



بررسی ساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم/برنج تولید شده با فرآیند نورد تجمعی

علی رخشنده^۱، محمدعلی میرزایی^{*}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۸
بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۰۳
پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۱۲/۲۹

کلمات کلیدی:

تغییر شکل پلاستیک شدید
اتصال نورد تجمعی
کامپوزیت آلومینیوم/برنج

خلاصه: فرآیند نورد تجمعی یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است که برای ساخت کامپوزیت آلومینیوم/برنج ریزدانه توسط نویسندگان این مقاله بررسی شده است. در تحقیق حاضر کامپوزیت زمینه آلومینیومی با برنج توسط فرآیند اتصال نوردی تجمعی در دمای اتاق، بدون عملیات حرارتی بین سیکلی تقویت شده است. استحکام کششی و سختی کامپوزیت در سیکل اول فرآیند افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. در سیکل‌های بعدی این فرآیند خواص مکانیکی تغییر چندانی نمی‌کند. بعد از هفت سیکل انجام فرآیند استحکام کششی و سختی کامپوزیت نسبت به نمونه اولیه آلومینیوم به ترتیب ۴۶ و ۸۵ درصد افزایش یافت. همچنین از یاد طول تا سیکل دوم کاهش شدید داشته و در سیکل‌های بعدی مقدار کمی افزایش می‌یابد. این تغییرات در خواص مکانیکی در طول فرآیند نورد تجمعی به دلیل کرنش سختی و مکانیزم کارسرد در سیکل‌های ابتدایی و ریزشدن دانه‌ها در سیکل‌های پایانی این فرآیند می‌باشد. نتایج ریزساختار کامپوزیت نشان می‌دهد که میانگین اندازه دانه‌های کامپوزیت تولید شده به مقدار ۲۵۰ نانومتر رسیده و ذرات فلز برنج با افزایش تعداد سیکل فرآیند، توزیع یکنواخت‌تری پیدا می‌کند.

۱- مقدمه

مواد با دانه‌های بسیار ریز^۱ که اندازه دانه آن‌ها کمتر از یک میکرون باشد خواص مکانیکی ویژه‌ای دارند. برای ساخت مواد با دانه‌های بسیار ریز دو روش کلی تعریف شده است: روش‌های "پایین به بالا" و روش‌های "بالا به پایین". در روش "پایین به بالا" مواد با دانه‌های بسیار ریز با گردآوری اتم‌های مجزا یا با تراکم نانو ذرات ساخته می‌شود. مثال‌های این روش شامل آلیاژسازی مکانیکی، رسوب شیمیایی بخار و انجماد سریع می‌باشد. این روش‌ها برای تولید پودرهایی با اندازه دانه کمتر از ۱۰۰ نانومتر مناسب هستند [۱]. روش "بالا به پایین" متفاوت است چون در این روش ماده جامد بالکی با اندازه دانه نسبتاً درشت تحت فرآیند قرار می‌گیرد تا ریزساختاری با دانه‌های بسیار ریز از طریق ایجاد کرنش زیاد تولید شود. مزیت این روش این است که چگالی تئوری ماده را ثابت نگه داشته و توانایی تولید نمونه‌های نسبتاً بزرگ را دارد. روش "بالا به پایین" شامل فرایندهایی است که در آن تغییر شکل شدید پلاستیک اعمال می‌شود. تغییر شکل پلاستیک شدید^۲ یک فرآیند مناسب برای تولید مواد بالکی با اندازه دانه نانومتری

می‌باشد. همچنین تغییر شکل ماده تا کرنش‌های برشی شدید زیر دمای تبلور مجدد و بدون عملیات حرارتی میانی صورت می‌گیرد [۱]. هم‌اکنون کرنش‌های پلاستیکی بسیار بزرگی در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید استفاده می‌شود تا ریزساختارهایی با دانه‌های بسیار ریز در مواد تشکیل گردد. فرآیندهایی مانند فشار تحت کانال زاویه‌ای با مقطع یکسان^۳ [۲]، اکستروژن و فشار سیکلی^۴ [۳] و پیچش تحت فشار بالا^۵ [۴] برخی از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشند. در این فرآیندها ثابت ماندن ابعاد نمونه، ویژگی مشترکی می‌باشد که در نتیجه آن اعمال کرنش‌های برشی بسیار بالا بر ماده امکان‌پذیر است. در این فرآیندها میزان تولید پایین بوده و در اغلب موارد استفاده از ماشین‌های شکل‌دهی با ظرفیت بار بالا و قالب‌های گران‌قیمت ضروری است. از بین این فرآیندها، فرآیند نورد تجمعی برای بسیاری از مواد فلزی با موفقیت انجام شده است.

در سال ۱۹۹۸ سایتو و تی‌سوجی [۵] یک روش جدید به نام نورد تجمعی^۶ اختراع کردند که در آن اعمال کرنش‌های بالا فقط با نورد کردن صورت می‌گیرد و از آنجایی که نورد سودمندترین روش جهت

3 Equal Channel Angular Pressing

4 Cyclic Extrusion Compression

5 High Pressure Torsion

6 Accumulative Roll Bonding

1 Ultrafine Grain

2 Severe Plastic Deformation

* نویسنده‌دار مکاتبات: Mirzaima@hormozgan.ac.ir



عرض بریده شدند. در شکل ۲ شماتیک فرآیند نورد تجمعی نشان داده شده است. سپس ورق‌ها در حمام استون چربی‌زدایی شده و عملیات برس کاری برای ایجاد سطح خراشیده و زیر با استفاده از برس دایره‌ای با قطر ۵۰ میلی‌متر با سیم‌های فولادی به قطر ۰/۳ میلی‌متر روی سطوح ورق‌ها انجام شد. یک ورق برنج بین دو ورق آلومینیوم قرار گرفت و برای جلوگیری از لغزش ورق‌ها بر روی هم، در چهار گوشه آن‌ها سوراخ ایجاد شده و ورق‌ها با استفاده از سیم مسی روی یکدیگر محکم بسته شدند. حال برای تولید کامپوزیت چندلایه اولیه ورق‌ها تحت فرآیند نورد با کاهش ضخامت ۶۰ درصد قرار گرفته تا ضخامت لایه‌ها از ۲/۵ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر کاهش یابد.

۲-۳- فرآیند نورد تجمعی

کامپوزیت چند لایه اولیه از وسط و به طور مساوی بریده شده و مراحل قبل شامل شستشو با استون برای از بین بردن چربی‌ها و آلودگی‌های موجود روی سطوح، برس کاری سطوح چربی‌زدایی شده، سوراخ نمودن چهار گوشه ورق‌ها و بستن روی هم با سیم مسی انجام شده ولی این بار عملیات نورد با کاهش ضخامت ۵۰ درصدی روی کامپوزیت اولیه انجام می‌شود. عملیات نورد تجمعی به وسیله دستگاه نورد ۲۰ تن با قطر غلطک‌های ۱۴۰ میلی‌متر با سرعت ۶۷ دور بر دقیقه، در دمای اتاق و بدون عملیات حرارتی بین سیکلی تا شش سیکل تکرار شد.

۲-۴- بررسی خواص مکانیکی

به منظور بررسی خواص مکانیکی ورق‌های تولید شده، آزمون کشش تک محوره در دمای محیط با نرخ کرنش ۰/۰۱ بر ثانیه با استفاده از دستگاه سانتام اس.تی.ام ۱۲۵۰ انجام شد. برای هر سیکل، دو نمونه جهت آزمون کشش در راستای نورد به وسیله دستگاه وایرکات مطابق با استاندارد ASTM E8/E8M تهیه شد. آزمون میکروسختی ویکرز به وسیله دستگاه کوپا^۱ تحت نیروی ۱۰۰ گرم و زمان اعمال نیروی ۱۰ ثانیه در صفحه طولی نمونه‌ها انجام شد. میکروسختی برای هر نمونه در بیش از هفت نقطه مختلف اندازه‌گیری گردید و بعد از حذف کمترین و بیشترین مقادیر، میانگین سختی نقاط دیگر محاسبه و گزارش شده است.

۲-۵- بررسی ساختار

جهت مشاهده نحوه توزیع و شکست لایه‌های برنج در زمینه آلومینیوم و همچنین دانه‌بندی کامپوزیت تولید شده با فرآیند نورد تجمعی، بعد از متالوگرافی، نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی با گسیل میدانی مدل میرا ۳ تی.اسکن^۲ مورد بررسی قرار گرفتند.

تولید فلزات بالک به اشکال ورق و میله می‌باشد، این روش بسیار مورد توجه قرار گرفت. در این فرآیند ابتدا سطح دو ورق فلزی با ابعاد یکسان برس کاری و چربی‌زدایی می‌شود. سپس این دو ورق روی هم قرار گرفته و نورد با کاهش ضخامت ۵۰ درصدی انجام می‌گیرد. پس از آن ورق از راستای طولی به دو قسمت مساوی برش داده می‌شود. این مراحل تا چندین سیکل تکرار می‌گردد. از آنجایی که ضخامت ورق در فرآیند ثابت است می‌توان فرآیند را تا کرنش‌های بالا جهت رسیدن به ورق‌های با اندازه دانه بسیار ریز و استحکام بالا تکرار کرد.

فرآیند نورد تجمعی بر روی مواد مشابه مثل آلومینیوم [۶]، فولاد [۷] و مس خالص [۸] و همچنین برای مواد غیرمشابه آلومینیوم/مس [۹] و آلومینیوم/تیتانیوم [۱۰] با موفقیت انجام گردیده است و در همه موارد منجر به شکل‌گیری ریزساختار فوق‌ریز و استحکام بسیار بالا گردیده است.

تغییر شکل پلاستیک شدید اعمالی توسط فرآیند نورد تجمعی برای فلزات و آلیاژهای مشابه، منجر به تقسیم شدن دانه‌ها، به واسطه مرزهای با زاویه بالا و مرزهای با زاویه پایین شده و در نهایت ساختار با دانه‌های فوق‌ریز و مرز دانه‌های تعادلی شکل می‌گیرد. مطالعات میکروساختاری و ماکروساختاری سیستم‌های دوفلزی که در آن فاز سخت‌تر درون فاز نرم جای می‌گیرد نشان‌دهنده آن است که شکل‌گیری ساختاری این نوع سیستم‌ها از پیچیدگی بیشتری نسبت به سیستم‌های تک‌فلزی برخوردار می‌باشد. به خاطر اختلاف خواص مکانیکی، ناپایداری پلاستیکی در یکی از لایه‌ها زودتر به وقوع پیوسته و تغییر شکل بیشتر لایه‌ها، منجر به گلویی شدن و سرانجام شکست فاز سخت‌تر می‌گردد [۱۱ و ۱۲].

در این تحقیق کامپوزیت آلومینیوم/برنج با اندازه دانه‌های نانومتری و استحکام بالا با فرآیند نورد تجمعی تولید شد. همچنین تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی ورق‌های کامپوزیتی با زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با لایه برنج در ضمن فرآیند نورد تجمعی و پس از هفت سیکل مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد تحقیق

در این تحقیق از آلومینیوم ۱۲۰۰ با ضخامت ۱ میلی‌متر و برنج ۷۰/۳۰ با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر به عنوان مواد اولیه استفاده شدند که مشخصات این مواد در جدول ۱ آورده شده است. همچنین در شکل ۱، ریزساختار آلومینیوم و برنج نشان داده شده که با استفاده از میکروسکوپ نوری عکس‌برداری شده است.

۲-۲- کامپوزیت چند لایه اولیه

به منظور ساخت کامپوزیت اولیه آلومینیوم و برنج با فرآیند نورد تجمعی، نمونه‌ها در ابعاد ۲۰۰ میلی‌متر در طول و ۵۰ میلی‌متر در

1 SANTAM STM250
2 KOOPA
3 MIRA3 TESCAN

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ساختار

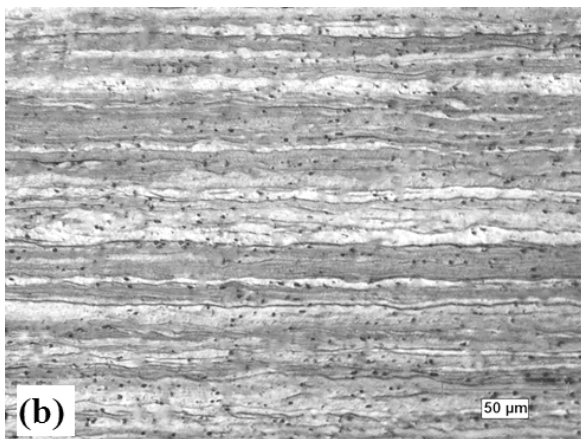
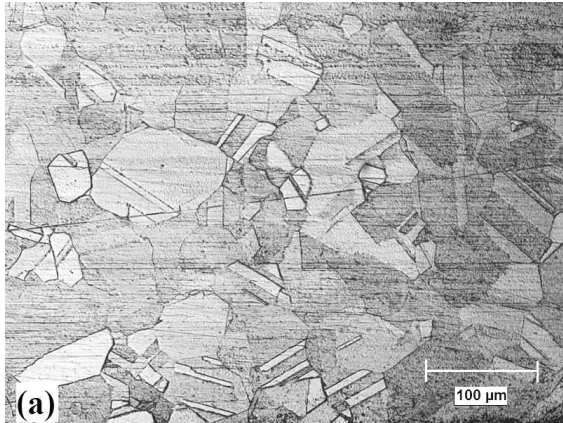
همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد لایه‌های برنج بعد از انجام فرآیند نورد تجمعی در سیکل پنجم و هفتم، به صورت مجزا و یکنواخت در زمینه آلومینیوم پخش شده‌اند و همچنین این شکل نشان‌دهنده اتصال مناسب بین لایه‌های آلومینیوم و برنج تحت فرآیند نورد تجمعی می‌باشد. به طور کلی در حین تغییر شکل پلاستیک فلزات غیرمشابه، اختلاف در خواص مکانیکی لایه‌ها موجب گلوپی شدن و شکست فاز سخت‌تر می‌شود. بنابراین به دلیل اختلاف خواص مکانیکی آلومینیوم و برنج، لایه‌های برنج به صورت قطعات کوچک در زمینه آلومینیوم به صورت ناهمگن پخش شده‌اند. برای اندازه‌گیری اندازه دانه‌های ایجاد شده بعد از ساخت کامپوزیت، نمونه‌ها در راستای جهت نورد بریده شده و بعد از الکترواچ زیر میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار گرفتند. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در سیکل پنجم مرزدانه‌های جدید به واسطه اعمال کرنش پلاستیک شدید و افزایش نابجایی‌ها تحت فرآیند نورد تجمعی به وجود آمده و در سیکل هفتم این مرزدانه‌ها دارای نظم بیشتری شده و باعث ایجاد دانه‌هایی با اندازه میانگین 250 نانومتر شده است. قابل توجه است که برآورد اندازه دانه‌های کریستالی توسط مرکز پژوهش متالورژی رازی تهران انجام گرفته است.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی مواد تحقیق

Table 1: Chemical composition and mechanical properties of the researched materials

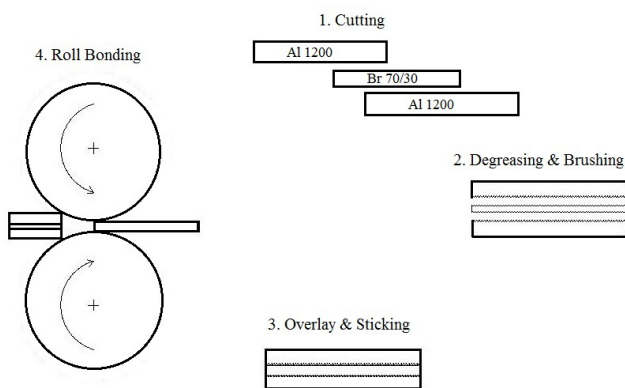
ماده	آلومینیوم ۱۲۰۰	برنج ۷۰/۳۰
ترکیبات شیمیایی (% wt)	آلومینیوم (۹۹/۸۵)، آهن (۰/۴۸)، منیزیم (۰/۳۳)، سیلیسیوم (۰/۰۷۶)، مس (۰/۰۰۲)، کروم (۰/۰۰۳)، سرب (۰/۰۴)	مس (۷۰/۳۲)، سرب (۰/۵۹)، آنتیموان (۰/۰۱۱)، آلومینیوم (۰/۰۵۸)، سرب (۰/۰۲۱)
ابعاد ورق (l,w,t) (mm)	۲۰۰، ۵۰، ۰/۵	۲۰۰، ۵۰، ۰/۵
سختی (HVN)	۸۵	۱۲۰
کشیدگی ^۲ (%)	۴/۸	۷۰
استحکام تسلیم ^۲ (MPa)	۱۳۵	۱۶۵
استحکام کششی ^۱ (MPa)	۲۴۶	۳۲۷

- 1 Tensile Strength
- 2 Yield Strength
- 3 Elongation



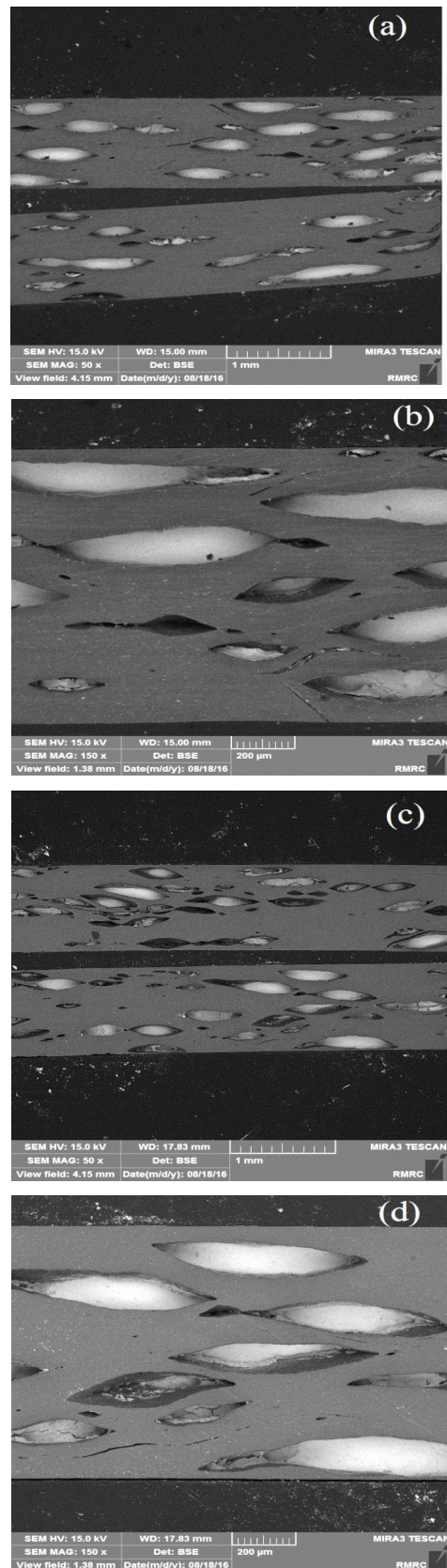
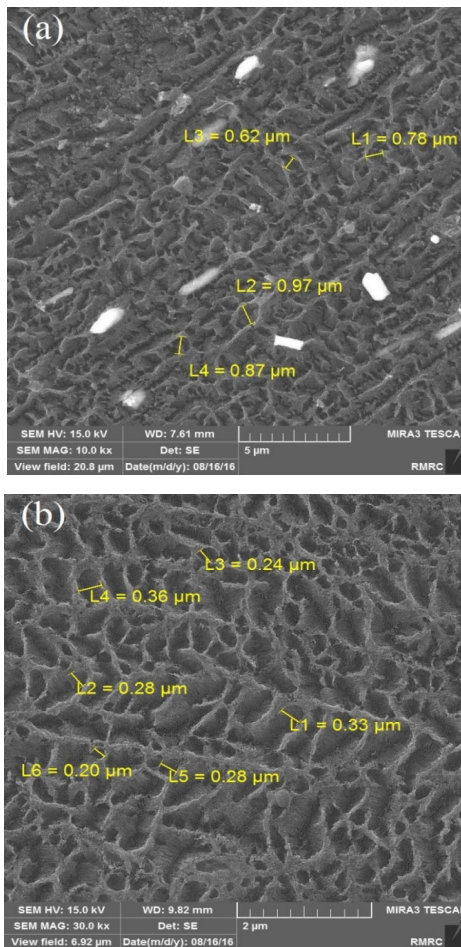
شکل ۱: ریزساختار ورق آلومینیوم و برنج استفاده شده در فرآیند نورد تجمعی (a) آلومینیوم و (b) برنج

Fig1. Microstructure of Aluminum and Brass sheet Used in the ARB Process a) Aluminum and b) Brass



شکل ۲: شماتیک فرآیند نورد تجمعی

Fig2. Schematic of process ARB



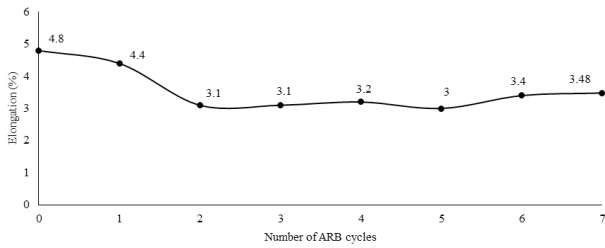
شکل ۴: مرزدانه و اندازه دانه جدید تشکیل شده بعد از فرآیند نورد تجمعی (a) پاس پنجم و (b) پاس هفتم

Fig4. New grain size and grain boundaries established after the ARB process (a) fifth pass and (b) seventh pass

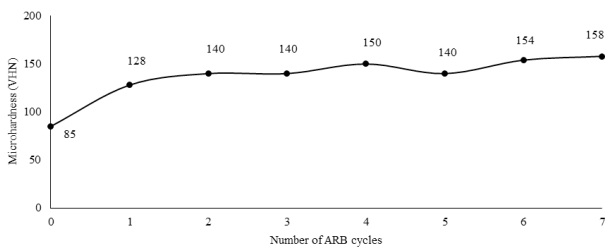
۳-۲- خواص مکانیکی

شکل ۵ منحنی تنش- کرنش و شکل ۶ منحنی تغییرات استحکام نهایی کامپوزیت تولید شده در مراحل مختلف فرآیند نورد تجمعی را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اعمال سیکل اول فرآیند استحکام به شدت افزایش پیدا کرده، اما در مرحله دوم کاهش می‌یابد و سپس با افزایش مراحل فرآیند نورد تجمعی، استحکام کششی دوباره کمی افزایش یافت و در مرحله هفتم به مقدار ۳۶۱ مگاپاسکال رسید. به طور کلی تغییرات استحکام در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید توسط دو مکانیزم اصلی استحکام‌دهی، شامل (۱) کرنش سختی و (۲) استحکام‌دهی مرزدانه‌ای یا ریزش‌دهی، تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۱۳]. بنابراین، در مراحل اولیه فرآیند نورد تجمعی با توجه به بالا بودن نرخ کارسختی، افزایش استحکام به واسطه کارسختی ماده بوده و در ادامه فرآیند افزایش استحکام به واسطه ریزش‌دهی دانه‌ها است. در این تحقیق افزایش استحکام علاوه بر دو مکانیزم گفته شده به ایجاد ساختار کامپوزیتی نیز مربوط می‌باشد. همچنین با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی، ساختار یکنواخت‌تر همراه با پیوندهای قوی‌تر تشکیل می‌شود.

شکل ۳: سطح مقطع نمونه در راستای نورد (a,b) پاس پنجم و (c,d) پاس هفتم
Fig3. The cross-section of the sample in the rolling direction (a ,b) fifth pass and (c, d) seventh pass



شکل ۷: تغییرات ازدیاد طول بر حسب سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی
Fig7. Variations of elongation with the number of ARB cycles



شکل ۸: تغییرات میکروسختی ویکرز بر حسب سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی
Fig8. Variations of the Vickers micro hardness with the number of ARB cycles

۴- نتایج

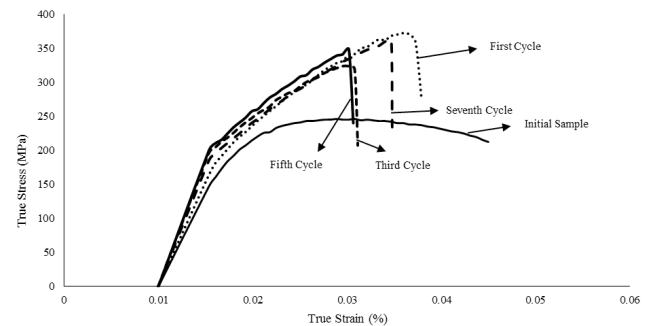
در تحقیق حاضر کامپوزیت چند لایه‌ای آلومینیوم/برنج با استفاده از فرآیند نورد تجمعی تولید شده است. بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت حاصل در مراحل مختلف از فرآیند نورد تجمعی نتایج زیر را به طور خلاصه نشان می‌دهد؛

- ۱- با افزایش مراحل فرآیند نورد تجمعی، لایه‌های برنج شکسته شده و در نهایت جدایش بین لایه‌ها رخ داده و بعد از هفت سیکل از فرآیند، کامپوزیتی با زمینه آلومینیوم و لایه‌های کوچک تقویت کننده برنج که به صورت یکنواخت در زمینه پخش شده‌اند، حاصل می‌شود.
- ۲- بعد از هفت سیکل از فرآیند نورد تجمعی، کامپوزیت آلومینیوم/برنج با ریزساختار نانومتری با اندازه دانه میانگین 250° نانومتر ساخته شد.
- ۳- با افزایش سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی، استحکام کششی افزایش می‌یابد که این افزایش در سیکل ابتدایی به دلیل کارسختی با شیب بیشتری بوده و در مراحل بعدی با نرخ کمتری افزایش یافته و در سیکل هفتم از فرآیند، مقدار استحکام کششی به حدود ۳۶۱ مگاپاسکال می‌رسد که نسبت به نمونه اولیه آلومینیوم ۴۶ درصد افزایش یافته است.

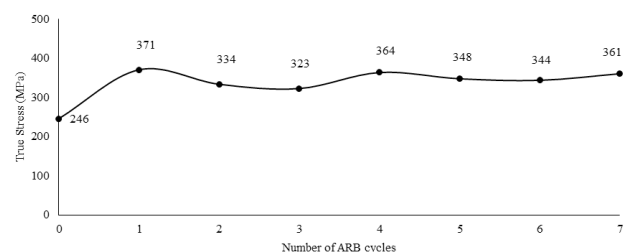
۴- درصد ازدیاد طول در سیکل اول و دوم با شیب زیاد کاهش یافته و بعد از آن با نرخ کمی افزایش می‌یابد و در پایان سیکل هفتم به مقدار ۳/۴۸ درصد می‌رسد که نسبت به سیکل دوم ۱۲ درصد افزایش داشته است.

شکل ۶ و شکل ۷ تغییرات استحکام و ازدیاد طول نمونه نورد تجمعی شده بر حسب پاس‌های مختلف فرآیند را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۶ میزان استحکام کامپوزیت در سیکل اول با نرخ بالایی افزایش یافته و بعد از آن با نوساناتی روبرو شده و در نهایت در سیکل هفتم حدود ۴۶ درصد نسبت به نمونه خام آلومینیوم افزایش داشته است. نوسانات ایجاد شده بعد از سیکل اول می‌تواند به دلیل کاهش تأثیر نرخ کارسختی و اثر ایجاد مرزخانه‌های ضعیف باشد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود درصد ازدیاد طول نیز در سیکل اول و دوم به شدت کاهش یافته و بعد از آن با نوساناتی همراه بوده و در نهایت به مقدار ۳/۴۸ درصد رسید که نسبت به نمونه خام آلومینیوم ۲۷/۵ درصد کاهش یافت.

شکل ۸ تغییرات میکروسختی ویکرز کامپوزیت تولید شده با فرآیند نورد تجمعی بر حسب پاس‌های مختلف فرآیند را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ سختی کامپوزیت در مراحل اولیه به شدت افزایش یافته و در مرحله هفتم فرآیند نورد تجمعی به بیشترین مقدار خود به میزان ۱۵۸ ویکرز رسید که نسبت به نمونه خام آلومینیوم حدود دو برابر افزایش داشته است. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود نرخ افزایش سختی در مراحل اولیه فرآیند نورد تجمعی بالا بوده، اما با افزایش مراحل فرآیند میزان سختی با نرخ کمتری افزایش داشته است. کارسختی فقط در مراحل اولیه روی سختی تأثیر داشته و با افزایش مراحل فرآیند، تأثیری چندانی بر روی سختی ندارد. طبق رابطه هال-پیچ اثر کارسختی بر افزایش سریع سختی در کرنش‌های پایین بیشتر از ریزشدن دانه‌ها می‌باشد. در واقع سهم ریزشدن دانه‌ها در افزایش سختی نسبت به کارسختی کمتر است [۱۴].



شکل ۵: تاثیر فرآیند ARB بر روی نمودار تنش-کرنش واقعی
Fig5. Effects of ARB process on True Stress- strain curve



شکل ۶: تغییرات استحکام کششی بر حسب سیکل‌های فرآیند نورد تجمعی
Fig6. Variations of the Tensile strength with the number of ARB cycles

iron deformed by accumulative roll bonding (ARB)." *Materials Science and Engineering: A* 561: 60-66.

- [8] Shaarbafe, M. and M. R. Toroghinejad (2008). "Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process." *Materials Science and Engineering: A* 473(1-2): 28-33.
- [9] Mehr, V. Y., et al. (2014). "Mechanical properties and microstructure evolutions of multilayered Al-Cu composites produced by accumulative roll bonding process and subsequent annealing." *Materials Science and Engineering: A* 601: 40-47.
- [10] Ng, H. P., et al. (2013). "Asymmetric accumulative roll bonding of aluminium-titanium composite sheets." *Materials Science and Engineering: A* 576: 306-315.
- [11] Lee, J.-M., et al. (2005). "Control of layer continuity in metallic multilayers produced by deformation synthesis method." *Materials Science and Engineering: A* 406(1-2): 95-101.
- [12] Yazar, Ö., et al. (2005). "Control of macrostructure in deformation processing of metal/metal laminates." *Acta materialia* 53(2): 375-381.
- [13] Zhan, M., et al. (2007). "Microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Zn alloy sheets severely deformed by accumulative roll-bonding." *Journal of Materials Science* 42(22): 9256-9261.
- [14] Park, K.-T., et al. (2001). "Microstructural characteristics and thermal stability of ultrafine grained 6061 Al alloy fabricated by accumulative roll bonding process." *Materials Science and Engineering: A* 316(1-2): 145-152.

۵- با افزایش مراحل فرآیند نورد تجمعی، میکروسختی افزایش می‌یابد به طوری که در سیکل اول با نرخ بیشتر و در سیکل‌های بعدی با نرخ کمتری افزایش داشته و در نهایت در سیکل هفتم به مقدار ۱۵۸ میکرو ویکرز رسید که نسبت به نمونه خام آلومینیوم حدود ۸۵ درصد افزایش داشته است.

مراجع

- [1] Raab, G. J., et al. (2004). "Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP-Conform." *Materials Science and Engineering: A* 382(1-2): 30-34.
- [2] Li, S., et al. (2005). "Texture evolution during multi-pass equal channel angular extrusion of copper: neutron diffraction characterization and polycrystal modeling." *Acta materialia* 53(7): 2111-2125.
- [3] Richert, M., et al. (1999). "Microstructural evolution over a large strain range in aluminium deformed by cyclic-extrusion-compression." *Materials Science and Engineering: A* 260(1-2): 275-283.
- [4] Khatibi, G., et al. (2010). "High cycle fatigue behaviour of copper deformed by high pressure torsion." *International journal of fatigue* 32(2): 269-278.
- [5] Saito, Y. (1998). "Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process." *Scripta Mater.* 39(9): 1221-1227.
- [6] Su, L., et al. (2014). "Investigation of ultrafine grained AA1050 fabricated by accumulative roll bonding." *Materials Science and Engineering: A* 614: 148-155.
- [7] Bonnot, E., et al. (2013). "Microstructure and texture evolution during the ultra grain refinement of the Armco