

بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری کامپوزیت Al/Brass ساخته شده به روش اتصال

نوردی تجمعی

نسیم نصیریان^{۱*} و خلیل رنجبر^۲

چکیده

در این پژوهش، برای نخستین بار تولید کامپوزیت Al/Brass به وسیله روش نورد اتصالی تجمعی^۳ انجام شد. آلومینیوم خالص تجاری با ضخامت ۲۰۰ میکرون به عنوان زمینه و برنج ۷۰/۳۰ با ضخامت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرون به عنوان تقویت کننده تا ۷ پاس نورد استفاده شد. پس از هر پاس نمونه‌ها مورد ارزیابی‌های ریزساختاری و مکانیکی قرار گرفتند. برای بررسی ساختار بدست آمده در هر پاس از میکروسکوپ نوری و الکترونی و برای بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها از آزمون کشش استفاده شده است. نتایج بررسی ریزساختار نشان می‌دهد که با افزایش پاس‌های نورد فاز سخت‌تر برنج شکسته شده و در فاز نرم‌تر آلومینیوم پراکنده می‌شود. با افزایش پاس‌های نورد فاز سخت یکنواخت‌تری در کامپوزیت ایجاد می‌شود. نتایج نشان دادند که در کامپوزیت با ضخامت برنج ۱۰۰ میکرون به دلیل عدم اتصال فاز زمینه با تقویت کننده، تغییر چندانی در رفتار مکانیکی نسبت به آلومینیوم خالص ایجاد نمی‌شود. در بررسی استحکام نهایی نمونه ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرون بر حسب افزایش پاس‌های نورد تغییرات نامنظم استحکام با افزایش تعداد پاس مشاهده می‌شود که البته، حالت بهینه ای برای یافتن بیش‌ترین استحکام وجود دارد. هم‌چنین، نوع شکست سطوح ایجاد شده در آزمون کشش، نرم گزارش شده است.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت‌های زمینه فلزی، نورد اتصالی تجمعی، ریز ساختار، استحکام کششی، سطوح شکست.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مواد دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز.

۲- استادیار، گروه مهندسی مواد دانشگاه شهید چمران اهواز.

*- نویسنده مسئول مقاله: Nsmnasirian@gmail.com

پیشگفتار

فاز سخت‌کننده کامپوزیت استفاده می‌شود. در بررسی‌هایی که در مورد تغییر شکل پلاستیک بر چند لایه‌های فلزی انجام می‌شود، رفتار الاستیک و پلاستیک آن‌ها زیر اعمال تنش مهم‌ترین موضوع می‌باشد. در سال ۲۰۰۵ چن [۵] و همکارانش کامپوزیت Al/Mg تولید کردند. در سال ۲۰۰۶ یانگ و ژانگ [۶] کامپوزیت سه لایه Ti/Al/Nb و مین [۷] و همکارانش کامپوزیت Al/Ni را ساختند. در سال ۲۰۰۹ یانگ [۸] روی تشکیل ترکیب TiAl₃ در نورد اتصالی تجمعی Ti/Al و مظفری [۹] و همکارانش به تولید کامپوزیت Al/Ni پرداختند. در سال ۲۰۱۰ جماعتی [۱۰] و همکارش به تولید کامپوزیت Al/Alumina و سان [۱۱] و همکارانش به تولید کامپوزیت Cu/Zr پرداختند. این پژوهش‌ها نمونه‌هایی از انجام نورد اتصالی تجمعی در تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای و پودری می‌باشند.

مواد و روش پژوهش

در این پژوهش از آلومینیوم خالص تجاری ۲۰۰ میکرون و برنج ۷۰/۳۰ با ضخامت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرون جهت انجام پژوهش‌های استفاده شد. تعداد لایه‌های آلومینیوم و برنج تشکیل‌دهنده کامپوزیت جهت انجام پژوهش ۵ لایه انتخاب شد که به صورت سه لایه آلومینیوم و دو لایه برنج روی هم قرار گرفته شده اند. در این کامپوزیت ورق‌های برنج به عنوان فاز سخت شونده در میان لایه‌های آلومینیوم به عنوان زمینه قرار گرفتند. هر ورق ابتدا در حمام استون تمیز و چربی زدایی گردیده و سپس به وسیله ابزار برس سیمی اتوماتیک، از دو سو برسکاری و زبر می‌شود. پس از آماده‌سازی سطح لایه‌ها نمونه‌ها زیر غلطک نورد قرار می‌گیرند. ابعاد نمونه‌های آماده‌شده برای نورد 200 mm×50 mm×1mm و 200 mm×50 mm×0.8 mm در نظر گرفته شد. نورد به وسیله دستگاه نورد ۲۰ تن با قطر غلطک ۱۵ سانتی متر و سرعت ۵ متر بر دقیقه انجام شد. پس از انجام نخستین نورد و ایجاد اتصال بین لایه‌ها نمونه عبور داده شده از طول به دو نیم تقسیم و دوباره در حمام استون قرار داده شد. سپس بار دیگر با برس سیمی اتوماتیک زبر گشته، روی هم قرار گرفته و نورد می‌شود.

در گذشته پیش از آن‌که روش‌های تغییر پلاستیک شدید کشف شود، برای بهبود دانه‌ها در مواد فلزی از روش کار پلاستیکی و آنیل از راه جوانه‌زنی و رشد، اندازه دانه ۱۰ میکرومتر بدست می‌آمد. سایتو نخستین بار نورد اتصالی تجمعی را روی آلومینیوم خالص تجاری با اعمال ۸ سیکل انجام داد و اندازه دانه خیلی ریز^۱ را از ۳۷ میکرومتر به کمتر از ۱ میکرومتر رساند. هم‌چنین، استحکام کششی را از ۹۰ به ۳۰۰ مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول را از ۴۰٪ به ۱۰٪ رساند. با یک نگاه اجمالی در می‌یابیم که فعالیت‌ها در زمینه اتصال نوردی تجمعی بر مواد با انرژی نقص چیدن^۲ متوسط و کم مانند مس و برنج کمتر انجام گرفته است [۱]. استحکام‌دهی هال-پیچ بر اساس افزایش در کسر حجمی مرز دانه‌ها به علت لغزش نابه‌جایی‌ها می‌باشد [۲]. در ابتدای کار نابه‌جایی‌ها درون دانه‌ها تجمع می‌کنند و زیر دانه‌هایی با مرزهای زاویه کمتر از ۱۵ درجه ایجاد می‌کنند. با افزایش کرنش فاصله بین این مرزهای زاویه کم کاهش می‌یابد و زاویه چرخش آنها افزایش می‌یابد [۳]. در سال‌های اخیر هوانگ، تی سو جی و یو ای جی و همکارانش دریافته‌اند که مرزهای لایه‌ای در موادی که مورد این آزمون قرار گرفته‌اند شامل بیش‌تر مواد زاویه بزرگ هستند در حالی که اگر در سطح مقطع به گونه عمودی حرکت کنیم، در بین لایه‌ها مخلوطی از مرزهای زاویه کم و زاویه بزرگ را می‌بینیم. روشن است که این مرزهای زاویه بزرگ به موازات جهت نورد، خواص مکانیکی منحصر به فردی را از خود نشان می‌دهند [۲]. امروزه، با این‌که فعالیت‌های گسترده‌ای در زمینه اتصال نوردی تجمعی انجام شده، ولی پژوهشگران کمتر به اعمال نورد اتصالی تجمعی روی فولی‌هایی با دو فلز متفاوت پرداخته‌اند [۴]. کامپوزیت‌های تولید شده به روش نورد اتصالی تجمعی به دو صورت کامپوزیت‌های پودری و کامپوزیت‌های لایه‌ای می‌باشند. در کامپوزیت‌های لایه‌ای ورقه‌های فاز سخت را در میان ورق‌های فاز نرم قرار می‌دهند. در کامپوزیت‌های پودری به جای ورق فاز سخت از ذرات پودری به عنوان

¹ - Ultra Fine Grain (UFG)

² - Stacking Fault Energy (SFE)

ایجاد این ساختارها در کامپوزیت‌ها توزیع تنش‌ی نایکنواخت در لایه‌هاست که به دلیل وجود اصطکاک در محل تماس غلطک‌ها و سطوح داخل کامپوزیت می‌باشد. این پدیده منجر به ایجاد تنش اصطکاکی در سطوح تماس و تنش‌های باقیمانده نایکنواخت درون سطوح بین لایه‌ها می‌گردد [۱۲]. نمونه‌های با ضخامت برنج ۱۰۰ میکرون نسبت به نمونه‌های با ضخامت برنج ۲۰۰ میکرون بیش‌تر شکسته و ریز می‌شوند. فاز برنج در نمونه‌های با ضخامت برنج ۲۰۰ میکرون در وسط بیش‌تر دچار شکست می‌شوند، ولی در نمونه‌های با ضخامت برنج ۱۰۰ میکرون شکستن و ریز شدن فاز برنج در سراسر سطح مقطع یکسان می‌باشد. ناپیوستگی بین دو فاز تشکیل دهنده کامپوزیت و جدایش در مرز مشترک بین آنها بیش‌تر در نمونه‌های با ضخامت برنج ۱۰۰ میکرون مشاهده شد. در این نمونه‌ها ایجاد ترک و ناپیوستگی در فاز زمینه آلومینیوم نیز مشاهده گردید. در صورتی‌که در نمونه‌های با ضخامت برنج ۲۰۰ میکرون ترک و از هم گسیختگی در فاز زمینه آلومینیوم مشاهده نشد. در این کامپوزیت فاز سخت شکسته می‌شود، ولی در گزارش قلندری [۱۲] و ایزدجو [۱۳] فاز سخت یکنواخت بوده و با افزایش پاس‌های نورد شکست در آنها رخ نداده است. یانگ [۸] و همکارانش گزارشی مبنی بر وجود ارتباط میان افزایش نسبت ضخامت فاز نرم به فاز سخت با افزایش کارسختی و در نتیجه، تغییر شکل بیش‌تر فاز زمینه آرایه نموده‌اند. در این پژوهش نسبت ضخامت آلومینیوم به برنج در کامپوزیت با ضخامت برنج ۱۰۰ میکرون برابر ۲ و در کامپوزیت با ضخامت برنج ۲۰۰ میکرون برابر یک است. اگر این نسبت‌ها را در کنار مطلب عنوان شده به وسیله یانگ قرار دهیم، به دلیل افزایش در کامپوزیت با ضخامت برنج ۱۰۰ میکرون، شاهد خرد شدن بیش‌تر فاز برنج در این کامپوزیت نسبت به نمونه‌های با ضخامت برنج ۲۰۰ میکرون هستیم. افزون بر این، به علت بالاتر بودن خاصیت الاستیسیته آلومینیوم نسبت به برنج، عامل نسبت ضخامت تشدید می‌گردد. در شکل‌های ۳ و ۴ نمودارهای تنش کرنش مهندسی برای کامپوزیت‌های ساخته شده و در شکل ۵ نمودار مقایسه‌ای تنش-کرنش مهندسی برای نمونه‌های کامپوزیتی با ضخامت برنج ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرون آورده شده

در شکل ۱ روند انجام نورد اتصالی تجمعی برای کامپوزیت Al/Brass نمایش داده شده است. جهت انجام بررسی‌های ساختاری برای کامپوزیت‌های ساخته شده از همه سیکل‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی مدل VEGA/TESCAN ساختار مواد و تغییرات ایجاد شده روی لایه‌ها و همچنین، نوع شکست در پاس‌های ابتدایی و انتهایی هر نوع کامپوزیت در آزمون کشش مورد مشاهده و بررسی قرار گرفت. نمونه‌های کامپوزیتی مورد آزمون کشش قرار گرفتند. دستگاه کشش بکار رفته Instron Machine بوده که با سرعت ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انجام شده است.

نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های کامپوزیتی Al/Brass با ضخامت برنج ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرون در پاس‌های گوناگون در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در تصاویر دیده می‌شود، از پاس صفر به ترتیب روند ایجاد ترک و بسته شدن آن تکرار می‌شود. بدین صورت که در پاس صفر، دو، چهار و شش ایجاد ترک و در پاس‌های یک، سه و پنج بسته شدن ترک اتفاق می‌افتد. در پاس هشت نیز کلا بافت کامپوزیت از هم پاشیده شده است و ادامه فرایند نورد اتصالی تجمعی ناممکن است. با افزایش پاس‌های نورد فاز سخت برنج افزون بر ریز شدن، نازک می‌شود. همچنین، در تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده از آلیاژ Al/Brass با ضخامت برنج ۲۰۰ میکرون شروع گلویی شدن از پاس دوم دیده می‌شود. با افزایش پاس‌های نورد روند نازک شدن نمونه‌های برنج ادامه یافته و با ایجاد گلویی شدن و شکستن و جدایش لایه‌های برنج، کامپوزیت یکنواخت‌تر با ذرات سخت ریزتر و پراکنده ایجاد می‌شود. به گونه‌ای که در پاس‌های بالاتر شاهد دانه‌های هم محو‌تر، یک اندازه‌تر و ریزتر هستیم. در این نمونه‌ها ریزتر شدن فاز برنج بیش‌تر در مرکز کامپوزیت رخ می‌دهد تا در لبه‌های کامپوزیت. مظفری [۹] و همکارانش و همچنین مین [۷] و همکارانش نیز گزارشی مشابه از ایجاد فاز سخت هم محور در مرکز کامپوزیت ارائه نموده‌اند. یکی از عوامل موثر در

^۱ - Yang

است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌گردد روند تغییرات استحکام کششی در هر دو نوع کامپوزیت مشابه می‌باشد. با این تفاوت که استحکام کششی در نمونه‌های با ضخامت ۱۰۰ میکرون برنج بسیار پایین‌تر است. در نمونه‌های با ضخامت ۲۰۰ میکرون برنج بیش‌ترین استحکام کششی در پاس یک به مقدار ۵۷۷ مگا پاسکال و پس از آن در پاس پنج با مقدار ۴۷۶ مگا پاسکال بیش‌ترین استحکام کششی مشاهده می‌شود. هم‌چنین، در نمونه‌های با ۱۰۰ میکرون برنج بیش‌ترین استحکام کششی ۸۳ مگا پاسکال در پاس یک می‌باشد. کم‌ترین استحکام کششی در کامپوزیت‌های با ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرون ضخامت برنج به ترتیب ۵۲ مگا پاسکال در پاس چهار و ۱۶۸ مگا پاسکال در پاس ۶ می‌باشد. در بیش‌تر پژوهش‌های انجام گرفته، افزایش استحکام کششی در تمام سیکل‌ها و یا کاهش استحکام کششی در سیکل‌های اولیه و پس از آن افزایش این استحکام و رسیدن به بیش‌ترین استحکام در پاس هفت گزارش شده است، اما در کامپوزیت Al/Brass افزایش و کاهش استحکام به صورت یک پاس در میان مشاهده شده است. علت این تغییرات را می‌توان در تصاویر ساختاری نمونه‌ها جویا شد. همان‌گونه که در تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های با ضخامت برنج ۱۰۰ میکرون مشاهده می‌شود، در پاس‌های نورد زوج جدایش ساختاری بین فازهای برنج و آلومینیوم مشاهده می‌شود. در پاس‌های فرد این فضای خالی بین دو فاز تشکیل دهنده کامپوزت از بین رفته و اتصال خوبی بین دو فاز بوجود می‌آید. در پاس‌های زوج اتصال کامل بین دو فاز وجود ندارد؛ در نتیجه، حین انجام آزمون کشش مکان‌های خالی بین دو فاز تمرکز تنش و گلوبی شدن موضعی را ایجاد کرده و باعث استحکام کششی کم و پارگی نمونه در تنش‌های کششی پایین می‌شود. در سیکل‌های نورد فرد در نتیجه اتصال مناسب استحکام کششی و ازدیاد طول افزایش می‌یابد. در نمونه‌های ساختاری کامپوزیت با ضخامت برنج ۲۰۰ میکرون جدایش بین فازی مشاهده نمی‌شود، ولی به علت شباهت رفتاری استحکام کششی و ازدیاد طول احتمال وجود این پدیده بسیار زیاد است. مکانیزم استحکام دهی با کرنش برشی با دیگر فرایندها در کرنش‌های بالا متفاوت است. این مکانیزم به دو عامل بستگی دارد. نخستین امکان، اثر تغییر شکل

برشی شدید زیر سطح می‌باشد. این تغییر شکل برشی در اثر اصطکاک بین غلطک و نمونه بدون استفاده از روانکار گزارش شده است که باعث ایجاد کرنش معادل و ریز دانه شدن می‌شود. این عامل با تکرار نورد اتصالی تجمعی می‌تواند تا قسمت‌های مرکزی نمونه گسترش یابد. عامل دیگر ایجاد سطوح جدید می‌باشد. شمار بسیار زیادی سطوح جدید با افزایش نورد اتصالی تجمعی ایجاد می‌شود. این سطوح ساختار فیبری گسترش یافته‌ای که بر اثر نورد پیوستگی دارد را نشان می‌دهد. از دیگر عواملی که باعث استحکام دهی می‌شود، حضور ساختار دوتایی است. تنش‌های باقی‌مانده بین لایه‌ها به علت ایجاد تغییر شکل همزمان ورق‌های Al/Brass زیر کرنش پلاستیک زیاد ایجاد می‌شوند. همان‌گونه که می‌دانیم، برنج ساختار بلوری FCC مثل آلومینیوم دارد، اما برنج مدول الاستیسیته کم‌تر دارد و این اختلاف در دو فاز تشکیل دهنده کامپوزیت بر روند تغییر شکل همزمان دو فاز اثر می‌گذارد [۹ و ۱۲]. شکل ۶ تصاویر SEM از سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی با ضخامت برنج ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرون را نشان می‌دهد. در تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی وجود سطوح فیبری به همراه حفرات کشیده شده و برشی مشاهده می‌گردد که بیانگر شکست نرم با مکانیزم پارگی به‌وسیله برش داخلی بین حفرات می‌باشد. در این مکانیزم پارگی با تغییر شکل برشی ساده ایجاد می‌شود که با نام پارگی حفره‌های برشی نامگذاری می‌شود. هم‌چنین، در سیکل‌های بالاتر در هر دو کامپوزیت گرایش به سمت شکست نرم‌تر قابل مشاهده است و به نظر می‌آید مکانیزم شکست از مکانیزم نواحی برشی در پاس‌های اولیه نورد به سمت مکانیزم تشکیل و تجمع میکرو حفرات روی سطح شکست و تجمع نابه‌جایی‌های فعال در پاس آخر و در نهایت، پارگی حفرات برشی تغییر می‌یابد. شکست در دمای پایین معمولاً به صورت ترد و یا نرم رخ می‌دهد. نوع شکست در بررسی‌های میکروسکوپی به وسیله میکروسکوپ الکترونی قابل تشخیص است. دو نوع مکانیزم شکست نرم وجود دارد که بسته به موقعیت و نوع مواد تشکیل‌دهنده کامپوزیت یکی از این دو عمل می‌کند. مکانیزم نواحی برشی و مکانیزم رشد حفره‌ها [۹، ۱۰]. جماعتی و طرفی‌نژاد [۱۰] شکست نرم را در سطوح شکست نمونه‌های

۲) هر چه تفاوت سختی دو فاز با یکدیگر بیش تر باشد، احتمال خرد شدن فاز سخت کننده در کامپوزیت بیش تر می شود.

۳) با افزایش پاس نورد ساختار به سمت همگن شدن فاز سخت شکسته شده پیش می رود که این پدیده منجر به ایجاد کامپوزیتی با ذرات سخت پراکنده شده به صورت یکنواخت می گردد. این مورد در کامپوزیت ۲۰۰ بیش تر دیده می شود که البته ذرات سخت ریز شده در وسط کامپوزیت بیش تر مشاهده شده است.

۴) استحکام کششی در کامپوزیت های ۱۰۰ و ۲۰۰ با افزایش سیکل نورد همانند سختی روند سینوسی را نشان می دهد. در این کامپوزیت ها بیش ترین استحکام کششی در سیکل ۱ در کامپوزیت ۲۰۰ و در سیکل پنج در کامپوزیت ۱۰۰ می باشد. در نتیجه افزایش نورد برای کامپوزیت ۲۰۰ تاثیری در افزایش استحکام مشاهده نمی شود، ولی در کامپوزیت ۱۰۰ افزایش نورد باعث افزایش استحکام در پاس پنج شده است.

۵) شکست در پاس های گوناگون به صورت نرم می باشد.

کامپوزیت Al/Alumina مشاهده نمودند و علت شکست را تشکیل حفره های هم محور و یا دایره ای در کنار فیبرهای خاکستری می دانند. آنها چگونگی عملکرد مکانیزم شکست نرم را چنین توجیه می کنند که مکانیزم به وسیله تغییر شکل برشی ساده رخ می دهد که به پارگی حفره های برشی شناخته شده است. در نهایت، شکست به وسیله برش حفره ها رخ می دهد. جماعتی و طرقي نژاد [۱۰] و مظفری و دانش منش [۹] در گزارشی که از سطوح شکست ارائه کرده اند وجود سطوح یکپارچه را به وسیله میکروسکوپ الکترونی گزارش کرده اند به گونه ای که تمایزی بین لایه های تشکیل دهنده کامپوزیت وجود ندارد و علت این امر را پیوند بسیار قوی بین لایه های تشکیل دهنده کامپوزیت می دانند.

نتیجه گیری

۱) هرچه نسبت ضخامت لایه های تشکیل دهنده کامپوزیت به یکدیگر نزدیک تر باشد، شروع شکسته شدن در پاس های بالاتر نورد رخ می دهد.

References

- 1- M. Karlík, P. Homola, and M. Slámová, Accumulative roll-bonding: first experience with a twin-roll cast AA8006 alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 378, 322-325, 2004.
- 2- Ch. Kwan, Z. Wang, and S. B. Kang, Mechanical behavior and microstructural evolution upon annealing of the accumulative roll-bonding (ARB) processed Al alloy 1100, *Materials Science and Engineering A* 480, 148-159, 2008.
- 3- B.L. Li, N. Tsuji, and N. Kamikawa, Microstructure homogeneity in various metallic materials heavily deformed by accumulative roll-bonding, *Materials Science and Engineering A* 423, 331-342, 2006.
- 4- G. Min, J.M. Lee, S.B. Kang, and H.W. Kim, Evolution of microstructure for multilayered Al/Ni composites by accumulative roll bonding process, *Materials Letters* 60, 3255-3259, 2006.
- 5- M.C. Chen, H.C. Hsieh, and W. Wu, The evolution of microstructures and mechanical properties during accumulative roll bonding of Al/Mg composite, *Journal of Alloys and Compounds* 416, 169-172, 2006.

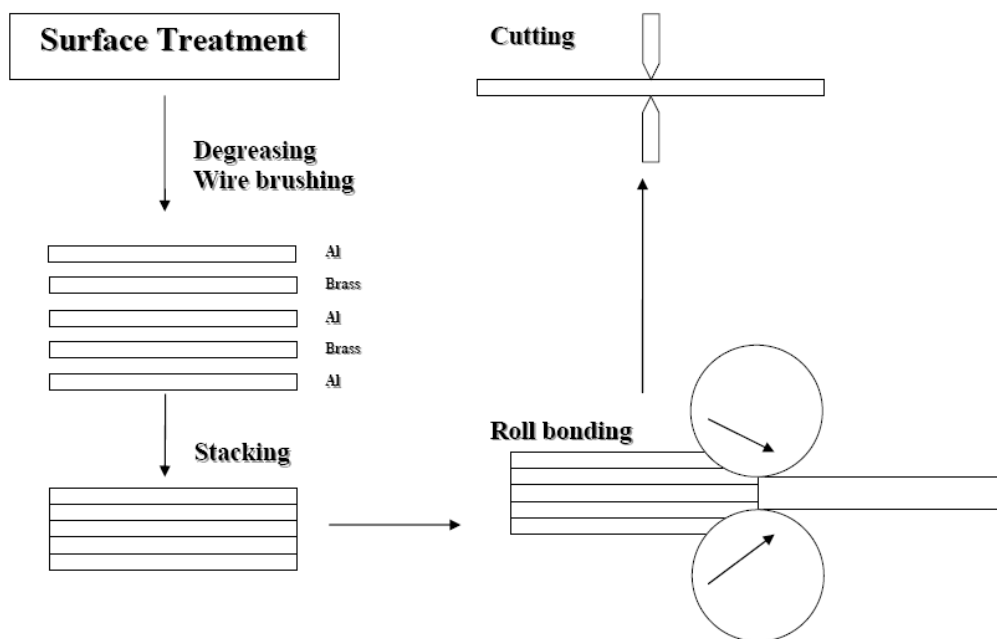
- 6- R. Zhang, and V.L. Acoff, processing sheet materials by accumulative roll bonding and reaction annealing from Ti/Al/Nb elemental foils, *Materials Science and Engineering A* 463, 67-73, 2007.
- 7- G. Min, J.M. Lee, S.B. Kang, and H.W. Kim, Evolution of microstructure for multilayered Al/Ni composites by accumulative roll bonding process, *Materials Letters* 60, 3255-3259, 2006.
- 8- D. Yang, P. Hodgson, and C. Wen, The kinetics of two-stage formation of TiAl₃ in multilayered Ti/Al foils prepared by accumulative roll bonding, *Intermetallics* 17, 727-732, 2009.
- 9- A. Mozaffari, H. Danesh Manesh, and K. Janghorban, Evaluation of mechanical properties and structure of multilayered Al/Ni composites produced by accumulative roll bonding (ARB) process, *Journal of Alloys and Compounds* 489, 103-109, 2010.
- 10- R. Jamaati, and M.R. Toroghinejad, Manufacturing of high-strength aluminum/alumina composite by accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering A* 527, 4146-4151, 2010.

11- Y.F. Sun, N. Tsuji, H. Fujii, and F.S. Li, Cu/Zr nanoscaled multi-stacks fabricated by accumulative roll bonding, Journal of Alloys and Compounds, 2010.

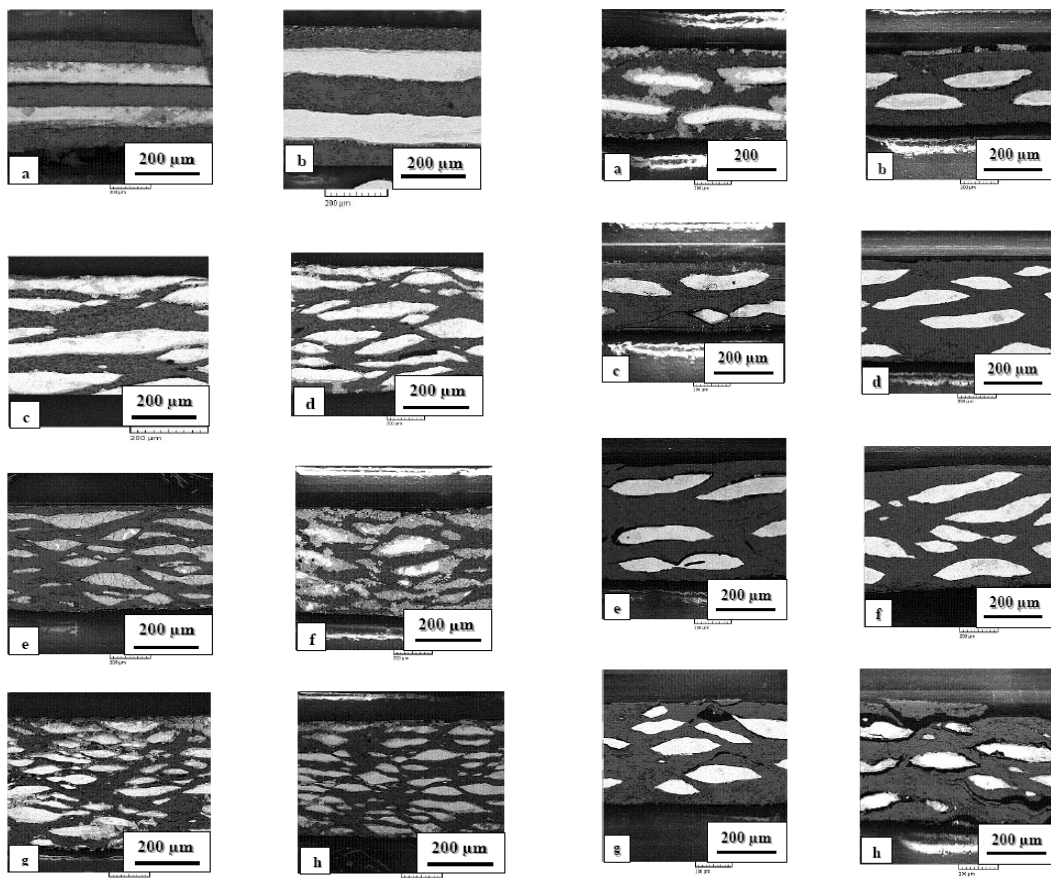
12- L. Ghalandari, and M.M. Moshksar, High-strength and high-conductive Cu/Ag multilayer produced by ARB, 172–178, 2010.

13- M. Ezadjoo, H. Daneshmand. And K. Janghorban. Journal of Alloy compound 406-415, 474, 2009.

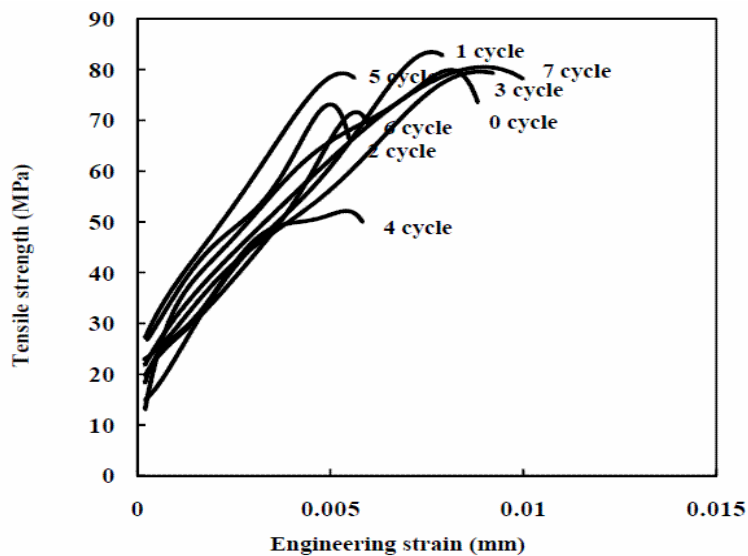
پیوست‌ها



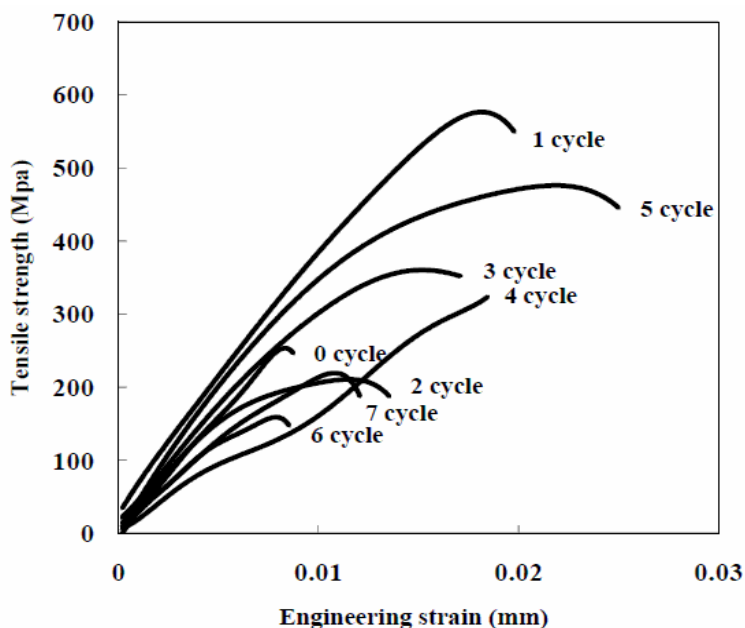
شکل ۱- چگونگی انجام نورد کامپوزیت ۵ لایه ای Al/Brass در پژوهش انجام گرفته.



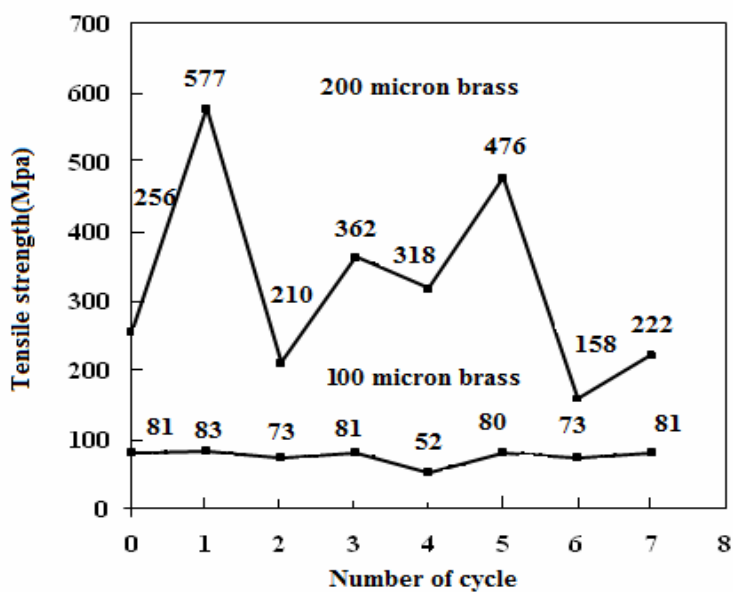
شکل ۲- تصاویر SEM از نمونه‌های کامپوزیتی سمت راست با ضخامت برنج ۱۰۰ میکرون و سمت چپ با ضخامت ۲۰۰ میکرون - a - پاس صفر - b - پاس یک - c - پاس دوم - d - پاس سوم - e - پاس چهارم - f - پاس پنجم - g - پاس ششم - h - پاس هفتم.



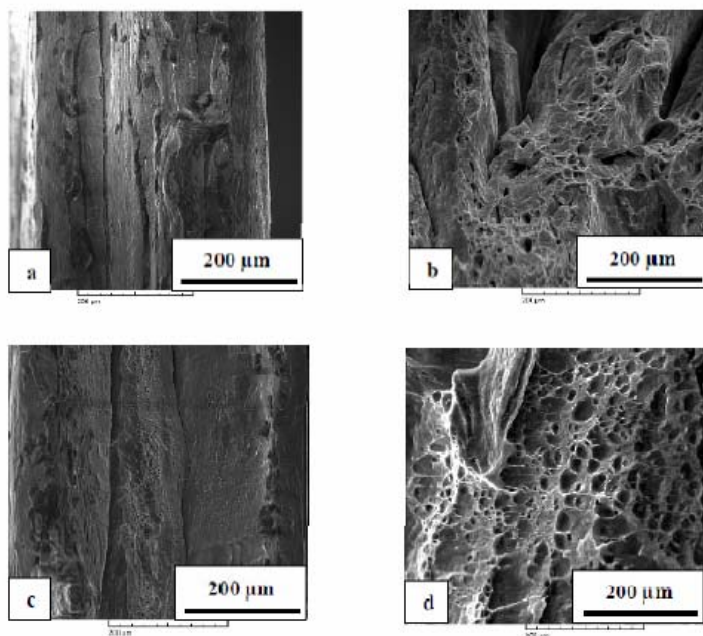
شکل ۳- نمودار تنش- کرنش مهندسی برای نمونه‌های کامپوزیتی با ضخامت ۱۰۰ میکرون در پاس‌های گوناگون در آزمون کشش.



شکل ۴- نمودار تنش- کرنش مهندسی برای نمونه های کامپوزیتی با ضخامت ۲۰۰ میکرون در پاس های گوناگون در آزمون کشش.



شکل ۵- مقایسه استحکام کششی با افزایش پاس برای نمونه های کامپوزیتی با ضخامت های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرون در آزمون کشش.



شکل ۶- تصویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه های کامپوزیت در سیکل های (a) 100-0 (b) 100-7 (c) 200-2 (d) 200-7.

