

# ساخت کامپوزیت لایه ای آلومینیوم / روی تقویت شده با نانو ذرات کاربرد سیلیسیم به روش اتصال نوردی تجمعی (ARB) و بررسی ساختاری و خواص مکانیکی آن

رضا نصیری ده سرخی<sup>۱\*</sup>، فتح اله قدس<sup>۲</sup>، محمد تجلی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

\* Reza.n64@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۶/۲۲، تاریخ پذیرش: ۹۰/۰۹/۰۸)

## چکیده

در این تحقیق، کامپوزیت لایه ای آلومینیوم/روی تقویت شده با نانو ذرات کاربرد سیلیسیم برای اولین بار به روش اتصال نوردی تجمعی (ARB) تولید گردید و خواص مکانیکی و ریز ساختاری آن مورد بررسی قرار گرفت. در این فرآیند پس از تولید نمونه‌ی ساندویچی، در هر مرحله میزان کاهش ضخامت حدود ۵۰٪ به نمونه اعمال شد که معادل با کرنش پلاستیک فون-میزر ۸ است. این فرآیند تا ۸ سیکل انجام و در نهایت کامپوزیتی با توزیع یکنواخت تکه های فلز روی در زمینه‌ی آلومینیوم و با استحکام کششی ۲۵۷ مگاپاسکال تولید شد.

## کلمات کلیدی:

آلومینیوم/روی، کامپوزیت زمینه فلزی، اتصال نوردی تجمعی، استحکام کششی، نانو ذرات

## ۱- مقدمه

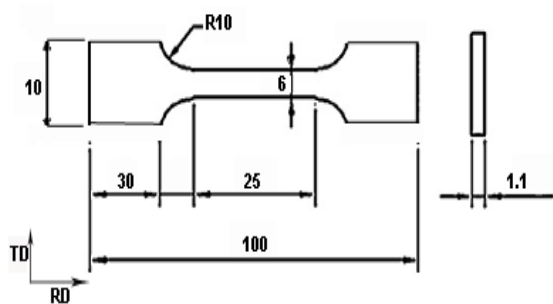
ورق‌های مورد نظر پس از آماده سازی اولیه، بر روی هم اتصال مکانیکی شده و سپس مورد اتصال نوردی قرار می‌گیرند. محصول تولیدی در راستای طولی به دو قسمت مساوی تقسیم شده و پس از تکرار آماده سازی‌های سطحی، بر روی هم اتصال مکانیکی شده و با اعمال کاهش سطح مقطع حدود ۵۰ درصد مورد اتصال نوردی قرار می‌گیرند و این عمل به طور تناوبی تا چندین سیکل انجام می‌شود. به دلیل کاربرد زیاد و روزافزون فلز

تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) را می‌توان به عنوان تغییر شکل تا کرنش‌های بالا در دمایی کمتر از دمای تبلور مجدد ماده بدون عملیات حرارتی میانی تعریف کرد که منجر به ایجاد ساختارهای فوق ریز دانه می‌گردد [۱]. فرآیند اتصال نوردی تجمعی (ARB) نسبت به سایر فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید دارای مزایایی از قبیل عدم نیاز به قالب‌های گران قیمت، سادگی انجام کار و سرعت بالای تولید است [۲]. در این روش

سطوح برای ایجاد زیری مناسب است که منجر به اتصال مناسب در نورد می‌شود.

جدول (۱): خواص و ترکیب شیمیایی ورق‌های اولیه مصرفی.

مواد	آلومینیوم آنیل شده	روی آنیل شده
ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)	۹۹٫۴Al, ۰٫۴۰۶Fe, ۰٫۱۲۱Si, ۰٫۰۳۳Cu	۹۷٫۴Zn, ۲Al, ۰٫۵Pb, ۰٫۱Fe
ابعاد ورق‌ها (بر حسب میلی متر)	۱۲۰×۶۰×۰٫۹	۱۲۰×۶۰×۰٫۲۵
سختی (بر حسب ویکرز)	۲۵	۴۵
درصد ازدیاد طول	۳۹	۱۶
استحکام تسلیم (مگا پاسکال)	۴۰	۱۱۰



شکل (۱) ابعاد نمونه های آزمون کشش بر طبق استاندارد

ASTM- E8M (بر حسب میلی متر)

بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدی به این روش، با انجام آزمون کشش تک محور در هر سیکل از فرآیند انجام شد. این آزمون با کاربرد دستگاه کشش مدل DARTEC با سرعت

روی در صنایع اتومبیل سازی، چاپ و انتشارات و سیستم‌های حفاظت خوردگی، با ارتقاء خواص مکانیکی این فلز می‌توان کاربرد آن را در صنایع توسعه داد. با توجه به اینکه فلز روی دارای مزایایی مانند مقاومت خوردگی بالا، ثبات ابعادی در حین کاربرد، هدایت الکتریکی و حرارتی مناسب و عیوب کاربردی مانند دانسیته‌ی بالا، انعطاف پذیری کم است، یکی از روش‌های ارتقاء خواص مکانیکی و فیزیکی این فلز، کامپوزیت کردن آن با موادی است که نقاط ضعف آن را پوشش داده و نقاط قوت را برجسته می‌کنند. آلومینیوم ماده‌ای مناسب برای کامپوزیت شدن با این فلز است زیرا دارای خواصی مانند دانسیته‌ی کم، انعطاف پذیری بالا، مقاومت خوردگی خوب، هدایت الکتریکی و حرارتی بالا است. همچنین با افزودن نانو ذرات کاربید سیلیسیم نیز می‌توان علاوه بر حفظ دانسیته‌ی پائین برای کامپوزیت، مقاومت سایشی آن را نیز ارتقاء داد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

ورق‌های آلومینیوم ۱۰۵۰ و روی، که ترکیب شیمیایی و خصوصیات آنها در جدول (۱) مشخص شده است، در ابعاد ۱۲۰×۶۰ (میلی متر) و به ترتیب در ضخامت‌های ۰٫۹ و ۰٫۲۵ میلی‌متر برش خورده و در دماهای ۳۵۰ درجه سلسیوس و ۱۵۰ درجه سلسیوس هر کدام به مدت ۳۰ دقیقه آنیل شدند [۳-۴]. برای بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم/ روی تقویت شده با نانو ذرات کاربید سیلیسیم تولید شده به روش اتصال نوردی تجمعی، نمونه های آزمون کشش طبق استاندارد ASTM-E8M بترتیب با طول و پهنای گیج ۲۵ و ۶ میلی‌متر در راستای طولی نورد و در سیکل های مختلف فرآیند تهیه گردید [۵].

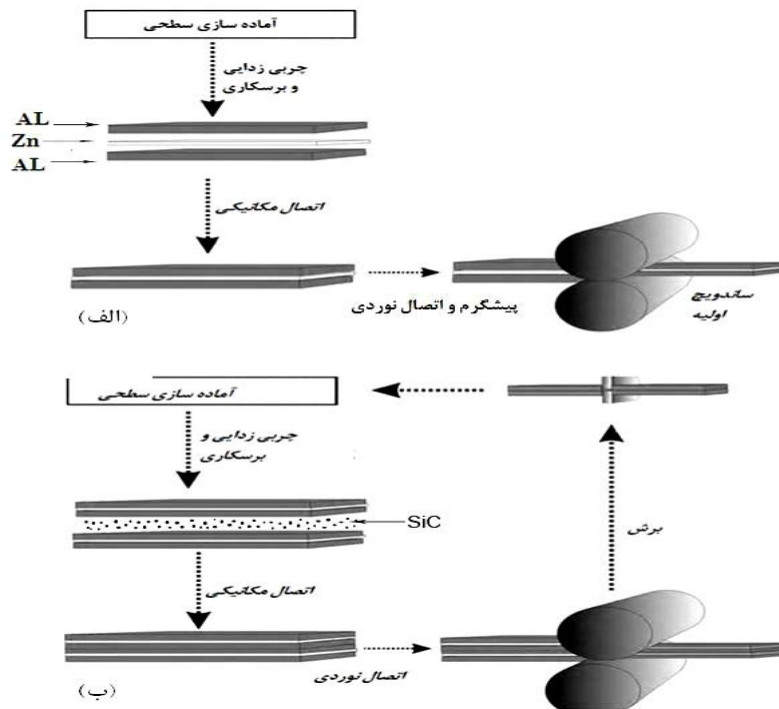
در شکل (۱) ابعاد این نمونه‌ها نشان داده شده است. ورق‌های آلومینیوم و روی پس از برش در ابعاد مورد نظر و انجام عملیات آنیل، مورد عملیات آماده سازی‌های سطحی قرار گرفتند. این عملیات در دو مرحله انجام گردید که شامل شستشوی سطحی ورق‌ها در محلول استون برای چربی زدایی و برس کاری این

مجدد، نانو ذرات کاربید سیلیسیم به میزان ۱ درصد حجمی به صورت یکنواخت روی سطح اتصالی نمونه پخش گردید و مجموعه‌ی حاصل پس از اتصال مکانیکی با اعمال کاهش ضخامت حدود ۵۰ درصد مورد اتصال نوردی قرار گرفت (مرحله ب).

این کار تا ۸ سیکل به طور تناوبی انجام شد که طبق معیار تسلیم فون- میز معادل با اعمال کرنش ۰/۸ در هر سیکل است. یعنی پس از ۸ سیکل با احتساب کرنش ۰/۶۲، برای سیکل صفرام، مقدار کرنش پلاستیک ۷/۰۲ در نمونه انباشته گردیده است. تصویر شماتیکی از این فرآیند در شکل (۲) نشان داده شده است.

ثابت ۰/۵ میلی متر بر دقیقه [۶]، و در دمای محیط انجام گردید. ورق‌ها با تناوب آلومینیوم/روی/آلومینیوم بر روی یکدیگر قرار داده شدند و برای عدم لغزش ورق‌ها بر روی یکدیگر در حین نورد، با کاربرد سیم‌های مسی، ورق‌ها به یکدیگر اتصال مکانیکی شدند. مجموعه‌ی حاصل با ضخامت تقریبی ۲/۱ میلی متر، پس از پیش گرم در دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۵ دقیقه، با کاربرد غلطک‌هایی به قطر ۱۱۰ میلی متر با سرعت چرخش ۴۵ دور بر دقیقه مورد عملیات اتصال نوردی قرار گرفت و به مقدار ضخامت ۱/۱ میلی متر رسید و تشکیل نمونه‌ی ساندویچی یا نمونه‌ی سیکل صفرام را داد (مرحله الف).

نمونه‌ی حاصل به دو نیم تقسیم و بعد از آماده سازی‌های سطحی



شکل (۲): تصویر شماتیکی از مراحل مختلف فرآیند اتصال نوردی تجمعی در ساخت کامپوزیت Al/Zn/SiC<sub>np</sub>

سیکل‌های فرآیند و هم‌چنین کرنش اعمالی به نمونه، لایه‌های آلومینیوم و روی کاهش ضخامت داده و دچار ناپایداری پلاستیک می‌شوند. به دلیل شکل پذیری و توان کار سختی بالاتر آلومینیوم در مقایسه با فلز روی (۲۲٪، برای آلومینیوم و ۱۵٪، برای روی)، در سیکل‌های اولیه لایه‌های آلومینیوم با جذب

### ۳- نتایج و بحث

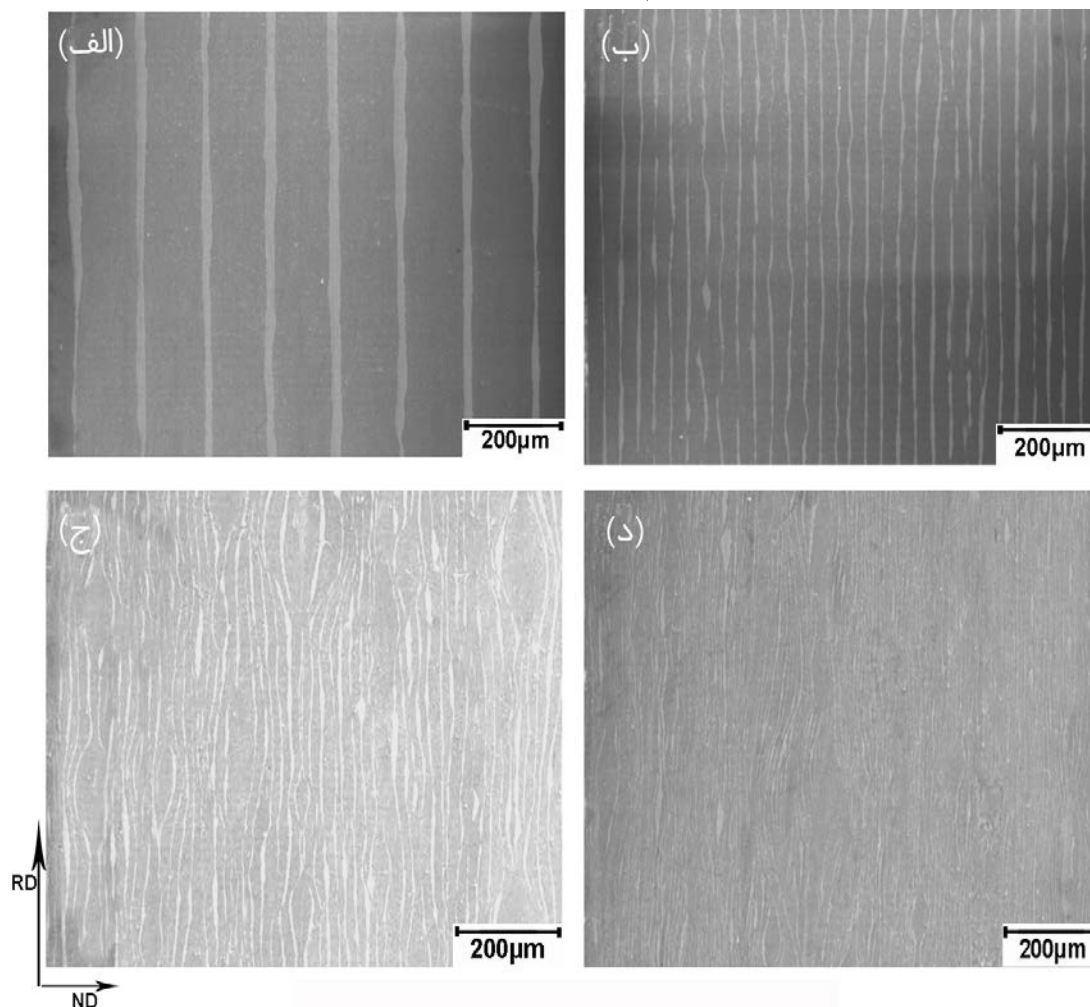
شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ریز ساختار و مورفولوژی لایه‌های روی در ساختار لایه ای کامپوزیت را در سیکل‌های مختلف فرآیند اتصال نوردی تجمعی، نشان می‌دهد. همانطور که در این تصاویر مشخص است با افزایش تعداد

دلیل داشتن ابعاد نانو متری و درصد حجمی پایین، قابلیت آشکار شدن در تصاویر میکروسکوپی را ندارند. به نظر می‌رسد که با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند، این ذرات نیز به صورت یکنواخت در زمینه کامپوزیت پخش می‌شوند.

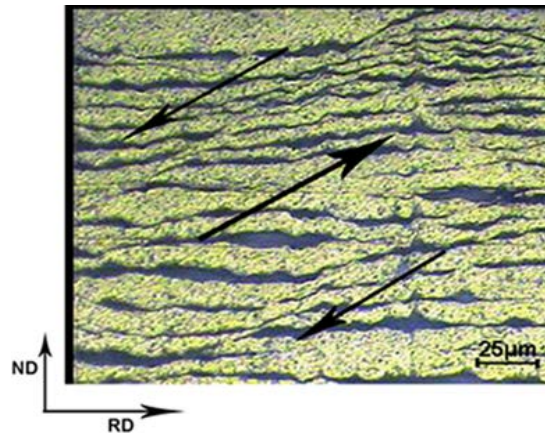
شکل (۴) تصویر میکروسکوپ نوری از ایجاد برخی باندهای برشی در زمینه کامپوزیت را نشان می‌دهد. این باندهای برشی با راستای نورد تقریباً زاویه ۴۵ درجه ایجاد می‌کنند که سبب برش و گسستگی در لایه‌های آلومینیوم و روی می‌گردند. همانطور که در برخی از منابع هم ذکر گردیده است [۸]، ظهور این باندهای برشی مربوط به سیکل‌های بالای فرآیند و نشان دهنده‌ی موضعی شدن تغییر شکل است.

کرنش پلاستیک زیاد و با کاهش ضخامت بیشتر، به طور قابل ملاحظه‌ای کارسخت شده و در مقابل، لایه‌های سخت‌تر فلز روی در مجاورت لایه‌های آلومینیوم تغییر شکل سخت‌تر نشان می‌دهند و دچار ناپایداری و شکست زودرس می‌شوند [۷].

با افزایش تعداد سیکل‌های فرآیند اتصال نوردی تجمعی، توزیع یکنواختی از تکه‌های لایه‌های فلز روی و نانو ذرات کاربید سیلیسیم در زمینه آلومینیوم پدید می‌آید، به طوری که در سیکل هشتم فرآیند اتصال نوردی تجمعی، یک کامپوزیت زمینه آلومینیوم با توزیع یکنواخت تکه‌های فلز روی در زمینه آلومینیوم حاصل می‌شود که ضخامت این لایه‌ها به کمتر از ۵ میکرون می‌رسد. در این کامپوزیت، ذرات کاربید سیلیسیم به



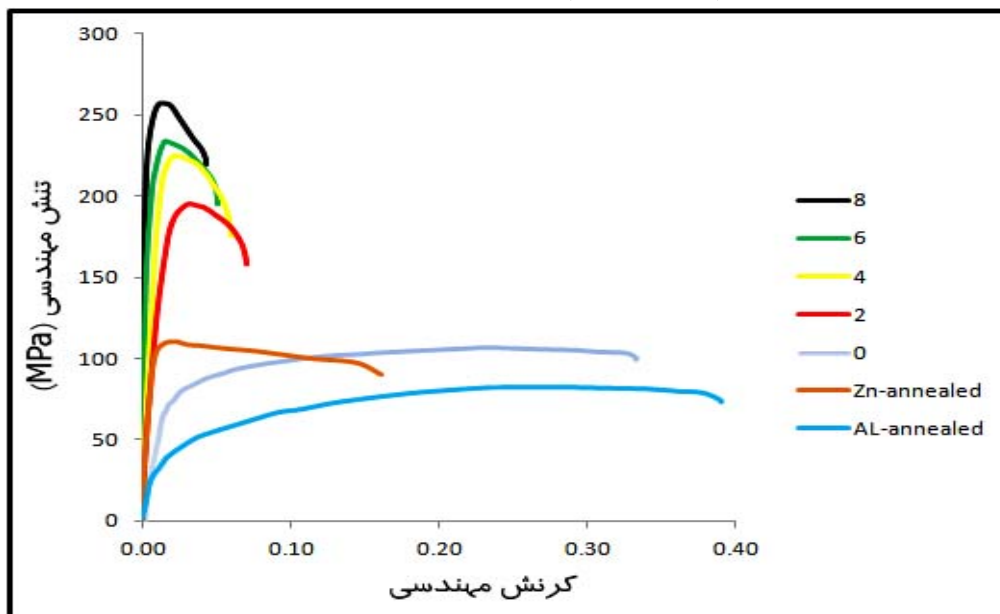
شکل (۳) تصویر تهیه شده توسط SEM از ساختار کامپوزیت Al/Zn/SiCnp در جهت طولی نورد از: (الف) سیکل دوم، (ب) چهارم، (ج) ششم و (د) هشتم



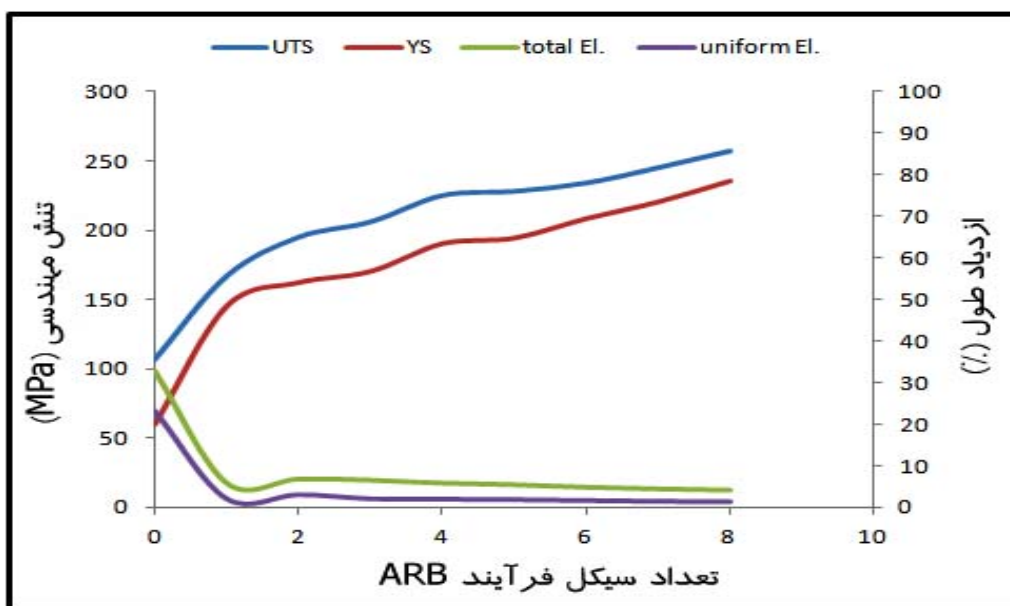
شکل (۴) باندهای برشی ایجاد شده در زمینه‌ی کامپوزیت در سیکل‌های بالای فرآیند

کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار را این گونه می‌توان بیان کرد که در سیکل‌های ابتدایی به دلیل کار سختی کمتر، میزان ازدیاد طول افزایش یافته و سپس در سیکل‌های بالاتر با افزایش میزان کار سختی و بالا رفتن استحکام از مقدار ازدیاد طول کاسته می‌شود [۹]. نانو ذرات کاربید سیلیسیم نیز با توزیع یکنواخت خود در زمینه‌ی این کامپوزیت، به صورت موانعی در مسیر حرکت نابجایی‌ها عمل کرده و تأثیر زیادی بر افزایش استحکام و سختی ایفا می‌کنند.

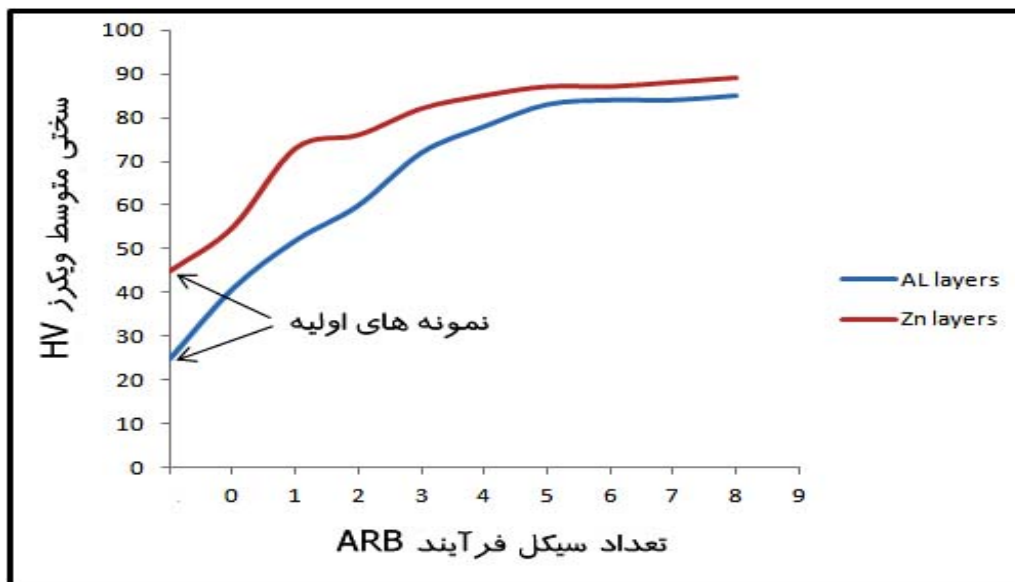
منحنی‌های تنش مهندسی - کرنش مهندسی مربوط به این آزمون در شکل (۵) و نمودار مربوط به خلاصه تغییرات خواص کششی در شکل (۶) نشان داده شده است. طبق این نمودارها با افزایش تعداد سیکل فرآیند اتصال نوردی تجمعی، میزان استحکام کششی کامپوزیت بطور پیوسته افزایش یافته و به میزان ۲۵۷ مگاپاسکال در سیکل هشتم می‌رسد که بترتیب ۳/۴ و ۲/۴۸ برابر استحکام کششی ورق‌های آلومینیوم و روی اولیه آنیل شده است. میزان ازدیاد طول کل و یکنواخت نیز با افزایش تعداد سیکل در ابتدا افزایش یافته و سپس از سیکل دوم تا سیکل هشتم



شکل (۵) دیاگرام تنش مهندسی - کرنش مهندسی کامپوزیت در سیکل‌های مختلف فرآیند اتصال نوردی تجمعی



شکل (۶) تغییرات خواص کششی کامپوزیت در سیکل‌های مختلف فرآیند اتصال نوردی تجمعی

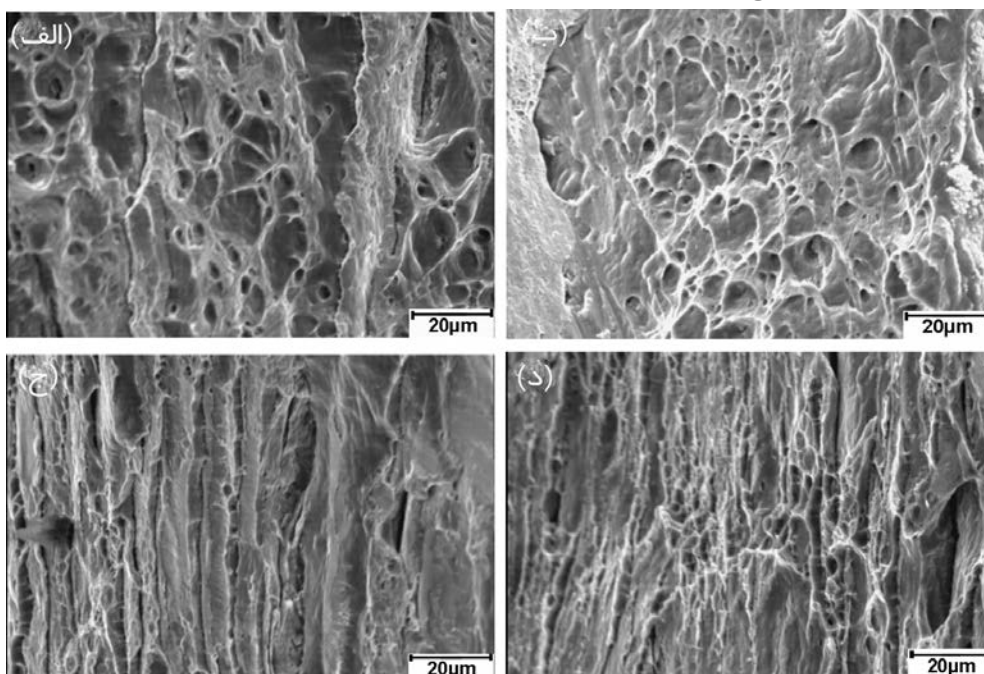


شکل (۷) تغییرات میکرو سختی ویکرز لایه‌های آلومینیوم و روی در سیکل‌های مختلف فرآیند ARB

آلومینیوم نسبت به لایه‌های روی آهسته‌تر است به این معنی که میزان سختی در لایه‌های روی در ابتدا به سرعت افزایش یافته و به یک مقدار بیشینه می‌رسد و تا سیکل‌های پایانی تغییر چندانی نمی‌کند و این در حالی است که در لایه‌های آلومینیوم افزایش سختی در لایه‌ها به آهستگی انجام می‌گیرد و این افزایش تا سیکل‌های پایانی نیز ادامه دارد و در سیکل هشتم فرآیند به یک

مقدار میکروسختی ویکرز در لایه‌های آلومینیوم و روی در هر سیکل فرآیند و در نقاط مختلف نمونه اندازه‌گیری و میزان متوسطی برای آن‌ها گزارش شد. نمودار تغییرات میکرو سختی ویکرز در سیکل‌های مختلف فرآیند در شکل (۷) نشان داده شده است. با دقت در این نمودار مشاهده می‌شود که در سیکل‌های ابتدایی فرآیند مقدار تغییرات سختی در لایه‌های

کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۸) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه‌ها در سیکل‌های مختلف فرآیند را نشان می‌دهد.



حالت اشباع تقریبی می‌رسد. برای بررسی مکانیزم و نوع شکست کامپوزیت در سیکل‌های مختلف فرآیند اتصال نوردی تجمعی، بعد از انجام آزمون کشش تک محور، سطح شکست نمونه‌ها به

شکل (۸): تصویر تهیه شده توسط SEM از سطح شکست کامپوزیت در سیکل‌های دوم (الف)، چهارم (ب)، ششم (ج) و هشتم (د) فرآیند اتصال نوردی تجمعی

تقویت کننده‌ی کاربید سیلیسیم تولید گردید که دارای استحکام خیلی بالاتری نسبت به مواد اولیه‌ی کاربردی است.

۲- با افزایش تعداد سیکل‌های فرآیند اتصال نوردی تجمعی، ضخامت لایه‌های روی کاسته شده و پس از انجام ۸ سیکل این فرآیند، کامپوزیتی با توزیع یکنواخت تکه‌های ورق روی و نانو ذرات کاربید سیلیسیم در زمینه‌ی آلومینیوم و با استحکام کششی ۲۵۷ مگاپاسکال بدست آمد.

۳- با اندازه گیری تغییرات سختی در لایه‌های آلومینیوم و روی مشخص شد که با افزایش تعداد سیکل فرآیند، میزان سختی در آن‌ها افزایش می‌یابد و در نهایت به یک حالت اشباع در سیکل هشتم می‌رسد ولی سرعت افزایش سختی در این لایه‌ها با متفاوت است.

۴- با بررسی سطح شکست نمونه‌ها مشخص گردید که با

همانطور که این تصاویر نشان می‌دهند در سیکل‌های ابتدایی فرآیند، تعداد و عمق حفراتی که اصطلاحاً دیمپل نامیده می‌شود، زیاد هستند که نشان دهنده‌ی شکست نرم است. با افزایش تعداد سیکل از میزان و عمق این دیمپل‌ها کاسته می‌شود و حالت شکست متمایل به شکست ترد می‌گردد و در سیکل پایانی سطوح شکست دارای دیمپل‌های اندک با حالت کشیده شده هستند که حالت شکست را می‌توان نرم برشی بیان کرد که جهت کشیدگی این دیمپل‌ها نیز نشان دهنده‌ی جهت گسترش ترک است [۹].

#### ۴- نتیجه گیری

۱- با انجام فرآیند اتصال نوردی تجمعی و کاربرد ورق‌های آلومینیوم و روی و نانو ذرات تقویت کننده‌ی کاربید سیلیسیم، برای اولین بار کامپوزیت لایه ای آلومینیوم/روی با نانو ذرات

- Composite by Accumulative Roll Bonding". *Materials Science and Engineering A* ۵۲۷, pp. ۴۱۴۶-۴۱۵۱, ۲۰۱۰.
- [۶] Saito Y, Utsunomiya H, Tsuji N, Saksi T. "Novel ultra-High Straining Process for Bulk Materials Development of the Accumulative Roll Bonding (ARB) Process". *Acta mater.* ۵۷۹, pp. ۴۷-۸۳, ۱۹۹۹.
- [۷] Mozaffari A., Danesh Manesh H., 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* ۴۸۹, pp. ۱۰۳-۱۰۹, ۲۰۱۰.
- [۸] Shahabi H.Sh., Danesh Manesh H. "Micro-Structural Evaluation of Cu/Nb Nano-Layered Composites Produced by Repeated Press and Rolling Process" *Journal of Alloys and Compounds* ۴۸۲, pp. ۵۲۶-۵۳۴, ۲۰۰۹.
- [۹] Eizadjou M., Kazemi Talachi A., H. Danesh Manesh, H. Shakur Shahabi, K Janghorban. "Investigation of Structure and Mechanical Properties of Multi-Layered Al/Cu Composite Produced by Accumulative Roll Bonding (ARB) Process". *Composites Science and Technology* ۶۸, pp. ۲۰۰۳-۲۰۰۹, ۲۰۰۸.
- افزایش تعداد سیکل فرآیند اتصال نوردی تجمعی از تعداد و عمق دیمپل‌ها در سطح کاسته شده و حالت شکست در سیکل‌های پایانی به صورت نرم برشی تبدیل می‌شود.
- ۵- مراجع**
- [۱] Valiev RZ, Langdon TG. "Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement". *Prog. Mater. Sci.* ۵۲, pp. ۸۸۱-۹۸۱, ۲۰۰۶.
- [۲] Shaarraf M., Toroghinejad M.R. "Nano-Grained Copper Strip Produced by Accumulative Roll Bonding Process". *Mater. Sci. Eng. A* ۴۷۳, pp. ۲۸-۳۳, ۲۰۰۸.
- [۳] Sakai G, Horita Z, Langdon TG. "Grain Refinement and Superplasticity in an Aluminium Alloy Processed by High-Pressure Torsion". *Mater. Sci. Eng. A* ۳۹۳, pp. ۵۱-۲۴۴, ۲۰۰۵.
- [۴] M. Movahedi, H.R. Madaah-Hosseini, A.H. Kokabi. "The Influence of Roll Bonding Parameters on the Bond Strength of Al-۲۰۰۲/Zn Soldering Sheets". *Materials Science and Engineering A* ۴۸۷, pp. ۴۱۷-۴۲۳, ۲۰۰۸.
- [۵] Roohollah Jamaati, Mohammad Reza Toroghinejad "Manufacturing of High-Strength Aluminum/Alumina