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

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

Volume 11, Number 1, 2025



Development and characterization of lead-free Sn-Zn solder produced by angular accumulative extrusion as an alternative to commercial Sn-Pb solder

M. K. Vojdanpak[1] ,M. J. Azadi[1], B. Niroumand[1*], A. Maleki[2]
1-Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran.
2-Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran.

Received 26 December 2025 ; Accepted 19 April 2025

Abstract

Eutectic tin-zinc solder can be a suitable replacement for tin-lead solder due to its low cost, suitable melting temperature, and desirable mechanical properties. However, due to the high vapor pressure of zinc, manufacturing this alloy using the melt method is very difficult and expensive. In this study, Sn-8.9%Zn lead-free solder was fabricated using the angular accumulative extrusion method of tin sheets and zinc powder in 10, 12, and 15 passes, and characterized. Microstructural investigations were performed using optical and scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, and X-ray diffraction spectroscopy. The shear strength and hardness of the solders were also measured. The results showed that after 12 passes, the dispersion of zinc powder in the tin matrix was improved, and the dissolution of zinc was confirmed by a decrease in the XRD peak intensities. However, after 15 passes, cracks appeared in the structure. The shear strength of the tin-zinc solder joint was about 60% higher than that of commercial tin-lead solder. The wetting angle of this solder on copper was measured to be 21 degrees, and its electrical resistance was measured to be 4.1 nanoohms, which is within the acceptable range for electronic applications, although it has a weaker performance compared to tin-lead solder.

Keywords: Lead-free Solder,Sn-Zn alloy, Sn-Pb alloy, Angular Accumulative Extrusion, Wettability, Shear strenght, Electrical conductivity.

*Corresponding Author: B. Niroumand, behzn@cc.iut.ac.ir

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.20]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال یازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1404

توسعه و مشخصه‌یابی لحیم بدون سرب قلع-روی تولید شده به روش اکستروژن تجمعی زاویه‌ای به‌عنوان جایگزین لحیم قلع-سرب تجاری

محمد کیان وجدان‌پاک[1]، محمد جواد آزادی[1]، بهزاد نیرومند[1*]، علی مالکی[2]

1-دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان 84156-83111، ایران.

2-دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان 84156-83111، ایران.

دریافت مقاله: 1403/10/06 ؛ پذیرش مقاله: 1404/01/30

چکیده

لحیم یوتکتیک قلع-روی به‌دلیل ارزان بودن، دمای ذوب مناسب و خواص مکانیکی مطلوب، می‌تواند جایگزین مناسبی برای لحیم قلع -سرب، باشد. اما به دلیل فشار بخار بالای روی، ساخت این آلیاژ به‌روش ذوبی بسیار مشکل و پرهزینه است. در این پژوهش لحیم بدون سرب Sn-8.9 wt% Zn با استفاده از روش اکستروژن تجمعی زاویه‌ای ورق قلع و پودر روی در 10، 12 و 15 پاس ساخته و مشخصه‌یابی شد. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس و طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس انجام شد. همچنین استحکام برشی و سختی لحیم‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که پس از12 پاس، پخش‌شوندگی پودر روی در زمینه قلع بهبود یافته و انحلال روی با کاهش شدت پیک‌های XRD تأیید شد. اما با انجام15 پاس، ترک‌هایی در ساختار ایجاد شد. استحکام برشی اتصال لحیم قلع-روی حدود 60% بیشتر از لحیم قلع-سرب تجاری بود. زاویه ترشوندگی این لحیم بر روی مس 21 درجه و مقاومت الکتریکی آن 4/1 نانو اهم اندازه‌گیری شد که در محدوده قابل قبول برای کاربردهای الکترونیکی است، هرچند نسبت به لحیم قلع-سرب عملکرد ضعیف‌تری دارد.

کلمات کلیدی: لحیم بدون سرب، آلیاژ قلع-روی، آلیاژ قلع-سرب، اکستروژن تجمعی زاویه‌ای، ترشوندگی، استحکام برشی، هدایت الکتریکی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: بهزاد نیرومند، behzn@cc.iut.ac.ir.

1- مقدمه

لحیم‌کاری فرایندی است که طی آن دو قطعه بدون ذوب شدن فلزپایه، از طریق ذوب آلیاژ لحیم و پدیده نفوذ به یکدیگر متصل می‌شوند. این روش نقشی اساسی در ایجاد اتصالات الکترونیکی ایفا می‌کند و دوام آن برای عملکرد بهینه تجهیزات الکترونیکی ضروری است. با افزایش پیچیدگی دستگاه‌های الکترونیکی، توسعه آلیاژهای پیشرفته لحیم از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار شده است[1].

لحیم‌های یوتکتیک قلع-سرب در دهه‌های گذشته به عنوان یکی از موفق‌ترین آلیاژهای لحیم شناخته شده‌اند و به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی خود، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این آلیاژها به‌طور

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.20]

عمده شامل 63 درصد وزنی قلع به‌عنوان فلز اصلی و 37 درصد وزنی سرب هستند و نقطه ذوب آن‌ها حدود 183 درجه سانتی‌گراد است. با این حال، نگرانی‌های جدی درباره سمی بودن سرب باعث شده است که جوامع علمی و نهادهای دولتی اقداماتی جدی برای محدود کردن استفاده از آن در صنایع مختلف، به‌ویژه صنعت الکترونیک، انجام دهند. در همین راستا، در سال 2000 میلادی، دو قانون کلیدی به تصویب رسید که بر اساس آن، سرب باید از تجهیزات و اجزای الکترونیکی که به پایان عمر خود رسیده‌اند، حذف گردد. همچنین پس از جولای 2006، استفاده از سرب در تجهیزات الکترونیکی به‌طور کامل ممنوع شد [2].

برای حذف سرب از آلیاژهای لحیم، لازم است جایگزین مناسبی با ویژگی‌های مطلوب انتخاب شود. لحیم‌کاری بدون سرب در حال حاضر یکی از موضوعات پژوهشی کلیدی به شمار می‌رود. محققان به دنبال توسعه آلیاژهایی هستند که علاوه بر سازگاری با محیط‌زیست، خواص مکانیکی، شیمیایی و حرارتی مطلوبی داشته باشند و بتوانند عملکرد مشابهی با لحیم‌های سرب‌دار ارائه دهند[3و4]. انتظار می‌رود آلیاژهایی که به‌عنوان جایگزین سرب انتخاب می‌شوند، ویژگی‌هایی برابر یا حتی برتر از آلیاژهای قلع-سرب ارائه دهند. عناصر جایگزین سرب باید ویژگی‌های مهمی را دارا باشند، که می‌توان به ایجاد خواص مطلوب در ترکیب با سایر عناصر، قابلیت تولید با فناوری‌ها و روش‌های موجود، داشتن دمای ذوب پایین، کاهش کشش سطحی و بهبود انعطاف‌پذیری اشاره کرد. علاوه بر این، این عناصر باید بتوانند از تبدیل قلع β به قلع α جلوگیری کنند، زیرا این تبدیل منجر به تغییرات حجمی ناخواسته، افت خواص و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان آلیاژ می‌شود[2].

در میان لحیم‌های بدون سرب، لحیم‌های قلع-روی (دمای ذوب 198 درجه سانتی‌گراد) نزدیک‌ترین دمای ذوب را به لحیم‌های قلع-سرب با دمای ذوب 183 درجه سانتی‌گراد دارند. لحیم‌های بدون سرب قلع-مس، قلع-نقره و قلع-نقره-مس با دمای ذوب بالای 217 درجه سانتی‌گراد از این نظر مناسب نیستند. لحیم‌های قلع-بیسموت، قلع-ایندیوم و قلع-روی-بیسموت با دمای ذوب 109 تا 138 درجه سانتی‌گراد برای لحیم‌کاری در دمای پایین ایده‌آل هستند اما ممکن است در دماهای بالا یا محیط‌های صنعتی محدودیت‌هایی ایجاد کند به‌عنوان مثال خواص خزشی این آلیاژها در دمای اتاق، مطلوب نیست. از این‌رو، آلیاژهای قلع-روی به‌عنوان یکی از گزینه‌های جایگزین برای لحیم‌های قلع-سرب مطرح هستند [5]. ترکیب یوتکتیک این آلیاژ (Sn–9wt% Zn) با دمای ذوب حدود 198 درجه سانتی‌گراد، شباهت زیادی به لحیم‌های قلع-سرب دارد. این لحیم دارای خواص مکانیکی مطلوبی، از جمله استحکام کششی 60 مگاپاسکال، استحکام تسلیم 30 مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول 20 درصد است. علاوه بر این، لحیم‌های قلع-روی نسبت به سایر لحیم‌های بدون سرب، قیمت کمتری دارند و از نظر خواص مکانیکی عملکرد بهتری ارائه می‌دهند. با این حال، اکسید شدن روی در این آلیاژ می‌تواند مانع از ایجاد ترشوندگی مناسب شود که یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از این لحیم است [6و7].

گارسیا و همکاران [8] آلیاژ قلع-روی را با مقادیر 4، 9 و 12 درصد وزنی روی، با استفاده از کوره الکتریکی مقاومتی ذوب کرده و پس از انجام فرایند همگن‌سازی، ریخته‌گری کردند. نتایج نشان داد که آلیاژ یوتکتیک حاوی 9 درصد وزنی روی، با استحکام برشی نهایی 60 مگاپاسکال، بالاترین استحکام را در میان سایر آلیاژهای قلع با درصدهای مختلف روی دارا بود [8]. روش‌های ذوبی معمولاً به‌عنوان تکنیک اصلی در تولید آلیاژ قلع-روی به‌کار می‌روند. با این وجود، این روش‌ها با چالش‌های جدی همچون فشار بخار بالا و اکسیداسیون شدید روی مواجه هستند [9]. برای غلبه بر این موانع، در این پژوهش از یک رویکرد غیرذوبی که شامل فرایند اکستروژن تجمعی زاویه‌ای و پودر روی برای تولید لحیم بدون سرب قلع-روی استفاده شد. انتظار می‌رود که حذف مرحله ذوب از فرایند آلیاژسازی، به بهبود کیفیت نهایی آلیاژ لحیم بدون سرب منجر شود.

در پژوهش کریمی و همکاران [10] ساخت لحیم بدون سرب قلع-مس با نانو ذرات تقویت کننده اکسید سیلیسیوم با استفاده

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.20]

از قالب اکستروژن زاویه‌ای تجمعی انجام شد. مشاهده شد که استحکام برشی حالت بدون ذرات تقویت کننده 36 مگاپاسکال و با اضافه کردن نانوذرات به مقدار 0/5 و 1 درصد وزنی استحکام برشی به‌ترتیب 41 و 44 درصد افزایش می‌یابد [10].

روش اکستروژن تجمعی زاویه‌ای در قالبی ترکیبی از اکستروژن و کانال غیرمساوی زاویه‌دار انجام و تأثیر تعداد پاس‌ها بر ساختار آلیاژ مطالعه شده است. هدف از این فرایند، توزیع یکنواخت ذرات ریز شده پودر روی و انحلال نسبی آن‌ها در زمینه قلع با عملیات مکانیکی است که در مرحله لحیم‌کاری و ذوب آلیاژ، منجر به ایجاد ترکیب یکنواخت در محل اتصال شود. یکی از مزایای این روش، امکان انجام آلیاژسازی بدون نیاز به ذوب اولیه مواد است که می‌تواند فرایند تولید را ساده‌تر و کارآمدتر کند.

با توجه به محدودیت‌های استفاده از سرب در لحیم، لحیم‌های بدون سرب اهمیت یافته‌اند. این پژوهش به ساخت و مشخصه‌یابی لحیم بدون سرب قلع-روی با روش اکستروژن تجمعی زاویه‌ای می‌پردازد. تاکنون تحقیقات کمی در مورد این روش، به‌ویژه بدون ذرات تقویت کننده، انجام شده است. در این مطالعه، تاثیر تعداد پاس‌های اکستروژن بررسی و شرایط بهینه ساخت تعیین می‌شود.

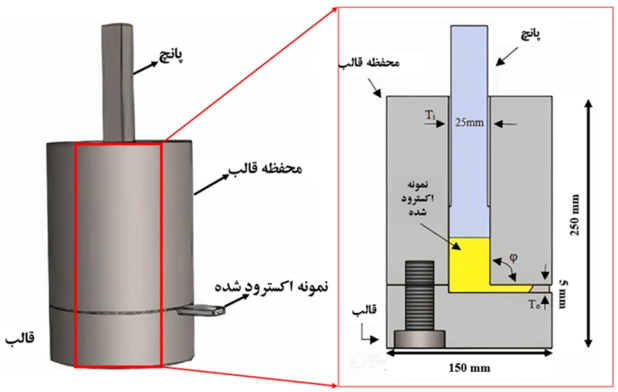
2-مواد و روش پژوهش

در این پژوهش از ورق قلع با خلوص 99 درصد و پودر روی با خلوص 99/5 درصد استفاده شد. ترکیب شیمیایی ورق‌های قلع و پودر روی به‌روش طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی اندازه‌گیری و در جدول(1) آورده شده است.

جدول1-ترکیب شیمیایی ورق‌های قلع و روی به‌روش طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی

عناصر	Sn	Zn	Cu	Pb	K	Na
ورق قلع	۹۹	-	۰/۱	۰/٤	۰/۲	۰/۳
پودر روی	-	۹۹/۵	۰/۰٤	۰/۰٦	۰/۲	۰/۲

روش ساخت نمونه‌ها در این پژوهش اکستروژن تجمعی زاویه‌ای می‌باشد؛ استفاده از این روش در آلیاژسازی و کامپوزیت‌سازی یک نوآوری به‌حساب می‌آید. شکل(1) طرحواره‌ای از قالب اکستروژن تجمعی زاویه‌ای استفاده شده را نشان می‌دهد. قالب از جنس فولاد CK45 با سختی 45 راکول سی است، ابعاد ورودی قالب 25×25 میلی‌متر و خروجی آن 25×5 میلی‌متر است که سطح مقطع بعد از اکستروژن 80 درصد کاهش می‌یابد. آلیاژ لحیم بدون سرب Sn-8.9Zn (درصد وزنی) در چهار مرحله ساخته شد.



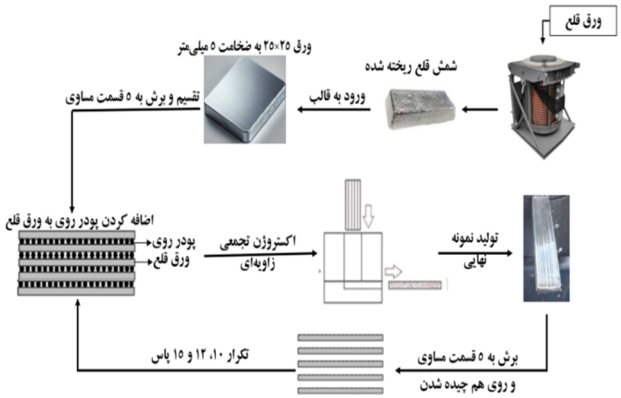
شکل1- طرحواره قالب اکستروژن تجمعی زاویه‌ای [10].

مطابق شکل(2) مرحله اول ذوب کردن و شمش کردن قلع خالص در قالب مکعب مستطیل به ابعاد سطح قاعده‌ی 25×25 میلی‌متر، مرحله دوم تسمه کردن شمش قلع با استفاده از قالب اکستروژن تجمعی زاویه‌ای، مرحله سوم اضافه کردن پودر روی به نسبت وزنی 8/9 درصد وزنی به قلع، که ترکیب یوتکتیک قلع-روی را ایجاد می‌کند و مرحله چهارم شامل 10، 12 و 15 پاس همراه با چرخش 90 درجه بعد از هر پاس توسط قالب اکستروژن تجمعی است. پس از هر پاس، تسمه حاصله از طول به 5 قسمت مساوی بریده و تسمه‌ها روی هم چیده شده و آماده سیکل بعدی می‌شود.

انتظار می‌رود که عملیات اکستروژن تجمعی زاویه دار، به علت کاهش سطح مقطع و تغییر زاویه به‌اندازه 90 درجه، تغییر شکل پلاستیک شدیدی را در نمونه ایجاد کرده و باعث پخش و توزیع مناسب ذرات روی در زمینه شود. برای بررسی تاثیر ذوب مجدد بر ریزساختار، خواص مکانیکی و ترشوندگی لحیم بدون سرب، آزمون‌های ذوب مجدد بر روی آلیاژهای قلع-روی ساخته شده و یک آلیاژ قلع-سرب تجاری انجام شد. برای این

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.20]

کار، دو ورق مسی به ضخامت 3 میلی‌متر و ابعاد 100 در 20 میلی‌متر آماده و سطح آن‌ها با سنباده از هرگونه آلودگی پاکسازی و با اتانول شستشو داده شد. سپس در نمونه‌های جداگانه وزن یکسان از آلیاژ قلع-روی و آلیاژ قلع-سرب پس از آغشته شدن به روغن لحیم آلمانی برند لاتفت، بین دو ورق مس قرار گرفت. ورق‌ها با گیره روی هم ثابت شده و مجموعه مونتاژ شده به مدت 5 دقیقه در دمای 350 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و در کوره سرد شدند. دما و زمان بیان شده طی انجام آزمون‌های متعدد و با سعی و خطا حاصل شد.

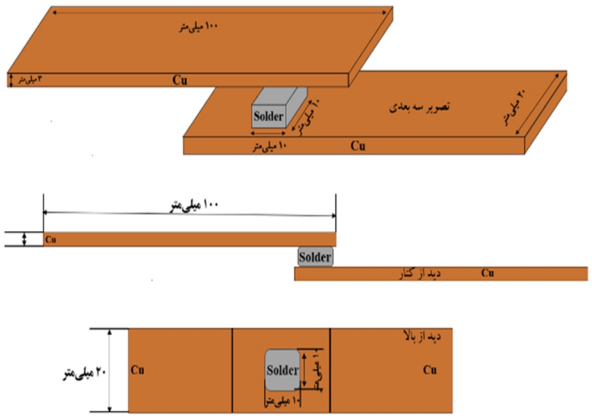


شکل2- طرحواره مراحل ساخت ورق لحیم بدون سرب Sn-Zn

بعد از سرد شدن نمونه‌ها، آزمون برش بر روی آن‌ها انجام شد و نیروی بیشینه کششی قابل تحمل قبل از شکست اتصال اندازه‌گیری شد. از سطح اتصال ورق‌های جدا شده تصویربرداری انجام گرفت و با استفاده از نرم‌افزار Image J مساحت محل اتصال اندازه‌گیری شد و در نهایت تنش برشی اتصال لحیم به‌دست آمد. این روش برای به‌دست آوردن استحکام برشی لحیم‌ها مرسوم است. شکل(3) طرحواره نمونه‌های ساخته شده برای آزمون برش را نشان می‌دهد. برای محاسبه چقرمگی نمونه‌ها با استفاده از نتایج استحکام برشی و نمودارهای بدست آمده و نرم افزار Originpro 2024 مساحت زیر نمودار محاسبه شد و چقرمگی نمونه‌ها بدست آمد.

برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها پس از هر پاس اکستروژن تجمعی، پس از آماده‌سازی سطح، سطح نمونه‌ها با محلول شامل 95% اتانول و 5% اسید نیتریک حکاکی شیمیایی شده و توسط میکروسکوپ نوری Nikon Epihot 300 بررسی شد.

جهت ارزیابی ترکنندگی لحیم از آزمون قطره بنشسته استفاده شد، به این صورت که ابعاد یکسان (شکل مربعی با اضلاع 0/5 میلی‌متر و ضخامت 0/3 میلی‌متر) و وزن یکسان (0/8 گرم) از هر یک از آلیاژهای قلع-روی و قلع-سرب روی یک زیرلایه مسی به ضخامت 3 میلی‌متر که سطح آن با سنباده از آلودگی تمیز شده بود و سپس با پولیش به کمترین زبری سطح ممکن رسیده بود، قرار گرفت. به‌منظور برقراری اتصال مناسب بین لحیم و زیرلایه، سطح ورق مسی به روغن لحیم لاتفت آغشته شد. سپس مجموعه به‌مدت 5 دقیقه در کوره مقاومتی در دمای 350 درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و در کوره خنک شد. پس از سرد شدن نمونه‌ها، زاویه تماس از قطرات منجمد شده با استفاده از دستگاه CA*500*-A ساخت شرکت شریف سولار اندازه‌گیری شد.



شکل3- طرحواره نمونه های آزمون برش.

برای بررسی مقاومت الکتریکی نمونه‌ها از آزمون پروب چهار نقطه‌ای استفاده شد. در این آزمون پروب‌های اول و آخر برای تولید جریان و پروب‌های میانی برای اندازه‌گیری ولتاژ استفاده می‌شوند. نمونه‌های استفاده شده در این پژوهش به ضخامت 4/5±0/5، عرض 5 و طول 25 میلی‌متر آماده شدند و سپس آزمون پروب چهارنقطه‌ای بر روی آن‌ها انجام گردید. در انتها به کمک رابطه $\rho=R\,(A/L)$ مقاومت الکتریکی ویژه آن‌ها محاسبه شد.

به‌منظور اندازه‌گیری تغییرات سختی از دستگاه Microhardness Koopa مدل MH3 با زمان نشست 10 ثانیه و مقدار بار 25 گرم استفاده شد. در نهایت نتایج حاصل از این آزمایش براساس

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.20]

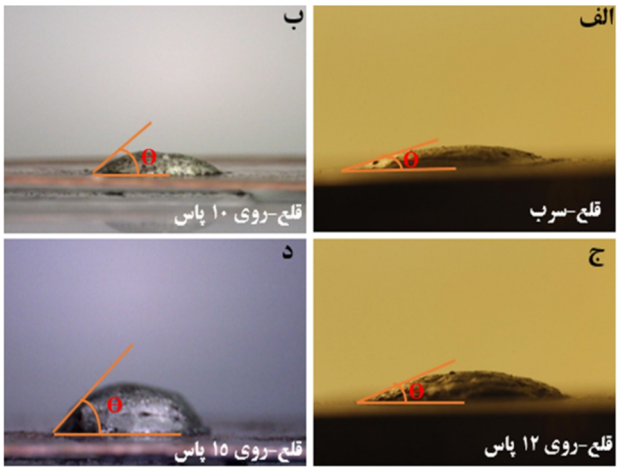
اندازه‌گیری قطر فرو رونده هرمی شکل دستگاه انجام و اعداد برحسب معیار سختی ویکرز گزارش شد.

تشخیص فازهای موجود در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تفرق پراش پرتو ایکس مدل Philips X'pert-MPD انجام شد. این آزمایش تحت ولتاژ 40 کیلووات و جریان 30 میلی آمپر و طول موج 1/54 آنگستروم صورت گرفت. اندازه‌گیری‌ها با گام‌های 0/05درجه و در حالت Cu kα جریان 30 میلی آمپر انجام شد.

3-نتایج و بحث

3-1-ترشوندگی

با انجام فرایند اکستروژن تجمعی زاویه‌دار با کاهش 80 درصدی سطح مقطع در هر پاس و زاویه 90 درجه، تغییرشکل پلاستیک شدیدی در نمونه ایجادشده و اصطکاک شدیدی نیز بین قالب و آلیاژ ایجاد می‌شود که دمای نمونه را نیز کمی بالاتر از دمای محیط می‌برد و مقدار ناچیزی اکسید بر روی هر لایه تشکیل می‌شود. با افزایش تعداد پاس اکستروژن، تعداد لایه‌های لحیم به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد بنابراین با افزایش بیش‌ازحد تعداد پاس اکستروژن، میزان اکسید قابل‌توجهی در لحیم تشکیل می‌شود که می‌تواند مقاومت به اکسیداسیون لحیم را کاهش دهد. این اکسید به‌عنوان یک سد عمل کرده و جلوی پیشروی و پخش شدن مذاب را می‌گیرد و منجر به افزایش زاویه ترشوندگی می‌شود. در این آزمون زاویه ترشوندگی دو آلیاژ لحیم قلع-سرب و قلع-روی با زیرلایه مسی با 3 بار تکرار بررسی شد. در شکل(4) تصویر زاویه تماس آلیاژ قلع-سرب و قلع-روی تولید شده در 10، 12 و 15 پاس مشاهده می‌شود. مشاهده می‌شود که زاویه ترشوندگی قطره در آلیاژ قلع-روی در10، 12 و 15 پاس به ترتیب حدود 30±4، 21±5 و 35±2 درجه و زاویه ترشوندگی قطره در آلیاژ قلع-سرب تجاری حدود 15±4 درجه است. نزدیک‌ترین ترشوندگی به آلیاژ قلع-سرب، در آلیاژ قلع-روی با 12 پاس اکستروژن تجمعی زاویه‌ای مشاهده شد که اختلاف آن به اندازه کافی کم است که بتوان آن را رقیبی برای آلیاژ قلع-سرب تجاری در نظر گرفت.



شکل4-تصویر قطره بنشسته آلیاژ الف- قلع-سرب تجاری، ب- قلع-روی در 10 پاس، ج- قلع-روی در 12 پاس و د- قلع-روی در 15 پاس.

بر این اساس 12 پاس اکستروژن تجمعی زاویه‌ای فرایند مناسب از نظر ایجاد زاویه تماس قابل‌قبول در نظر گرفته شد.

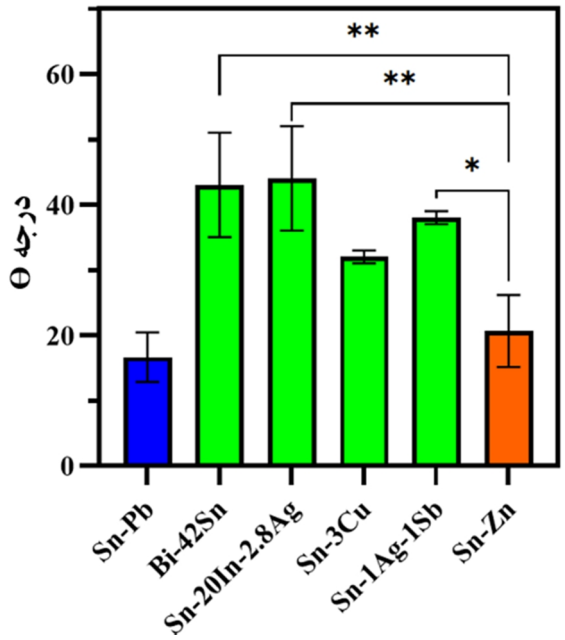
میزان ترشوندگی گزارش شده توسط آبتو و همکاران [11] برای چند نوع آلیاژ لحیم در پژوهش‌های قبلی، به همراه یافته‌های این پژوهش در شکل(5) به صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است. این اطلاعات برای مقایسه میزان ترشوندگی آلیاژهای لحیم بسیار مناسب است زیرا برای تمامی آن‌ها از یک نوع فلاکس استفاده شده است. همان‌طور که مشخص است زاویه ترشوندگی در پژوهش حاضر به صورت معناداری از برخی نمونه‌های پژوهش‌های پیشین بهتر و قابل رقابت با زاویه ترشوندگی لحیم تجاری قلع-سرب است.

3-2-ریزساختار

در راستای ساخت آلیاژ یوتکتیک قلع-روی و جهت بررسی اثر فرایند اکستروژن تجمعی زاویه‌ای بر آلیاژسازی، چندین نمونه با استفاده از ورق قلع و پودر روی ساخته شد. فرایند اکستروژن تجمعی زاویه‌ای بر روی نمونه‌ها تا 10، 12 و 15 پاس انجام شد. با توجه بررسی‌های انجام شده در طی این پژوهش، نمونه قلع-روی در پاس 15ام به بعد دچار ترک در تسمه شد که در شکل(6) مشاهده می‌شود. دلیل این ترک‌ها تنش برشی بالای وارد شده در هر پاس و همچنین ایجاد اکسید در طی پاس‌های آزمایش می‌تواند باشد و با توجه به این نتیجه این نمونه برای

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.20]

ادامه پژوهش مورد بررسی قرار نگرفت. افزایش تعداد پاس‌ها چسبندگی بین لایه‌ها و خرد شدن پودرهای روی را در پی داشت.

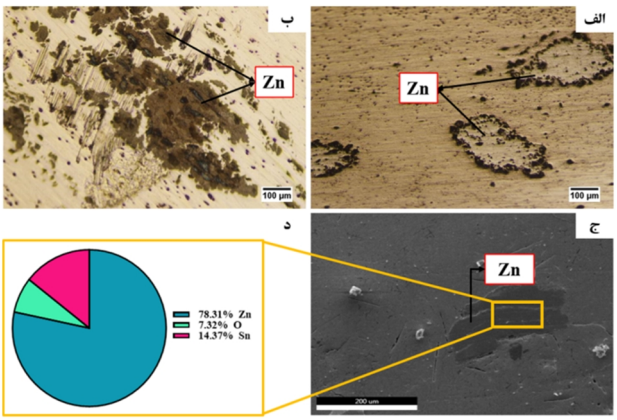


شکل5- زاویه ترشوندگی لحیم بدون سرب *Sn-Zn* و پژوهش‌های پیشین و لحیم *Sn-Pb* تجاری ($p^{*}< 0.05$) [11].



شکل6-ترک‌های موجود در نمونه قلع-روی 15 پاس.

شکل (7-الف) ساختار میکروسکوپی نوری نمونه قلع-روی 10 پاس و پیکان‌های روی شکل دانه‌های کلوخه شده پودر روی را نشان می‌دهد. ذرات کلوخه شده روی در این شکل تایید می‌کنند که در 10 پاس روی در زمینه قلع به‌خوبی پخش نشده است. شکل(7-ب) نشان می‌دهد که افزایش تعداد پاس تا 12 بنظر می‌رسد ذرات روی در اثر افزایش تعداد پاس ابتدا دچار لهیدگی و خوردایش کرده‌اند. به دنبال این پدیده توزیع ذرات روی در زمینه قلع یکنواخت‌تر گردیده است. شایان ذکر است افزایش ظاهری نواحی مربوط به روی ناشی از لهیدگی این ذرات در زمینه قلع است. همچنین در شکل (7-ج) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه‌های قلع-روی و در شکل (7-د) نتایج آزمون EDS، درصد وزنی عناصر موجود در نواحی غنی از روی در این نمونه مشاهده می‌شود. این نتیجه وجود قلع در این کلوخه‌ها و همچنین اکسید شدن نمونه‌ها در طی پاس‌های اکستروژن تجمعی زاویه‌ای به دلیل بالا رفتن دمای نمونه‌ها طی عملیات را تایید می‌کند. با توجه به نتایج تحلیل ریزساختار نمونه‌های قلع-روی و پراکندگی مناسب‌تر ذرات روی در زمینه قلع در طی 12 پاس، همچنین با توجه به نتایج آزمون ترشوندگی، نمونه بهینه با 12 پاس در بین نمونه‌های 10، 12 و 15 پاس انتخاب شد و در ادامه خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی آن با آلیاژ قلع-سرب مقایسه شد.



شکل7-ریزساختار نمونه قلع-روی طی الف- 10 پاس، ب- 12 پاس، ج- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه 12 پاس و د- نتیجه آزمون *EDS* از ناحیه مشخص شده.

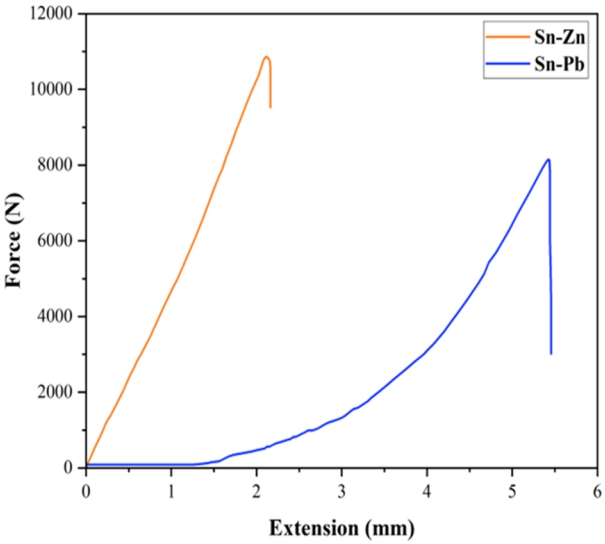
3-3-خواص مکانیکی

برای اطمینان از عملکرد مطلوب لحیم آلیاژ قلع-روی ساخته شده، این لحیم باید بتواند در محل اتصال، خواص مکانیکی مناسبی از خود نشان دهد. بدین منظور خواص نمونه‌های ساخته شده با یک نمونه لحیم تجاری مورد استفاده در بازار مقایسه شد.

شکل(8) نمودار تست برش آلیاژ قلع-روی و آلیاژ قلع-سرب تجاری را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که میانگین بیشینه نیرویی که نمونه قلع-سرب تحمل می‌کند معادل 8830 نیوتن می‌باشد. سطح شکست نمونه قلع-سرب در شکل(9-الف) نشان داده شده است. بخش مشکی رنگ نشان داده شده،

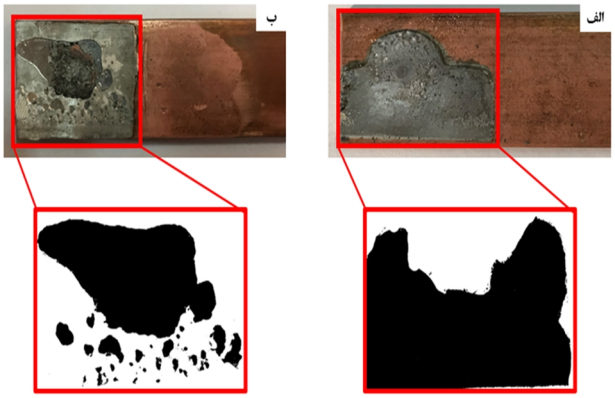
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.20]

میانگین بخش‌های تحت تاثیر شکست و شکل ناحیه اتصال با مساحت 2/056 سانتی‌متر مربع است. بنابراین استحکام برشی نمونه حدود 43 مگاپاسکال می‌باشد. مطابق با شکل(8) میانگین بیشینه نیروی برشی وارده به به نمونه متصل شده با آلیاژ قلع-روی معادل 11075 نیوتن، و براساس شکل(9-ب) میانگین مساحت سطح اتصال در نمونه قلع-روی برابر 1/606 سانتی‌متر مربع اندازه‌گیری شد. در نتیجه، استحکام برشی نمونه قلع-روی حدود 69 مگاپاسکال محاسبه شد. با توجه به نتایج، استحکام برشی حاصل از آلیاژ قلع-روی 60% از استحکام برشی حاصل از آلیاژ قلع-سرب بیشتر است. کریمی و همکاران [10]، به ساخت لحیم بدون سرب قلع-مس به روش اکستروژن تجمعی زاویه‌ای پرداختند و استحکام برشی 30/4 مگاپاسکال را گزارش دادند. همچنین حسینی و همکاران [12] به ساخت آلیاژ لحیم بدون سرب قلع-مس با نانو ذرات سیلیکا پرداختند و استحکام برشی 15/1 مگاپاسکال را گزارش دادند.

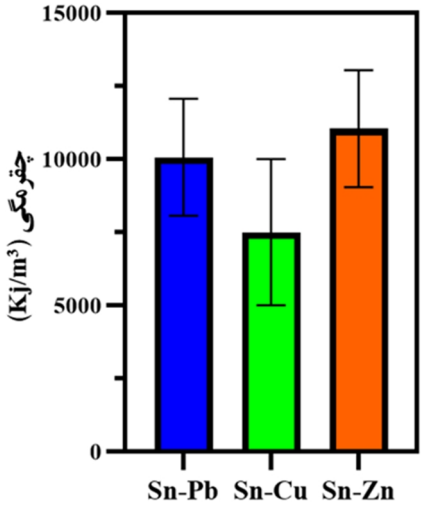


شکل8-نمودار آزمون برش برای دو زیرلایه مسی متصل شده با آلیاژ لحیم قلع-سرب و قلع-روی.

باتوجه به شکل(10) و نتایج آزمون استحکام برشی، مشخص است که نمونه آلیاژ قلع-روی دارای چقرمگی بالاتری نسبت به نمونه‌های قلع-سرب و قلع-مس [13] است. بنابراین، برای کاربردهایی که نیاز به مقاومت بالا در برابر تنش و ضربه دارند، استفاده آلیاژ قلع-روی توصیه می‌شود. شکل(11) تغییرات ریزسختی در طول بخشی از تسمه لحیم قلع-روی پس از انجام 12 پاس را نشان می‌دهد.



شکل 9- تصویر سطح شکست برشی و سطح واقعی اتصال با لحیم الف- قلع-سرب ب-قلع-روی.



شکل10- چقرمگی نمونه‌های لحیم قلع-سرب، قلع-مس و قلع-روی [14].

در هر نمونه، ریزسختی در پنج نقطه مختلف بر روی یک خط صاف اندازه‌گیری شده و هر اندازه‌گیری با رعایت فاصله استاندارد 3 بار تکرار شده است. میانگین نتایج این تکرارها گزارش شده و نتایج نشان می‌دهد که نقاط با سختی بالاتر مربوط به توزیع ذرات روی در زمینه است.

3-4-مقاومت الکتریکی

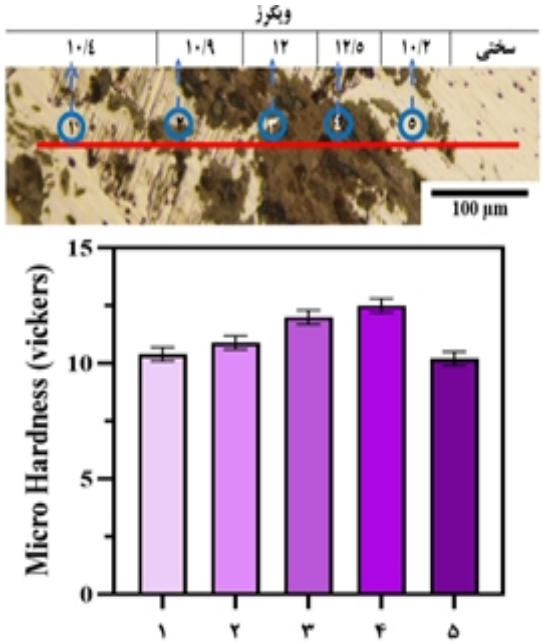
مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده آلیاژ قلع-سرب تجاری و آلیاژ قلع-روی ساخته شده در این پژوهش و آلیاژ قلع-مس ساخته شده در پژوهش محققان دیگر [14] در شکل(12)

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.20]

مقایسه شده است. با توجه به شکل(12)، مقاومت الکتریکی آلیاژ قلع-سرب دز حدود $14/2\pm0/7$ $10^{-8}\Omega.m$ و آلیاژ قلع-روی ساخته شده در این پژوهش حدود $13/8\pm0/5$ $10^{-8}\Omega.m$ است. با توجه به جدول(2)، عنصر روی مقاومت الکتریکی کمتری از عنصر قلع دارد و از این‌رو با افزودن عنصر روی مقاومت الکتریکی این آلیاژ کاهش یافته است. مقاومت الکتریکی از ویژگی‌های کلیدی در طراحی و ارزیابی اتصالات لحیم در مدارهای الکترونیکی است.

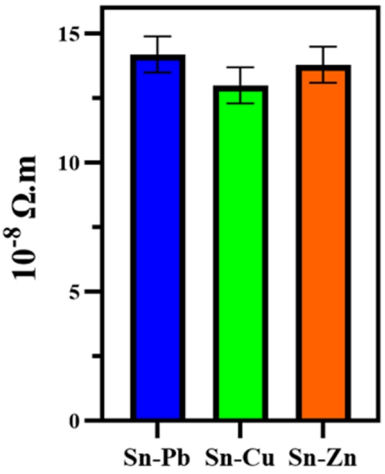
جدول2-مقاومت الکتریکی عناصر اصلی آلیاژها.

عنصر	Sn	Zn	Pb	Cu
مقاومت الکتریکی ($10^{-8}\Omega.m$)	۱۱	۵/۹	۲۰/۸	۱/۷

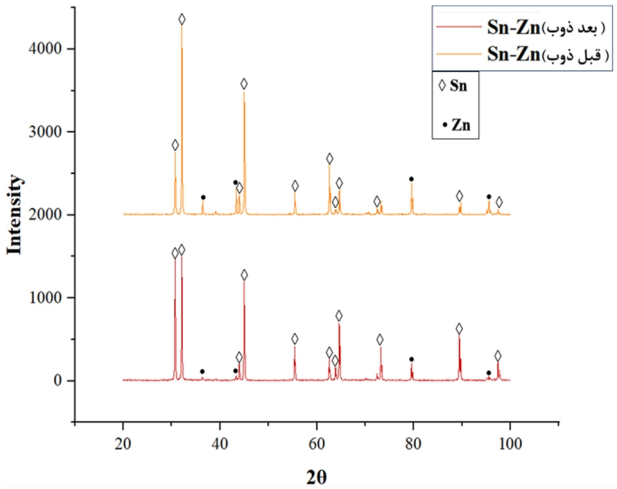


شکل11- تغییرات ریزسختی نمونه قلع-روی در 12 پاس

این ویژگی می‌تواند تاثیر قابل‌توجهی بر عملکرد کلی دستگاه‌ها و مدارها داشته باشد. نتایج نشان می‌دهد که نمونه قلع-روی ساخته شده دارای مقاومت الکتریکی نسبتا کمتری نسبت به نمونه قلع-سرب تجاری است؛ بنابراین، برای کاربردهایی که نیاز به هدایت الکتریکی بالا و پایداری حرارتی دارند، استفاده از این آلیاژ قلع-روی توصیه می‌شود. به نظر می‌رسد که این آلیاژ در کابردهای مشابه با آلیاژ قلع-سرب قابل استفاده باشد. از طرفی مطابق با شکل(12) و جدول(2)، با توجه به مقاومت الکتریکی پایین عنصر مس، آلیاژ قلع-مس مقاومت الکتریکی پایین‌تری از دو آلیاژ دیگر از خود نشان می‌دهد و برخلاف خواص مکانیکی (شکل 10) هدایت الکتریکی بهتری دارد [14].



شکل 12- مقاومت الکتریکی لحیم‌های قلع-سرب، قلع-مس و قلع-روی [15].



شکل13- نتیجه پراش پرتو ایکس آلیاژ قلع-روی پس از 12 پاس در دو حالت قبل از ذوب و پس از ذوب

به‌منظور تعیین فازهای تشکیل‌شده در نمونه‌های اکسترود شده و ذوب‌شده آزمون پراش پرتوایکس بر روی نمونه‌ها در حالت اکسترود شده و پس از ذوب انجام شد. و نتایج آن به کمک نرم‌افزار X'PERT تحلیل شد. نتایج آزمون پراش پرتوایکس از نمونه‌های اکسترود شده در شکل(13) ارائه شده

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.20]

است. همان‌طور که انتظار می‌رفت نتایج این آزمون نشان‌دهنده‌عناصر قلع و روی می‌باشد. مشاهده می‌شود که شدت پیک‌های روی پس از ذوب کاهش می‌یابد که علت آن می‌تواند صحه گذار انحلال عنصر روی در زمینه قلع باشد.

4-نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی امکان ساخت لحیم بدون سرب از آلیاژ قلع-روی و بررسی تاثیر فرایند اکستروژن تجمعی زاویه‌ای بر خواص آلیاژ لحیم قلع-روی و مقایسه آن با آلیاژ لحیم قلع-سرب تجاری و برخی دیگر از لحیم‌های بدون سرب انجام شد. مهمترین نتایج به دست آمده از این پژوهش به صورت زیر است:

- در 12 پاس اکستروژن تجمعی زاویه‌ای، پراکندگی یکنواختی از ذرات روی در زمینه قلع مشاهده شد، که باعث بهبود خواص مکانیکی و الکتریکی می‌شود.
- افزایش بیشتر تعداد پاس‌ها از 12 باعث تشکیل اکسیدهای مخرب و ترک‌های ساختاری شد که کیفیت لحیم را کاهش می‌دهد.
- آلیاژ قلع-روی در 12 پاس اکستروژن زاویه ترشوندگی برابر با 5±21 درجه با زیرلایه مسی داشت و عملکرد نزدیکی به آلیاژ قلع-سرب نشان داد و به‌نظر می‌رسد بتواند جایگزین مناسبی برای آن در کاربردهای صنعتی باشد.
- استحکام برشی آلیاژ قلع-روی با حدود 69 مگاپاسکال نزدیک به 60% بیشتر از آلیاژ قلع-سرب بود که برای کاربردهای نیازمند مقاومت بالا مناسب است.
- مقاومت الکتریکی آلیاژ قلع-روی ساخته شده (13/0±8/5 10^{-8} Ωm) از آلیاژ قلع-سرب (14/0±2/7 10^{-8} Ωm) کمتر است، که آن را برای مدارهای الکترونیکی کارآمدتر می‌کند.
- به نظر می‌رسد که این آلیاژ برای صنایع الکترونیکی و مکانیکی، که نیاز به هدایت الکتریکی و استحکام مکانیکی بالا دارند، مناسب باشد و بتواند در بسیاری از کاربردها جایگزین لحیم قلع-سرب شود.

منابع

1-Vianco PT, Frear DR (1993) Issues in the replacement of lead-bearing solders. JOM 45:14–19

2-Kumar N, Maurya A (2022) Development of lead free solder for electronic components based on thermal analysis. Mater Today Proc 62:2163–2167

3-Asasaari SF, Fadil NA, Tamin MN (2022) Mechanics of solder/IMC interface of lead-free solder interconnects in ball grid array assembly. J Mech Eng Sci 16:8718–8729

4-SINGH A, CHOO HL, TAN WH, DURAIRAJ R (2024) Effect of Mo and ZrO_2 nanoparticles addition on interfacial properties and shear strength of Sn58Bi/Cu solder joint. Trans Nonferrous Met Soc China 34:2619–2628

5-Kotadia HR, Howes PD, Mannan SH (2014) A review: On the development of low melting temperature Pb-free solders. Microelectron Reliab 54:1253–1273

6-Gerhátová Ž, Babincová P, Drienovský M, Pašák M, Černičková I, Ďuriška L, Havlík R, Palcut M (2022) Microstructure and Corrosion Behavior of Sn–Zn Alloys. Materials (Basel) 15:7210

7-El-Daly AA, Hammad AE (2010) Effects of small addition of Ag and/or Cu on the microstructure and properties of Sn–9Zn lead-free solders. Mater Sci Eng A 527:5212–5219

8-Garcia LR, Osório WR, Peixoto LC, Garcia A (2010) Mechanical properties of Sn–Zn lead-free solder alloys based on the microstructure array. Mater Charact 61:212–220

9-Lynch RF (2001) Zinc: Alloying, Thermomechanical Processing, Properties, and Applications. In: Encycl. Mater. Sci. Technol. Elsevier, pp 9869–9883

10- Karimi A, Maleki A, Taherizadeh A, Niroumand B (2023) Synthesis and characterization of Sn–Cu/SiO_2(np) lead-free nanocomposite solder through angular accumulative extrusion. J Mater Sci Mater Electron 34:1455

11-Abtew M, Selvaduray G (2000) Lead-free Solders in Microelectronics. Mater Sci Eng R Reports 27:95–141

12-Hosseini M, Niroumand B, Maleki A, Issa HK (2022) Manufacturing and characterization of Sn–Cu/SiO_2np lead-free nanocomposite solder by accumulative roll bonding (ARB) process. J Mater Sci Mater Electron 33:13516–13530

13-Zhao M, Zhang L, Liu Z-Q, Xiong M-Y, Sun L (2019) Structure and properties of Sn-Cu lead-free solders in electronics packaging. Sci Technol Adv Mater 20:421–444

14-Liu G, Ji S, Grechcini L, Bentley A, Fan Z (2017) Microstructure and mechanical properties of Sn–Cu alloys for detonating and explosive cords. Mater Sci Technol 33:1907–1918

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.20]