



ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت چندلایه‌ای AA2024/AA7072/AA2024 فرآوری شده به روش نورد تجمعی

حسن ابراهیمی باویلی^۱، مهدی شaban غازانی^۲، علی فردی ایلخچی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه بناب، بناب، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: Ali.fardi@ubonab.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۳ فروردین ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۳ مرداد ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

کامپوزیت چندلایه

نورد تجمعی

ریزساختار

خواص مکانیکی

تغییر شکل پلاستیک شدید

چکیده

در مطالعه حاضر، کامپوزیت چندلایه AA2024/AA7072/AA2024 از طریق فرایند اتصال نوردی تجمعی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تولید و خواص مکانیکی آن بعد از پاس‌های مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید در دمای محیط ارزیابی شد. مشاهده شد که بعد از اولین مرحله نورد تجمعی، همه لایه‌ها یکنواخت و پیوسته هستند؛ اما پس از مرحله چهارم نورد تجمعی، در لایه‌های AA7072 به تدریج گلوبی ایجاد شده و با ادامه تغییر شکل تا سیکل ششم به دلیل شکل‌پذیری پایین‌تر به قطعات کوچک تقسیم می‌شوند. پس از هفتمین مرحله از تغییر شکل به روش نورد تجمعی، لایه‌های شکسته شده AA7072 به صورت غیر یکنواخت در زمینه AA2024 توزیع می‌شوند. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای مشاهده تحولات ریزساختاری و مکانیسم شکست انجام شد. همچنین خواص مکانیکی کامپوزیت حاصل با استفاده از آزمایش کشش و اندازه‌گیری سختی لایه‌ها ارزیابی شد. مشاهده شد که سختی و استحکام کششی با افزایش تعداد پاس‌های نورد تجمعی بهبود می‌یابد. حداکثر استحکام کششی در حدود ۳۸۹ مگاپاسکال و بعد از ۷ مرحله نورد تجمعی با کاهش سطح مقطع ۵۰ درصد به دست آمد.

Microstructure and mechanical properties of AA 2024/AA 7072/AA 2024 multilayer composites prepared by accumulative roll bonding

Hasan Ebrahimi Bavili¹, Mehdi Shaban Ghazani², Ali Fardi Ilkhchy^{2*}

1- MSc Graduate, Department of Materials Science Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2- Faculty Member, Department of Materials Science Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

* Corresponding Author's Email: Ali.fardi@ubonab.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 1 April 2024

Accepted: 13 August 2024

Keywords:

Multilayer Composite
Accumulative Roll Bonding
Microstructure
Mechanical Properties
Severe Plastic Deformation

Abstract

In the present study, the AA 2024/AA 7072/AA 2024 multilayer composite was fabricated through an accumulative roll bonding process at 250°C. The resultant mechanical properties were evaluated after different deformation cycles at ambient temperature. It was observed that all layers were uniform and continuous during the first cycle of accumulative roll bonding. Still, after the 4th ARB cycle, AA 7072 layers were gradually necked and separated into small fragments with continuous deformation up to the 6th cycle due to lower formability compared with AA 2024 layers. After the 7th deformation cycle of ARB processing, AA 7072 fragments were distributed non-uniformly in the AA 2024 matrix. In addition, fractography analysis was conducted using scanning electron microscopy (SEM) to observe the microstructure evolution and the fracture mechanism. Also, the mechanical properties were evaluated by tensile testing and micro-hardness measurements. It was observed that hardness and tensile strength improve with increasing accumulative roll bonding cycles. Maximum tensile strength of about 389MPa was obtained after 7 cycles of accumulative roll bonding.

Please cite this article using:

Ebrahimi Bavili H, Shaban Ghazani M, Fardi Ilkhchy A. Microstructure and mechanical properties of AA 2024/AA 7072/AA 2024 multilayer composites prepared by accumulative roll bonding. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jun 21;11(4):72-86. doi: 10.22034/IJME.2024.450513.1942 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی را می‌توان از طریق فرایندهای حالت جامد و مذاب و همچنین فرایندهای گازی تولید کرد [۱]. در روش‌های فرآوری حالت مایع، ذرات تقویت‌کننده به مذاب فاز زمینه اضافه می‌شوند و برای اطمینان از توزیع تقریباً یکنواخت ذرات در زمینه از هم زدن مذاب استفاده می‌شود [۲]. مهم‌ترین عیب روش‌های تولید حالت مذاب، دشواری دستیابی به توزیع یکنواخت ذرات در زمینه و ایجاد زمینه‌ای با ریزساختار یکنواخت است. علاوه بر این، برهم‌کنش‌های سطحی می‌تواند بین فاز زمینه و تقویت‌کننده رخ دهد که این امر می‌تواند برای خواص مکانیکی کامپوزیت فرآوری شده با روش‌های حالت مذاب مضر باشد [۳]. روش‌های حالت جامد نیز توسط محققان برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی ارائه شده‌اند. متداول‌ترین روش در بین فرایندهای حالت جامد مبتنی بر متالورژی پودر است. روش‌هایی مانند آهنگری و تفجوشی [۴]، اکستروژن و تفجوشی [۵] و پرس و تفجوشی [۶] نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. روش‌های فرآوری حالت جامد برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات با خواص مکانیکی بهبود یافته استفاده می‌شود. اتصال نوردی تجمعی (ARB)^۱ یکی از مؤثرترین و آسان‌ترین روش‌های فرآوری حالت جامد است که قادر به تولید کامپوزیت‌های زمینه‌ای نانساختار با اندازه دانه‌های کمتر از ۱۰۰ نانومتر است [۷]. این روش یکی از فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید ورق‌های نانساختار از طریق اتصال مکرر دو ورق درشت‌دانه اولیه است [۸]. در مورد نورد تجمعی، ساختار دانه‌ای کشیده شده در سطوح کرنش پایین تشکیل می‌شود که منجر به ایجاد ریزساختار لایه‌ای می‌شود. در سطوح کرنش متوسط، مرزهای زاویه کوچک با اعمال کرنش مداوم به مرزهای زاویه بزرگ تبدیل می‌شوند. ریزدانه شدن در کرنش‌های بالا اتفاق می‌افتد [۹]؛ بنابراین، کاهش اندازه دانه‌های ریزساختار یکی از مهم‌ترین عواملی است که تأثیر زیادی بر خواص مکانیکی ورق‌های تولیدشده به روش نورد تجمعی دارد. بهبود قابل توجه خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه فلزی فرآوری شده به روش نورد تجمعی و نسبت استحکام به وزن بالا در مقایسه با سایر روش‌ها منجر به افزایش چشمگیر تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی نانساختار با این روش می‌شود [۱۰]. در این میان، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی سال‌ها است که در حال توسعه بوده و در صنایع مختلف به‌کاربرده می‌شوند [۱۱]. به‌عنوان مثال می‌توان به کاربرد این کامپوزیت‌ها در صنعت خودروسازی و هوافضا اشاره کرد. علاوه بر این، تعداد زیادی از انواع مختلف تقویت‌کننده با درصد‌های متفاوت برای ساخت این کامپوزیت‌ها استفاده شده است [۱۲]. در سال‌های اخیر برای تولید مواد کامپوزیتی چندلایه زمینه آلومینیومی مانند [13] Al/Mg, Al/Zn و [۱۴] Cu/Ni [۱۵] از نورد تجمعی استفاده شده است. در بین آلیاژهای مختلف آلومینیوم، آلیاژ AA 2XXX در تولید قطعات مورد استفاده در تجهیزات فضایی به‌کار برده می‌شود. در این راستا برای افزایش بیشتر استحکام این آلیاژ از ذرات تقویت‌کننده مانند کاربید سیلیسیم استفاده می‌شود [۱۶]؛ زیرا استحکام این آلیاژ نسبتاً پایین بوده ولی شکل‌پذیری خوبی دارد. از سوی دیگر، آلیاژ AA 7XXX اغلب استحکام بالاتری را به همراه شکل‌پذیری پایین نشان می‌دهند. بنابراین، ساخت کامپوزیت‌های چندلایه AA 7XXX/AA 2XXX با روش نورد تجمعی و ترکیب مزایای هر دو ماده برای بالا بردن استحکام می‌تواند جالب باشد. اگرچه تحقیقات متعددی در زمینه تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی انجام گرفته است ولی فرآوری کامپوزیت چندلایه AA 7XXX/AA 2XXX با استفاده از نورد تجمعی و ارزیابی خواص مکانیکی آن گزارش نشده است. به‌عنوان مثال در یک پژوهش تحولات ریزساختاری و خواص مکانیکی کامپوزیت چندلایه AA5083/AA2024 فرآوری شده به روش نورد تجمعی مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۷]. در این تحقیق فرآوری کامپوزیت نانساختار با اندازه دانه‌متوسط ۵۰۰ نانومتر با مطالعات ریزساختاری تأیید شد. همچنین نشان داده شده که چگالی نابعایی‌ها با افزایش پاس‌های تغییر شکل افزایش یافته و به یک مقدار ثابت میل می‌کند. در تحقیق دیگر ریزساختار و بافت تغییر شکل در کامپوزیت لایه‌ای AA5086/AA2219 تولیدشده به روش نورد تجمعی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۸]. نتایج این پژوهش نشان داد که غیریکنواختی تغییر شکل مابین لایه‌های مختلف در پاس چهارم باعث ناپایداری فصل مشترک بین لایه‌ها شده و در پاس هفتم و هشتم باعث شکست لایه‌ها در راستای گلوبی می‌شود. در مورد آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ نیز تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد با انجام نورد تجمعی در دمای اتاق می‌توان اندازه دانه‌ها را به کمتر از ۵۰۰ نانومتر کاهش داد [۱۹]. در تحقیق حاضر، کامپوزیت چندلایه AA2024/AA7072/AA2024 با فرایند نورد تجمعی و با لحاظ دمای پیش‌گرم ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تولید و خواص مکانیکی حاصل با روش‌های میکروسختی و آزمون کشش ارزیابی شد. از میکروسکوپ

¹ Accumulative Roll Bonding

الکترونی روبشی (SEM) نیز برای تجزیه و تحلیل سطوح شکست حاصل از آزمایش کشش استفاده شد. علاوه بر این، توزیع و پیکربندی لایه‌های مختلف کامپوزیت با استفاده از میکروسکوپ نوری پس از هر مرحله نورد تجمعی مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

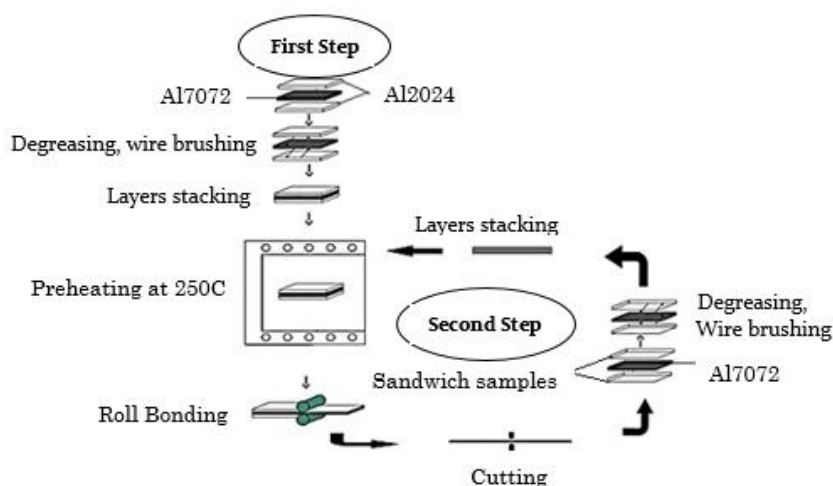
در تحقیق حاضر از دو آلیاژ آلومینیوم مختلف AA2024 و AA7072 برای تولید کامپوزیت چندلایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده در تحقیق

%	AA7072	AA2024
Al	98.094	93.212
As	0.019	0.017
Cr	0.027	0.029
Cu	0.025	3.962
Fe	0.279	0.388
Mg	0.043	1.286
Mn	0.082	0.493
Pb	0.04	0.026
Sb	0.034	0.02
Si	0.156	0.291
Sn	0.071	0.01
V	0.015	0.014
Zn	1.042	0

ورق‌های آلیاژی به مدت ۱ ساعت در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند تا ریزساختار کارسخت شده درست قبل از فرایند نورد تجمعی از بین برود. ابعاد اولیه ورق AA2024 که برای تهیه ساندویچ اولیه استفاده شد، برابر با $1 \times 50 \times 150$ میلی‌متر و ابعاد اولیه ورق AA7072 برابر با $2 \times 50 \times 150$ میلی‌متر انتخاب گردید. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، برای تهیه ساندویچ اولیه، دو ورق AA2024 و یک ورق آلیاژ AA7072 انتخاب شدند. دو طرف ورق AA7072 و یک طرف ورق AA2024 به مدت ۵ دقیقه در اسید نیتریک (۲۵ Vol.%) چربی‌زدایی و سپس برس زده شد. پس از فرایند برس‌کاری، ورق AA7072 بین دو ورق AA2024 آماده شده به‌گونه‌ای قرار داده شد که سطوح آماده شده در تماس با یکدیگر قرار گیرند؛ سپس چهارگوشه ورق‌ها سوراخ و از سیم‌های فولادی برای بستن ساندویچ اولیه قبل از اتصال نوردی استفاده شد. بنابراین ابعاد ساندویچ اولیه برابر با $4 \times 50 \times 150$ میلی‌متر است. ساندویچ آماده شده به مدت ۵ دقیقه در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده و سپس بلافاصله با کاهش ضخامت ۵۰ درصدی نورد شد. عملیات آنیل در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد برای افزایش شکل‌پذیری و قابلیت نورد و همچنین افزایش چسبندگی بین لایه‌ها انجام شد. علت انتخاب دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به جای دماهای بالاتر مانند ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد این است که جلوی وقوع تبلور مجدد در ورق‌ها گرفته شود و از طرفی اگر دما پایین انتخاب شود (مانند ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) تاثیر چندانی در بهبود اتصال بین ورق‌ها ندارد. بنابراین در این تحقیق از بالاترین دمایی که تبلور مجدد اتفاق نیفتد، استفاده شده است. بعد از انجام اولین مرحله نورد با کاهش ضخامت ۵۰ درصدی ابعاد ساندویچ نورد شده برابر با $2 \times 50 \times 300$ میلی‌متر است. سپس، ورق یک‌تکه حاصل به دو نیمه بریده شد و یک طرف هر ورق دوباره برس‌کاری، چربی‌زدایی و در تماس با یکدیگر قرار گرفته و سپس دوباره در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده و بلافاصله با کاهش ضخامت ۵۰ درصدی نورد شد. کرنش پلاستیک معادل در هر پاس از نورد تجمعی حدود ۰/۸ است. فرایند نورد تجمعی به همراه آنیل بین مراحل نورد تا هفت پاس ادامه یافت. ابعاد ورق‌ها قبل از انجام نورد $4 \times 50 \times 150$ میلی‌متر است که بعد از انجام نورد با ۵۰ درصد کاهش ضخامت به $2 \times 50 \times 300$ میلی‌متر تغییر پیدا می‌کند. تمام نمونه‌های کامپوزیت چندلایه با استفاده از دستگاه نورد با قطر غلتک ۳۵۰ میلی‌متر و سرعت چرخش ۱۰ دور در دقیقه فرآوری شدند. برای مشاهده تحولات ریزساختاری نمونه‌های کامپوزیتی در ضخامت طولی و عرضی، از میکروسکوپ نوری Olympus PMG3 و میکروسکوپ الکترونی روبشی Cam Scan MV300 استفاده شد. برای آماده‌سازی نمونه‌های متالوگرافی، در ابتدا نمونه‌هایی از ورق نورد شده برداشته شد و این نمونه‌ها طوری مانده شدند که بتوان سطح مقطع عرضی را مورد بررسی قرار داد. در ابتدا سطح نمونه‌ها با

استفاده از سنباده‌هایی با شماره ۳۲۰ تا ۲۰۰۰ سنباده‌زنی شدند. سپس سطح نمونه‌ها با استفاده از سوسپانسیون پودر اکسید آلومینیوم با دانه‌بندی ۰/۳ میکرون پولیش شد. بعد از پولیش، سطح نمونه‌ها با استفاده از محلول ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۲ میلی‌لیتر اسید هیدروفلوریک اچ شد. برای ارزیابی خواص مکانیکی، آزمایش‌های کشش بر روی نمونه‌های کششی که موازی با جهت نورد و در راستای عرضی ورق‌ها تهیه شده بودند، مطابق با استاندارد JIS Z2201 انجام شد. آزمون کشش با دستگاه کشش Zwick/Roell Z010 و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. سطوح شکست نمونه‌های کششی با استفاده از مشاهدات SEM مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری سختی برینل بر روی سطح بالایی ورق‌های چندلایه با استفاده از سختی سنج مدل ESEWAY انجام شد. ریز سختی ویکرز نمونه‌های فرآوری شده بعد از پاس‌های مختلف نورد تجمعی بر طبق استاندارد E 384، در امتداد جهت نورد و جهت عرضی و با اعمال بار ۱۰۰ گرم اندازه‌گیری شد.



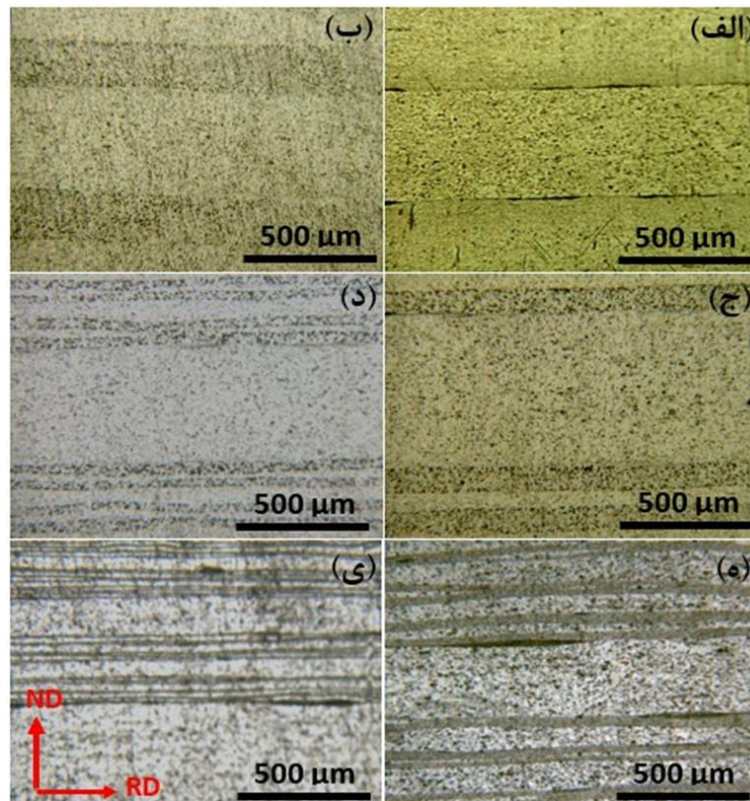
شکل ۱ فرایند نورد تجمعی مورد استفاده در تولید کامپوزیت‌ها

۳- نتایج و بحث

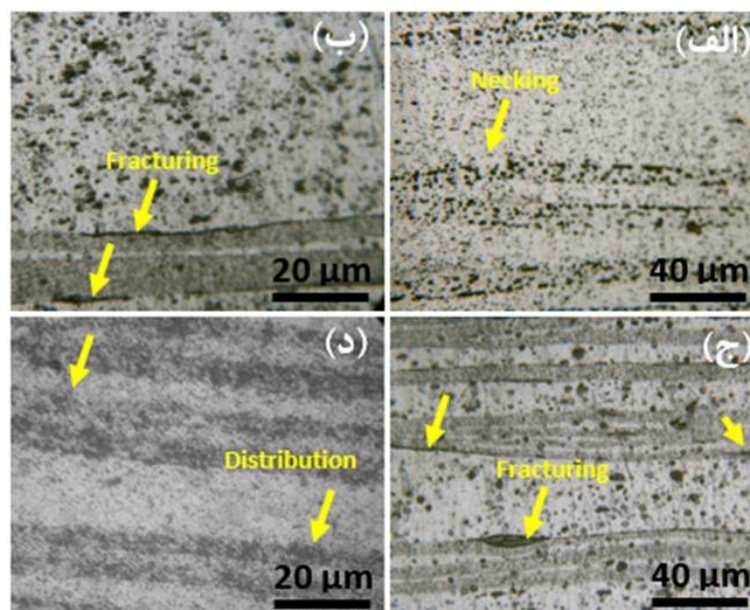
۳-۱- بررسی‌های ریزساختاری

تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار کامپوزیت چندلایه فرآوری شده پس از پاس‌های مختلف نورد تجمعی در شکل ۲ نشان داده شده است. ضخامت اولیه ورق‌های AA2024 و AA7072 به ترتیب ۱ و ۲ میلی‌متر است. تصاویر ریزساختاری پس از پاس‌های دوم و سوم نورد تجمعی در شکل ۲-ب و شکل ۲-ج نشان داده شده است که به ترتیب مربوط به کاهش ضخامت ۶۵٪ و ۶۱٪ می‌باشند. شکل ۲-د ریزساختار پس از پاس چهارم را نشان می‌دهد که در آن کاهش ضخامت ۵۹ درصدی نسبت به پاس قبلی حاصل می‌شود. پس از ۴ پاس، گلوبی در لایه‌های آلیاژ AA7072 رخ می‌دهد. همچنین کاهش ضخامت در لایه‌های AA2024، به دلیل استحکام تسلیم پایین‌تر، بیشتر از لایه‌های AA7072 است. این مشاهدات در توافق با کارهای مشابه انجام گرفته توسط محققین است [۲۰]. محققین نشان داده‌اند که در پاس‌های اولیه نورد تجمعی کاهش ضخامت در لایه‌هایی که شکل‌پذیری بالاتری دارند بیشتر است. به‌عنوان مثال در کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم-منیزیم که توسط نورد تجمعی فرآوری می‌شوند، مشاهده شد ضخامت لایه‌های آلومینیوم بیشتر از منیزیم کاهش می‌یابد [۲۰]. علاوه بر این، مشاهده شد که لایه‌های کامپوزیت در پاس‌های اولیه یکنواخت و پیوسته هستند ($n < 4$)، اما افزایش تغییر شکل منجر به تشکیل باندهای برشی و تغییر شکل غیریکنواخت می‌شود. همان‌طور که مشاهده شد تا ۴ پاس، شکل اولیه لایه‌های AA2024 و AA7072 حفظ شده و این لایه‌ها در جهت نورد کشیده می‌شوند اما بدون هیچ‌گونه تکه‌تکه شدن به‌صورت پیوسته باقی می‌مانند. شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری با وضوح بالا را نشان می‌دهد که از مقطع عرضی کامپوزیت نورد شده پس از پاس‌های ۴ تا ۷ گرفته شده است. پس از ۴ و ۵ مرحله از فرایند تغییر شکل، لایه‌های AA7072 به دلیل شکل‌پذیری کمتر در مقایسه با آلیاژ AA2024، تکه‌تکه شده‌اند (شکل ۳-الف و ۳-ب). پس از پاس هفتم، لایه‌های تکه‌تکه شده AA7072 به‌طور غیریکنواخت در زمینه آلیاژ AA2024 توزیع شده‌اند (شکل ۳-د). فاز زمینه نرم‌تر (AA2024) به میزان تغییر شکل پلاستیک بیشتری

نیاز دارد تا با تغییر شکل لایه‌های سخت آلیاژ AA7072 سازگار شود. بنابراین، تغییر شکل پلاستیک در لایه‌های AA2024 متمرکز می‌شود. همان‌طور که توسط مطالعات قبلی نشان داده شده است، تفاوت رفتار کارسختی دو فلز مختلف در طول تغییر شکل پلاستیک منجر به ناپایداری می‌شود. بنابراین، با افزایش کرنش پلاستیک وارد شده به مواد، به دلیل چنین ناپایداری‌هایی، گلویی و شکستگی در لایه‌های سخت‌تر ظاهر می‌شوند [۲۵].

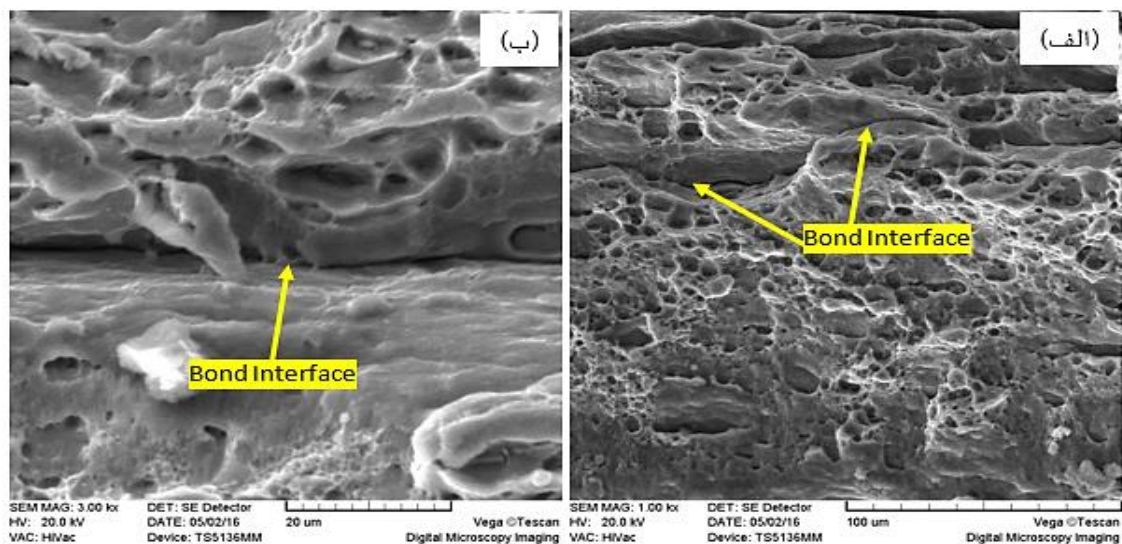


شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ نوری تهیه شده از مقطع عرضی کامپوزیت بعد از پاس‌های مختلف نورد تجمعی: الف) پاس اول، ب) پاس دوم، ج) پاس سوم، د) پاس چهارم، ه) پاس پنجم و ی) پاس ششم



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی با بزرگنمایی بالا از ریزساختار کامپوزیت بعد از پاس‌های مختلف نورد تجمعی: الف) ۴ پاس، ب) ۵ پاس، ج) ۶ پاس، د) ۷ پاس

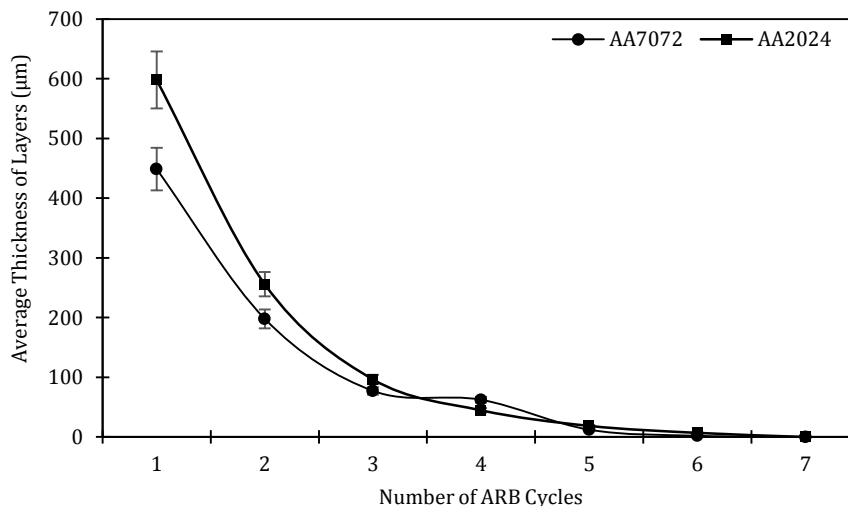
به‌هرحال، از مطالعه حاضر می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تغییر شکل پلاستیک موضعی، لایه نرم‌تر مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل از خود نشان می‌دهد؛ همچنین در اطراف لایه‌های سخت‌تر، ماده کار سخت می‌شود. بنابراین در لایه‌های سخت (AA7072) به دلیل شکل‌پذیری کمتر، گلوبی مشاهده می‌شود. به‌طور مشابه محققین نشان داده‌اند که در کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم-مس که با نورد تجمعی فرآوری می‌شوند، با افزایش پاس‌های تغییر شکل لایه‌های مس که شکل‌پذیری کمتری نسبت به لایه‌های آلومینیوم دارند به تدریج شکسته شده و در زمینه آلومینیوم که نرم‌تر است پراکنده می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر فلز نرم‌تر زمینه را تشکیل می‌دهد [۲۱]. تصاویر میکروسکوپ نوری از ساختار کامپوزیت لایه‌ای AA2024/AA7072 (شکل ۳) نیز بیانگر وقوع ناپایداری تغییر شکل در لایه‌های AA7072 است که با نتایج محققان همخوانی دارد. به‌طور کلی، آلیاژهای آلومینیوم دارای چقرمگی شکست بالایی هستند و به دلیل سیستم‌های لغزش کافی می‌توانند در برابر تغییر شکل‌های بالا مقاومت کنند. بنابراین، ترک به‌سختی در فصل مشترک بین دو لایه مشاهده می‌شود. از آنجایی که لایه‌های مختلف در این نمونه تا پاس ۷ نورد تجمعی به‌صورت پیوسته باقی می‌مانند و هیچ نشانه‌ای از خرد شدن یک لایه و پخش شدن آن در زمینه لایه دیگر وجود ندارد، ورق به‌دست آمده یک ساندویچ پنل چند لایه می‌باشد. در شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع کامپوزیت‌ها پس از پاس‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی کامپوزیت‌های فرآوری شده بعد از الف) ۶ مرحله و ب) ۷ مرحله نورد تجمعی

همان‌طور که مشاهده شد، دو لایه کاملاً به هم چسبیده‌اند و ترک‌هایی در این نواحی ایجاد نشده است. مکانیسم اصلی اتصال لایه‌ها در دماهای پایین مکانیسم فیلم است. بر اساس این مکانیسم، لایه اکسیدی تشکیل‌شده در سطح هر لایه تحت تنش‌های موضعی شکسته می‌شود و فلز زیر لایه بین ترک‌ها اکسترود شده و با مواد تازه لایه دیگر محصور می‌شود. میزان تغییر شکل لایه‌های مختلف از طریق اندازه‌گیری ضخامت هر لایه پس از پاس‌های مختلف ارزیابی می‌شود. نتایج این اندازه‌گیری‌ها برای لایه‌های AA2024 و AA7072 در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، ضخامت لایه‌ها در طی پاس‌های اولیه به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد، اما کاهش ضخامت آن‌ها در پاس‌های بعدی در اثر کاهش شکل‌پذیری و کارسختی لایه‌ها در اثر تغییر شکل محدود می‌شود. نتایج مشابهی توسط محققین در این مورد ارائه شده است. به‌عنوان مثال در مورد کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم - منیزیم فرآوری‌شده به روش نورد تجمعی مشاهده شده است که ضخامت لایه‌ها با افزایش تعداد گام‌ها به تدریج کاهش پیدا می‌کند. همچنین نتایج تحقیقات نشان داد که سرعت کاهش ضخامت در لایه نرم‌تر (آلومینیوم) بیشتر از لایه سخت‌تر (منیزیم) است [۲۲]. با بررسی شکل ۵ نیز می‌توان به این نتیجه رسید سرعت کاهش ضخامت لایه‌های AA2024 بیشتر از AA7072 است. در مورد مقایسه فرایند نورد تجمعی به‌همراه پیش‌گرم در بین پاس‌های تغییر شکل، با فرایند نورد تجمعی در دمای محیط می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. در نورد تجمعی در دمای محیط، ورق بدون پیش‌گرم تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد. از آنجایی که در دمای محیط بازایی و تبلور مجدد

در نمونه اتفاق نمی‌افتد، دانه‌های ریزساختار فلز در جهت نورد کشیده می‌شوند و چگالی نابجایی‌ها و عیوب شبکه‌ای افزایش می‌یابد. ولی زمانی که مابین پاس‌های نورد، آنیل انجام شود یک سری تغییرات ریزساختاری در نمونه اتفاق می‌افتد که باعث نرم شدن فلز و کاهش چگالی عیوب می‌شود. اگر دمای پیش‌گرم بیشتر از نصف دمای ذوب باشد، تبلور مجدد اتفاق می‌افتد و در نتیجه آن دانه‌های هم‌محور و بدون نابجایی از زمینه دانه‌های تغییرشکل یافته جوانه زده و رشد می‌کنند. در اثر وقوع تبلور مجدد، سختی و استحکام کاهش یافته و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر اگرچه آنیل مابین پاس‌های تغییرشکل انجام گرفته ولی دمای آنیل پایین‌تر از نصف دمای ذوب است. بنابراین در حین آنیل، تبلور مجدد اتفاق نمی‌افتد ولی بازایی در ساختار نابجایی‌ها صورت می‌گیرد. در اثر وقوع بازایی، چگالی نابجایی‌ها در داخل دانه‌ها کاهش یافته و یک مقداری افت در سختی اتفاق می‌افتد.

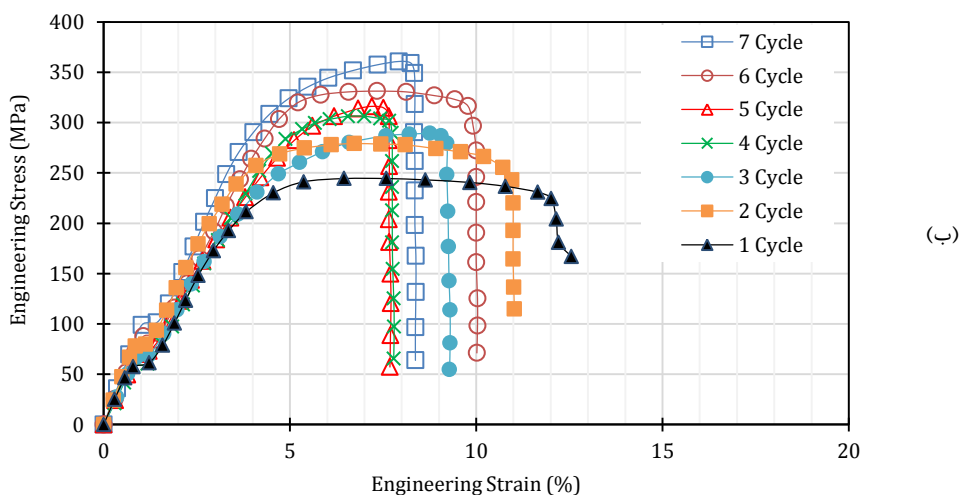
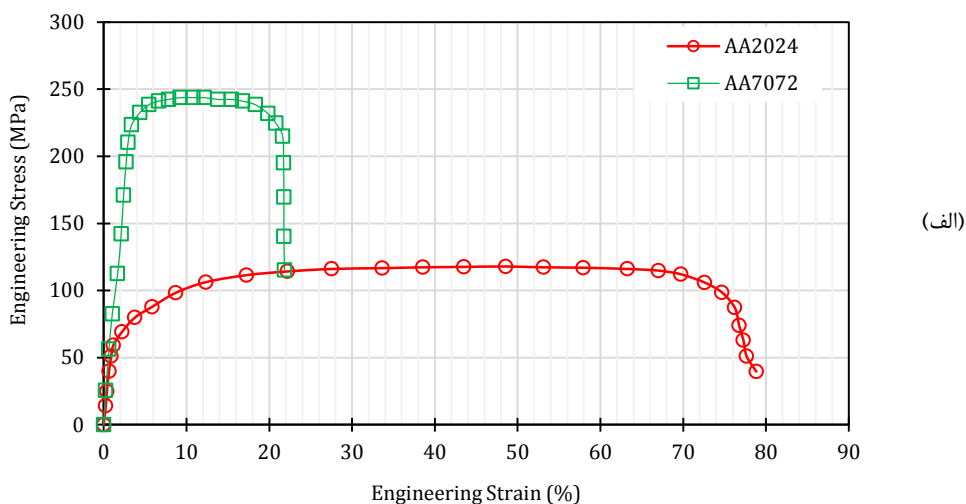


شکل ۵ ضخامت لایه‌های AA2024 و AA7072 بعد از پاس‌های مختلف نورد تجمعی

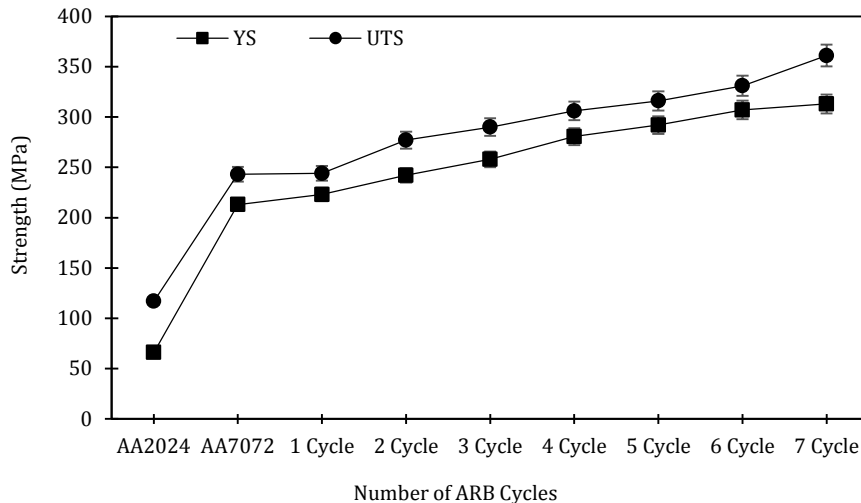
۳-۲- خواص مکانیکی

شکل ۶ منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی کامپوزیت چندلایه را پس از پاس‌های مختلف نورد تجمعی نشان می‌دهد که از طریق آزمون کشش به دست آمده‌اند. علاوه بر این، تغییرات استحکام شکست و استحکام تسلیم با پاس‌های نورد تجمعی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده شد، ظاهر منحنی‌های تنش-کرنش بعد از پاس‌های مختلف یکسان است؛ به طوری که سطح تنش در کرنش‌های پایین به سرعت افزایش یافته و به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد و سپس به آرامی تا تنش شکست نهایی کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشخص است، مکانیسم‌های استحکام‌بخشی مختلفی در حین تغییر شکل پلاستیک مواد رخ می‌دهد. در مراحل اولیه تغییر شکل پلاستیک، تجمع نابجایی‌ها و تشکیل ساختار دانه‌های فرعی جدید باعث استحکام‌بخشی مواد از طریق کارسختی می‌شود. با اعمال کرنش‌های پلاستیک بالا، همان‌طور که در روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید مشاهده می‌شود، زاویه عدم تطابق بین دانه‌ها افزایش یافته و ساختاری با دانه‌بندی فوق‌العاده ریز به دست می‌آید که به نوبه خود منجر به بهبود استحکام می‌شود [۱]. مکانیسم استحکام‌بخشی دیگر در مواد کامپوزیتی، نقش تقویت‌کنندگی لایه‌های سخت‌تر است [۱۷]. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده شد، استحکام کششی کامپوزیت ساخته شده با افزایش تعداد پاس‌های تغییر شکل افزایش می‌یابد. این به دلیل تأثیر دو عامل مهم است: ریزدانه شدن ساختار که در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید و اثر تقویتی ساختار چندلایه ایجاد می‌شود. استحکام‌بخشی در اثر تغییر شکل شدید پلاستیک دو جنبه متفاوت دارد. در سطوح کرنش پایین‌تر که متناظر با پاس‌های اولیه نورد تجمعی است، زمانی که دانه‌های درشت وجود دارد، کرنش سختی به دلیل تولید و تکثیر نابجایی‌ها مکانیسم تقویت‌کننده غالب است. با افزایش پاس‌های نورد تجمعی، مکانیسم ریزدانه شدن منجر به تشکیل ساختاری با دانه‌بندی فوق‌العاده ریز و بنابراین اثر لغزش مرز دانه بارزتر می‌شود. بنابراین، در پاس‌های اولیه، چگالی نابجایی به سرعت افزایش می‌یابد و کارسخت شدن منجر به افزایش استحکام کششی می‌شود؛ اما در سطوح کرنش بالا مکانیسم‌های مرزدانه‌ای عمل می‌کنند. در پژوهش حاضر، اثر تقویتی AA7072 در زمینه AA2024 نیز در تقویت

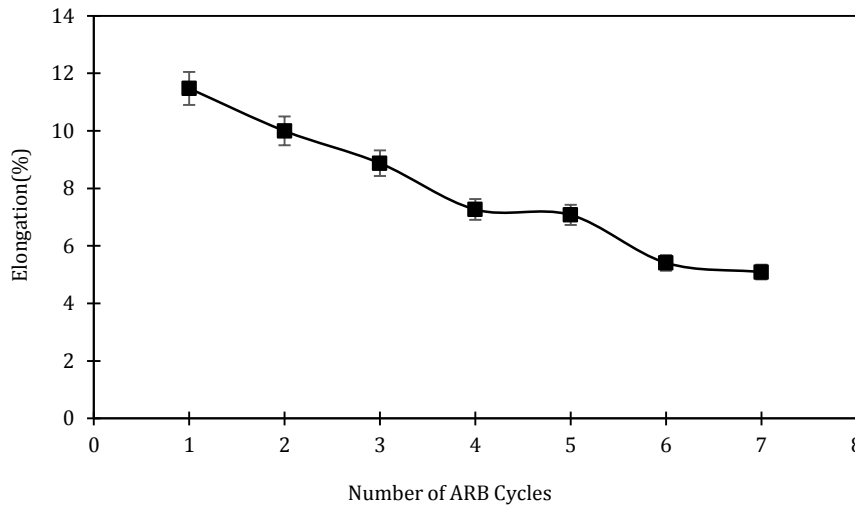
کامپوزیت ساخته شده نقش دارد. بررسی شکل ۷ نشان داد که استحکام کامپوزیت چندلایه پس از پاس اول به دلیل اثر کارسخت شدن در مقایسه با استحکام آلیاژهای AA2024 و AA7072 افزایش یافته است. همچنین در پاس‌های تغییر شکل بالاتر، اثر تقویتی قطعات AA7072 منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌شود. استحکام کششی پس از ۷ مرحله نورد تجمعی ۳/۳۲ برابر بیشتر از استحکام AA2021 و ۱/۶ برابر بیشتر از استحکام آلیاژ AA7072 است. نتایج مشابهی در مورد روند تغییرات استحکام در کامپوزیت Al-Mg توسط محققین ارائه شده است [۲۲]. بررسی تحقیقات انجام گرفته در مورد خواص مکانیکی کامپوزیت‌های چندلایه فرآوری شده توسط نورد تجمعی نشان می‌دهد در پاس‌های ابتدایی نورد تجمعی استحکام کششی کامپوزیت‌ها به سرعت افزایش می‌یابد که مهم‌ترین دلیل این افزایش کارسختی فلز بیان شده است. با افزایش تعداد پاس‌های نورد تجمعی نرخ افزایش استحکام به تدریج کاهش می‌یابد که این به دلیل رسیدن چگالی نابجایی‌ها به یک حد اشباع و فعال شدن مکانیسم‌های استحکام دهی دیگر مانند ریزدانه شدن است [۲۳ و ۲]. همچنین مشاهده شد که درصد ازدیاد طول کامپوزیت چندلایه با افزایش پاس‌های نورد تجمعی به شدت کاهش می‌یابد (شکل ۸). به طوری که درصد ازدیاد طول کامپوزیت فرآوری شده پس از ۷ پاس نورد تجمعی به ۵/۲ درصد می‌رسد. داکتیلیته پایین در نمونه‌های کامپوزیت لایه‌ای که به وسیله نورد تجمعی فرآوری شده‌اند به دلیل کارسختی لایه‌های کامپوزیت، توزیع غیریکنواخت لایه‌های شکسته شده فاز استحکام‌بخش در فاز زمینه و همچنین عدم چسبندگی بین لایه‌ها است [۲۴]. در شکل ۳ این عدم چسبندگی بین لایه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۶ الف) منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی ورق‌های اولیه و ب) کامپوزیت‌های فرآوری شده بعد از پاس‌های مختلف نورد تجمعی



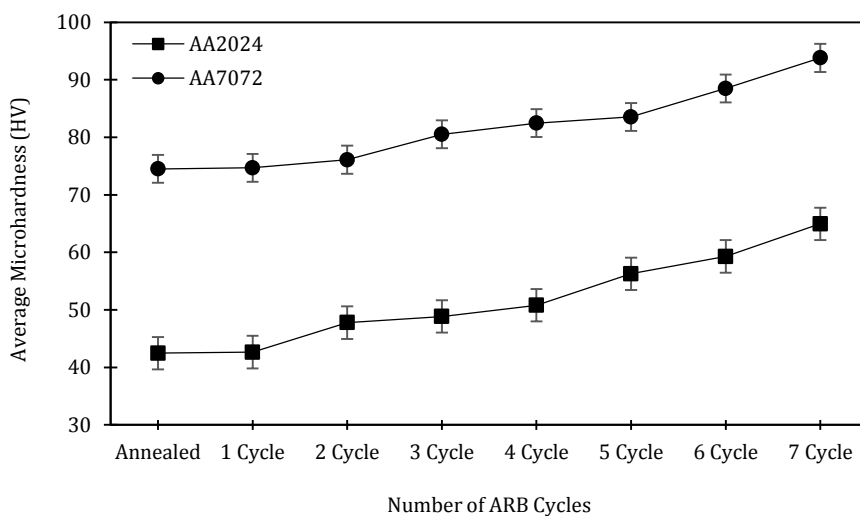
شکل ۷ تغییرات استحکام کششی و استحکام تسلیم کامپوزیت‌های فرآوری شده به صورت تابعی از تعداد پاس‌های نورد تجمعی



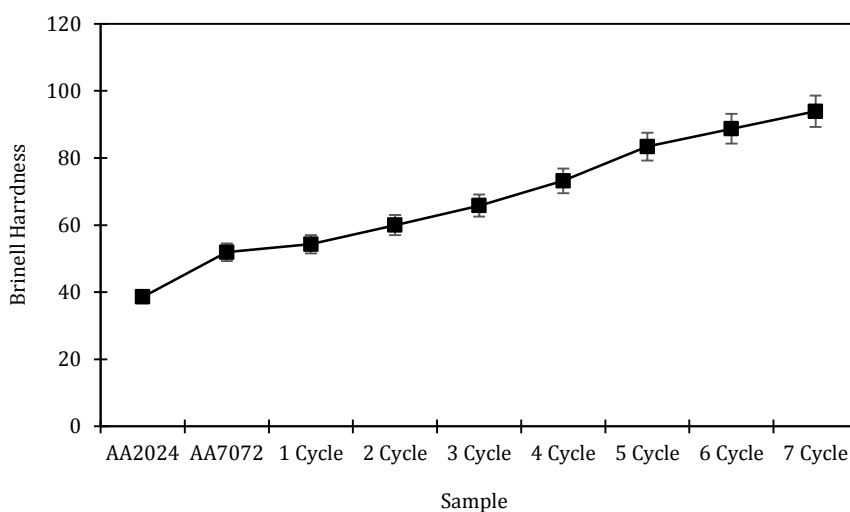
شکل ۸ درصد ازدیاد طول کامپوزیت‌های فرآوری شده به صورت تابعی از تعداد پاس‌های نورد تجمعی

شکل ۹ مقادیر سختی لایه‌های AA2024 و AA7075 را پس از پاس‌های مختلف تغییر شکل نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده شد، ریز سختی هر لایه با افزایش پاس‌های نورد تجمعی افزایش می‌یابد. ریزسختی لایه‌های AA2024 از ۴۲/۴۵ به ۶۴/۴ و ویکرز و برای لایه‌های AA7072 از ۷۵ به ۹۴ ویکرز پس از اعمال ۷ مرحله نورد تجمعی افزایش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی لایه‌های AA7072 بیشتر از سختی AA2024 در هر مرحله از تغییر شکل است، اما روند تغییرات ریزسختی در این لایه‌ها یکسان است. همچنین مشاهده شد که ریزسختی لایه‌های AA2024 و AA7072 به‌طور مداوم با افزایش پاس‌های فرایند نورد تجمعی افزایش می‌یابد. از طرفی چگالی نابجایی‌ها پس از چندین پاس به مقدار اشباع می‌رسد و اشباع در سختی اندازه‌گیری شده در هر لایه به دلیل تعادل دینامیکی بین تولید و حذف نابجایی‌ها است. افزایش مقادیر سختی لایه‌های AA2024 و AA7072 در پاس‌های آخر به دلیل ریزدانه شدن است که در کرنش‌های اعمالی بالاتر اتفاق می‌افتد. شکل ۱۰ تغییرات مقادیر سختی ماکرو را با پاس‌های نورد تجمعی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده شد، ماکرو سختی کامپوزیت چندلایه با افزایش پاس‌های تغییر شکل به دلیل اثر کارسختی افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات انجام گرفته در این زمینه نیز تأیید کننده نتایج به‌دست آمده در این پژوهش است. به‌عنوان مثال در یک تحقیق که کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم و نیکل به‌وسیله نورد تجمعی فرآوری شده است، مشاهده شد با افزایش تعداد پاس‌های تغییر شکل، سختی لایه‌های نیکل و مس از مقدار اولیه ۲۸ و ۷۱ ویکرز تا ۸۶ و ۱۴۱ ویکرز به ترتیب برای لایه‌های آلومینیوم و مس

افزایش پیدا می‌کند [۲۵]. تحقیقات نشان‌دهنده افزایش سریع سختی در پاس‌های ابتدایی نورد تجمعی است که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد [۲۴].



شکل ۹ تغییرات میکروسختی لایه‌های مختلف کامپوزیت فرآوری شده به صورت تابعی از تعداد پاس‌های نورد تجمعی

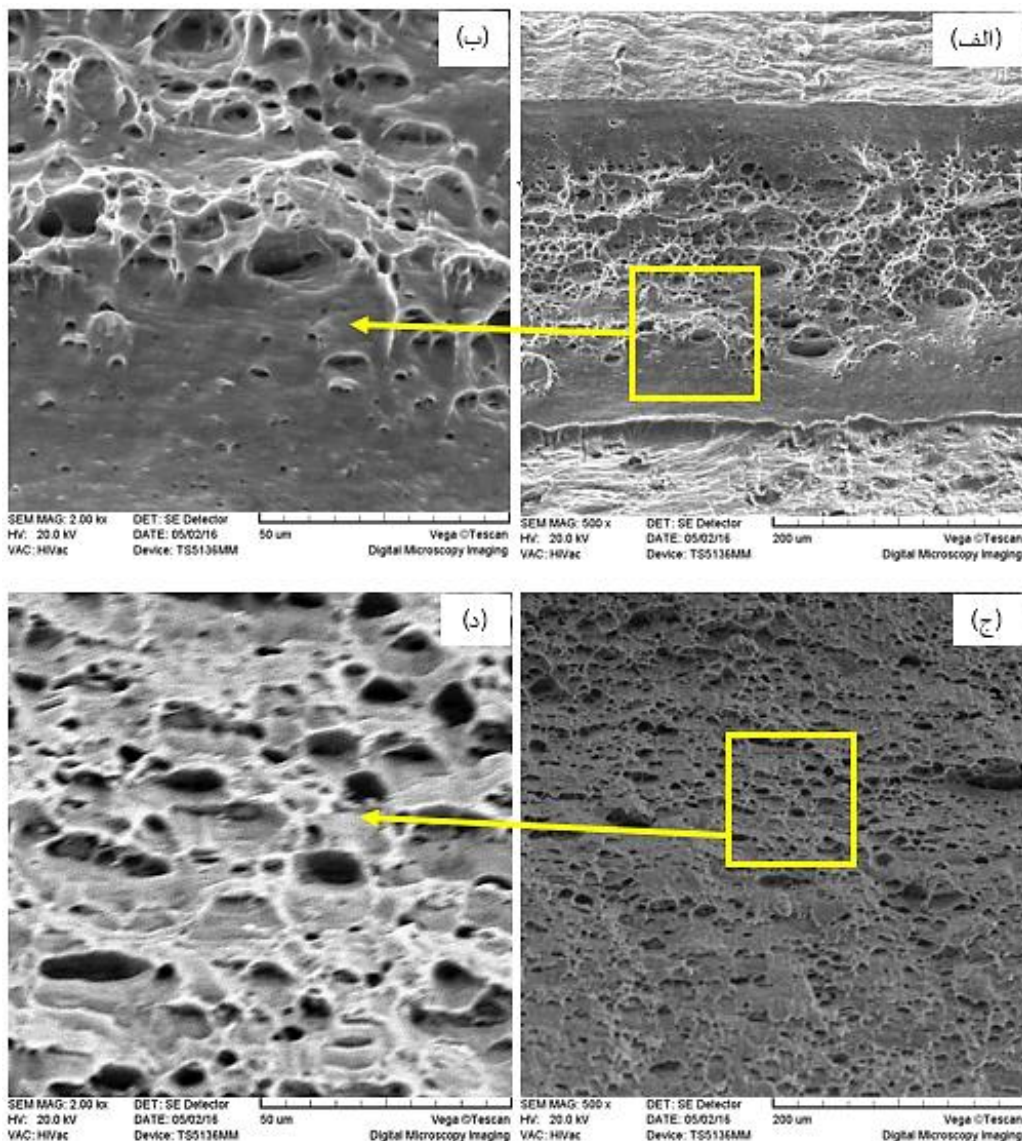


شکل ۱۰ تغییرات سختی برینل در سطح بیرونی کامپوزیت فرآوری شده به صورت تابعی از تعداد پاس‌های نورد تجمعی

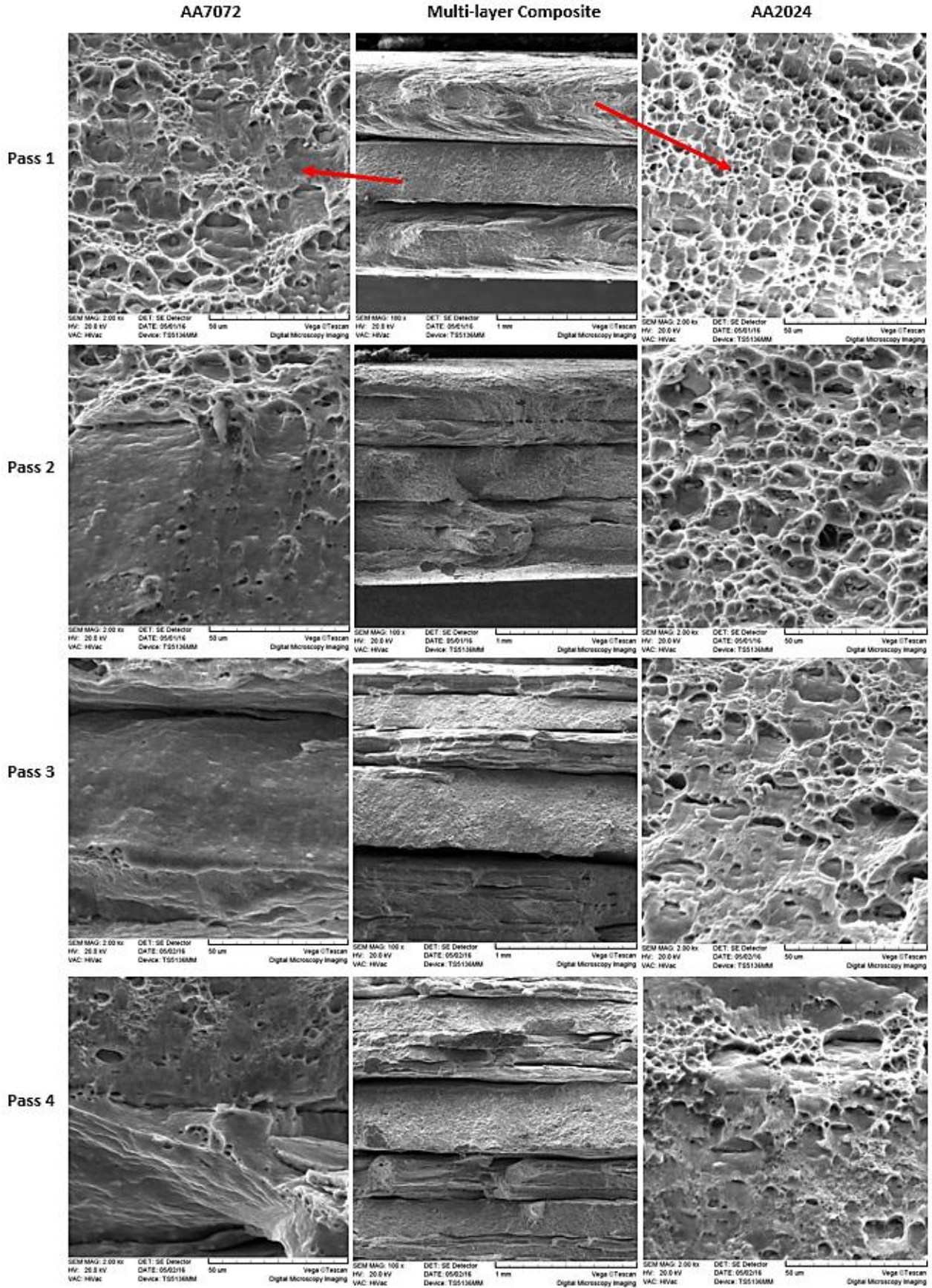
۳-۳- شکست نگاری

برای تعیین مکانیسم‌های شکست در کامپوزیت AA2024/AA7072 فرآوری شده به روش نورد تجمعی، از شکست نگاری با میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. شکل ۱۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست AA2024 و AA7072 را پس از آزمایش کشش در دمای اتاق را نشان داد. همان‌طور که مشاهده شد، شکست نرم مکانیسم اصلی شکست در هر دو آلیاژ AA2024 و AA7072 است. بنابراین گودی عمیق در سطح شکست لایه AA2024 مشاهده شد اما گودی کم‌عمق در AA7072 مشهود است که نشان‌دهنده وقوع شکستگی نرم‌تر است. شکل ۱۲ سطح شکست لایه‌های کامپوزیت AA2024 و AA7072 را در نمونه‌های کشش ساخته شده از کامپوزیت فرآوری شده با پاس‌های مختلف نورد تجمعی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مکانیسم اصلی شکست ایجاد و به هم پیوستن حفره‌های ریز است. در سیکل‌های اول تعداد و عمق گودی‌ها بیشتر است که

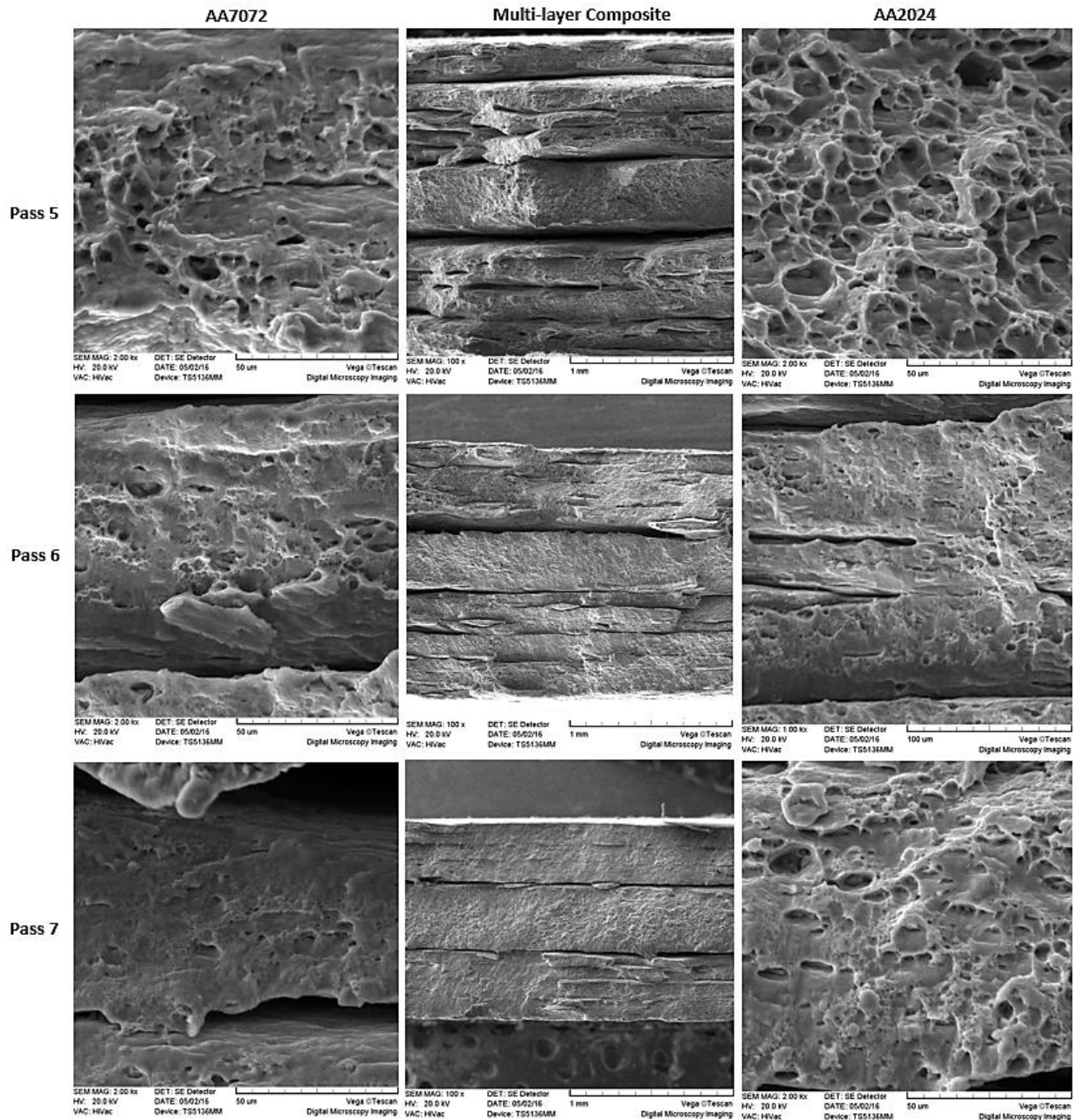
نشان‌دهنده وقوع شکستی نرم می‌باشد. علاوه بر این، تعداد و عمق گودی‌ها با افزایش پاس‌های تغییر شکل کاهش می‌یابد؛ بنابراین، مکانیسم شکست در پاس‌های بالای تغییر شکل به صورت شکست ترد است. علاوه بر این در هر مرحله از نورد تجمعی، حفرات ایجاد شده در مقطع لایه‌های AA2024 بیشتر از مقطع لایه‌های AA7072 است. این موضوع نشان‌دهنده شکست در لایه‌های AA2024 نرم‌تر از لایه‌های AA7072 می‌باشد. همچنین مشاهده شد که شکست در لایه‌های AA2024 و در پاس‌های بالاتر تغییر شکل به صورت نرم باقی می‌ماند ولی در لایه‌های AA7072 و در پاس‌های بالاتر تغییر شکل، شکست به صورت ترد اتفاق می‌افتد. همچنین، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص است که مکانیسم شکست کامپوزیت AA2024/AA7072 فرآوری شده به روش نورد تجمعی یک شکست برشی نرم و با فرورفتگی‌های کم عمق و کوچک است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده شد، شناسایی فصل مشترک اتصال دو ماده با افزایش پاس‌های نورد تجمعی دشوارتر می‌شود. فشار اعمال شده و نفوذ اتم‌ها در فصل مشترک لایه‌ها در پاس‌های بالای نورد تجمعی ممکن است منجر به پیوند خوب بین لایه‌ها شود.



شکل ۱۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست (الف) و (ب) آلومینیوم ۷۰۷۲، (ج) و (د) آلومینیوم ۲۰۲۴، حاصل از آزمون کشش



شکل ۱۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح شکست کامپوزیت فرآوری شده بعد از پاس‌های مختلف فرایند نورد تجمعی



ادامه شکل ۱۲

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، کامپوزیت چندلایه AA2024/AA7072/AA2024 با استفاده از نورد تجمعی ساخته شد و خواص مکانیکی و مکانیسم شکست پس از پاس‌های مختلف تغییر شکل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- لایه‌های کامپوزیت در پاس‌های اولیه یکنواخت و پیوسته هستند ($n < 4$) اما افزایش تغییر شکل منجر به تشکیل باندهای برشی و تغییر شکل غیریکنواخت می‌شود.
- ضخامت لایه‌ها در پاس‌های اولیه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد اما کاهش ضخامت آن‌ها با کاهش شکل‌پذیری لایه‌ها در پاس‌های بعدی محدود می‌شود.

- استحکام کششی کامپوزیت فراوری شده با افزایش پاس‌های نورد تجمعی افزایش می‌یابد. این به دلیل تأثیر دو عامل مهم است: ریزدانه شدن در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید و اثر تقویتی ساختار چندلایه.
- درصد ازدیاد طول تا شکست کامپوزیت چندلایه با افزایش پاس‌های تغییر شکل به شدت کاهش می‌یابد و ازدیاد طول کل کامپوزیت ساخته شده پس از ۷ پاس تغییر شکل به ۵/۲ درصد کاهش می‌یابد.

References

- [1] Hasan M, Zhao J, Jiang Z. Micromanufacturing of composite materials: a review. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2019 Apr 15;1(1):012004. doi: 1088/2631-7990/ab0f74
- [2] Inegbenebor AO, Bolu CA, Babalola PO, Inegbenebor AI, Fayomi OS. Aluminum silicon carbide particulate metal matrix composite development via stir casting processing. *Silicon*. 2018 Mar;10:343-7. doi: 10.1007/s12633-016-9451-7
- [3] Sritharan T, Chan LS, Tan LK, Hung NP. A feature of the reaction between Al and SiC particles in an MMC. *Materials characterization*. 2001 Jul 1;47(1):75-7. doi: 10.1016/S1044-5803(01)00144-9
- [4] Prasanna Kumar UJ, Gupta P, Jha AK, Kumar D. Closed die deformation behavior of cylindrical iron-alumina metal matrix composites during cold sinter forging. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2016 Oct;97:135-51. doi: 10.1007/s40033-015-0089-1
- [5] Sankhla A, Makhesana M, Patel K, Taha-Tijerina JJ, Patel A, Bagga P. Effects of hot extrusion on compressive strength and densification of aluminium-based metal matrix composites. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2024 Apr 15:1-3. doi: 10.1080/2374068X.2024.2342004
- [6] Ozay C, Karlidag OE. Hot press sintering effects and wear resistance of the Al-B4C composite coatings of an AA-2024 alloy. *Materials Testing*. 2021 Dec 30;63(12):1150-6. doi: 10.1515/mt-2021-0057
- [7] Ferreira F, Ferreira I, Camacho E, Lopes F, Marques AC, Velhinho A. Graphene oxide-reinforced aluminium-matrix nanostructured composites fabricated by accumulative roll bonding. *Composites Part B: Engineering*. 2019 May 1;164:265-71. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.11.075
- [8] Meselhy AF, Reda MM. Investigation of mechanical properties of nanostructured Al-SiC composite manufactured by accumulative roll bonding. *Journal of Composite Materials*. 2019 Dec;53(28-30):3951-61. doi: 10.1177/0021998319851831
- [9] Naseri M, Reihanian M, Borhani E. Effect of strain path on microstructure, deformation texture and mechanical properties of nano/ultrafine grained AA1050 processed by accumulative roll bonding (ARB). *Materials Science and Engineering: A*. 2016 Sep 15;673:288-98. doi: 10.1016/j.msea.2016.07.031
- [10] Rezayat M, Akbarzadeh A, Owhadi A. Fabrication of high-strength Al/SiC p nanocomposite sheets by accumulative roll bonding. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012 Jun;43:2085-93. doi: 10.1007/s11661-011-1039-7
- [11] Garg P, Jamwal A, Kumar D, Sadasivuni KK, Hussain CM, Gupta P. Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications. *Journal of materials research and technology*. 2019 Sep 1;8(5):4924-39. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.06.028
- [12] Arunkumar S, Sundaram MS, Vigneshwara S. A review on aluminium matrix composite with various reinforcement particles and their behaviour. *Materials Today: Proceedings*. 2020 Jan 1;33:484-90. doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.053
- [13] Liu T, Song B, Huang G, Jiang X, Guo S, Zheng K, Pan F. Preparation, structure and properties of Mg/Al laminated metal composites fabricated by roll-bonding, a review. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022 Aug 1;10(8):2062-93. doi: 10.1016/j.jma.2022.08.001
- [14] Mosafajahanabad N, Alizadeh M, Salahinejad E. Accumulative roll bonding fabrication, tensile and corrosion characterization of Zn/Al multilayered composites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2022 Aug 30;22(4):191. doi: 10.1007/s43452-022-00521-6
- [15] Tayyebi M, Eghbali B. Study on the microstructure and mechanical properties of multilayer Cu/Ni composite processed by accumulative roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*. 2013 Jan 1;559:759-64. doi: 10.1016/j.msea.2012.09.021
- [16] Hooker JA, Doorbar PJ. Metal matrix composites for aeroengines. *Materials science and technology*. 2000 Jul 1;16(7-8):725-31. doi: 10.1179/026708300101508414
- [17] Sajjadi Nikoo S, Kumaran SN, Qods F, Yousefieh M. Microstructure evolution and mechanical properties of the AA2024/AA5083 ultra-fine grained composite fabricated via accumulative roll bonding (ARB) method. *Journal of Materials Research*. 2023 May 14;38(9):2519-33. doi: 10.1557/s43578-023-00985-z
- [18] Roy S, Nataraj BR, Suwas S, Kumar S, Chattopadhyay K. Microstructure and texture evolution during accumulative roll bonding of aluminium alloys AA2219/AA5086 composite laminates. *Journal of Materials Science*. 2012 Sep;47:6402-19. doi: 10.1007/s10853-012-6567-z

- [19] Hidalgo-Manrique P, Orozco-Caballero A, Cepeda-Jiménez CM, Ruano OA, Carreño F. Influence of the accumulative roll bonding process severity on the microstructure and superplastic behaviour of 7075 Al alloy. *Journal of Materials Science & Technology*. 2016 Aug 1;32(8):774-82. doi: [10.1016/j.jmst.2016.06.004](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.06.004)
- [20] Liu HS, Zhang B, Zhang GP. Microstructures and mechanical properties of Al/Mg alloy multilayered composites produced by accumulative roll bonding. *Journal of Materials Science & Technology*. 2011 Jan 1;27(1):15-21. doi: [10.1016/S1005-0302\(11\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(11)60019-4)
- [21] Mehr VY, Toroghinejad MR, Rezaeian A, Asgari H, Szpunar JA. A texture study of nanostructured Al-Cu multi-layered composite manufactured via the accumulative roll bonding (ARB). *Journal of Materials Research and Technology*. 2021 Sep 1;14:2909-19. doi: [10.1016/j.jmrt.2021.08.054](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.054)
- [22] Nie J, Liu M, Wang F, Zhao Y, Li Y, Cao Y, Zhu Y. Fabrication of Al/Mg/Al composites via accumulative roll bonding and their mechanical properties. *Materials*. 2016 Nov 23;9(11):951. doi: [10.3390/ma9110951](https://doi.org/10.3390/ma9110951)
- [23] Tayyebi M, Eghbali B. Study on the microstructure and mechanical properties of multilayer Cu/Ni composite processed by accumulative roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*. 2013 Jan 1;559:759-64. doi: [10.1016/j.msea.2012.09.021](https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.021)
- [24] Alizadeh M, Samiei M. 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 Apr 1;56:680-4.
- [25] Mozaffari A, Manesh HD, Janghorban K. Evaluation of mechanical properties and structure of multilayered Al/Ni composites produced by accumulative roll bonding (ARB) process. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010 Jan 7;489(1):103-9. doi: [10.1016/j.jallcom.2009.09.022](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.09.022)