



URNAL OF ding Science and Technology of I

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

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

Received 31 March 2024 ; Accepted 18 May 2024

Abstract

Soldering plays a crucial role in the electronics industry, driving the need for constant improvements in physical and mechanical properties and the management of intermetallic compound formation. Research in composite materials aims to achieve a uniform distribution of reinforcing particles within solder matrix to enhance their performance. This study investigates the integration of cobalt microparticles into SAC0307 lead-free soft solder alloy using the accumulative roll bonding (ARB) method. Microstructural analysis confirmed a homogeneous dispersion of cobalt particles within the solder after three ARB passes. Moreover, increasing cobalt content led to a reduction in the size of Cu_6Sn_5 intermetallic compounds, from 9 µm to 5 µm with 1% cobalt by weight. Examination of β -Sn grain morphology revealed the impact of cobalt particles on recovery and recrystallization kinetics in the solder sheets. Tensile tests showed a 28% increase in strength and a 31% decrease in elongation for composite solder alloy containing 1% cobalt. Differential scanning calorimetry (DSC) results revealed minimal change in the melting temperature of composite solder foil.

Keywords: Lead-free solders; Metal composites; Intermetallic compound; Microstructure; Accumulative Roll Bonding.

🔁 *Corresponding Author: M.Movahedi, <u>m_movahedi@sharif.edu</u>



نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir



سال دهم، شماره2، پاییز و زمستان 1403

کامپوزیتسازی آلیاژلحیم نرم بدون سرب به روش اتصال نورد انباشتی

محمدهادی نور محمدی، مجتبی موحدی^{*}، امیرحسین کوکبی دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

دريافت مقاله: 1403/01/12 ؛ پذيرش مقاله: 1403/02/29

چکیدہ

لحیم کاری نرم از پرمصرف ترین فرایندهای اتصال دهی در صنعت الکترونیک است. بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی و همچنین کنترل تشکیل و رشد ترکیبات بینفلزی، زمینه ساز گسترش تحقیقات در زمینه کامپوزیت سازی شده است. توزیع یکنواخت از ذرات سخت در زمینه لحیم، طوری که خواص فیزیکی و مکانیکی را بهبود بخشد میتواند معیاری موفقیت آمیز برای رسیدن به آلیاژهای لحیم کامپوزیتی باشد. در این پژوهش با بهره گیری از روش اتصال دهی نورد انباشتی (ARB)، کامپوزیت سازی آلیاژ لحیم نرم بدون سرب آلیاژهای لحیم کامپوزیتی باشد. در این پژوهش با بهره گیری از روش اتصال دهی نورد انباشتی (ARB)، کامپوزیت سازی آلیاژ لحیم نرم بدون سرب SAC0307 با استفاده از میکروذرات کالت انجام شد. در ادامه جهت بررسی کارایی روش کامپوزیتی به کارگرفته شده، ورقهای لحیم تولید شده به این روش از نظر ریز ساختاری، مکانیکی و فیزیکی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی های ریز ساختاری نشان دهنده توزیع مناسب ذرات تقویت کننده کبالت درزمینه لحیم بعد از کی یونی کی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی های ریز ماختاری نشان دهنده توزیع مناسب ذرات تقویت کنده کبالت درزمینه لحیم بعد از گی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی های ریز ساختاری نشان دهنده توزیع مناسب ذرات تقویت کنده کبالت درزمینه لحیم بعد لحیم کی و فیزیکی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی های ریز ساختاری نشان دهنده توزیع مناسب ذرات تقویت کنده کبات در آلیاژ (وی پاس ARB بود. هری و فیزیکی مورد بررسی گریات در آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی از سیمان از گی بال ARB بود. همچنین، با افزایش درصد کبالت اندازه ترکیبات بین فلزی دوره Sn در آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی از سیمان در آلیاژ لحیم فیران شده کر و اندازه در آلیاژ لحیم فیرایندهای در آلیاژ لحیم فیراندهای ورق و تسریع ورقهای تولید ترمیمی (بازیابی و تبلور مجدد) با حضور ذرات تقویت کنده کبالت در زمینه لحیم نشان داده شد. بررسی های خوامی در آلیاز و مکاییکی ورق های کی ورق و تسریع ورق و تسریع ورق می تولید قرین مده مین نور ورقهای تولید مای دور و تای کی ورت مین ور و نی کرمی ور انهای در آلیان داد. همچنین بنایج آزمون که ور و تومی کرونی کبالت است. از مرفی نتایج آزمون کرمی ور می نور و تی مای دور و ورقهای آلیاز در درمان داد. همچنین، نتایج آزمون کش نمانده از می مده، انه که ور ور ور میمی کرمی ور نی مر ور وی کبل و ور و حمو کرمی ور و ممین مده و تان ده ور کش

کلمات کلیدی: لحیمهای نرم بدون سرب؛ کامپوزیتهای زمینه فلزی؛ ترکیبات بینفلزی؛ ریزساختار؛ اتصال نورد انباشتی.

🖾 * نو يسنده مسئول، پست الكترونيكي: مجتبي موحدي، <u>m_movahedi@sharif.edu</u>

1- مقدمه

جدیدترین رویکرد در افزایش اطمینان اتصالات الکتریکی، استفاده از مواد و ذرات تقویتکننده است. بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی و همچنین کنترل تشکیل و رشد ترکیبات بینفلزی، زمینه ساز گسترش تحقیقات در زمینه کامپوزیت سازی شده است. در سال های اخیر تلاش شده است با استفاده از نانوذرات و کامپوزیت سازی، خواص آلیاژ های لحیم نرم بدون

سرب بهبود داده شود و نتایج رضایت بخشی نیز گرفته شده است. داشتن توزیع یکنواخت از ذرات سخت در زمینه لحیم، طوریکه خواص فیزیکی و مکانیکی را بهبود بخشد می تواند معیاری موفقیت آمیز برای رسیدن به آلیاژهای لحیم کامپوزیتی باشد. روش های افزودن ذرات تقویت کننده در زمینه آلیاژ لحیم نرم به منظور ایجاد آلیاژ لحیم نرم کامپوزیتی به دو دسته روش های اختلاط مکانیکی و روش های درجا تقسیم می شود.

روش اختلاط مکانیکی عموماً با مکانیزم پراکنده سختی موجب استحکام بخشی آلیاژ لحیم می شود. در حالی که در روش درجا، رسوب سختی مکانیزم اصلی استحکام بخشی است. با رسوب سختی می توان مقاومت خزشی و خستگی حرارتی – مکانیکی آلیاژهای لحیم کامپوزیتی را بهبود بخشید [1].

همچنین روش دیگری که اخیراً مورد استفاده قرارگرفته است؛ اختلاط مكانيكي ذرات تقويتكننده با ألياژ لحيم بـهصورت اتصال نورد انباشتی است. در تحقیقاتی که جهت کامپوزیتسازی آلیاژ لحیم از روش،های تغییر شکل مکانیکی مانند نورد انباشتی، اکسترود و غیره استفاده شده است؛ نتایج رضایت بخشی گزارش شده است. روشن قیاس و همکارانش [2] در پژوهشی با استفاده از فرایند ARB آلیاژ لحیم کامیوزیتی با ذرات نانومتری CeO₂ تولید کردند. همچنین، در پژوهشهای دیگری تولید آلیاژهای لحیم کامپوزیتی با استفاده از فرایند ARB گزارش شده است [3, 4]. نرخ تولید بالا، توانایی تولید پیوسته، توانایی تولید ورق،های کامپوزیتی نهایی، وجود تخلخل کم در فلزپرکننده کامپوزیتی و خرد شدن و توزیع یکنواخت ذرات تقویتکننده حین تولید، از مزایای استفاده از فرایند ARB در تولید آلیاژهای لحیم کامپوزیتی است. در این پژوهش سعی بر آن شد با بررسی ساختاری، خواص مکانیکی و فیزیکی ورق، ای لحیم کامپوزیتی تولیدشده به روش اتصال نورد انباشتی، کارایی این روش کامپوزیتی مورد بررسی قرار گیرد.

2- مواد و روش پژوهش

در این پژوهش ابتدا آلیاژ لحیم تجاری SAC0307 (ساخت شرکت آلمانی STANNOL) که به صورت یک رول سیمی بود تکه تکه شده و داخل بوته ای از جنس آلومینا، در کوره تیوبی تحت گاز محافظ آرگون در دمای 2°450 به مدت 30 دقیقه ذوب و نگهداری شد و سپس تا دمای محیط سرد شد؛ در ادامه سطح شمش منجمد شده با سنگ براده برداری و آخال زدایی شد. درنهایت بعد از تمیزکاری با استون، شمش آلیاژ لحیم پایه آماده نورد و مراحل بعدی کامپوزیت سازی شد. در این تحقیق از میکروذرات کبالت (Co) با اندازه کمتر از سالی

اندازه 3μm استفاده گردیـد. در شـکل (1) تصـویر FE-SEM پودر میکروذرات کبالت آورده شده است.



شكل1-تصوير FE-SEM از پودر ميكروذرات كبالت.

در این تحقیق به منظور کامپوزیت سازی از فرایند اتصال نورد انباشتی (ARB) استفاده گردید. این فرایند توسط دستگاه نورد آزمایشگاهی با غلتک هایی به قطر 150mm، سرعت چرخشی پالامیشگاهی با غلتک هایی به قطر 150mm، سرعت چرخشی پذیرفت. شمش آلیاژ لحیم ذوب شده، در ابتدا به ورق هایی به ضخامت 2000 میکرومتر نورد گردید و سپس به ابعاد 20mm برش یافت. ورق های فوق به مدت 2 ساعت در منحامت 2001 تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. سپس سطوح دمای 2° 100 تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. سپس سطوح از توسط سمباده شماره 60 برس زده شد تا سطوحی با زبری m 2/2 برای اتصال نوردی ایجاد گردد. در ادامه نمونه ها با استون چربیزدایی شد. ذرات کبالت بعد از توزیع مناسب در استون، سریعاً روی یک سطح از ورق های لحیم اسپری شد.

سپس5 ورق لحیم آلیاژی که شامل 4 ورق پوشش دار و 1 ورق بدون پوشش بود، بر روی هم قرار داده شد و ابتدا و انتهای آنها، ثابت گردید. ورق های لحیم طوری روی هم قرار داده شدند که یک سطح پوشش دار در مجاورت یک سطح بدون پوشش قرار گیرد. در پایان این مرحله، بسته هایی حاوی

ورقههای لحیم و با درصدهای وزنی مختلف از یودر کبالت (0، 0/05، 0/15، 0/2، 0/2 و 1 درصد) ايجاد گرديد. سپس اين بستههای چندلایه در دمای اتاق با کاهش ضخامت 80% نورد گردید. این کاهش ضخامت برای ایجاد یک باند مناسب بین لايهها و برحسب مقالات موجود در زمينه نورد قلع صورت پذیرفت [2, 5]. سپس ورق بهدست آمده پس از برش زوائد و گوشههای ورق در دمای℃ 100به مدت یک ساعت تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. تسمههای ایجادشده در مرحله قبل، بهمنظور بهبود توزیع ذرات در داخل زمینه، به دونیم برش یافته و یکطرف آنها برس زده و توسط استون چربی زدایی گردید. سیس با کاهش ضخامت 60% در دمای اتاق فرایند نورد اتصالی صورت پذیرفت. این مرحله یکبار دیگر تکرار گردید تا توزيع يكنواخت ذرات در داخل ورق لحيم ايجاد گردد. جهت ساخت لحیم کامپوزیتی به روش ARB متغیرهای ساخت طوری تعیین شد که میکروذرات کبالت با اندازه کمتر از 10 میکرومتر دچار تغییر شکل و مورفولوژی نشوند. در این پژوهش بعد از سه پاس نورد فویل نهایی شامل 20 لایه است و با توجه به اینکه ضخامت فویل نهایی 200 میکرومتر است، ضخامت هر لايه 10 ميكرومتر مي شود؛ بنابراين به دليل سختي بالاتر میکروذرات کبالت نسبت به آلیاژ لحیم، در حین فرایند ARB بدون اینکه میکروذرات کبالت دچار تغییر شکل شوند در فویل آلیاژ لحیم فرورفته و با پاس،های بعدی نورد توزیع و كامپوزيتسازى انجام پذيرفت. شايان ذكر است كه با افزايش تعداد سیکل فرایند ARB توزیع ذرات بهتر می شود، هرچند که با افزایش تعداد سیکل، خطر ترک خوردن نمونه از گوشهها زیاد شده و عملاً امکانپذیر نیست. در همین راستا با انجام یک سیکل دیگر (در کل 4 سیکل ARB) میکروذرات کبالت در سطح ورق و شیار ترکهای ایجادشده مشاهده شد (شکل 2). درنتیجه در این پژوهش سه سیکل ARB تعداد سیکل بهینه جهت همگنسازی توزیع ذرات بود.

جهت بررسی استحکام بین لایه ها در ورق های تولید شده به روش فرایند ARB، از آزمون Peel استفاده شد. آزمون مورد نظر مطابق شکل (3) با سرعت 1 mm/min انجام شد.

آزمون کشش روی نمونه ها با ابعادی مطابق استاندارد ASTM E8 با نرخ کرنش ^{I-}s 0/01 و در دمای اتاق مطابق شکل (4) انجام شد. لازم به ذکر است برای هر کامپوزیت، 3 نمونه کشش آماده سازی شد و مقادیر میانگین تنش تسلیم، استحکام نهایی کششی و کرنش شکست گزارش گردید.



شکل2- تصویر FE-SEMبه همراه آنالیز EDS از سطح ورق لحیم کامپوزیتی پس از 4 سیکل ARB.



شکل3-تصویر نمونه آماده شده و روش انجام آزمون Peel.



شکل4-تصویر نمونه آماده شده و روش انجام آزمون کشش.

همچنین، به منظور بررسی ریزساختار لحیمهای کامپوزیتی و مشاهده نحوه توزيع فازهاى مختلف و مورفولوژي آن ها، ورقهای لحیم پس از برش داخل مانت سرد قرار داده شد و پس از سمباده زنی و پولیش نهایی، از محلول حکاکی با ترکیب (2% اسید هیدروکلریک، %5 اسید نیتریک و %93 متانول) جهت متالوگرافی نمونهها استفاده گردیـد. بررسـیهـای میکروسـکپ نوری جهت توزیع دانه بندی و توزیع ترکیبات بینفلزی در زمينه لحيم كامپوزيتي انجام گرفت. همچنين، با استفاده از میکروسکپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) مجهز به آنالیزور طیفسنج تفرقی اشعه ایکس (EDS) توزیع ترکیبات بین فلزی، ذرات کبالت و شکست نگاری سطوح شکست نمونههای آزمون Peel و کشش بررسی شد. جهت شناسایی فازی از آزمون XRD استفاده شد. در این پژوهش از نمونههای آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت، آزمون XRD گرفته شد. همچنین، با بهره گیری از دستگاه گرماسنج افتراقی (DSC)، نقطه ذوب، انجماد و میـزان تحت تبريـد لحـيم كـامپوزيتي محاسـبه گرديـد. جهـت انجـام آزمایش تکههای ورق لحیم کامپوزیتی به وزن 8 mg آمادهسازی گردید و تحت اتمسفر محافظ (گاز نیتروژن) به همراه نمونه مرجع آلومینای پودری شکل با نرخ گرمایش C/min° 15 انجام گرفت.

3- نتايج و بحث

5-1-بررسی توزیع ترکیبات بین فلزی و ذرات کبالت در شکل (5) تصویر SEM از سطح مقطع ورق نهایی آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی (شکل 5-الف) و آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت (شکل 5-ب) آورده شد. در تصویر (شکل 5-ب) توزیع ترکیبات بین فلزی 5ns (نقاط خاکستری) و ذرات تقویتکننده کبالت (نقاط سیاه) در زمینه آلیاژ لحیم، قابل مشاهده است. جهت مشاهده بهتر توزیع ذرات تقویتکننده در زمینه لحیم، توزیع میکروذرات کبالت در زمینه آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت بررسی شد؛ هرچند در تمامی نمونههای کامپوزیتی بعد از 3 پاس نورد و

اتمام فرایند ARB، توزیع مناسب میکروذرات کبالت در زمینه لحیم مشاهده شد.



شکل5- تصاویر FE-SEM از توزیع ذرات تقویت کننده و ترکیبات بینفلزی خردشده الف- آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی ب- آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت.

همچنین، در شکل(6) تصاویر FE-SEM و آنالیز EDS از ریزساختار زمینه ورق لحیم نهایی آلیاژهای لحیم کامپوزیتی با 0/05 و1 درصد وزنی کبالت آورده شده است. همانطور که مشخص است در زمینه آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 0/05 درصد وزنی کبالت ترکیبات بینفلزی درشتتری مشاهده میشود. وجود تركيبات بينفلزي درشت در ساختار زمينه لحيم باعث تمرکز تنش و کاهش استحکام مکانیکی زمینه لحیم می شود؛ ترد بودن ترکیبات بینفلزی و انسجام ترکیب بینفلزی با زمینه لحیم بر استحکام برشی تأثیرگذار است. لی و همکارانش [6] با بررسی استحکام برشی آلیاژ لحیم Sn-Cu در حضور ترکیبات بینفلزی Cu₆Sn₅ با اندازه 3 تا 12 میکرومتر نتیجه گرفتند که وجود میکرو ترکهای بزرگ و کاهش تعداد ترکیبات بینفلزی به دلیل افزایش اندازه ترکیبات بینفلزی بر استحکام برشی تأثیر منفی دارد. در فرایند ARB ترکیبات بینفلزی درشت در زمینه شکسته شده و به ذرات کوچکتر خرد می شوند؛ در تحقیقی لیو و همکارانش [7] خرد شدن ترکیبات بینفلزی Cu₆Sn₅ در زمينه لحيم را گزارش كردند. همچنين، خرد شدن تركيبات

بین فلزی Ag₃Sn در حین فرایند ARB توسط روشن قیاس و همکارانش [2] گزارش شده است. در حین فرایند نورد انباشتی، نیرو و کرنش اعمال شده به ورق ها از طریق زمینه به ترکیبات بین فلزی منتقل می شود. از آنجا که این ترکیبات، ترد و تغییر شکل ناپذیر هستند، قابلیت تطابق و همراهی با تغییر فرم پلاستیک زمینه مجاور خود را ندارند؛ بنابراین ترکیبات بین فلزی به دلیل فشار ایجاد شده به وسیله نورد به ذرات کوچکتر خرد می شوند و توزیع یکنواخت تری از ترکیبات بین فلزی در زمینه لحیم ایجاد خواهد شد. میزان خرد شدن و اندازه نهایی این ترکیبات به میزان کرنش اعمال شده وابسته است.



شکل6-تصاویر FE-SEM و آنالیز EDS از ریزساختار سطح مقطع ورق لحیم نهایی الف - آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 0/05 درصد وزنی کبالت و ب - آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت.

شکل (7) اندازه و تصویر Threshold ترکیبات بینفلزی Cu₆Sn₅ با استفاده از نرمافزار ImageJ را نشان میدهد. همانطور که در نمودار شکل (شکل (7-ب)) مشخص است، با افزایش درصد میکروذرات کبالت اندازه ترکیبات بینفلزی Cu₆Sn₅ خردشده از 9 میکرومتر در نمونه آلیاژ لحیم

غيركاميوزيتي به 5 ميكرومتر در نمونه آلياژ لحيم كاميوزيتي بـا 1 درصد وزنى كبالت كاهش يافت. همچنين، با مقايسه اندازه ترکیبات بینفلزی در آلیاژهای لحیم غیرکامپوزیتی و کامپوزیتی مشاهده شد که با افزایش درصد وزنی کبالت اندازه ترکیبات بین فلزی کمتر شده است؛ دلیل این اتفاق را میتوان به خرد شدن ترکیبات بینفلزی حین نورد ناشی از محدود شدن كرنش يلاستيك زمينه توسط ميكروذرات كبالت و افزايش ميزان کرنش اعمال شده به ترکیبات بین فلزی Cu6Sn5 دانست. البته بدیهی است کـه در حـین شـارشمجـدد لحـیمهـا کـه عمومـاً روشهای ذوبی است ریزساختار زمینه لحیم نیز تغییر خواهد کرد و درنتیجه توزیع و اندازه ترکیبات بینفلزی دستخوش تغییرات خواهد شد. در پژوهشی که هوانگ و همکارانش [8] جهت بررسی ریزساختار لحیم کامپوزیتی تولیدشده به روش درجا انجام دادند، خرد شدن ترکیبات بینفلزی Cu₆Sn₅ با درصدهای مختلف کاهش سطح مقطع با استفاده از فرایند نورد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تا 90 درصد کاهش سطح مقطع اندازه ترکیبات بینفلـزی Cu₆Sn₅ کـاهش یافـت و بعدازان تغییر محسوسی نداشت. همچنین، هوانگ و همكارانش معتقدند كه تركيبات بينفلزي خردشده ممكن است به دلیل نقطه ذوب بالاترشان نسبت به دمای لحیم کاری ذوب نشوند بلکه در زمان حرارت دهی تا حدودی ضخیم شوند؛ زیرا زمان لحیمکاری بسیار اندک و از حدود چند ثانیه تا چند دقیقه است. هرچند این ادعا توسط سایر محققین تأیید نشده، اما ممکن است تعدادی از ترکیبات بینفلزی پایدار در زمان کوتاه لحیمکاری ازنقطهنظر ترمودینامیکی در مقابل ذوب شدن از خود مقاومت نشان دهند یا سینتیک انحلال ترکیبات بینفلزی حین فرايند لحيم كارى كند باشد. همچنين، اگر تكنيكهاى اتصال دهی حالتجامد استفاده شود، ترکیبات بینفلزی ریز در ساختار باقی میمانند که بهعنوان ذرات تقویتکننده در زمینه لحیم در نظر گرفته می شوند. در این پژوهش ابتدا با افزودن 0/05 درصد وزنی کبالت به آلیاژ لحـیم غیرکـامپوزیتی تغییـر محسوسـی در اندازه ترکیبات بینفلزی خردشده دیده نشد؛ در ادامه با افزودن 0/2 و 1 درصد وزنی کبالت به آلیاژ لحیم SAC اندازه ترکیبات

بین فلزی به ترتیب 24 و 44 درصد کاهش یافت. همان طور که گزارش شد افزایش درصد وزنی کبالت در لحیم کامپوزیتی با کاهش اندازه ترکیبات بین فلزی Cu₆Sn₅ رابطه مستقیم دارد و رفته رفته شیب کاهش اندازه ترکیبات بین فلزی Cu₆Sn₅ با افزایش درصد وزنی کبالت در لحیم کامپوزیتی کاهش خواهد یافت. به عبارتی دیگر، علاوه بر اینکه درصد کاهش سطح مقطع در حین نورد بر خرد شدن ترکیبات بین فلزی مؤثر است، درصد وزنی ذرات تقویت کننده نیز تأثیر گذار خواهد بود.



شکل7-الف - تصویر Threshold ترکیبات بینفلزی Cu₆Sn₅ ب - نمودار اندازه ترکیبات بینفلزی Cu₆Sn₅

2-3-بررسی اندازه دانه های β-Sn در ریزساختار برخلاف سایر تحقیقات قبلی، در این پژوهش به بررسی کاهش اندازه دانههای β-Sn آلیاژهای لحیم کامپوزیتی در اثر فرایند

ARB پرداخته شده است. در شکل (8)، ریزساختار آلیاژهای لحیم کامپوزیتی و غیرکامپوزیتی نشان داده شده است. همانطور که در تصویر 8-الف مشاهده میشود قبل از فرایند ARB ریزساختار آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی شامل دانههای هم محور معرکامپوزیتی، دانه های هم محور ARB روی آلیاژ لحیم نرم غیرکامپوزیتی، دانه های هم محور AR-۹ روی آلیاژ لحیم نده فیرکامپوزیتی، دانه های هم محور AR-۹، به دانههای کشیده شده در راستای نورد تبدیل شد (8-ب). همچنین، بررسی (شکل 8-ج)، به مانند ساختار آلیاژ لحیم غیر کامپوزیتی قبل از فرایند ARB، دانههای هم محور Sn-۹ را نشان داد؛ با این فرایند ARB، دانههای هم محور Sn-۹ را نشان داد؛ با این فرایند ARB، دانههای AR-۹ در آلیاژهای کامپوزیتی به شکل فرایند ARB، دانههای AR-۹ در آلیاژهای کامپوزیتی به شکل نقاوت که اندازه دانههای AR-۹ در آلیاژهای کامپوزیتی به شکل دانهای Sn-۹ را میتوان به تسریع قوع فرایندهای بازیابی و دانههای Sn-۹ را میتوان به تسریع قوع فرایندهای بازیابی و دانههای مارحاد ناشی از حضور ذرات تقویت کننده در زمینه لحیم دانست.



شکل8- تصاویر پلاریزه از ریزساختار الف- آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی اولیه ب- آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی بعد از فرایند ARB ج- آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 0/2 درصد وزنی کبالت بعد از فرایند ARB

لازم به ذکر است، برای اکثر آلیاژهای لحیمکاری نسبت دمای اتاق به دمای ذوب آنها بر اساس مقیاس کلوین (دمای همولوگ) حدود 40% تا 60% است. لذا در دمای اتاق حین

فرایند ARB بازیابی دینامیکی، استاتیکی و آزاد شدن تنشهای باقیمانده در ساختار اتفاق میافتد. بهطورکلی میتوان گفت که افزایش انرژی داخلی آلیاژ لحیم تغییر شکل یافته بهعنوان نیروی محرک برای وقوع فرایندهای ترمیمی (بازیابی و تبلور مجدد) عمل میکند.

با افزایش تعداد سیکلهای ARB، کرنشهای بسیار بالا به ماده تحمیل میشود که انرژی داخلی لحیم زمینه را افزایش میدهد. بهمنظور کاهش این انرژی داخلی، سینتیک ترمیم تسریع میشود. این اتفاق قبلاً توسط لائرو و همکارانش [9] گزارش شده است.

بر طبق نتایج این گروه، مقادیر سختی آلیاژ لحیم بعد از تغییر شکل پلاستیک شدید پایین ر از مقدار آن پس از اعمال تغییر فرم خفیف تر بوده است. آنها این امر را به بازیابی و تبلور مجدد دینامیک حین تغییر فرم پلاستیک شدید نسبت دادهاند که در دمای اتاق و بدون هیچگونه عملیات حرارتی اتفاق افتاده است. شایانذکر است که وقوع همزمان فرایندهای ترمیم کریستالی نظیر بازیابی و تبلور مجدد حین فرایند ARB برای تولید لحیمهای کامپوزیتی سودمند خواهند بود؛ بدین صورت که با افزایش کارپذیری احتمال ترک خوردن کنارهایی کاهش خواهد یافت. علاوه بر این، وقوع تبلور محدد حین فرایند ARB به بهبود کیفیت اتصال بین لایهها نیز میانجامد [10].

از طرفی دیگر بررسی ریزساختار ورق،های لحیم کامپوزیتی و از طرفی دیگر بررسی ریزساختار ورق،های لحیم کامپوزیتی و توزیع اندازه دانههای β-Sn در ساختار نشان از توزیع ذرات تقویت کننده است. به عبارتی دیگر، افزایش چگالی نابجاییها در اطراف ذرات کبالت باعث وقوع فرایندهای ترمیمی در اطراف این ذرات میشود. بنابراین در صورت توزیع مناسب ذرات تقویت کننده، به طور یکنواخت در تمام ریزساختار کاهش اندازه دانههای β-Sn اتفاق خواهد افتاد. هرچند با در نظر گرفتن کاربرد اصلی لحیمها که پس از شارش مجدد و انجماد ناشی از لحیمکاری است، آرایش نابجاییها و مرزهای دانه که در حین فرایند ARB به وجود آمده است پس از شارش مجدد از بین خواهد رفت و تنها توزیع میکروذرات کبالت و ترکیبات بینفلزی خردشده حائز اهمیت است.

3-3-آزمون **XRD**

شــكل (9) نتـايج أزمـون XRD ورق نهـايي أليـاژ لحـيم غیرکامپوزیتی و آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت را نشان میدهد. در نمودار XRD مربوط به آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت، به علت درصد پایین میکروذرات کبالت (کمتر از 3%) پیکهای مربوط به کبالت مشاهده نشد. پیکهای مربوط به فازهای β-Sn و Cu₆Sn₅ در نمودار XRD مشخص شده است. با مقایسه شدت ییکها در نمودار XRD آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و آلیاژ لحیم کـامپوزیتی بـا 1 درصـد وزنی کبالت، کاهش شدت پیکها در آلیاژ لحیم کامپوزیتی مشاهده شد. لازم به ذکر است β-Sn دارای 7 سیستم لغزش است؛ هرچند که هنوز تحقیقات جهت تکمیل مکانیزم و سیستمهای لغزش β-Sn ادامه دارد. صفحات کریستالو گرافی (101) و (211) از صفحات مهم در سیستم لغزش β-Sn است. همانطور که تحقیقات و نتایج نشان میدهد صفحات لغزش در نمودار XRD بیشترین شدت پیک را به خود اختصاص می دهند؛ برای مثال در شبکه fcc صفحه (111) بیشترین شدت ییک را در نمودار XRD دارد. همان طور که از نمودار XRD آلیاژ لحیم غیرکامیوزیتی مشاهده میشود صفحه (101) در زاویه °32 بیشترین شدت پیک را دارد؛ درنتیجه صفحه (101) صفحه اصلى لغزش نابجاييها در نمونه آلياز لحيم غیرکامپوزیتی ساختهشده بهروش نورد انباشتی است. در نمونه آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت صفحه (211) در زاویه°44/9 بیشترین شدت پیک را دارد که نشاندهنده این است که در نمونه کامیوزیتی با 1 درصد وزنبی کبالت صفحه (211) صفحه اصلى لغزش نابجاييها است. دليل اينكه چرا صفحه اصلى لغزش از صفحه (101) در نمونه آلياژ لحيم غیرکامپوزیتی به صفحه (211) در نمونه آلیاژ لحیم کامپوزیتی تغییر کرده را می توان به فرایند تبلور مجدد دینامیکی و افـزایش چگالی نابجایی ها در اطراف ذرات تقویت کننده و ترکیبات بینفلزی در حین فرایند ARB مربوط دانست. احتمالاً با افزودن ذرات تقویت کننده و پراکندگی ترکیبات بین فلزی Cu₆Sn₅ در ساختار، سینتیک تبلور مجدد دینامیکی افزایش خواهد یافت.

تبلور مجدد مکانیکی در مکانهایی با چگالی نابجایی های بالا مستعدتر است بنابراین در نمونه آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت به دلیل وجود چگالی نابجایی بالا در نزدیکی ذرات تقویت کننده و ترکیبات بینفلزی احتمال تبلور مجدد دینامیکی افزایش پیدا میکند. همچنین ذرات تقویتکننده و ترکیبات بینفلزی ریز که در ساختار پراکندهشدهاند مانع از رشد دانههای تبلور مجدد شده می شوند. بنابراین، نمونه آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت دارای چگالی بالای مرزهای با زاویه بالا است و باعث کـاهش شـدت پیـک.هـا در نمودار XRD می شود. از طرفی با فرض اینکه تبلور مجدد اتفاق نیفتاده باشد افزایش چگالی نابجایی ها در صفحه لغزش (101) می تواند باعث کاهش شدت پیک صفحه (101) در نمودار XRD شود؛ بنابراین با در نظر گرفتن اینکه هم تبلور مجدد و هم افزایش چگالی نابجایی ها در صفحات ترجیحی كريستالو گرافي باعث كاهش شدتXRD مي شود؛ شدت پيک صفحه (101) نمونه آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی كبالت علاوه بر اينكه نسبت به پيك متناظر در نمونه آلياژ لحيم غیرکامپوزیتی کاهشیافته نسبت به پیک صفحه (211) نمونه آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت نیـز کـاهش یافتـه



ئىكل9- نتايج ازمون XRD نمونه الياژ لحيم غيركامپوزيتى و الياژ لحيم كامپوزيتى با 1 درصد وزنى كبالت.

3-4-بررسی خواص مکانیکی

در شکل (10) استحکام بین لایهها در ورقهای لحیم غیرکامیوزیتی و کامیوزیتی بدست آمده از آزمون Peel گزارش شده است. در این آزمون استحکام بین لایه های اولیه (یاس اول ARB با 80% كاهش سطح مقطع) و لايههاي ثانويه (پاس دوم ARB با 60% كاهش سطج مقطع) نشان داده شده است. بـ مقایسه نمودار آزمون Peel دو نمونه آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و آلیاژ لحیم کامپوزیتی می توان نتیجه گرفت که در فرایند ARB با افزودن میکروذرات کبالت، استحکام بین لایـههـا کـاهش پیـدا مي كند. به عبارتي حضور ذرات تقويت كننده در بين لايهها، مانع از اکسترود شدن لایهها در یکدیگر و درنتیجه افزایش استحکام اتصال می شود. در این پژوهش همان طور که در نتایج آزمون Peel مشاهده می شود با افزودن 0/2 درصد میکروذرات کبالت استحکام اتصال بین لایههای آلیاژ لحیم کامپوزیتی در فرایند ARB، حدود 20% كاهش يافت؛ بهطوركلي با افزايش كسر حجمي ذرات، استحكام اتصال لايهها كاهش مي يابد. همچنين تأثير ذرات تقويت كننده ازنظر شكل، هندسه، اندازه ذرات و نوع ذره قابل بررسی است؛ در تحقیقات اثر اندازه ذرات این گونه بیان شده است کـه بـا کـاهش انـدازه ذرات از میکرومتـری بـه نانومتری، استحکام اتصال ضعیفتری به دست می آید؛ همچنین در کامپوزیتسازی به روش ARB، با اندازه ذرات بزرگتر (در مقیاس میکرومتری) در تعداد سیکل کمتری توزیع و یکپارچگی ذرات تقویت کننده در نمونه کامپوزیتی بهدست آمده است [11, 12]. همين طور مشاهده شد استحكام اتصال بين لايهها در سیکل اول با 80% کاهش سطح مقطع، نسبت به سیکل دوم با 60% كاهش سطح مقطع بيشتر است. باوجود اينكه جهت بهبود اتصال بین لایهها بین دو سیکل اول و دوم آنیل میانی انجام شد؛ ولی به نظر میرسد میزان کرنش در سیکلهای فرایند ARB تأثير بيشتري بر استحكام اتصال بين لايهها دارد.

در شکل (11) تصویر FE-SEM سطح شکست نمونه آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی بعد از آزمون Peel نشان دادهشده است. در تصویر ترکها و نواحی اکسترود لایهها در یکدیگر بهخوبی مشاهده میشود. در فرایند ARB مکانیزم اتصال بین لایهها،

شکست فیلم اکسیدی ایجاد شده روی سطح لایه (Crack) و اکسترود شدن مواد تشکیلدهنده لایهها در داخل یکدیگر (Extrude Region) در حین تغییر شکل پلاستیک با استفاده از نورد عنوان میشود. همچنین، ذرات تقویتکننده اسپری شده روی سطح لایهها از مناطق اکسترود شده، وارد لایهها شده و درنهایت ورق کامپوزیتی به دست میآید. استحکام کافی بین لايههاي ورق لحيم توليدشده، لازمه انجام فرايند هاي بعدي شامل برش ورق،ها و استفاده در لحیمکاری شارش مجدد است. همچنین، استحکام اتصال مناسب، معیاری از موفقیتآمیز بودن کامپوزیتسازی به روش ARB است. هرچند استحکام اتصال بين لايهها تا زمان لحيمكاري شارش مجدد حائز اهميت است و پس از ذوب ورق لحيم توليدشده، توزيع مجدد ذرات تقويتكننده اتفاق خواهد افتاد. لازم به ذكر است استحكام اتصال پس از لحیم کاری شارش مجدد در پژوهش قبلی[13] انجام گرفت. نتایج بدست آمده از آزمون کشش-برش نشاندهنده افزایش 38 درصدی استحکام اتصال در آلیاژ لحیم با 0/4 درصد وزنی کبالت است.



شکل (12) نمودار استحکام کششی ورق، ای لحیم غیرکامپوزیتی و کامپوزیتی تولید شده به روش ARB را نشان میدهد. با افزایش درصد وزنی کبالت استحکام کششی افزایش و ازدیاد طول کاهش یافت؛ بهطوریکه لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت 28 درصد افزایش استحکام کششی و

31 درصد کاهش ازدیاد طول را نشان داد. در پژوهشی که آلیاژ لحیم کامپوزیتی Sn-3.5Ag-0.7Cu با نانو ذرات CeO2 بعد از 14 سیکل ARB کامپوزیتسازی شده بود، حداکثر 42% افزایش استحکام کششی نسبت به نمونه بدون نانو ذرات گزارش شد [2].



شکلFE-SEM از سطح شکست نمونه بعد از انجام آزمون Peel.

در پژوهش دیگری تأثیر اندازه ذرات این گونه گزارش شده است که با کاهش اندازه ذرات تقویت کننده حداکثر استحکام کششی ورق ARB شده در تعداد سیکل بالاتری اتفاق خواهد افتاد [11]. همچنین، در شکل (13) تصویر سطح شکست نمونههای آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت بعد از آزمون کشش نشان داده شده است. در تصاویر سطح شکست، جدایش محل اتصال بین لایه ها در سیکل دوم و سوم فرایند ARB، قابل مشاهده است. همچنین، با مقایسه سطح شکست نمونه آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت، مشاهده شد که اتصال بین 5 لایه در سیکل اول فرایند ARB در نمونه آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی نسبت به نمونه آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد وزنی کبالت بهتر انجام شده است. همان طور که نتایج آزمون

Peel نشان داد با افزودن میکروذرات کبالت، اتصال بین لایـههـا ضعیفتر میشود که ایـن موضـوع در سـطح شکسـت آزمـون کشش نیز مشهود است.



شکل12-الف- نمودار تنش -کرنش و ب- استحکام نهایی کشش و درصد ازدیاد طول آلیاژهای لحیم کامپوزیتی و غیرکامپوزیتی بدست آمده از آزمون کشش.

5-5-بررسی خواص فیزیکی با توجه به نتایج آزمون DSC، دمای ذوب آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی 7/2355 درجه سانتی گراد است. همچنین، دمای ذوب آلیاژهای لحیم کامپوزیتی 1± 235 درجه سانتی گراد بدست آمد؛ بنابراین می توان نتیجه گرفت میکروذرات کبالت روی نقطه ذوب آلیاژ لحیم تأثیر ناچیزی داشته است. شکل (14) پیک مربوط به دمای ذوب آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و آلیاژهای لحیم کامپوزیتی را نشان می دهد. همچنین در پژوهش قبلی [13] انجام شده، ترشوندگی آلیاژهای لحیم کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با کامپوزیتی کردن زاویه ترشوندگی

از 27 درجه به 23 درجه در آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 0/2 درصد وزنی کبالت کاهش یافت.



شکل13-تصاویر FE-SEM از سطح شکست آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی و کامپوزیتی با 2/2 درصد وزنی کبالت پس از انجام آزمون کشش.



شکل14-پیک دمای ذوب بدست آمده از آنالیز DSC برای آلیاژهای لحیم غیرکامپوزیتی وکامپوزیتی.

4- نتيجەگىرى

در این پژوهش آلیاژ لحیم نرم بدون سرب SAC0307 با استفاده از میکرو ذرات کبالت و به روش اتصال نورد انباشتی کامپوزیت سازی شد. در ادامه با بررسی ریزساختاری، خواص غیرکامپوزیتی نشان داد. - نتایج آزمون DSC نشان دهنده تأثیر نامحسوس کامپوزیتسازی روی دمای ذوب آلیاژهای لحیم کامپوزیتی است.

منابع

1-Shen, J. and Y.C. Chan, *Research advances in nanocomposite solders*. Microelectronics Reliability, 2009. 49(3): p. 223-234.

2-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.

3-Hosseini, M., et al., *Manufacturing and characterization of Sn–Cu/SiO2np lead-free nanocomposite solder by accumulative roll bonding (ARB) process.* Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2022. 33(17): p. 13516-13530.

4-Wattanakornphaiboon, A., R. Canyook, and K. Fakpan, *Effect of SnO2 reinforcement on creep property of Sn-Ag-Cu solders*. Materials Today: Proceedings, 2018. 5(3): p. 9213-9219.

5-Li, L., K. Nagai, and F. Yin, *Progress in cold roll bonding of metals*. Science and technology of advanced materials, 2008. 9(2): p. 023001.

6-Li, Z., et al., *The Influence of Primary Cu 6 Sn 5 Size* on the Shear Impact Properties of Sn-Cu/Cu BGA Joints. Journal of Electronic Materials, 2018. 47: p. 84-95.

7-Liu, G., et al., *Microstructure and mechanical properties of Sn–Cu alloys for detonating and explosive cords.* Materials Science and Technology, 2017. 33(16): p. 1907-1918.

8-Hwang, S.-Y., J.-W. Lee, and Z.-H. Lee, *Microstructure of a lead-free composite solder produced by an in-situ process.* Journal of electronic materials, 2002. 31: p. 1304-1308.

9-Lauro, P., et al., *Effects of mechanical deformation and annealing on the microstructure and hardness of Pb-free solders*. Journal of Electronic materials, 2003. 32: p. 1432-1440.

10-Wang, Q., et al., An ultrafine-grained AZ31 magnesium alloy sheet with enhanced superplasticity prepared by accumulative roll bonding. Journal of Iron and Steel Research, International, 2007. 14(5): p. 167-172.

11-Jamaati, R., et al., *Effect of particle size on microstructure and mechanical properties of composites produced by ARB process.* Materials Science and Engineering: A, 2011. 528(4-5): p. 2143-2148.

12-Yousefian, R., E. Emadoddin, and S. Baharnezhad, Manufacturing of the aluminum metal-matrix composite reinforced with micro-and nanoparticles of TIO2 through accumulative roll bonding process (ARB). Reviews on Advanced Materials Science, 2018. 55(1): p. 1-11.

13-.Nourmohammadi, M., et al., *Investigation of* microstructure and mechanical properties of lead free composite solder containing cobalt microparticles produced by accumulative roll bonding. مکانیکی و فیزیکی کارایی این روش کامپوزیت سازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسیهای انجام شده به شرح زیر است: - با توجه به اندازه میکروذرات کبالت (کمتر از 10µm)،3 پاس

ARB تعداد پاس بهینه برای کامپوزیت سازی تعیین شد. - توزیع مناسبی از میکرو ذرات کبالـت بعـد از 3 پـاس ARB

- با افزایش درصد کبالت در زمینه لحیم، کرنش زمینه لحیم محدودتر شده و کرنش اعمال شده به ترکیبات بین فازی افزایش یافت؛ در نتیجه اندازه ترکیبات بین فلزی Cu₆Sn₅ از 9μm در آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی به πμ5 در آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد کبالت کاهش یافت.

- بررسی ریزساختاری آلیاژ لحیم اولیه (ریخته گری شده)، آلیاژ لحیم غیرکامپوزتی (بعد از انجام ARB) و آلیاژ لحیم کامپوزیتی نشان دهنده وقوع فرایندهای ترمیمی ناشی از فرایند ARB است. به عبارتی دیگر، دانههای هم محور آلیاژ لحیم اولیه بعد از فرایند ARB به دانههای کشیده شده در راستای نورد در آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی تبدیل شد. از طرفی در آلیاژ لحیم کامپوزیتی دانههای هم محور آلیاژ لحیم اولیه به دانههای هم محور با اندازه دانه فوق العاده کوچکتر تبدیل شد.

- پیکهای شناسایی شده در آزمون XRD مربوط به فازهای β-Sn و Cu₆Sn5 بود. همچنین، کاهش شدت پیکها در آلیاژ لحیم کامپوزیتی نشان دهنده افزایش چگالی نابجاییها در آلیاژ لحیم کامپوزیتی است.

- نتایج آزمون Peel نشان دهنده افت 20% استحکام لایههای ورق لحیم کامپوزیتی به دلیل حضور میکرو ذرات در بین لایهها است. همچنین، شکست نگاری سطوح شکست نمونههای آزمون کشش نشان دهنده اتصال بهتر لایههای ورق آلیاژ لحیم غیرکامپوزیتی است.

- با افزایش درصد کبالت استحکام کششی و درصد ازدیاد طول ورق های آلیاژ لحیم کامپوزیتی به ترتیب افزایش و کاهش یافت. آلیاژ لحیم کامپوزیتی با 1 درصد کبالت %28 افزایش استحکام کشش و %31 کههش ازدیاد طول نسبت به آلیاژ لحیم

مشاهده شد.