



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



M. H. Nourmohammadi, M. Movahedi*^{ID}, A. H. Kokabi^{ID}

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@sharif.edu



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

محمد هادی نورمحمدی، مجتبی موحدی*، امیرحسین کوکی

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 کامپوزیت‌سازی 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؛ در نتیجه 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 کاند 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؛ لحیم‌کاری؛ کامپوزیت‌های زمینه فلزی؛ ترکیبات بین فلزی؛ اتصال نورد انباشتی.

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

1- مقدمه

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

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 قرن 20 لحیم و لحیم‌کاری، نقش مهمی در مهندسی الکترونیک پیشرفته ایفا کرد. از سال 1990 سالانه حدود 10^{13} اتصال لحیم در صنعت الکترونیک تولید

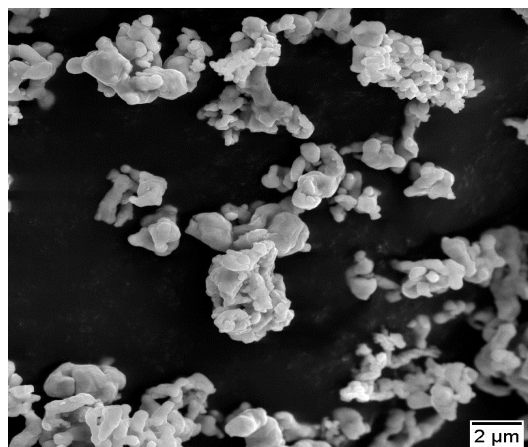
از مواد و ذرات تقویت‌کننده است. بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی و همچنین کنترل تشکیل و رشد ترکیبات بین‌فلزی زمینه‌ساز گسترش تحقیقات در زمینه کامپوزیت‌سازی شده است. در سال‌های اخیر تلاش شده است با استفاده از نانوذرات و کامپوزیت‌سازی، خواص لحیم‌های بدون سرب بهبود داده شود و نتایج رضایت‌بخشی نیز گرفته شده است؛ 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. نابعی‌ها و مرزدهانه‌ها منابع جای خالی هستند؛ اگرچه سطح آزاد مهم‌ترین منبع جای خالی است. در آلومینیوم، تشکیل اکسید آلومینیوم روی سطح، مانع دسترسی آلومینیوم به جاهای 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 کامپوزیت‌سازی از روش‌های مؤثر در

بهبود مقاومت در برابر مهاجرت الکترونی معرفی شده است. به‌عنوان مثال با بررسی‌های انجام‌شده بر بهبود مقاومت به مهاجرت الکترونی آلومینیوم، گزارش شده است که با افزودن ۱ درصد 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 $(Co,Cu)_6Sn_5$ را تشکیل دهند. این ترکیب بین‌فلزی، پایدارتر از ترکیب بین‌فلزی Cu_6Sn_5 است؛ لذا ترکیب بین‌فلزی 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 کامپوزیت‌سازی 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.

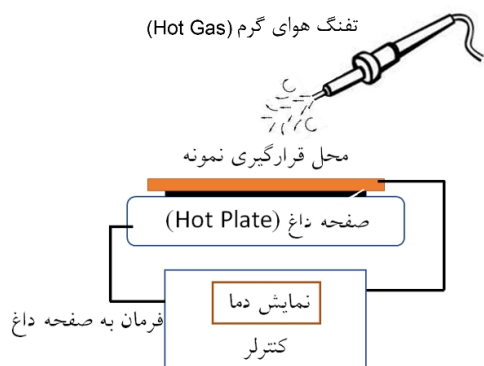
2- مواد و روش پژوهش

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 روی هم گذاشته شد. در شکل (1) تصویر SEM از پودر میکرو ذرات کبالت استفاده شده با میانگین اندازه ذرات $3\mu m$ نشان داده شده است. در ادامه با یک پاس نورد و 80 درصد کاهش سطح مقطع، فویل نورد شده پس

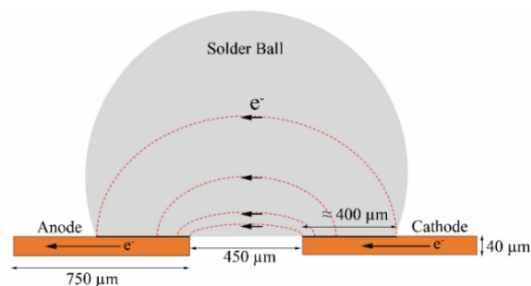
$$\rho = \frac{I}{A} \rightarrow I = 10^4 \times (250 \times 400) \times 10^{-8} \rightarrow I = 10 \text{ Amp} \quad \text{رابطه 1}$$



شکل 1- تصویر SEM از پودر میکرو ذرات کبالت.



شکل 2- شماتیک فرایند ذوب و لحیم کاری شارش مجدد.



شکل 3- تصویر شماتیک آزمون مهاجرت الکترون.

جدول 1- زمان بندی آزمون مهاجرت الکترونی.

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

از انجام عملیات حرارتی در دمای 100°C به مدت زمان 1 ساعت به دو قسمت مساوی تقسیم شد؛ سپس پس از سمباده زنی و ایجاد زبری سطح $(Ra) 2/2\mu\text{m}$ روی هم گذاشته و دوباره با 60 درصد کاهش سطح مقطع، نورد شد. این عمل یکبار دیگر تکرار و در نهایت فویل کامپوزیتی با ضخامت $200\mu\text{m} - 220\mu\text{m}$ پس از انجام عملیات حرارتی در دمای 100°C به مدت زمان 1 ساعت آماده لحیم کاری شد. به منظور فرایند لحیم کاری، از برد الکترونیکی با ضخامت مس $40\mu\text{m}$ و روان ساز رزینی نیمه فعال (RMA) استفاده شد. نمونه های آزمون مهاجرت الکترونی با فرایند ذوب و لحیم کاری شارش مجدد به وسیله صفحه داغ و تفنگ هوای گرم مطابق شکل (2) در دمای 285°C آماده گردید. به منظور بررسی ریزساختار لحیم نرم، نحوه توزیع فازها و ترکیبات بین فلزی و اندازه گیری ضخامت ترکیبات بین فلزی فصل مشترکی، مقطع عرضی نمونه ها مطابق شکل (3) پس از سمباده زنی و پولیش، تحت بررسی های میکروسکوپی قرار گرفت.

به منظور آشکارسازی و بررسی ریزساختاری از محلول حکاکی $(2\% \text{HCl} + 5\% \text{HNO}_3 + 93\% \text{CH}_3\text{OH})$ استفاده شد. سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) مجهز به آنالیزور طیف سنج تفرقی اشعه ایکس (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 با قابلیت کنترل آمپر و ولتاژ استفاده شد. آزمایش تحت جریان DC و اندازه جریان 10 آمپر انجام شد.

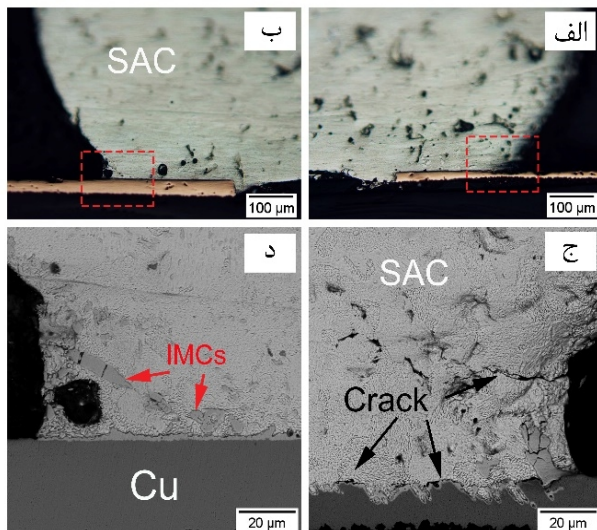
به طور کلی بررسی مهاجرت الکترونی آلیاژهای لحیم در چگالی جریان های بالاتر از 10^3 Amp/cm^2 معنا پیدا می کند. در این پژوهش از چگالی جریان 10^4 Amp/cm^2 جهت بررسی مهاجرت الکترونی لحیم غیر کامپوزیتی و لحیم کامپوزیتی استفاده شد. از رابطه (1)، جریان لازم برای رسیدن به چگالی جریان 10^4 Amp/cm^2 بدست آمد. در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

3- نتایج و بحث

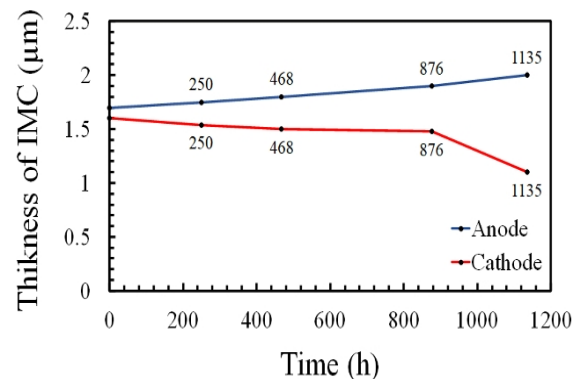
3-1- بررسی رفتار مهاجرت الکترونی آلیاژ لحیم

غیر کامپوزیتی

در شکل (4) نمودار تغییرات ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در طول آزمون مهاجرت الکترونی آورده شده است. همان طور که مشخص است، با افزایش زمان آزمون مهاجرت الکترونی، ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی 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 بین فلزی فصل مشترکی، کاهش ضخامت مشاهده می شود 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 بین فلزی فصل مشترکی با زمان آزمون مهاجرت الکترونی، افزایش شیب کاهش ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در سمت کاتد بعد از گذشت 876 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی است.



شکل 5- تصاویر ریزساختاری از سمت کاتد الف و ج- و آند ب و د- آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی بعد از گذشت 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی: الف و ب- تصاویر میکروسکپ نوری، ج و د- تصاویر میکروسکپ الکترونی.

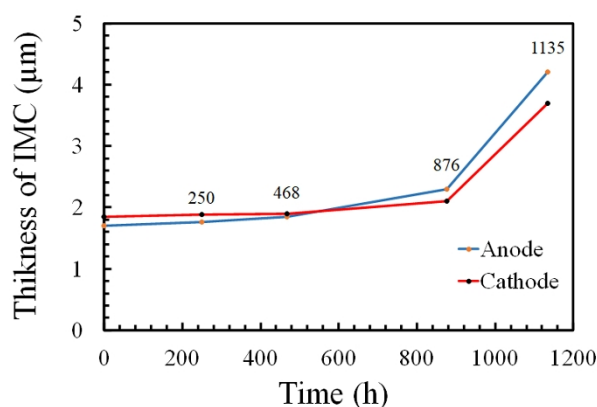


شکل 4- نمودار تغییرات ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی در طی زمان آزمون مهاجرت الکترونی.

همچنین، زمانی که شار اتمی مس ناشی از نیروی طوفان الکترونی افزایش پیدا می کند، در سمت کاتد غلظت اتم مس کاهش می یابد. این کاهش غلظت باعث افزایش گرادیان غلظتی اطراف ترکیبات بین فلزی Cu_6Sn_5 و دو طرف ترکیب بین فلزی فصل مشترکی می شود؛ بنابراین جهت تعادل ترمودینامیکی، سیستم به سمت کاهش گرادیان غلظتی پیش خواهد رفت. در پاسخ به افزایش گرادیان غلظتی در دو سمت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی، ابتدا ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی

شکل (5) تصاویر ریزساختاری سمت کاتد را پس از گذشت 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی نشان می دهد. باتوجه به تصاویر ریزساختاری، مصرف شدن زیرلایه مسی در سمت کاتد قابل مشاهده است. همچنین، در ناحیه ای که زیرلایه مسی مصرف شده، ترک هایی ایجاد شده است. وجود ترک در لبه های زیرلایه مسی، سطح اتصال را کاهش می دهد؛ بنابراین

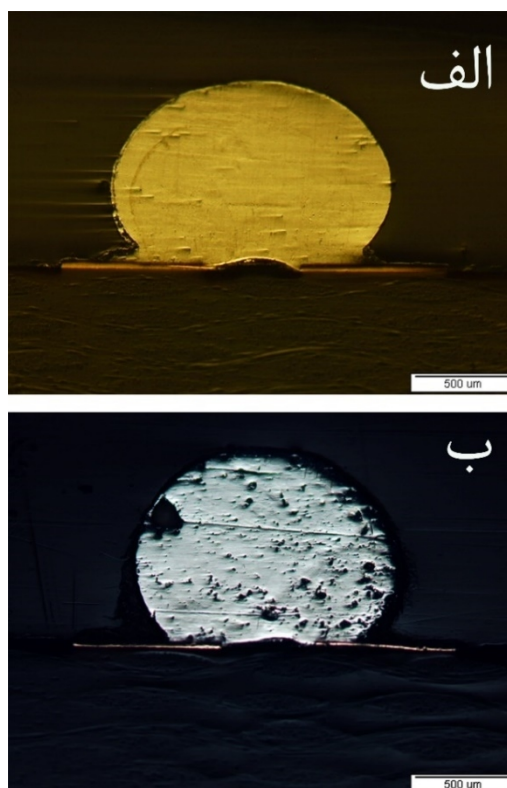
1135 ساعت، ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در هر دو سمت کاتد و آند با شیب زیادی افزایش یافت. در تحقیقات انجام شده روی تغییرات ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در طی زمان آزمون مهاجرت الکترونی، گزارش شده است که تغییرات ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی با زمان، به صورت خطی است [12]. بنابراین تغییر رفتار خطی ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی با زمان در هر دو سمت آند و کاتد را می توان ناشی از افزایش دمای نمونه به دلیل افزایش مقاومت الکتریکی نمونه دانست.



شکل 7- 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. همان طور که مشخص است؛ زیرلایه مسی در زمان آزمون مهاجرت الکترونی، مصرف شده است. بخشی از زیرلایه مسی مصرف شده، صرف افزایش اندازه ترکیبات بین فلزی $(Co,Cu)_6Sn_5$ در زمینه آلیاژ لحیم شده است؛ با توجه 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 ایجاد شده باعث افزایش نرخ رشد ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی شده است. به عبارتی دیگر با افزایش دمای کاتد، نیروی محرکه لازم جهت رشد ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی کاهش می یابد.

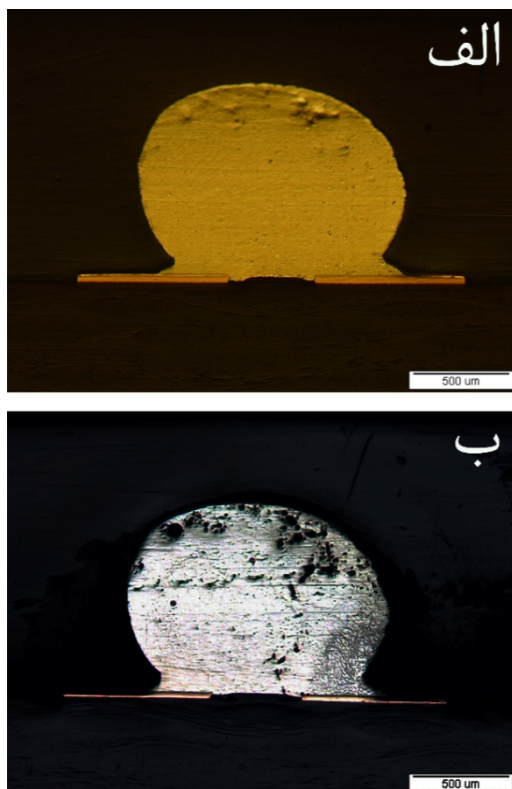
کاهش می یابد و پس از یک ضخامت بحرانی، انحلال زیرلایه مس داخل زمینه لحیم اتفاق خواهد افتاد. در شکل (6) تصاویر ریزساختاری از زمینه لحیم بعد از گذشت و 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی، افزایش حفره ها در سمت کاتد اتصال الکترونیکی را نشان می دهد که نشان دهنده شار جای خالی از سمت آند به کاتد در پاسخ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



شکل 6- تصاویر میکروسکپ نوری از ریزساختار آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی بعد از گذشت الف - 0 و ب - 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی.

2-3- بررسی رفتار مهاجرت الکترونی آلیاژ لحیم کامپوزیتی در شکل (7) نمودار تغییرات ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در طول آزمون مهاجرت الکترونی آورده شده است. ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی سمت کاتد با گذشت 876 ساعت از آزمون مهاجرت الکترونی، تقریباً ثابت بود. این اتفاق در پژوهش دیگری نیز مشاهده شده است [11]. همچنین، ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در سمت آند افزایش یافته است. در ادامه با افزایش زمان آزمون مهاجرت الکترونی تا

ترکیبات بین‌فلزی، این ترکیبات داخل زمینه اطراف خود انحلال پیدا می‌کنند و در نهایت صرف رشد ضخامت ترکیب بین‌فلزی 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 بین‌فلزی زمینه در سمت کاتد اتصال الکترونیکی است. مصرف شاراتی می‌س توسط ترکیبات بین‌فلزی زمینه، باعث جلوگیری از افزایش شار جای خالی به سمت کاتد شده است.



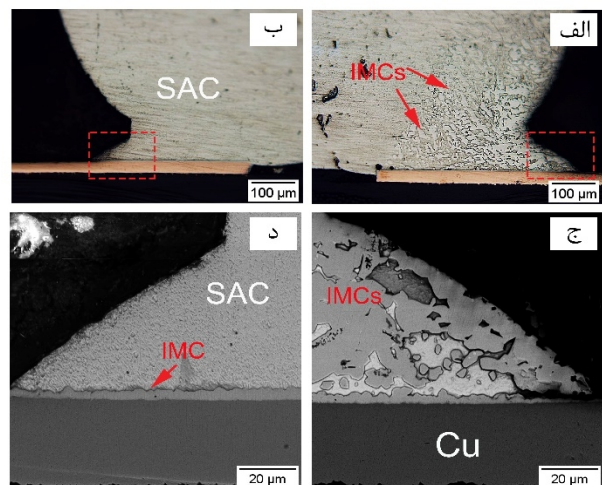
شکل 9- تصاویر میکروسکپ نوری از ریزساختار آلیاژ لحیم کامپوزیتی بعد از گذشت الف- 0 و ب- 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی.

3-3- مقایسه رفتار مهاجرت الکترونی آلیاژ لحیم

غیر کامپوزیتی و کامپوزیتی

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

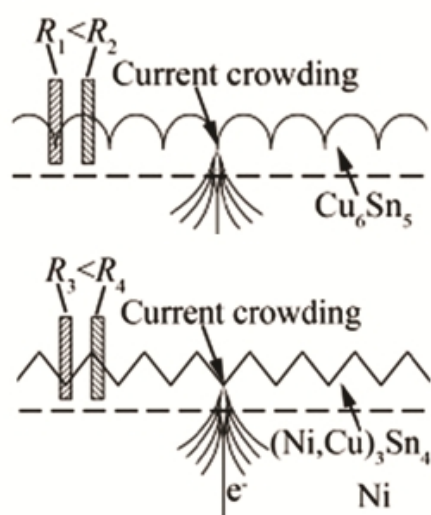
از طرفی، ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی $(Co,Cu)_6Sn_5$ پایدارتر از ترکیب بین‌فلزی Cu_6Sn_5 است. در نتیجه گرادیان غلظتی لازم جهت انحلال ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی در زمینه لحیم افزایش می‌یابد. با توجه به دلایل ذکر شده، ضخامت ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی در طول زمان آزمون مهاجرت الکترونی افزایش می‌یابد. از طرفی در سمت کاتد ترکیبات بین‌فلزی در محل مرزدهانه‌ها 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 مرزدهانه‌ها مصرف شد. مطابق پژوهش قبلی [9]، با کامپوزیت سازی لحیم اندازه دانه‌های $\beta-Sn$ کاهش می‌یابد و منجر به افزایش چگالی مرزدهانه‌ها و فازهای یوتکتیکی در مرزدهانه‌ها می‌شود.



شکل 8- تصاویر ریزساختاری از سمت کاتد الف و ج- و آن‌د ب و د- آلیاژ لحیم کامپوزیتی بعد از گذشت 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی: الف و ب- تصاویر میکروسکپ نوری، ج و د- تصاویر میکروسکپ الکترونی.

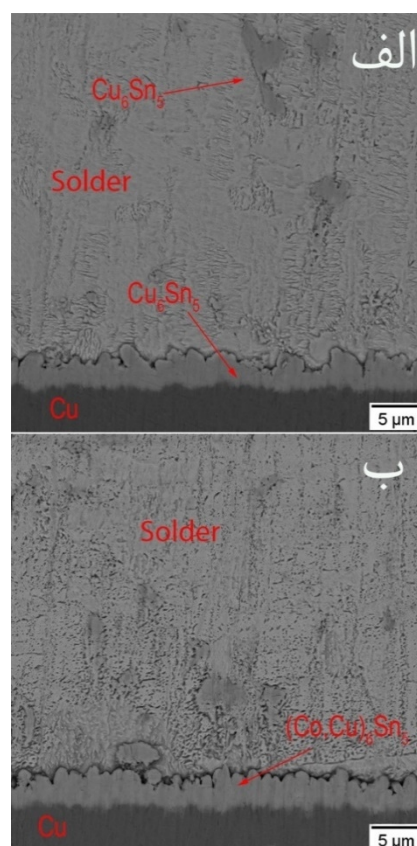
لذا در ادامه مسیر حرکت الکترون، با مصرف شدن تمام اتم‌های مس شارش یافته توسط مرزدهانه‌ها، اتم مسی برای ترکیبات بین‌فلزی موجود در مرزدهانه‌های سمت آن‌د باقی نمی‌ماند. اگرچه نیروی طوفان الکترونی همچنان وجود دارد و اطراف ترکیبات بین‌فلزی زمینه در سمت آن‌د، فقیر از عنصر مس خواهد شد؛ بنابراین به دلیل گرادیان غلظتی به وجود آمده در اطراف

مقاومت اتصال $\text{Cu} / \text{SAC305} / \text{Cu} (\text{Ni})$ در برابر مهاجرت الکترونی انجام دادند؛ مکانیزم اصلی در تخریب اتصال، ذوب شدگی موضعی و تنش‌های ناشی از اختلاف ضریب انبساط حرارتی ترکیب بین فلزی فصل مشترکی و زمینه لحیم گزارش شد. در شکل (11) دلیل ذوب شدگی موضعی نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است؛ ترکیب بین فلزی Cu_6Sn_5 با مورفولوژی حلزونی شکل و ترکیب بین فلزی $(\text{Ni}, \text{Cu})_6\text{Sn}_5$ با مورفولوژی سوزنی شکل در نواحی که مقاومت الکتریکی کمتری دارد؛ دچار چگالی جریان بالا می‌شوند. در نتیجه در این نواحی افزایش دما و ذوب شدگی موضعی رخ داده است. در پژوهش انجام شده با توجه به مورفولوژی حلزونی ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی، افزایش موضعی چگالی جریان و در نتیجه افزایش موضعی مصرف زیر لایه مسی رخ داده است. در نهایت، 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 $(\text{Co}, \text{Cu})_6\text{Sn}_5$ در آلیاژ لحیم کامپوزیتی نسبت به ترکیب بین فلزی فصل مشترکی Cu_6Sn_5 در آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی، آلیاژ لحیم کامپوزیتی از نظر پایداری اتصال، رفتار بهتری را نشان داد.



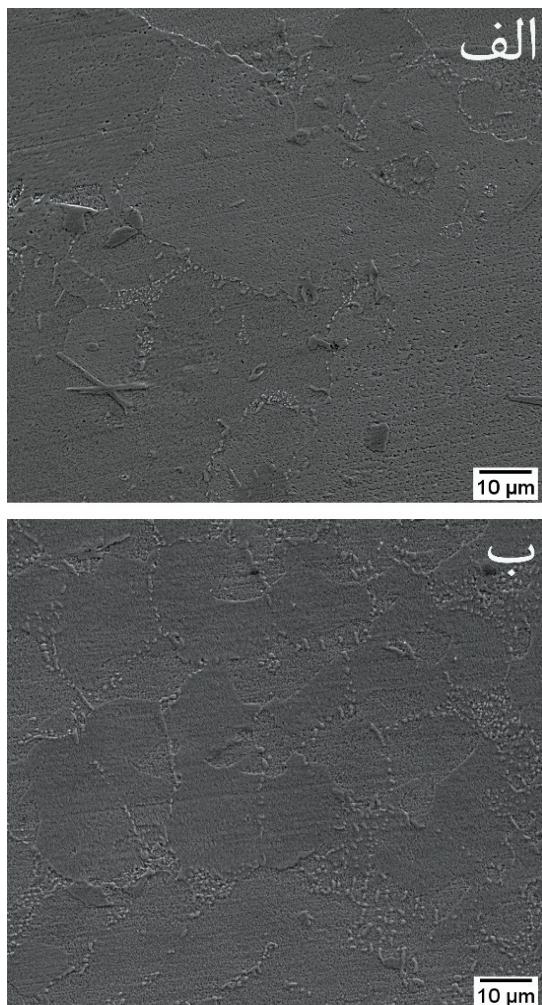
شکل 11- شماتیک تأثیر مورفولوژی ترکیب بین فلزی فصل مشترکی بر چگالی جریان [2].

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



شکل 10- تصاویر میکروسکپ الکترونی (FE-SEM) از ریزساختار و مورفولوژی ترکیب بین فلزی فصل مشترکی الف- آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی و ب- آلیاژ لحیم کامپوزیتی [9].

به عبارتی دیگر، الکترون مسیری با کمترین مقاومت الکتریکی را انتخاب می‌کند و زمانی که لایه ترکیب بین فلزی فصل مشترکی 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



شکل 12- 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. به عبارتی دیگر، ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی سمت کاتد آلیاژ لحیم کامپوزیتی به دلیل شرکت کبالت در ترکیب شیمیایی ترکیب بین‌فلزی به صورت $(\text{Co,Cu})_6\text{Sn}_5$ ، پایدارتر می‌شود.

- مکانیزم غالب نفوذ در آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و کامپوزیتی به ترتیب شبکه‌ای و مرزدانه‌ای بود.

در دمای مناسب وقوع مهاجرت الکترونی، نفوذ شبکه‌ای، مرزدانه‌ای و سطحی مکانیزم‌های نفوذ جهت انتقال جرم و نفوذ اتمی هستند. در دمای 100 درجه سانتی‌گراد نفوذ شبکه‌ای در آلومینیوم و مس ناچیز است؛ در صورتی که 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 تشکیل شده‌اند؛ لذا مکانیزم غالب نفوذ، نفوذ شبکه‌ای است. با این حال 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 $\beta\text{-Sn}$ و درصد فازهای یوتکتیکی در ریزساختار به ترتیب کاهش و افزایش یافته است.

در نتیجه باعث افزایش چگالی مرزدانه‌ها و تراکم ترکیبات بین‌فلزی در مرزدانه‌ها گردیده است. از طرفی با توجه به افزایش اندازه ترکیبات بین‌فلزی 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 بین‌فلزی زمینه در سمت کاتد و آند، نفوذ مس در ساختار از نوع شبکه‌ای بوده است. تغییر مکانیزم نفوذ از شبکه‌ای به مرزدانه‌ای باعث افزایش ضریب نفوذ مس در آلیاژ لحیم و در نتیجه 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.

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).

- در آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی اندازه ترکیبات بین فلزی Cu_6Sn_5 در زمینه آلیاژ لحیم در دو سمت آند و کاتد به یک اندازه بود؛ ولی در آلیاژ لحیم کامپوزیتی این گونه نبود.

- کاهش اندازه دانه‌های $\beta\text{-Sn}$ 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 بین فلزی 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 رفتار بهتری نشان داد؛ هر چند غیر یکنواخی 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.