

Research Paper

Investigation of Structural and Corrosion properties of MoS₂-WC Reinforced Al/18Cu Layered Composite in Marine Environment

Abbas Karimi¹, Morteza Alizadeh^{2*}

1. MSc student of Materials Engineering, Department of Materials Engineering, Corrosion and Materials Protection Group, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

2. Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Received: 2024/07/16

Revised: 2024/08/15

Accepted: 2024/08/18

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2024.33684.2048](https://doi.org/10.30495/jnm.2024.33684.2048)

Keywords:

Accumulative Roll Bonding, Corrosion Properties, Composite, Aluminum 1050, Tungsten Carbide

Abstract

Introduction: Metal Matrix Composites (MMCs) are of great importance in the industry due to characteristics such as good corrosion resistance, superior elastic modulus, high strength-to-weight ratio, and thermal stability. Among MMCs, Hybrid Metal Matrix Composites (HMMCs), which use two or more reinforcements, offer a combination of desirable properties.

Methods: In this research, to fabricate composite samples, the surfaces of aluminum and copper sheets were first prepared by washing with acetone and brushing. WC and MoS₂ powders were heated at 120°C to remove moisture. Four aluminum sheets and one copper sheet were stacked, with WC and MoS₂ powders sprinkled on them. Then, these sheets were arranged in a sandwich structure consisting of four layers of aluminum, one layer of copper, and four layers of WC-MoS₂, and rolled using a 30-ton rolling mill with a 65% reduction in cross-sectional area at room temperature without any lubricant. After the initial rolling, the sandwich was cut into three equal parts, and after cleaning and surface preparation, they were re-stacked into a new sandwich and rolled with a 60% reduction in cross-sectional area. This process was repeated for seven cycles, according to previous studies on the fabricated samples.

Findings: In this study, the hybrid composite Al/Cu/WC/MoS₂ was fabricated using the Accumulative Roll Bonding (ARB) process over seven cycles. Structural analysis using X-ray diffraction (XRD) patterns indicated that no new phases were formed. Scanning Electron Microscope (SEM) images confirmed the desirable multilayer structure. The ARB process resulted in the proper distribution of copper metal and WC-MoS₂ particles within the aluminum matrix. In the final stage of ARB, the copper metal was distributed in an island-like pattern within the aluminum matrix. Corrosion tests showed that corrosion resistance improved with an increasing number of ARB cycles. The corrosion current density in the hybrid composite produced with seven cycles was lower than in other cycles due to the minimal porosity and homogeneous distribution of MoS₂ and WC particles, indicating the highest corrosion resistance. The corrosion current density in the hybrid composite produced with seven cycles was lower than in other cycles due to the least porosity and homogeneous distribution of MoS₂ and WC particles, indicating the highest corrosion resistance.

Citation: Abbas Karimi, Morteza Alizadeh, Investigation of Structural and Corrosion properties of MoS₂- WC Reinforced Al/18Cu Layered Composite in Marine Environment , Quarterly Journal of New Materials. 2024; 14 (54): 47-58.

*Corresponding author: Morteza Alizadeh

Address: Department of Materials Engineering, Shiraz University of Technology.

Tell: 09173154592

Email: Alizadeh@sutech.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Bulk materials with a high strength-to-weight ratio are crucial for weight-sensitive industrial applications. Enhancing this ratio can be achieved by reducing grain size and incorporating reinforcing materials. Ultra-fine and nanometric grain sizes are produced through Severe Plastic Deformation (SPD) methods, such as Equal Channel Angular Pressing (ECAP), High-Pressure Torsion (HPT), and Accumulative Roll Bonding (ARB). ARB is cost-effective for producing large sheets with ultra-fine grains and can create various composites. Metal Matrix Composites (MMCs) are particularly promising for aerospace, military, and automotive industries due to their superior properties, and hybrid MMCs (HMMCs) offer combined benefits of multiple reinforcements. Multilayer metal composites, produced through processes like ion sputtering and diffusion bonding, have unique properties and corrosion resistance but need further investigation, especially regarding ARB-processed alloys. Studies show varying corrosion resistance in ARB-processed materials. Understanding MMC corrosion behavior is vital for their application. While much research has focused on the microstructure and mechanical properties of ARB-produced MMCs, corrosion studies are limited. Recent findings indicate differing corrosion resistances based on material composition and ARB cycles. This study aims to explore the corrosion behavior of Al/18Cu/3MoS₂/3WC hybrid composites produced by ARB, focusing on the effects of MoS₂ and WC particles on corrosion in a 3.5 wt% NaCl solution using linear polarization measurements.

Findings and Discussion

In this research, the hybrid composite Al/Cu/WC/MoS₂ was fabricated using the Accumulative Roll Bonding (ARB) process

over seven cycles. Structural analysis using X-ray Diffraction (XRD) patterns indicated that no new phases were formed. Scanning Electron Microscope (SEM) images confirmed the desired multilayer structure. The ARB process resulted in the appropriate distribution of WC-MoS₂ particles within the aluminum matrix, creating a continuous multilayer structure. In the final ARB stage, copper layers were distributed as islands within the aluminum matrix. Corrosion tests revealed that as the number of ARB cycles increased, discontinuities decreased, and particle distribution improved, leading to enhanced corrosion resistance of the composite. The corrosion current density in the hybrid composite produced with seven cycles was lower than in other cycles, due to the minimal porosity and homogeneous distribution of MoS₂ and WC particles, indicating the highest corrosion resistance.

Conclusion

The Accumulative Roll Bonding (ARB) process helps maintain a desirable multilayer structure and proper distribution of WC-MoS₂ particles between the layers of aluminum and copper. The corrosion current density decreases with an increasing number of ARB cycles due to the uniform distribution of reinforcing particles and the formation of a passive layer by aluminum.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

Shiraz university of technology.

Authors' contributions

Experimentation: Abbas Karimi, **Data analysis and results:** Abbas Karimi, Morteza Alizadeh, **Final writing:** Abbas Karimi, Morteza Alizadeh.

مقاله پژوهشی

ارزیابی ساختاری و عملکرد خوردگی کامپوزیت لایه ای $Al/18Cu$ تقویت شده با WC و MoS_2 در محیط دریاییعباس کریمی^۱، مرتضی علیزاده^{*۲}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد، گروه خوردگی و حفاظت از مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده

مقدمه: کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC) به دلیل ویژگی‌هایی مانند مقاومت به خوردگی مناسب، مدول الاستیسیته برتر، نسبت استحکام به وزن بالا و پایداری حرارتی، در صنعت اهمیت زیادی دارند. در بین MMCها، کامپوزیت‌های زمینه فلزی هیبریدی (HMMC) با استفاده از دو یا چند تقویت‌کننده، ترکیبی از خواص مطلوب را ارائه می‌دهند.

روش: در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، ابتدا سطح ورق‌های آلومینیوم و مس شستشو با استون و برس کاری شدند. پودرهای WC و MoS_2 برای از بین بردن رطوبت در دمای $120^\circ C$ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. چهار ورق آلومینیوم و یک ورق مس روی هم قرار داده شده در حالی که پودرهای WC و MoS_2 روی آن‌ها پاشیده شد. سپس این ورق‌ها به صورت ساندویچی شامل چهار لایه آلومینیوم، یک لایه مس و چهار لایه $WC-MoS_2$ چیده شده و با دستگاه نورد $30^\circ C$ تنی با کاهش سطح مقطع 65% در دمای اتاق و بدون روان‌کننده نورد داده شد. بعد از نورد اولیه، ساندویچ به سه قسمت مساوی برش داده شد و پس از تمیز کردن و آماده‌سازی سطح، مجدداً به صورت ساندویچ جدید چیده و با کاهش سطح مقطع 60% نورد شد. این فرآیند تا هفت چرخه طبق مطالعات پیشین بر روی نمونه‌های ساخته شده اجرا شد.

یافته‌ها: در این تحقیق، کامپوزیت هیبریدی $Al/Cu/WC/MoS_2$ با استفاده از فرآیند اتصال نوردی تجمعی (ARB) در هفت چرخه ساخته شد. بررسی ساختاری با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نشان داد که هیچ فاز جدیدی تشکیل نشده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ساختار چندلایه مطلوب را تأیید کردند. فرآیند ARB منجر به توزیع مناسب فلز مس و ذرات $WC-MoS_2$ در زمینه آلومینیوم شد. در مرحله نهایی ARB، فلز مس به صورت جزیره‌ای در زمینه آلومینیوم توزیع شد. آزمون‌های خوردگی نشان دادند که با افزایش تعداد چرخه‌های ARB مقاومت به خوردگی بهبود یافت. چگالی جریان خوردگی در کامپوزیت هیبریدی تولید شده با هفت چرخه، به دلیل کمترین تخلخل و توزیع همگن ذرات WC و MoS_2 ، پایین‌تر از سایر چرخه‌ها بود که نشان‌دهنده بالاترین مقاومت در برابر خوردگی است.

نتیجه‌گیری: فرآیند ARB به حفظ ساختار چندلایه مطلوب و توزیع مناسب ذرات $WC-MoS_2$ بین لایه‌های آلومینیوم و مس کمک می‌کند. چگالی جریان خوردگی با افزایش تعداد چرخه‌های ARB به دلیل توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده و تشکیل لایه پسیو توسط آلومینیوم کاهش می‌یابد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۶

تاریخ داوری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2024.33684.2048](https://doi.org/10.30495/jnm.2024.33684.2048)

واژه‌های کلیدی:

اتصال نوردی تجمعی، خواص خوردگی، کامپوزیت، آلومینیوم ۱۰۵۰، کاربید تنگستن

* نویسنده مسئول: مرتضی علیزاده

نشانی: گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.

تلفن: ۰۹۱۷۳۱۵۴۵۹۲

پست الکترونیکی: Alizadeh@sutech.ac.ir

مقدمه

نتایج این مطالعه به درک عمیق تر رفتار خوردگی این کامپوزیت هیبریدی و همچنین بررسی ریزساختاری آن کمک خواهد کرد. تا جایی که می‌دانیم، این اولین مطالعه‌ای است که به طور خاص بر تاثیر ذرات MoS₂ و WC (کوچکتر از ۵۰ میکرون) بر رفتار خوردگی زمینه آلومینیوم در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl در فرآیند ARB تمرکز دارد.

مواد و روش‌ها

۱- مواد اولیه

در این مطالعه از ورق‌های آلومینیوم خالص تجاری (۹۹ درصد خلوص) و مس خالص تجاری (۹۹ درصد خلوص) به عنوان مواد اولیه استفاده شد. ضخامت ورق‌های آلومینیوم ۱ و ۰/۷ میلی‌متر و ضخامت ورق مس ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد، در حالی که طول و عرض آنها ۱۲ سانتی‌متر انتخاب شد. برای توسعه کامپوزیت‌های چندلایه هیبریدی از دو پودر مختلف یعنی WC و MoS₂ استفاده شد. ابعاد نمونه‌ها باتوجه به رسیدن به ترکیب شیمیایی مورد نظر انتخاب شد.

۲- فرایند ساخت کامپوزیت

برای شروع ساخت نمونه‌های کامپوزیت، ابتدا عملیات آماده‌سازی سطح بر روی ورق‌های آلومینیوم و مس انجام شد. بدین منظور، ورق‌ها دو بار با استون شسته شدند تا روغن و گریس آن‌ها پاک شود. سپس سطح ورق‌ها با یک برس سیمی برس کاری شد تا یک لایه نازک و سخت روی سطوح ایجاد شود. پودرهای WC و MoS₂ برای از بین بردن رطوبت، در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد درون آون حرارت داده شدند.

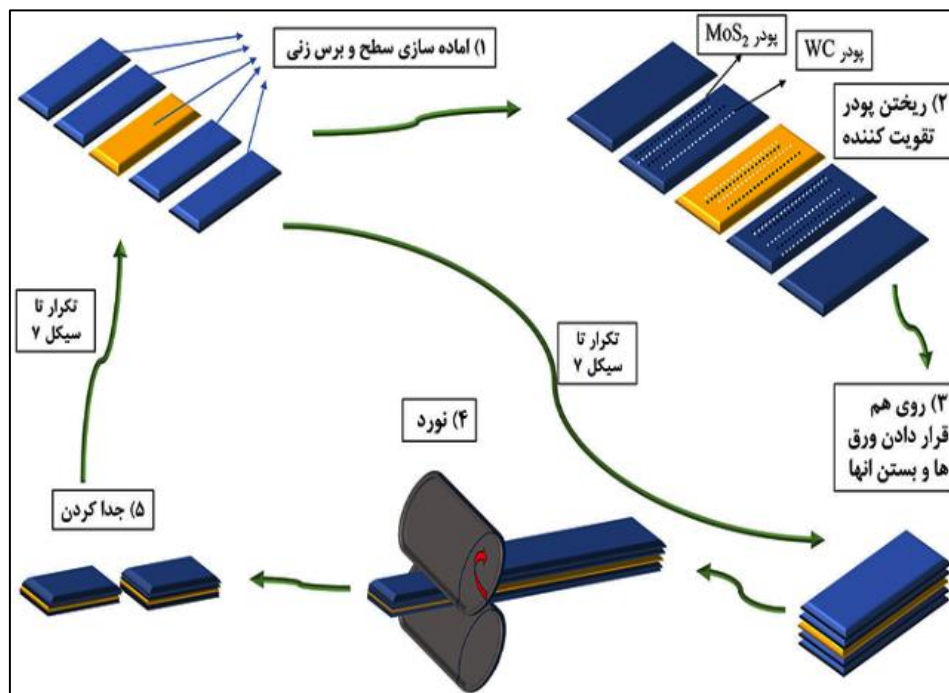
پس از آماده‌سازی مواد اولیه، چهار ورق آلومینیوم و یک ورق مس روی هم قرار داده شدند و مخلوطی از پودرهای WC و MoS₂ بین آن‌ها پاشیده شد. سپس این ورق‌ها با ترتیب Al/Al/Cu/Al/Al روی هم چیده شدند. ساندویچ آماده شده شامل چهار لایه آلومینیوم، یک لایه مس و چهار لایه WC-MoS₂ با استفاده از یک دستگاه نورد ۳۰ تنی با کاهش سطح مقطع ۶۵ درصد در دمای اتاق و بدون روان‌کننده، نورد شد.

بعد از نورد اولیه، ساندویچ به سه قسمت مساوی برش داده شد و پس از تمیز کردن و آماده‌سازی سطح، مجدداً به صورت یک ساندویچ جدید چیده و با کاهش سطح مقطع ۶۰ درصد نورد داده شد. در مرحله بعدی، نمونه نورد شده به نصف برش داده شد و آماده‌سازی سطح مانند مرحله قبل انجام گرفت. سپس فرایند ARB طبق مطالعات پیشین [۳، ۱۷] تا هفت چرخه روی نمونه‌های ساخته شده اجرا شد. مراحل انجام کار به طور شماتیکی در شکل ۱ نشان داده شده است.

امروزه مواد حجیم با نسبت استحکام به وزن بالا در کاربردهای صنعتی حساس به وزن اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند [۱-۳]. کاهش اندازه دانه فلزات و استفاده از مواد تقویت‌کننده در آنها می‌تواند نسبت استحکام به وزن را افزایش دهد [۱-۳]. مواد با اندازه دانه‌های فوق‌ریز و نانومتری از طریق روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیکی (SPD) تولید می‌شوند [۱-۳]. رایج‌ترین روش‌های SPD عبارتند از پرس زاویه‌ای کانال مساوی (ECAP)، پیچش با فشار بالا (HPT) و روش اتصال نوردی تجمعی (ARB). با فرایند ARB می‌توان کامپوزیت‌های چندلایه فلزی، کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده با ذرات سرامیکی، و کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت‌شده با ذرات سرامیکی را تولید کرد [۴]. کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs) به دلیل ویژگی‌های برجسته‌ای مانند مقاومت سایشی بالا، مدول الاستیسیته برتر، نسبت استحکام به وزن بالا و پایداری حرارتی، به عنوان مواد امیدوارکننده‌ای در صنایع هوافضا، نظامی و خودروسازی مطرح شده‌اند. در میان MMC ها، کامپوزیت‌های زمینه فلزی هیبریدی (HMMCs) جایگاه ویژه‌ای دارند. این دسته از مواد با استفاده از دو یا چند تقویت‌کننده، ترکیبی از خواص مطلوب را ارائه می‌دهند [۱-۳، ۵، ۶]. کامپوزیت‌های چندلایه فلزی به دلیل ویژگی‌های مکانیکی، الکتریکی و خوردگی مطلوب مورد توجه قرار گرفته‌اند و از طریق فرآیندهای پوشش‌دهی مانند کندوپاش یونی و تبخیر برای ایجاد لایه‌های نازک یا با پیوند انتشاری نوارهای نازک و فرایند ARB تولید می‌شوند [۱-۴، ۶].

نشان داده شده که خواص کامپوزیت‌های تولیدی به نوع فرایند تولید بستگی دارد [۷-۱۰]، با توجه به اینکه در هنگام تولید کامپوزیت‌ها با فرایند ARB ریز شدن دانه‌ها هم رخ می‌دهد، تغییرات خواص نسبت به روش‌های دیگر مقداری متفاوت خواهد بود. اگرچه ریزساختار و خواص مکانیکی MMC های تولید شده توسط فرایند ARB در دو دهه گذشته به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱-۲۷]، تا به امروز اطلاعات کمی در مورد خوردگی گزارش شده است. کدخدایی و همکاران [۲۶] دریافتند که مقاومت کلی در برابر خوردگی آلومینیوم خالص در حین ARB کاهش می‌یابد در حالی که مقاومت در برابر خوردگی کامپوزیت‌های ساخته شده توسط ARB با افزایش مقدار نانوذرات سیلیس (SiO₂) افزایش می‌یابد. همچنین، دارمیانی و همکاران [۲۷] گزارش کرده‌اند که مقاومت در برابر خوردگی حفره‌ای نانو کامپوزیت آلومینیوم-کاربید سیلیسیم تولید شده توسط ARB، به دلیل توزیع یکنواخت SiC در زمینه آلومینیوم، با افزایش تعداد چرخه های ARB افزایش می‌یابد.

تاکنون مطالعه شاخصی در مورد رفتار خوردگی کامپوزیت‌های هیبریدی که با فرایند ARB تولید شده‌اند، در منابع علمی گزارش نشده است. انگیزه اصلی این پژوهش، بررسی رفتار خوردگی کامپوزیت هیبریدی Al/18Cu/3MoS₂/3WC تولید شده به روش ARB است.



شکل ۱- مراحل تولید کامپوزیت Al/18Cu/3MoS₂/3WC (%wt)

۳-شناسایی

نمونه‌ها به درخشش نهایی برس و برای بررسی دقیق با میکروسکوپ الکترونی و نوری آماده شوند.

۴-آزمون پلازیراسیون

آزمایش‌های الکتروشیمیایی بر روی کامپوزیت‌های هیبریدی با استفاده از دستگاه پتانسیواستات مدل IVIUMSTAT در محلول ۳/۵ درصد NaCl و در دمای اتاق انجام شد. در این آزمایش‌ها، از الکتروده Ag/AgCl و یک میله پلاتین به ترتیب به عنوان الکتروده مرجع و الکتروده کمکی استفاده شد. نمونه‌های کامپوزیتی الکتروده کاری در نظر گرفته شدند و آزمایشات روی سطح TD انجام شد.

برای آماده‌سازی الکترودهای کاری، ابتدا سطح تا سمباده ۶۰۰ پولیش شد و سپس با آب مقطر شسته شدند. در مرحله بعد، به مدت ۱۰ دقیقه با استون به صورت فراصوت چربی‌زدایی و نهایتاً دوباره با آب مقطر شسته شدند. در آزمایش‌های پلازیراسیون، پس از هر چرخه از فرآیند ARB، ابتدا پتانسیل مدار باز (OCP) پس از ۳۰ دقیقه غوطه‌وری در محلول NaCl اندازه‌گیری شد. سپس، آزمایش‌ها با سرعت اسکن ۱ میلی‌ولت بر ثانیه انجام شد تا رفتار الکتروشیمیایی کامپوزیت‌های هیبریدی در برابر خوردگی مورد بررسی قرار گیرد. در نهایت سطح خورده شده توسط SEM و EDX مورد بررسی قرار گرفت.

به منظور بررسی ساختار و شناسایی فازهای موجود در کامپوزیت‌های تولیدی، از روش پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. آزمایش‌های XRD توسط دستگاه ساخت Bruker آلمان و با استفاده از نرم‌افزار Advanced D8 انجام گرفت. نمونه‌های کامپوزیت بر روی صفحه ND-RD قرار داده شده و با تابش آند مس در بازه زاویه‌ای ۲۰ تا ۹۰ درجه و با گام ۰/۰۵ درجه مورد تابش قرار گرفتند. زمان تابش برای هر گام ۱ ثانیه بود. الگوی XRD حاصل شده با نرم‌افزار X-pert High Score Plus مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ولتاژ و جریان دستگاه به ترتیب ۴۰ کیلو ولت و ۳۰ میلی آمپر تنظیم شده بود.

برای بررسی ریز ساختار نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی تولید شده، از دو روش میکروسکوپی نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. در روش SEM، از دستگاه TESCAN VEGA مجهز به طیف‌سنج پراکندگی انرژی (EDS) برای آنالیز عنصری نمونه‌ها نیز بهره گرفته شد. آزمون‌ها بر صفحه عمود بر TD انجام شد.

فرآیند آماده‌سازی نمونه‌ها برای بررسی ریزساختار و ساختار شامل مراحل سمباده زنی و پولیش بود. در مرحله سمباده زنی، از کاغذ سمباده با شماره‌های ۴۰۰ تا ۳۰۰۰ برای صاف و یکنواخت کردن سطح نمونه‌ها استفاده شد. در مرحله پولیش نهایی، از پودر Al₂O₃ با اندازه ذرات ۰/۳ میکرومتر به عنوان ماده ساینده و چرخ پولیش استفاده شد تا سطح

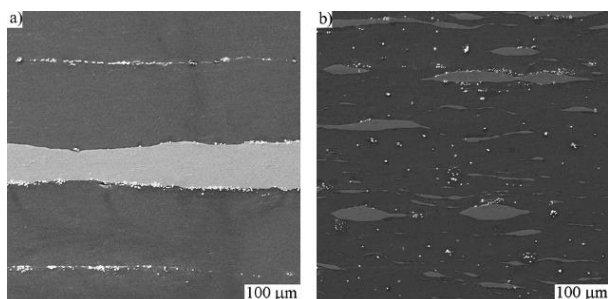
۴- آزمون کشش

آزمایش کشش بر روی ورق های کامپوزیتی در دمای محیط با نرخ کشش ۴-۱۰ × ۱ بر ثانیه توسط دستگاه یونیورسال بر اساس استاندارد ASTM-E8 انجام شد.

نتایج

۱- بررسی ساختاری

شکل ۲، الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) کامپوزیت Al/18Cu/3MoS₂/3WC را پس از ۷ چرخه ARB نشان می دهد. این الگو بیانگر وجود تنها فازهای آلومینیوم (Al)، مس (Cu)، تنگستن کاربید (WC) و سولفید مولیبدن (MoS₂) در این کامپوزیت است و هیچ فاز جدیدی در الگوی XRD مشاهده نمی شود. از آنجا که فرآیند ARB در دمای اتاق انجام می شود، واکنش شیمیایی بین عناصر موجود رخ نمی دهد. در طول فرآیند ARB، به دلیل اصطکاک بین نوارها و غلتکها، دما افزایش می یابد، اما این افزایش برای وقوع واکنش شیمیایی ناچیز است. گزارش شده است که دمای نمونه در طول فرآیند ARB از دمای اتاق به حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد افزایش می یابد [۱۲]، در حالی که دمای مورد نیاز برای واکنش بسیار بالاتر است.



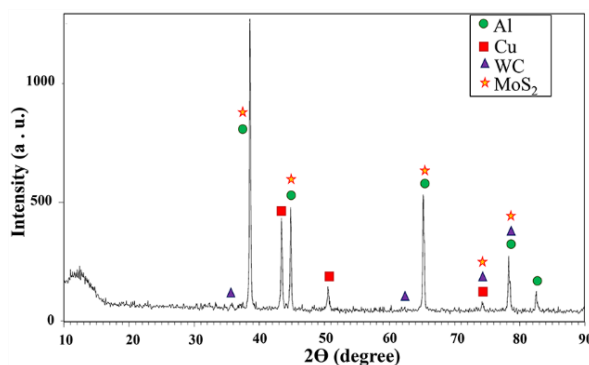
شکل ۳- ریزساختار کامپوزیت های چندلایه Al/Cu/WC/MoS₂ تولید شده: (a) پس از اولین چرخه ARB و (b) پس از چرخه هفتم ARB

همانطور که در شکل ۳a مشاهده می شود، لایه های پودر در برخی نواحی مقطع دارای ناپیوستگی هستند. این ناپیوستگی ها به دلیل وجود فضاهای خالی بین ذرات پودر در هنگام پاشش آن ها روی سطح نمونه ها ایجاد می شود. شکل ۴، سطح ورق آلومینیوم قبل و بعد از پاشش پودرهای WC-MoS₂ را نشان می دهد. قابل توجه است که پاشش پودر به صورت دستی با الک انجام شده است و بنابراین توزیع پودرها کاملاً همگن نیست. همانطور که دیده می شود، برخی نواحی خالی (فلش های زرد رنگ) از پودر روی سطح وجود دارد و بنابراین، تشکیل برخی ناپیوستگی ها در مقطع اجتناب ناپذیر است و حتی به محل نمونه برداری نیز بستگی دارد.

علاوه بر این، همانطور که از شکل ۴ مشخص است، برخی تجمعات ذرات روی سطح ورق صفحه (RD-TD) وجود دارد. شکل ۳b نشان می دهد که این تجمعات ذرات در نمای مقطع صفحه RD-ND نیز دیده می شود. همان طور که در شکل ۳b دیده می شود ذرات سرامیکی در پایان چرخه هفتم توزیع مناسبی دارند.

توزیع ذرات سرامیکی در زمینه آلومینیوم با دو مکانیزم قابل توجه است: (الف) جریان زمینه آلومینیوم در جهت نورد،

(ب) افزایش تعداد لایه ها با افزایش تعداد چرخه های ARB در طول فرآیند ARB زمینه در جهت نورد جریان می یابد و ذرات WC-MoS₂ را در این جهت حمل می کند. همچنین، از آنجایی که ورق نورد شده در فرآیند ARB به دو ورق برش داده می شود و روی هم قرار می گیرد و سپس دوباره نورد می شود، بنابراین با پیشرفت فرآیند ARB تعداد لایه های افزایش می یابد و ذرات به خوبی در زمینه توزیع می شوند.

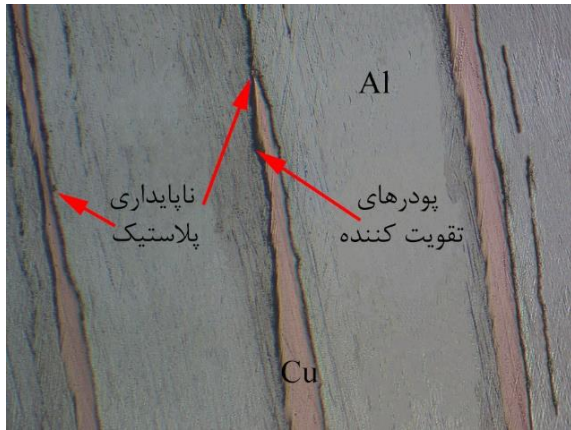


شکل ۲- الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) کامپوزیت تولید شده پس از ۷ چرخه نورد

۲- بررسی ریز ساختاری

شکل ۳، تصاویر SEM از سطح مقطع کامپوزیت های هیبریدی چندلایه Al/Cu/WC/MoS₂ را پس از اولین و آخرین چرخه فرآیند ARB نشان می دهد. مشاهدات SEM در جهت ضخامت (TD) نمونه ها انجام شده است.

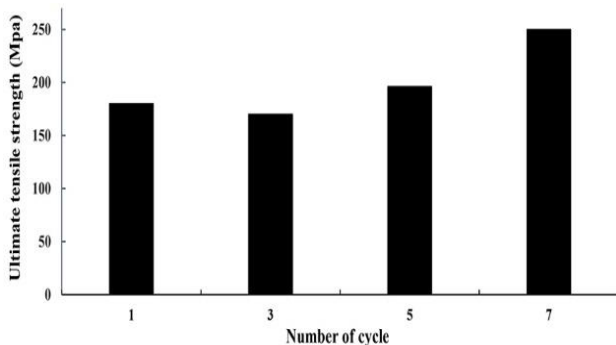
همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، مقطع عرضی شامل چهار لایه آلومینیوم، یک لایه مس و چهار لایه WC-MoS₂ است. دو لایه



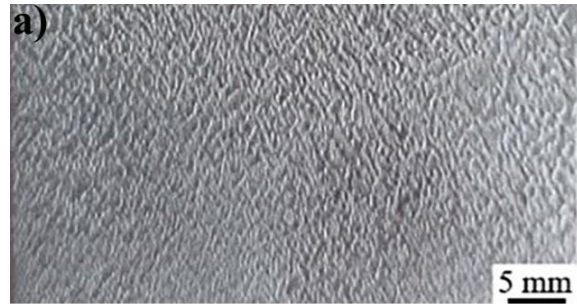
شکل ۵- تصویر میکروسکوپ نوری (OM) از کامپوزیت چندلایه Al/Cu/WC/MoS₂ پس از دومین چرخه ARB

۳- بررسی خواص خوردگی

شکل ۶ استحکام کششی کامپوزیت تولید شده را در سیکل‌های مختلف فرآیند ARB نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود استحکام کششی کامپوزیت تولیدی بعد از سیکل ۷ نسبت به سیکل اول افزایش یافته است و استحکام کششی آن از ۱۸۰ مگاپاسکال به ۲۵۰ مگاپاسکال رسیده است. افزایش استحکام در این کامپوزیت به دلیل مکانیزم‌های زیر است: الف) کار سختی، ب) ریز شدن دانه‌ها، ج) افزایش تعداد لایه‌ها، د) حضور ذرات سرامیکی و نقش آنها در جلوگیری از حرکت ناب‌ها جایی‌ها. در سیکل‌های ابتدایی فرآیند تعداد زیادی ناب‌ها جایی تولید می‌شود و با برخورد آنها به یکدیگر کارسختی به وجود می‌آید. با افزایش تعداد سیکل‌های نورد با تقسیم دانه‌ای، کامپوزیت‌های تولیدی ریزدانه می‌شوند و مطابق با رابطه هال پیچ استحکام زیاد می‌شود.



شکل ۶- نمودار تنش کششی نهایی بر حسب تعداد چرخه



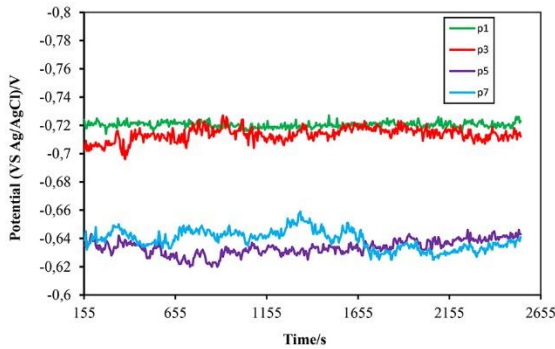
شکل ۴- سطح ورق آلومینیوم (a) پس از برس کاری با سیس و (b) پس از پاشش پودرهای WC-MoS₂

از شکل ۳b مشاهده می‌شود که علاوه بر ذرات سرامیکی، جزیره‌های مس نیز به عنوان تقویت‌کننده فلزی پس از چرخه هفتم فرآیند ARB در زمینه آلومینیوم توزیع شده است. در پایان چرخه‌های اولیه، لایه مس به صورت پیوسته بین دو لایه آلومینیوم قرار دارد و با افزایش تعداد چرخه‌های ARB، به دلیل روی هم قرار گرفتن لایه‌های نورد شده، تعداد لایه‌های مس نیز افزایش می‌یابد. برای مثال بعد از چرخه دوم، تعداد لایه‌های مس به ۳ لایه و بعد از هفت چرخه به ۱۴۴ لایه افزایش می‌یابد، در حالی که لایه‌های پیوسته مس پس از چرخه نهایی، ناپیوسته و به شکل جزیره‌ای در می‌آیند (شکل ۳b).

گزارش شده است که در فرآیند ARB فلزات غیرهمسان با خواص مکانیکی متفاوت، ناپایداری پلاستیکی در فلز سخت‌تر اجتناب‌ناپذیر است [۱-۳، ۵]. در مطالعه حاضر، لایه‌های مس که سختی و استحکام بالاتری نسبت به لایه‌های آلومینیوم دارند، دچار ناپایداری پلاستیکی می‌شوند. طبق شکل ۵، در دومین چرخه ARB و به دلیل اختلاف شکل‌پذیری لایه‌های آلومینیوم و مس، گردنی و پارگی در لایه‌های مس رخ می‌دهد. بنابراین، همزمان با کاهش ضخامت لایه‌های مس به دلیل کرنش اعمال شده، آن‌ها در زمینه آلومینیوم توزیع می‌شوند. در نهایت، پس از هفت چرخه ARB، یک کامپوزیت زمینه آلومینیومی با جزایر مس که به خوبی توزیع شده، تولید می‌شود.

۴- بررسی خواص خوردگی

۴-۱- پتانسیل مدار باز (OCP)



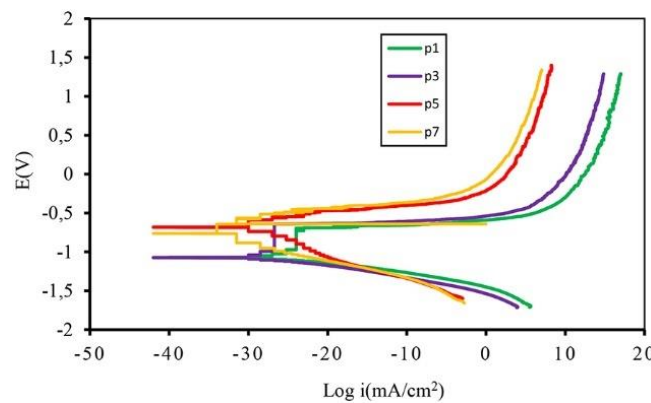
شکل ۷ - پتانسیل مدار باز کامپوزیت تولید شده در چرخه های مختلف

۴-۲- پلازیراسیون خطی

پلازیراسیون خطی، روشی الکتروشیمیایی برای بررسی رفتار خوردگی فلزات و آلیاژها در محیطهای مختلف است. در این روش، پتانسیل الکتریکی اعمال شده بر روی نمونه به طور جزئی (معمولاً در حدود ۱۰ تا ۵۰ میلی ولت) در یک محدوده پتانسیل مشخص تغییر داده می شود و در همان زمان، چگالی جریان الکتریکی عبوری از نمونه اندازه گیری می شود. شکل ۷ تغییرات چگالی جریان خوردگی (i_{corr}) کامپوزیت هیبریدی را پس از ۱، ۳، ۵ و ۷ چرخه ARB را نشان می دهد. چگالی جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی و همچنین شیب های کاتدی و آندی با برون یابی تافل برای شاخه کاتدی و آندی محاسبه شد و در جدول ۱ آورده شده است.

لازم به ذکر است که همه نمونه ها قبل از آزمون پلازیراسیون و استخراج داده های OCP به مدت ۳۰ دقیقه در محلول خورنده قرار داده شدند. شکل ۷ نمودارهای پتانسیل مدار باز (OCP) کامپوزیت های چندلایه تولید شده در چرخه های مختلف در محلول ۳/۵ درصد NaCl را نشان می دهد. همان طور که تعریف شده، پتانسیل مدار باز، پتانسیلی است که در آن سرعت واکنش های کاتدی و آندی در یک محیط خورنده خاص با یکدیگر برابر هستند. پتانسیل مدار باز شاخصی از تمایل یک ماده به خوردگی است. هر چه OCP مثبت تر باشد، ماده نجیب تر و در برابر خوردگی پایدارتر است [۲۸-۳۰].

همانطور که از شکل ۴ مشاهده می شود، با افزایش چرخه های نورد، نواحی کاتدی در مقطع TD کامپوزیت ها کاهش می یابد. این امر به افزایش رابط بین فاز زمینه و تقویت کننده منجر می شود که تمایل به خوردگی نمونه ها را افزایش می دهد. این موضوع با کاهش پتانسیل خوردگی به مقادیر منفی تر نشان داده می شود. افزایش سطح فاز دوم (مس) در کامپوزیت با افزایش چرخه های ARB رخ می دهد. این امر باعث ایجاد زوج گالوانیکی بین آلومینیوم و مس می شود و لذا پتانسیل به سمت مقادیر کمتر سوق پیدا می کند [۲۸-۳۰].



شکل ۸ - نمودار پلازیراسیون خطی کامپوزیت تولید شده در چرخه های مختلف

جدول ۱- پارامترهای خوردگی کامپوزیت تولید شده در محلول ۳/۵ درصد NaCl

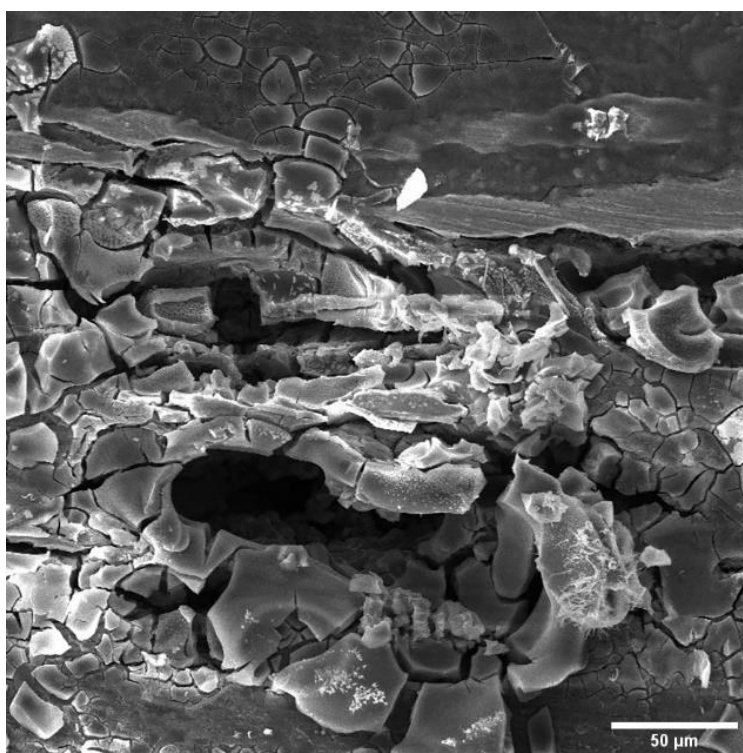
Number of pass	$E_{ocp}(v)$	β_{anod} (V/dec)	β_{cath} (V/dec)	E_{corr} (v)	i_{corr} (A/Cm ²)
1	-7.2	0.13	0.17	-1.1	7.543×10^{-5}
3	-7	0.16	0.23	-1.23	6×10^{-5}
5	-6.5	0.27	0.32	-0.8	3×10^{-5}
7	-6.1	0.26	0.29	-0.6	2.1×10^{-5}

است. همانطور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود وجود مقادیر بالای اکسیژن و آلومینیوم در نتایج سطح خوردگی، دلالت بر تشکیل لایه پسیو اکسید آلومینیوم می‌کند. این لایه پسیو با توجه به اینکه مقاومت خوبی در برابر خوردگی دارد، مقاومت به خوردگی کامپوزیت را در چرخه پایانی ARB پایین آورده است، که در شکل ۶ قابل مشاهده است [۲۸-۳۰].

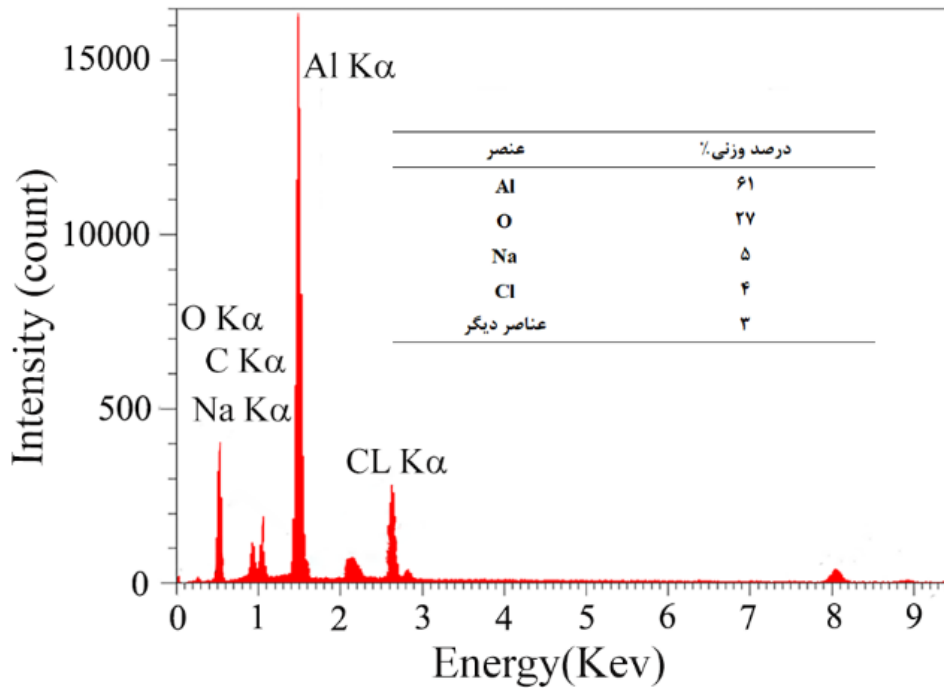
با افزایش چرخه های ARB طبق مکانیزم تقسیم دانه ای دانه بندی کامپوزیت کاهش می یابد و در چرخه نهایی به حد فوق ریز می رسد [۴]. نشان داده شده است ریز شدن دانه ها به تشکیل پوسته محافظ کمک میکند و پوسته پسیو پیوسته تشکیل شده باعث افزایش مقاومت به خوردگی کامپوزیت می شود [۲۸-۳۰]. علاوه بر این در چرخه های نهایی ARB ذرات تقویت کننده در زمینه به خوبی پخش شده و جلوی حرکت نایجایی ها و رسیدن آنها به سطح را میگیرد و به تشکیل راحت تر پوسته محافظ کمک میکند [۲۸].

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود در چرخه اول نورد به دلیل عدم توزیع کامل اجزا مقاومت به خوردگی کم است. در چرخه‌های بعدی، به دلیل توزیع یکنواخت مس و ذرات تقویت کننده و همچنین اثر سیکل‌های نورد، علی‌رغم وقوع خوردگی میکرو گالوانیک بین اجزا، به دلیل تشکیل پوسته پسیو آلومینیوم از خوردگی یکنواخت بر روی سطح مقطع TD جلوگیری می‌شود. پایین ترین چگالی جریان خوردگی کامپوزیت هیبریدی با ۷ چرخه با کمترین تخلخل و توزیع همگن ذرات WC و MoS₂ در زمینه آلومینیوم مرتبط است [۳۱]. این بدان معنی است که کامپوزیت هیبریدی تولید شده با ۷ چرخه بالاترین مقاومت و کامپوزیت هیبریدی تولید شده با ۳ چرخه کمترین مقاومت در برابر خوردگی را دارد. بالاترین مقاومت در برابر خوردگی کامپوزیت هیبریدی ۷ چرخه به کمترین تخلخل و توزیع همگن ذرات WC و MoS₂ در زمینه (شکل ۳) نسبت داده می شود [۲۸-۳۰].

شکل ۸ تصویر SEM سطح نمونه چرخه هفتم بعد از آزمون خوردگی را نشان می دهد. همچنین آنالیز EDX آن در شکل ۹ نشان داده شده



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از هفتمین چرخه نورد بعد از آزمون خوردگی



شکل ۱۰ - نمودار EDS از مون خوردگی هفتمین چرخه ARB

نتیجه گیری

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط دانشگاه صنعتی شیراز تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

انجام آزمایش‌ها: عباس کریمی؛
تحلیل داده‌ها و نتایج: عباس کریمی، مرتضی علیزاده،
نگارش نهایی: عباس کریمی، مرتضی علیزاده.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

۱- کامپوزیت هیبریدی Al/18Cu/3WC/3MoS₂ به طور موفقیت آمیز توسط روش ARB ساخته شد.

۲- ذرات تقویت‌کننده MoS₂ و WC به طور نسبتاً مناسب در زمینه آلومینیومی توزیع شد.

۳- به دلیل اختلاف شکل‌پذیری بین آلومینیوم و مس، در سیکل‌های اولیه، گردنی و پارگی در لایه‌های مس رخ می‌دهد و با ادامه فرآیند باعث توزیع مناسب جزیره‌های مس در زمینه آلومینیوم می‌شود.

۴- حضور فازهای تقویت‌کننده در زمینه آلومینیومی توسط آنالیز تفرق اشعه ایکس تایید شد.

۵- تغییر چرخه‌های ARB منجر به تغییر مقاومت به خوردگی کامپوزیت‌های تولیدی شد در حالی که کامپوزیت تولید شده در چرخه هفتم کمترین دانسیته جریان خوردگی را داشت.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

References

1. Alizadeh, M. and M.K. Dashtestaninejad, Development of Cu-matrix, Al/Mn-reinforced, multilayered composites by accumulative roll bonding (ARB). *Journal of Alloys and Compounds*, 2018. 732: p. 674-682.
2. Tsuji, N., Bulk nanostructured metals and alloys produced by accumulative roll-bonding, in *Nanostructured Metals and Alloys*. 2011, Elsevier. p. 40-58.
3. Tsuji, N., et al., ARB (Accumulative Roll-Bonding) and other new techniques to produce bulk ultrafine grained materials. *Advanced Engineering Materials*, 2003. 5(5): p. 338-344.
4. Alizadeh, M., Comparison of nanostructured Al/B₄C composite produced by ARB and Al/B₄C composite produced by RRB process. *Materials Science and Engineering: A*, 2010. 528(2): p. 578-582.
5. Eizadjou, M., et al., 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): p. 2003-2009.
6. Kumar, A., et al., Fabrication methods of metal matrix composites (MMCs). *Materials Today: Proceedings*, 2021. 46: p. 6840-6846.
7. Eizadjou, M., et al., Pitting corrosion susceptibility of ultrafine grains commercially pure aluminium produced by accumulative roll bonding process. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2012. 47(1): p. 19-24.
8. Naeini, M.F., M.H. Shariat, and M. Eizadjou, On the chloride-induced pitting of ultra fine grains 5052 aluminum alloy produced by accumulative roll bonding process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011. 509(14): p. 4696-4700.
9. Korchef, A. and A. Kahoul, Corrosion behavior of commercial aluminum alloy processed by equal channel angular pressing. *International Journal of Corrosion*, 2013. 2013(1): p. 983261.
10. Akiyama, E., et al., Effects of severe plastic deformation on the corrosion behavior of aluminum alloys. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2009. 13: p. 277-282.
11. Jamaati, R. and M.R. Toroghinejad, Manufacturing of high-strength aluminum/alumina composite by accumulative roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*, 2010. 527(16-17): p. 4146-4151.
12. Jamaati, R., et al., Investigation of nanostructured Al/Al₂O₃ composite produced by accumulative roll bonding process. *Materials & Design*, 2012. 35: p. 37-42.
13. Naseri, M., A. Hassani, and M. Tajally, An alternative method for manufacturing Al/B₄C/SiC hybrid composite strips by cross accumulative roll bonding (CARB) process. *Ceramics International*, 2015. 41(10): p. 13461-13469.
14. Shamanian, M., et al., Fabrication and characterization of Al-Al₂O₃-ZrC composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process. *Journal of alloys and compounds*, 2015. 618: p. 19-26.
15. Ahmadi, A., M.R. Toroghinejad, and A. Najafizadeh, Evaluation of microstructure and mechanical properties of Al/Al₂O₃/SiC hybrid composite fabricated by accumulative roll bonding process. *Materials & Design*, 2014. 53: p. 13-19.
16. Alizadeh, M. and M. Samiei, Fabrication of nanostructured Al/Cu/Mn metallic multilayer composites by accumulative roll bonding process and investigation of their mechanical properties. *Materials & Design (1980-2015)*, 2014. 56: p. 680-684.
17. Rezayat, M., A. Akbarzadeh, and A. Owhadi, Production of high strength Al-Al₂O₃ composite by accumulative roll

bonding. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012. 43(2): p. 261-267.

18.Karimi, M. and M.R. Toroghinejad, An alternative method for manufacturing high-strength CP Ti-SiC composites by accumulative roll bonding process. Materials & Design, 2014. 59: p. 494-501.

19.Jamaati, R., M. Naseri, and M.R. Toroghinejad, Wear behavior of nanostructured Al/Al₂O₃ composite fabricated via accumulative roll bonding (ARB) process. Materials & Design, 2014. 59: p. 540-549.

20.Liu, C., et al., Fabrication of Al/Al₃Mg₂ composite by vacuum annealing and accumulative roll-bonding process. Materials Science and Engineering: A, 2012. 558: p. 510-516.

21.Reihanian, M. and M. Naseri, An analytical approach for necking and fracture of hard layer during accumulative roll bonding (ARB) of metallic multilayer. Materials & Design, 2016. 89: p. 1213-1222.

22.Liu, C., et al., Microstructures and mechanical properties of Al/Zn composites prepared by accumulative roll bonding and heat treatment. Materials Science and Engineering: A, 2013. 580: p. 36-40.

23.Liu, C., et al., Evaluation of mechanical properties of 1060-Al reinforced with WC particles via warm accumulative roll bonding process. Materials & Design, 2013. 43: p. 367-372.

24.Liu, C., et al., Effect of W particles on the properties of accumulatively roll-bonded Al/W composites. Materials Science and Engineering: A, 2012. 547: p. 120-124.

25.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.

26.Kadkhodae, M., et al., Evaluation of corrosion properties of Al/nanosilica nanocomposite sheets produced by

accumulative roll bonding (ARB) process. Journal of Alloys and Compounds, 2013. 576: p. 66-71.

27.Darmiani, E., et al., Corrosion investigation of Al-SiC nano-composite fabricated by accumulative roll bonding (ARB) process. Journal of Alloys and Compounds, 2013. 552: p. 31-39.

28.Fattah-Alhosseini A, Naseri M, Alemi MH. Corrosion behavior assessment of finely dispersed and highly uniform Al/B₄C/SiC hybrid composite fabricated via accumulative roll bonding process. Journal of Manufacturing Processes. 2016 Apr 1;22:120-6.

29.Malmir N, Alizadeh M, Pashangeh S, Moghaddam AO. Structural characteristics and corrosion properties of Cu/Sn-Pb composite produced by accumulative roll bonding process. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2024 Jun 7;24(3):170.

30.Esmaeil Zadeh M, Ghalandari L, Sani R, Jafari E. Microstructural Evaluation, Mechanical Properties, and Corrosion Behavior of the Al/Cu/Brass Multilayered Composite Produced by the ARB Process. Metals and Materials International. 2024 Apr;30(4):1123-44.

۳۱- احمدساعتچی و همکاران، استفاده از روشی نوین جهت بررسی خوردگی موضعی آلیاژهای آلومینیوم، ۲۰۲۴، ۷۵-۷۰ و ۶۰۶۱ در محیطهای شبه اتمسفر دریایی، مجله مواد نوین، جلد ۴، شماره ۱.