



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, m_movahedi@sharif.edu



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

محمد هادی نور محمدی، مجتبی موحدی*، امیرحسین کوکبی^{ID}

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 کوچک سازی وسایل الکترونیکی بیشتر از پیش مورد نیاز است. قرارگیری اتصالات الکترونیکی جدید در شرایط دمایی خزشی به دلیل نقطه ذوب پایین لحیم ها و همین طور دانسیته جریان بالا چالش هایی مانند مهاجرت الکترونی و حرارتی به وجود آورده است. لذا اخیراً آلیاژ سازی و کامپوزیت سازی 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 می شود؛ در نتیجه پایداری و برقراری اتصال الکترونیکی نمونه لحیم کاری شده با آلیاژ لحیم کامپوزیتی بیشتر از آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی است. از طرفی دیگر، به دلیل ساختار ریزدانه و افزایش چگالی مرز دانه ها در آلیاژ لحیم کامپوزیتی، مکانیزم نفوذ شبکه ای در آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی به مکانیزم نفوذ مرز دانه تغییر یافته است؛ در نتیجه به دلیل مصرف اتم های مس شارش یافته از سمت کاند به آند توسط ترکیبات بین فلزی موجود در مرز دانه ها، در آلیاژ لحیم کامپوزیتی طی زمان آزمون مهاجرت الکترونی غیر یکنواختی ریز ساختاری مشاهده شد.

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

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

1- مقدمه

لحیم کاری نرم از پر کاربردترین فرایندهای اتصال دهی اجزاء الکترونیکی در صنعت الکترونیک است. در اواخر قرن 19 فرایند لحیم کاری تنها در ساخت اتصالات متالورژیکی و اتصالات لحیم کاری جهت رسانایی الکتریکی کاربرد داشت. با آمدن عصر الکترونیک پیشرفته در قرن 20 لحیم و لحیم کاری، نقش مهمی در مهندسی الکترونیک پیشرفته ایفا کرد. از سال 1990 سالانه حدود 10^{13} اتصال لحیم در صنعت الکترونیک تولید

می شود [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 آلیاژ سازی لحیم های مورد استفاده در صنعت الکترونیک کاربرد زیادی داشت؛ بنابراین تلاش شد تا جایگزینی برای ترکیب لحیم های Pb-Sn پیدا شود. امروزه آلیاژ لحیم های حاوی قلع، نقره و مس که به اختصار SAC نامیده می شوند؛ یکی از کاندیدهای جایگزین مناسب می باشند. جدیدترین رویکرد در افزایش اطمینان اتصال، استفاده

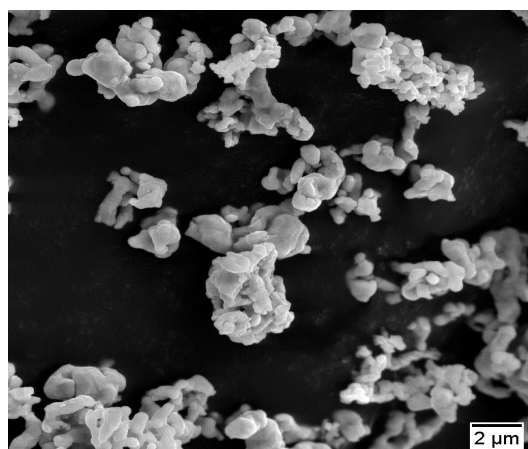
از مواد و ذرات تقویت کننده است. بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی و همچنین کنترل تشکیل و رشد ترکیبات بین فلزی زمینه ساز گسترش تحقیقات در زمینه کامپوزیت سازی شده است. در سال های اخیر تلاش شده است با استفاده از نانو ذرات و کامپوزیت سازی، خواص لحیم های بدون سرب بهبود داده شود و نتایج رضایت بخشی نیز گرفته شده 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 کوچک سازی وسایل الکترونیکی، قرارگیری در شرایط دمایی خزشی به دلیل نقطه ذوب پایین لحیم ها و همین طور دانسیته جریان بالا چالش هایی مانند مهاجرت الکترونی و حرارتی وجود دارد. به طور کلی 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 اتم ها در اتصالات الکترونیکی است. پدیده مهاجرت الکترونی باعث انتقال جرم و افزایش شار اتمی از کاتد به سمت آند می شود و در نهایت باعث تضعیف استحکام اتصال در سمت کاتد به دلیل ایجاد حفره و کاهش ضخامت ترکیب بین فلزی در فصل مشترک می گردد [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 گفته شده تأثیرگذار هستند. مقاومت در برابر مهاجرت الکترونی یکی از چالش های حال حاضر جهت دستیابی میکرو اتصالات به چگالی جریان های بالا در اتصالات لحیم کاری است. به طور کلی با توقف شار جای خالی، مهاجرت الکترونی نیز متوقف می شود. نابیایی ها و مرز دانه ها منابع جای خالی هستند؛ اگرچه سطح آزاد مهم ترین منبع جای خالی است. در آلومینیوم، تشکیل اکسید آلومینیوم روی سطح، مانع دسترسی آلومینیوم به جاهای خالی در سطح آزاد می شود. همچنین ناحیه بین آلومینیوم و اکسید آلومینیوم منبع خوبی برای جاهای خالی نیست. این قضیه برای قلع نیز صادق است [4]. در تحقیقات انجام شده آلیاژ سازی و کامپوزیت سازی از روش های مؤثر در

بهبود مقاومت در برابر مهاجرت الکترونی معرفی شده است. به عنوان مثال با بررسی های انجام شده بر بهبود مقاومت به مهاجرت الکترونی آلومینیوم، گزارش شده است که با افزودن 1 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 به طور قابل توجهی افزایش یافت. اتم های نیکل می توانند جایگزین اتم های مس در ترکیب بین فلزی Cu_6Sn_5 شوند و ترکیب بین فلزی $(Co,Cu)_6Sn_5$ را تشکیل دهند. این ترکیب بین فلزی، پایدارتر از ترکیب بین فلزی Cu_6Sn_5 است؛ لذا ترکیب بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک زیر لایه مسی و لحیم، تا حد زیادی از نفوذ اتم های مس از زیر لایه مسی به داخل لحیم جلوگیری می کند. 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 غیر کامپوزیتی در اتصالات الکترونیکی تحت چگالی جریان بالا مورد بررسی قرار گرفت.

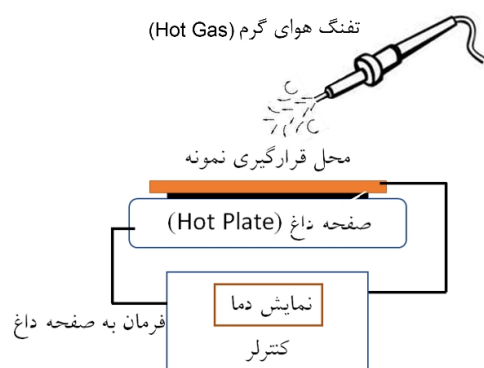
2- مواد و روش پژوهش

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) آماده سازی 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

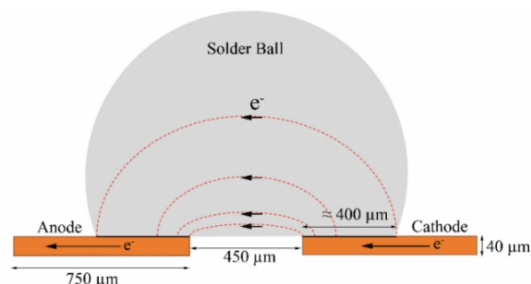
$$\rho = \frac{I}{A} \rightarrow I = 10^4 \times (250 \times 400) \times 10^{-8} \rightarrow I = 10 \text{ Amp} \quad \text{رابطه 1}$$



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.

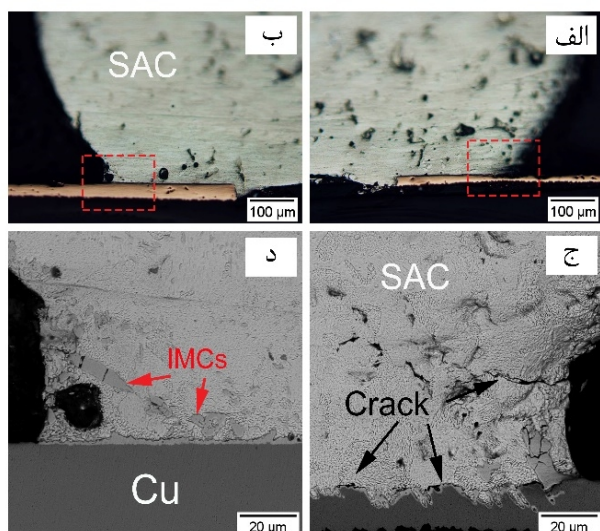
به طور کلی بررسی مهاجرت الکترونی آلیاژهای لحیم در چگالی جریان های بالاتر از 10^3 Amp/cm^2 معنا پیدا می کند. در این پژوهش از چگالی جریان 10^4 Amp/cm^2 جهت بررسی مهاجرت الکترونی لحیم غیر کامپوزیتی و لحیم کامپوزیتی استفاده شد. از رابطه (1)، جریان لازم برای رسیدن به چگالی جریان 10^4 Amp/cm^2 بدست آمد. در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

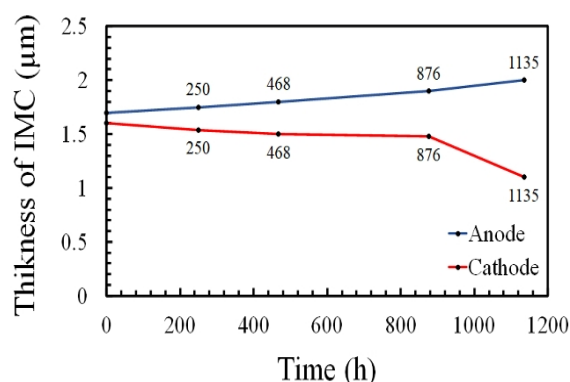
چگالی جریان در سمت باقی مانده اتصال به شدت افزایش یافته و باعث کاهش بیشتر ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی می شود. بنابراین، علت افزایش شیب کاهش ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی بعد از 876 ساعت از آزمون مهاجرت الکترونی، ایجاد ترک در سطح اتصال زیر لایه مسی و لحیم است؛ که باعث افزایش شار جریان و در نتیجه افزایش شیب کاهش ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی شده است. از طرفی دلیل ایجاد ترک در فصل مشترک اتصال زیر لایه مسی و لحیم را می توان به اختلاف ضریب انبساط حرارتی زیر لایه مسی، ترکیب بین فلزی فصل مشترکی و آلیاژ لحیم نسبت داد [10].



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.

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

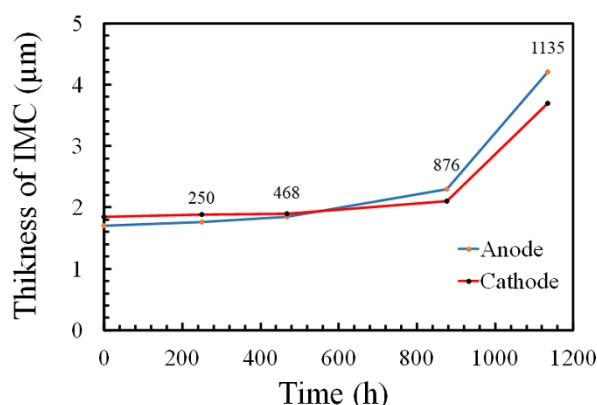
در شکل (4) نمودار تغییرات ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در طول آزمون مهاجرت الکترونی آورده شده است. همان طور که مشخص است، با افزایش زمان آزمون مهاجرت الکترونی، ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در سمت آند و کاتد به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. در سمت کاتد با توجه به شار اتمی ناشی از افزایش گرادیان 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 4- نمودار تغییرات ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی در طی زمان آزمون مهاجرت الکترونی.

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

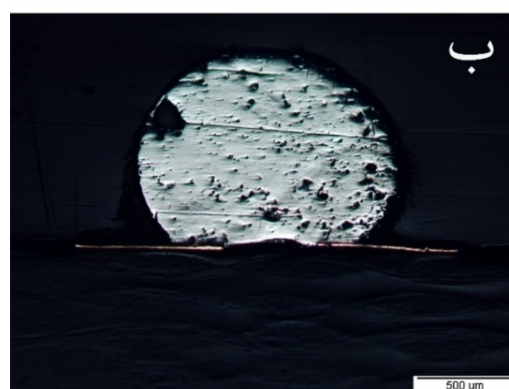
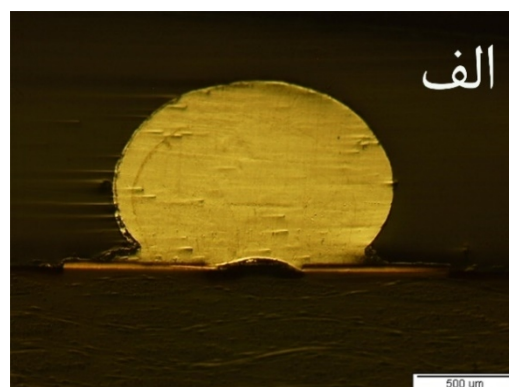
1135 ساعت، ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در هر دو سمت کاتد و آند با شیب زیادی افزایش یافت. در تحقیقات انجام شده روی تغییرات ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در طی زمان آزمون مهاجرت الکترونی، گزارش شده است که تغییرات ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی با زمان، به صورت خطی است [12]. بنابراین تغییر رفتار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

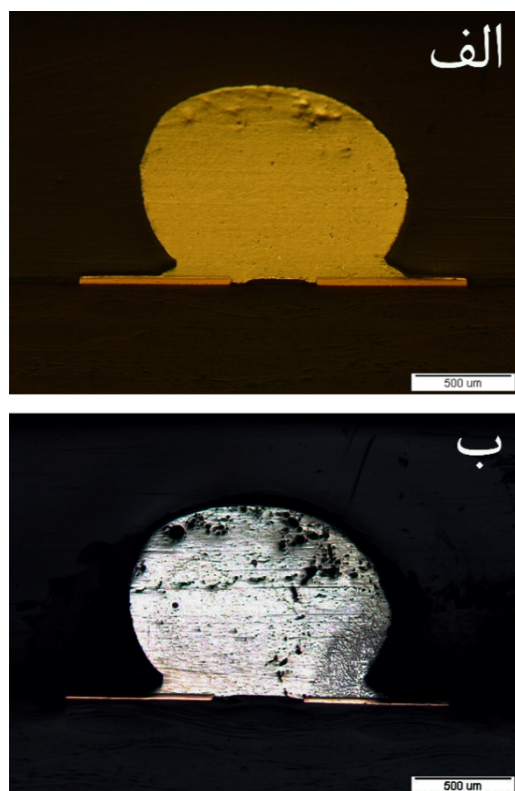


شکل 6- تصاویر میکروسکپ نوری از ریزساختار آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی بعد از گذشت الف - 0 و ب - 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی.

3-2- 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 بین فلزی، این ترکیبات داخل زمینه اطراف خود انحلال پیدا می کنند و در نهایت صرف رشد ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در سمت آنند می گردد. 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 حفره ها و افزایش اندازه ترکیبات بین فلزی زمینه در سمت کاتد اتصال الکترونیکی است. مصرف شار اتمی مس توسط ترکیبات بین فلزی زمینه، باعث جلوگیری از افزایش شار جای خالی به سمت کاتد شده است.



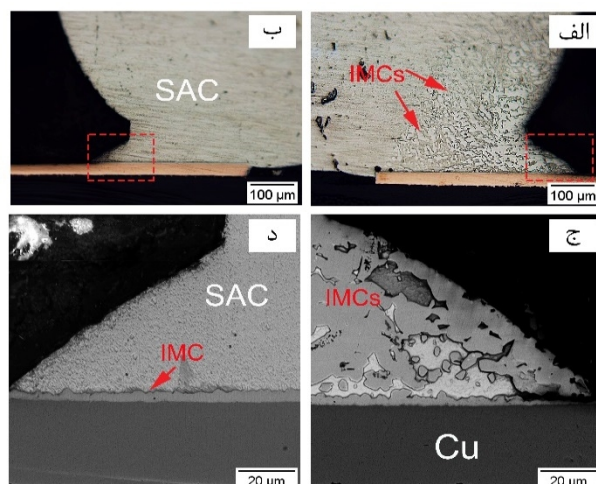
شکل 9- تصاویر میکروسکپ نوری از ریزساختار آلیاژ لحیم کامپوزیتی بعد از گذشت الف - 0 و ب - 1135 ساعت از زمان آزمون مهاجرت الکترونی.

3-3- مقایسه رفتار مهاجرت الکترونی آلیاژ لحیم

غیر کامپوزیتی و کامپوزیتی

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

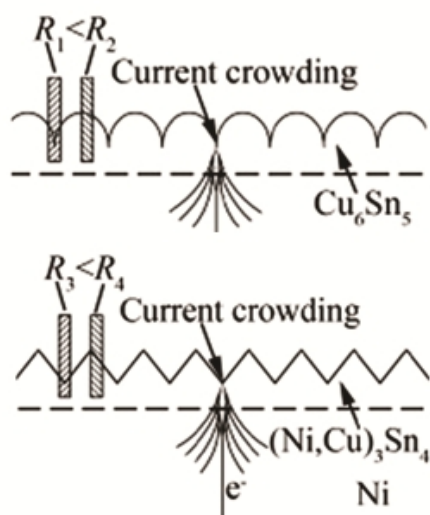
از طرفی، ترکیب بین فلزی فصل مشترکی $(Co,Cu)_6Sn_5$ پایدارتر از ترکیب بین فلزی Cu_6Sn_5 است. در نتیجه گرادیان غلظتی لازم جهت انحلال ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در زمینه لحیم افزایش می یابد. با توجه به دلایل ذکر شده، ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در طول زمان آزمون مهاجرت الکترونی افزایش می یابد. از طرفی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



شکل 8- تصاویر ریزساختاری از سمت کاتد الف و ج - و آنند 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.

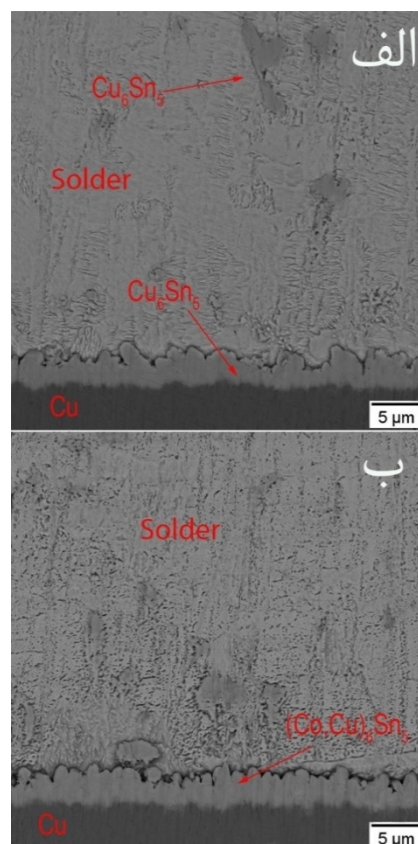
لذا در ادامه مسیر حرکت الکترون، با مصرف شدن تمام اتم های مس شارش یافته توسط مرزدهانه ها، اتم مسی برای ترکیبات بین فلزی موجود در مرزدهانه های سمت آنند باقی نمی ماند. اگرچه نیروی طوفان الکترونی همچنان وجود دارد و اطراف ترکیبات بین فلزی زمینه در سمت آنند، فقیر از عنصر مس خواهد شد؛ بنابراین به دلیل گرادیان 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 تنش های 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. همان طور 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 می شوند. 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 تنش های ایجاد شده و ترک های به وجود آمده، سطح اتصال لحیم زمینه و زیر لایه مسی کاهش یافته است. بنابراین، به دلیل مورفولوژی لایه ای 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.



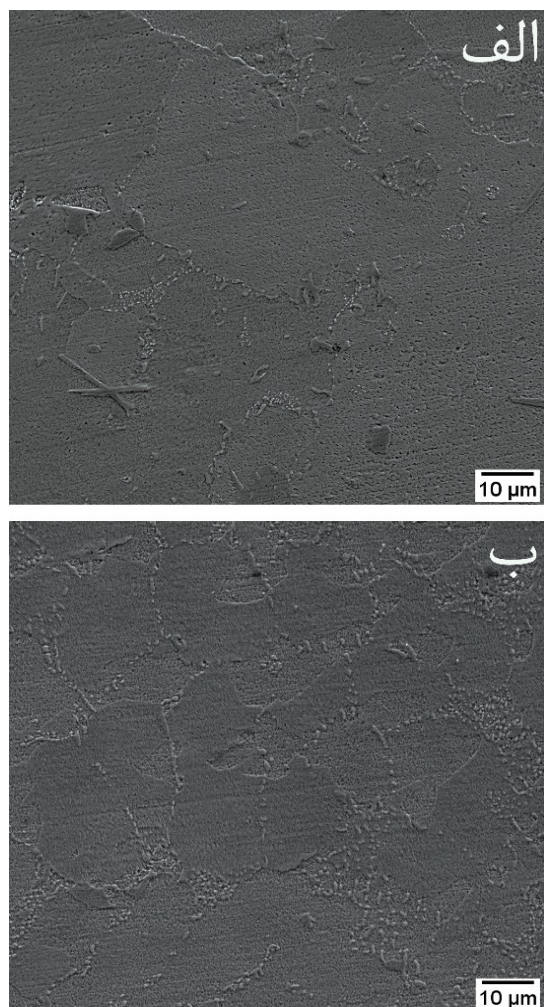
شکل 11- شماتیک تأثیر مورفولوژی ترکیب بین فلزی فصل مشترکی بر چگالی جریان [2].

کامپوزیتی لایه ای 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 می کند. 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 می کند 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 غیر کامپوزیتی و ب - آلیاژ لحیم کامپوزیتی.

4- نتیجه گیری

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

- با کامپوزیتی کردن آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی، از کاهش ضخامت ترکیب بین فلزی فصل مشترکی در سمت کاتد جلوگیری شد. به عبارتی دیگر، ترکیب بین فلزی فصل مشترکی سمت کاتد آلیاژ لحیم کامپوزیتی به دلیل شرکت کبالت در ترکیب شیمیایی ترکیب بین فلزی به صورت $(\text{Co,Cu})_6\text{Sn}_5$ ، پایدارتر می شود.

- مکانیزم غالب نفوذ در آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی و کامپوزیتی به ترتیب شبکه ای و مرزدانه ای بود.

در دمای مناسب وقوع مهاجرت الکترونی، نفوذ شبکه ای، مرزدانه ای و سطحی مکانیزم های نفوذ جهت انتقال جرم و نفوذ اتمی هستند. در دمای 100 درجه سانتی گراد نفوذ شبکه ای در آلومینیوم و مس ناچیز است؛ در صورتی که در آلیاژهای لحیم مکانیزم غالب نفوذ است. مکانیزم های غالب نفوذ در آلومینیوم و مس در دمای 100 درجه سانتی گراد به ترتیب نفوذ مرزدانه ای و سطحی است. در بررسی مقاومت آلیاژ لحیم در برابر مهاجرت الکترونی، بررسی مکانیزم غالب نفوذ و روش های کاهش ضریب نفوذ از متغیرهای تأثیرگذار است. عموماً اتصالات لحیم کاری شده از تعداد کمی دانه تشکیل شده اند؛ لذا مکانیزم غالب نفوذ، نفوذ شبکه ای 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 غیر کامپوزیتی و کامپوزیتی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در آلیاژ لحیم کامپوزیتی در مقایسه با آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی با کامپوزیت سازی، اندازه دانه های $\beta\text{-Sn}$ و درصد فازهای یوتکتیکی در ریزساختار به ترتیب کاهش و افزایش یافته است.

در نتیجه باعث افزایش چگالی مرزدانه ها و تراکم ترکیبات بین فلزی در مرزدانه ها گردیده است. از طرفی با توجه به افزایش اندازه ترکیبات بین فلزی زمینه در سمت کاتد آلیاژ لحیم کامپوزیتی بعد از 1135 ساعت از گذشت زمان آزمون مهاجرت الکترونی، می توان ادعا کرد نفوذ مس در آلیاژ لحیم کامپوزیتی از نوع مرزدانه ای و در آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی 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 در نتیجه گیریکنواختی ریزساختار در دو سمت کاتد و آند می گردد. لازم به ذکر است گیریکنواختی ریزساختار در دو سمت کاتد و آند باعث تفاوت خواص فیزیکی و مکانیکی در دو سمت اتصال می گردد که منجر به کاهش قابلیت اطمینان اتصال در یک سمت می شود.

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 دانه های $\beta\text{-Sn}$ 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 ریز ساختار 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.