



بررسی تجربی خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیومی تقویت شده با نانولوله کربنی ساخته شده به روش نورد تجمعی

محمدرضا مروتی، بیژن ملایی داریانی*

مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۵-۱۲-۰۵
بازنگری: ۱۳۹۶-۱۰-۲۱
پذیرش: ۱۳۹۶-۱۱-۱۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۱۴

کلمات کلیدی:

تغییر شکل پلاستیک شدید
نورد تجمعی
نانولوله کربنی
ریزساختار

خلاصه: در این تحقیق، کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانولوله کربنی با استفاده از فرآیند نورد تجمعی بدست آمده است. از فرآیند نورد تجمعی به عنوان یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید به دلیل خواص مکانیکی و ریزساختاری خوب نمونه‌های تولید شده، برای تقویت ورق‌های آلومینیومی با استفاده از نانولوله‌های کربنی استفاده شده است. به منظور ارزیابی خواص مکانیکی کامپوزیت ساخته شده از آزمایش کشش تک‌محوری استاندارد استفاده شده است، بدین منظور، ابتدا استحکام کششی نهایی ورق‌های ساخته شده با روش نورد تجمعی با ورق تک‌لایه و سپس ورق‌های تقویت شده با نانولوله کربنی مقایسه شده است. تغییرات ریزساختاری کامپوزیت حین چرخه‌های مختلف نورد توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۰/۱۵-۰/۰۵ درصد وزنی نانولوله کربنی در ورق‌های کامپوزیت باعث افزایش استحکام کششی نهایی آنها شده ولی افزودن بیش از ۰/۱۵ درصد وزنی نانولوله کربنی باعث کاهش استحکام کششی نهایی ورق‌های کامپوزیت می‌گردد. علاوه بر آن، کامپوزیت زمینه فلزی تولید شده به وسیله نورد تجمعی تا ۷ چرخه، توزیع یکنواخت و پیوند قوی بین ذرات و زمینه را نشان می‌دهد. همچنین هنگامی که تعداد چرخه‌ها افزایش می‌یابد، استحکام کششی نهایی کامپوزیت نیز افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

پژوهشگران قرار گرفته است [۳].

ویژگی‌های خاص نانولوله‌های کربنی^۲ از جمله ضریب کشسانی بالا و استحکام تسلیم خوب نسبت به چگالی نانولوله‌ها باعث افزایش چشم‌گیری در کارایی روش‌های رشد نانولوله‌ها و تقویت کامپوزیت‌های آلومینیومی گردید [۴]. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانولوله‌های کربنی به واسطه برخورداری از خواص نظیر استحکام کششی و صلیبیت ویژه بالا، پایداری حرارتی و قابلیت کار در دمای بالا؛ از جمله مواد مهندسی محسوب می‌شوند که اخیراً به آنها توجه ویژه‌ای شده است [۴]. نتایج حاصل از بررسی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانولوله‌ها نشان می‌دهد که در نتیجه افزودن نانولوله‌های کربنی و بهینه کردن شرایط تولید، خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی بهبود می‌یابد. کاون^۳ و همکاران افزایش استحکام کششی نهایی در ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده توسط نانولوله کربنی با ۳ درصد حجمی را، در حدود ۲۸

امروزه نیاز به کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم با چگالی کم و استحکام کششی نهایی مکانیکی خوب، در صنایع مختلف بیشتر شده است. اگرچه آلیاژهای آلومینیوم دارای چگالی کم هستند، اما مقدار استحکام کششی نهایی آنها در مقایسه با موادی همچون فولادها و آلیاژهای پایه تیتانیوم کم است. در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی بر روی گسترش نانوکامپوزیت‌های پایه فلزی^۱ انجام شده است. در اکثر تحقیقات صورت گرفته در مورد مواد پایه آلومینیومی تقویت شده با ذرات نانو، نشان داده شده است که ذرات سرامیکی باعث افزایش در استحکام کششی نهایی مواد پایه آلومینیومی شده است [۱]. از میان ذرات تقویت کننده سرامیکی، ذرات SiC بیشترین استفاده را به خود اختصاص داده است. مقاومت به سایش آلومینیوم می‌تواند با افزودن این ذرات سرامیکی افزایش یابد [۲]. افزون بر SiC، ذرات تقویت کننده دیگری نظیر B₄C در سال‌های اخیر مورد توجه

2 Carbon Nano Tube (CNT)

3 Kwon

1 Metal Matrix Nano Composite (MMNC)

* نویسنده‌دار مکاتبات: dariani@aut.ac.ir



شامل روش‌هایی از قبیل: متالورژی پودر، اکستروژن، پرس داغ و روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید^۵ است. در روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید عموماً کرنش بسیار بالایی در دمای پایین به ماده اعمال می‌شود تا ماده به صورت فوق ریزدانه یا حتی نانو ساختار تغییر ریز ساختار دهد. روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید تنوع زیادی دارند که مهمترین این روش‌ها عبارتند از: فشار اکستروژن زاویه‌ای^۶ [۱۲]، پیچش تحت فشار بالا^۷ [۱۳]، فرآیند نورد تجمعی [۱۴] و غیره.

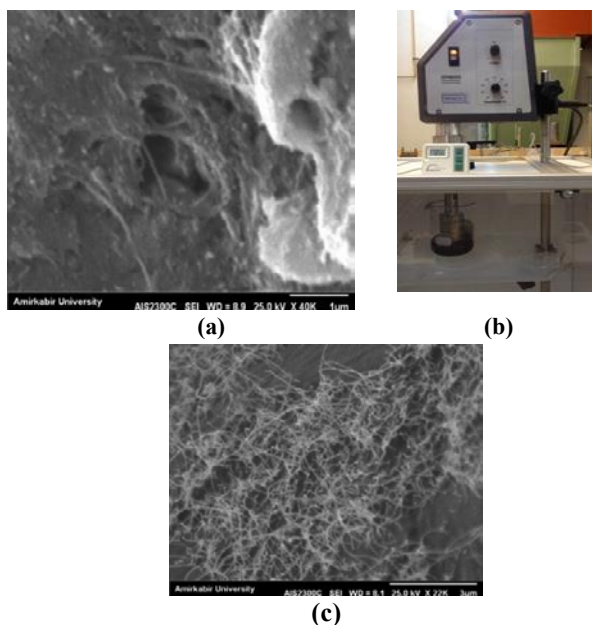
فرآیند نورد تجمعی^۸ به عنوان یکی از روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید و دستیابی به ساختاری با اندازه دانه نانومتری توسط سایتو^۹ و همکاران معرفی شد [۱۵]. آنها نشان دادند که با استفاده از روش فرآیند نورد تجمعی می‌توان به مواد بسیار ریز با ساختارهای نانو دست یافت که از این طریق می‌توان ویژگی‌های مکانیکی مواد را نیز بهبود بخشید. اخیراً چندین تئوری برای توضیح مکانیزم پیوند در روش پیوند سرد با نورد پیشنهاد شده است. پژوهشگران تئوری فیلم [۱۶] را به دلیل دمای پایین فرآیند، به عنوان تئوری غالب معرفی می‌کنند. برطبق این مکانیزم لایه‌های اکسیدی ترد که پس از آماده‌سازی سطحی ایجاد می‌شوند، شکسته شده و فلز بکر زیرلایه از میان ترک‌ها در جهت عمود بر نورد به بیرون تراوش می‌کند. برخورد دو فلز بکر از هر دو لایه به یکدیگر سبب اتصال و پیوند خواهد شد. سلیمی و همکاران با استفاده از روش نورد تجمعی، ورق آلومینیوم را در چند چرخه نورد با ذرات نانولوله کربنی تقویت کرده‌اند [۱۷].

آنها برای تقویت ورق آلومینیوم، از ذرات نانولوله کربنی چند دیواره استفاده کردند و بیشتر در مورد ریز ساختار و چگونگی پخش‌شوندگی ذرات نانولوله کربنی در بین ذرات آلومینیوم گزارش داده‌اند ولی در مورد استحکام کششی نهایی و بهبود خواص مکانیکی ورق تقویت شده آلومینیوم گزارشی ارائه نکرده‌اند. شکل ۱ نمونه‌ای از فرآیند نورد تجمعی را نشان می‌دهد که در هر مرحله ذرات نانولوله کربنی بین لایه‌ها پخش می‌گردد. هدف از این تحقیق، تولید ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی (با درصدهای

درصد گزارش داده‌اند [۵]. کوزوماکی^۱ و همکاران استحکام کششی تسلیم ۸۰ مگاپاسکال را برای ورق آلومینیوم تقویت شده با ۰/۵-۲ درصد حجمی نانولوله کربنی بدست آوردند [۶]. دونگ^۲ و همکاران یک بهبود در استحکام کششی نهایی و میزان سختی را گزارش کردند، به طوریکه استحکام کششی و میزان سختی در ماده مسی تقویت شده با نانولوله کربنی در حدود ۳۵ درصد افزایش یافته است [۷]. لاه^۳ و همکاران یک افزایش در میکرو سختی آلومینیوم ۶۰۶۱ تقویت شده با نانولوله کربنی را گزارش کردند، به طوریکه با افزایش ۳ درصد حجمی نانولوله کربنی بر سطح ماده آلومینیومی، در حدود ۷۱/۸ درصد افزایش در میکروسختی را نشان داده است [۸]. ایساوی^۴ و همکاران افزایش ۴۸ درصد در استحکام کششی نهایی مواد آلومینیوم تقویت شده با نانولوله کربنی را نسبت به ماده آلومینیوم خالص نشان دادند [۹]. طبق تحقیقات ایساوی، با افزایش بیشتر از ۰/۵-۱ درصد حجمی نانولوله کربنی به پودر آلومینیوم، مقدار استحکام کششی نهایی کمتر می‌شود و این به دلیل جمع شدن ذرات نانولوله کربنی بر روی هم و پخش نادرست ذرات نانولوله کربنی در بین پودر آلومینیوم می‌باشد که باعث تقویت مواد آلومینیوم نمی‌شود. زودانگ و همکاران افزایش ۶۰ درصد در استحکام کششی نهایی و ۷۰ درصد در استحکام کششی نهایی مواد آلومینیوم تقویت شده با نانولوله کربنی را نشان دادند [۱۰]. به طوریکه با افزایش ۱-۱/۵ درصد حجمی نانولوله کربنی به پودر آلومینیوم در حدود ۶۰-۷۰ درصد در استحکام کششی مواد آلومینیوم تقویت شده نسبت به مواد آلومینیوم خالص گزارش شده است ولی با افزایش درصد حجمی نانولوله کربنی ۲-۱/۵ درصد مقدار استحکام کششی نهایی مواد آلومینیوم پایین می‌آید. افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله به زمینه موجب افزایش استحکام کششی نهایی از ۱۳۲ مگاپاسکال به ۱۶۵ مگاپاسکال به میزان ۲۴ درصد نسبت به نمونه مرجع شده است [۱۱]. بر طبق گزارش محققان، طرز پخش ذرات نانولوله کربنی در بین ذرات آلومینیوم حائز اهمیت است، به طوریکه با پخش همسان ذرات نانولوله کربنی در بین ذرات آلومینیوم، می‌توان به ساختار با استحکام کششی نهایی بالا و بهینه رسید [۱۱]. چندین روش برای تقویت ورق‌های کامپوزیتی پیشنهاد می‌شود که

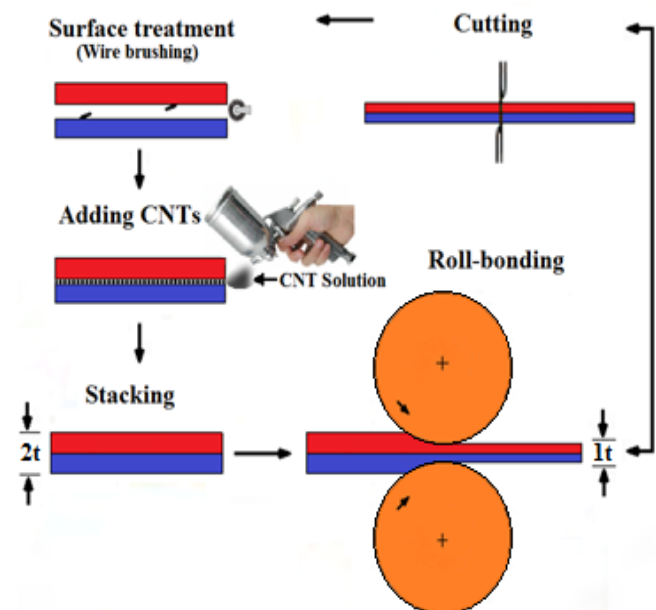
5 Severe Plastic Deformation (SPD)
6 Equal-Channel Angular Pressing (ECAP)
7 High Pressure Torsion (HPT)
8 Accumulative Roll Bonding (ARB)
9 Saito

1 Kuzumaki
2 Dong
3 Laha
4 Esawi



شکل ۲: فرآیند پخش نانولوله کربنی: الف) توده‌ای شدن نانولوله‌ها
 ب) پخش نانولوله‌ها با استفاده از امواج ماورا صوت ج) پخش همسان
 نانولوله‌ها بر روی سطح
Fig. 2. The process of CNT dispersion. a) Agglomeration of CNT. B) Dispersion of CNT with ultrasonic. c) Homogeneous dispersion of CNT on surface

۱-۱-۲- توزیع نانولوله‌های کربنی روی سطح ورق آلومینیوم
 توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی درون زمینه باعث پرشدن
 حفرات داخل زمینه و در نتیجه افزایش چگالی نسبی شده که باعث
 افزایش استحکام کششی نهایی می‌گردد. از طرفی افزایش بیش از
 حد نانولوله‌ها باعث توده‌ای شدن و تجمع آنها در زمینه شده و
 خواص مکانیکی زمینه کاهش خواهد یافت [۴]. کاهش نسبت سطح
 به حجم و حذف ناخالصی‌ها توسط اسیدشویی و عامل‌دار کردن
 نانولوله‌های کربنی باعث تضعیف نیروهای واندروالسی نانولوله‌ها و
 در نتیجه توزیع یکنواخت آنها روی سطح ورق آلومینیوم می‌گردد.
 پخش کردن نانولوله‌های کربن روی سطح ورق آلومینیوم به این
 صورت بوده است که درصدهای مختلف وزنی نانولوله با دستگاه
 سونیکیتور^۲ در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد در اتانول تشکیل محلول
 سوسپانسیون داده است (شکل ۲ ب)). بدین صورت که مقدار ۰/۰۵،
 ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد وزنی نانولوله کربنی در داخل اتانول بوسیله
 سونیکیتور در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد معلق شده و با یک
 دستگاه پاشش، محلول سوسپانسیون شامل نانولوله کربنی بر روی
 نمونه ورق‌ها پخش شده است و سپس ورق‌های آلومینیوم را روی هم



شکل ۱: تصویر شماتیک از فرآیند نورد تجمعی
Fig. 1. Schematic illustration of the ARB process

وزنی مختلف) با استفاده از فرآیند نورد تجمعی بوده است. نتایج
 حاصل از ریزساختار در چرخه‌های مختلف فرآیند نورد تجمعی، تأثیر
 درصد وزنی نانولوله کربنی بر روی استحکام کششی نهایی ورق‌های
 نانوکامپوزیتی و همچنین، تأثیر نانولوله‌های کربنی بر روی ضریب
 کشسانی ورق‌های نانوکامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- فرآیندهای تجربی

۱-۲- فرآیند ساخت ورق آلومینیومی ریزساختار

این کار تحقیقاتی شامل سه مرحله است. مرحله اول شامل
 آماده‌سازی نانولوله‌های کربنی و مرحله دوم شامل پخش
 نانولوله کربنی بر روی ورق آلومینیوم و سپس مرحله سوم عملیات
 نورد تجمعی می‌باشد. لازم به ذکر است در هر مرحله از عملیات نورد
 تجمعی، ورق‌های نورد شده تحت دمای ۲۵۰ درجه به مدت ۵ دقیقه
 تحت عمل عملیات آنیل^۱ قرار گرفته شده است. در هر مرحله از
 نورد، ورق‌های نورد شده کارسخت شده و ظرفیت کارسخت شوندگی
 ورق نورد شده کاهش می‌یابد لذا برای برگشت به حالت اولیه ورق
 آلومینیوم، فرآیند عملیات آنیل تحت شرایط ۲۵۰ درجه سانتیگراد و
 در حدود ۵ دقیقه بر روی ورق‌های نورد شده در هر چرخه از عملیات
 نورد تجمعی اعمال می‌گردد.

2 Sonicator

1 Anneal

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم سری ۱۲۰۰
Table 1. Chemical composition of aluminum alloy 1200 series

Al %	Mn %	Cu %	Zn %	Ti %	Si %	Fe %	Other total %	عنصر
۹۹	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱	۰/۱۵	مقدار (درصد)

جهت طولی به دو نیم تقسیم و فرآیند گفته شده دوباره تا ۷ چرخه تکرار شده است.

۲-۲- اندازه‌گیری خواص مکانیکی نمونه‌های نورد تجمعی ابتدا با استفاده از استاندارد آزمون کشش ASTM E8 [۱۸]، نمودار تنش- کرنش مهندسی (با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه) برای نمونه‌های نورد تجمعی و نمونه‌های آلومینیومی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی بدست آمده است (شکل ۴) و سپس با استفاده از دستگاه آزمون کشش دارای کرنش‌سنج^۳ مقدار دقیق ضریب کشسانی برای نمونه‌های فرآیند بدست آمده است. برای کم کردن خطا در آزمایش از هر نمونه سه عدد آزمون کشش با کرنش‌سنج گرفته شده است. در این تحقیق از ورق آلومینیوم ۱۲۰۰ و پودر نانولوله کربنی چند دیواره با قطر ۳۰-۴۰ نانومتر و طول ۵-۱۰ میکرومتر استفاده شده است که خواص مکانیکی ورق آلومینیوم ۱۲۰۰ و نانولوله کربنی در جدول ۲ ارائه شده است.

۳-۲- متالوگرافی^۴ نمونه‌ها

به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های بدست آمده با استفاده از فرآیند نورد تجمعی، سطح مقطع نمونه‌ها توسط پولیش مکانیکی آماده شده است و با استفاده از محلول (10ml HBF₄ + 200 ml distilled water) تحت ولتاژ ۲۶ ولت و به مدت ۸۰ ثانیه تحت فرآیند الکترواچ^۵ آشکارسازی شده است. در ادامه، ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری^۶ مشاهده شده و مورد تحلیل قرار گرفته است.

گذاشته شده است و سپس درون کوره در معرض دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد برای بخار کامل اتانول قرار داده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم سری ۱۲۰۰ را نشان می‌دهد. شکل نانولوله کربنی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ قبل از پخش (a) و بعد از پخش (c) بوسیله امواج مافوق صوت در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطوری که شکل نشان می‌دهد امواج مافوق صوت با فرکانس در حدود ۵۰ kHz به صورت بهینه نانولوله‌های کربنی را در داخل اتانول پخش کرده است.

۲-۱-۲- فرآیند تقویت ورق آلومینیومی با نانولوله کربنی

برای ساخت ورق آلومینیوم تقویت شده با استفاده از ذرات نانو از فرآیند نورد تجمعی استفاده شده است. ابتدا به منظور دستیابی به ساختار هم‌محور^۲، ورق‌های آلومینیوم ۱۲۰۰ به ضخامت ۱ میلی‌متر به مدت ۳۰ دقیقه در درجه حرارت ۳۰۰ درجه سانتیگراد تحت فرآیند عملیات آنیل قرار گرفته است. دو قطعه از این ورق با پهنای ۸۰ میلی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر با استفاده از استون چربی‌زدایی شده است و توسط برس فولادی خراشیده (برای پخش بهینه نانولوله کربنی بر روی سطح) و زیر گردیده است. سپس در هر مرحله از نورد، بعد از آماده‌سازی سطح ورق آلومینیوم مقدار ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد وزنی نانولوله کربنی بر روی سطح طبق دستورالعمل بیان شده در بخش ۱-۲-۱، پخش شده است و سپس عملیات نورد بر روی ورق آلومینیوم انجام گردیده است، سپس این چرخه عملیات تولید برای بدست آوردن چرخه‌های بالای نورد تکرار گردیده است. عملیات نورد توسط دستگاه نورد با قطر غلتک ۴۰ سانتی‌متر و تحت کاهش ضخامت ۵۰ درصد انجام شده است. تصویری از دستگاه فرآیند نورد تجمعی در شکل ۳ آورده شده است. ورق‌های چسبیده شده از

3 Extensometer

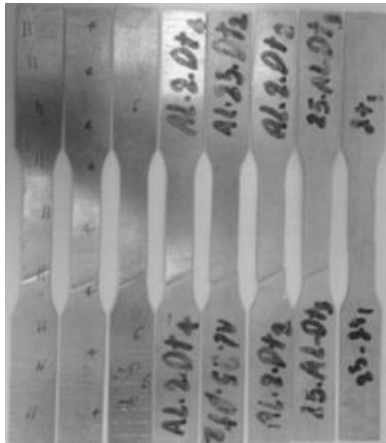
4 Metallography

5 Electro etch

6 Optical Microscopy (OM)

1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

2 Alignment



شکل ۴: نمایی از نمونه‌های آزمون کشش
Fig. 4. The schematic of the tensile test specimens



شکل ۳: نمایی از دستگاه فرآیند نورد تجمعی
Fig. 3. The schematic of the ARB process

پلاستیک به هنگام حرکت با موانع کمی برخورد می‌کنند و از این رو افزایش استحکام بر اثر کرنش سختی به مراحل اولیه تغییر شکل مربوط می‌شود در ادامه تغییر شکل به علت اشباع چگالی نابجایی‌ها، کرنش سختی بیشتری در آلیاژ رخ نمی‌دهد و استحکام‌یابی تقریباً متوقف می‌شود. علاوه بر قانون هال-پچ که بیان‌کننده اثر کاهش اندازه دانه در افزایش استحکام است می‌توان به نقش موانع مؤثر برابر پیوستن ریز حفرات به یکدیگر و رشد ترک اشاره کرد. برای توضیح بیشتر نقش ریز کردن دانه‌ها بر روی استحکام کششی‌نهایی، می‌توان گفت هرچه دانه‌ها ریزتر باشند موانع مؤثر (مرزدانه‌ها) برای متوقف کردن ریزترک‌ها بیشتر است. در نتیجه، ترک مجبور است به‌طور مرتب جوانه زند، و برای تغییر جهت در صفحه گسترش ترک و در دانه مجاور انرژی زیادی مصرف می‌شود.

نمودار استحکام کششی‌نهایی بر حسب تعداد چرخه بر روی نمونه‌های نانوکامپوزیتی در شکل ۶ نشان داده شده است. بیشترین افزایش استحکام کششی‌نهایی مربوط به چرخه اول (ورق دولایه) می‌باشد. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد چرخه فرآیند، افزایش جزئی در استحکام کششی‌نهایی وجود دارد یعنی شیب نرخ افزایش استحکام کششی‌نهایی با افزایش چرخه فرآیند نورد تجمعی بعد از چرخه اول ملایم‌تر می‌شود. گزارش شده است که تا چرخه اول و دوم، کرنش سختی عامل اصلی در افزایش استحکام کششی‌نهایی دارد و بعد از چرخه دوم به بعد تشکیل دانه‌های فرعی تا حدودی به افزایش استحکام کششی‌نهایی کمک می‌کند [۱۵]. رابطه کرنش سختی و اندازه دانه‌ها مربوط به اثر هال-پچ می‌شود. به

جدول ۲: خواص مکانیکی آلومینیوم ۱۲۰۰ و نانولوله کربنی

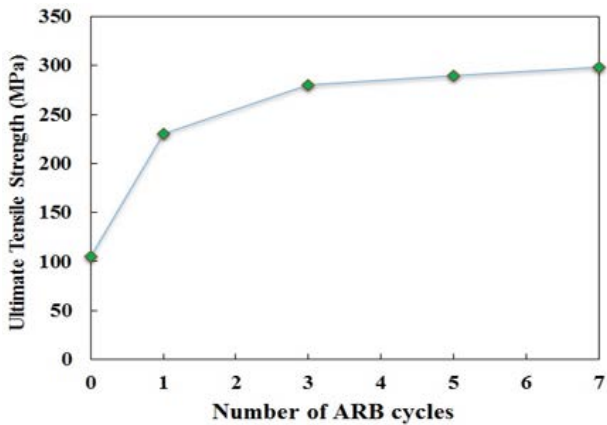
Table. 2. Mechanical Properties of Aluminum 1200 and CNT

مواد	ضریب کشسانی، GPa	چگالی، g/cm ³	کششی تسلیم، MPa	استحکام
آلومینیوم ۱۲۰۰	۷۰	۲/۷	۱۰۵	
نانولوله کربنی چند دیواره	۱۱۰۰	۲/۶	۱۵۰۰۰۰	

۲- نتایج و بحث

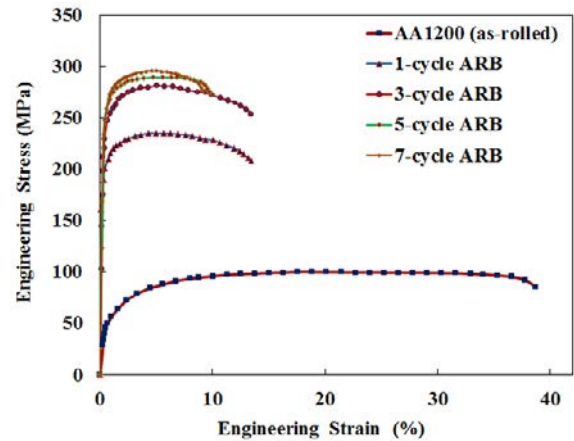
۳-۱- تعیین خصوصیات مکانیکی نمونه‌های نورد تجمعی

نمودار تنش-کرنش مهندسی ورق آلومینیوم ۱۲۰۰ و نمونه‌های نورد تجمعی ۱-۷ چرخه نورد تجمعی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطوری که شکل ۶ نشان می‌دهد، استحکام کششی‌نهایی آلومینیوم ۱۲۰۰ در حدود ۱۰۵ مگاپاسکال می‌باشد که با پیشرفت فرآیند تا ۷ چرخه (۱۲۸ لایه) به ۲۹۰ مگاپاسکال رسیده است. یعنی استحکام کششی‌نهایی آلومینیوم ۱۲۰۰ در اثر انجام فرآیند نورد تجمعی تا ۷ چرخه به ۷/۲ برابر مقدار اولیه افزایش و بهبود یافته است. با توجه به نمودار تنش-کرنش می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد چرخه‌های فرآیند، استحکام کششی‌نهایی نمونه افزایش یافته ولی شکل‌پذیری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. به طور کلی آلیاژهای سری ۱۰۰۰ به دلیل مقادیر بسیار کم عناصر آلیاژی و عدم حضور ناخالصی یا رسوب در ریزساختار، نابجایی‌های تشکیل شده بر اثر تغییر شکل



شکل ۶: تغییرات استحکام کششی نهایی در چرخه‌های مختلف فرآیند نورد تجمعی

Fig. 6. The changes of ultimate strength of ARB-ed sheets in different cycle.



شکل ۵: منحنی تنش-کرنش مهندسی آلومینیوم ۱۲۰۰ و آلومینیوم نورد تجمعی شده در چرخه‌های مختلف

Fig. 5. Engineering stress-strain curve of aluminum 1200 series and ARB-ed aluminum sheets in different cycle.

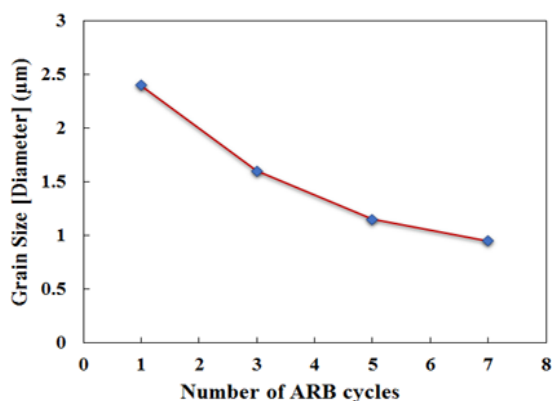
اندازه دانه‌ها با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری J image و روش رسم خط، اندازه‌گیری شده است. این روش با در نظر گرفتن اندکی تقریب برای اندازه‌گیری اندازه دانه در آلیاژهای یک فاز یا چندفازی به کار می‌رود. همچنین برای دانه‌های ستونی شده اندازه دانه در جهت نورد و عمود بر نورد اندازه‌گیری شده است.

همانطوری که در شکل ۷ (الف) نشان داده شده است، نمونه آلومینیوم ۱۲۰۰ دارای دانه‌های هم‌محور با اندازه متوسط در حدود ۳۵-۴۰ میکرون می‌باشد. شکل ۷ (ب) نمونه دو لایه نورد تجمعی را نشان می‌دهد همانطوری که شکل نشان می‌دهد اندازه متوسط دانه‌ها در حدود ۲ میکرون می‌باشد، که کاهش اندازه دانه‌ها ناشی از تغییر شکل شدید می‌باشد که در این مرحله نابجایی‌های زیادی بوجود می‌آید. شکل ۷ (ج) نمونه هشت لایه نورد تجمعی را نشان می‌دهد که اندازه دانه‌ها در این نمونه در حدود ۱/۵ الی ۱/۷ میکرون می‌باشد که در این مرحله غلظت نابجایی‌ها کاهش می‌یابد و اندازه دانه‌ها ریزتر می‌شود. شکل ۷ (د) نمونه سی و دو لایه نورد تجمعی را نشان می‌دهد که اندازه دانه‌ها در این نمونه در حدود ۱/۲ الی ۱/۴ میکرون می‌باشد همچنین تمام دانه‌ها در این مرحله در راستای نورد کشیده شده‌اند. دانه‌ها در این مرحله زاویه زیادی با هم دارند. در ادامه شکل ۷ (ه) اندازه دانه ۰/۹ الی ۱/۱ میکرون را نشان می‌دهد که مربوط به صد و بیست و هشت لایه نورد تجمعی می‌باشد؛ در این نمونه‌ها، مرزدانه‌های پرزاویه که در اثر تغییر شکل به وجود آمده‌اند، باعث تقسیم و ریز شدن دانه‌ها می‌شوند. شکل ۸ اندازه دانه‌ها در چرخه‌های مختلف فرآیند نورد تجمعی را نشان

این صورت که به پدیده افزایش تنش تسلیم مواد با کاهش اندازه دانه آنها گفته می‌شود. اثر هال-پچ بر اساس پدیده انباشتگی نابجایی‌ها در مرزدانه‌ها توضیح داده می‌شود. این انباشتگی‌ها موجب ایجاد نواحی تمرکز تنش در مرز دانه‌ها می‌شوند که در فعال‌سازی چشمه‌های نابجایی در دانه‌های مجاور و انتقال آنها بین دانه‌ها نقش اساسی دارند. براین اساس، کوچک‌تر شدن اندازه دانه موجب محدود شدن این انباشتگی‌ها و در نتیجه محدودیت پخش نابجایی‌ها در حجم اجسام می‌شود.

۳-۱-۱- متالوگرافی نمونه‌های نورد تجمعی

جهت شناسایی اندازه دانه‌های آلومینیوم در چرخه‌های مختلف نورد تجمعی، بر روی نمونه‌ها متالوگرافی صورت گرفته است. قبل از انجام متالوگرافی بر روی سطح شمش به ترتیب عملیات سایش نرم، پرداخت خشن، پرداخت نهایی و اچ کردن انجام شده است. با استفاده از میکروسکوپ نوری از مقطع مورد نظر عکس برداری شده است که نتیجه آن برای لایه‌های مختلف فرآیند نورد تجمعی در شکل ۷ نمایش داده شده است. در چرخه‌های ابتدایی فرآیند نورد تجمعی، تراکم نابجایی‌ها در دانه‌ها ایجاد شده و مرزهای فرعی تشکیل می‌شود و با افزایش کرنش در مراحل بعد، فاصله این مرزهای فرعی کاهش می‌یابد به عبارتی تغییر شکل پلاستیک شدید باعث ریز شدن دانه‌ها در اثر تشکیل مرزهای نابجایی شده که در چرخه‌های بعدی منجر به تشکیل ساختار بسیار ریز مرزهای دانه پایدار می‌گردند [۱۴ و ۱۵].

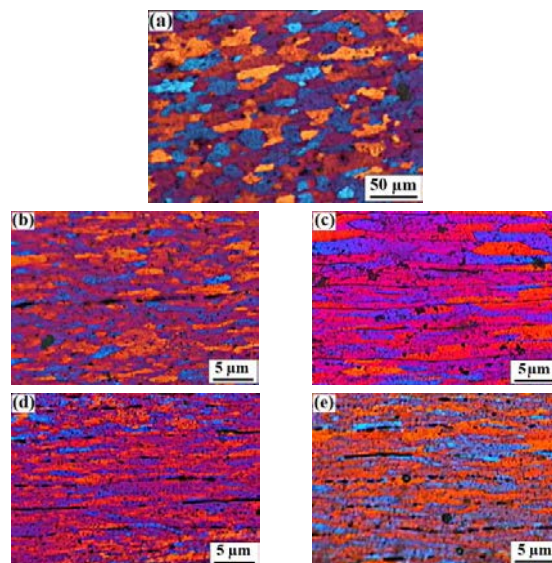


شکل ۸: تغییرات اندازه دانه‌ها در برابر چرخه‌های مختلف نورد تجمعی

Fig. 8. The grain size change due to several ARB cycles.

نمونه نورد تجمعی (دولایه) ۸ درصد و با بالا رفتن درصد وزنی نانولوله کربنی تا ۰/۱ درصد، افزایش استحکام نهایی ورق نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه نورد تجمعی (دولایه) ۱۰ درصد شده است. در ادامه با بالا رفتن درصد وزنی نانولوله کربنی تا ۰/۱۵ درصد، افزایش استحکام کششی نهایی ورق نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه نورد تجمعی (دولایه) ۶۱ درصد بوده است. ولی در ادامه با بالا رفتن درصد وزنی نانولوله کربنی تا ۰/۲ درصد، افت شدیدی در حدود ۲۰ مگاپاسکال در استحکام کششی نهایی ورق نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه نورد تجمعی (دولایه) وجود خواهد داشت که این عیب بخاطر توده‌ای شدن نانولوله‌های کربنی بر روی سطح ورق آلومینیوم است. عیب اساسی در تولید ورق‌های کامپوزیتی آلومینیوم تقویت شده با نانولوله کربنی، پدیده توده‌ای شدن ذرات نانولوله کربنی است. در این تحقیق با توجه به افزایش چشمگیر استحکام کششی نهایی در ۰/۱۵ درصد وزنی نانولوله کربنی، پخش نانولوله کربنی در بین ورق‌های کامپوزیتی با این مقدار درصد وزنی نانولوله کربنی انجام گردید.

۲-۲-۳- استحکام کششی نهایی نمونه‌های تقویت شده با نانولوله کربنی نانولوله کربنی مانند ذرات تقویت کننده درون کامپوزیت‌های زمینه فلزی، موجب افزایش تجمع نابعایی‌ها در زمینه فلزی اطراف ذرات گردیده که این عامل باعث سخت شدن موضعی زمینه شده و در نتیجه اتصال دو ورق بهبود خواهد یافت. از طرف دیگر لایه‌های اکسیدی ترد که پس از آماده‌سازی سطحی ایجاد می‌شوند، در فرآیند نورد تجمعی شکسته شده و فلز بکر زیرلایه از میان ترک‌ها در جهت عمود بر نورد به بیرون تراوش می‌کند. برخورد دو فلز بکر از هر دو



شکل ۷: ریزساختار ورق‌های آلومینیوم ۱۲۰۰ نورد تجمعی در چرخه‌های مختلف (الف): آلومینیوم نورد شده (ب): سیل اول، (ج): چرخه سوم، (د): چرخه پنجم، (ه): چرخه هفتم نورد تجمعی

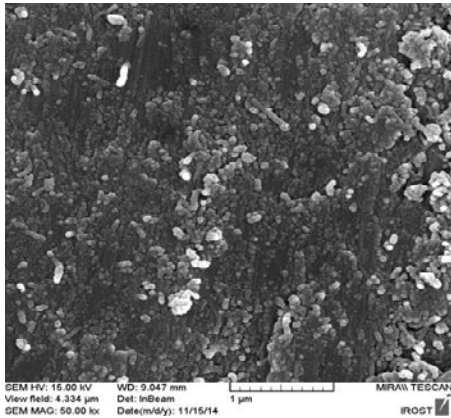
Fig. 7. Optical micrographs of AA1200 (a) before ARB and after (b) 1, (c) 3, (d) 5, (e) 7 cycle ARB processing.

می‌دهد. همانطوری که شکل ۸ نشان می‌دهد، ریز شدن اندازه دانه‌ها از چرخه دوم به بعد با شیب ملایمی تغییر می‌کند به طوری که در چرخه‌های بالاتر اندازه دانه‌ها، تغییر آچنانی نمی‌کنند [۱۹].

۲-۳- تعیین خصوصیات مکانیکی نمونه‌های تقویت شده با نانولوله کربنی
۱-۲-۳- تاثیر پخش شدن نانولوله کربنی بر روی استحکام کششی نهایی نمونه‌ها

در مورد کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی عدم رعایت مقدار و توزیع نامناسب نانولوله‌های کربنی در زمینه اثر نامطلوبی بر خواص کامپوزیت خواهد داشت. افزایش بیش از حد نانولوله‌ها باعث توده‌ای شدن و تجمع آنها در زمینه خواهد شد و به علت حضور این توده‌ها خواص مکانیکی کامپوزیت کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر افزودن مقدار کم نانولوله کربنی نیز اثر کمتری در تقویت نانوکامپوزیت آلومینیوم خواهد داشت. در این تحقیق با درصد وزنی مختلفی از نانولوله کربنی اقدام به تقویت ورق آلومینیوم دولایه شده است.

شکل ۹ نشان می‌دهد که در ۰/۰۵ درصد وزنی نانولوله کربنی مقدار افزایش استحکام کششی نهایی ورق نانوکامپوزیتی نسبت به



شکل ۱۰: پخش ناهمسان (توده‌ای شدن) نانولوله‌های کربنی در چرخه اول نورد تجمعی

Fig. 10. Inhomogeneous dispersion (agglomeration of CNT) in the first cycle of ARB process.

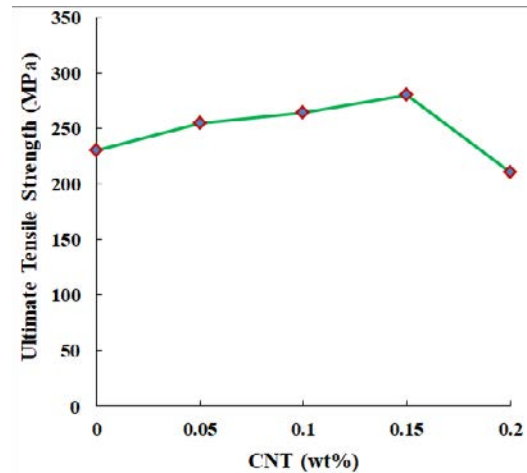
آلومینیوم بوجود آید.

همانطوری که شکل ۱۳ نشان می‌دهد نانولوله کربنی باعث تقویت خصوصیات مکانیکی مخصوصاً استحکام کششی نهایی ورق آلومینیومی شده است. مقدار افزایش استحکام کششی نهایی ورق کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی با بالاتر رفتن چرخه نورد، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. شیب تغییرات استحکام کششی نهایی با بالا رفتن چرخه‌های نورد تجمعی کمتر شده ولی باز هم بخاطر اینکه ذرات نانولوله کربنی بصورت یکنواخت‌تری در زمینه آلومینیومی پخش می‌شوند باعث می‌شود که یک پیوند قوی‌تری بین زمینه و ذرات نانو بوجود آید.

مشاهده شده است که استحکام کششی نهایی ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی در چرخه ۷ نورد، تقریباً $\frac{3}{5}$ برابر استحکام کششی اولیه و در حدود ۱۵ درصد بیشتر از استحکام کششی نهایی ورق نورد تجمعی در چرخه ۷ نورد است.

۳-۲-۳- ضریب کشسانی نمونه‌های تقویت شده با نانولوله کربنی

شکل ۱۵ تغییرات ضریب کشسانی ورق‌های کامپوزیتی نورد تجمعی و ورق‌های آلومینیومی تقویت شده با نانولوله کربنی در چرخه‌های مختلف فرآیند نورد را نشان می‌دهد. تغییرات ضریب کشسانی مربوط به جهت‌گیری کریستالی است [۲۰] و در بیشتر تحقیقات نشان داده شده است که در اعمال کرنش‌های کمتر در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد مقدار ضریب کشسانی کاهش یافته و در



شکل ۹: تغییرات استحکام کششی نهایی ورق نورد شده بر حسب درصد نانولوله کربنی

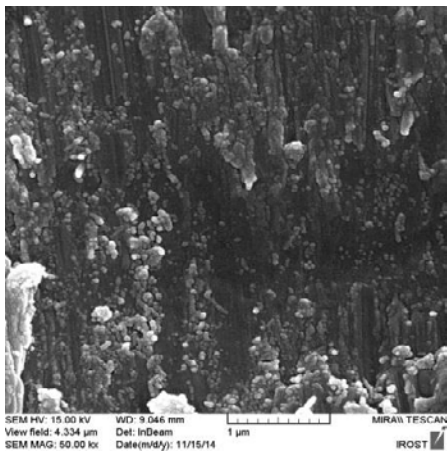
Fig. 9. The changes in the ultimate tensile strength of the ARB-ed sheets.

لایه به یکدیگر سبب اتصال و پیوند خواهد شد. همچنین سختی ذرات نانولوله‌ها بیشتر از فلز بکر (آلومینیوم ۱۲۰۰) است. بنابراین این ذرات می‌توانند لایه اکسیدی سطح را شکسته و سطوح در تماس بیشتری برای اتصال فراهم آورده که این امر موجب بهبود اتصال می‌گردد. یکی از عوامل مهمی که نمونه‌های نورد تجمعی در چرخه‌های بالا استحکام کششی نهایی بالاتری دارند این است که با بالاتر رفتن چرخه نورد، ذرات نانولوله کربنی بصورت یکنواخت‌تری در زمینه آلومینیومی پخش شده است.

همانطوری که عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت مقدار نانولوله‌های کربنی در چرخه‌های بالا به صورت بهینه‌تری نسبت به چرخه پایین در میان لایه‌های آلومینیوم پخش شده‌اند. شکل ۱۰ سطح مقطع از ورق دولایه آلومینیوم تقویت شده با نانولوله کربنی را نشان می‌دهد. همانطوری که از شکل مشخص است نانولوله‌های کربنی به صورت بهینه پخش نشده است.

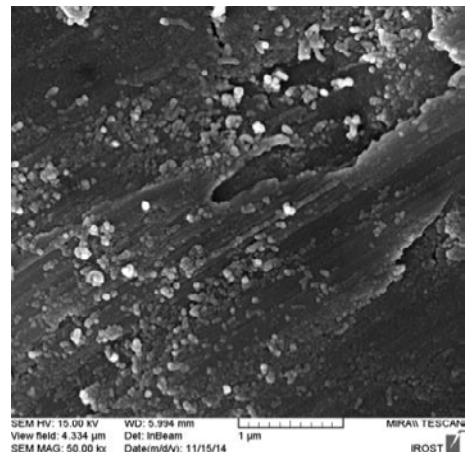
شکل ۱۱ سطح مقطع ورق تقویت شده با نانولوله کربنی در چرخه پنجم را نشان می‌دهد. در این لایه‌ها، نانولوله‌های کربنی به صورت بهینه بر روی سح ورق آلومینیوم پخش شده است.

شکل ۱۲ سطح مقطع ورق تقویت شده در چرخه هفتم را نشان می‌دهد، پخش نانولوله کربنی بر روی ورق آلومینیوم در چرخه هفتم نورد به صورت بهینه‌تری صورت گرفته است که این عمل باعث شده است تا لایه‌های با استحکام کششی نهایی بالا در بین ورق تقویت شده



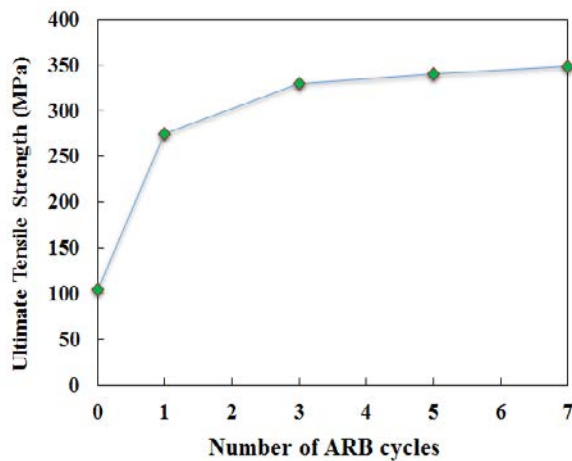
شکل ۱۲: پخش همسان نانولوله‌های کربنی در چرخه هفتم نورد تجمعی

Fig. 12. Homogeneous dispersion of CNT in the seventh cycle of ARB process.



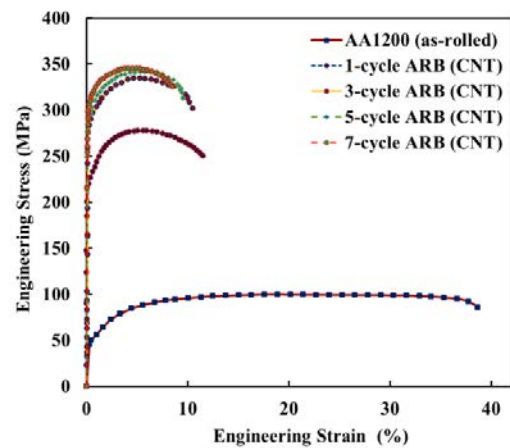
شکل ۱۱: پخش همسان نانولوله‌های کربنی در چرخه پنجم نورد تجمعی

Fig. 11. Homogeneous dispersion of CNT in the fifth cycle of ARB process.



شکل ۱۴: تغییرات استحکام کششی نهایی ورق‌های کامپوزیتی AA1200/CNT در چرخه‌های مختلف فرآیند نورد تجمعی

Fig. 14. The changes of ultimate strength of aluminum reinforced sheets in different cycle ARB process.

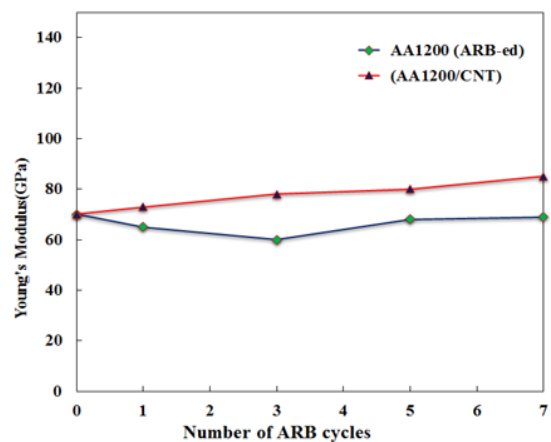


شکل ۱۳: مقایسه نمودار تنش-کرنش مهندسی ورق آلومینیوم ۱۲۰۰ با ورق‌های آلومینیوم نورد شده و آلومینیوم تقویت شده با نانولوله کربنی

Fig. 13. Comparison of engineering stress-strain curve of aluminum sheet 1200 series with ARB-ed sheets and Aluminum sheets reinforced with CNT

کرنش‌های بالای ۵۰ درصد تغییری در مقدار ضریب کشسانی رخ نمی‌دهد [۲۱].

همانطوری که شکل ۱۵ نشان می‌دهد، در فرآیند نورد تجمعی مقدار ضریب کشسانی در چرخه‌های اولیه در حدود ۱۰ درصد کاهش یافته است و با بالا رفتن چرخه فرآیند و با عملیات آنیل در هر چرخه مقداری از اکسیدهای لایه‌ها رسوب سخت شده و ضریب کشسانی افزایش می‌یابد و در کل در فرآیند نورد تجمعی تغییر جزئی در ضریب کشسانی وجود دارد. با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد که در ورق‌های آلومینیومی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی، مقدار ضریب کشسانی از چرخه‌های اولیه فرآیند نورد شروع به افزایش می‌نماید. دلیل افزایش مقدار ضریب کشسانی در این فرآیند، بخاطر مقدار ضریب کشسانی نانولوله کربنی (در حدود ۱ ترا پاسکال) است.



شکل ۱۵: تغییرات ضریب کشسانی ورق‌های کامپوزیتی AA1200/CNT در چرخه‌های مختلف فرآیند نورد تجمعی

Fig. 15. The young's modulus variation of composite sheets AA1200 / CNT in different cycles of accumulative rolling process

- [3] Morovvati M. R., Lalehpour A and Esmacilzare A. Effect of nano/micro B4C and SiC particles on fracture properties of aluminum 7075 particulate composites under chevron-notch plane strain fracture toughness test. *Materials Research Express*, 3 (2016)
- [4] Iijima S., Brabec C., Maiti A., Bernholc J. Structural flexibility of carbon nanotubes. *J Chem Phys* 104(1996): 2089-92
- [5] Morovvati M. R., 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*. April 2018, Volume 95, Issue 9-12, pp 3523-3533.
- [6] Morovvati M. R., Mollaei-Dariani B. The effect of annealing on the formability of aluminum 1200 after accumulative roll bonding. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 30, December 2017, Pages 241-254.
- [7] Dong, S., Tu J., Zhang X. "An investigation of the sliding wear behavior of Cu-matrix composite reinforced by carbon nanotubes, *Material Science Engineering*." 313 (2001): 83-87
- [8] Laha, T. , A. Agarwa, T. Tim, Seal, S. "Synthesis and characterization of plasma spray formed carbon nanotube reinforced aluminum composite." *Material Science Engineering A* 381(2004): 249-258
- [9] Esawi A.M.K., Borady M.A.E. "Carbon nanotube-reinforced aluminium strips." *Composite Science Technology* 68(2008): 486-492
- [10] Xudong, Y., Chunsheng, S., Enzuo, L., Jiajun, L., Naiqin, Z. "Synthesis of uniformly dispersed carbon nanotube reinforcement in Al powder for preparing reinforced Al composites." *Composites: Part A* 42 (2011)1833-1839
- [11] Jinzhi, L., Ming-Jen, T. "Mixing of carbon nanotubes (CNTs) and aluminum powder for powder metallurgy use." *Powder Technology*, 208 (2011): 42-48
- [12] Valiev, R.Z., and Langdon, T.G. "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain

در چرخه‌های ابتدایی مقدار نانولوله کربنی به صورت همسان پخش نمی‌گردند ولی در چرخه‌های بالا، نانولوله‌های کربنی به صورت همسان در زمینه آلومینیومی پخش شده که باعث افزایش ضریب کشسانی و مقدار استحکام کششی نهایی می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر خصوصیات مکانیکی و عوامل موثر بر فرآیند تقویت ورق‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج حاصل از آن به شرح زیر است.

- اتصال ورق‌ها به واسطه درهم رفتگی سطحی آنها و تراوش فلزات پایه به‌درون یکدیگر است در این میان حضور نانولوله کربنی سبب افزایش درهم‌رفتگی و افزایش قفل‌های مکانیکی در فصل مشترک اتصال می‌شود که باعث افزایش در اتصال فصل مشترک می‌گردد.

- نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۵/۱-۵/۰ درصد وزنی نانولوله کربنی باعث افزایش استحکام کششی نهایی ورق‌های نانوکامپوزیت می‌شود ولی افزودن بیش از ۵/۱ درصد وزنی نانولوله کربنی باعث کاهش استحکام کششی نهایی ورق‌های نانوکامپوزیت می‌گردد.

- در چرخه ۷ نورد تجمعی، استحکام کششی نهایی ورق‌های نانوکامپوزیتی در مقایسه با ورق‌های نورد تجمعی در حدود ۱۶ درصد افزایش یافته است و نسبت به ورق آلومینیوم ۱۲۰۰ در حدود ۲۲۰ درصد بوده که افزایش چشمگیری است.

- بطورکلی اندازه ضریب کشسانی در ورق‌های نورد تجمعی شده کاهش جزئی (در حدود ۱۰ درصد) دارد ولی در ورق‌های آلومینیومی تقویت شده با نانولوله کربنی افزایش (در حدود ۲۰ درصد) می‌یابد.

مراجع

- [1] Raju, K. S. R., Raju V. R., Raju P. R. M., Rajesh S., Partha G. "Enhancement of the mechanical properties of an aluminum metal matrix nanocomposite by the hybridization technique." *Journal of Materials Research and Technology* 5 (2016): 241-249
- [2] Mazahery A., Ostad Shabani M. Characterization of cast A356 alloy reinforced with nano SiC composites. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22(2012) 275-280

- [17] Salimi, S. Izadi, H. Gerlich, A.P. “Fabrication of an aluminum–carbon nanotube metal matrix composite by accumulative roll-bonding.” *Journal of Material Science* 46 (2011): 409–415, 2011.
- [18] ASTM E8, Standard test methods for tension testing of metallic materials, Annual Book of ASTM Standards 3, (2001): 1
- [19] Tsuji, N. Ito, Y. Saito, Y. and Minamino, Y. “Strength and Ductility of Ultrafine Grained Aluminum and Iron Produced by ARB and Annealing” *Scripta Materialia* 47 (2002): 893-995
- [20] Honda, K. and Yamada, R. “On the change of elastic constant in metals caused by cold working.” *Sci. Repts, Tohoku Imp, Univ* 17 (1928): 723-741
- [21] Yamaguchi, K., Adachi, H., and Takakura, N., “Effects of plastic strain path on Young’s modulus of sheet metals” *Metals and Materials* (1998): 420-425
- refinement.” *Progress in Materials Science* 51 (2006): 881–981
- [13] Zhilyaev, A.P., Langdon, T. G. “Using high-pressure torsion for metal processing: fundamentals and applications.” *Progress in Materials Science* 53 (2008): 893-979
- [14] Saito, Y., Tsuji, N., Utsunomiya, H., Sakai, T., Hong, R.G., “Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process.” *Scripta materialia*, 39.9 (1998): 1221-1227
- [15] 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* 47.2 (1999): 579-583
- [16] Cave, J.A., and Williams, J.D. “The Mechanisms of Cold Pressure Welding by Rolling.” *Journal of the Institute of Metals* 101 (1975): 203–207

