

پرس تجمعی پیوندی: روشی نوین جهت تولید نانو کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیم / اکسید روی

سجاد امیرخانلو^{۱،۲*}، محمد ابراهیم باجغلی^۳، مصطفی کتابچی^۴ و نادر پروین^۴

۱- دکتری مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- پسادکتری، دانشگاه بروئل لندن و شرکت جگوار لندور، لندن، انگلستان

۳- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران

۴- دانشیار و عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

*s.amirkhanlou@aut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۲۴، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۸/۱۰)

چکیده

تاکنون مطالعات مفید محدودی در رابطه با تولید نانو کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات انجام شده است. از جمله دلایل این محدودیت می‌توان به دشوار بودن توزیع یکنواخت نانو ذرات تقویت کننده در زمینه فلزی، واکنش فصل مشترک زمینه و ذرات و در نتیجه آن کاهش کارایی نانو کامپوزیت‌ها در روش‌های سنتی تولید کامپوزیت‌ها اشاره کرد. روش ابداعی پرس تجمعی-پیوندی در این پژوهش به گونه‌ای طراحی شد که به کمک آن نانو کامپوزیت آلومینیم/اکسید روی به شکل موفقیت آمیزی تولید گردید. تحولات ریزساختاری و خواص مکانیکی آلومینیم خالص و نانو کامپوزیت تولید شده در مراحل مختلف فرایند پرس تجمعی پیوندی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمون کشش بررسی شد. نتایج نشان داد پس از مرحله دوم فرایند پرس تجمعی پیوندی، تمامی خوشه‌ها و مناطق تهی از ذرات محو شد و توزیع ذرات در زمینه کاملاً همگن بود. با افزودن نانو ذرات اکسید روی به زمینه آلومینیومی، استحکام کششی تا ۲/۶ برابر ماده اولیه بهبود یافت. ازدیاد طول نانو کامپوزیت در مرحله اول فرایند پرس تجمعی پیوندی کاهش و به ۳/۴ درصد رسید اما با ادامه فرایند و در مرحله دوم تا ۷/۲ درصد افزایش یافت. همچنین مطالعه شکست نگاری نمونه‌ها نشان داد نوع شکست، شکست داکتیل برشی بود.

واژه‌های کلیدی:

پرس تجمعی پیوندی، نانو کامپوزیت زمینه فلزی، آلومینیم، اکسید روی، خواص مکانیکی.

۱- مقدمه

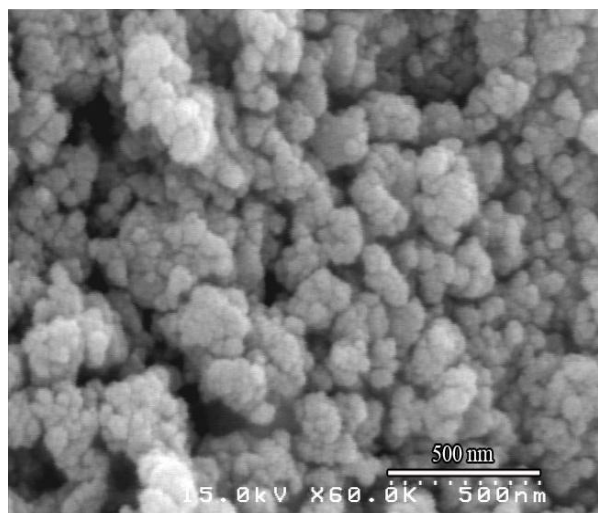
نانومتري دارد، تشکیل شده است. نانو کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرت یکی از انواع مهم نانو کامپوزیت‌ها می‌باشند. این کامپوزیت‌ها سبک بوده و به علت استحکام و سختی بالا کاربردهای وسیعی در صنایع خودرو و هوافضا پیدا کرده‌اند. تاکنون مطالعات محدودی در رابطه با نانو کامپوزیت‌های زمینه

یکی از جنبه‌های نانوفناوری که توجهات فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است، نانو کامپوزیت‌ها هستند. این گروه از مواد توانایی دستیابی به گستره‌ی جدیدی از خواص الکترونیکی، مغناطیسی، مکانیکی و نوری را دارا می‌باشند. نانو کامپوزیت‌ها از دو یا چند جزء مجزا از هم، که یک یا چند جزء آن ابعاد

هدف از این پژوهش، ارائه روش دیگری جهت توزیع یکنواخت نانو ذرات تقویت کننده در آلومینیوم و تولید نانو کامپوزیتی با حداکثر بهبود در ساختار و خواص مکانیکی می باشد. روش نوین و ابداعی پرس تجمعی-پیوندی در این پژوهش به گونه ای طراحی شده است که امکان ساخت نانو کامپوزیت را خواهد داشت.

۲- مواد و روش آزمایشگاهی

مواد اولیه در این پژوهش شامل آلومینیوم خالص تجاری AA1050 و نانو ذرات اکسید روی بود. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو پودر اکسید روی در شکل ۱ مشاهده می گردد.



شکل (۱): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو ذرات اکسید روی

شمای فرایند پرس تجمعی پیوندی (Accumulative press bonding, APB) برای تولید نانو کامپوزیت Al/2vol%ZnO با استفاده از ذرات تقویت کننده در شکل ۲ نشان داده شده است. در این حالت از نوارهایی با ابعاد $50 \text{ mm} \times 1/5 \text{ mm} \times 100$ استفاده گردید. از ذرات تقویت کننده با اندازه ای کوچک تر از 100 nm نیز به عنوان تقویت کننده استفاده شد. روی ورق ها، عملیات سطحی مانند چربی زدایی و برس زنی انجام گردید تا پیوند مناسبی بین دو ورق به وجود آید. چربی زدایی با

فلزی تقویت شده با ذرات انجام شده است. از جمله دلایل این محدودیت می توان به دشوار بودن توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه فلزی، واکنش فصل مشترک زمینه و ذرات و در نتیجه آن کاهش خواص مکانیکی نانو کامپوزیت ها اشاره کرد. در واقع روش های سنتی تولید کامپوزیت ها جوابگوی نیازهای تکنولوژی امروز در زمینه نانو کامپوزیت ها نمی باشد. بنابراین یافتن روش های کاملاً مناسب جهت ساخت نانو کامپوزیت ها برای محققان همچنان یک چالش بزرگ می باشد.

کاربرد و خواص منحصر به فرد کامپوزیت های تقویت شده با نانو ذرات منجر به ارائه روش های جدید تولید گردیده است تا مشکلات و معایب کامپوزیت های سنتی را به حداقل برسانند. یکی از این روش ها، استفاده از فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید می باشد. از آنجا که تولید کامپوزیت در حالت کاملاً جامد انجام می گیرد بسیاری از مشکلات روش های حالت مایع همچون فازهای ناخواسته و فصل مشترک ضعیف را نخواهد داشت. کامپوزیت های ذره ای تاکنون تنها توسط یکی از فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید به نام نورد تجمعی پیوندی تولید شده اند و در دیگر فرایندها هنوز این امکان حاصل نشده است. ایده ی استفاده از فرایند نورد تجمعی پیوندی به منظور تولید کامپوزیت اولین بار توسط راعی در سال ۲۰۰۸ پس از مطالعه ی پژوهش های کیتازونو و همکاران [۱] و لی و همکاران [۲] مطرح گردید. کیتازونو و لی به ترتیب از فرایند نورد تجمعی پیوندی به منظور تولید فوم و بهبود پیوند لایه ها استفاده کرده بودند. متأسفانه راعی نتوانست ایده ی خود را به انجام رسانده و منتشر نماید. در نهایت در سال ۲۰۱۰ و بعد از آن کامپوزیت های تقویت شده با ذرات به طور موفقیت آمیزی توسط گروه های تحقیقاتی عزیزان و همکاران [۳-۸]، جماعتی و همکاران [۹-۱۴] و امیرخانلو و همکاران [۱۵-۱۹] و لیو و همکاران [۲۰] تولید گردید. از جمله این کامپوزیت ها می توان به کامپوزیت Al/SiC ، $\text{Al/B}_4\text{C}$ ، $\text{Cu/Al}_2\text{O}_3$ ، $\text{Al/Al}_2\text{O}_3$ اشاره کرد.

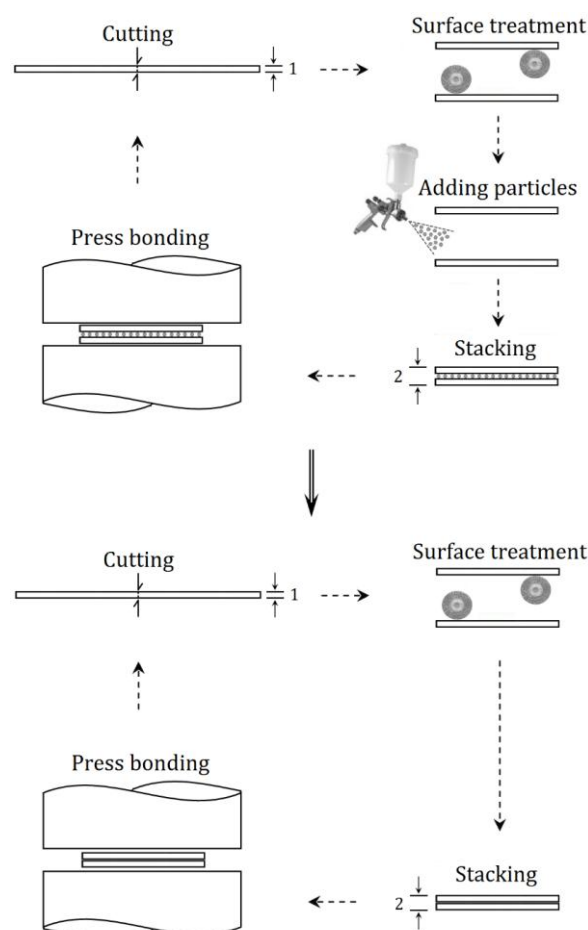
با مقدار کاهش ضخامت ۵۰٪ انجام گرفت. سپس نمونه‌های پرس شده توسط برش به دو قسمت مساوی بریده شده و این روند تا ۵ سیکل انجام خواهد شد (مرحله‌ی اول-مرحله‌ی افزودن ذرات تقویت کننده). در ادامه، به منظور دستیابی به توزیع یکنواخت تر ذرات تقویت کننده در زمینه و همچنین از بین بردن تخلخل در فصل مشترک بین لایه‌ها و بین ذرات و زمینه، روند بالا تا ۱۴ سیکل و بدون اضافه کردن ذرات تقویت کننده انجام گرفت (مرحله‌ی دوم- مرحله‌ی بهبود توزیع ذرات تقویت کننده). ریزساختار نانو کامپوزیت‌های تولید شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (Philips XL30) مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های کششی براساس استاندارد ASTM E8M به دست آمد. سپس نمونه‌ها توسط دستگاه کشش Houndsfield H50KS با نرخ کرنش اولیه‌ای برابر با $10^{-4} \times 1/67 \text{ s}^{-1}$ مورد آزمایش قرار گرفتند. از دیاد طول کل نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری اختلاف بین طول سنجه قبل و بعد از آزمون کشش به دست آمد. پس از انجام آزمایش کشش، منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی برای نمونه‌های APB شده بعد از مراحل مختلف رسم شد. همچنین سطوح شکست نمونه‌های کشش با میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ساختار

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقاطع نانو کامپوزیت با ۲ vol.% اکسید روی پس از ۵ سیکل (مرحله‌ی اول) و ۱۴ سیکل (مرحله‌ی دوم) فرایند APB در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ (الف) نشان می‌دهد که بعد از سیکل پنجم، نمونه شامل خوشه‌های بزرگی از ذرات اکسید روی و مناطق تهی از ذرات وسیع می‌باشد. مشخص است که خوشه‌های اکسید روی حاوی تخلخل‌های زیادی می‌باشند. وجود خوشه‌های ذرات تقویت کننده به دلیل افزودن ذرات در مرحله اول فرایند APB می‌باشد. پس از ۱۴ سیکل، تمامی خوشه‌ها و مناطق تهی از ذرات محو شده و تقریباً هیچ تخلخلی در نمونه وجود ندارد و

قرار دادن ورق‌ها در محلولی مناسب مانند استن انجام شد. پس از آماده‌سازی سطح نوارها، ذرات تقویت کننده به صورت تقریباً یکنواخت روی یکی از نوارها اسپری شد. سپس نوارها روی هم قرار گرفت. به منظور جلوگیری یا کم‌تر شدن تشکیل دوباره‌ی آلودگی‌ها و اکسید سطحی، روی هم قرار دادن و جابجایی نوارها با دقت و احتیاط انجام و سپس به سرعت تحت عملیات پرس توسط ماشین پرس مدل (Toni Technik Baustoffprüffsysteme GmbH, Berlin, Germany) قرار گرفت.

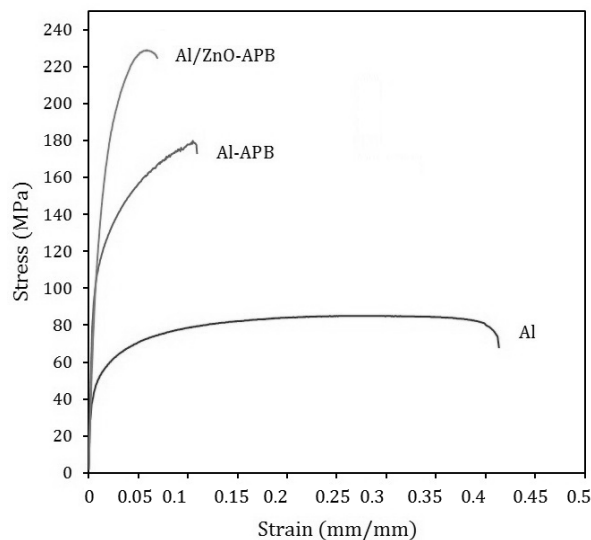


شکل (۲): شمای فرایند پرس تجمعی-پیوندی برای تولید کامپوزیت با استفاده از ذرات تقویت کننده

به طور کلی، بهتر است زمان بین آماده‌سازی سطحی و پرس تجمعی کم‌تر از ۱۲۰ ثانیه باشد. عملیات پرس تجمعی-پیوندی

۳-۲- خواص مکانیکی

منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی نمونه‌ی آنیل شده اولیه، آلومینیم خالص و نانو کامپوزیت ساخته شده توسط فرایند APB در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، تفاوت زیادی میان مقادیر استحکام کششی برای این سه نمونه وجود دارد. بر اساس گزارش‌های پژوهشگران، افزایش استحکام در موادی که شدیداً تغییر شکل یافته‌اند مربوط به وقوع دو مکانیزم عمده استحکام‌دهی در این مواد است. این مکانیزم‌ها عبارتند از کرنش سختی و ریز دانه شدن است [۹، ۱۰]. در مراحل اولیه‌ی فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، کرنش سختی نقش محسوس‌تری را در بهبود استحکام ایفا می‌کند. اما در مراحل پایانی، ریز دانه شدن نقش اصلی را در بهبود استحکام ایفا می‌کند و نقش کرنش سختی، کم‌رنگ می‌شود. این اثر مربوط است به افزایش تعداد دانه‌های فوق ریز دانه و افزایش عدم تطابق مرز دانه‌ها [۱۶].

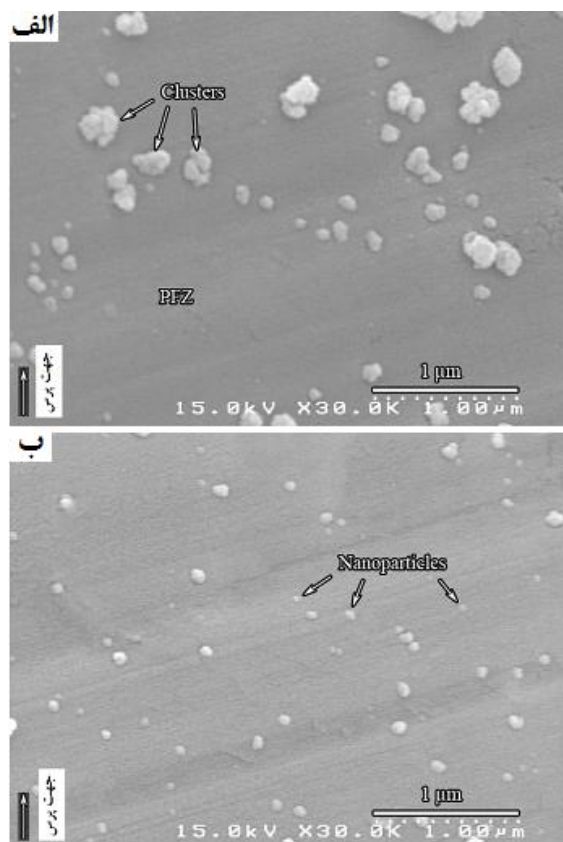


شکل (۴): منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی نمونه‌ی آنیل شده اولیه، آلومینیم خالص و نانو کامپوزیت ساخته شده توسط فرایند APB

تغییرات استحکام کششی و ازدیاد طول نمونه‌ی آلومینیم خالص و نانو کامپوزیت ساخته شده توسط فرایند APB بر حسب تعداد سیکل به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. با

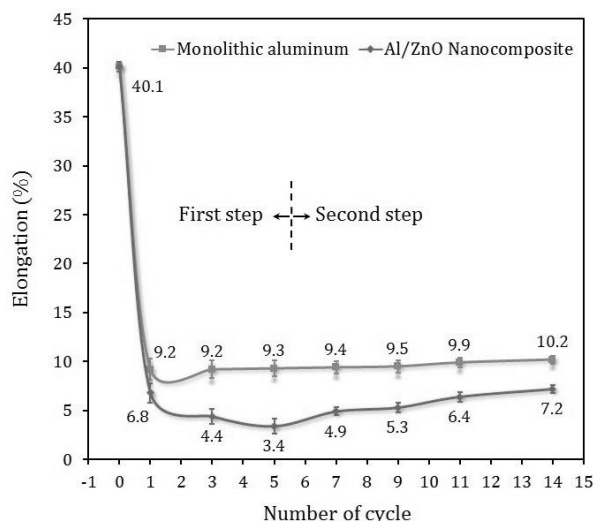
توزیع ذرات در زمینه کاملاً همگن می‌شود (شکل (ب)).

در حین فرایند پرس تجمعی پیوندی، آلومینیم به طور پلاستیکی تغییر شکل می‌دهد. در حضور مناطقی متشکل از ذرات اکسید روی، این مناطق در نتیجه‌ی نیروی فشاری و تغییر شکل پلاستیکی فلز از هم جدا می‌شوند و توزیع یکنواخت‌تری را در زمینه به وجود می‌آورند. همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، فرایند APB به شکل موفقیت آمیزی منجر به تولید یک نانو کامپوزیت زمینه فلزی با توزیع یکنواختی از نانو ذرات شده است. این مسئله از آن جهت حائز اهمیت است که سایر روش‌های تولید نانو کامپوزیت از جمله ریخته‌گری و متالورژی پودر پس از گذشت تحقیقات بسیار، همچنان از معایبی همچون توزیع نامناسب نانو ذرات تقویت‌کننده، تشکیل ترکیبات ناخواسته به دلیل دمای کاری بالا و مناطق خالی از نانو ذرات رنج می‌برند.



شکل (۳): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو کامپوزیت زمینه آلومینیمی با ۱۲ vol.% اکسید روی پس از: (الف): ۵ سیکل (مرحله اول) و (ب): ۱۴ سیکل (مرحله دوم) فرایند APB

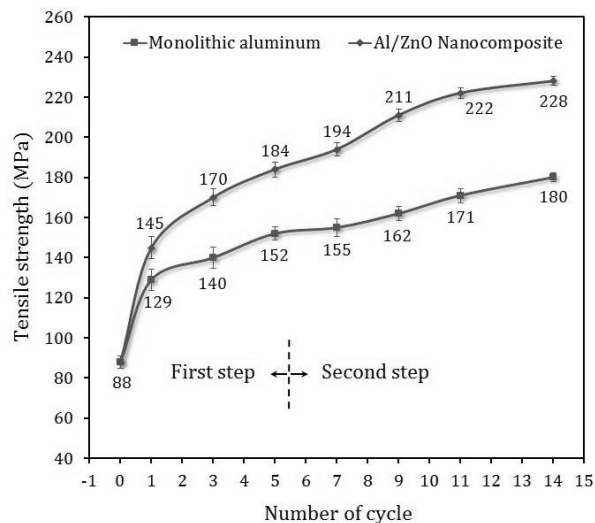
مناسب میان ذرات و زمینه، عامل مهم دیگری است که روی استحکام کششی و ازدیاد طول کامپوزیت اثرگذار است. با افزایش تعداد سیکل، پیوند قوی تری بین ذرات اکسید روی و زمینهی آلومینومی در نتیجهی فشار پرس و تغییر فرم شدید زمینه شکل گرفته و باعث افزایش استحکام کششی و ازدیاد طول کامپوزیت خواهد شد.



شکل (۶): تغییرات مقادیر ازدیاد طول نمونهی آلومینیم و نانو کامپوزیت ساخته شده توسط فرایند APB بر حسب تعداد سیکل

همانگونه که از شکل ۶ مشخص است ازدیاد طول نانو کامپوزیت در مرحله اول فرایند APB کاهش و در مرحله دوم افزایش می یابد. کاهش ازدیاد طول در مرحله اول ناشی از افزودن ذرات تقویت کننده می باشد. فصل مشترک این ذرات با زمینه منشا ایجاد و گسترش ترک می باشد و در نتیجه با افزایش این ذرات و همچنین وجود آگلومره هایی از این نانو ذرات در ساختار منجر به کاهش ازدیاد طول می گردد. افزایش مقدار ازدیاد طول نانو کامپوزیت در مرحلهی دوم به علت کاهش تخلخل، بهبود یکنواختی نانو ذرات در زمینه و افزایش چسبندگی میان ذرات و زمینه می باشد. تمامی نتایج به دست آمده از خواص مکانیکی در توافق کامل با مشاهدات ریزساختاری هستند.

توجه به شکل ۵ مشخص است که با افزودن نانو ذرات اکسید روی به زمینه آلومینومی، استحکام کششی بهبود می یابد. نانو ذرات تقویت کننده به عنوان سدی در برابر حرکت نابجایی ها عمل کرده و بدین ترتیب موجب افزایش استحکام کششی نانو کامپوزیت می گردد. همچنین بر اساس گزارش های محققان، دانسیتهی نابجایی ها در زمینهی اطراف فصل مشترک فلز-سرامیک در کامپوزیت ها افزایش می یابد که موجبات افزایش استحکام کششی را فراهم می کند [۷]. از طرف دیگر با توجه به تفاوت زیاد بین ضریب انبساط حرارتی اکسید روی ($4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) و آلومینیم ($23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) یکی دیگر از مکانیزم های استحکام دهی که می تواند تأثیرگذار باشد عبارت است از مکانیزم عدم انطباق حرارتی. این مکانیزم با تولید کرنش عدم انطباق در فصل مشترک منجر به بهبود استحکام می گردد.



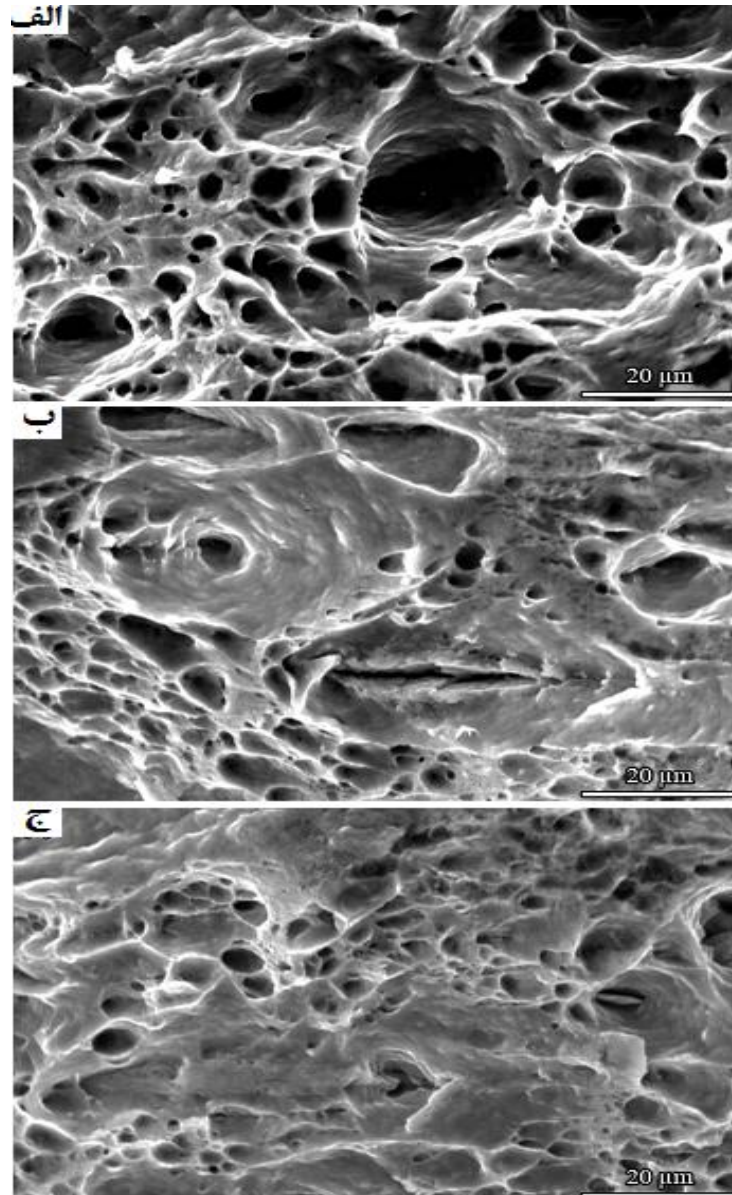
شکل (۵): تغییرات مقادیر استحکام کششی نمونهی آلومینیم و نانو کامپوزیت ساخته شده توسط فرایند APB بر حسب تعداد سیکل

با توجه به شکل ۵ و ۶ مشخص است که با افزایش تعداد سیکل، استحکام کششی برای هر دو نمونه بهبود می یابد. یکنواختی ذرات اکسید روی اثری مهم روی استحکام کششی و ازدیاد طول کامپوزیت دارد. با افزایش تعداد سیکل، توزیع ذرات اکسید روی در زمینه بهبود یافته و موجب افزایش استحکام کششی و ازدیاد طول می شود. از طرف دیگر، برقراری پیوندی

۳-۳- سطوح شکست

معمولاً این نوع شکست در بیش تر مواد دارای شکل رشته‌ای (فیبری) و خاکستری با حفره‌های هم‌محور و نیم‌کره‌ای می‌باشد. شکست نرم نتیجه‌ای از تشکیل ریزحفره‌ها و پیوستن آن‌ها به یکدیگر است.

به منظور توضیح مکانیزم شکست برای نمونه‌های مختلف از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. سطوح شکست نمونه‌ها مختلف پس از آزمون کشش در شکل ۷ نشان داده شده است. واضح است که تمامی نمونه‌ها، شکست نرمی را که مشخصه‌ی آن حفره‌های هم‌محور و عمیق است نشان می‌دهند.



شکل (۷): سطوح شکست پس از آزمون کشش برای: (الف): آلومینیم آنیل شده اولیه، (ب): نمونه‌ی آلومینیم و (ج): کامپوزیت تولیدی پس از ۱۴ سیکل فرایند

APB

زمینه، عمق حفره‌ها کاهش یافته و در نتیجه ازدیاد طول کم می‌شود. نشان داده شده است که شکست کامپوزیت‌ها مربوط

با افزودن ذرات تقویت کننده به زمینه، مقدار ازدیاد طول کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۷، با افزایش ذرات تقویت کننده در

- JIM, Vol. 40, pp. 1422-1428, 1999.
- [3] M. Alizadeh & M. H. Paydar, "Fabrication of Al/SiC P composite strips by repeated roll-bonding (RRB) process", J. Alloys Compd, Vol. 477, pp. 811-816, 2009.
- [4] M. Alizadeh & M. H. Paydar, "Fabrication of nanostructure Al/SiC P composite by accumulative roll-bonding (ARB) process", J. Alloys Compd, Vol. 492, pp. 231-235, 2010.
- [5] M. Alizadeh & M. H. Paydar, "High-strength nanostructured Al/B₄C composite processed by cross-roll accumulative roll bonding", Mater. Sci. Eng., A, Vol. 538, pp. 14-19, 2012.
- [6] M. Alizadeh, M. H. Paydar & F. Sharifian Jazi, "Structural evaluation and mechanical properties of nanostructured Al/B 4C composite fabricated by ARB process", Composites Part B: Engineering, Vol. 44, pp. 339-343, 2013.
- [7] M. Alizadeh, M. H. Paydar, D. Terada & N. Tsuji, "Effect of SiC particles on the microstructure evolution and mechanical properties of aluminum during ARB process", Mater. Sci. Eng, A, Vol. 540, pp. 13-23, 2012.
- [8] M. Alizadeh & M. Talebian, "Fabrication of Al/Cu p composite by accumulative roll bonding process and investigation of mechanical properties", Mater. Sci. Eng, A, Vol. 558, pp. 331-337, 2012.
- [9] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad & A. Najafizadeh, "An alternative method of processing MMCs by CAR process", Mater. Sci. Eng, A, Vol. 527, pp. 2720-2724, 2010.
- [10] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad & A. Najafizadeh, "Application of anodizing and CAR processes for manufacturing Al/Al₂O₃ composite", Mater. Sci. Eng, A, Vol. 527, pp. 3857-3863, 2010.
- [11] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, J. Dutkiewicz & J. A. Szpunar, "Investigation of nanostructured Al/Al₂O₃ composite produced by accumulative roll bonding process", Mater. Des, Vol. 35, pp. 37-4, 2012.
- [12] R. Jamaati & M. R. Toroghinejad, "Manufacturing of high-strength aluminum/alumina composite by accumulative roll is bonding", Mater. Sci. Eng, A, Vol. 527, pp. 4146-4151, 2010.
- [13] R. Jamaati & M. R. Toroghinejad, "Application of

به تشکیل حفره‌ها در فصل مشترک ذره-زمینه می‌باشد [۱۵-۱۶]. بعد از فرایند APB نمونه‌ها باز هم شکست داکتیل حاوی حفره‌ها را نشان می‌دهند اما این حفره‌ها به عمیقی حفره‌های نمونه‌ی آنبیل شده نبوده و کشیده شده‌اند. این حفره‌ها، حفره‌های برشی هستند. شکل‌های ۷ (ج) به وضوح نشان می‌دهند که نوع شکست، شکست داکتیل برشی است. مشخصه‌ی این نوع شکست حفره‌های برشی کشیده‌ی کم‌عمق می‌باشد. در این نوع شکست، برش داخلی بین حفره‌ها اتفاق می‌افتد و منجر به شکست نهایی می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- ۱- نانو کامپوزیت تولید شده توسط فرایند پرس تجمعی پیوندی، فاقد مناطق تهی از نانوذرات و توزیع نانو ذرات در زمینه کاملاً همگن بود.
- ۲- با افزودن نانو ذرات اکسید روی به زمینه آلومینیومی، استحکام کششی تا ۲/۶ برابر بهبود یافت.
- ۳- ازدیاد طول نانو کامپوزیت در مرحله اول فرایند APB کاهش و به ۳/۴ درصد رسید اما با ادامه فرایند و در مرحله دوم تا ۷/۲ درصد افزایش یافت.
- ۴- مطالعه شکست نگاری نمونه‌ها نشان داد نوع شکست، شکست داکتیل برشی بود.
- ۵- به طور خلاصه، در این پژوهش برای اولین بار روش پرس تجمعی پیوندی به شکل موفقیت آمیزی جهت تولید نانو کامپوزیت زمینه فلزی ارائه گردید.

۵- مراجع

- [1] E. S. K. Kitazono & K. Kuribayashi, "Novel manufacturing process of closed-cell aluminum foam by accumulative roll-bonding", Scripta Mater, Vol. 50, pp. 495-498, 2004.
- [2] S. H. Lee, T. Sakai, Y. Saito, H. Utsunomiya & N. Tsuji, "Strengthening of sheath-rolled aluminum based MMC by the ARB process", Mater. Trans,

- R. Toroghinejad, "Manufacturing of high-performance Al356/SiCp composite by CAR process", *Mater. Manuf. Processes*, Vol. 26, pp. 902-907, 2011.
- [18] S. Amirkhanlou & B. Niroumand, "Fabrication and characterization of Al356/SiCp semisolid composites by injecting SiCp containing composite powders", *J. Mater. Process. Technol*, Vol. 212, pp. 841-847, 2012.
- [19] S. Amirkhanlou, M. R. Rezaei, B. Niroumand & M. R. Toroghinejad, "Refinement of microstructure and improvement of mechanical properties of Al/Al₂O₃ cast composite by accumulative roll bonding process", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 528, pp. 2548-2553, 2011.
- [20] C.Y. Liu, Q. Wang, Y. Z. Jia, B. Zhang, R. Jing, M. Z. Ma, Q. Jing & R. P. Liu, "Evaluation of mechanical properties of 1-0.6Al reinforced with WC particles via warm accumulative roll bonding process", *Mater. Des*, Vol. 43, pp. 367-372, 2013.
- ARB process for manufacturing high-strength, finely dispersed and highly uniform Cu/Al 20 3 composite", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 527, pp. 7430-7435, 2010.
- [14] R. Jamaati & M. R. Toroghinejad, "High-strength and highly-uniform composite produced by anodizing and accumulative roll bonding processes", *Mater. Des*, Vol. 31, pp. 4816-4822, 2010.
- [15] S. Amirkhanlou, R. Jamaati, B. Niroumand & M. R. Toroghinejad, "Using ARB process as a solution for dilemma of Si and SiCp distribution in cast Al-Si/SiCp composites", *J. Mater. Process. Technol*, Vol. 211, pp. 1159-1165, 2011.
- [16] S. Amirkhanlou, R. Jamaati, B. Niroumand & M. R. Toroghinejad, "Fabrication and characterization of Al/SiCp composites by CAR process", *Mater. Sci. Eng., A*, Vol. 528, pp. 4462-4467, 2011.
- [17] S. Amirkhanlou, R. Jamaati, B. Niroumand & M.