	T_{sj}	میانگین دمای یک چرخه حرارتی
۱۹	w_0	مقدار انرژی آزاد
۲۰	K	ضریب خستگی
۲۱	Δw	مقدار انرژی کرنشی کل
۲۲	w_{ss}	چگالی انرژی پسماند
۲۳	B	متغیر کمکی
۲۴	d	قطر
۲۵	t	ضخامت
۲۶	ΔT	اختلاف دما
۲۷	L	طول
۲۸	h	ارتفاع
۲۹	CTE	ضریب انبساط حرارتی
۳۰	v	ضریب پواسون

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

مراجع

- [16] R. Ghaffarian, "CCGA packages for space applications," *Microelectron. Reliab.*, vol. 46, no. 12, pp. 2007–2015, 2006.
- [17] A. Lambert, A. Mian, J. Hogan, T. Kaiser, and B. LaMeres, "Finite element analysis of system-level electronic packages for space applications," *J. Comput. Eng.*, vol. 2015, Art. no. 428073, 2015.
- [18] T.-Y. Park, J.-C. Park, and H.-U. Oh, "Evaluation of structural design methodologies for predicting mechanical reliability of solder joint of BGA and TSSOP under launch random vibration excitation," *Int. J. Fatigue*, vol. 114, pp. 206–216, 2018.
- [19] J. Parry, C. Bailey, and C. Aldham, "Multiphysics modelling for electronics design," in *Proc. 7th Intersoc. Conf. Thermal Thermomech. Phenomena Electron. Syst. (ITHERM)*, vol. 2, pp. 86–93, 2000.
- [20] Y. Wang, H. Liu, L. Huo, H. Li, W. Tian, H. Ji, and S. Chen, "Research on the reliability of advanced packaging under multi-field coupling: A review," *Micromachines*, vol. 15, no. 4, Art. no. 422, 2024.
- [21] Z. Wang, C. L. Bak, H. Wang, H. Sørensen, and F. Faria da Silva, "Multiphysics digital model of the high-frequency transformer for power electronics application considering electro-thermal interactions," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2023.
- [22] H. Köck, S. Eiser, and M. Kaltenbacher, "Electrothermal multiscale modeling and simulation concepts for power electronics," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 4, pp. 3128–3140, 2015.
- [23] W. Engelmaier, "The use environments of electronic assemblies and their impact on surface mount solder attachment reliability," *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manuf. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 903–908, 1990.
- [24] D. P. Duffek, "Effects of combined thermal and mechanical loading on the fatigue of solder joints," Ph.D. dissertation, Univ. Notre Dame, Notre Dame, IN, USA, 2004.
- [25] H.-C. Cheng, K.-N. Chiang, C.-K. Chen, and J.-C. Lin, "A study of factors affecting solder joint fatigue life of thermally enhanced ball grid array assemblies," *J. Chin. Inst. Eng.*, vol. 24, no. 4, pp. 439–451, 2001.
- [26] R. Dudek, M. Hildebrandt, K. Kreyßig, S. Rzepka, R. Döring, L. Scheiter, M. Zhang, and R. W. Ortmann, "Analysis of solder fatigue on mounted test assemblies under thermal cycling loads," in *Proc. 21st Int. Conf. Thermal, Mech. Multi-Physics Simul. Exp. Microelectron. Microsyst. (EuroSimE)*, pp. 1–8, 2020.
- [27] W. W. Lee, L. T. Nguyen, and G. S. Selvaduray, "Solder joint fatigue models: Review and applicability to chip scale packages," *Microelectron. Reliab.*, vol. 40, no. 2, pp. 231–244, 2000.
- [28] X. Li, R. Sun, and Y. Wang, "A review of typical thermal fatigue failure models for solder joints of electronic components," in *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 242, no. 1, Art. no. 012103, 2017.
- [29] C. Han and B. Han, "Board-level reliability analysis of chip resistor assemblies under thermal cycling: A comparison study between SnPb and SnAgCu," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 28, pp. 879–886, 2014.
- [30] L. F. Coffin Jr., "A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal," *Trans. ASME*, vol. 76, no. 6, pp. 931–949, 1954.
- [31] I. Sharif, D. B. Barker, A. Dasgupta, and M. G. Pecht, "Fatigue analysis of a PlanarPak™ surface mount component," in *Proc. IEEE 41st Electron. Components Technol. Conf. (ECTC)*, 1991.
- [1] T. Y. Tee, J. E. Luan, E. Pek, C. T. Lim, and Z. Zhong, "Advanced experimental and simulation techniques for analysis of dynamic responses during drop impact," in *Proc. 54th Electron. Components Technol. Conf. (ECTC)*, vol. 1, pp. 1088–1094, 2004.
- [2] A. Goel and R. J. Graves, "Electronic system reliability: Collating prediction models," *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, vol. 6, no. 2, pp. 258–265, 2006.
- [3] M. A. Gharaibeh and J. M. Pitarresi, "Random vibration fatigue life analysis of electronic packages by analytical solutions and Taguchi method," *Microelectron. Reliab.*, vol. 102, Art. no. 113475, 2019.
- [4] Z. Khaji, M. Fakoor, S. Shakhesi, "Investigating the fracture of electronic boards in space systems under random vibrations," *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol. 4 (1), p.:10-23, 2024.
- [5] E. Suhir, "Failure oriented accelerated testing (FOAT), Boltzmann–Arrhenius–Zhurkov equation (BAZ), and their application in aerospace microelectronics and photonics reliability engineering," *Int. J. Aeronaut. Sci. Aerosp. Res.*, vol. 6, no. 3, pp. 185–191, 2019.
- [6] E. Suhir, "Aerospace electronics reliability prediction: Application of two advanced probabilistic techniques," *ZAMM—J. Appl. Math. Mech.*, vol. 98, no. 5, pp. 824–839, 2018.
- [7] J. Harikumar, G. Buticchi, G. Migliazza, V. Madonna, P. Giangrande, A. Costabeber, *et al.*, "Failure modes and reliability-oriented system design for aerospace power electronic converters," *IEEE Open J. Ind. Electron. Soc.*, vol. 2, pp. 53–64, 2021.
- [8] F. Hou, X. Zhang, X. Guo, H. Xie, Y. Lu, L. Cao, and L. Wan, "Thermo-mechanical reliability study for 3D package module based on flexible substrate," in *Proc. 14th Int. Conf. Electron. Packaging Technol. (ICEPT)*, pp. 1296–1300, 2013.
- [9] H. Xiao, D. Luo, and H. Wang, "Research on damage-mechanism-based prediction methodologies for thermo-mechanical reliability of solder joints in electronic packaging," in *Proc. 17th Int. Conf. Electron. Packaging Technol. (ICEPT)*, pp. 7–13, 2016.
- [10] S. Shao, D. Liu, Y. Niu, K. O'Donnell, D. Sengupta, and S. Park, "A study on the thermomechanical reliability risks of through-silicon vias in sensor applications," *Sensors*, vol. 17, no. 2, Art. no. 322, 2017.
- [11] C. Basaran and R. Chandaroy, "Using finite element analysis for simulation of reliability tests on solder joints in microelectronic packaging," *Comput. Struct.*, vol. 74, no. 2, pp. 215–231, 2000.
- [12] M. P. Rodriguez and N. Y. A. Shammam, "Finite element simulation of thermal fatigue in multilayer structures: Thermal and mechanical approach," *Microelectron. Reliab.*, vol. 41, no. 4, pp. 517–523, 2001.
- [13] J. Lau, Ed., *Thermal Stress and Strain in Microelectronics Packaging*. New York, NY, USA: Springer, 2012.
- [14] K. Weide, "Impact of FEM simulation on reliability improvement of packaging," *Microelectron. Reliab.*, vol. 39, nos. 6–7, pp. 1079–1088, 1999.
- [15] R. Ghaffarian, "Accelerated thermal cycling and failure mechanisms for BGA and CSP assemblies," *J. Electron. Packag.*, vol. 122, no. 4, pp. 335–340, 2000.

- [38] ANSYS Sherlock Documentation. [Online]. Available: <https://ansyshelp.ansys.com/>
- [39] J. He, Y. Ling, and D. Lei, "Mechanical properties of Sn-Pb-based solder joints and fatigue life prediction of PBGA package structure," *Ceram. Int.*, vol. 49, no. 16, pp. 27445–27456, 2023.
- [40] S. Mizuta, "High reliability lead-free solder SN100C (Sn-0.7Cu-0.05Ni+Ge)," *Strain*, vol. 60, 2024.
- [41] J. Depiver, S. Mallik, and E. H. Amalu, "Comparative analysis of SAC solder alloys for enhanced reliability in electronic assemblies: A finite element approach," 2024.
- [42] R. Coyle, M. Reid, C. Ryan, R. Popowich, P. Read, D. Fleming, M. Collins, J. Punch, and I. Chatterji, "The influence of the Pb-free solder alloy composition and processing parameters on thermal fatigue performance of a ceramic chip resistor," in *Proc. 59th Electron. Components Technol. Conf. (ECTC)*, pp. 423–430, 2009.
- [43] E. Werner, "Fatigue life of leadless chip carrier solder joints during power cycling," *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manuf. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 232–237, 1983.
- [32] M. Pecht and A. Dasgupta, "Physics-of-failure: An approach to reliable product development," *J. Inst. Environ. Sci.*, vol. 38, no. 5, pp. 30–34, 1995.
- [33] W. Engelmaier, "Fatigue life of leadless chip carrier solder joints during power cycling," *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manuf. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 232–237, 1983.
- [34] S. Verma, A. Dasgupta, and D. Barker, "A numerical study of fatigue life of J-leaded solder joints using the energy partitioning approach," in *Proc. IEEE 43rd Electron. Components Technol. Conf. (ECTC)*, 1993.
- [35] H. Akay, N. H. Paydar, and A. Bilgic, "Fatigue life predictions for thermally loaded solder joints using a volume-weighted averaging technique," pp. 228–235, 1997.
- [36] A. Syed, "Accumulated creep strain and energy density based thermal fatigue life prediction models for SnAgCu solder joints," in *Proc. 54th Electron. Components Technol. Conf. (ECTC)*, vol. 1, pp. 737–746, 2004.
- [37] B. Qiu, J. Xiong, H. Wang, S. Zhou, X. Yang, Z. Lin, M. Liu, and N. Cai, "Survey on fatigue life prediction of BGA solder joints," *Electronics*, vol. 11, no. 4, Art. no. 542, 2022.