



Investigation of microstructure and mechanical properties of lead free composite solder containing cobalt microparticles produced by accumulative roll bonding

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

Faculty of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Received 12 March 2023 ; Accepted 15 May 2023

Abstract

The miniaturization and compaction trends in electronic equipment and the removal of lead (Pb) element from solder alloys due to environmental considerations have created a great challenge in the field of designing and developing of new solder alloys. Therefore, researchers have recently focused on composite solder alloys using reinforcing particles to improve the reliability of lead-free solders. In this research, SAC0307 solder alloys (99 wt.% Sn, 0.3 wt.% Ag, and 0.7 wt.% Cu) with different percentages of cobalt microparticles were made by the Accumulative Roll Bonding (ARB) method. Then, the effect of the particles on wettability, microstructures and mechanical characteristics of solder alloys was investigated. The lowest contact angle was 23° in 0.2 wt.% cobalt sample. By adding cobalt to the solder matrix, the size of intermetallic compounds (IMCs), Cu₆Sn₅ and Ag₃Sn, decreased and the percentage of eutectic phases increased. The shape of the interfacial intermetallic compounds changed from scallop to layer shape by adding cobalt, and their average thickness increased about 13-71% in composite samples. The shear strength of solders increased up to 38% by enhancement of cobalt microparticles in the solder alloy containing 0.4 wt.% cobalt; however, shear strength was decreased in the composite solder containing 1 wt.% cobalt due to the agglomeration of microparticles. The shear fracture surfaces showed that the nature of the fracture changed from ductile fracture in the form of elongated dimples to brittle fracture in the form of cleavage with the increase in the percentage of cobalt microparticles. The composite solder alloys containing 0.2-0.4 wt.% Co have the best wettability behavior and tensile shear strength.

Keywords: Lead free solders; Nanocomposite Materials; Soldering; Intermetallic compound; Accumulative Roll Bonding.

*Corresponding Author: m_movahedi@sharif.edu



بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ لحیم نرم بدون سرب کامپوزیتی حاوی میکرو ذرات کبالت تولید شده به روش اتصال نورد انباشتی

محمد هادی نور محمدی ^{ID}، مجتبی موحدی ^{ID*}، امیر حسین کوکبی ^{ID}، معین تمیزی ^{ID}

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

دریافت مقاله: 1401/12/21؛ پذیرش مقاله: 1402/02/25

چکیده

روند کوچک سازی و فشرده سازی تجهیزات الکترونیکی و حذف عنصر سرب از آلیاژهای لحیم کاری به دلیل ملاحظات زیست محیطی، چالش بزرگی را در زمینه طراحی و توسعه لحیم های جدید ایجاد کرده است. لذا اخیراً کامپوزیت سازی با بهره گیری از ذرات تقویت کننده به منظور بهبود کارایی لحیم های بدون سرب مدنظر پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش آلیاژ لحیم SAC0307 (99 درصد وزنی قلع، 0/3 درصد وزنی نقره و 0/7 درصد وزنی مس) با درصدهای مختلف میکرو ذرات کبالت، به روش اتصال نورد انباشتی ساخته شد؛ سپس به بررسی تأثیر کامپوزیت سازی بر مشخصه های ترشوندگی، ریزساختاری و مکانیکی آلیاژ لحیم پرداخته شد. کمترین زاویه تماس در نمونه 0/2 درصد کبالت به مقدار 23 درجه به دست آمد. با اضافه کردن کبالت، اندازه ترکیبات بین فلزی Cu_6Sn_5 و Ag_3Sn کاهش پیدا کرد و درصد فازهای یوتکتیکی افزایش یافت. همچنین شکل ترکیبات بین فلزی فصل مشترکی با اضافه کردن کبالت از حالت حلزونی به لایه ای تغییر کرده و متوسط ضخامت آن ها حدود 13 تا 71 درصد افزایش یافته است. استحکام برشی لحیم ها با افزایش میکرو ذرات کبالت تا 38% در آلیاژ حاوی 0/4 درصد کبالت افزایش یافت؛ در حالی که در لحیم کامپوزیتی حاوی 1 درصد کبالت، کاهش استحکام برشی به دلیل آگلومره شدن میکرو ذرات کبالت، مشاهده شد. سطوح شکست برشی نشان داد، ماهیت شکست با افزایش درصد میکرو ذرات کبالت در لحیم کامپوزیتی از شکست نرم به صورت حفرات کشیده شده به شکست ترد به صورت تورقی تبدیل شده است. نتایج نشان داد آلیاژ کامپوزیتی حاوی 0/2 تا 0/4 درصد کبالت بهترین خواص ترشوندگی و استحکام کشش برشی را دارند.

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

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

1- مقدمه

متالورژیکی و اتصالات لحیم کاری جهت رسانایی الکتریکی استفاده می شد. با آمدن عصر الکترونیک پیشرفته در قرن 20، لحیم و لحیم کاری، نقش مهمی در مهندسی الکترونیک پیشرفته ایفا می کند. از سال 1990 سالانه حدود 10^{13} اتصال لحیم در

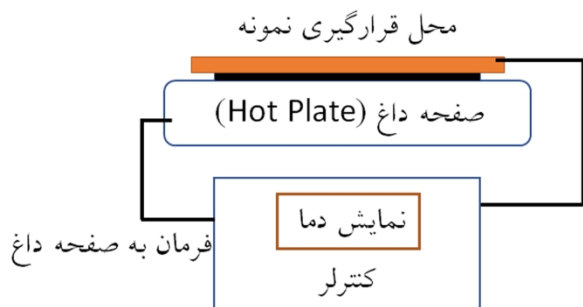
لحیم کاری نرم از پرمصرف ترین فرایندهای اتصال دهی اجزاء الکترونیکی در صنعت الکترونیک است. در اواخر قرن 19 فرایند لحیم کاری تنها برای دو کاربرد ساخت اتصالات

نقاط ضعف این نوع لحیم‌ها می‌باشد. به دلیل اهمیت اتصالات الکترونیکی، خواص و ترکیب لحیم بسیار مهم است. برای بدست آوردن یک اتصال مطمئن بین اجزاء الکترونیکی، باید از استحکام اتصال لحیم و زیر لایه اطمینان داشت. از مهم‌ترین پارامترها، واکنش‌های فصل مشترکی و تشکیل ترکیبات بین‌فلزی می‌باشد که اهمیت زیادی روی قابلیت اطمینان اتصال دارند. به دلیل دمای کاری بالا نسبت به دمای ذوبی که این اتصالات دارند، بررسی نفوذ مس از زیر لایه مسی به داخل مذاب در رشد و ضخامت ترکیبات بین‌فلزی از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهشی، اضافه شدن 0/5 درصد نانو ذرات TiO_2 به SAC، باعث کاهش اندازه ترکیبات بین‌فلزی و $\beta\text{-Sn}$ شده است [4]. همین‌طور ژانگ و همکارانش [5] عنوان کرده‌اند که با افزودن نانو ذرات آلومینیوم به آلیاژ لحیم $\text{Sn}_{3.8}\text{Ag}_{0.7}\text{Cu}$ اندازه ترکیبات بین‌فلزی کاهش پیدا کرده است؛ طبق تحقیقاتی که انجام شده است غالباً با افزایش نانو ذرات به مقدار بهینه، اندازه ترکیبات بین‌فلزی به دلیل وجود نانو ذرات به‌عنوان محل‌هایی مناسب برای جوانه‌زنی ترکیبات بین‌فلزی، ریزتر شده‌اند و باعث تأثیر بر روی خواص مکانیکی و اتصال آلیاژهای لحیم‌کاری شده است [6]. در پژوهشی دیگر توسط تای و همکارانش [7] تأثیر نانو ذرات کبالت روی ساختار فصل مشترکی آلیاژ لحیم $\text{Sn}_{3.8}\text{Ag}_{0.7}\text{Cu}$ و زیر لایه مس بعد لحیم‌کاری گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزودن نانو ذرات کبالت به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای باعث توقف رشد ترکیب بین فلزی Cu_3Sn و افزایش رشد ترکیب بین فلزی Cu_6Sn_5 می‌شود. در این پژوهش سعی بر آن شد تا با روش جدید، توزیع ذرات در زمینه آلیاژ لحیم کنترل و توزیعی یکنواخت از ذرات انجام شود. بنابراین، آلیاژ کامپوزیتی SAC0307 با درصدهای مختلف میکرو ذرات کبالت به روش اتصال نورد انباشتی (ARB) ساخته شد. سپس خواص فیزیکی، ریزساختاری و استحکام برشی این آلیاژ لحیم مورد ارزیابی قرار گرفت.

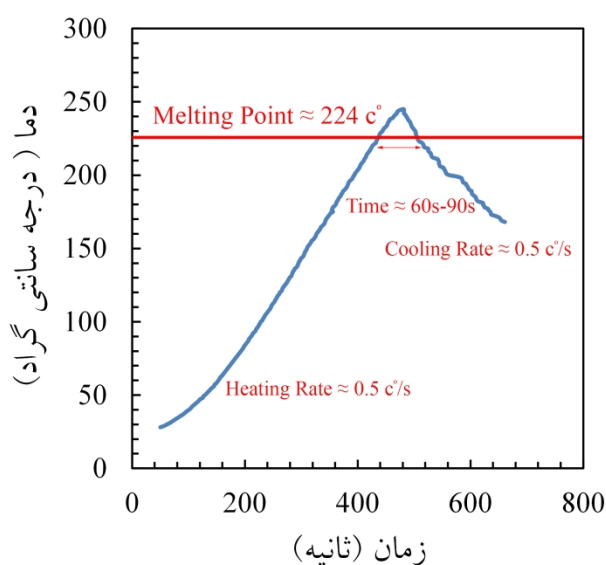
2- مواد و روش پژوهش

در این پژوهش ترکیب آلیاژ لحیم کامپوزیتی بدون سرب

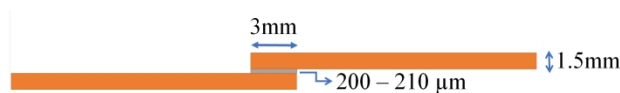
صنعت الکترونیک تولید می‌شود [1]. سال 2006 براساس قوانین منع استفاده از مواد سمی استفاده از برخی عناصر شیمیایی ممنوع شد؛ سرب که یک عنصر سمی است در آلیاژسازی لحیم‌های مورد استفاده در صنعت الکترونیک کاربرد زیادی داشت؛ بنابراین کوشیده شد تا جایگزینی برای ترکیب لحیم‌های Pb-Sn پیدا شود. تاکنون ترکیبات بسیاری معرفی شدند؛ امروزه آلیاژ لحیم‌های حاوی قلع، نقره و مس که به اختصار SAC نامیده می‌شوند یکی از کاندیدهای جایگزین می‌باشند. انتقال فناوری لحیم‌کاری به لحیم‌کاری بدون سرب باعث استفاده گسترده از آلیاژهای لحیم‌کاری برپایه Sn-Ag-Cu به‌خصوص آلیاژهای لحیم‌کاری با درصد بالای نقره مانند SAC405 و SAC305 شد. این آلیاژها عموماً خواص فیزیکی و متالورژیکی خوبی دارند، اما درصد نسبتاً بالای نقره در لحیم‌کاری منجر به قیمت بالاتر و از طرفی انقباض انجمادی ناشی از Ag_3Sn می‌شود. از زمان معرفی آلیاژهای لحیم بدون سرب، محققان در تلاش هستند تا خواصی مانند ترشوندگی و رفتار مکانیکی این آلیاژها بهبود یابد؛ بنابراین، پژوهش‌هایی با هدف کاهش درصد Ag در آلیاژهای لحیم‌کاری انجام شده است و آلیاژ SAC0307 ($\text{Sn}_{99}\text{Ag}_{0.3}\text{Cu}_{0.7}$) یک نامزد امیدوارکننده است [2]. جدیدترین رویکرد در افزایش اطمینان اتصال، استفاده 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 نانو ذرات و کامپوزیت‌سازی، خواص لحیم‌های بدون سرب بهبود داده شود و نتایج رضایت‌بخشی نیز گرفته شده است؛ ولی هنوز ترکیب مشخصی از آلیاژهای کامپوزیتی به صنعت الکترونیک راه نیافته است و تحقیقات در این زمینه برای یافتن بهترین نتایج ادامه دارد. داشتن توزیع یکنواخت از ذرات سخت‌کننده در زمینه لحیم، بطوری که خواص فیزیکی و مکانیکی اتصال لحیم را بهبود بخشد می‌تواند به عنوان معیاری موفقیت آمیز برای رسیدن به آلیاژهای لحیم کامپوزیتی دانست [3]. عموماً ترشوندگی ضعیف و دمای ذوب بالا لحیم‌های بدون سرب از



شکل 1- شماتیک فرایند ذوب و لحیم کاری شارش مجدد.



شکل 2- پروفیل دمایی لحیم کاری شارش مجدد.



شکل 3- شماتیک نمونه های تست کشش - برش.

3- نتایج و بحث

3-1- اندازه گیری زاویه تماس

به طور کلی ترشوندگی با رابطه یانگ توضیح داده می شود. افزایش ترشوندگی به این دلیل که سطح بیشتری برای واکنش بین مذاب و جامد ایجاد می کند تأثیر بسیار مهمی روی استحکام اتصال دارد. در کل ترشوندگی لحیم های بدون سرب ضعیف تر از لحیم های حاوی سرب است و تلاش می شود که با استفاده از آلیاژسازی و کامپوزیتی کردن این نقطه ضعف لحیم های بدون سرب مرتفع شود؛ یکی از راهکارها استفاده از نانو ذرات داخل

بصورت $\text{SAC0307} + X\% \text{wt. Co}$ ($X = 0, 0.05, 0.2, 0.4, 1$)

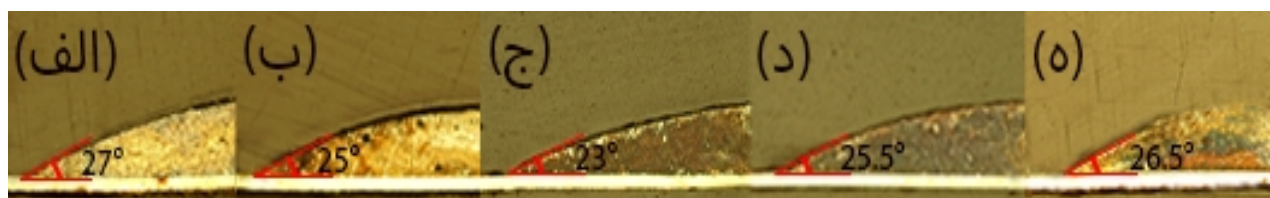
انتخاب شد. برای ساخت آلیاژ کامپوزیتی از روش اتصال نورد انباشتی (ARB) استفاده شد.

ابتدا 5 لایه فویل آلیاژ لحیم تجاری Sn0.3Ag0.7Cu (ساخت شرکت STANNOL) آماده سازی و سپس بین هر لایه درصد وزنی مشخص از محلول استون حاوی ذرات کبالت اسپری و روی هم گذاشته شد. میانگین اندازه ذرات کبالت $3\mu\text{m}$ اندازه گیری شد. در ادامه با یک پاس نورد و 80 درصد کاهش سطح مقطع، فویل نورد شده به دو قسمت مساوی تقسیم شد؛ سپس 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 $200 - 220\mu\text{m}$ آماده شد.

به منظور فرایند لحیم کاری، از زیر لایه فویل مس خالص به ضخامت $70\mu\text{m}$ و روان ساز رزینی نیمه فعال استفاده شد. فرایند ذوب و لحیم کاری شارش مجدد به وسیله ی صفحه داغ مطابق شکل (1) و پروفیل دمایی شکل (2) انجام گرفت.

به منظور بررسی ریزساختار لحیم نرم مانند مشاهده مورفولوژی، نحوه توزیع فازها و ترکیبات بین فلزی، اندازه گیری ضخامت ترکیبات بین فلزی فصل مشترکی و زاویه ترشوندگی، مقطع عرضی نمونه ها برش داده شد و پس از سمباده و پولیش برای مشاهدات میکروسکوپی آماده شدند.

همچنین به منظور آشکارسازی 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)، ریزساختار ترکیبات بین فلزی لحیم و فصل مشترک بررسی شد. استحکام مکانیکی اتصال، به وسیله آزمون کشش - برش صورت پذیرفت. در شکل (3) ابعاد نمونه های مسی آزمون کشش - برشی ارائه شده است. سطح هم پوشانی اتصال برابر $10 \times 3\text{mm}^2$ انتخاب شد؛ سپس آزمون کشش - برش با سرعت کشش 1mm/min و سه مرتبه تکرار انجام شد. سطوح شکست به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی و شکست نگاری قرار گرفت.



شکل 4- تصویر زاویه ترشوندگی نمونه‌های الف - SAC0307 ب- SAC0307+0.05%Co ج- SAC0307+0.2%Co د- SAC0307+0.4%Co ه- SAC0307+1%Co

لحیم مذاب می‌باشد. نانو ذرات روی انرژی سطحی مذاب یا انرژی فصل‌مشرکی بین زیرلایه و مذاب لحیم می‌تواند تأثیرگذار باشد. در شکل (4) زاویه تماس آلیاژ لحیم SAC0307

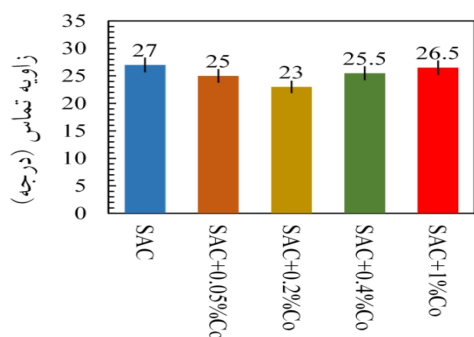
با درصدهای مختلف میکرو ذرات کبالت، نشان داده شده است. تصور بر این است که نانو ذرات به سمت محیط کروی مذاب پخش شده، جدایش پیدا می‌کنند و در نقطه سه‌گانه، برانرژی‌های سطحی در تعادل تأثیر می‌گذارند؛ شکل (5) شماتیک محل قرارگیری نانو ذرات در حین لحیم‌کاری شارش‌مجدد را به‌خوبی نشان می‌دهد. برای مثال گزارش شده است که تا 0/1 درصد اضافه‌شدن نانو ذرات آلومینیوم به آلیاژ لحیم Sn0.65Cu، ترشوندگی بهبود می‌یابد و بیشتر از این مقدار اثر عکس دارد [5, 8, 9]. همچنین در شکل (6) نمودار زاویه تماس برای آلیاژهای کامپوزیتی آورده شده است. طبق نتایج بدست آمده با افزایش درصد میکرو ذرات کبالت در آلیاژ لحیم کامپوزیتی ابتدا ترشوندگی آلیاژ کامپوزیتی با زیر لایه مس بهبود و سپس تضعیف می‌شود. آلیاژ لحیم کامپوزیتی حاوی 0/2 درصد وزنی کبالت با کاهش زاویه تماس از 27 درجه در آلیاژ لحیم SAC0307 به 23 درجه، باعث بهبود ترشوندگی به میزان 15 درصد شد. به‌طورکلی اعتقاد براین است که بهبود ترشوندگی با استفاده از نانو ذرات یک میزان بهینه دارد، عموماً مقادیر کم نانو ذرات باعث بهبود زاویه ترشوندگی می‌شود.

بطوری‌که تغییرات زاویه ترشوندگی مربوط به تأثیر نانو ذرات روی تغییرات انرژی‌های سطحی است؛ طبق رابطه (1) اگر تغییرات محیط دایره مثبت باشد به این معنا است که تغییرات انرژی سطحی منفی بوده و نانو ذرات باعث کاهش انرژی سطحی لحیم مذاب پخش‌شده در نقطه سه‌گانه می‌شود. در رابطه (1)، Γ^K بیانگر میزان جذب نانو ذرات روی سطح

$$\Gamma^K = -\frac{C}{RT} \frac{d\gamma^k}{dc} \quad (1)$$



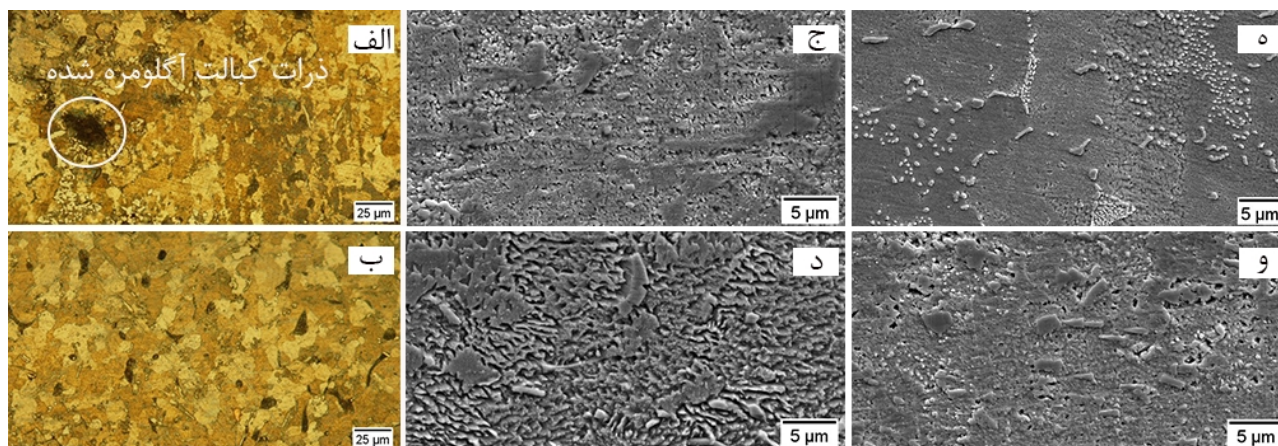
شکل 5- شماتیک محل قرارگرفتن نانو ذرات حین لحیم‌کاری [5].



شکل 6- نمودار اندازه میانگین زاویه تماس.

3-2- بررسی ریزساختار زمینه لحیم کامپوزیتی

در شکل (7) ریزساختار زمینه لحیم کامپوزیتی آورده شده است. تصویر ریزساختاری آلیاژ لحیم SAC0307 شامل دانه‌های β -Sn، ترکیب بین فلزی Ag_3Sn و ترکیب بین فلزی Cu_6Sn_5 می‌باشد. در تصاویر زمینه لحیم‌های کامپوزیتی حاوی کبالت علاوه بر این ترکیب بین‌فلزی $(Co, Cu)_6Sn_5$ مشاهده شد. لیو و همکارانش [10] با بررسی ترمودینامیکی لحیم‌های بدون سرب $Co-Sn$ نقطه یوتکتیکی سیستم $Sn-Co-Cu$ ، در آلیاژ لحیم بدون سرب $Sn-0.4Co-0.7Cu$ را دمای $224^\circ C$ گزارش کردند.



شکل 7- تصاویر نوری ریزساختار لحیم‌های کامپوزیتی الف - SAC+1%Co ب - SAC+0.2%Co و تصاویر SEM ریزساختار لحیم‌های کامپوزیتی ج - SAC+0.2%Co د - SAC+0.4%Co ه - SAC و - SAC+1%Co.

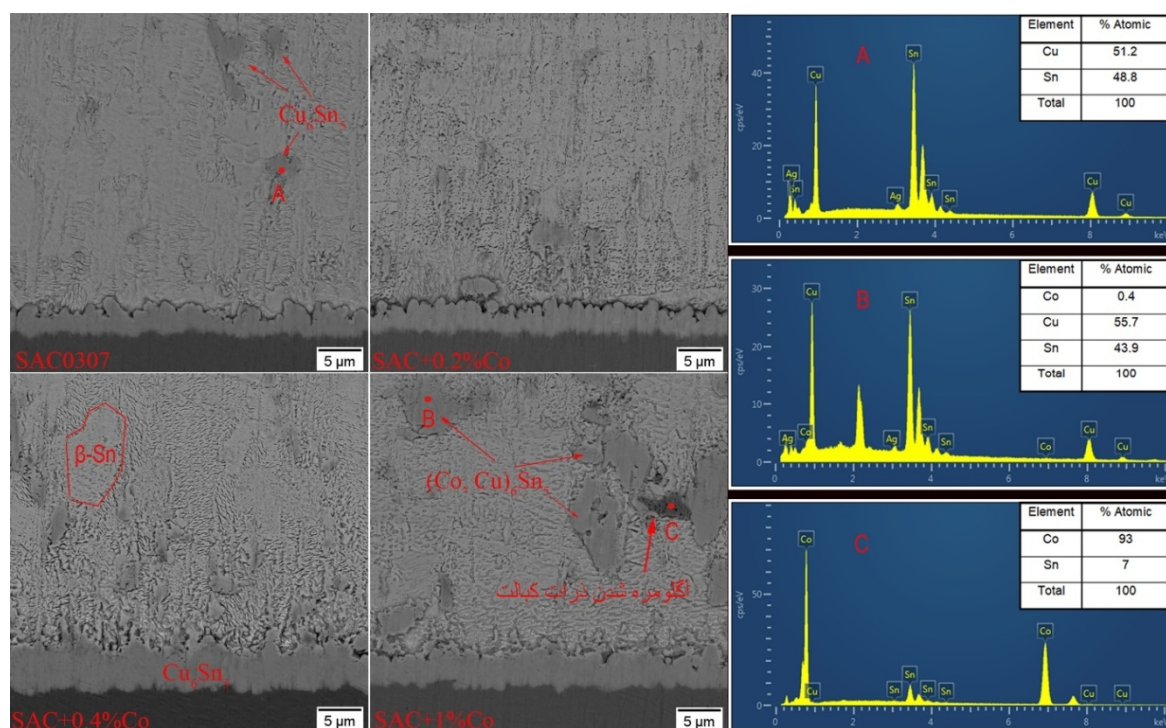
لحیم می‌توان اندازه این ترکیبات بین‌فلزی را کاهش داد [5]. همچنین لیو و همکارانش [12] با استفاده از نانو صفحات گرافن (GNSs) از رشد ترکیبات بین‌فلزی فصل‌مشرکی جلوگیری کردند. هنگامی که ترکیبات بین‌فلزی می‌خواهند رشد کنند با نانو صفحات گرافن مواجه شده و این ذرات بصورت فیزیکی مانع رشد آن‌ها می‌شوند؛ نانو صفحات گرافن به دلیل سطح ویژه بالایی که دارند به عنوان مانع نفوذ اتمی عمل کرده و نفوذ اتمی را کاهش می‌دهد. در تحقیق دیگری در نمونه 0/1 درصد گرافن لحیم کامپوزیتی SAC0307، کاهش 30 درصدی ضخامت ترکیبات بین‌فلزی فصل‌مشرکی گزارش شده است [13]. به‌طور کلی می‌توان گفت با افزودن نانو ذرات، اثرات عمده‌ای که می‌توانند روی ترکیبات بین‌فلزی داشته باشند عبارت‌اند از افزایش یا کاهش نرخ رشد ترکیبات بین‌فلزی با توجه به اندازه ذرات، مکانیزم‌های مرتبط با نرخ نفوذ زیرلایه مسی، تغییر انرژی سطحی ترکیبات بین‌فلزی و تغییر مورفولوژی ترکیبات بین‌فلزی که تأثیر گذار هستند. همچنین ممکن است باعث حذف نوعی از ترکیب بین‌فلزی شده و یا در ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشرکی مشارکت کنند [5, 12].

ریزساختار و مورفولوژی فصل مشترک زیرلایه مس و زمینه لحیم برای آلیاژهای مختلف در شکل (8) نشان داده شده است. مورفولوژی ترکیبات بین‌فلزی فصل‌مشرکی در آلیاژ لحیم SAC0307 به‌صورت حلزونی (Scallop-shaped) می‌باشد و با افزودن کبالت مورفولوژی ترکیبات بین‌فلزی فصل‌مشرکی از

ریزساختار و مورفولوژی زمینه لحیم برای آلیاژهای 1 درصد کبالت و 0/2 درصد کبالت در تصویر (الف) و (ب) آورده شده است. آگلومره شدن ذرات کبالت در تصویر (الف) قابل مشاهده است. دلیل این امر نیروی واندروالس بین میکرو ذرات کبالت می‌باشد که در درصدهای زیاد کبالت، این نیرو توزیع مناسب ذرات کبالت را در حین لحیم‌کاری شارش مجدد به هم ریخته و باعث توزیع غیریکنواخت ذرات کبالت می‌شود. همینطور لیو و همکارانش [11] بیان کردند که در آلیاژ لحیم SAC+0.2%SiC به دلیل نیروی واندروالس بین نانو ذرات SiC، آگلومره شدن نانو ذرات SiC اتفاق افتاده است. همچنین لازم به ذکر است به دلیل اینکه ذرات کبالت محل‌های مناسبی برای جوانه‌زنی ترکیبات بین‌فلزی می‌باشند، به دلیل توزیع ناهمگن و آگلومره شدن ذرات کبالت، غیریکنواختی و تجمع ترکیبات بین‌فلزی قابل مشاهده است. با مقایسه تصویر ریزساختاری آلیاژ لحیم کامپوزیتی 0/2 درصد کبالت و 1 درصد کبالت به‌خوبی تفاوت در توزیع و اندازه ترکیبات بین‌فلزی در زمینه لحیم کامپوزیتی دیده می‌شود.

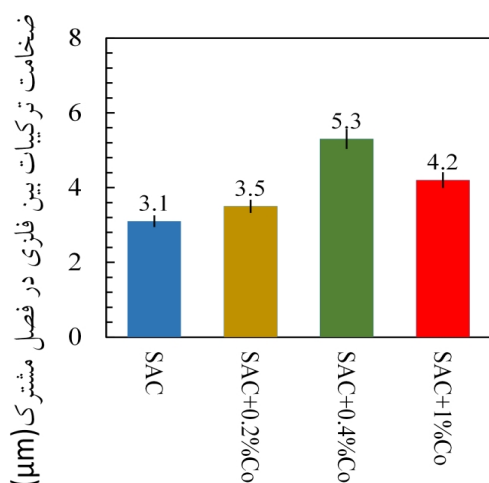
3-3- ساختار فصل مشترک لحیم کامپوزیتی با زیرلایه مس

ترکیبات بین‌فلزی Cu_6Sn_5 و Ag_3Sn به دلیل ترد بودن، مکان‌های مستعد برای رشد ترک و شکست هستند و در نتیجه استحکام اتصال را تضعیف می‌کنند. در تحقیقات نشان داده شد که با اضافه کردن نانو ذرات آلومینیوم و میکرو ذرات آهن به آلیاژ



شکل 8- تصاویر ریزساختاری فصل مشترک لحیم‌های کامپوزیتی حاوی درصدهای مختلف ذرات کبات.

مذاب قلع اتفاق افتاده و در ادامه ترکیبات بین‌فلزی که روی نانو ذرات کبات جوانه‌زنی کرده‌اند در فصل مشترک حضور می‌یابند و باعث افزایش ضخامت ترکیب بین‌فلزی در فصل مشترک می‌شوند.



شکل 9- ضخامت ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک لحیم و زیرلایه مس.

3-4- بررسی خواص مکانیکی لحیم کامپوزیتی

3-4-1- بررسی آزمون کشش - برش لحیم کامپوزیتی

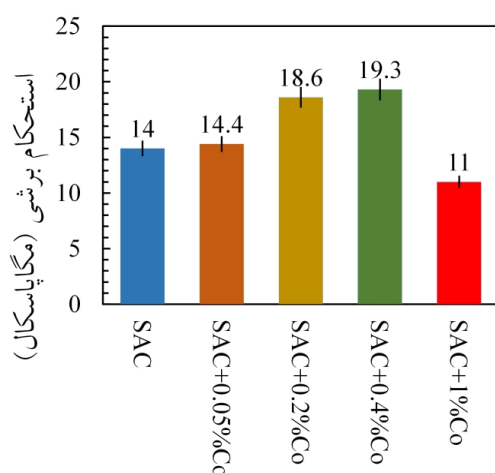
نتایج آزمون کشش - برش در شکل (11) آورده شده است.

حالت حلزونی به لایه‌ای (Planar) تغییر شکل می‌دهند. همچنین، شکل (9) نمودار ضخامت ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک لحیم کامپوزیتی را نشان می‌دهد؛ که با افزایش درصد میکرو ذرات کبات، ضخامت ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک به ترتیب 13، 71 و 42 درصد زیاد می‌شود. این موضوع را می‌توان به مشارکت کبات در ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی بصورت $(Co, Cu)_6Sn_5$ نسبت داد. در پژوهشی که توسط تای و همکارانش [7] انجام شد؛ آن‌ها نشان دادند که در آلیاژ لحیم نرم $Sn-3.8Ag-0.7Cu$ با افزایش درصد وزنی کبات، ترکیب بین‌فلزی فصل مشترکی ضخیم‌تر و مورفولوژی به شکل لایه‌ای تغییر می‌کند. در پژوهشی دیگر [14] افزودن نانو ذرات نیکل همانند کبات در واکنش‌های فصل مشترکی این اثر را نشان داد. دلیل آن، حل شدن نانو ذرات نیکل در ترکیبات بین‌فلزی و تأثیر آلیاژی روی ترکیبات بین‌فلزی فصل مشترکی عنوان شده است. در شکل (10) دلیل دیگر رشد ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک توسط نیشیکاوا و همکارانش [15] برای نانو ذرات کبات روی آلیاژ لحیم $Sn-3.5Ag$ آورده شده است؛ با انجام لحیم‌کاری شارش‌مجدد، حل شدن مس داخل

SAC0307، موارد بالا به عنوان عوامل عمده استحکام بخشی برای آلیاژهای لحیم کامپوزیتی شناخته می شوند. در آلیاژ 1 درصد کبالت به دلیل آگلومره شدن ذرات کبالت، این مکان ها می توانند محل جوانه زنی و رشد ترک باشند؛ که منجر به کاهش استحکام لحیم کامپوزیتی حاوی 1 درصد کبالت شد.

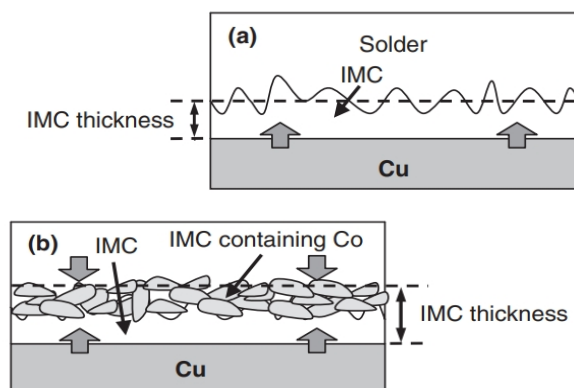
3-4-2- بررسی سطح شکست لحیم کامپوزیتی

در شکل (12) سطح شکست آلیاژ لحیم کامپوزیتی SAC0307، پس از آزمون کشش - برش با درصد های مختلف میکرو ذرات کبالت آورده شده است. در تصاویر سطح شکست آلیاژ لحیم SAC0307 و آلیاژ لحیم کامپوزیتی SAC+0.2%Co حفرات کشیده شده (Dimples) در راستای سطح برش مشاهده شدند؛ که این حالت از مشخصه های شکست نرم تلقی می شود.



شکل 11- نمودار استحکام کشش - برش برای آلیاژهای لحیم کامپوزیتی حاوی درصد های مختلف ذرات کبالت.

با افزایش بیشتر درصد میکرو ذرات کبالت، سطوح شکست تورقی و ترد مشاهده شد. با در نظر گرفتن سطح شکست نرم آلیاژ لحیم بدون کبالت و لحیم کامپوزیتی با 0/2 درصد کبالت، احتمالاً مسیر رشد ترک از داخل زمینه لحیم و در لحیم کامپوزیتی با 0/4 درصد کبالت به دلیل سطح شکست تورقی، مسیر رشد ترک بیشتر از داخل ترکیب بین فلزی فصل مشترکی و یا مرز ترکیب بین فلزی فصل مشترکی و زمینه لحیم کامپوزیتی بوده است. همین طور با توجه به تصویر لحیم کامپوزیتی با



شکل 10- شماتیک رشد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک [15].

با افزودن میکرو ذرات کبالت، ابتدا استحکام برشی افزایش یافته و سپس کاهش پیدا کرده است. به طور کلی می توان مکانیزم های استحکام بخشی به وسیله نانو ذرات در آلیاژهای لحیم کامپوزیتی را به سه گروه زیر تقسیم کرد:

- وجود فاز ثانویه سخت در زمینه لحیم نرم که این مکانیزم، اصلی ترین مکانیزم استحکام دهی نانو ذرات می باشد. زمانی که برای تغییر شکل پلاستیک، نابجایی ها به نانو ذرات برخورد می کنند، بر اساس تئوری اوروان اگر نانو ذرات به اندازه کافی سخت باشند، نابجایی ها توانایی برش آنها را ندارند و در صورت برش انرژی آنها کاهش پیدا می کند. این امر قابلیت حرکت نابجایی ها را کاهش و سطح تنش برای تغییر فرم پلاستیک را افزایش می دهد.

- نانو ذرات خنثی به دلیل اینکه با زمینه لحیم واکنش نمی دهند و عموماً نقطه ذوب بالایی دارند؛ مکان های مناسب برای جوانه زنی فازهای اولیه انجماد می باشند؛ بنابراین وجود این ذرات جوانه زنی ناهمگن را تشویق می کند و باعث کاهش اندازه دانه و افزایش مرزدانه ها می شوند. همین طور به دلیل اینکه نانو ذرات در مرزدانه حضور می یابند، جابجایی مرزدانه ها با مشکل مواجه می شود.

- در نانو ذرات فلزی بیشتر استحکام دهی از طریق محلول جامد با مکانیزم های اعوجاج شبکه و اتمسفرکاترل می باشد [16 و 17].

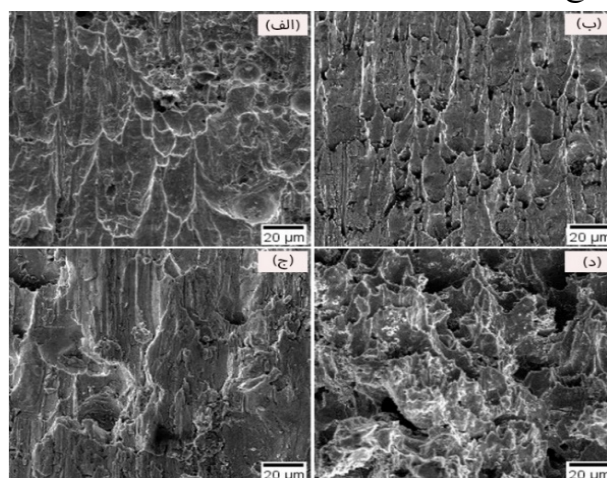
بنابراین با توجه به موارد ذکر شده به دلیل فلزی بودن ماهیت ذرات کبالت و استحکام بالای کبالت نسبت به آلیاژ لحیم

شکست از شکست نرم و حفرات کشیده شده در جهت تنش به شکست ترد و صفحات تورقی در سطح شکست تغییر یافت. - در آلیاژ لحیم کامپوزیتی حاوی 1 درصد میکرو ذرات کبالت، آگلومره شدن ذرات کبالت منجر به افت استحکام برشی گردید. بنابراین آلیاژ لحیم کامپوزیتی حاوی 0/2 الی 0/4 درصد میکرو ذرات کبالت، ترکیب بهینه از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی می باشد.

منابع

- 1-Obemdorff, P., Lead-free Solder Systems: Phase Relations and Microstructure. 2001, PhD thesis, Technical University of Eindhoven, 12 Eindhoven, The Netherlands.
- 2-Illés, B., et al. Soldering with SACX0307-(TiO₂/ZnO) nano-composite solder alloys. in 24th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). 2021. IEEE.
- 3-Roshanghias, A., et al., Ceria reinforced nanocomposite solder foils fabricated by accumulative roll bonding process. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2012. 23: p. 1698-1704.
- 4-Chang, S., et al., Effect of addition of TiO₂ nanoparticles on the microstructure, microhardness and interfacial reactions of Sn3.5AgXCu solder. Materials & Design, 2011. 32(10): p. 4720-4727.
- 5-Zhang, L. and K.-N. Tu, Structure and properties of lead-free solders bearing micro and nano particles. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2014. 82: p. 1-32.
- 6-Yakymovych, A., et al., Effect of nano Co reinforcements on the structure of the Sn-3.0 Ag-0.5 Cu solder in liquid and after reflow solid states. Materials Chemistry and Physics, 2016. 181: p. 470-475.
- 7-Tay, S., A. Haseeb, and M. Rafie Johan, Addition of cobalt nanoparticles into Sn-3.8 Ag-0.7 Cu lead-free solder by paste mixing. Soldering & Surface Mount Technology, 2011. 23(1): p. 10-14.
- 8-Zaimi, N., et al. Influence of non-metallic particles addition on wettability, intermetallic compound formation and microhardness of Sn-0.7 Cu lead free solder paste. in Solid State Phenomena. 2018. Trans Tech Publ.
- 9-Tamizi, M., et al., Wettability and Rheological Behavior of Low Ag Lead-Free SAC/Graphene and Cobalt-Graphene Nanocomposite Solder Paste. Metallurgical and Materials Transactions A, 2022. 53(8):

1 درصد کبالت، به دلیل دیده نشدن حفرات کشیده، شکست از نوع شکست ترد است.



شکل 12- تصاویر سطح شکست الف- SAC ب- SAC+0.2%Co

ج- SAC+0.4%Co د- SAC+1%Co.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر اضافه کردن میکرو ذرات کبالت بر خواص فیزیکی، متالورژیکی و مکانیکی در آلیاژ لحیم نرم بدون سرب Sn-0.3Ag-0.7Cu بررسی شد. از این پژوهش نتایج زیر بدست آمد:

- با افزایش میکرو ذرات کبالت زاویه تماس لحیم و زیرلایه مسی کم شد؛ همچنین آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 0/2 درصد کبالت، درصد بهینه جهت بهبود ترشوندگی است.

- حضور میکرو ذرات کبالت در زمینه لحیم کامپوزیتی، به دلیل محل های مناسب جوانه زنی ترکیبات بین فلزی باعث کاهش اندازه ترکیبات بین فلزی شد؛ همینطور درصد فاز یوتکتیکی افزایش یافت.

- بطور کلی با افزایش درصد میکرو ذرات کبالت در آلیاژ لحیم کامپوزیتی، ضخامت ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک تا 71 درصد افزایش یافت. حضور ذرات کبالت در نزدیکی فصل مشترک منجر به تشویق جوانه زنی ترکیبات بین فلزی و تأثیر آلیاژی روی ترکیبات بین فلزی فصل مشترکی می شود.

- استحکام برشی آلیاژ لحیم کامپوزیتی حاوی 0/4 درصد میکرو ذرات کبالت، 38 درصد افزایش استحکام نسبت به آلیاژ لحیم SAC0307 نشان داد؛ همچنین با افزایش درصد کبالت نوع

- سال هشتم، شماره 1، بهار و تابستان 1401.
- 14-Taya, S., et al., Influence of Nanoparticle on the morphology and growth of interfacial intermetallic compounds between $\text{Sn}_{3.8}\text{Ag}_{0.7}\text{Cu}$ lead-free solder and copper substrate. *Intermetallics*, 2013. 33: p. 8e15.
- 15-Nishikawa, H., A. Komatsu, and T. Takemoto, Interfacial reaction between Sn-Ag-Co solder and metals. *Materials transactions*, 2005. 46(11): p. 2394-2399.
- 16-Lin, J., et al., Effect of strain rate on joint strength and failure mode of Lead-Free solder joints. *Journal of Electronic Materials*, 2018. 47: p. 2073-2081.
- 17-Sujan, G., et al., Interfacial reaction, ball shear strength and fracture surface analysis of lead-free solder joints prepared using cobalt nanoparticle doped flux. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017. 695: p. 981-990.
- p. 2811-2822.
- 10-Liu, L., C. Andersson, and J. Liu, Thermodynamic assessment of the Sn-Co lead-free solder system. *Journal of electronic materials*, 2004. 33: p. 935-939.
- 11-Liu, P., P. Yao, and J. Liu, Effect of SiC nanoparticle additions on microstructure and microhardness of Sn-Ag-Cu solder alloy. *Journal of electronic materials*, 2008. 37: p. 874-879.
- 12-Liu, X., et al., Effect of graphene nanosheets reinforcement on the performance of Sn - Ag - Cu er. *Materials Science and Engineering: A*, 2013. 562: p. 25-32.
- 13- سجاد ازغندی راد و همکاران، "بررسی ریزساختار و خواص فیزیکی لحیم نانو کامپوزیتی حاوی درصد های مختلف نانو صفحات گرافن (SAC0307+GNSS)", نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران،