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

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

Volume 9, Number 1, 2023



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

M. H.Nourmohammadi, M.Movahedi*, A. H. Kokabi, M. Tamizi
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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.07]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره1، بهار و تابستان 1402



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

محمدهادی نورمحمدی، مجتبی موحدی*، امیرحسین کوکبی، معین تمیزی

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

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

چکیده

روند کوچک‌سازی و فشرده‌سازی تجهیزات الکترونیکی و حذف عنصر سرب از آلیاژهای لحیم‌کاری به دلیل ملاحظات زیست‌محیطی، چالش بزرگی را در زمینه طراحی و توسعه لحیم‌های جدید ایجاد کرده است. لذا اخیراً کامپوزیت‌سازی با بهره‌گیری از ذرات تقویت‌کننده به‌منظور بهبود کارآیی لحیم‌های بدون سرب مدنظر پژوهشگران قرارگرفته 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 کامپورزیت‌سازی بر مشخصه‌های 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 پیداکرد و درصد فازهای یوتکتیکی افزایش یافت. همچنین شکل ترکیبات بین‌فلزی فصل‌مشترکی با اضافه کردن کبالت از حالت حلزونی به لایه‌ای تغییر کرده و متوسط ضخامت آن‌ها حدود 13 تا 71 درصد افزایش یافته است. استحکام‌برشی لحیم‌ها با افزایش میکرو ذرات کبالت تا 38% در آلیاژ حاوی 0/4 درصد کبالت افزایش یافت؛ درحالی که در لحیم کامپوزیتی حاوی 1 درصد کبالت، کاهش استحکام برشی به دلیل آگلومره شدن میکروذرات کبالت، مشاهده شد. سطوح شکست برشی نشان داد، ماهیت شکست با افزایش درصد میکرو ذرات کبالت در لحیم کامپوزیتی از شکست نرم به‌صورت حفرات کشیده شده به شکست ترد به‌صورت تورقی تبدیل‌شده است. نتایج نشان داد آلیاژ کامپوزیتی حاوی 0/2 تا 0/4 درصد کبالت بهترین خواص ترشوندگی و استحکام کششی برشی را دارند.

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

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

1- مقدمه

لحیم‌کاری نرم از پرمصرف‌ترین فرایندهای اتصال‌دهی اجزاء الکترونیکی در صنعت الکترونیک است. در اواخر قرن 19 فرایند لحیم‌کاری تنها برای دو کاربرد ساخت اتصالات متالورژیکی و اتصالات لحیم‌کاری جهت رسانایی الکتریکی استفاده می‌شد. با آمدن عصر الکترونیک پیشرفته در قرن 20، لحیم و لحیم‌کاری، نقش مهمی در مهندسی الکترونیک پیشرفته ایفا می‌کند. از سال 1990 سالانه حدود 10^{13} اتصال لحیم در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.07]

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 انجام‌شده است و آلیاژ (SAC0307) Sn99Ag0.3Cu0.7 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 گرفته‌شده 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 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 فصل‌مشترکی 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 زیرلایه 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 β-Sn شده است [4]. همین‌طور ژانگ و همکارانش[5] عنوان کرده‌اند که با افزودن نانو ذرات آلومینیوم به آلیاژ لحیم Sn3.8Ag0.7Cu اندازه ترکیبات بین‌فلزی کاهش پیداکرده است؛ طبق تحقیقاتی که انجام‌شده است غالباً با افزایش نانو ذرات به مقدار بهینه، اندازه ترکیبات بین‌فلزی به دلیل وجود نانو ذرات به‌عنوان محل‌هایی مناسب برای جوانه‌زنی ترکیبات بین‌فلزی، ریزترشده‌اند و باعث تأثیر بر روی خواص مکانیکی و اتصال آلیاژهای لحیم‌کاری شده است [6]. در پژوهشی دیگر توسط تای و همکارانش[7] تأثیرنانو ذرات کبالت روی ساختار فصل‌مشترکی آلیاژ لحیم Sn3.8Ag0.7Cu و زیر لایه مس بعد لحیم‌کاری گزارش‌شده 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.07]

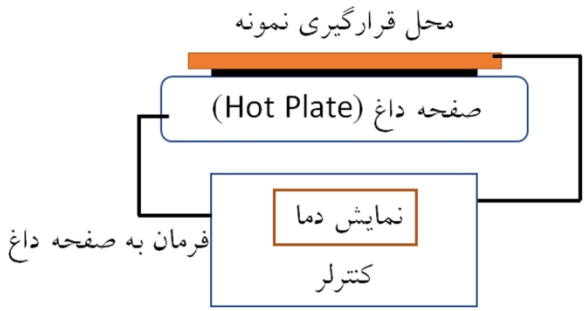
بصورت SAC0307+X%wt.Co(X= 0, 0.05, 0.2, 0.4, 1) انتخاب شد. برای ساخت آلیاژ کامپوزیتی از روش اتصال نورد انباشتی (ARB) استفاده شد.

ابتدا 5 لایه فویل آلیاژ لحیم تجاری Sn0.3Ag0.7Cu (ساخت شرکت STANNOL) آماده‌سازی و سپس بین هر لایه درصد وزنی مشخص از محلول استون حاوی ذرات کبالت اسپری و روی‌هم گذاشته شد. میانگین اندازه ذرات کبالت 3µm 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 روی‌هم گذاشته و دوباره با 60 درصد کاهش سطح مقطع، نورد شد. این عمل یک‌بار دیگر تکرار و در نهایت فویل کامپوزیتی باضخامت 200 -220 µm آماده شد.

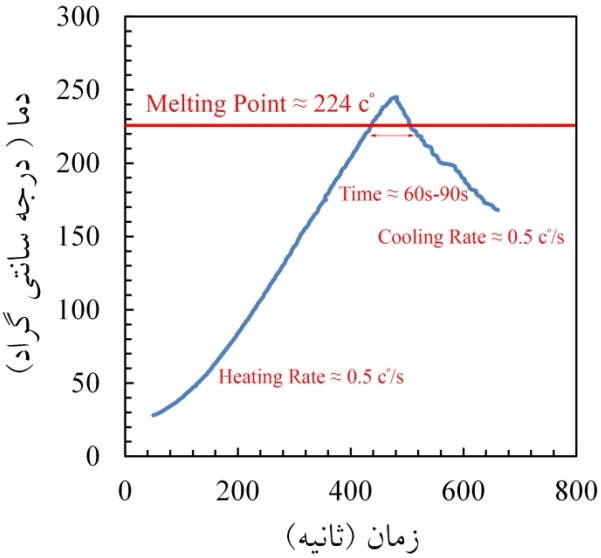
به‌منظور فرایند لحیم‌کاری، از زیر لایه فویل مس خالص به ضخامت 70 µm و روان‌ساز رزینی نیمه‌فعال استفاده شد. فرایند ذوب و لحیم‌کاری شارش‌مجدد به‌وسیله‌ی صفحه داغ مطابق شکل (1) و پروفیل دمایی شکل (2) انجام گرفت.

به‌منظور بررسی ریزساختار لحیم نرم مانند مشاهده مورفولوژی، نحوه توزیع فازها و ترکیبات بین‌فلزی، اندازه‌گیری ضخامت ترکیبات بین‌فلزی فصل‌مشترکی و زاویه ترشوندگی، مقطع عرضی نمونه‌ها برش داده‌شد و پس از سمباده و پولیش برای مشاهدات میکروسکوپی آماده شدند.

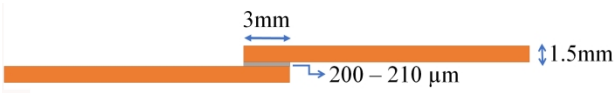
همچنین به‌منظور آشکارسازی ریزساختاری از محلول حکاکی ($2\%HCl+5\%HNO_3+93\%CH_3OH$) استفاده شد. سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشرمیدانی (FE-SEM) مجهز به آنالیزور طیف‌سنج تفرقی اشعه ایکس (EDS)، ریزساختار ترکیبات بین‌فلزی لحیم و فصل مشترک بررسی شد. استحکام مکانیکی اتصال، به‌وسیله آزمون کشش- برش صورت پذیرفت. در شکل (3) ابعاد نمونه‌های مسی آزمون کشش- برشی ارائه‌شده است. سطح هم‌پوشانی اتصال برابر $3mm^2$ x 10انتخاب شد؛ سپس آزمون کشش- برش با سرعت کشش 1 mm/min و سه مرتبه تکرار انجام شد. سطوح شکست به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی و شکست‌نگاری قرار گرفت.



شکل1- شماتیک فرایند ذوب و لحیم‌کاری شارش‌مجدد.



شکل2- پروفیل دمایی لحیم‌کاری شارش‌مجدد.



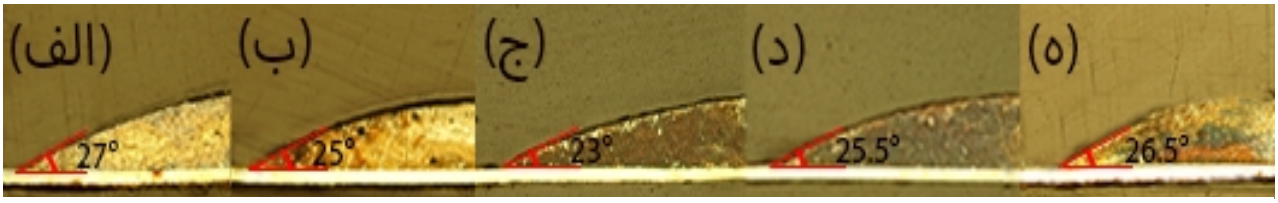
شکل3- شماتیک نمونه های تست کشش – برش.

3- نتایج و بحث

3-1- اندازه‌گیری زاویه تماس

به‌طورکلی ترشوندگی با رابطه یانگ توضیح داده می‌شود. افزایش ترشوندگی به این دلیل که سطح بیشتری برای واکنش بین مذاب و جامد ایجاد می‌کند تأثیر بسیار مهمی روی استحکام اتصال دارد. در کل ترشوندگی لحیم‌های بدون سرب ضعیف‌تر از لحیم‌های حاوی سرب است و تلاش می‌شود که با استفاده از آلیاژسازی و کامپوزیتی کردن این نقطه ضعف لحیم‌های بدون سرب مرتفع شود؛ یکی از راهکارها استفاده از نانو ذرات داخل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.07]

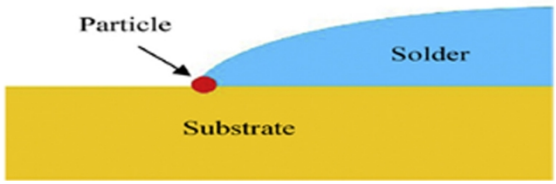


شکل4- تصویر زاویه ترشوندگی نمونه‌های الف- SAC0307 ب- SAC0307+0.05%Co ج- SAC0307+0.2%Co د- SAC0307+0.4%Co ه- SAC0307+1%Co

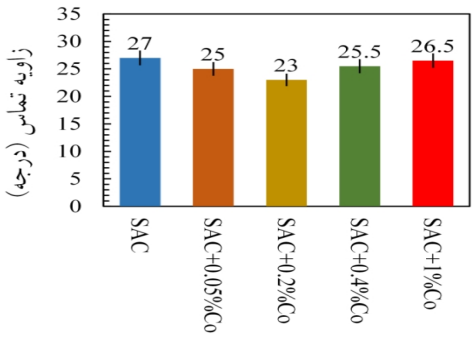
مذاب لحیم می‌باشد. نانو ذرات روی انرژی سطحی مذاب یا انرژی فصل‌مشترکی بین زیرلایه و مذاب لحیم می‌تواند تأثیرگذار باشد. درشکل (4) زاویه تماس آلیاژ لحیمSAC0307 با درصدهای مختلف میکرو ذرات کبالت، نشان داده شده است. تصور بر این است که نانو ذرات به سمت محیط کروی مذاب پخش‌شده، جدایش پیدا می‌کنند و در نقطه سه‌گانه، برانرژی‌های سطحی در تعادل تأثیر می‌گذارند؛ شکل (5) شماتیک محل قرارگیری نانو ذرات در حین لحیم‌کاری شارش‌مجدد را به‌خوبی نشان می‌دهد. برای مثال گزارش‌شده 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 SAC0307به 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 لحیم مذاب بر واحد سطح، C سطح تمرکز نانو ذرات و γ^k انرژی سطحی لحیم مذاب بر واحد سطح می‌باشند[5] .

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



شکل5- شماتیک محل قرارگرفتن نانوذرات حین لحیم‌کاری [5].



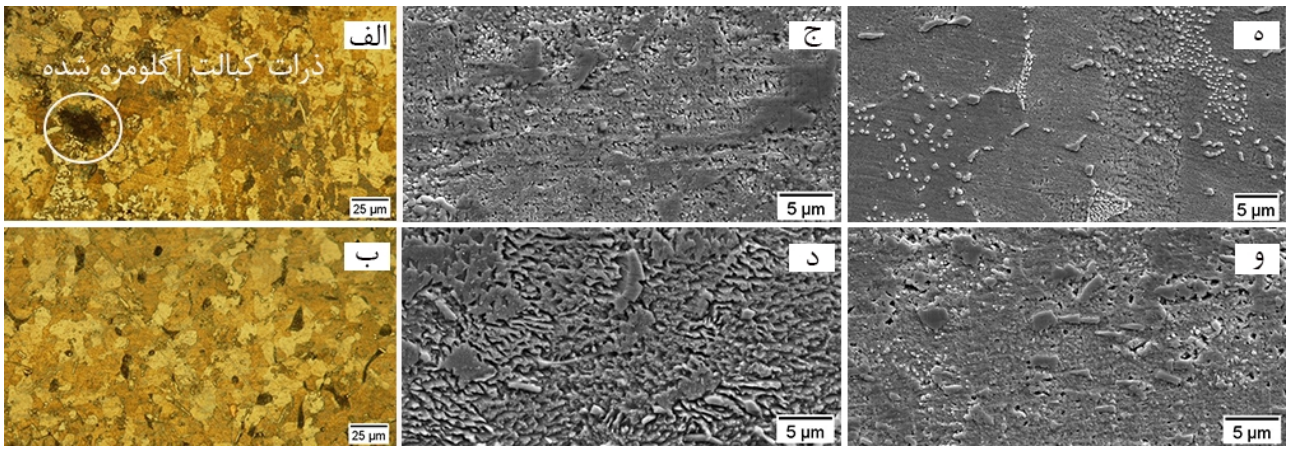
شکل6- نمودار اندازه میانگین زاویه تماس.

3-2- بررسی ریزساختار زمینه لحیم کامپوزیتی

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.07]



شکل7-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.

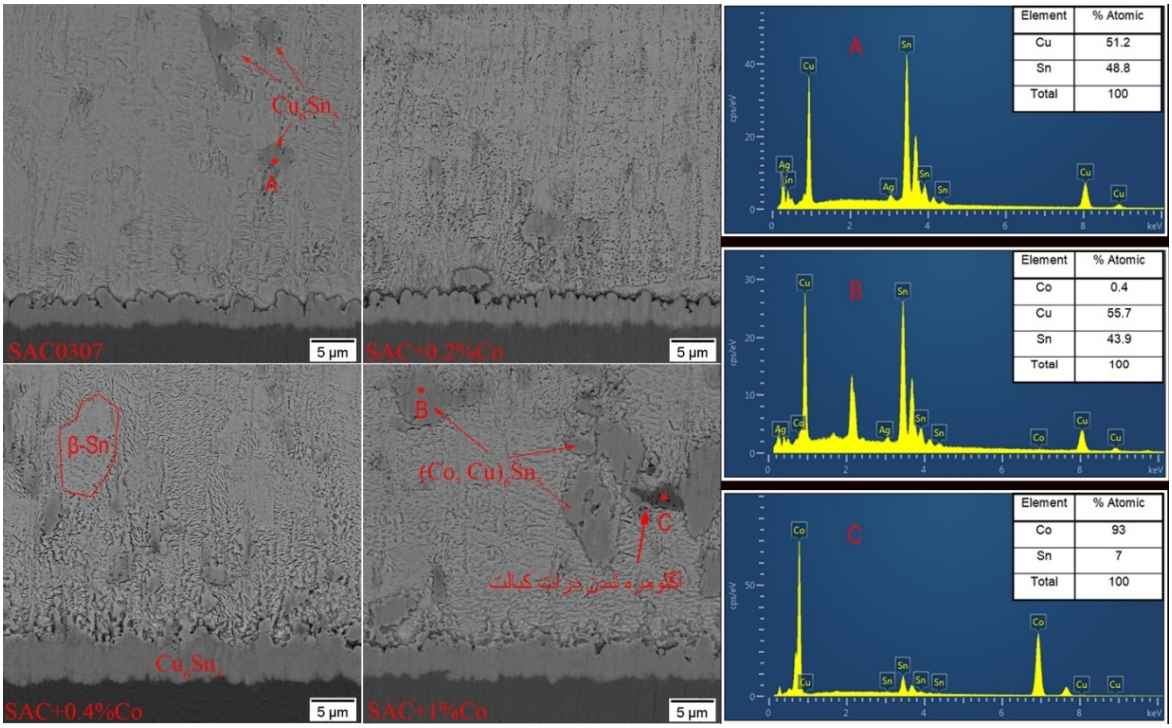
ریزساختار و مورفولوژی زمینه لحیم برای آلیاژهای 1 درصد کبالت و 0/2 درصد کبالت در تصویر (الف) و (ب) آورده شده است. آگلومره شدن ذرات کبالت در تصویر (الف) قابل‌مشاهده است. دلیل این‌امر نیروی واندروالس بین میکرو ذرات کبالت می‌باشد که در درصدهای زیاد کبالت، این نیرو توزیع مناسب ذرات کبالت را در حین لحیم‌کاری شارش‌مجدد به‌هم 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 به‌دلیل ترد بودن، مکان‌های مستعد برای رشد ترک و شکست هستند و درنتیجه استحکام اتصال را تضعیف می‌کنند. در تحقیقات نشان داده‌شد که با اضافه کردن نانو ذرات آلومینیوم و میکرو ذرات آهن به آلیاژ لحیم می‌توان اندازه این ترکیبات بین‌فلزی را کاهش داد [5]. همچنین لیو و همکارانش [12] با استفاده ازنانو صفحات گرافن (GNSs) از رشد ترکیبات بین‌فلزی فصل‌مشترکی 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 عملکرده و نفوذ اتمی را کاهش میدهد. در تحقیق دیگری در نمونه 0/1 درصد گرافن لحیم کامپوزیتی SAC0307، کاهش30 درصدی ضخامت ترکیبات بین‌فلزی فصل‌مشترکی گزارش شده است [13]. به‌طورکلی 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 فصل‌مشترکی مشارکت کنند [5, 12].

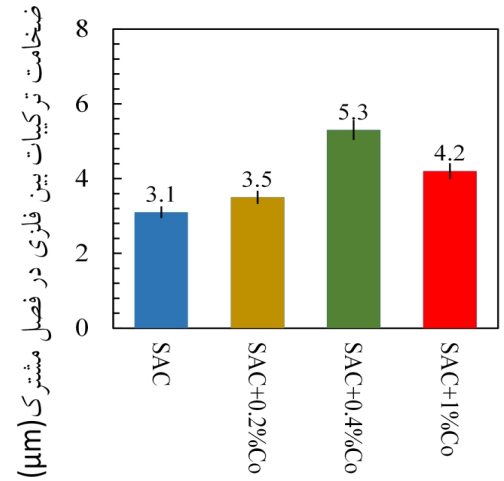
ریزساختار و مورفولوژی فصل مشترک زیرلایه مس و زمینه لحیم برای آلیاژهای مختلف در شکل (8) نشان داده‌شده است. مورفولوژی ترکیبات بین‌فلزی فصل‌مشترکی در آلیاژ لحیم SAC0307 به‌صورت حلزونی (Scallop-shaped) می‌باشد و با افزودن کبالت مورفولوژی ترکیبات بین‌فلزی فصل‌مشترکی از

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.07]



شکل8- تصاویر ریزساختاری فصل مشترک لحیم‌های کامپوزیتی حاوی درصدهای مختلف ذرات کبالت.

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 کبالت، ضخامت ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک به ترتیب 13، 71 و 42 درصد زیاد می‌شود. این موضوع را می‌توان به مشارکت کبالت در ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی 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 کبالت، ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی ضخیم‌تر و مورفولوژی به شکل لایه‌ای تغییر می‌کند. در پژوهشی دیگر [14] افزودن نانو ذرات نیکل همانند کبالت 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 فصل‌مشترکی عنوان‌شده است. در شکل (10) دلیل دیگر رشد ترکیبات بین‌فلزی در فصل‌مشترک توسط نیشیکاوا و همکارانش [15] برای نانو ذرات کبالت روی آلیاژ لحیم Sn-3.5Ag آورده شده است؛ با انجام لحیم‌کاری شارش‌مجدد، حل شدن مس داخل مذاب قلع اتفاق افتاده و در ادامه ترکیبات بین‌فلزی که روی نانو ذرات کبالت جوانه‌زنی کرده‌اند در فصل مشترک حضور می‌یابند و باعث افزایش ضخامت ترکیب بین‌فلزی در فصل‌مشترک می‌شوند.



شکل9- ضخامت ترکیبات بین‌فلزی درفصل مشترک لحیم و زیرلایه مس.

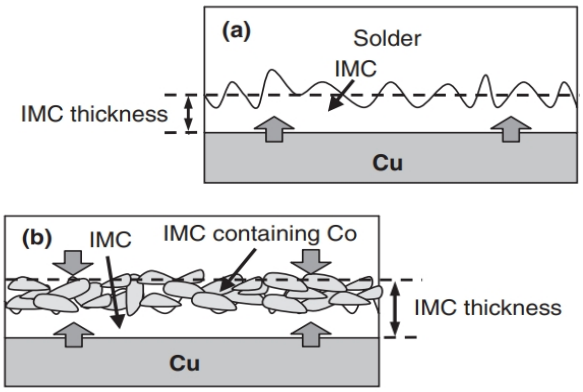
3-4- بررسی خواص مکانیکی لحیم کامپوزیتی

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

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.07]



شکل10- شماتیک رشد ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک [15].

با افزودن میکرو ذرات کبالت، ابتدا استحکام‌برشی افزایش‌یافته و سپس کاهش پیداکرده است. به‌طورکلی می‌توان مکانیزم‌های استحکام‌بخشی به‌وسیله نانو ذرات در آلیاژهای لحیم کامپوزیتی را به سه گروه زیر تقسیم کرد:

- وجود فاز ثانویه سخت در زمینه لحیم نرم که این مکانیزم، اصلی‌ترین مکانیزم استحکام‌دهی نانو ذرات می‌باشد. زمانی‌که برای تغییر شکل پلاستیک، نابجایی‌ها به نانو ذرات برخورد می‌کنند، بر اساس تئوری اوروان اگر نانو ذرات به‌اندازه کافی سخت باشند، نابجایی‌ها توانایی برش آن‌ها را ندارند و در صورت برش انرژی آن‌ها کاهش پیدا می‌کند. این‌امر قابلیت حرکت نابجایی‌ها را کاهش و سطح تنش برای تغییر فرم پلاستیک را افزایش می‌دهد.

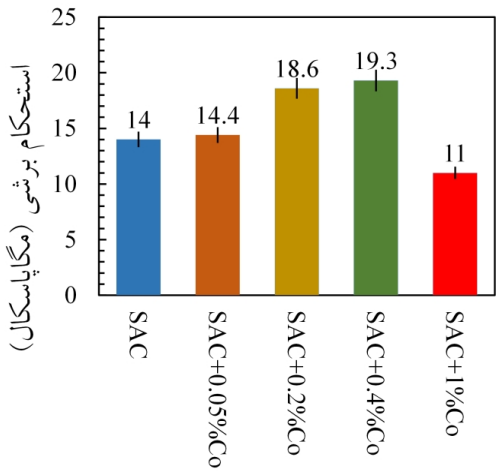
- نانو ذرات خنثی به‌دلیل اینکه با زمینه لحیم واکنش نمی‌دهند و عموماً نقطه ذوب بالایی دارند؛ مکان‌های مناسب برای جوانه‌زنی فازهای اولیه انجماد می‌باشند؛ بنابراین وجود این ذرات جوانه‌زنی ناهمگن را تشویق می‌کند و باعث کاهش اندازه دانه و افزایش مرزدانه‌ها می‌شوند. همین‌طور به‌دلیل اینکه نانو ذرات در مرزدانه حضور می‌یابند، جابجایی مرزدانه‌ها با مشکل مواجه می‌شود.

- در نانو ذرات فلزی بیشتر استحکام‌دهی از طریق محلول جامد با مکانیزم‌های اعوجاج شبکه و اتمسفرکاترل می‌باشد [16و17].

بنابراین با توجه به موارد ذکرشده به دلیل فلزی بودن ماهیت ذرات کبالت و استحکام بالای کبالت نسبت به آلیاژ لحیم SAC0307، موارد بالا به‌عنوان عوامل عمده استحکام‌بخشی برای آلیاژهای لحیم کامپوزیتی شناخته می‌شوند. در آلیاژ 1 درصد کبالت به دلیل آگلومره شدن ذرات کبالت، این مکان‌ها می‌توانند محل جوانه‌زنی و رشد ترک باشند؛ که منجر به کاهش استحکام لحیم کامپوزیتی حاوی1 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 درصدهای 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 مشخصه‌های شکست نرم تلقی می‌شود.

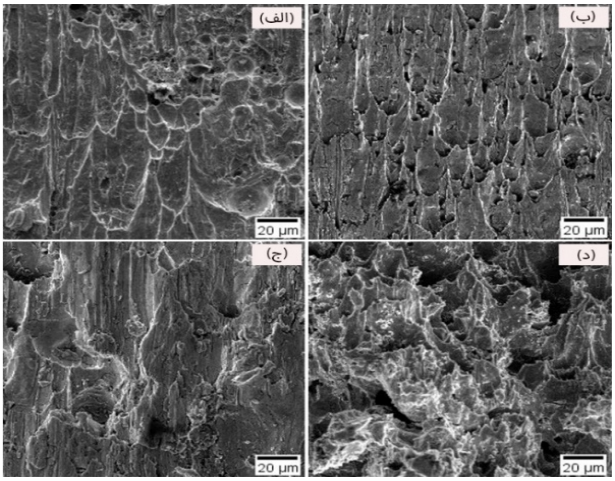


شکل11- نمودار استحکام کشش – برش برای آلیاژهای لحیم کامپوزیتی حاوی درصدهای مختلف ذرات کبالت.

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 بین‌فلزی فصل‌مشترکی و یا مرز ترکیب بین‌فلزی فصل‌مشترکی و زمینه لحیم کامپوزیتی بوده است. همین‌طور با توجه به تصویر لحیم کامپوزیتی با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.07]

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



شکل12- تصاویر سطح شکست الف-SAC ب-SAC+0.2%Co ج- SAC+0.4%Co د- SAC+1%Co .

4- نتیجه‌گیری

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 محل‌های مناسب جوانه‌زنی ترکیبات بین‌فلزی باعث کاهش اندازه ترکیبات بین‌فلزی شد؛ همینطور درصد فاز یوتکتیکی افزایش یافت.

- بطور کلی با افزایش درصد میکرو ذرات کبالت در آلیاژ لحیم کامپوزیتی، ضخامت ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک تا 71 درصد افزایش یافت. حضور ذرات کبالت در نزدیکی فصل مشترک منجر به تشویق جوانه‌زنی ترکیبات بین‌فلزی و تأثیر آلیاژی روی ترکیبات بین‌فلزی فصل‌مشترکی می‌شود.

- استحکام‌برشی آلیاژ لحیم کامپوزیتی حاوی 0/4 درصد میکرو ذرات کبالت، 38 درصد افزایش استحکام نسبت به آلیاژ لحیم SAC0307نشان داد؛ همچنین با افزایش درصد کبالت نوع 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 استحکام‌برشی گردید.

بنابراین آلیاژ لحیم کامپوزیتی حاوی 0/2 الی 0/4 درصد میکرو ذرات کبالت، ترکیب بهینه از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی می‌باشد.

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-(TiO 2/ZnO) nano-composite solder alloys. in ۲۴۴ ۰۲۱th 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 inliquid 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):

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.07]

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، سال‌هشتم، شماره 1، بهار و تابستان 1401.
14-Taya, S., et al., Influence of Ninanoparticle on the morphology and growth of interfacial intermetallic compounds between Sne3. 8Age0. 7Cu 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.07]