E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 10, Number 1, 2024

Investigating the electromigration resistance of composite lead-free solder alloy containing cobalt particles

M. H.Nourmohammadi, M.Movahedi*, A. H. Kokabi
Faculty of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Received 21 April 2024 ; Accepted 19 June 2024

Abstract

In today's technological landscape, the push for miniaturization in electronic devices is greater than ever, driven by technological advancements. The challenges of electromigration and thermomigration have arisen due to the need to establish new electronic connections under conditions characterized by creeping temperatures, originating from the low melting point of solders and high current density. Therefore, recently, alloying and composite materials have been employed to enhance the resistance of electronic connections to electromigration. In this study, efforts to enhance the resistance to electromigration using a composite SAC0307 lead-free solder alloy incorporating cobalt microparticles. The presence of cobalt in the intermetallic composition of the interface causes more stability of the intermetallic composition of the interface and prevents the reduction of the thickness of the intermetallic composition of the interface during the time of the electromigration test; As a result, the stability and electronic connection of the sample soldered with composite solder alloy is more than that of non-composite solder alloy. On the other hand, due to the fine grain structure and the increase in grain boundary density in the composite solder alloy, the lattice diffusion mechanism in the non-composite solder alloy has been changed to the grain boundary diffusion mechanism; As a result, due to the consumption of copper atoms flowed from the cathode side to the anode by the intermetallic compounds present in the grain boundaries, non-uniform microstructural was observed in the composite solder alloy during the time of electromigration test.

Keywords:Lead-free solders; electromigration; Soldering; Intermetallic compound; Accumulative Roll Bonding.

*Corresponding Author: M.Movahedi, m_movahedi@sharif.edu

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.20]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دهم، شماره1، بهار و تابستان 1403

بررسی مقاومت به مهاجرت الکترونی آلیاژ لحیم بدون سرب کامپوزیتی حاوی ذرات کبالت

محمدهادی نورمحمدی، مجتبی موحدی* ، امیرحسین کوکبی

دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1403/02/02 ؛ پذیرش مقاله: 1403/03/30

چکیده

امروزه با پیشرفت روز افزون تکنولوژی، تقاضا برای کوچک‌سازی وسایل الکترونیکی بیشتر از پیش مورد نیاز است. قرارگیری اتصالات الکترونیکی جدید در شرایط دمایی خزشی به دلیل نقطه ذوب پایین لحیم‌ها و همین‌طور دانسیته جریان بالا چالش‌هایی مانند مهاجرت الکترونی و حرارتی به وجود آورده است. لذا اخیراً آلیاژسازی و کامپوزیت‌سازی جهت بهبود مقاومت به مهاجرت الکترونی اتصالات الکترونیکی به کار گرفته شده است. در این پژوهش سعی بر آن شد با کامپوزیت سازی آلیاژ لحیم بدون سرب SAC0307 با استفاده از میکروذرات کبالت، مقاومت به مهاجرت الکترونی بهبود یابد. حضور کبالت در ترکیب بین فلزی فصل مشترکی باعث پایداری بیشتر ترکیب بین فلزی فصل مشترکی و جلوگیری از کاهش ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در طی زمان آزمون مهاجرت الکترونی می‌شود؛ درنتیجه پایداری و برقراری اتصال الکترونیکی نمونه لحیم‌کاری شده با آلیاژ لحیم کامپوزیتی بیشتر از آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی است. از طرفی دیگر، به دلیل ساختار ریزدانه و افزایش چگالی مرزدانه‌ها در آلیاژ لحیم کامپوزیتی، مکانیزم نفوذ شبکه ای در آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی به مکانیزم نفوذ مرزدانه تغییر یافته است؛ در نتیجه به دلیل مصرف اتم‌های مس شارش یافته از سمت کاتد به آند توسط ترکیبات بین فلزی موجود در مرزدانه‌ها، در آلیاژ لحیم کامپوزیتی طی زمان آزمون مهاجرت الکترونی غیریکنواختی ریزساختاری مشاهده شد.

کلمات کلیدی: لحیم‌های نرم بدون سرب؛ مهاجرت الکترونی؛ لحیم کاری؛ کامپوزیت‌های زمینه فلزی؛ ترکیبات بین فلزی؛ اتصال نورد انباشتی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: مجتبی موحدی، m_movahedi@sharif.edu

1- مقدمه

لحیم‌کاری نرم از پر کاربردترین فرایندهای اتصال‌دهی اجزاء الکترونیکی در صنعت الکترونیک است. در اواخر قرن 19 فرایند لحیم‌کاری تنها در ساخت اتصالات متالورژیکی و اتصالات لحیم‌کاری جهت رسانایی الکتریکی کاربرد داشت. با آمدن عصر الکترونیک پیشرفته در قرن20 لحیم و لحیم‌کاری، نقش مهمی در مهندسی الکترونیک پیشرفته ایفا کرد. از سال 1990 سالانه حدود 10^{13} اتصال لحیم در صنعت الکترونیک تولید می‌شود [1]. سال 2006 براساس قوانین منع استفاده از مواد سمی (ROHS) استفاده از برخی عناصر شیمیایی ممنوع شد؛ سرب که یک عنصر سمی است در آلیاژسازی لحیم‌های مورد استفاده در صنعت الکترونیک کاربرد زیادی داشت؛ بنابراین تلاش شد تا جایگزینی برای ترکیب لحیم‌های Pb-Sn پیدا شود. امروزه آلیاژ لحیم‌های حاوی قلع، نقره و مس که به اختصار SAC نامیده می‌شوند؛ یکی از کاندیدهای جایگزین مناسب می‌باشند. جدیدترین رویکرد در افزایش اطمینان اتصال، استفاده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.20]

از مواد و ذرات تقویت‌کننده است. بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی و همچنین کنترل تشکیل و رشد ترکیبات بین‌فلزی زمینه‌ساز گسترش تحقیقات در زمینه کامپوزیت‌سازی شده است. در سال‌های اخیر تلاش شده است با استفاده از نانوذرات و کامپوزیت‌سازی، خواص لحیم‌های بدون سرب بهبود داده شود و نتایج رضایت‌بخشی نیز گرفته‌شده است؛ اما هنوز ترکیب مشخصی از آلیاژهای کامپوزیتی به صنعت الکترونیک راه نیافته است و تحقیقات در این زمینه برای یافتن بهترین نتایج ادامه دارد. از طرفی در مسیر رشد تقاضا برای کوچک‌سازی وسایل الکترونیکی، قرارگیری در شرایط دمایی خزشی به دلیل نقطه ذوب پایین لحیم‌ها و همین‌طور دانسیته جریان بالا چالش‌هایی مانند مهاجرت الکترونی و حرارتی وجود دارد. به‌طورکلی با برقراری جریان الکتریکی در اتصالات الکترونیکی، مهاجرت الکترونی، مهاجرت حرارتی، تغییر گرادیان غلظتی در ساختار و گرادیان تنشی چهار نیروی محرکه جهت انتقال جرم و افزایش نفوذ اتم‌ها در اتصالات الکترونیکی است. پدیده مهاجرت الکترونی باعث انتقال جرم و افزایش شار اتمی از کاتد به سمت آند می‌شود و در نهایت باعث تضعیف استحکام اتصال در سمت کاتد به دلیل ایجاد حفره و کاهش ضخامت ترکیب بین‌فلزی در فصل مشترک می‌گردد [2-6]. لازم به ذکر است تخریب یک اتصال ناشی از چگالی جریان بالا تنها به دلیل پدیده مهاجرت الکترونی نیست و هرکدام از موارد گفته‌شده تأثیرگذار هستند. مقاومت در برابر مهاجرت الکترونی یکی از چالش‌های حال حاضر جهت دستیابی میکرو اتصالات به چگالی جریان‌های بالا در اتصالات لحیم‌کاری است. به‌طورکلی با توقف شار جای خالی، مهاجرت الکترونی نیز متوقف می‌شود. نابجایی‌ها و مرزدانه‌ها منابع جای خالی هستند؛ اگرچه سطح آزاد مهم‌ترین منبع جای خالی است. در آلومینیوم، تشکیل اکسید آلومینیوم روی سطح، مانع دسترسی آلومینیوم به‌جاهای خالی در سطح آزاد می‌شود. همچنین ناحیه بین آلومینیوم و اکسید آلومینیوم منبع خوبی برای جاهای خالی نیست. این قضیه برای قلع نیز صادق است [4]. در تحقیقات انجام‌شده آلیاژسازی و کامپوزیت سازی از روش‌های مؤثر در بهبود مقاومت در برابر مهاجرت الکترونی معرفی‌شده است. به‌عنوان‌مثال با بررسی‌های انجام‌شده بر بهبود مقاومت به مهاجرت الکترونی آلومینیوم، گزارش‌شده است که با افزودن 1درصد مس به آلومینیوم مقاومت به مهاجرت الکترونی افزایش پیدا کرده است [7]. جهت بهبود مقاومت در برابر مهاجرت الکترونی باید مسیرهای نفوذی محدود شوند. همچنین، کاهش ضریب نفوذ مسیرهای نفوذی، روی مقاومت در برابر مهاجرت الکترونی اثرگذار است. در پژوهشی [8] با اضافه کردن نیکل به ترکیب لحیم SnAgCu مقاومت در برابر مهاجرت الکترونی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. اتم‌های نیکل می‌توانند جایگزین اتم‌های مس در ترکیب بین‌فلزی Cu_6Sn_5 شوند و ترکیب بین‌فلزی $(Co,Cu)_6\ Sn_5$ را تشکیل دهند. این ترکیب بین فلزی، پایدارتر از ترکیب بین‌فلزی Cu_6Sn_5 است؛ لذا ترکیب بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک زیرلایه مسی و لحیم، تا حد زیادی از نفوذ اتم‌های مس از زیرلایه مسی به داخل لحیم جلوگیری می‌کند. در پژوهش قبلی [9] با کامپوزیت سازی آلیاژ لحیم SAC0307 با استفاده میکرو ذرات کبالت بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی حاصل شد. در پژوهش حاضر، رفتار لحیم کامپوزیتی با 0/2 درصد وزنی کبالت و لحیم غیرکامپوزیتی در اتصالات الکترونیکی تحت چگالی جریان بالا مورد بررسی قرار گرفت.

2- مواد و روش پژوهش

در این پژوهش ترکیب آلیاژ لحیم کامپوزیتی بدون سرب بصورت SAC0307+X%wt.Co(X= 0, 0.2) انتخاب شد. برای ساخت آلیاژ کامپوزیتی از روش اتصال نورد انباشتی (ARB) استفاده شد. ابتدا 5 لایه فویل آلیاژ تجاری Sn0.3Ag0.7Cu (ساخت شرکت STANNOL) آماده‌سازی و سپس بین هر لایه درصد وزنی مشخصی از محلول استون حاوی ذرات کبالت اسپری و روی‌هم گذاشته شد. در شکل(1) تصویر SEM از پودر میکرو ذرات کبالت استفاده شده با میانگین اندازه ذرات 3µm نشان داده شده است. در ادامه با یک پاس نورد و 80 درصد کاهش سطح مقطع، فویل نورد شده پس

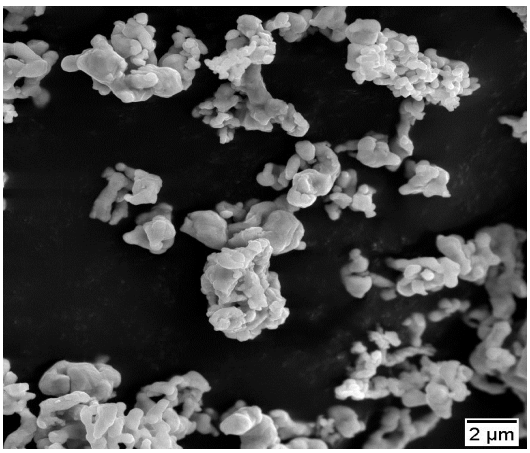
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.20]

از انجام عملیات حرارتی در دمای 100°C به مدت زمان 1 ساعت به دو قسمت مساوی تقسیم شد؛ سپس پس از سمباده‌زنی و ایجاد زبری سطح (Ra) 2/2µm، روی‌هم گذاشته و دوباره با 60 درصد کاهش سطح مقطع، نورد شد. این عمل یک‌بار دیگر تکرار و در نهایت فویل کامپوزیتی باضخامت 200µm- 220 پس از انجام عملیات حرارتی در دمای 100°C به مدت زمان 1 ساعت آماده لحیم‌کاری شد. به‌منظور فرایند لحیم‌کاری، از برد الکترونیکی با ضخامت مس 40µm و روان‌ساز رزینی نیمه فعال (RMA) استفاده شد. نمونه‌های آزمون مهاجرت الکترونی با فرایند ذوب و لحیم‌کاری شارش مجدد به‌وسیله صفحه داغ و تفنگ هوای گرم مطابق شکل (2) در دمای 285 °C آماده گردید. به‌منظور بررسی ریزساختار لحیم‌نرم، نحوه توزیع فازها و ترکیبات بین‌فلزی و اندازه‌گیری ضخامت ترکیبات بین‌فلزی فصل‌مشترکی، مقطع عرضی نمونه‌ها مطابق شکل (3) پس از سمباده‌زنی و پولیش، تحت بررسی‌های میکروسکپی قرار گرفت.

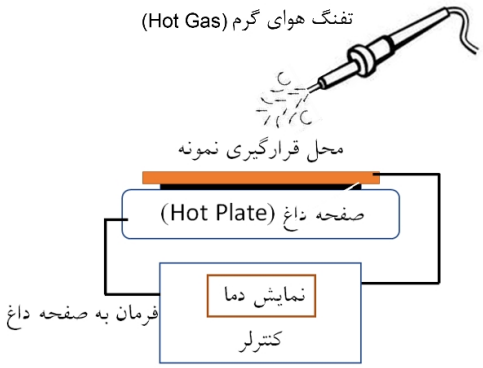
به‌منظور آشکارسازی و بررسی ریزساختاری از محلول حکاکی ($2\%HCl+5\%HNO_3+93\%CH_3OH$) استفاده شد. سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشرمیدانی (FE-SEM) مجهز به آنالیزور طیف‌سنج تفرقی اشعه‌ایکس (EDS)، تغییرات ریزساختاری و ضخامت ترکیبات بین فلزی فصل مشترکی بعد از فواصل زمانی آزمون مهاجرت الکترونی مطابق جدول (1) بررسی شد. در این پژوهش از یک منبع تغذیه جریان ثابت مدل SPS-900NP باقابلیت کنترل آمپر و ولتاژ استفاده شد. آزمایش تحت جریان DC و اندازه جریان 10 آمپر انجام شد.

به‌طورکلی بررسی مهاجرت الکترونی آلیاژهای لحیم در چگالی جریان‌های بالاتر از $10^3 Amp/cm^2$ معنا پیدا می‌کند. در این پژوهش از چگالی جریان $10^4 Amp/cm^2$ جهت بررسی مهاجرت الکترونی لحیم غیرکامپوزیتی و لحیم کامپوزیتی استفاده شد. از رابطه (1)، جریان لازم برای رسیدن به چگالی جریان $10^4 Amp/cm^2$ بدست آمد. در این رابطه ρ چگالی جریان، A سطح مقطع عبور جریان و I جریان است.

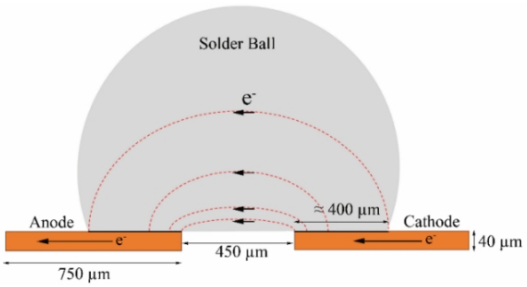
رابطه 1 $$\rho = \frac{I}{A} \rightarrow I = 10^4 \times (250 \times 400) \times 10^{-8} \rightarrow I = 10\ Amp$$



شکل1- تصویر SEM از پودر میکرو ذرات کبالت.



شکل2-شماتیک فرایند ذوب و لحیم‌کاری شارش‌مجدد.



شکل3- تصویر شماتیک آزمون مهاجرت الکترون.

جدول1- زمان بندی آزمون مهاجرت الکترونی.

مدت‌زمان آزمون (ساعت)	آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی	آلیاژ لحیم کامپوزیتی
قبل از آزمون (0 ساعت)	✓	✓
250 ساعت	✓	✓
468 ساعت	✓	✓
876 ساعت	✓	✓
1135 ساعت	✓	✓

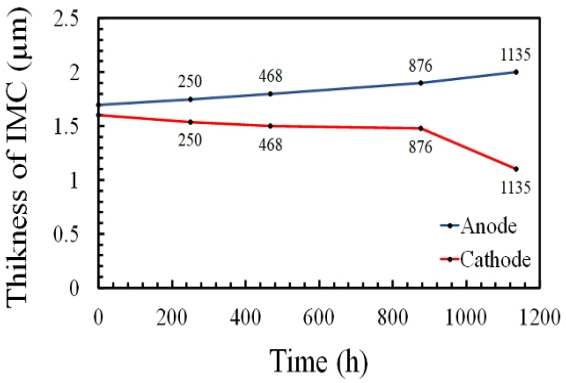
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.20]

3- نتایج و بحث

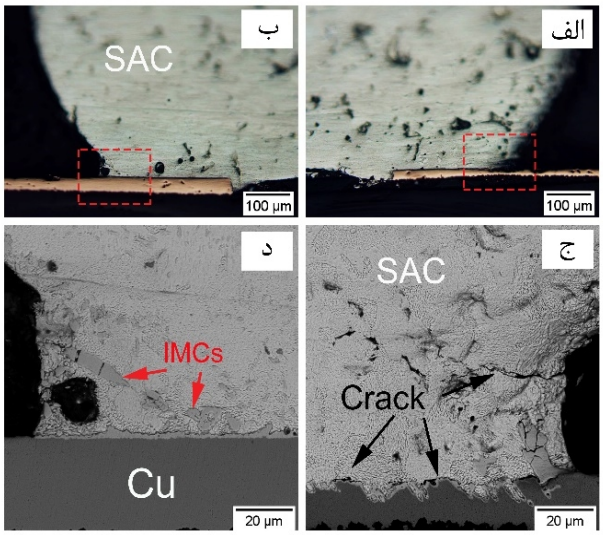
3-1- بررسی رفتار مهاجرت الکترونی آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی

در شکل (4) نمودار تغییرات ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی در طول آزمون مهاجرت الکترونی آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش زمان آزمون مهاجرت الکترونی، ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی در سمت آند و کاتد به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. در سمت کاتد با توجه به شار اتمی ناشی از افزایش گرادیان غلظتی در دو سمت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی، کاهش ضخامت مشاهده می‌شود و در سمت آند به دلیل شار اتمی مس از سمت کاتد به آند، غلظت مس در سمت آند افزایش یافته و باعث افزایش ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی گردیده است. نکته حائز اهمیت در نمودار تغییرات ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی با زمان آزمون مهاجرت الکترونی، افزایش شیب کاهش ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی در سمت کاتد بعد از گذشت 876 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی است.



شکل4- نمودار تغییرات ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی در طی زمان آزمون مهاجرت الکترونی.

شکل (5) تصاویر ریزساختاری سمت کاتد را پس از گذشت 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی نشان می‌دهد. باتوجه به تصاویر ریزساختاری، مصرف شدن زیرلایه مسی در سمت کاتد قابل مشاهده است. همچنین، در ناحیه‌ای که زیرلایه مسی مصرف شده، ترک‌هایی ایجاد شده است. وجود ترک در لبه‌های زیرلایه مسی، سطح اتصال را کاهش می‌دهد؛ بنابراین چگالی جریان در سمت باقی‌مانده اتصال به‌شدت افزایش یافته و باعث کاهش بیشتر ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی می‌شود. بنابراین، علت افزایش شیب کاهش ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی بعد از 876 ساعت از آزمون مهاجرت الکترونی، ایجاد ترک در سطح اتصال زیر لایه مسی و لحیم است؛ که باعث افزایش شار جریان و درنتیجه افزایش شیب کاهش ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی شده است. از طرفی دلیل ایجاد ترک در فصل مشترک اتصال زیرلایه مسی و لحیم را می‌توان به اختلاف ضریب انبساط حرارتی زیرلایه مسی، ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی و آلیاژ لحیم نسبت داد [10].

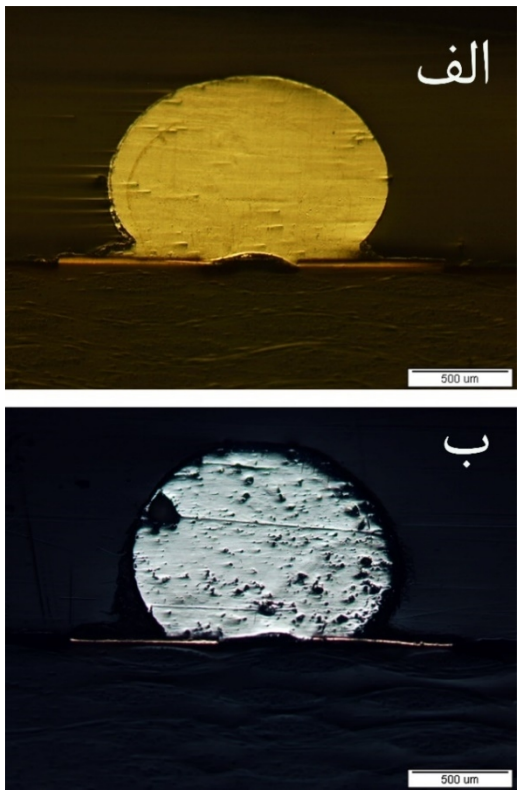


شکل5- تصاویر ریزساختاری از سمت کاتد االف و ج- و آند ب و د- آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی بعد از گذشت 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی: الف و ب- تصاویر میکروسکپ نوری، ج و د- تصاویر میکروسکپ الکترونی.

همچنین، زمانی‌که شار اتمی مس ناشی از نیروی طوفان الکترونی افزایش پیدا می‌کند، در سمت کاتد غلظت اتم مس کاهش می‌یابد. این کاهش غلظت باعث افزایش گرادیان غلظتی اطراف ترکیبات بین‌فلزی Cu_6Sn_5 و دو طرف ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی می‌شود؛ بنابراین جهت تعادل ترمودینامیکی، سیستم به سمت کاهش گرادیان غلظتی پیش خواهد رفت. در پاسخ به افزایش گرادیان غلظتی در دو سمت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی، ابتدا ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.20]

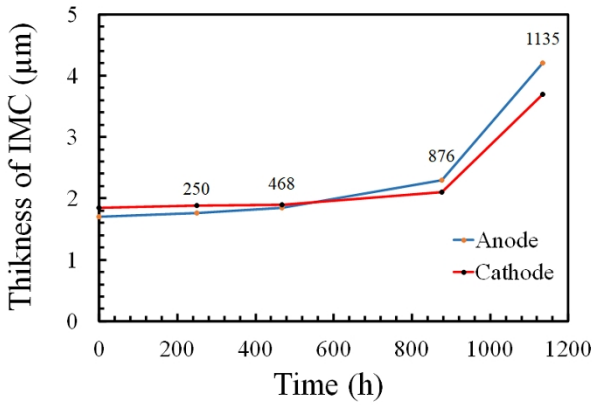
کاهش می‌یابد و پس از یک ضخامت بحرانی، انحلال زیرلایه مس داخل زمینه لحیم اتفاق خواهد افتاد. در شکل (6) تصاویر ریزساختاری از زمینه لحیم بعد از گذشت و 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی، افزایش حفره‌ها در سمت کاتد اتصال الکترونیکی را نشان می‌دهد که نشان دهنده شار جای خالی از سمت آند به کاتد در پاسخ به شار اتمی مس از سمت کاتد به آند است.



شکل6-تصاویر میکروسکپ نوری از ریزساختار آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی بعد از گذشت الف- 0 و ب- 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی.

3-2- بررسی رفتار مهاجرت الکترونی آلیاژ لحیم کامپوزیتی

در شکل (7) نمودار تغییرات ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی در طول آزمون مهاجرت الکترونی آورده شده است. ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی سمت کاتد با گذشت 876 ساعت از آزمون مهاجرت الکترونی، تقریباً ثابت بود. این اتفاق در پژوهش دیگری نیز مشاهده‌شده است[11]. همچنین، ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی در سمت آند افزایش یافته است. در ادامه با افزایش زمان آزمون مهاجرت الکترونی تا 1135 ساعت، ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی در هر دو سمت کاتد و آند با شیب زیادی افزایش یافت. در تحقیقات انجام‌شده روی تغییرات ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی در طی زمان آزمون مهاجرت الکترونی، گزارش‌شده است که تغییرات ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی با زمان، به‌صورت خطی است [12]. بنابراین تغییر رفتار خطی ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی با زمان در هردو سمت آند و کاتد را می‌توان ناشی از افزایش دمای نمونه به دلیل افزایش مقاومت الکتریکی نمونه دانست.



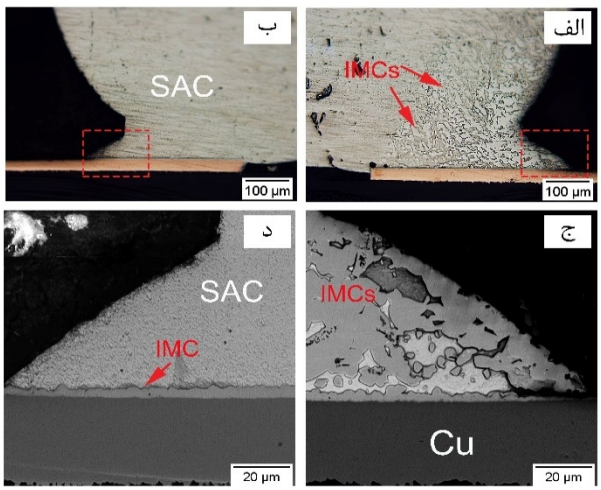
شکل7- نمودار تغییرات ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی آلیاژ لحیم کامپوزیتی در طی زمان آزمون مهاجرت الکترونی.

در شکل (8) تصاویر گرفته شده با استفاده از میکروسکپ الکترونی(SEM) و نوری از ریزساختار سمت ابتدایی کاتد و انتهایی آند آلیاژ لحیم کامپوزیتی آورده شده است. همان‌طورکه مشخص است؛ زیرلایه مسی در زمان آزمون مهاجرت الکترونی، مصرف‌شده است. بخشی از زیرلایه مسی مصرف‌شده، صرف افزایش اندازه ترکیبات بین‌فلزی $(Co,Cu)_6Sn_5$ در زمینه آلیاژ لحیم شده است؛ باتوجه به اینکه مقاومت الکتریکی ویژه ترکیبات بین فلزی بیشتر از زیرلایه مسی و آلیاژ لحیم است، افزایش مقاومت الکتریکی و به همراه آن افزایش دما اتفاق خواهد افتاد. بنابراین، افزایش دمای ایجادشده باعث افزایش نرخ رشد ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی شده است. به‌عبارتی‌دیگر با افزایش دمای کاتد، نیروی محرکه لازم جهت رشد ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی کاهش می‌یابد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-18]

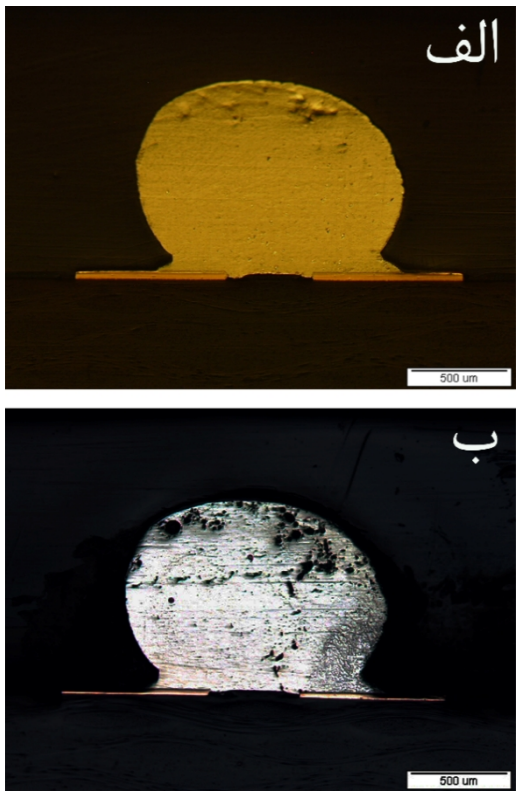
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.20]

از طرفی، ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی $(Co,Cu)_6Sn_5$ پایدارتر از ترکیب بین فلزی Cu_6Sn_5 است. در نتیجه گرادیان غلظتی لازم جهت انحلال ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی در زمینه لحیم افزایش می‌یابد. با توجه به دلایل ذکر شده، ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در طول زمان آزمون مهاجرت الکترونی افزایش می‌یابد. از طرفی در سمت کاتد ترکیبات بین‌فلزی در محل مرزدانه‌ها در زمان آزمون مهاجرت الکترونی رشد کرده و در سمت آند ترکیبات بین‌فلزی زمینه در زمان آزمون، انحلال یافته است. شار اتمی ایجاد شده از سمت کاتد به آند، ناشی از نیروی طوفان الکترونی، توسط ترکیبات بین‌فلزی موجود در مرزدانه‌ها مصرف شد. مطابق پژوهش قبلی [9]، با کامپوزیت سازی لحیم اندازه دانه‌های β-Sn کاهش می‌یابد و منجر به افزایش چگالی مرزدانه‌ها و فازهای یوتکتیکی در مرزدانه‌ها می‌شود.



شکل8-تصاویر ریزساختاری از سمت کاتد الف و ج- و آند ب ود- آلیاژ لحیم کامپوزیتی بعد از گذشت 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی: الف و ب- تصاویر میکروسکپ نوری، ج ود- تصاویر میکروسکپ الکترونی.

لذا در ادامه مسیر حرکت الکترون، با مصرف شدن تمام اتم‌های مس شارش یافته توسط مرزدانه‌ها، اتم مسی برای ترکیبات بین‌فلزی موجود در مرزدانه‌های سمت آند باقی نمی‌ماند. اگرچه نیروی طوفان الکترونی همچنان وجود دارد و اطراف ترکیبات بین‌فلزی زمینه در سمت آند، فقیر از عنصر مس خواهد شد؛ بنابراین به دلیل گرادیان غلظتی به وجود آمده در اطراف ترکیبات بین‌فلزی، این ترکیبات داخل زمینه اطراف خود انحلال پیدا می‌کنند و در نهایت صرف رشد ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در سمت آند می‌گردد. همچنین، در شکل (9) تصاویر ریزساختاری از زمینه لحیم بعد از گذشت 0 و 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی، نشان دهنده تراکم پایین حفره‌ها و افزایش اندازه ترکیبات بین فلزی زمینه در سمت کاتد اتصال الکترونیکی است. مصرف شاراتمی مس توسط ترکیبات بین فلزی زمینه، باعث جلوگیری از افزایش شار جای خالی به سمت کاتد شده است.



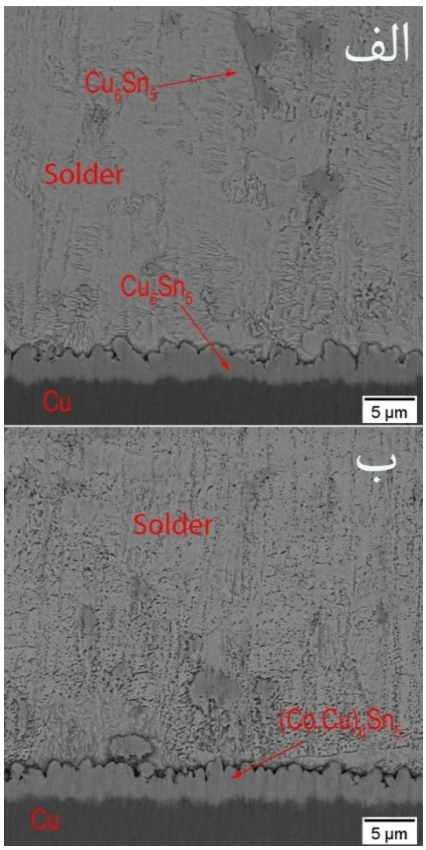
شکل9-تصاویر میکروسکپ نوری از ریزساختار آلیاژ لحیم کامپوزیتی بعد از گذشت الف- 0 و ب- 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی.

3-3- مقایسه رفتار مهاجرت الکترونی آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و کامپوزیتی

ابتدا تفاوت مورفولوژی و پایداری ترکیب بین فلزی فصل مشترکی آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و کامپوزیتی بحث خواهد شد. با توجه به پژوهش قبلی انجام شده [9]، مورفولوژی ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی از نوع حلزونی و مورفولوژی ترکیب بین فلزی آلیاژ لحیم

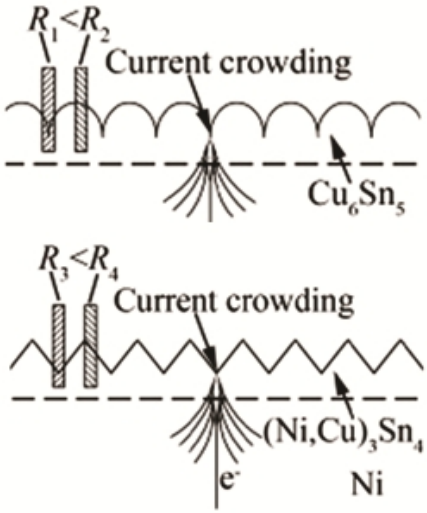
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.20]

کامپوزیتی لایه‌ای است (شکل 10). بررسی مورفولوژی و ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی در آزمون مهاجرت الکترونی حائز اهمیت است. معمولاً مقاومت الکتریکی ویژه ترکیبات بین‌فلزی بیشتر از آلیاژ لحیم است؛ بنابراین با افزایش ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی مقاومت الکتریکی اتصال افزایش پیدا می‌کند. همچنین مورفولوژی و پیوستگی ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی ازنظر یکنواختی مقاومت الکتریکی در سرتاسر ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی مهم است.



شکل10- تصاویر میکروسکپ الکترونی (FE-SEM) از ریزساختار و مورفولوژی ترکیب بین فلزی فصل مشترکی الف- آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و ب- آلیاژ لحیم کامپوزیتی[9].

به‌عبارتی‌دیگر، الکترون مسیری با کمترین مقاومت الکتریکی را انتخاب می‌کند و زمانی‌که لایه ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی در سرتاسر اتصال از پیوستگی و ضخامت یکسان برخوردار نباشد، چگالی جریان الکتریکی در طول اتصال متفاوت خواهد بود. برای مثال، در بررسی که لی و همکارانش [2] روی مقاومت اتصال Cu / SAC305 / Cu (Ni) در برابر مهاجرت الکترونی انجام دادند؛ مکانیزم اصلی در تخریب اتصال، ذوب‌شدگی موضعی و تنش‌های ناشی از اختلاف ضریب انبساط حرارتی ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی و زمینه لحیم گزارش شد. در شکل (11) دلیل ذوب‌شدگی موضعی نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشخص است؛ ترکیب بین‌فلزی Cu_6Sn_5 با مورفولوژی حلزونی شکل و ترکیب بین‌فلزی $(Ni,Cu)_6Sn_5$ با مورفولوژی سوزنی شکل در نواحی که مقاومت الکتریکی کمتری دارد؛ دچار چگالی جریان بالا می‌شوند. درنتیجه در این نواحی افزایش دما و ذوب‌شدگی موضعی رخ داده است. در پژوهش انجام شده با توجه به مورفولوژی حلزونی ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی، افزایش موضعی چگالی جریان و درنتیجه افزایش موضعی مصرف زیرلایه مسی رخ داده است. درنهایت، به دلیل تنش‌های ایجاد شده و ترک‌های به وجود آمده، سطح اتصال لحیم زمینه و زیر لایه مسی کاهش یافته است. بنابراین، به دلیل مورفولوژی لایه‌ای و پایداری بیشتر ترکیب بین فلزی فصل مشترکی $(Co,Cu)_6Sn_5$ در آلیاژ لحیم کامپوزیتی نسبت به ترکیب بین فلزی فصل مشترکی Cu_6Sn_5 در آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی، آلیاژ لحیم کامپوزیتی از نظر پایداری اتصال، رفتار بهتری را نشان داد.



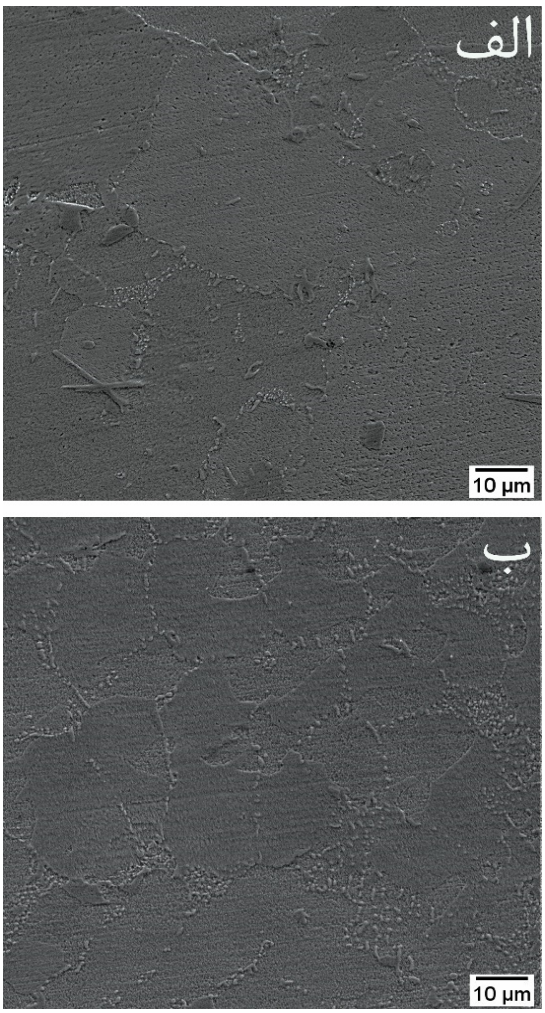
شکل11- شماتیک تأثیر مورفولوژی ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی برچگالی جریان [2].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.20]

در دمای مناسب وقوع مهاجرت الکترونی، نفوذ شبکه‌ای، مرزدانه‌ای و سطحی مکانیزم های نفوذ جهت انتقال جرم و نفوذ اتمی هستند. در دمای 100 درجه سانتی‌گراد نفوذ شبکه‌ای در آلومینیوم و مس ناچیز است؛ درصورتی‌که در آلیاژهای لحیم مکانیزم غالب نفوذ است. مکانیزم‌های غالب نفوذ در آلومینیوم و مس در دمای 100 درجه سانتی‌گراد به ترتیب نفوذ مرزدانه‌ای و سطحی است. در بررسی مقاومت آلیاژ لحیم در برابر مهاجرت الکترونی، بررسی مکانیزم غالب نفوذ و روش‌های کاهش ضریب نفوذ از متغیرهای تأثیرگذار است. عموماً اتصالات لحیم‌کاری شده از تعداد کمی دانه تشکیل‌شده‌اند؛ لذا مکانیزم غالب نفوذ، نفوذ شبکه‌ای است. بااین‌حال با توجه به ریزساختار و دمای کاری باید مکانیزم غالب نفوذ بررسی شود [4, 13, 14]. در شکل (12) تصاویر SEM از ریزساختار آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و کامپوزیتی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در آلیاژ لحیم کامپوزیتی در مقایسه با آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی با کامپوزیت‌سازی، اندازه دانه‌های β-Sn و درصد فازهای یوتکتیکی در ریزساختار به ترتیب کاهش و افزایش یافته است.

در نتیجه باعث افزایش چگالی مرزدانه‌ها و تراکم ترکیبات بین فلزی در مرزدانه‌ها گردیده است. از طرفی باتوجه به افزایش اندازه ترکیبات بین فلزی زمینه در سمت کاتد آلیاژ لحیم کامپوزیتی بعد از 1135 ساعت از گذشت زمان آزمون مهاجرت الکترونی، می‌توان ادعا کرد نفوذ مس در آلیاژ لحیم کامپوزیتی از نوع مرزدانه‌ای و در آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی با توجه به تشابه اندازه ترکیبات بین فلزی زمینه در سمت کاتد و آند، نفوذ مس در ساختار از نوع شبکه ای بوده است. تغییر مکانیزم نفوذ از شبکه ای به مرزدانه ای باعث افزایش ضریب نفوذ مس در آلیاژ لحیم و درنتیجه غیریکنواختی ریزساختار در دو سمت کاتد و آند می‌گردد. لازم به ذکر است غیریکنواختی ریزساختار در دو سمت کاتد و آند باعث تفاوت خواص فیزیکی و مکانیکی در دو سمت اتصال می‌گردد که منجر به کاهش قابلیت اطمینان اتصال در یک سمت می‌شود.



شکل12-تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ریزساختار الف- آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و ب- آلیاژ لحیم کامپوزیتی.

4-نتیجه‌گیری

با مقایسه نتایج آزمون مهاجرت الکترونی برای آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و کامپوزیتی، موارد زیر حائز اهمیت است:

- با کامپوزیتی کردن آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی، از کاهش ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی در سمت کاتد جلوگیری شد. به‌عبارتی‌دیگر، ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی سمت کاتد آلیاژ لحیم کامپوزیتی به دلیل شرکت کبالت در ترکیب شیمیایی ترکیب بین‌فلزی به‌صورت $(Co,Cu)_6Sn_5$، پایدارتر می‌شود.
- مکانیزم غالب نفوذ در آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و کامپوزیتی به ترتیب شبکه‌ای و مرزدانه‌ای بود.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.20]

- در آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی اندازه ترکیبات بین‌فلزی Cu_6Sn_5 در زمینه آلیاژ لحیم در دو سمت آند و کاتد به یک اندازه بود؛ ولی در آلیاژ لحیم کامپوزیتی این‌گونه نبود.

-کاهش اندازه دانه‌های β-Sn و افزایش درصد فازهای یوتکتیکی در نمونه آلیاژ لحیم کامپوزیتی بر قابلیت اطمینان اتصال تحت آزمون مهاجرت الکترونی اثر منفی داشت. از طرفی پایداری بیشتر ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی ناشی از حضور کبالت در ترکیب بین فلزی بر قابلیت اطمینان اتصال اثر مثبت داشت.

بنابراین آلیاژ لحیم کامپوزیتی از نظر پایداری اتصال و مقاومت به مهاجرت الکترونی رفتاربهتری نشان داد؛ هرچند غیریکنواخی ریزساختار در دو سمت کاتد و آند در آلیاژ لحیم کامپوزیتی اثر منفی روی قابلیت اطمینان اتصال دارد.

منابع

1-Obemdorff, P., Lead-free Solder Systems: Phase Relations and Microstructure. 2001, PhD thesis, Technical University of Eindhoven, 12 Eindhoven, The Netherlands.

2-Li, W., et al., Joule heating dominated fracture behavior change in micro-scale Cu/Sn-3.0 Ag-0.5 Cu/Cu (Ni) joints under electro-thermal coupled loads. Microelectronics Reliability, 2018. 82: p. 224-227.

3-Rahman, M.K., et al., A review of the study on the electromigration and power electronics. Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, 2016. 6(01): p. 19.

4-Tu, K.-N., Solder joint technology. Vol. 117. 2007: Springer.

5-Tu, K.-N., Y. Liu, and M. Li, Effect of Joule heating and current crowding on electromigration in mobile technology. Applied Physics Reviews, 2017. 4(1).

6-Wang, J., et al., The reliability of lead-free solder joint subjected to special environment: a review. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019. 30: p. 9065-9086.

7-Ghate, P. Electromigration-induced failures in VLSI interconnects. in 20th International Reliability Physics Symposium. 1982. IEEE.

8-Zhao, X., et al., The effect of adding Ni and Ge microelements on the electromigration resistance of low-Ag based SnAgCu solder. Microsystem technologies, 2012. 18: p. 2077-2084.

9-Nourmohammadi, M., et al., Investigation of microstructure and mechanical properties of lead free composite solder containing cobalt microparticles produced by accumulative roll bonding.

10-Wang, B., W. Li, and K. Pan, Abnormal shear performance of microscale ball grid array structure Cu/Sn–3.0 Ag–0.5 Cu/Cu solder joints with increasing current density. Crystals, 2022. 12(1): p. 85.

11-Chan, Y.C. and D. Yang, Failure mechanisms of solder interconnects under current stressing in advanced electronic packages. Progress in Materials Science, 2010. 55(5): p. 428-475.

12-Chao, B.H.-L., et al., Recent advances on kinetic analysis of electromigration enhanced intermetallic growth and damage formation in Pb-free solder joints. Microelectronics Reliability, 2009. 49(3): p. 253-263.

13-Aaronson, H.I., Atomic mechanisms of diffusional nucleation and growth and comparisons with their counterparts in shear transformations. 1993, Springer.

14-Zaporozhets, T., et al., Three-dimensional simulation of void migration at the interface between thin metallic film and dielectric under electromigration. Journal of applied physics, 2005. 98(10).

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.20]