



New Strategy to Simultaneous Increase in Strength and Electrical Conductivity of UFG Copper Strip Fabricated via Accumulative Roll Bonding- Cold Roll Bonding

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Salari H.¹ MSc,
Mahmoodi M.*¹ PhD,
Borhani E.² PhD

How to cite this article

Salari H. Mahmoodi M. Borhani E. New Strategy to Simultaneous Increase in Strength and Electrical Conductivity of UFG Copper Strip Fabricated via Accumulative Roll Bonding- Cold Roll Bonding. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(9): 2085-2092.

ABSTRACT

The cold roll bonding (CRB) is a type of bonding process between similar and/or dissimilar metals that is bonded through plastic deformation via rolling process at room temperature. In addition, the accumulative roll bonding (ARB) process is considered as one of the methods for applying severe plastic deformation (SPD) with the ability to achieve ultra-fine grains (UFG) structure and improved mechanical properties. In this research, a combined method was suggested consisting of ARB and CRB processes in order to fabricate UFG copper strip with simultaneous increase of strength and electrical conductivity. Microstructure, mechanical properties, and electrical conductivity of copper specimen fabricated via combined method and ARB processes were investigated. Field emission scanning electron microscope (FESEM) micrographs showed in the crystalline structure of the specimen fabricated via combined method, a large amount of the UFG with uniform distribution are observable. Also tensile strength and hardness of strips increased with increasing the number of rolling passes. Finally, investigation the electrical conductivity of the specimens by four-point probes test showed electrical conductivity decreases with increasing the number of ARB cycles, while the specimen fabricated via combined method increased simultaneously strength, hardness, and high electrical conductivity.

Keywords Accumulative Roll Bonding; Cold Roll Bonding; Severe Plastic Deformation; Electrical; Conductivity; Strength

CITATION LINKS

[1] Enhanced mechanical and electrical properties of super-aligned carbon nanotubes reinforced copper by severe plastic deformation [2] Correlation between structural parameters and mechanical properties of Al5083 sheets processed by ECAR [3] EBSD characterization of nano/ultrafine structured Al/Brass composite produced by severe plastic deformation [4] Development of Cu-matrix, Al/Mn-reinforced, multilayered composites by accumulative roll bonding (ARB) [5] Evaluation of microstructure and mechanical properties of aluminum AA7022 produced by friction stir extrusion [6] Effects of reinforcement distribution on the mechanical properties of Al-Fe₃O₄ nanocomposites fabricated via accumulative roll bonding [7] Microstructural and textural evolutions in multilayered Ti/Cu composites processed by accumulative roll bonding [8] Investigation of residual stresses distribution in equal channel angular rolled aluminum alloy by means of the slitting method [9] Applicability of artificial neural network and nonlinear regression to predict mechanical properties of equal channel angular rolled Al5083 sheets ... [10] Investigation of residual stress and mechanical properties of equal channel angular rolled St12 strips [11] Experimental study of process parameters' effect on surface residual stress magnitudes in equal channel angular rolled aluminum alloys [12] Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement [13] Ultra-fine grained bulk aluminium produced by accumulative roll bonding process. Scripta Materialia [14] Fabrication of Al/Cu composite by accumulative roll bonding process and investigation of mechanical properties [15] Fabrication of nanostructure Al/SiCP composite by accumulative roll-bonding (ARB) process [16] Nanostructured bulk copper fabricated by accumulative roll bonding [17] Electronic properties of materials [18] High-strength and high-conductive Cu/Ag multilayer produced by ARB [19] ASM specialty handbook: Copper and copper alloys [20] ARB (accumulative roll-bonding) and other new techniques to produce bulk ultrafine grained materials [21] Microstructural evolution and hardening parameters [22] Hall-petch relation and boundary strengthening [23] Microstructure and mechanical properties of ultra-fine grains (UFGs) aluminum strips produced by ARB process [24] Measurement of sheet resistivities with the four-point probe

¹Manufacturing & Production Department, Mechanical Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

²Nanomaterials Department, Nanotechnology Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

*Correspondence

Address: Semnan University, In front of Sookan Park, Semnan, Iran
Phone: +98 (23) 31513345
Fax: +98 (23) 336541
mahmoodi@semnan.ac.ir

Article History

Received: March 26, 2018

Accepted: January 29, 2019

ePublished: September 01, 2019

رویکرد جدید برای افزایش همزمان استحکام و رسانایی الکتریکی ورق مس فوق ریزدانه تولیدشده توسط پیوند نورد تجمعی- پیوند نوردی

حامد سالاری MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

مسعود محمودی PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

احسان برهانی PhD

گروه نانومواد، دانشکده نانو فناوری، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

پیوند نورد سرد یک نوع فرآیند اتصال دهی مابین فلزات مشابه یا غیرمشابه است که پیوند بین فلزات از طریق اعمال تغییر شکل پلاستیک توسط فرآیند نورد در دمای اتاق برقرار می‌شود. از طرفی، فرآیند پیوند نورد تجمعی به‌عنوان یکی از روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید با امکان دستیابی به ساختار فوق ریزدانه و خواص مکانیکی بهبودیافته مطرح است. در این پژوهش یک روش ترکیبی متشکل از فرآیندهای پیوند نورد تجمعی و پیوند نورد سرد به‌منظور ساخت ورق مسی فوق ریزدانه با افزایش همزمان استحکام و هدایت الکتریکی پیشنهاد شد. ریزساختار خواص مکانیکی و هدایت الکتریکی نمونه تولیدشده با روش ترکیبی و نمونه‌های حاصل از سیکل‌های مختلف فرآیند پیوند نورد تجمعی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از بررسی ریزساختار ماده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که در ساختار کریستالی نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی، طیف گسترده‌ای از دانه‌های بسیار ریز در محدوده چندصد نانومتر با توزیع یکنواخت دیده می‌شوند. همچنین نتایج حاصل از آزمون کشش و سختی حاکی از افزایش پیوسته مقدار استحکام و سختی با افزایش تعداد پاس‌های نورد بود. در نهایت، بررسی هدایت الکتریکی توسط آزمون پروب چهار نقطه نشان داد که با افزایش تعداد سیکل‌های فرآیند پیوند نورد تجمعی، هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد، در حالی که در نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی افزایش همزمان استحکام، سختی و هدایت الکتریکی مشاهده شد.

کلیدواژه‌ها: پیوند نورد تجمعی، پیوند نورد سرد، تغییر شکل پلاستیک شدید، هدایت الکتریکی، استحکام

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۹

*نویسنده مسئول: mahmoodi@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

ریزساختار یک ماده می‌تواند روی خواص فیزیکی مانند استحکام، چقرمگی، انعطاف‌پذیری، سختی، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر سایش یا رسانایی الکتریکی تأثیر بگذارد [1, 2]. این خواص به‌نوبه خود کاربرد ماده را در فرآیندهای صنعتی، کنترل می‌کنند. مواد فوق ریزدانه به‌عنوان پلی کریستال‌های دارای دانه‌های بسیار کوچک با اندازه دانه میانگین (در محدوده ۱۰۰ نانومتر تا یک میکرومتر) تعریف می‌شوند.

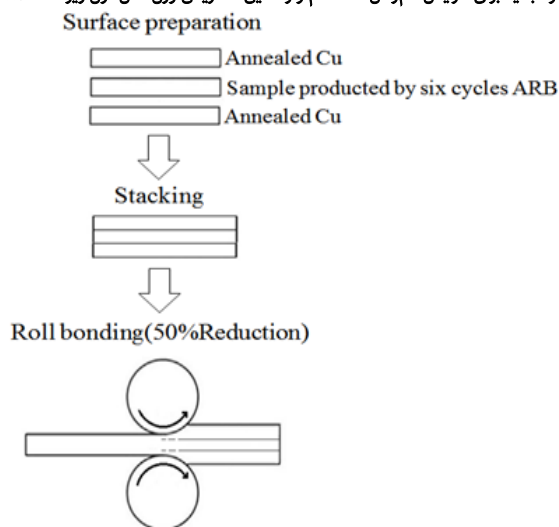
یکی از مهم‌ترین روش‌های فرآوری مواد فوق ریزدانه، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید است. در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، برای تولید فلزات فوق ریزدانه، کرنش پلاستیک بسیار بزرگی به فلز، در دمای پایین‌تر از دمای تبلور مجدد اعمال می‌شود [3-5]. از جمله فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید می‌توان به اکستروژن در کانال زاویه‌دار، اکستروژن و فشار تناوبی، پیچش تحت فشارهای بالا و پیوند نورد تجمعی اشاره کرد.

تغییرات بسیار ناچیز در ابعاد اولیه نمونه می‌تواند امکان تکرار فرآیند و در نتیجه دستیابی به کرنش‌های بسیار بالا را میسر سازد [6-8]. ویژگی مهم دیگر در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید،

امکان بهبود خواص مکانیکی و ریزساختاری نمونه‌ها بدون نیاز به افزودن عناصر آلیاژی یا ذرات سرامیکی است [9-12]. همچنین با انجام این فرآیندها در دماهای زیر نقطه ذوب فلز زمینه، می‌توان از تشکیل فازها و ترکیبات ناخواسته و مخرب جلوگیری نمود.

فرآیند پیوند نورد تجمعی به‌عنوان یکی از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای اولین بار توسط سائیتو و همکاران در سال ۱۹۹۹ معرفی شد [13]. این فرآیند معمولاً در دمای اتاق و بدون روانکار به این ترتیب انجام می‌گیرد که تعدادی ورق، روی هم قرار داده می‌شوند و توسط دستگاه نورد، تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار می‌گیرند. در ادامه، ورق خروجی از دستگاه نورد در راستای عمود بر نورد، به دو قسمت مساوی تقسیم و روی هم قرار داده می‌شود. سپس ساندویچ حاصل، دوباره تحت نورد قرار می‌گیرد. این قسمت از فرآیند، یعنی تقسیم ورق خروجی از دستگاه نورد به دو قسمت مساوی و قراردادن این دو قسمت روی هم، تعبیر کلمه تجمعی، برای این فرآیند است. این در حالی است که اگر مرحله تقسیم نمونه به دو قسمت و روی هم قراردادن آنها مطرح نباشد، فرآیند، پیوند نورد سرد نامیده می‌شود. تعداد مراحل نورد و همچنین تعداد، جنس، ضخامت و ترتیب چیدمان ورق‌ها یا استفاده از ذرات تقویت‌کننده یا پوشش‌های مختلف از پارامترهایی هستند که توسط محققان برای دستیابی به خواص مکانیکی و ریزساختاری مورد نظر انتخاب می‌شوند. محصول به‌دست‌آمده از فرآیندهای پیوند نوردی به‌صورت یک‌تکه است، بنابراین این فرآیندها نه تنها یک روش اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بلکه یک روش اتصال دهی نیز به شمار می‌روند که دلیل استفاده از کلمه پیوند برای این فرآیندها به این موضوع مربوط می‌شود [14]. مزایای فرآیندهای پیوند نوردی عبارت از عدم نیاز به استفاده از تجهیزات شکل دهی با ظرفیت بار زیاد و همچنین قالب‌های پرهزینه، نرخ تولید بالا و عدم محدودیت ابعادی در تولید محصول هستند [15]. با توجه به پیشرفت‌های سریع در صنایع الکترونیک، تولید موادی با استحکام و هدایت الکتریکی بالا از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مورد، مس و آلیاژهای آن به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته دو مشکل عمده در دستیابی به افزایش همزمان استحکام و هدایت الکتریکی وجود دارد [16]. نخست اینکه در آلیاژهای مس، عناصر آلیاژی در نقش ناخالصی ظاهر شده و موجب کاهش هدایت الکتریکی می‌شوند [17]. از این رو استفاده از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای دستیابی به خواص مکانیکی و الکتریکی مطلوب بدون نیاز به افزودن عناصر آلیاژی، پیشنهاد مناسبی برای حل این مشکل بود که توسط محققان مطرح شد. دوم اینکه افزایش کار سرد در نمونه باعث افزایش تراکم عیوب ساختاری مانند نابجایی می‌شود. همچنین هسته‌های نابجایی‌ها عامل پراکنده شدن الکترون‌ها و در نتیجه کاهش هدایت الکتریکی در نمونه‌ها هستند [18].

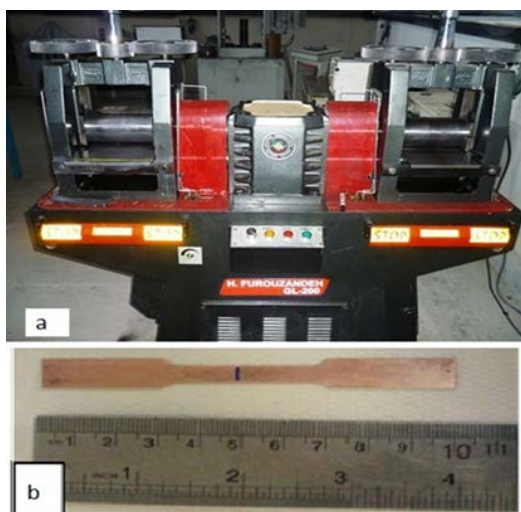
در بررسی هدایت الکتریکی نمونه‌های ورق، به دلیل شارش الکترون‌ها از سطح، ریزساختار نزدیک به سطوح در نمونه‌ها نقش مهمی را در نحوه شارش الکترون‌ها ایفا می‌کند [18]. در فرآیند پیوند نورد تجمعی با افزایش تغییر شکل پلاستیک ناشی از بالارفتن تعداد سیکل‌های فرآیند، چگالی نابجایی‌ها افزایش می‌یابد. این مساله می‌تواند باعث بهبود برخی خواص مکانیکی مانند استحکام و افت برخی خواص فیزیکی مانند هدایت الکتریکی شود. کاهش هدایت الکتریکی به دلیل افزایش تراکم هسته نابجایی‌ها به‌عنوان یک ضعف برای نمونه‌های حاصل از فرآیند پیوند نورد تجمعی محسوب می‌شود.



شکل ۲) شماتیک فرآیند پیوند نوردی روی ورق‌های مس آنیل شده و ورق حاصل از سیکل ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی

۲-۱- شرایط آماده‌سازی و بررسی نمونه‌ها

شکل ۳، دستگاه نورد مورد استفاده برای تولید نمونه‌های پیوند نوردی را نشان می‌دهد. به‌منظور ساخت نمونه برای بررسی‌های میکروسکوپی، ابعاد 20×20 میلی‌متر از ورق‌های حاصل از سیکل‌های مختلف فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولید شده به‌روش ترکیبی (پیوند نورد تجمعی- پیوند نوردی) بریده شدند. نمونه‌ها برای بررسی از صفحه (راستای نورد- راستای عرضی)، درون مانت گرم قرار گرفتند و پس از سنباده‌زنی توسط کاغذهای سنباده از جنس سیلیسیم‌کارباید، پولیش نهایی توسط خمیر الماس 0.25 میکرون صورت گرفت. در نهایت، نمونه‌ها توسط محلول آب مقطر، اتانول، اسید هیدروکلریک و کلراید آهن، اچ شدند. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، شرایط اتصال بین‌لایه‌ای و ریزساختاری نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل MIRA3TESCAN-XMU مورد بررسی قرار گرفت. آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمون کشش طبق استاندارد ASTM-E8-13a صورت پذیرفت. این آزمون توسط دستگاه مدل STM-۴۰۰ با نرخ کرنش 0.002 بر ثانیه و در دمای اتاق انجام شد.



شکل ۳) تصویر دستگاه نورد مورد استفاده و نمونه آزمون کشش محوری مس تولید شده، (a) تصویر دستگاه نورد مورد استفاده، (b) نمونه آزمون کشش محوری مس تولید شده

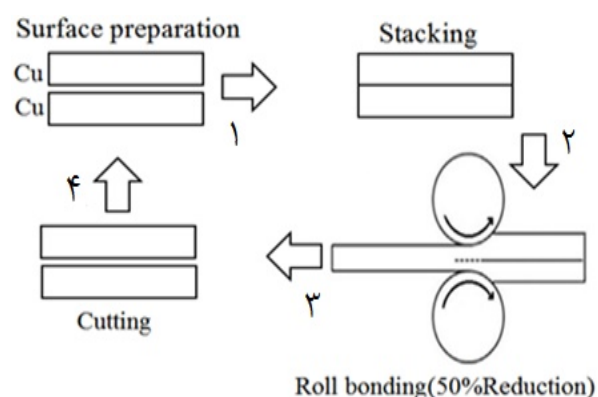
در پژوهش حاضر، ایده ترکیب فرآیندهای پیوند نورد تجمعی و پیوند نورد سرد، برای تولید ورق مسی فوق ریزدانه، به‌گونه‌ای مطرح شد که ریزساختار نزدیک به سطوح بالا و پایین نمونه، جهت هدایت الکتریکی مناسب، دارای تراکم پایینی از عیوب ساختاری باشند. نمونه تولید شده به این روش ترکیبی که روش پیوند نورد تجمعی- پیوند نوردی نامیده شد، از لحاظ ریزساختاری، خواص مکانیکی و الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت و با نمونه‌های حاصل از مراحل مختلف فرآیند پیوند نورد تجمعی مقایسه شد.

۲- مواد و روش انجام آزمایش

مواد مورد استفاده در این پژوهش، مس خالص تجاری با درجه $12000C$ و ضخامت 0.8 میلی‌متر است. برای انجام فرآیند نورد، ورق‌ها با ابعاد 150×50 میلی‌متر بریده شدند. همچنین فرآیند آنیل در دمای 500 درجه سلسیوس و به مدت 60 دقیقه انجام گرفت [19]. ابتدا سطوحی از ورق‌ها که قرار است روی هم قرار بگیرند با استون، چربی‌زدایی و سپس با برس سیمی، برسکاری شدند. انجام برسکاری باعث حذف لایه‌های اکسیدی و همچنین افزایش زبری و کارسختی سطوح می‌شود. در نتیجه فشار لازم نورد برای ایجاد اتصال، کاهش و استحکام اتصال افزایش می‌یابد. به‌منظور تولید نمونه به‌روش ترکیبی پیوند نورد تجمعی- پیوند نوردی، دو مرحله آزمایش طراحی شد.

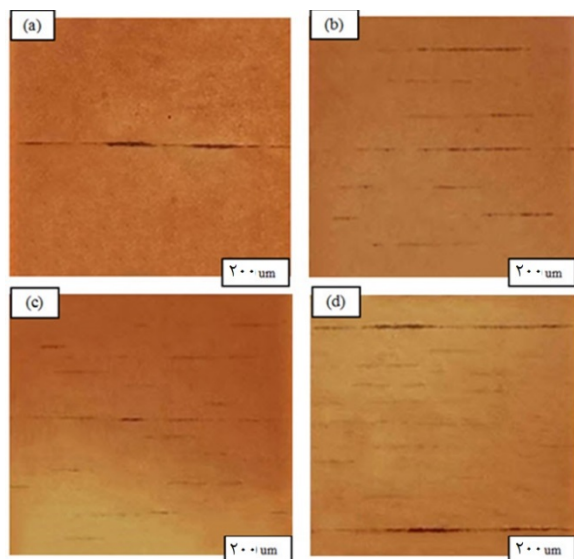
مرحله اول آزمایش بدین صورت بود که در این مرحله، دو ورق مسی پس از اتمام عملیات‌های آماده‌سازی، روی هم قرار داده شدند. ساندویچ اولیه با کاهش ضخامت 50% نورد شد. در ادامه، ورق خروجی از دستگاه نورد در جهت عمود بر نورد به دو قسمت مساوی برش داده شدند و این دو قسمت بعد از آماده‌سازی روی هم قرار داده شدند و تحت نورد با کاهش ضخامت 50% قرار گرفتند. این فرآیند تا شش سیکل و تولید یک ورق مسی با تعداد 64 لایه، بدون روانکار و در دمای اتاق صورت پذیرفت. شکل ۱، شماتیک یک سیکل فرآیند پیوند نورد تجمعی روی ورق مسی را نشان می‌دهد.

مرحله دوم آزمایش نیز بدین صورت بود که طبق ایده مطرح شده در این پژوهش، نمونه حاصل از سیکل ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی، مابین دو ورق مس آنیل شده قرار داده شد و ساندویچ حاصل تحت فرآیند پیوند نوردی با کاهش ضخامت 50% قرار گرفت. شکل ۲، شماتیک فرآیند پیوند نوردی برای نمونه‌های مس آنیل شده و نمونه حاصل از سیکل ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی را نشان می‌دهد.



شکل ۱) شماتیک یک سیکل فرآیند پیوند نورد تجمعی روی ورق مسی

دست‌نخورده از دو سطح، مقابل هم با وجود فاصله‌ای در حد یک اتم مابین آنها، یک پیوند فلزی بین سطوح ایجاد می‌شود^[20]. به بیان دیگر، مقدار بیشتر تغییر شکل لایه‌ها، ترک‌های سطحی و فلزات دست‌نخورده بیشتر را نتیجه خواهد داد. به این ترتیب جوش سرد قوی‌تری به دست خواهد آمد.



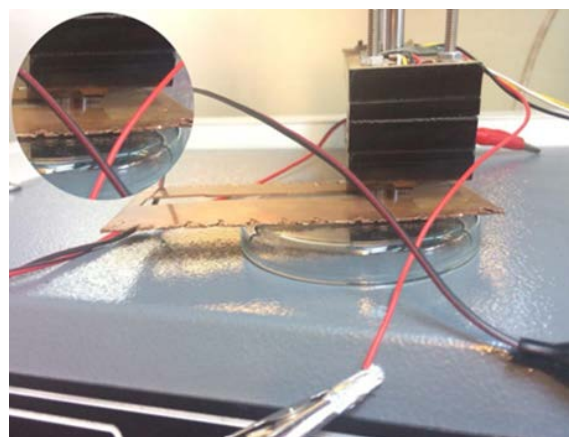
شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های مسی پس از یک، دو و پنج سیکل فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی؛ (a) یک، (b) دو، (c) پنج سیکل فرآیند پیوند نورد تجمعی و (d) نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی

با افزایش تعداد سیکل‌های فرآیند پیوند نورد تجمعی، میزان تغییر شکل پلاستیک اعمال‌شده به نمونه، افزایش و ضخامت لایه‌های نمونه کاهش می‌یابد. در نتیجه طبق نظریه فیلم، حجم فلز دست‌نخورده اکستروده‌شده از مابین ترک‌ها بیشتر می‌شود و پیوند بین‌لایه‌ای مناسب‌تری شکل می‌یابد. به همین دلیل طبق شکل ۵- a تا c به‌ترتیب برای نمونه‌های حاصل از سیکل‌های اول، سوم و پنجم فرآیند پیوند نورد تجمعی، با افزایش تعداد سیکل‌های فرآیند، وضوح کمتری از خطوط اتصال بین‌لایه‌ای قابل مشاهده است. نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی با شش سیکل فرآیند پیوند نورد تجمعی و یک پاس فرآیند پیوند نورد سرد، در بین نمونه‌های تولیدشده، بیشترین تغییر شکل اعمالی توسط نورد را در تمامی نواحی به‌جز قسمت‌های نزدیک به لبه بالا و پایین نمونه تحمل کرده است. از این رو طبق شکل ۵- d، مناطقی از این نمونه که تحت شش سیکل فرآیند پیوند نورد تجمعی به‌علاوه یک پاس نورد سرد قرار گرفته‌اند، دارای کمترین وضوح خطوط اتصال بین‌لایه‌ای هستند. این در حالی است که در نواحی نزدیک به لبه بالایی و پایینی نمونه، دو خط اتصال بین‌لایه‌ای حاصل از فرآیند پیوند نورد سرد کاملاً مشهود است که به‌منظور افزودن دو ورق مس خالص به نمونه حاصل از سیکل ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی انجام پذیرفته بود.

در پژوهش حاضر، کاهش عیوب ساختاری در سطوح بالا و پایین نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی، به‌منظور افزایش هدایت الکتریکی، توسط کاهش اعمال تغییر شکل پلاستیک به این سطوح نسبت به سطوح نمونه شش سیکل پیوند نورد تجمعی‌شده صورت پذیرفت که این مهم، با اعمال یک پاس فرآیند پیوند نورد سرد انجام گرفت. ولی افت کیفیت پیوند بین‌لایه‌ای در نمونه‌های

آزمون میکروسختی به‌منظور بررسی سختی نمونه‌ها از صفحه (راستای نورد- راستای عرضی)، با استفاده از دستگاه میکروسختی‌سنج ویکرز مدل Buehler توسط اعمال بار ۲۵ گرم و زمان توقف ۱۰ ثانیه طبق استاندارد ASTM-E384-05a صورت پذیرفت. برای هر نمونه ۸ نقطه، بررسی و میانگین اندازه‌های به‌دست‌آمده به‌عنوان سختی نمونه انتخاب شد. برای بررسی مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌ها از یک دستگاه پروب چهارنقطه‌ای دیجیتال با ماکزیمم تلرانس ۱ نانواهم استفاده شد. شکل ۴، دستگاه مورد استفاده در این آزمون به‌همراه بزرگ‌نمایی از محل قرارگیری پروب‌ها را نشان می‌دهد.

روش محاسبه مقاومت الکتریکی توسط دستگاه پروب چهارنقطه‌ای به این صورت بود که چهار پروب با فاصله‌های ۲ میلی‌متر از یکدیگر روی نمونه قرار می‌گیرند. سپس دستگاه از یک میلی‌ولت تا ۱۰ ولت ولتاژ اعمال و جریان عبوری از نمونه در بازه صفر تا ۲۰۰ میلی‌آمپر را می‌خواند. به این ترتیب مقدار مقاومت الکتریکی محاسبه می‌شود.



شکل ۴ تصویر آزمون پروب چهارنقطه‌ای روی نمونه تولیدشده در این پژوهش

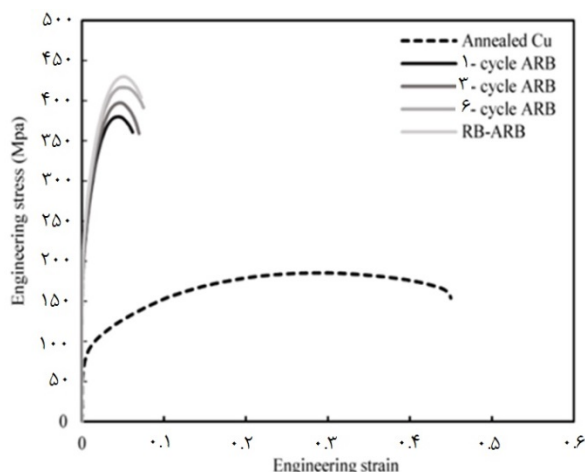
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختار

شکل ۵- a تا d، تصاویر میکروسکوپ نوری از صفحه (راستای نورد- راستای عرضی)، به‌ترتیب برای نمونه‌های حاصل از سیکل اول، سوم، پنجم فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی را نشان می‌دهد. تعداد لایه‌ها در سیکل ۱m از فرآیند پیوند نورد تجمعی برابر با 2^n است. در نمونه ترکیبی تعداد لایه‌ها به $2^n + 2$ یعنی ۶۶ لایه رسیده است. با توجه به تصاویر شکل ۵، خطوط اتصال بین‌لایه‌ای در سیکل‌های اولیه تقریباً واضح هستند. این در حالی است که در سیکل‌های بالاتر، این خطوط کمتر دیده می‌شوند.

محوشدن خطوط اتصال بین‌لایه‌ای در مراحل بالاتر، ناشی از افزایش قدرت اتصال بین لایه‌ها با افزایش مراحل فرآیند نورد بوده که با نظریه فیلم قابل توجیه است. این نظریه در بیان مکانیزم جوش سرد ایجادشده در فرآیند نوردی مطرح شده است. طبق این نظریه، لایه‌های نازک و ترد ایجادشده در سطح ورق ناشی از برسکاری، در هر مرحله از نورد خرد می‌شوند. همراه با خردشدن این لایه‌ها، برخی ترک‌ها در جهت عمود بر نورد ایجاد و باعث ظاهرشدن زیرلایه‌های فلزی می‌شوند که به فلز دست‌نخورده معروف هستند. این زیرلایه‌های نمایان‌شده تحت نیروی نورد از داخل ترک‌ها به بیرون اکستروده شده و در مرحله بعد با قرارگرفتن فلزات

ترکیبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، بیشترین افزایش در استحکام کششی برای نمونه حاصل از سیکل اول فرآیند پیوند نورد تجمعی اتفاق افتاد. سپس با ادامه فرآیند تغییرات، مقدار استحکام با نرخ ملایم‌تری تا سیکل ششم افزایش یافت.



نمودار ۱) منحنی تنش- کرنش مهندسی برای نمونه‌های مس حاصل از سیکل‌های مختلف فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولیدشده به روش ترکیبی

استحکام کششی نمونه تولیدشده به روش ترکیبی به ۴۳۲ مگاپاسکال رسید که حدوداً ۲/۳ برابر مس آنیل‌شده و بیش از استحکام کششی نمونه حاصل از سیکل ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی بود. استحکام تسلیم (σ_y) برای نمونه‌های پیوند نورد تجمعی‌شده با جمع تمامی مکانیزه‌های استحکام‌دهی به‌صورت رابطه ۱ بیان می‌شود [22].

(۱) $\sigma_y = \sigma_g + \sigma_d$

σ_g و σ_d به ترتیب پارامترهای ناشی از اصلاح دانه و ناهنجاری هستند. در اثر انجام کار سرد، دانسیته ناهنجاری‌ها با افزایش تغییر فرم افزایش می‌یابد. در نتیجه، برخورد آنها بیشتر می‌شود که این خود باعث ایجاد جاگ‌های متعدد روی ناهنجاری‌ها و متوقف شدن یا کند شدن حرکت آنها می‌شود. بنابراین با افزایش مقدار تغییر شکل پلاستیک، مقدار ناهنجاری‌ها افزایش می‌یابد که منجر به افزایش تنش تسلیم می‌شود. افزایش تنش تسلیم σ_d متناسب با تراکم ناهنجاری (ρ) است که از رابطه ۲ (رابطه تیلور) محاسبه می‌شود [21].

$$\sigma_d = \alpha M G b \sqrt{\rho} \quad (2)$$

α پارامتر وابسته به جنس، M نشان‌دهنده فاکتور تیلور، G مدول برشی و b بردار برگرز است. در دماهای پایین (کمتر از دمای ذوب ماده)، مرز دانه‌ها موانع قوی در برابر حرکت ناهنجاری‌ها هستند. زیرا به علت اختلاف آرایش کریستالوگرافی دانه‌های مجاور، ناهنجاری‌ها قادر به لغزش از یکی به دیگری نیستند. پس ناهنجاری‌های متحرک با رسیدن به مرز دانه‌ها تجمع می‌کنند و از حرکت باز می‌مانند. کاهش اندازه دانه باعث ایجاد مرز دانه‌های زاویه بزرگ با اندازه کوچک شده و از طریق رابطه ۳ (رابطه هال- پیچ) موجب استحکام بخشی می‌شود [21].

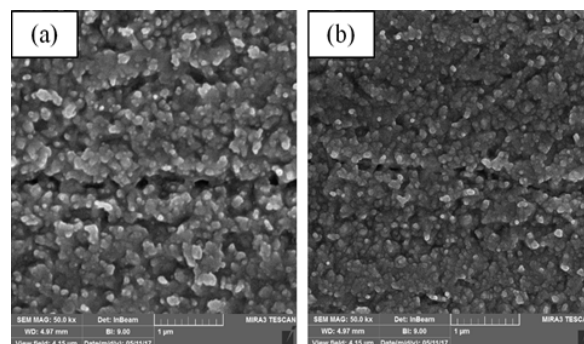
$$\sigma_y = \sigma_0 + A d^{-1/2} \quad (3)$$

d قطر دانه، σ_0 مقاومت شبکه و A ثابت معادله است. افزایش استحکام نمونه‌های تولیدشده توسط فرآیند پیوند نورد تجمعی تا

پیوندی توسط فرآیند پیوند نورد سرد، به دلیل پایین بودن تغییر شکل اعمال شده، غیرقابل اجتناب بود.

شکل ۶- a و b به ترتیب تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از صفحه (راستای نورد- راستای عرضی)، برای نمونه حاصل از سیکل چهارم فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولیدشده به روش ترکیبی است. پس از چهار مرحله فرآیند پیوند نورد تجمعی متوسط، اندازه دانه مس خالص تقریباً به ۴۰۰ نانومتر رسید. اندازه ساختار کریستالی نمونه تولیدشده به روش ترکیبی، فوق‌العاده ریز شده است، به طوری که مس با ساختار نسبتاً یکنواخت با دانه‌هایی در حدود ۲۰۰-۱۰۰ نانومتر حاصل شد.

کاهش اندازه چشمگیر دانه در نمونه تولیدشده به روش ترکیبی در مقایسه با نمونه حاصل از سیکل چهارم فرآیند پیوند نورد تجمعی می‌تواند به تفاوت در میزان تغییر شکل پلاستیک اعمال شده توسط فرآیند نورد برای هر یک از این نمونه‌ها مربوط باشد. با اعمال تغییر شکل پلاستیک به ماده، تراکم بالایی از عیوب مانند ناهنجاری‌ها در ریزساختار شکل می‌گیرند. ناهنجاری‌هایی که حین تغییر شکل پلاستیک ایجاد می‌شوند، در نواحی به نام مرزهای ناهنجاری تجمع می‌کنند. به مرور متناسب با جهت نیروی تغییر شکل، آرایش خاصی مابین مرزهای ناهنجاری هندسی و تصادفی ایجاد می‌شود. با افزایش کرنش، فاصله این مرزها (با اندازه واحدهای تشکیل شده) کوچک‌تر و زاویه عدم تطابق آنها بیشتر می‌شود. در نتیجه، این فعل و انفعالات باعث تشکیل ریزساختاری با دانه‌بندی بسیار ریز و مرز دانه‌هایی با زاویه عدم تطابق بالا می‌شود. یکنواختی بیشتر ریزساختار نمونه تولیدشده توسط روش ترکیبی نسبت به نمونه حاصل از سیکل چهارم فرآیند پیوند نورد تجمعی را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در فرآیند پیوند نورد تجمعی پس از سیکل اول، کرنش برشی اضافی در سطح ورق ایجاد می‌شود. وقتی ورق به دو قسمت بریده می‌شود و تکه‌ها روی هم قرار می‌گیرند، این کرنش به وسط ضخامت ورق منتقل می‌شود. به همین ترتیب بعد از هر سیکل کرنش برشی اضافی ایجادشده در سطح ورق به تدریج در طول ضخامت ورق، توزیع و موجب تسریع تحولات ریزساختاری مثل ریزدانه‌گی و همچنین یکنواختی ساختار در تعداد پاس‌های بیشتر نورد می‌شود [21]. از این رو، نمونه تولیدشده توسط روش ترکیبی به دلیل قرارگرفتن تحت سیکل‌های بالاتری از فرآیند پیوند نورد تجمعی دارای یکنواختی ریزساختاری بیشتری است.



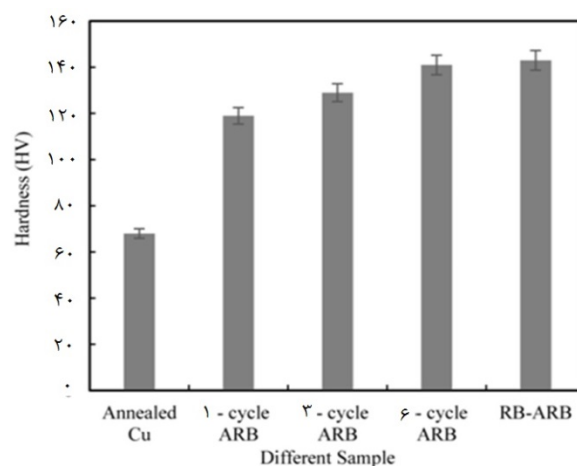
شکل ۶) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های مسی پس از چهار سیکل فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولیدشده به روش ترکیبی، (a) چهار سیکل فرآیند پیوند نورد تجمعی، (b) نمونه تولیدشده به روش ترکیبی

۳-۲- بررسی خواص مکانیکی

نمودار ۱، تغییرات استحکام کششی نمونه‌های حاصل از سیکل‌های مختلف فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولیدشده به روش

سیکل‌های میانی (سیکل سوم) تحت تأثیر مکانیزم کرنش سختی یا (تقویت نابه‌جایی‌ها) طبق رابطه ۲ قرار دارد. در سیکل‌های بالاتر، افزایش تغییر شکل پلاستیک اعمال‌شده در اثر فرآیند نورد، باعث شکل‌گیری دانه‌های فوق‌العاده ریز در حد چند صدنانومتر در ریزساختار نمونه می‌شود. تشکیل دانه‌های بسیار ریز با مرز دانه‌های زاویه بزرگ، از حرکت نابه‌جایی‌ها جلوگیری می‌کنند و موجب قفل شدن آنها در یکدیگر می‌شوند. به این ترتیب در نمونه‌های حاصل از سیکل‌های بالای فرآیند پیوند نورد تجمعی، بهبود اندازه دانه طبق رابطه ۳ نقش مهمی را در افزایش استحکام نمونه‌ها ایفا می‌کند [23]. بالاتر بودن استحکام کششی نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی نسبت به نمونه‌های حاصل از سیکل اول، سوم و ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی می‌تواند به دلیل تعداد پاس نورد بیشتر و در نتیجه افزایش ریزدانه‌گی در نمونه تولیدشده توسط این روش باشد.

نمودار ۲، مقدار تغییرات سختی را برای نمونه‌های حاصل از سیکل‌های مختلف فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار ۲ مشخص بوده، مقدار سختی به‌صورت پیوسته تا سیکل ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی افزایش یافته است. همچنین مقدار سختی نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی نسبت به مقدار سختی نمونه حاصل از سیکل ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی، اندکی افزایش نشان می‌دهد.



نمودار ۲) تغییرات میکروسختی برای نمونه‌های حاصل از سیکل‌های مختلف فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی

افزایش سختی می‌تواند تحت تأثیر افزایش استحکام باشد. به بیان دیگر می‌توان گفت با افزایش استحکام سختی نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه، تفسیر ریزساختاری افزایش سختی از تفسیر ریزساختاری که برای افزایش استحکام مطرح شد، جدا نیست. به‌طوری که افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها طبق رابطه ۲ (رابطه تیلور) و تغییرات در اندازه دانه طبق رابطه ۳ (رابطه هال-پچ)، علاوه بر تأثیر روی استحکام، موجب تغییرات قابل توجهی در سختی ماده می‌شوند. به غیر از این تفاسیر مشترک بین افزایش سختی و استحکام، ویژگی‌های ریزساختاری مختص فرآیندهای پیوند نوردی وجود دارد که موجب افزایش چشمگیر سختی می‌شوند. سختی به‌طور کلی ۲ تا ۳ برابر در مقایسه با سختی مواد آئیل‌شده می‌رسد و پس از آن، سختی به سطح اشباع می‌رسد و بیشتر افزایش نمی‌یابد [18]. افزایش نمایی تعداد لایه‌ها در واحد ضخامت، یکی از این ویژگی‌های ریزساختاری در نمونه‌های تولیدشده به‌روش پیوند نورد

تجمعی است.

همچنین کرنش معادل برای سیکل nام از فرآیند پیوند نورد تجمعی برابر با $0.8n$ است. از طرفی چون کرنش برشی اضافی ایجادشده در طی فرآیندهای پیوند نوردی ناشی از اصطکاک بین غلطک و نمونه و اصطکاک بین خود لایه‌ها، ضخامت ماده را تغییر نمی‌دهد، باید به کرنش معادل ورق اضافه شود. پس کرنش کلی اعمالی در طول n سیکل فرآیند پیوند نورد تجمعی بدون روانکار خیلی بزرگ‌تر از $0.8n$ است [19] که می‌تواند تفسیر دیگری از افزایش چشمگیر مقدار سختی تا سیکل ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی باشد.

۳-۳- بررسی هدایت الکتریکی

پس از قرارگیری نمونه‌های حاصل از سیکل‌های مختلف فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی، تحت آزمون پروب چهارنقطه‌ای، مقاومت الکتریکی برای هریک از نمونه‌ها گزارش شد.

اسمیت به‌منظور گزارش مقاومت الکتریکی ویژه برای نمونه‌های تحت آزمون پروب چهارنقطه‌ای علاوه بر مقدار مقاومت الکتریکی، ضرایب اصلاحی مربوط به هندسه نمونه را مطرح کرد [24]. مقاومت ویژه از رابطه ۴ به دست می‌آید.

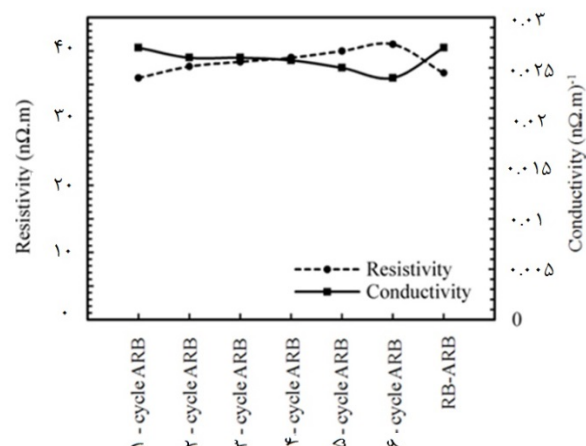
$$\rho = G \frac{V}{I} = G R \quad (4)$$

ρ و R به ترتیب مقاومت ویژه و مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده از نمونه هستند. G ضریب اصلاح در آزمون پروب چهارنقطه‌ای است و طبق رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$G = \frac{\pi}{\ln 2} t C \left(\frac{a}{d} \right)^2 \quad (5)$$

$\frac{\pi}{\ln 2}$ عامل فاکتور هندسی، t ضخامت نمونه، C عامل اصلاح ناشی از شکل مستطیلی نمونه با طول (a) ، عرض (d) و فاصله پراب‌ها از هم (S) است. مقدار عامل C طبق جدول مطرح‌شده توسط اسمیت [24] با توجه به ابعاد نمونه‌ها و فاصله پراب‌ها از هم برابر با $4/51$ خوانده شد [24]. همچنین هدایت الکتریکی با معکوس کردن مقاومت ویژه به دست آمد.

نمودار ۳، مقدار تغییرات مقاومت و هدایت الکتریکی برای نمونه‌های حاصل از سیکل‌های مختلف فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی را نشان می‌دهد. با توجه به شارش الکترون‌ها در لایه بسیار نازک از سطح، وضعیت ریزساختاری سطح شارش در کیفیت حرکت الکترون‌ها، نقش اصلی را ایفا می‌کند.



نمودار ۳) تغییرات مقاومت و هدایت الکتریکی برای نمونه‌های حاصل از سیکل‌های مختلف فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی

۵- مشاهده ساختار فوق ریزدانه و همگن در نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی می‌تواند نتیجه امیدبخشی برای دستیابی به بهبود سایر خواص مانند شکل‌پذیری، چقرمگی، انعطاف‌پذیری، مقاومت در برابر خوردگی و رفتار در درجه حرارت بالا یا پایین باشد که نیاز به بررسی بیشتری را می‌طلبد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله از دانشگاه سمنان برای حمایت مادی و معنوی این تحقیق تشکر می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. ضمناً محتویات علمی و ادبی مقاله، منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله بر عهده نویسندگان است

تعارض منافع: نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع برای این اثر ندارند.

سهم نویسندگان: حامد سالاری (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ مسعود محمودی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ احسان برهانی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- 1- Xiong L, Shuai J, Liu K, Hou Z, Zhu L, Li W. Enhanced mechanical and electrical properties of super-aligned carbon nanotubes reinforced copper by severe plastic deformation. *Composites Part B: Engineering*. 2019;160:315-332.
- 2- Mahmoodi M, Naderi A, Dini G. Correlation between structural parameters and mechanical properties of Al5083 sheets processed by ECAR. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017;26:6022-6027.
- 3- Naseri M, Reihanian M, Borhani E. EBSD characterization of nano/ultrafine structured Al/Brass composite produced by severe plastic deformation. *Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*. 2018;51(2):123-138.
- 4- Alizadeh M, Dashtestaninejad MK. Development of Cu-matrix, Al/Mn-reinforced, multilayered composites by accumulative roll bonding (ARB). *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;732:674-682.
- 5- Tahmasbi K, Mahmoodi M. Evaluation of microstructure and mechanical properties of aluminum AA7022 produced by friction stir extrusion. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;32:151-159.
- 6- Pirouzi B, Borhani E. Effects of reinforcement distribution on the mechanical properties of Al-Fe304 nanocomposites fabricated via accumulative roll bonding. *Mechanics of Advanced Composite Structures*. 2018;5(2):131-139.
- 7- Jiang Sh, Peng R, Jia N, Zhao X, Zuo L. Microstructural and textural evolutions in multilayered Ti/Cu composites processed by accumulative roll bonding. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(6):1165-1174.
- 8- Mahmoodi M, Lohrasbi S. Investigation of residual stresses distribution in equal channel angular rolled aluminum alloy by means of the slitting method. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2017;52(6):389-396.
- 9- Mahmoodi M, Naderi A. Applicability of artificial

همان‌طور که در نمودار ۳ مشخص است، با افزایش مراحل فرآیند نورد، هدایت الکتریکی نمونه‌های پیوند نورد تجمعی‌شده، به‌صورت پیوسته تا سیکل ششم کاهش داشته است. می‌توان گفت با در نظر گرفتن این نکته که هسته اتم‌های ناهنجاری به‌صورت مانع در مقابل جریان الکترون‌ها عمل می‌کنند، با افزایش تراکم ناهنجاری‌ها در اثر بالارفتن مراحل نورد، هدایت الکتریکی به‌صورت پیوسته کاهش یافته است.

روش ترکیبی مطرح‌شده در این پژوهش با ایده افزودن لایه‌های مس خالص آنیل‌شده توسط فرآیند پیوند نورد سرد به سطوح بالا و پایین نمونه حاصل از سیکل ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی باعث شد تا هدایت الکتریکی این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌های پیوند نورد تجمعی‌شده افزایش یابد. این مساله را می‌توان به‌دلیل مقدار کار سرد پایین انجام‌گرفته توسط فقط یک پاس نورد و تراکم پایین عیوب ساختاری مانند ناهنجاری‌ها در سطوح بالا و پایین نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی دانست.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نمونه‌های حاصل از سیکل‌های مختلف فرآیند پیوند نورد تجمعی و نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی (پیوند نورد تجمعی- پیوند نوردی) از لحاظ ریزساختاری، خواص مکانیکی و فیزیکی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از بررسی‌های صورت‌گرفته در این پژوهش به‌صورت زیر است:

۱- کیفیت اتصال بین‌لایه‌ای در نمونه‌های تولیدشده، با افزایش تعداد مراحل نورد افزایش یافت. به‌طوری که نمونه تولیدشده با روش ترکیبی، مناسب‌ترین کیفیت اتصال بین‌لایه‌ای در نواحی حاصل از سیکل ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی به‌علاوه یک پاس فرآیند پیوند نورد سرد را داشت، ولی خطوط اتصال ورق‌های مس خالص آنیل‌شده توسط فرآیند پیوند نورد سرد کاملاً مشهود بود که نشان از کیفیت پایین استحکام پیوندی برای نواحی نزدیک به لبه پایینی و بالایی نمونه بود.

۲- با قرارگیری مس خالص تحت چهار سیکل فرآیند پیوند نورد تجمعی ساختار فوق ریزدانه با متوسط اندازه دانه ۴۰۰ نانومتر مشاهده شد. همچنین نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی با تحمل تغییر شکل بیشتر توسط فرآیند نورد، دارای دانه‌هایی در مقیاس نانو با توزیع یکنواخت‌تری نسبت به نمونه حاصل از سیکل چهارم فرآیند پیوند نورد تجمعی بود، به‌طوری که محدوده اندازه دانه‌ها تقریباً به ۲۰۰-۱۰۰ نانومتر کاهش یافت.

۳- استحکام و سختی نمونه‌ها در سیکل اول فرآیند پیوند نورد تجمعی، افزایش بسیار چشمگیری داشت. در ادامه با افزایش سیکل‌های فرآیند پیوند نورد تجمعی تا سیکل ششم، استحکام و سختی با نرخ ملایم‌تری افزایش یافتند. نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی دارای بیشترین استحکام و سختی در مقایسه با سایر نمونه‌ها بود.

۴- نمونه سیکل ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی، بالاترین مقاومت ویژه را بین نمونه‌های حاصل از مراحل مختلف این فرآیند نشان داد. با توجه به استحکام و سختی بالای این نمونه نسبت به نمونه‌های حاصل از سیکل‌های مختلف فرآیند پیوند نورد تجمعی، کاهش هدایت الکتریکی می‌تواند یک نقص بزرگ باشد. این در حالی است که نمونه تولیدشده به‌روش ترکیبی با ایده افزودن دو ورق مس خالص توسط فرآیند پیوند نورد سرد به نمونه حاصل از سیکل ششم فرآیند پیوند نورد تجمعی، به‌طور هم‌زمان استحکام، سختی و هدایت الکتریکی بالایی را نشان داد که این مشاهده

- 2):231-235.
- 16- Takata N, Lee SH, Lim CY, Kim SS, Tsuji N. Nanostructured bulk copper fabricated by accumulative roll bonding. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2007;7(11):3985-3989.
- 17- Hummel R. *Electronic properties of materials*. 2nd edition. Heidelberg: Springer Verlag GmbH; 1993. pp. 120-123.
- 18- Ghalandari L, Moshksar M. High-strength and high-conductive Cu/Ag multilayer produced by ARB. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;506(1):172-178.
- 19- Davis J. *ASM specialty handbook: Copper and copper alloys*. Russell Township: ASM International Handbook Committee; 2001. p. 44073.
- 20- Tsuji N, Saito Y, Lee SH, Minamino Y. ARB (accumulative roll-bonding) and other new techniques to produce bulk ultrafine grained materials. *Advanced Engineering Materials*. 2003;5(5):338-344.
- 21- Hansen N, Huang X, Hughes D. Microstructural evolution and hardening parameters. *Materials Science and Engineering: A*. 2001;317(1-2):3-11.
- 22- Hansen N. Hall-petch relation and boundary strengthening. *Scripta Materialia*. 2004;51(8):801-806.
- 23- Eizadjou M, Danesh Manesh H, Janghorban K. Microstructure and mechanical properties of ultra-fine grains (UFGs) aluminum strips produced by ARB process. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009;474(1-2):406-415.
- 24- Smits F. Measurement of sheet resistivities with the four-point probe. *Bell Labs Technical Journal*. 1958;37(3):711-718.
- neural network and nonlinear regression to predict mechanical properties of equal channel angular rolled Al5083 sheets. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2016;13(8):1515-1525.
- 10- Honarpisheh M, Haghighat E, Kotobi M. Investigation of residual stress and mechanical properties of equal channel angular rolled St12 strips. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2018;232(10):841-851.
- 11- Mahmoodi M, Sedighi M, Tanner DA. Experimental study of process parameters' effect on surface residual stress magnitudes in equal channel angular rolled aluminum alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2014;228(12):483-487.
- 12- Valiev RZ, Langdon TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*. 2006;51(7):881-981.
- 13- Saito Y, Tsuji N, Utsunomia H, Sakai T, Hong R. Ultra-fine grained bulk aluminium produced by accumulative roll bonding process. *Scripta Materialia*. 1999;40(7):795-800.
- 14- Alizadeh M, Talebian M. Fabrication of Al/Cu composite by accumulative roll bonding process and investigation of mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2012;558:331-337.
- 15- Alizadeh M, Paydar M. Fabrication of nanostructure Al/SiCP composite by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;492(1-