ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1333-1346

Evaluation of Mechanical and Electrical Properties of Al/Cu/ Carbon Nanotubes Multilyer Nanocomposites Manufactured by Accumulative Roll Bonding (ARB)

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Rostamnejad Charati A.[1] *MSc,*
Abdoos H.*[1] *PhD,*
Borhani E.[1] *PhD,*
Naseri M.[2] *PhD*

How to cite this article
Rostamnejad Charati A, Abdoos H, Borhani E, Naseri M. Evaluation of Mechanical and Electrical Properties of Al/Cu/Carbon Nanotubes Multilyer Nanocomposites Manufactured by Accumulative Roll Bonding (ARB). Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1333-1346.

[1]Nanotechnology Faculty, New Sciences & Technologies Campus, Semnan University, Semnan, Iran
[2]Materials Science & Engineering Department, Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

Correspondence
Address: Semnan University, In front of Sookan Park, Semnan, Iran, Postal Code:: 3513119111
Phone: +98 (23) 31535409
Fax: +98 (23) 31535400
h.abdoos@semnan.ac.ir

Article History
Received: August 08, 2019
Accepted: November 06, 2019
ePublished: May 09, 2020

ABSTRACT

In the present study, multilayer nanocomposites fabricated by accumulative roll bonding (ARB) process. Aluminum sheets, copper sheets (with 0.1 and 0.3mm thickness) and multiwall carbon nanotubes (MWCNTs) were used as experimental materials. The rolling process continued to five cycles. Then, microstructure, hardness, tensile strength and electrical conductivity of nanocomposites were investigated. Necking and fracturing recognized as mechanisms of copper layers distribution in the aluminum matrix. The bonding strength between layers increased with the number of cycles due to the improvement of MWCNTs distribution. The results show that the hardness of aluminum increased with increasing copper layer thickness and these increases were about 30 and 32% for composites without nano reinforcements and nanocomposites contain MWCNTs, respectively. The highest hardness (147HV), is related to the sample containing carbon nanotubes and 0.3mm copper sheet, after five rolling cycles (446% increase compared to aluminum sheets). The results confirm the positive effect of copper and the MWCNTs on the improvement of strength. The highest strength and elongation is observed in the aluminum-copper-MWCNTs nanocomposite after four cycles. The results also indicated that the addition of copper and MWCNTs can simultaneously increase the strength and electrical conductivity of the resulted composites.

Keywords Accumulative Roll Bonding; Nanocomposite; Aluminum; Carbon Nanotubes; Mechanical Properties; Electrical Conductivity

CITATION LINKS

[1] Application of accumulative roll bonding and anodizing process to produce Al–Cu–Al2O3 ... [2] Investigation of structure and mechanical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) ... [3] Fabrication of an aluminum–carbon nanotube metal matrix composite by accumulative ... [4] Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites ... [5] The formability investigation of CNT-reinforced aluminum nano-composite sheets manufactured by accumulative roll ... [6] Novel manufacturing process of closed-cell aluminum foam by ... [7] Development and characterization of Al/MWCNT–Al2O3 hybrid ... [8] Compressive, shear, and fracture behavior of CNT reinforced Al matrix composites manufactured by severe plastic ... [9] The investigation and comparison of mechanical propertise and microstructure Al/CNT and Al/CNT/Al2O3 copmosites produced by mixed accumulative roll ... [10] The influence of carbon nanotube and roll bonding parameters on the bond strength of Al ... [11] Macrostructure evolution and mechanical properties of accumulative roll bonded Al/Cu/Sn multilayer ... [12] New strategy to simultaneous increase in strength and electrical conductivity of ufg copper strip fabricated via accumulative roll bonding- cold roll ... [13] Hard copper with good electrical conductivity fabricated by accumulative roll-bonding to ultrahigh ... [14] Cu/C composites with a good combination of hardness and electrical conductivity fabricated from Cu and graphite by accumulative ... [15] Mechanical properties and microstructure evolutions of multilayered Al–Cu composites produced by accumulative roll bonding process and subsequent ... [16] Electrical conductivity measurement of metal plates using broadband eddy-current and four-point ... [17] Pressure welding by rolling [18] Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) ... [19] Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding ... [20] P/M aluminum matrix composites: an ... [21] volution of reinforcement distribution in Al–B4C composites during accumulative roll ... [22] A new consideration on reinforcement distribution in the different planes of nanostructured ... [23] Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding ... [24] Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding ... [25] Structure and strength after large strain ...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

ارزیابی خواص مکانیکی و الکتریکی نانوکامپوزیت‌های چندلایه آلومینیوم- مس- نانولوله کربنی تولیدشده با فرآیند نورد تجمعی پیوندی

علی‌اکبر رستم‌نژادچراتی MSc
دانشکده نانوفناوری، پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
حسن عبدوس* PhD
دانشکده نانوفناوری، پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
احسان برهانی PhD
دانشکده نانوفناوری، پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
مجید ناصری PhD
گروه مهندسی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

چکیده
در مقاله حاضر نانوکامپوزیت‌های چندلایه با استفاده از ورق‌های آلومینیوم- مس (با دو ضخامت ۰/۱ و ۰/۳میلی‌متر) و نانولوله‌های کربنی از طریق فرآیند نورد تجمعی تهیه شدند. فرآیند نورد تجمعی برای تولید نمونه‌های نانوکامپوزیتی تا پنج سیکل ادامه یافت. سپس آزمون‌های بررسی ساختار، سختی، کشش و اندازه‌گیری هدایت الکتریکی به منظور ارزیابی خصوصیات نمونه‌ها انجام پذیرفت. گلویی‌شدن و شکست دو سازوکار مهم در ارتباط با نحوه توزیع فلز مس در زمینه آلومینیم حین نورد تشخیص داده شدند. همچنین افزایش تعداد پاس‌ها ضمن بهبود پیوند لایه‌ها موجب از هم‌پاشیدن خوشه‌های نانولوله‌های‌کربنی و بهبود توزیع آنها در ساختار می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که مقدار سختی آلومینیوم با افزایش ضخامت لایه مس برای کامپوزیت بدون نانولوله‌کربنی و نانوکامپوزیت محتوی نانولوله‌کربنی به ترتیب حدود ۳۰ و ۳۲% به ازای اعمال پنج پاس، افزایش یافته است. بیشترین میزان سختی، معادل ۱۴۷ویکرز، متعلق به نمونه حاوی نانولوله‌کربنی و تهیه‌شده از ورق مس با ضخامت ۰/۳میلی‌متر و پس از اعمال پنج پاس نورد است (۴۴۶% افزایش در مقایسه با آلومینیم). نتایج آزمون استحکام‌سنجی تاثیر ضخامت لایه مسی و نانولوله‌های کربنی را در افزایش استحکام تا پاس چهارم تایید می‌کند. بیشترین استحکام و تغییر طول تا شکست مربوط به نمونه نانوکامپوزیت چندلایه آلومینیم- مس- نانولوله‌کربنی در پاس چهارم است. همچنین نتایج آزمون‌ها مشخص می‌سازد که افزودن مس و نانولوله‌های کربنی به طور همزمان می‌تواند موجب افزایش استحکام و هدایت الکتریکی کامپوزیت‌های مورد مطالعه شود.

کلیدواژه‌ها: نورد تجمعی پیوندی، نانوکامپوزیت، آلومینیوم، نانولوله‌های کربنی، خواص مکانیکی، هدایت الکتریکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۵

*نویسنده مسئول: h.abdoos@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های فلزی چندلایه (Metallic Multilayered Composites; MMCs) به‌عنوان موادی پیشرفته دارای کاربردهای فراوانی هستند[1]. در سال‌های اخیر کامپوزیت‌های چندلایه فلزی به‌دلیل خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی مورد توجه قرار گرفته‌اند[2]. تولید این نوع کامپوزیت‌ها با فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید به‌دلیل ملاحظات اقتصادی و امکان تولید انبوه، توسعه یافته است[1-3]. قابل ذکر است که اغلب فرآیندهای تغییر شکل نیازمند تجهیزات گران و فرآیند پیچیده هستند که استفاده از آنها را به‌صورت اقتصادی و صنعتی محدود می‌سازد. در این میان، فرآیند نورد تجمعی پیوندی (Accumulative roll bonding; ARB) با توجه به سادگی و ارزانی آن می‌تواند برای تولید کامپوزیت‌های چندلایه فلزی مورد استفاده قرار گیرد[2].

از طرفی فرآیند نورد تجمعی یکی از روش‌های جدید برای تولید کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات به شمار می‌رود. یکی از نکات مهم در توسعه کامپوزیت‌ها اجتناب از کلوخه‌ای‌شدن و حفظ توزیع همگن تقویت‌کننده‌ها در زمینه است[4]. فرآیند نورد تجمعی می‌تواند تا حد زیادی این مشکلات را مرتفع سازد[1, 3]. در فرآیند نورد تجمعی، پودر تقویت‌کننده نانومتری قبل از اعمال نورد بین صفحات فلزی با هدف تولید لایه‌ای از کامپوزیت زمینه فلزی در فصل مشترک، توزیع می‌شود[3, 5]. اولین بار *کیتازانو* و همکاران[6] از فرآیند نورد تجمعی برای توزیع ذرات TiH_2 در زمینه آلومینیم برای تولید فومهای آلومینیم سلول بسته استفاده نمودند. نانوذرات مختلفی برای ساخت انواع کامپوزیت‌ها در فرآیند نورد تجمعی استفاده شده‌اند که هدف استفاده از آنها صرفاً بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت حاصل بوده است. از میان تقویت‌کننده‌های مختلف نانولوله‌های کربنی به‌دلیل خواص فوق‌العاده بسیار مورد توجه هستند[7]. نانولوله‌های کربنی یکی از آلوتروپ‌های کربن با خصوصیات ویژه محسوب می‌شوند[8]. نانولوله‌های کربنی دارای خواص فیزیکی و مکانیکی فوق‌العاده هستند. با توجه به این ویژگی‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی به منظور افزایش خواص مانند پایداری در دمای بالا، استحکام و سفتی، هدایت الکتریکی و گرمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند[4, 5]. خواص مکانیکی فوق‌العاده نانولوله‌های کربنی در مقایسه با هر ماده فلزی آنها را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تقویت‌کننده‌ها مطرح ساخته است[8]. *سلیمی* و همکاران[3] کامپوزیت زمینه آلومینیم تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را تهیه نمودند و گزارش کردند که نانولوله‌ها در زمینه آلومینیم به گونه مناسبی جای گرفته و ساختار چندلایه خود را نیز پس اعمال پاس‌های نورد حفظ نمودند. *تابش* و همکاران[9] نیز خواص مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت آلومینیم- نانولوله کربنی و کامپوزیت هیبریدی آلومینیم- نانولوله کربنی- آلومینا را که با فرآیند نورد تجمعی تهیه شده بودند، مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که در هر دو نوع کامپوزیت با افزایش تعداد پاس‌ها استحکام کششی افزایش و انعطاف‌پذیری ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. همچنین استحکام در کامپوزیت هیبریدی در پاس‌های مشابه، مقادیر بیشتری را نشان

داد. *مروتی* و *مولایی‌داریانی*[5] خصوصیات کامپوزیت زمینه آلومینیم نورد تجمعی شده و تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را بررسی نمودند. آنها دریافتند که ضریب کارسختی صفحات آلومینیمی نورد شده و تقویت شده با نانولوله‌های کربنی با افزایش تعداد پاس‌ها کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان دادند که خواص کششی ارتقاء یافته و ساختار همگن‌تری حاصل می‌شود. *صمدزاده* و *طروقی‌نژاد*[10] استحکام پیوند صفحات آلومینیمی را که تحت فرآیند نورد پیوندی قرار گرفته بودند در حضور نانولوله‌های کربنی مطالعه کردند. آنها اثر توزیع نانولوله‌ها، کاهش ضخامت، کسر وزنی نانولوله‌ها و دمای نورد را بر روی استحکام پیوندی صفحات آلومینیمی نورد شده مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین نورد تجمعی پیوندی فلزات غیرمشابه برای تولید کامپوزیت‌های چندلایه با هدف بهبود خواص مکانیکی انجام پذیرفته است. ساخت و بررسی خصوصیات کامپوزیت‌های چندلایه مس- آلومینیوم توسط *ایزدجو* و همکاران[2] مورد مطالعه قرار گرفت. ایشان گزارش نمودند که با افزایش کرنش حین اعمال پاس‌های نورد؛ استحکام، میکروسختی و تغییر طول تا شکست این کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. اخیراً کامپوزیت‌های چندلایه آلومینیوم/ مس/ قلع با روش نورد تجمعی توسط *مهدویان* و همکاران[11] تولید شدند. در این تحقیق نشان داده شد که با افزایش تعداد پاس‌ها توزیع یکنواختی از لایه‌های شکسته شده در زمینه آلومینیوم ایجاد می‌شود. همچنین در این تحقیق تغییرات استحکام با افزایش تعداد پاس‌ها از طریق مطالعه ساختار مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به پیشرفت‌های سریع در صنایع الکترونیک، تولید موادی با استحکام و هدایت الکتریکی بالا از اهمیت زیادی برخوردار است[12]. مواد دارای استحکام و هدایت الکتریکی بالا در صنعت، برای ساخت قاب‌های هدایت، سیم‌های اتصال و الکترودهای جوشکاری مقاومتی مورد استفاده قرار می‌گیرند[13, 14]. در فرآیند پیوند نورد تجمعی با افزایش تغییر شکل پلاستیک، چگالی نابجایی‌ها افزایش می‌یابد. این موضوع هر چند بهبود خواص مکانیکی را به همراه دارد ولی از طرفی موجب افت خواص فیزیکی مانند هدایت الکتریکی به‌دلیل انحراف الکترون در برخورد با هسته نابجایی‌ها می‌شود[12] و محصولات تولیدی با این روش نمی‌توانند در کاربردهایی که به‌طور همزمان به استحکام و خواص الکتریکی مناسبی نیاز است، به راحتی مورد استفاده قرار گیرند. در این راستا تلاش‌هایی با هدف بهبود همزمان رفتار مکانیکی و الکتریکی از طریق تولید کامپوزیت با فرآیند نورد تجمعی صورت گرفته است[12-14]. به‌عنوان مثال، کامپوزیت‌های مس- کربن با ترکیب مناسبی از سختی و هدایت الکتریکی توسط فرآیند نورد تجمعی مس و گرافیت تا ۳۰ سیکل و ۵۰% کاهش سطح مقطع در هر سیکل تولید شدند[14]. نتایج موید کاهش اندازه ذرات گرافیت و بهبود توزیع آن در زمینه مس است. آزمون هدایت الکتریکی بر روی نمونه‌های تولیدشده نشان داد که کاهش هدایت الکتریکی در اثر اعمال فرآیند نورد تجمعی ناچیز است. *سالاری* و همکاران[12] یک روش ترکیبی شامل فرآیند نورد تجمعی و پیوند نورد سرد را به‌منظور ساخت ورق مسی فوق ریزدانه با افزایش همزمان استحکام و هدایت الکتریکی پیشنهاد دادند. نتایج حاصل از آزمون کشش و سختی نشان داد که استحکام و سختی به‌طور پیوسته با افزایش تعداد پاس‌های نورد افزایش می‌یابد. در نمونه‌های تولید شده توسط این روش ابداعی افزایش همزمان استحکام، سختی و هدایت الکتریکی مشاهده شد.

بررسی‌ها نشان می‌دهند که در کامپوزیت‌های چندلایه حاصل از فرآیند نورد تجمعی اغلب بهبود و ارتقاء خواص مکانیکی مد نظر قرار گرفته و خواص فیزیکی همانند هدایت الکتریکی کمتر بررسی شده است. هدف از مطالعه حاضر تلفیق فلزات آلومینیم- مس، به‌عنوان دو فلز پرکاربرد با هدایت الکتریکی مناسب، به‌صورت کامپوزیت چندلایه تقویت شده با نانولوله‌های کربنی است. در تحقیق پیش رو ساخت این نانوکامپوزیت با هدف ارزیابی خصوصیات مکانیکی و الکتریکی مورد توجه قرار گرفته است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای در راستای ساخت و مشخصه‌یابی نانوکامپوزیت مذکور انجام نپذیرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

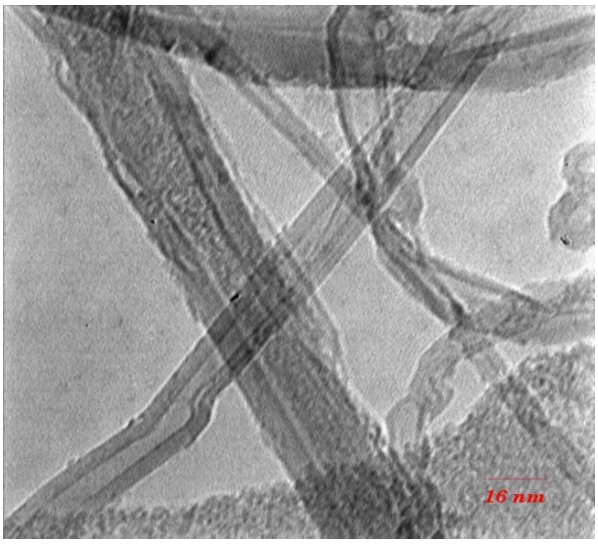
۲-۱- مواد اولیه و آماده‌سازی

در این پژوهش آلومینیوم ۱۰۵۰ با ضخامت ۰/۵میلی‌متر و مس خالص تجاری با خلوص ۹۹/۹% با دو ضخامت ۰/۱ و ۰/۳میلی‌متر به‌صورت ورق و به‌عنوان مواد اولیه مورد استفاده قرار گرفتند. جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق‌های آلومینیوم و مس مورد استفاده را نشان می‌دهد.

ابتدا ورق‌های آلومینیم و مس به‌صورت نوارهایی با طول ۱۵۰میلی‌متر و عرض ۵۰میلی‌متر برش خوردند. ورق‌های مسی در دمای ٤٨٠درجه سانتیگراد و ورق‌های آلومینیوم در دمای ۳۷۰درجه سانتیگراد[1, 15] به مدت دو ساعت توسط کوره مقاومتی و در اتمسفر معمولی آنیل شدند. انتخاب زمان دو ساعت برای آنیل به‌منظور ایجاد شکل‌پذیری و امکان اعمال پاس‌های بیشتر نورد در نانوکامپوزیت‌های چندلایه صورت پذیرفت. همچنین سطوح ورق‌ها ابتدا جهت برطرف‌نمودن آلودگی توسط استون شستشو داده شدند و سپس جهت رفع اکسیدهای سطحی و ایجاد زبری مناسب عملیات برس‌کاری بر روی سطوح ورق‌ها انجام پذیرفت. تصویر میکروسکوپ الکترونی نانولوله‌های کربنی چند دیواره در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات نانولوله‌های کربنی مورد استفاده به‌عنوان تقویت‌کننده در جدول ۲ ذکر شده است. لازم به ذکر است که نانولوله‌های مذکور از پژوهشگاه صنعت نفت (کد ۰۱-۲-۱۱۰) تهیه شدند.

جدول ۱) آنالیز شیمیایی ورق‌های آلومینیوم و مس مورد استفاده در تحقیق

عنصر	مقدار
ورق آلومینیومی	
Al	جز اصلی
Cu	۰/۰۵
Fe	۰/٤
Mg	۰/۰۵
Mn	۰/۰۵
Si	۰/۲۵
Ti	۰/۰۳
V	۰/۰۵
Zn	۰/۰۵
ورق مس	
Cu	جز اصلی
Zn	<۰/۰۱
Pb	<۰/۰۱
Sn	<۰/۰۱
P	<۰/۰۰۳
Mn	۰/۰۲
Fe	<۰/۰۰۵
Ni	<۰/۰۲
Si	<۰/۰۰۵
Ag	<۰/۰۰۲
Co	<۰/۰۱



شکل ۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانولوله‌های کربنی چندلایه مورد استفاده.

جدول ۲) مشخصات نانولوله‌های کربنی چند دیواره مورد استفاده در پژوهش حاضر.

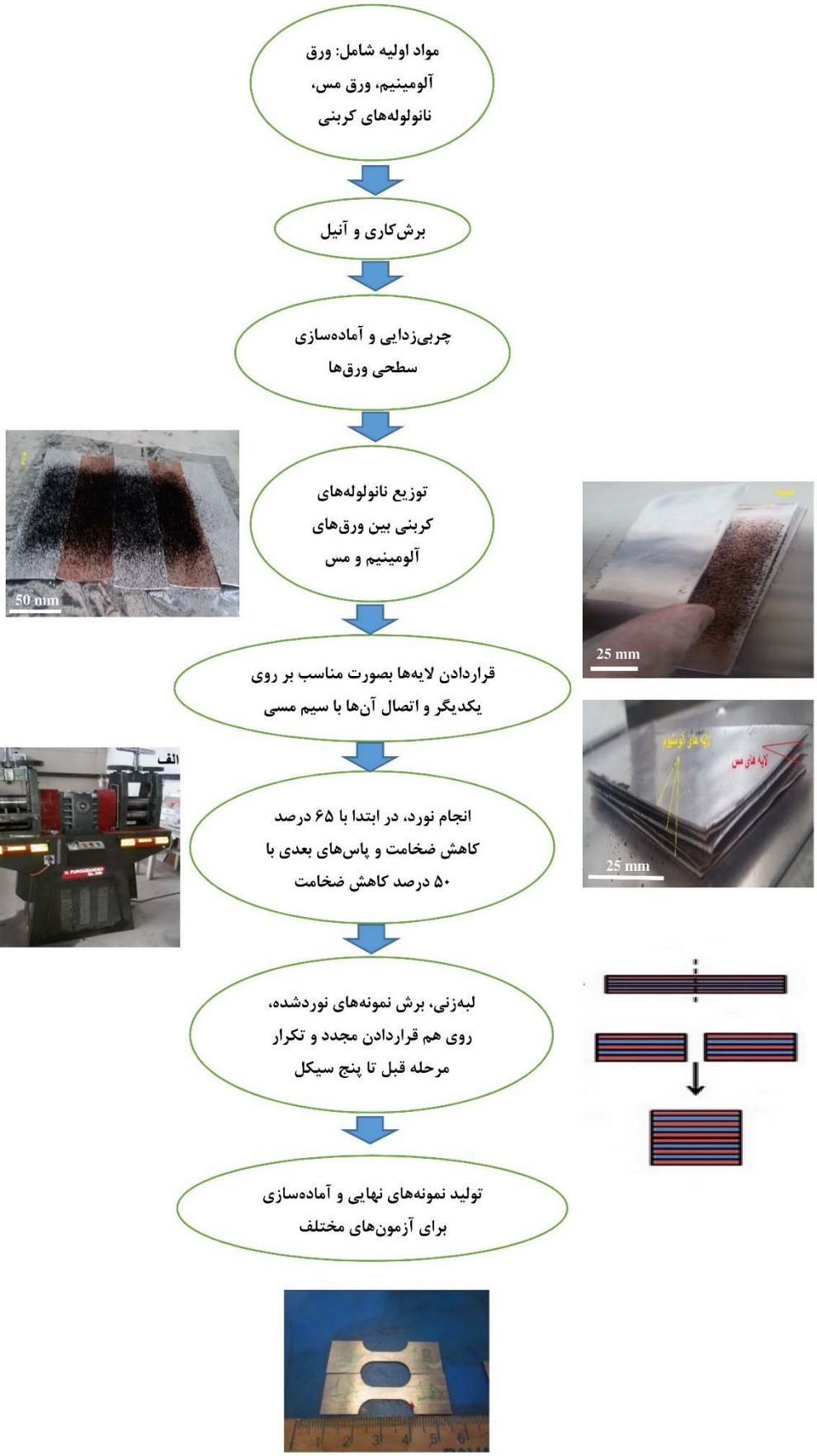
مشخصه	مقدار
مساحت سطحی (m^2/g)	۲۵۰
قطر (نانومتر)	۱۰-۲۰
طول (میکرومتر)	۱۰
خلوص (%)	۹۵-۹۹
ناخالصی شامل کربن آمورف و غیره (%)	۱-۵

۲-۲- ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیت چندلایه با روش نورد تجمعی

برای ساخت کامپوزیت چندلایه، سه لایه فلز آلومینیم و دو لایه فلز مس استفاده شدند به گونه‌ای که بالاترین و پایین‌ترین لایه‌ها از جنس آلومینیم بوده و لایه‌های مس در بین آنها قرار گرفتند. به‌منظور بررسی تاثیر ضخامت فلز مس بر خواص نهایی کامپوزیت، ورق‌های مسی مورد استفاده با دو ضخامت متفاوت، (۰/۱میلی‌متر و ۰/۳میلی‌متر) انتخاب شدند. در پژوهش حاضر برای بررسی اثرات مس و نانولوله‌های کربنی دو گروه از نمونه‌های کامپوزیتی تولید شدند. گروه اول شامل کامپوزیت‌های چندلایه آلومینیم- مس هستند که میزان ضخامت لایه مس در آنها متفاوت است. گروه دوم شامل نانوکامپوزیت‌های چندلایه آلومینیم- مس- نانولوله کربنی مجددا با دو ضخامت مختلف از مس هستند که توسط ۰/۲% وزنی نانولوله کربنی (نسبت به وزن لایه‌های آلومینیوم و مس) تقویت شده‌اند. بدین منظور نانولوله‌های کربنی پیش از عملیات نورد در بین لایه‌های آلومینیم و مس از طریق پاشش توزیع شدند. پس از روی هم قرارگرفتن ورق‌ها سوراخ‌های کوچکی در اطراف ساندویچ حاصل توسط مته ایجاد و لایه‌ها با سیم مسی مناسب، جهت جلوگیری از لغزش و ثابت‌ماندن در حین نورد، به یکدیگر متصل شدند. سپس نمونه‌ها طی ۵ پاس تحت نورد قرار گرفتند. جدول ۳، شرایط نمونه‌های مختلف در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. ابتدا عملیات نورد تجمعی پیوندی با کاهش ٦٥درصدی در ضخامت، برای ایجاد پیوند اولیه مناسب انجام پذیرفت. انتخاب میزان کرنش بالاتر معادل ٦٥% با هدف ایجاد اتصال مناسب و مستحکم بین لایه‌ها صورت پذیرفت. آزمون‌های اولیه نشان داد که نورد با اعمال این میزان کرنش برای اتصال بین لایه‌ای نسبتاً مناسب است. پس از انجام مرحله اول؛ برای پاس‌های بعدی کاهش ضخامت معادل ۵۰% در نظر گرفته شد. مراحل تولید نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳) شرایط تولید نمونه‌های مختلف در تحقیق حاضر

ردیف	کد نمونه	نوع لایه و تقویت‌کننده	تعداد پاس‌های نورد				
			۱	۲	۳	٤	۵
۱	A	آلومینیم/ مس با ضخامت ۰/۱میلی‌متر	A1	A2	A3	A4	A5
۲	B	آلومینیم/ مس با ضخامت ۰/۳میلی‌متر	B1	B 2	B3	B4	B5
۳	C	آلومینیم/ مس با ضخامت ۰/۱میلی‌متر / ۰/۲% وزنی نانولوله کربنی	C1	C2	C3	C4	C5
٤	D	آلومینیم/ مس با ضخامت ۰/۳میلی‌متر/ ۰/۲% وزنی نانولوله کربنی	D1	D2	D3	D4	D5



شکل ۲) مراحل مختلف تولید نانوکامپوزیت‌های چندلایه آلومینیم/ مس/ نانولوله‌های کربنی به روش نورد تجمعی پیوندی

۳-۲- بررسی خواص نمونه‌ها و مشخصه‌یابی

روند تغییرات ریزساختار در حین انجام فرآیند به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, VEGA-TESCAN) مورد بررسی قرار گرفت. آزمون سختی‌سنجی ویکرز بر روی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM E92 و توسط دستگاه سختی‌سنج بوهلر ساخت کشور آلمان انجام پذیرفت. جهت اندازه‌گیری سختی فرورونده ویکرز با نیروی ۱۰۰گرم مورد استفاده قرار گرفت. مدت زمان اعمال نیرو ۱۵ثانیه در نظر گرفته شد. در هر نمونه ۱۰ نقطه به‌طور تصادفی مورد آزمون سختی قرار گرفت که میانگین ۸ عدد از آنها بدون در نظرگرفتن بیشترین عدد و کمترین عدد، به‌عنوان سختی نمونه‌ها گزارش شده است. به‌منظور بررسی استحکام نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌های استاندارد آزمون کشش توسط وایرکات ورق‌های نوردشده (موازی با جهت نورد) تهیه شدند و سپس آزمون‌ها مطابق استاندارد ISO 6892-1(2016) انجام پذیرفتند. هدایت الکتریکی کامپوزیت‌ها با روش چهار نقطه‌ای و توسط دستگاه (34401 Digital Multi-meter, 9100 calibrator) انجام پذیرفت[16]. جریان معادل ۱آمپر تنظیم و ولتاژ در فواصل مختلف اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی و نحوه ایجاد پیوند بین لایه‌ها

ساز و کارهای درگیر در فرآیند نورد سرد پیوندی شامل تئوری‌های فیلم، سد انرژی، پیوند نفوذی و تبلور مجدد اتصالی است. *وایدیاناس* و همکاران[17]، بیان کردند که تئوری فیلم مهم‌ترین ساز و کار در فرآیند نورد سرد پیوندی در دماهای پایین نورد محسوب می‌شود. در مکانیزم فیلم، یک لایه سطحی به شدت کار سخت شده روی بخشی از سطح به وسیله برس‌زنی تشکیل می‌شود. این پوشش ترد در انبساط‌های سطحی کوچک شکسته و فلز دست‌نخورده (بکر) از بین ترک‌های لایه اکسیدی، اکسترود شده و با سطح مقابل در تماس قرار گرفته و پیوند فلز با فلز تشکیل می‌شود[18, 19].

مطابق شکل ۳- الف و ب در پاس‌های ابتدایی نورد، پیوند مستحکمی بین لایه‌های آلومینیم و مس ایجاد نمی‌شود با اعمال پاس‌های بیشتر که همراه با تغییر شکل شدیدتری هستند، اتصال بین لایه‌ها افزایش یافته و پیوند مستحکم تشکیل می‌شود. عدم اتصال مناسب در کامپوزیت چندلایه‌ای که با ورق مس ۰/۳میلی‌متر تهیه شده است به‌دلیل ضخیم‌بودن آن و نیاز به نیروی بیشتر وخیم‌تر است. در نهایت اتصال مناسبی در فصل‌مشترک لایه‌ها در هر دو کامپوزیت با اعمال ۴ پاس نورد ایجاد شد (شکل ۳- ج).

۳-۲- روند تغییرات ساختار

در پاس‌های ابتدایی خوشه‌های متشکل از نانولوله‌های کربنی، باعث عدم چسبندگی یکنواخت لایه‌های مس و آلومینیوم می‌شوند. شکل ۳- د پاس اول از نمونه آلومینیوم- مس با ضخامت ۰/۱میلی‌متر محتوی ۰/۲% وزنی نانولوله‌های کربنی و شکل ۳- ه همین شرایط را برای نمونه‌های نورد شده با ورق مس به ضخامت ۰/۳میلی‌متر نشان می‌دهد. در حضور نانولوله‌های کربنی در این نمونه‌ها، بین لایه های مس و آلومینیوم در سیکل اول با درصد کاهش ضخامت یکسان در مقایسه با زمانی که نانولوله‌های کربنی بین لایه ها توزیع نشده بود اتصال سست‌تری برقرار شده است.

به‌منظور بررسی روند تغییرات ریزساختار به‌ازای افزایش تعداد پاس‌های نورد، تصاویر مقاطع عرضی در پاس‌های ۱، ۴ و ۵ مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل ۴ و ۵ نحوه توسعه ریزساختار را در کامپوزیت‌های چندلایه آلومینیم- مس به‌ترتیب برای ورق مسی با ضخامت ۰/۱ و ۰/۳میلی‌متر نشان می‌دهند.

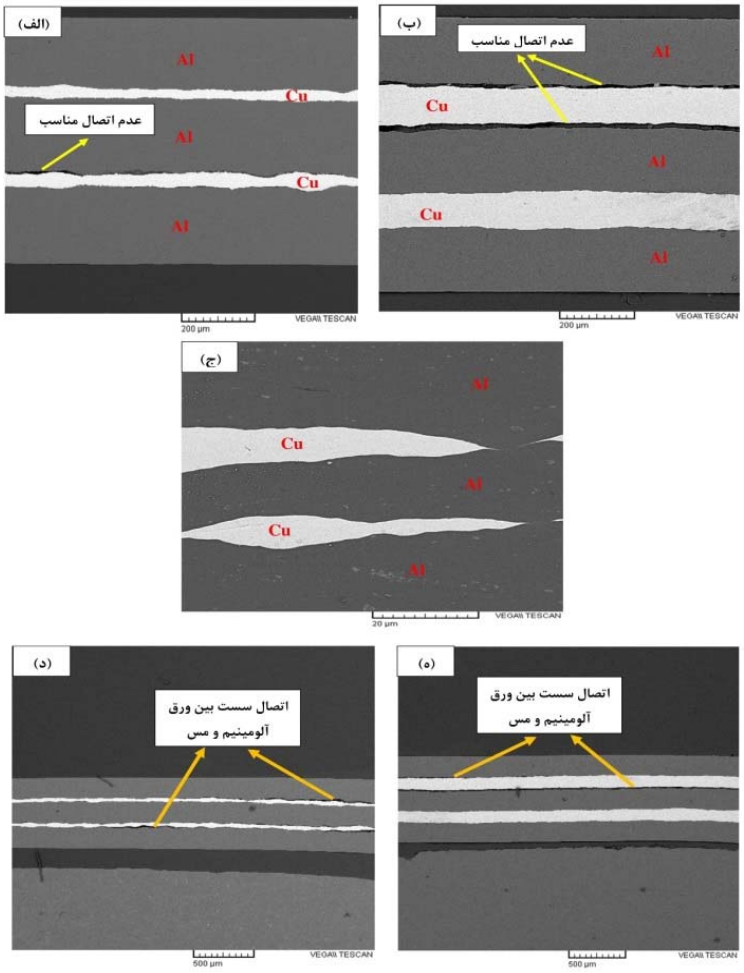
آنچه جالب توجه است روند توزیع فلز مس در زمینه آلومینیم است. با توجه به روند اتصال بین لایه‌ها، به خوبی مشاهده می‌شود که با بالارفتن تعداد پاس‌ها و کاهش ضخامت لایه‌ها، اتصال بهتر بین لایه‌های نورد برقرار می‌شود. لایه مس در پاس‌های ابتدایی به‌صورت لایه کامل قابل مشاهده است. در پاس‌های دوم به بعد لایه مس به سمت گلویی‌شدن پیش رفته و در ادامه آلومینیوم از طریق ترک‌های ایجاد شده در لایه‌های مس گسترش پیدا می‌کند و به لایه بعدی آلومینیوم متصل می‌شود. لایه مس تحت فشار نیروی نورد و در اثر پیوند لایه‌های آلومینیوم دچار گسیختگی شده و به‌صورت نواحی بزرگ در سیکل ٤ در زمینه آلومینیوم توزیع شده است. با بالاتررفتن تعداد پاس‌ها نواحی بزرگ مس تحت اعمال نیروی پیوندی در زمینه آلومینیم به‌صورت نواحی کوچک‌تر و با توزیع یکنواخت‌تری قابل مشاهده‌اند. با پیشرفت فرآیند نورد، تعداد لایه‌های آلومینیوم و مس افزایش یافته و در نتیجه ضخامت لایه‌ها کاهش می‌یابد و نفوذ مس در زمینه در اثر فشار عمودی نورد موجب بهبود توزیع مس در جهت عمود بر نورد می‌شود.

چگونگی توزیع لایه‌های مس در زمینه آلومینیم شامل گلویی‌شدن، شکستن و جداشدن است که در شکل ۴- ب نشان داده شده است. این اتفاق از پاس دوم فرآیند نورد برای نمونه‌های کامپوزیتی رخ می‌دهد و در پاس‌های بالاتر نفوذ لایه آلومینیوم از ترک‌های ایجاد شده در لایه مس گسترش می‌یابد که در نهایت به کوچک‌ترشدن نواحی شامل مس و توزیع مناسب‌تر آنها در لایه آلومینیوم منجر می‌شود. منظور از گلویی‌شدن کاهش سطح و نازک‌شدن لایه‌های مس در حین اعمال پاس‌های نورد است. این رویداد در پاس‌های مختلف رخ می‌دهد. با اعمال نورد لایه‌هایی که نازک می‌شوند در اثر کارسختی شکسته و نواحی شکسته‌شده در زمینه آلومینیوم توزیع می‌شوند. ابتدا گلویی‌شدن و سپس شکستن لایه‌ها رخ می‌دهد. لازمه شکسته‌شدن و توزیع لایه‌ها گلویی‌شدن است. انتظار می‌رود با اعمال سیکل‌های بیشتر این دو فرآیند نیز با شدت و سرعت بیشتری رخ دهند و نهایتاً شکسته‌شدن نواحی مس و کوچک‌ترشدن آن توزیع یکنواخت‌تر مس در کل زمینه آلومینیوم را فراهم سازد. اغلب در حین تغییر شکل سیستم‌های متشکل از دو فلز غیرمشابه، ناپایداری‌های

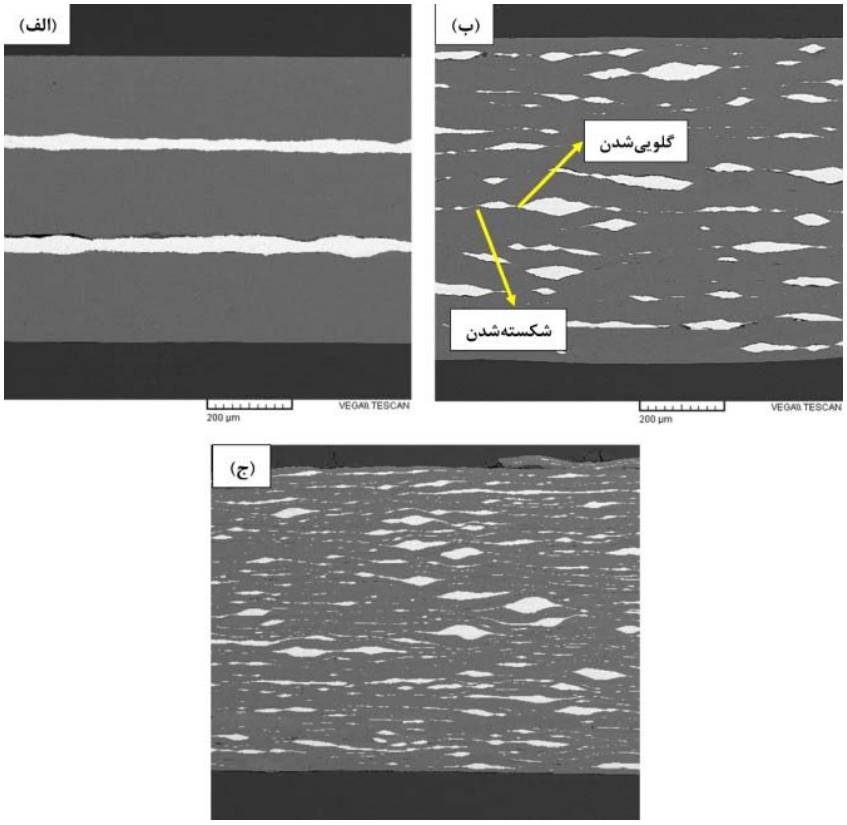
پلاستیک در یکی از لایه‌ها به‌دلیل متفاوت‌بودن خواص مکانیکی بیش از دیگری رخ می‌دهد و با افزایش کرنش لایه سخت‌تر دچار گلویی‌شدن و شکست می‌شود. آلومینیم و مس هر دو دارای ساختار FCC هستند، ولی انرژی نقص در چیده‌شدن آنها کاملاً باهم متفاوت است. آلومینیم دارای انرژی نقص در چیده‌شدن بالا و مس دارای انرژی نقص در چیده‌شدن کمتری است. با توجه به نقش این انرژی در تفکیک نابجایی‌های جزیی، انتظار می‌رود که لایه‌های مس در فصل مشترک، تحت کرنش سختی بیشتری در مقایسه با آلومینیم قرار گیرند[2, 15] که این امر منجر به توزیع فلز مس در میان آلومینیم می‌شود.

همچنین حضور بیشتر مناطق غنی از مس در کامپوزیت‌های چندلایه تهیه‌شده از ورق مس با ضخامت بیشتر (۰/۳میلی‌متر) کاملاً با مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ مشهود است. همچنین نواحی مس در نمونه‌های تهیه شده با لایه‌های مس دارای ضخامت ۰/۱میلی‌متر ظریف‌تر بوده و توزیع ریزتری را در مقایسه با لایه مسی با ضخامت ۰/۳میلی‌متر در تعداد پاس‌های مشابه دارند.

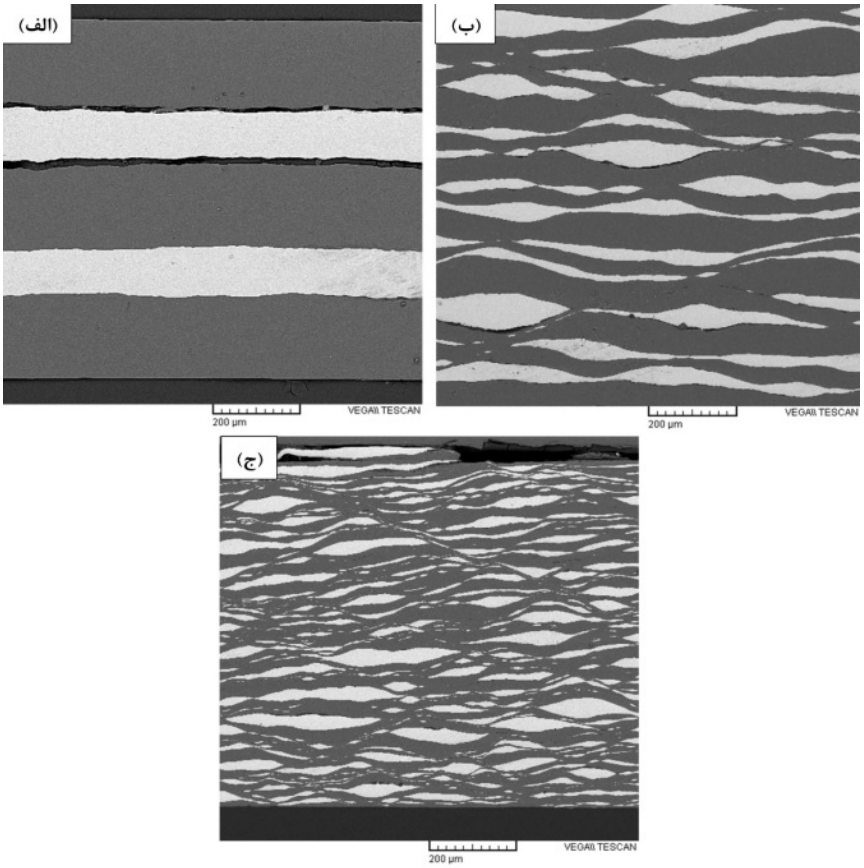
شکل ٦ ساختار نانوکامپوزیت چندلایه محتوی ۰/۲% وزنی نانولوله‌های کربنی را نشان می‌دهد. در ساختار علاوه‌بر آلومینیم و مس خوشه‌های نانولوله‌های کربنی نیز مشاهده می‌شوند. آنالیز EDS حضور آلومینیوم، مس و نانولوله‌های کربنی را تایید می‌کند (نمودار ۱). خوشه‌های منسجم نانولوله‌های کربنی (خوشه‌هایی که هیچ گونه ماده فلز زمینه بین آنها وجود ندارد) و ذرات جدا شده مس در پاس‌های متوالی می‌توانند به خوشه‌های نفوذی (خوشه‌هایی که فلز زمینه بین آنها نفوذ کرده است) تبدیل شوند. همچنین در اثر شکسته‌شدن خوشه‌ها؛ فاصله بین آنها افزایش می‌یابد که این امر باعث بهبود توزیع تقویت‌کننده در زمینه می‌شود[20, 21]. خوشه‌ها به‌علت ازدیاد طول ورق، افزایش انبساط خوشه و تبدیل خوشه‌های منسجم به خوشه‌های نفوذی و همچنین نفوذ فلز زمینه در بین ذرات در جهت نورد کشیده می‌شوند. این به معنی افزایش فاصله ذرات خوشه‌ها، تجزیه خوشه‌ها، کاهش‌یافتن نواحی خالی از پودر و بهبود در همگنی ساختار است[22]. مقایسه شکل ۶- الف و ب نشان می‌دهد که با اعمال پاس‌های بیشتر خوشه‌های ذرات تقویت‌کننده (نانولوله‌ها) کوچک‌تر شده و با نفوذ بیشتر زمینه در میان این خوشه‌ها توزیع آنها بهبود می‌یابد. بنابراین افزایش تعداد پاس‌ها بهبود توزیع نانولوله‌ها در زمینه آلومینیوم را به همراه دارد.



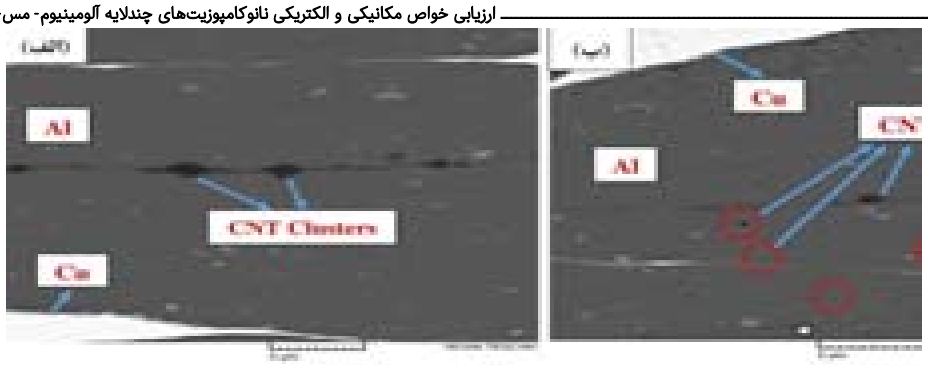
شکل ۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی نورد نمونه‌های کامپوزیت چندلایه؛ الف پاس اول، آلومینیوم- مس با ضخامت ۰/۱میلی‌متر، ب پاس اول، آلومینیوم- مس با ضخامت ۰/۳میلی‌متر، ج پاس چهارم، آلومینیوم- مس با ضخامت ۰/۳میلی‌متر د پاس اول، آلومینیم- مس با ضخامت ۰/۱میلی‌متر- نانولوله کربنی، ه پاس اول، آلومینیم- مس با ضخامت ۰/۱میلی‌متر- نانولوله کربنی



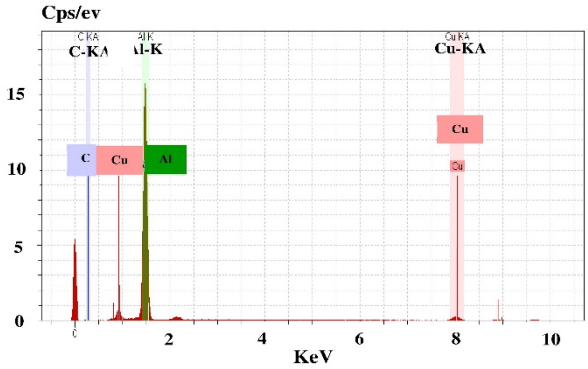
شکل ۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از روند تغییرات ساختار برای کامپوزیت چندلایه آلومینیم- مس (۰/۱میلی‌متر) با اعمال پاس‌های نورد؛ الف: ۱، ب: ۴، ج: ۵ پاس



شکل ۵) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از روند تغییرات ساختار برای کامپوزیت چندلایه آلومینیم - مس (۰/۳ میلیمتر) با اعمال پاس‌های نورد؛ الف: ۱، ب: ۴، ج: ۵ پاس

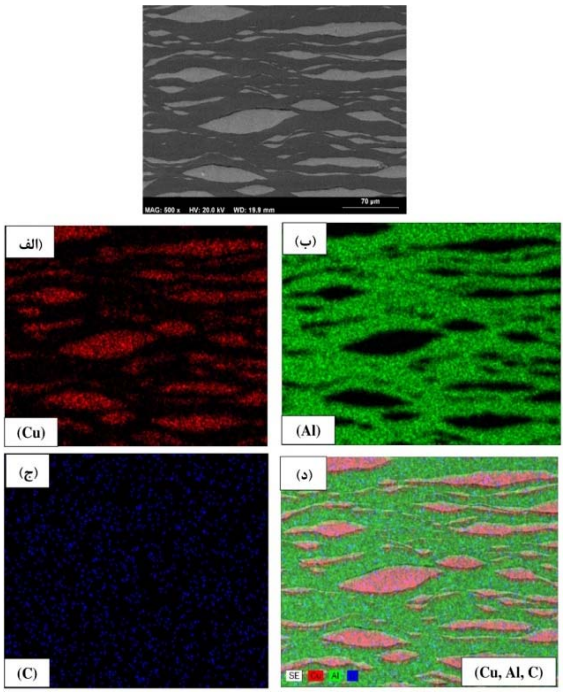


شکل ٦) تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به تغییر ساختار نانوکامپوزیت چندلایه مس- آلومینیم- نانولوله‌کربنی؛ الف: پاس سوم، ب: پاس پنجم نورد



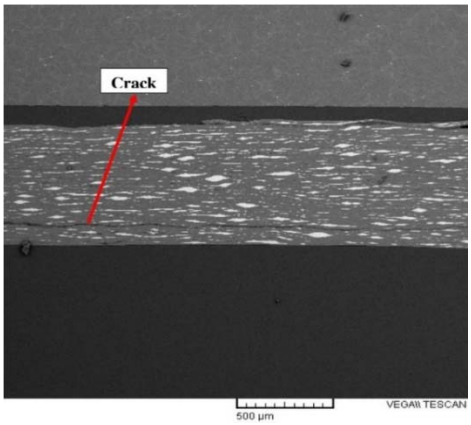
نمودار ۱) نتیجه آنالیز EDS

شکل ۷، آنالیز MAP عنصری را برای نانوکامپوزیت چندلایه آلومینیم- مس- نانولوله‌کربنی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نانولوله‌ها پس از اعمال ۵ پاس دارای توزیع یکنواختی در زمینه هستند.



شکل ۷) آنالیز MAP از نمونه نانوکامپوزیتی چندلایه آلومینیم- مس (با ضخامت ۰/۳میلی‌متر)- نانولوله کربنی در پاس پنجم نورد؛ الف) رنگ قرمز: عنصر مس، ب) رنگ سبز: عنصر آلومینیم، ج) رنگ آبی: عنصر کربن، د) عناصر مس، آلومینیم و کربن

بررسی نمونه‌ها با اعمال پاس‌های مختلف نشان می‌دهد که ادامه نورد تا پاس پنجم هرچند بهبود توزیع تقویت‌کننده‌ها را ایجاد می‌کند، از طرفی اعمال کرنش‌های زیاد و وقوع کارسختی بیش از حد می‌تواند ترک‌خوردگی را در برخی از بخش‌های نمونه، همانند آنچه در شکل ۸ نشان داده شده است، ایجاد کند که افت خصوصیات ماده را ایجاد خواهد نمود.



شکل ۸) تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع عرضی نمونه کامپوزیتی آلومینیوم- مس (۰/۳میلی‌متر)- نانولوله کربنی در پاس پنجم نورد که دچار ترک‌خوردگی شده است.

۳-۳- خواص مکانیکی

۳-۳-۱- سختی

مقادیر سختی کامپوزیت‌های چندلایه آلومینیم- مس و نانوکامپوزیت‌های چندلایه آلومینیم- مس- نانولوله کربنی در پاس‌های مختلف در نمودار ۲ قابل مشاهده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود مقدار سختی با افزایش تعداد پاس‌های نورد برای همه نمونه‌ها افزایش یافته است. نرخ افزایش مقدار سختی در پاس‌های اول بیشتر بوده و با اعمال پاس‌های بیشتر با کاهش مواجه می‌شود. افزایش سریع در میزان سختی در سیکل اول به‌دلیل کرنش سختی یعنی افزایش دانسیته نابجایی‌ها و برهم‌کنش بین آنها است که در کرنش‌های بالا اشباع می‌شود و دلیل آن را می‌توان برقراری تعادل بین ایجاد نابجایی‌ها در طول فرایند نورد و حذف آنها در طی مرحله بازیابی دینامیکی دانست که درنتیجه دانسیته نابجایی‌ها به حالت اشباع و پایدار می‌رسند[23].

در پاس‌های اولیه، نمونه‌ها دارای یک ساختار لایه‌ای هستند که در آن لایه‌های تقویت‌کننده در فاصله بین لایه‌های آلومینیوم قرار گرفته‌اند. با افزایش سیکل‌ها، توزیع ذرات در زمینه بهبود پیدا می‌کند و موجب افزایش سختی کامپوزیت می‌شود.

همچنین نتایج نشان می‌دهند که افزودن نانولوله‌های کربنی به کامپوزیت چندلایه آلومینیم- مس، افزایش مقدار سختی را در پی دارد. بیشترین مقدار سختی متعلق به نانوکامپوزیت چندلایه آلومینیم- مس- نانولوله کربنی به میزان حدود HV ۱۴۷ و در پاس پنجم نورد است. چنانچه این سختی با سختی آلومینیم مقایسه شود ۴۴۶% افزایش را نشان می‌دهد. قابل توجه اینکه میزان سختی کامپوزیت تهیه شده از ورق مس ۰/۳میلی‌متر بیشتر از نانوکامپوزیت محتوی نانولوله کربنی است که از ورق مس با ضخامت ۰/۱میلی‌متر تهیه شده است. این امر تاثیر افزایش ضخامت لایه مس در بهبود خواص مکانیکی را نشان می‌دهد که پیش از این نیز توسط سایرین نشان داده شده است[15].

۳-۳-۲- استحکام کششی

نمودار تنش- کرنش مهندسی برای نانوکامپوزیت‌های چندلایه به‌ازای اعمال پاس‌های مختلف در نمودار ۳ قابل رویت است. بیشترین استحکام و تغییر طول تا شکست، مربوط به نمونه نانوکامپوزیت چندلایه آلومینیم- مس- نانولوله کربنی در پاس چهارم است که از ورق مس با ضخامت ۰/۳میلی‌متر تهیه شده است. تغییرات استحکام کششی در فرآیند نورد تجمعی بوسیله دو ساز و کار مهم استحکام‌دهی کنترل می‌شود: کرنش سختی به‌وسیله نابجایی‌ها و کوچک‌شدن اندازه دانه‌ها[24]. در پاس‌های اولیه فرآیند نورد تجمعی، کرنش سختی یا استحکام‌دهی توسط نابجایی‌ها مهم‌ترین اثر را در افزایش استحکام کششی دارا است، در حالی که در مراحل پایانی، استحکام کششی بالاتر، به‌وسیله کوچک‌ترشدن اندازه دانه‌ها صورت می‌پذیرد. با شکل‌گیری دانه‌های هم‌محور، به‌دلیل نرخ بالای بازیابی دینامیکی، کاهش دانسیته نابجایی‌ها به‌وسیله عمل‌کردن مرزدانه‌ها به‌عنوان جذب‌کننده‌های نابجایی، سرعت پیدا می‌کند[25]. بنابراین ساز و کار استحکام‌دهی به‌وسیله کرنش سختی حذف شده یا تضعیف می‌شود. در عوض مکانیزم استحکام‌دهی به‌وسیله مرزدانه‌های ریز، در پاس‌های بالاتر نورد غالب شده که نتیجه آن افزایش انعطاف‌پذیری بدون تضعیف استحکام است. همچنین در پاس چهارم استحکام نمونه نانوکامپوزیتی تهیه شده از ورق مس ۰/۳میلی‌متر در مقایسه با حالت ۰/۱میلی‌متر بیشتر است. این موضوع به‌دلیل حضور بیشتر مس در زمینه آلومینیم قابل توجیه است[15].

نکته قابل توجه اینکه در پاس اول به‌دلیل عدم تامین کرنش کافی برای اتصال کامل لایه‌ها، پیوند مستحکم بین لایه‌ها ایجاد نشده که این موضوع به ویژه برای کامپوزیت با لایه ضخیم‌تر مس (۰/۳میلی‌متر) مشهودتر است. عدم اتصال مناسب بین لایه‌ها منجر به کاهش بیشتر استحکام نمونه تهیه شده از ورق مس ۰/۳میلی‌متر در مقایسه با حالت ۰/۱میلی‌متر شده است. در مقابل از آنجایی که در آزمون سختی، مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک به‌صورت موضعی اندازه‌گیری می‌شود، مقادیر سختی در پاس اول برای نمونه‌های مذکور، برخلاف نتایج آزمون کشش است.

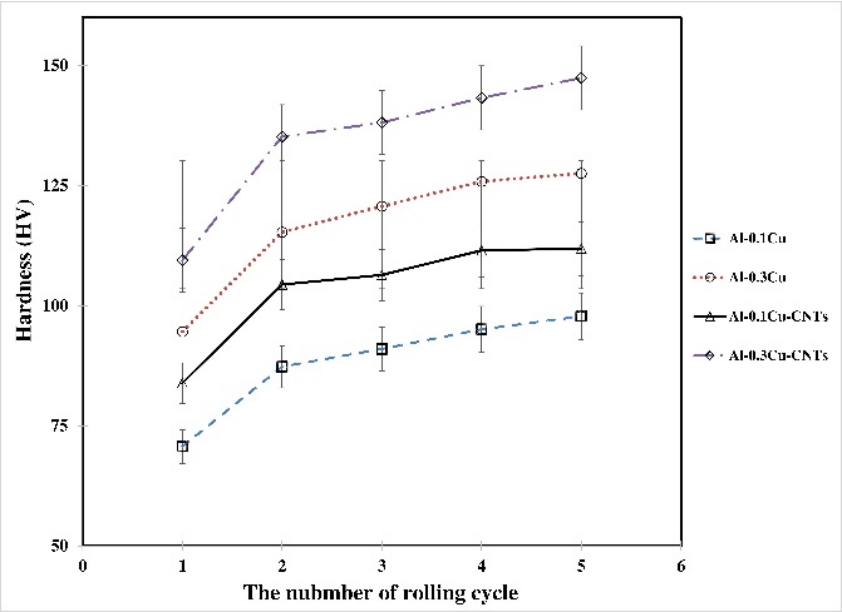
همچنین نتایج آزمون کشش نشان می‌دهند که با اعمال پاس‌های بیشتر و در اثر افزایش کرنش‌های اعمالی بر روی نمونه و یکنواخت‌ترشدن توزیع تقویت‌کننده در زمینه، استحکام افزایش می‌یابد. این بهبود در خواص کششی تا سیکل چهارم ادامه دارد. از سیکل چهارم به بعد استحکام نمونه‌ها احتمالاً در اثر اعمال بیش از حد کرنش کاهش یافته است. در اثر افزایش تعداد پاس‌های نورد بعد از سیکل چهارم، هر چند انتظار می‌رود که توزیع تقویت‌کننده‌ها بهبود یابد، از طرفی افزایش مقدار کارسختی موجب ایجاد ترک در کامپوزیت و از دست‌رفتن خصوصیات استحکامی می‌شود (شکل ۸). این واقعیت برای نمونه‌ای که دارای ضخامت لایه مس اولیه بیشتری (۰/۳میلی‌متر) است به‌دلیل قابلیت کارسختی بالاتر[2]، بیش از نمونه مشابه با ضخامت اولیه مس کمتر (۰/۱میلی‌متر) است. به‌منظور بررسی بیشتر این شرایط، نورد برای نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی تا پاس ششم ادامه یافت. تصویر ظاهری نمونه پس از اعمال پاس ششم در شکل ۹ قابل رویت است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نمونه در این حالت بسیار ترد و شکننده بود و بلافاصله با اعمال نیروی کمی تخریب شد.

۳-٤- هدایت الکتریکی

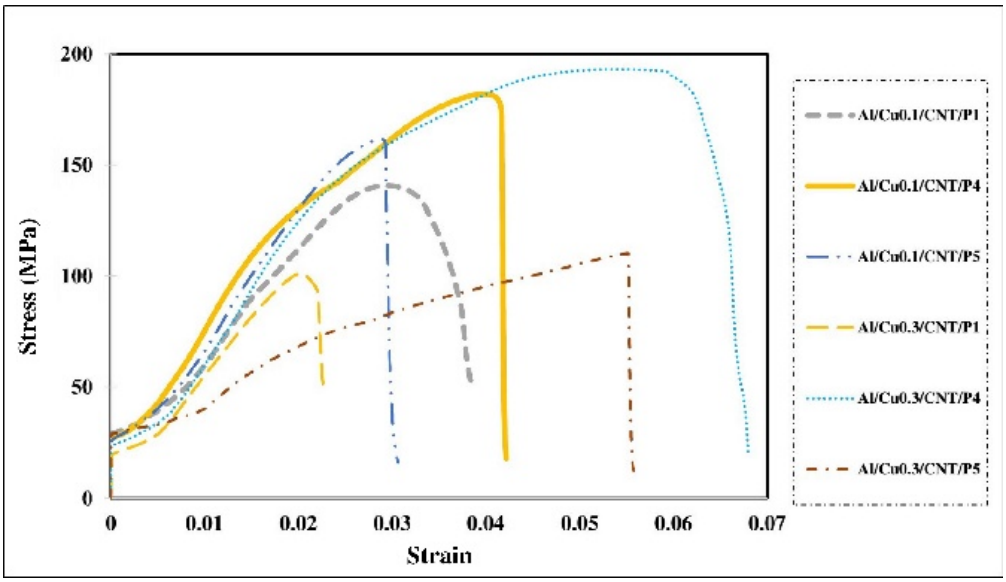
مشاهدات نشان می‌دهد با افزایش استحکام نمونه، هدایت الکتریکی آن کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر این حقیقت است که عوامل موثر در استحکام بخشی فلزات موجب افزایش مقاومت الکتریکی و در نتیجه کاهش هدایت الکتریکی می‌شوند. یکی از عوامل افزایش استحکام در فلزات ریزدانه‌شدن است که در نتیجه اعمال تغییر شکل‌های شدید به‌وجود می‌آید. ریزدانه‌شدن باعث افزایش و تراکم مرزدانه‌ها شده و هریک از مرزدانه‌ها عاملی برای تفرق الکترون از مسیر حرکت خود محسوب می‌شوند[14, 12]. پراکنده‌شدن الکترون‌ها از مسیر جریان و جهت جریان الکتریکی به معنی کاهش هدایت الکتریکی است. بنابراین در راستای نیل به یک تعادل مناسب بین استحکام و هدایت الکتریکی استفاده از تقویت‌کننده‌های با هدایت الکتریکی بیشتر از آلومینیم مثل مس و نانولوله‌های کربنی در تحقیق حاضر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نمودار ٤، اثر فرآیند نورد تجمعی بر درصد هدایت الکتریکی کامپوزیت‌های چندلایه آلومینیم- مس- نانولوله کربنی را نسبت به هدایت الکتریکی آلومینیم خالص نشان می‌دهد. به‌دلیل وجود لایه‌های مسی در پاس‌های ابتدایی که هنوز دچار گسیختگی و توزیع در زمینه آلومینیم نشده‌اند، هدایت الکتریکی بهتری نسبت به آلومینیوم خالص مشاهده می‌شود. در پاس‌های ابتدایی در نمونه‌های حاوی نانولوله‌های کربنی به‌دلیل اتصال سست‌تر بین

لایه‌ها در مقایسه با نمونه‌های بدون نانولوله، هدایت الکتریکی کمتری حاصل شد. با افزایش تعداد پاس‌ها، به‌دلیل اعمال کرنش بیشتر، مرزدانه‌ها افزایش می‌یابند که این موضوع افت هدایت الکتریکی کامپوزیت را به همراه دارد. در پاس دوم بیشترین هدایت الکتریکی مربوط به نمونه آلومینیم تقویت‌شده با ورق مس ۰/۳میلی‌متری است. با توجه به میزان مس بالاتر در این نمونه، هدایت الکتریکی بیشتر آن دور از انتظار نیست، منتها در نمونه با همین شرایط و محتوی نانولوله کربنی هدایت الکتریکی به‌دلیل عدم اتصال مناسب در پاس دوم مقادیر کمتری دارد. در پاس‌های چهارم و پنجم نمونه‌های محتوی نانولوله کربنی با توجه به استحکام بین‌لایه‌ای ایجادشده؛ دارای هدایت الکتریکی بالاتری در مقایسه با کامپوزیت‌های بدون نانولوله کربنی هستند. در سیکل پنجم، هدایت الکتریکی نمونه نانوکامپوزیتی تهیه شده از ورق مس ۰/۳میلی‌متر در مقایسه با نمونه مشابه تهیه شده از ورق ۰/۱میلی‌متر دارای هدایت اندکی کمتر است. این موضوع می‌تواند با کارسختی بیش از حد و ایجاد نواقصی همانند ریزترک‌ها در نمونه مذکور در ارتباط باشد. همچنین به‌طور کلی می‌توان بیان نمود که نمونه‌های تهیه شده با ورق مس ۰/۳میلی‌متری به‌دلیل وجود مس بیشتر دارای هدایت الکتریکی بهتری هستند. بیشترین استحکام در نمونه‌های نانوکامپوزیتی محتوی نانولوله‌های کربنی به همراه هدایت الکتریکی مناسب متعلق به نمونه نانوکامپوزیتی آلومینیم- مس- نانولوله کربنی است که با ورق مس ۰/۳میلی‌متری تهیه شده و تا پاس چهارم تحت فرایند نورد قرار گرفته است.

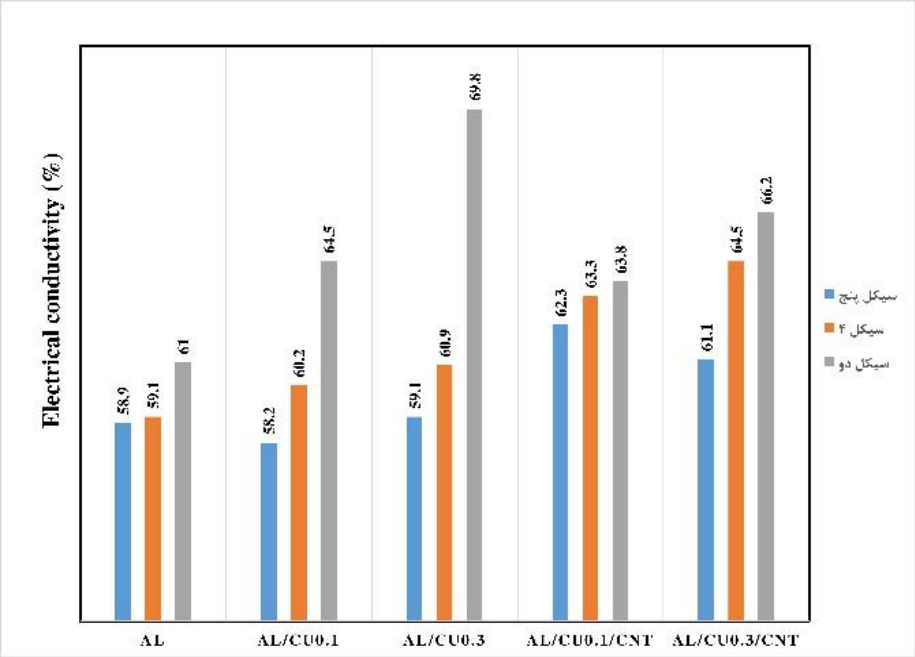


نمودار ۲) تغییرات سختی کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های چندلایه برحسب تعداد پاس‌های نورد



نمودار ۳) منحنی تنش- کرنش مهندسی نمونه‌های نانوکامپوزیتی چندلایه آلومینیم- مس- نانولوله کربنی در پاس‌های اول، دوم و چهارم

شکل ۹) تصویر نمونه‌های نانوکامپوزیتی آلومینیم- مس (با ضخامت ۰/۳میلی‌متر)- نانولوله کربنی (۰/۲% وزنی) پس از اعمال شش سیکل نورد (پایین)، بخش‌هایی از نمونه تخریب‌شده به‌دلیل شکنندگی زیاد (بالا)



نمودار ٤) درصد هدایت الکتریکی نمونه‌های نوردشده مختلف نسبت به آلومینیم خالص در پاس‌های دوم، چهارم و پنجم

٤- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، نمونه‌های کامپوزیتی چندلایه آلومینیم- مس و نمونه‌های نانوکامپوزیتی آلومینیم- مس محتوی نانولوله‌های کربنی به روش نورد تجمعی و با اعمال پنج پاس تهیه شدند. تغییرات ریزساختار، سختی، استحکام کششی و هدایت الکتریکی نمونه‌ها مورد آزمون قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به شرح ذیل هستند:

۱- نمونه‌های کامپوزیتی زمینه آلومینیوم در پاس‌های ابتدایی از اتصال سست‌تری برخوردار هستند. حضور لایه مس ضخیم‌تر و همچنین نانولوله‌های کربنی در بین لایه‌ها این وضعیت را وخیم‌تر می‌سازد و هر چه تعداد پاس‌های نورد افزایش می‌یابد، پیوند بین لایه‌ها و نحوه توزیع مس در زمینه بهبود می‌یابد.

۲- گلویی‌شدن و شکست لایه‌های مس به‌عنوان دو ساز و کار مهم در نحوه توزیع مس در میان زمینه آلومینیم در نمونه‌های مورد آزمایش، شناسایی شد. با اعمال پاس‌های بیشتر نواحی مس به‌صورت مناطق کوچک‌تر و توزیع بهتر در زمینه پراکنده می‌شوند.

۳- با تکرار پاس‌های نورد به تدریج خوشه‌های منسجم نانولوله‌های‌کربنی به خوشه‌های نفوذی تبدیل شده و توزیع آنها در میان زمینه آلومینیم بهبود می‌یابد.

٤- سرعت افزایش سختی در پاس‌های اول به‌دلیل کرنش سختی بیشتر بالاتر بوده و در پاس‌های انتهایی کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار سختی متعلق به نانوکامپوزیت چندلایه آلومینیم- مس- نانولوله کربنی به میزان حدود HV ۱۴۷ و در پاس پنجم نورد است که افزایش ۴۴۶ درصدی را در مقایسه با آلومینیم نشان می‌دهد. همچنین نمونه‌های محتوی مس بیشتر دارای سختی بالاتری هستند.

۵- خواص کششی با افزایش تعداد پاس‌ها تا پاس چهارم، افزایش می‌یابد. بیشترین استحکام کششی توام با تغییر طول تا شکست

مربوط به نمونه نانوکامپوزیت چندلایه آلومینیم- مس- نانولوله‌کربنی است که از ورق مس با ضخامت ۰/۳میلی‌متر تهیه شده است. اعمال پاس‌های بیش از پنج باعث تردشدن نمونه‌های نانوکامپوزیتی و اُفت خصوصیات استحکامی آن می‌شود.

٦- انجام فرآیند نورد تجمعی علی‌رغم بهبود خواص مکانیکی موجب کاهش هدایت الکتریکی نمونه‌ها می‌شود. حضور مس و نانولوله‌های‌کربنی افزایش هدایت الکتریکی نمونه‌ها را در پی دارد، به گونه‌ای که می‌توان با کامپوزیت‌سازی و افزودن مس و نانولوله کربنی به آلومینیم تا حدی اثرات کاهش هدایت الکتریکی در اثر اعمال تغییر شکل‌های شدید را کاهش داده و به توازن مناسبی از استحکام و خواص الکتریکی مطلوب دست یافت.

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

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور 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 هیچ گونه تعارض منافعی برای این اثر ندارند.

سهم نویسندگان: علی‌اکبر رستم‌نژادچراتی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰%)؛ حسن عبدوس (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۰%)؛ احسان برهانی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۲۰%)؛ مجید ناصری (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۲۰%)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

1- Mehr VY, Rezaeian A, Toroghinejad MR. Application of accumulative roll bonding and anodizing process to produce Al–Cu–Al2O3 composite. Materials & Design. 2015 ;70:53-59.

2- Eizadjou M, Talachi AK, Manesh HD, Shahabi HS, Janghorban K. Investigation of structure and mechanical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process. Composites Science and Technology. 2008;68(9):2003-2009.

3- Salimi S, Izadi H, Gerlich AP. Fabrication of an aluminum–carbon nanotube metal matrix composite by accumulative roll-bonding. Journal of materials science. 2011;46(2):409-415.

4- Moghadam AD, Omrani E, Menezes PL, Rohatgi PK. Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene–a review. Composites Part B: Engineering. 2015;77:402-420.

5- Morovvati MR, Mollaei-Dariani B. The formability investigation of CNT-reinforced aluminum nano-composite sheets manufactured by accumulative roll bonding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;95(9-12):3523-3533.

6- Kitazono K, Sato E, Kuribayashi K. Novel manufacturing process of closed-cell aluminum foam by accumulative roll-bonding. Scripta Materialia. 2004;50(4):495-498.

7- Nasresfahani MR, Shamanian M. Development and characterization of Al/MWCNT–Al_2O_3 hybrid composite by accumulative roll bonding. Journal of Materials Science. 2018;53(15):10812-10821.

8- Zare H, Jahedi M, Toroghinejad MR, Meratian M, Knezevic M. Compressive, shear, and fracture behavior of CNT reinforced Al matrix composites manufactured by severe plastic deformation. Materials & Design. 2016;106:112-119.

9- Tabesh A, Ebrahimi Gh, Ezatpour HR. The investigation and comparison of mechanical propertise and microstructure Al/CNT and Al/CNT/Al_2O_3 copmosites produced by mixed accumulative roll bounding. Journal of Science and Technology of Composites. 2018;4(4):464-470. [Persian]

10- Samadzadeh M, Toroghinejad MR. The influence of carbon nanotube and roll bonding parameters on the bond strength of Al sheets. Journal of Materials Engineering and Performance. 2014;23(5):1887-1895.

11- Mahdavian MM, Khatami-Hamedani H, Abedi HR. Macrostructure evolution and mechanical properties of accumulative roll bonded Al/Cu/Sn multilayer composite. Journal of Alloys and Compounds. 2017;703:605-613.

12- 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. [Persian]

13- Yao G, Mei Q, Li J, Li C, Ma Y, Chen F, et al. Hard copper with good electrical conductivity fabricated by accumulative roll-bonding to ultrahigh strains. Metals. 2016;6(5):115-120.

14- Yao GC, Mei QS, Li JY, Li CL, Ma Y, Chen F, et al. Cu/C composites with a good combination of hardness and electrical conductivity fabricated from Cu and graphite by accumulative roll-bonding. Materials & Design. 2016;110:124-129.

15- Mehr VY, Toroghinejad MR, Rezaeian A. Mechanical properties and microstructure evolutions of multilayered Al–Cu composites produced by accumulative roll bonding process and subsequent annealing. Materials Science and Engineering: A. 2014;601:40-47.

16- Bowler N, Huang Y. Electrical conductivity measurement of metal plates using broadband eddy-current and four-point methods. Measurement Science and Technology. 2005;16(11):2193.

17- Vaidyanath LR, Nicholas MG, Milner DR. Pressure welding by rolling. British Welding Jour. 1959;6:13-28

18- Jamaati R, Toroghinejad MR. Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process. Materials Science and Engineering: A. 2010;527(9):2320-2326.

19- Saito Y, Utsunomiya H, Tsuji N, Sakai T. Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process. Acta materialia. 1999;47(2):579-583.

20- Torralba JD, Da Costa CE, Velasco F. P/M aluminum matrix composites: an overview. Journal of Materials Processing Technology. 2003;133(1-2):203-206.

21- Yazdani A, Salahinejad E. Evolution of reinforcement distribution in Al–B_4C composites during accumulative roll bonding. Materials & Design. 2011;32(6):3137-3142.

22- Yazdani A, Salahinejad E, Moradgholi J, Hosseini M. A new consideration on reinforcement distribution in the

different planes of nanostructured metal matrix composite sheets prepared by accumulative roll bonding (ARB). Journal of Alloys and Compounds. 2011;509(39):9562-9564.
23- Shaarbaf M, Toroghinejad MR. Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process. Materials Science & Engineering A. 2008;473(1-2):28-33.
24- Saito Y, Tsuji N, Utsonomiya H, Sakai T, Hong RG. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. Scripta Materialia. 1998;39(9):1221-1227.
25- Hansen N, Huang X, Ueji R, Tsuji N. Structure and strength after large strain deformation. Materials Science and Engineering: A. 2004;387:191-194.