

بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت AA 6061 / SiC تولید شده با فرایند اصطکاکی اغتشاشی چند مرحله ای

استادیار، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مواد و فناوری های نوین، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
 استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاداسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران
 دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مواد و فناوری های نوین، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
 کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاداسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

سروش پرویزی*

حسین ترابیان

نقیسه ملایی

علیرضا گرشاسبی

چکیده

در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی هنگامی که سایز ذرات افزودنی از میکرومتر به نانومتر کاهش پیدا کند، روش‌های متداول ناکارآمد خواهند بود. کامپوزیت‌های تولید شده با این روش‌ها صرفاً یک خاصیت مکانیکی را بهبود و باعث ضعف کامپوزیت در سایر خواص می‌گردند. در این پژوهش نانوکامپوزیت لایه‌ای AA6061/SiC و همچنین نانوکامپوزیت همگن با فرایند همزن اصطکاکی اغتشاشی با موفقیت تولید شد و از آنجایی که تمرکز بر روی بهبود خواص مقاومت به ضربه و کاهش شکست ترد در عین استحکام بالا بود، تست های مکانیکی خمش سه نقطه ای، ضربه شاری و سختی‌سنجی بر روی نمونه‌ها انجام شد. سطح مقطع شکست نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ روبش الکترونی بررسی شد. نتایج به دست آمده بیانگر بهبود خواص خمشی، جذب ضربه و سطح مقطع شکست کامپوزیت لایه ای FG در مقایسه با کامپوزیت همگن HNC بود که باعث شد کامپوزیت تولیدی در عین استحکام بالا بیش از حد ترد نباشد و کاربرد گسترده‌ای داشته باشد. نتایج بدست آمده برای سختی، مقاومت خمشی و مقاومت به ضربه، به ترتیب رشد ۱۵، ۶۸ و ۱۶ درصد را نشان دادند. **واژه های کلیدی:** فرایند اصطکاکی اغتشاشی، نانوکامپوزیت، کامپوزیتهای زمینه فلزی، ساختار هدفمند، خواص مکانیکی.

Experimental Investigation of Mechanical Properties of AA 6061 / SiC Nano-Composite Produced by Multistep FSP

S. Parvizi

H. Torabian

N. Mollaei

A. R. Garshashi

Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University (SRTTU), Tehran, Iran
 Faculty of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University (CTBIAU), Tehran, Iran
 Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University (SRTTU), Tehran, Iran
 Faculty of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University (SRBIAU), Tehran, Iran

Abstract

In the production of metal matrix composites when the size of the additive particles is reduced from micrometer to nanometer, all of the conventional producing methods are inefficient. Composites produced by these methods only improve the mechanical properties and in many cases result in weakness of other properties of the produced composite. In this study, AA6061 / SiC layered nano-composite and also homogeneous nano-composite were produced with FSP process. Since the focus was on improving the impact resistance and reducing the fracture failure at high strength. Three-point bending, Charpy shock and hardness tests were performed on the specimens. Also, the cross-sectional fracture of the specimens were performed by electron microscopy (FE-SEM). The results showed that the flexural properties, traction absorption and FG composite layer breakage were improved compared to homogeneous HNC composites, which made the composite produced at the same high strength not too brittle, and this would widen the range of application of the composite. The results also showed that improvement of hardness, bending and impact properties are 15, 68, 16 respectively.

Keywords: FSP process, nano-composite, metal matrix composites (MMC), functionally graded, mechanical properties.

که نمی‌توان ماده ای یافت که همه خواص مورد نظر را دارا باشد، باید به دنبال چاره ای دیگر بود. کلید این مشکل، استفاده از کامپوزیتهاست [۱]. روش‌های مختلفی برای ساخت کامپوزیت‌ها تا کنون امتحان و اجرا شده است که هر کدام بنا به ویژگی‌های مختص به خود، مزایا و معایبی دارد. تمامی این روش‌ها با موفقیت منجر به تولید کامپوزیت شده اند اما هنگامی که مقیاس ذرات افزودنی به فلز پایه، در اندازه نانو باشد با اشکال روبرو می‌شوند. از سوی دیگر کامپوزیت‌های ساخته شده تمام ویژگی‌های مد نظر طراحان را برآورده نمی‌کنند. به

۱- مقدمه

در کاربردهای مهندسی، اغلب به تلفیق خواص مواد نیاز است. به عنوان مثال در صنایع هوافضا، کاربردهای زیر آب و حمل و نقل امکان استفاده از یک نوع ماده که همه خواص مورد نظر را فراهم نماید، وجود ندارد. در صنایع هوافضا به موادی نیاز است که ضمن داشتن استحکام بالا، سبک باشند، مقاومت سایشی و کششی خوبی داشته باشند. از آنجا

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: parvizi@srttu.edu

نفوذ پودر ۶۰۰ میکرومتر بود [۱۳]. در تحقیقات جدیدتر محمود یک کامپوزیت با زمینه پایه Al1050 و ذرات افزودنی SiC تولید کرد. ذرات در یک شیار به ابعاد ۳×۵/۱ میلی متر با عمق ۲ میلی متر قرار گرفتند و سطح آنها با یک لایه ورق آلومینیومی پوشانده شد. این تحقیق بر روی پارامترهای فرایند نظیر سرعت دورانی و پیشروی ابزار انجام شد [۱۴].

۲- روش آزمایش

آلومینیوم آلیاژی کلاس ۶۰۶۱ به عنوان ماتریس پایه در این فرایند مورد استفاده قرار گرفت [۱۵]. آلومینیوم کلاس ۶۰۶۱ پرکاربردترین آلیاژ در خانواده ۶۰۰۰ است که خواص جوش پذیری خوبی در روش های اصطکاکی در مقایسه با سایر آلیاژهای قابل عملیات حرارتی دارد. این آلیاژ قابلیت جوش پذیری ذوبی نسبتا قابل قبولی دارد که البته این قابلیت به نسبت روش های اصطکاکی پایین تر است. سختی آن از آلیاژهای کلاس ۲۰۰۰ و ۷۰۰۰ پایین تر است اما خواص بسیار مناسبی از قبیل مقاومت در برابر خوردگی، قابلیت ماشینکاری و شکل پذیری خوب دارد که آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای استفاده در روش کامپوزیت سازی اصطکاکی اغتشاشی بدل کرده است [۱۶].

نانوذرات کاربید سیلیسیوم (SiC) با درصد خلوص ۹۹/۵ درصد و اندازه ذرات ۴۵-۶۵ نانومتر به عنوان مواد افزودنی به زمینه فوق افزوده شد. رنگ این مواد سفید مایل به خاکستری و مورفولوژی آنها مکعبی شکل بود. برای ساخت نانو کامپوزیت های تولید شده در این پژوهش از دستگاه فرز ساخت کمپانی ماشین سازی تبریز استفاده شد. این دستگاه قابلیت ایجاد دور موتورهای مختلف و حرکت در سه محور x,y,z را دارا می‌باشد. ایجاد زاویه کجی ابزار نسبت به محور برای اختلاط بهتر با استفاده از تنظیم کنگی فرز بر روی 3 درجه امکان پذیر است. سرعت دورانی روی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی روی ۴۰ میلی متر بر دقیقه تنظیم شد. پین مورد استفاده در این پژوهش شامل دو بخش است: بخش رزوه دار در محیط خارجی پین و نوک گرد کروی. این شکل هندسی باعث ایجاد جریان گردابی یکدست و توزیع گرمای مناسب می‌شود که در نهایت باعث توزیع مناسبتر دانه‌ها و بهتر شدن ساختار دانه بندی می‌گردد. از آنجایی که فرایند FSP یک فرایند مکانیکی است لذا نیازمند یک فیکسچر مناسب جهت جلوگیری از اعوجاج و پارگی نمونه است. فیکسچر مورد استفاده در این فرایند اجازه بستن قطعه‌ای مستطیل شکل به حداکثر طول ۳۵ سانتی متر و حداکثر عرض ۲۰ سانتی متر را می‌دهد. در این روش نانو پودر SiC درون شیار ابتدایی با عرض ۴ میلی متر و عمق ۶ توزیع و فشرده شده است. ابعاد بلوک آلومینیوم ابتدایی ۳۳۰×۲۰۰×۸ میلی متر در نظر گرفته شد. بعد از توزیع و فشردن پودر به داخل شیارها سطح این شیار به علت جلوگیری از پاشش پودر و جرقه زدن آن با یک ابزار بدون پین (Pinless) بسته شد. پس از این مرحله نمونه FG تحت چهار مرحله عملیات همزن اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفتند. سرعت نفوذ ابزار به داخل شیار ۲ میلی متر بر ثانیه اعمال شد و پس از هر گذر فرایند توقف کافی جهت خنک شدن قطعات تا دمای اتاق و فرصت دهی کافی به کامپوزیت جهت دانه بندی مناسب در مناطق HAZ و TMAZ انجام شد. پس از هر گذر جهت رفت و برگشت ابزار عوض شد تا مناطق

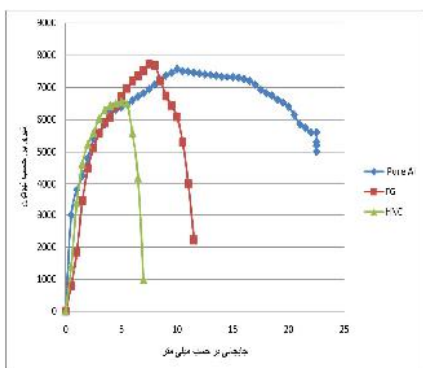
عنوان مثال با افزایش سختی خاصیت شکل پذیری خود را از دست می دهند. لذا نیاز به تولید کامپوزیت با روشی است که هم توانایی ایجاد نانو کامپوزیت را داشته باشد هم بتواند خواصی متضاد را یکجا جمع کند. به عنوان مثال کامپوزیتی که بتواند در عین استحکام بالا شکل پذیری مناسب تری نسبت به سایر کامپوزیت‌های هم رده خود داشته باشد [۲].

روش همزن اصطکاکی اغتشاشی برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی با میکروساختار بهبود یافته توسعه داده شده است. این فرایند از روش جوشکاری اصطکاکی مشتق شده است که یک روش جوشکاری حالت جامد است و در سال 1990 در موسسه (TWI) برای جوشکاری فلزاتی نظیر آلومینیوم که با فرایندهای ذوبی قابلیت جوشکاری پایینی دارند اختراع شده است [۳]. اصول کار در این روش بدین گونه است که ابتدا شیار در داخل قطعه تعبیه می‌شود تا درصد وزنی خاصی از نانو پودر سرامیکی پر می‌شود. سپس یک ابزار بدون پین سطح درز را می‌بندد. یک ابزار با طراحی خاص پین و شانه در درون شیار فرو رفته و با انجام همزمان عمل چرخش و پیشروی کامپوزیت همگن را تولید می کند. سپس شیاری با اندازه مشخص و کوچکتر از شیار قبلی دقیقا در محل سابق تعبیه می‌شود و تا درصد وزنی خاصی از پودر پر می‌شود و مجددا تمامی مراحل بالا برای این شیار نیز تکرار می‌شود. بدین ترتیب نانو کامپوزیت Functionally Graded تولید می‌شود که خواصی بهبود یافته نسبت به سایر کامپوزیت های هم رده خود دارد [۴،۳]. میشر اولین کسی بود که از فرایند همزن اصطکاکی اغتشاشی برای تولید کامپوزیت SiC استفاده کرد. بدین صورت که ذرات SiC را با متانول، تر کرد و درون شیاری در جهت حرکت ابزار قرارداد. این پودر پس از انجام فرایند لایه نازکی از کامپوزیت با ضخامت ۵۰ تا ۲۰۰ میکرومتر را بوجود آورد [۵]. در سال 2004 شرما^۲ و میشر^۱ فرایند همزن اصطکاکی اغتشاشی را جهت بهبود عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم A356 استفاده کردند [۶]. در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۶ سی جی لی^۳ و همکارانش این فرایند را جهت تولید کامپوزیت پایه منیزیم با پودر نانو SiO₂ و بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آن بکار بردند [۷]. در سال ۲۰۰۷ الانگوان^۴ و همکارانش اقدام به بررسی تاثیر سرعت پیشروی و دورانی ابزار بر تولید کامپوزیت آلومینیوم کلاس ۲۰۰۰ کردند [۸]. در پژوهشی در سال ۲۰۰۸ الانگوان و همکارانش به بررسی تاثیر شکل پین ابزار و قطر شانه آن برای بهینه کردن پارامترهای فرایند ساخت کامپوزیت پایه آلومینیوم کلاس ۶۰۰۰ پرداختند [۹]. در سال ۲۰۱۰ پرویز اسدی و بشارتی گیوی به بررسی تاثیر پارامترهای فرایند در روند ساخت کامپوزیت آلیاژ منیزیم AZ91 با نانو ذرات SiC پرداختند [۱۰]. در پژوهشی دیگر در همین راستا ظهور و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به بررسی تاثیر سرعت دورانی ابزار، تعداد پاس های فرایند و سایز ذرات اضافه شده بر ریزساختار و سختی کامپوزیت پایه آلومینیوم کلاس ۵۰۰۰ با ذرات مس پرداختند [۱۱]. در سال ۲۰۱۴ بهرام خیابوی و همکارانش به بررسی تاثیر فرایند همزن اصطکاکی اغتشاشی بر تولید کامپوزیت سطحی پایه مس با ذرات افزودنی از جنس کروم اقدام کردند [۱۲]. در یک روش نوین دیگر زحمتکش، نانو کامپوزیتی با آلومینیوم پایه ۲۰۲۴ و پودر Al₂O₃ ایجاد کرد که پودرها توسط یک جت هوا روی سطح ماتریس پایه قرار گرفتند. نتایج بدست آمده حاکی از یک ترکیب بسیار مناسب پودر و ماتریس است در عین حال که عمق

به نمونه HNC مناسبتر است به گونه ای که ذرات ریزتر، عیب جای خالی و خوشه ای کمتر و ذرات به هم مترکمتر و فشرده تر هستند. جهت گیری مناسب دانه ها در کامپوزیت FG نسبت به HNC، ریزتر شدن ذرات افزودنی به علت افزایش تعداد پاس های فرایند، کمتر شدن عیوب ریزساختاری از عمده دلایل اثرگذار بر بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت لایه ای نسبت به کامپوزیت همگن می باشند.

۲-۳- رفتار خمشی

منحنی نیرو - جابجایی حاصل از تست خمش سه نقطه ای برای سه مورد: آلومینیوم خالص، کامپوزیت همگن و کامپوزیت مرحله ای لایه ای در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳- منحنی نیرو جابجایی حاصل از تست خمش سه نقطه ای

قابل ملاحظه است که نمونه خالص آلومینیوم 6061 به علت نرم بودن و برخوردار از شکل پذیری مناسب بیشترین میزان انعطاف پذیری را از خود نشان داده و دچار شکست نشده است. همچنین می توان مشاهده کرد که کامپوزیت همگن کمترین میزان انعطاف و شکل پذیری را از خود نشان داده است و نقطه شروع ترک در آن زودتر از کامپوزیت لایه ای اتفاق افتاده است. در جدول ۱ می توان مقدار جابجایی ماندلر دستگاه تست خمش برای هر سه نمونه قبل از آغاز ترک (در دو نمونه کامپوزیت همگن و لایه ای) یا قبل از برگشت مقدار نیروی دستگاه یا به عبارتی U شکل شدن نمونه را ملاحظه کرد.

جدول ۱- میزان جابجایی ماندلر

نمونه	میزان جابجایی ماندلر قبل از ایجاد ترک یا برگشت نیرو (mm)	میزان جابجایی نهایی ماندلر (mm)	حداکثر نیرو N
آلومینیوم خالص	12.3	22.35	7568.01
کامپوزیت FG	7.8	12.83	7712.81
کامپوزیت HNC	4.63	7.84	6571.38

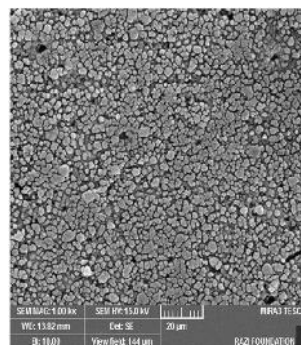
ملاحظه می شود میزان جابجایی ماندلر تا قبل از ایجاد ترک برای نمونه FG در مقایسه با نمونه HNC پیشرفتی معادل ۶۸ درصد را نشان می دهد. همچنین حداکثر نیروی وارد شده به کامپوزیت FG تا قبل از ایجاد ترک در مقایسه با کامپوزیت HNC به میزان ۴۳/۱۱۴۱ نیوتن بیشتر است. برای توضیح چگونگی این بهبود می توان به تصاویر

پیشرو و پسرو مکررا عوض شده و از کشیده شدن پودر به یک سمت خاص جلوگیری شود. سرعت پیشروی برابر با ۴۰mm/min و سرعت دورانی ۱۶۰۰ rpm تنظیم شد. برای مقایسه تاثیرات فرایند همزن اصطکاکی اغتشاشی و میزان بهبود نمونه نانوکامپوزیت لایه ای نسبت به حالت عادی یک نمونه نانوکامپوزیت همگن (HNC : Homogenous Nano Composite) نیز بوسیله فرایند همزن اصطکاکی اغتشاشی تولید شد. برای تولید این کامپوزیت بلوک آلومینیومی با ابعاد ۳۳۰×۲۰۰×۸ میلی متر تهیه شد در مرکز آن شیاری با عرض ۵ میلی متر و عمق ۶ میلی متر ایجاد شد. پس از آنکه سطح شیار با استفاده از ابزار بدون پین بسته شد چهار مرحله فرایند همزن اصطکاکی بر روی این نمونه صورت گرفت و کامپوزیت HNC با موفقیت تولید شد. سپس تست خمش سه نقطه ای، ضربه به روش شارپی و سختی سنجی و بررسی ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد.

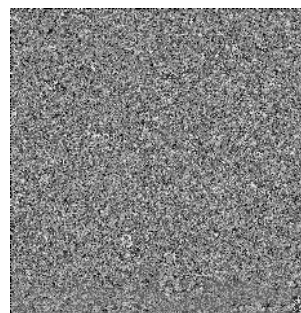
۳- بحث و نتایج

۳-۱- ریزساختار

همان طور که در دو شکل ۱ و ۲ که توسط میکروسکوپ الکترونی گرفته شده اند مشاهده می شود یک اختلاط مطلوب بین نانوذرات افزودنی و زمینه آلومینیوم مشاهده می شود.

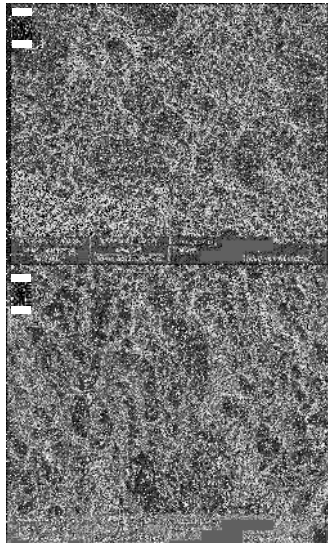


شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه FG



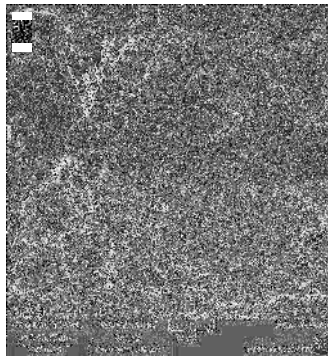
شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه HNC

این اختلاط بهینه ناشی از اعمال تغییرات شدید پلاستیکی در اثر گردش ابزار با سرعت پیشروی و دورانی بالا، انجام چند پاسه فرایند FSP و ریز شدن دانه های SiC می باشد. همان طور که مشخص است اختلاط دانه ها در نمونه FG نسبت

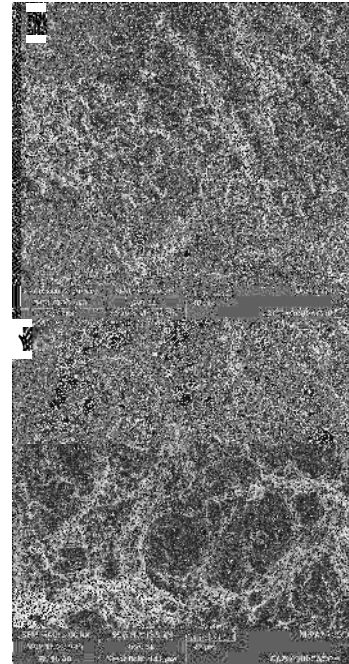


شکل ۵-۱- سطح مقطع شکست نمونه FG در وسط ضخامت ۲- سطح مقطع شکست نمونه HNC در وسط ضخامت

مجددا تصاویری از بالاترین لایه در سطح مقطع شکست تهیه شد که پرتراکم ترین لایه از نظر ذرات افزودنی در نمونه FG می باشد. همان طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است در این منطقه به علت تراکم بسیار زیاد ذرات افزودنی نمونه FG نیز به سمت شکست صفحه ای میل پیدا کرده است و سرعت رشد آسیب و ترک بیشتر از قبل شده است همچنان که در نمونه HNC نیز چنین رفتاری را قابل مشاهده است.

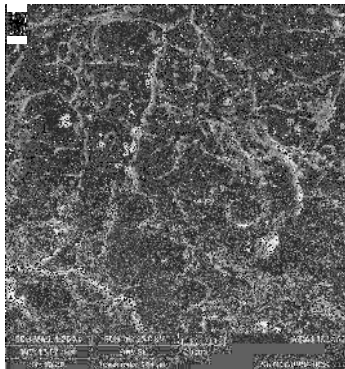


گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست برای هر دو نمونه FG و HNC اشاره کرد. دو تصویر ۱-۴ و ۲-۴ از لایه کف هر دو کامپوزیت گرفته شده است بدین معنا که لنز میکروسکوپ بر روی قسمت تحتانی کامپوزیت حین ساخت متمرکز شده است. در این حالت درصد اختلاط پودر SiC در نمونه FG نسبت به لایه فوقانی بسیار کم می باشد در صورتی که برای نمونه HNC این درصد از کف تا سطح یکسان و ثابت است.



شکل ۴-۱- سطح مقطع شکست نمونه HNC ۲- سطح مقطع شکست نمونه FG

تصاویر ۵ تهیه شده مقطع وسط ضخامت نشان می دهد. با افزایش میزان نانوذرات SiC همان نقاط چاله مانند در نمونه FG هم پدید آمده اند اما حتی در این حالت هم اندازه متوسط و تعداد این چاله ها به نسبت نمونه HNC کمتر است و به علت تعداد بیشتر پاس های فرایند FSP صورت گرفته روی این نمونه دانه بندی و ترکیب پودر و آلومینیوم بسیار ریزتر است.

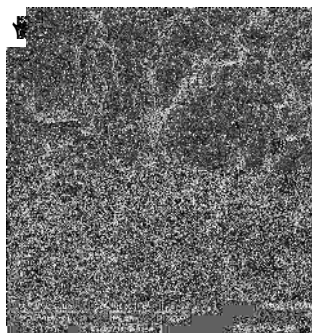
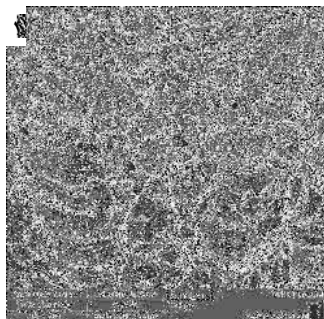


شکل ۶-۱- سطح مقطع شکست نمونه FG در بالای ضخامت ۲- سطح مقطع شکست نمونه HNC در بالای ضخامت

جدول ۲- نتایج حاصل از تست ضربه

نمونه	Pure Al	FG	HNC
میزان جذب ضربه برحسب ژول	۸۸/۹۳۷	۵۵۰/۹۴۶۷	۴۳/۸۵۶۱

برای تفسیر علت بهبود مقاومت به ضربه نمونه FG می‌توان تصویر سطح مقطع شکست نمونه‌ها را بررسی کرد (شکل ۸). سطح مقطع نمونه کامپوزیتی FG و HNC پس از پس از شکست مسیری زیگزاگی را طی نموده است.



شکل ۸-۱- سطح مقطع شکست ضربه نمونه HNC با بزرگنمایی هزار برابر
شکل ۸-۲- سطح مقطع شکست ضربه نمونه FG با بزرگنمایی هزار برابر

با توجه به شکل ۸ اجرای هشت پاس فرایند FSP بر روی نمونه FG منجر به ریزتر شدن ساختار نسبت به نمونه HNC گردیده است. در تصویر ۸-۱ حتی تغییر وضعیت بین دو لایه نیز قابل مشاهده است که اجرای فرایند بصورت دولایه باعث کمتر شدن چاله‌های ایجاد شده از سمت راست به سمت چپ تصویر شده است. این امر باعث این شد که تعداد دفعات برخورد ترک در حین ضربه با ذرات بیشتر شده و موجب مستهلک شدن انرژی ضربه گشت. همچنین توزیع ذرات ریزتر شده SiC در نمونه FG بوضوح قابل ملاحظه است. این امر موجب این می‌شود تا خود ذرات در حین کار دچار شکست نشوند و به رشد سریع ترک منجر نشود.

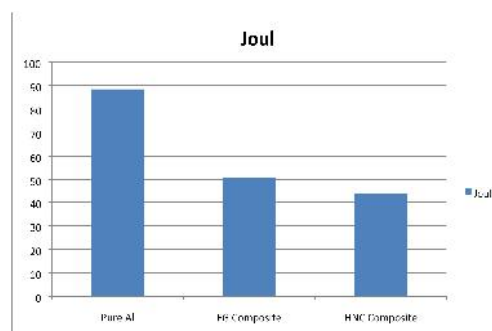
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نانوکامپوزیت لایه ای FG با استفاده از روش FSP دومرحله ای با همپوشانی کامل لایه‌ها با موفقیت تولید شد. توزیع سایه‌گون نانوذرات SiC در ماتریس پایه از مقدار صفر درصد در کف

می‌توان چنین استنباط کرد که شکست و رشد ترک در نمونه FG حالات مختلفی را از شکست نرم تا شکست ترد و صفحه‌ای تجربه کرد که همین امر منجر به مقدار بیشتر جابجایی ماندن در دستگاه تست خمش و رشد کندتر ترک و انحراف ترک از مسیر اولیه گردید در حالی که در نمونه HNC ترک از ابتدا تحت شرایط شکست ترد و صفحه‌ای قرار گرفت که باعث بیشتر بودن عیوب Dimple مانند و جای خالی رشد ترک سریعتر بود و از مسیر اولیه نیز انحراف چندانی پیدا نکرد.

۳-۳- تست ضربه

آزمایش بر روی دستگاه تست ضربه شارپی انجام شد. قانون حاکم بر کلیه آزمایش‌های ضربه این است که نمونه قبل از شکست مقداری از انرژی ضربه را جذب و مستهلک می‌سازد. مقدار انرژی مستهلک شده بسته به خواص فیزیکی و ساختاری درون ماده دارد. قبل از انجام آزمایش از کالیبره بودن دستگاه توسط حرکت بدون بار پاندول اطمینان حاصل شد. نمونه تست ضربه مطابق با استاندارد ASTM E23 آماده شد. نتایج حاصل از تست ضربه شارپی در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۷- نتایج تست ضربه برای آلومینیوم خالص، کامپوزیت لایه ای و کامپوزیت همگن

آلومینیوم ۶۰۶۱ خالص به علت خاصیت شکل پذیری مناسب خود بهترین عملکرد را در جذب ضربه ایجاد شده توسط دستگاه نشان داده است و با جذب انرژی ضربه به میزان ۸۸/۳۹۷ ژول بالاترین میزان دمپ ضربه را از خود بروز داده است. پس از آن کامپوزیت FG با جذب انرژی ضربه به میزان ۵۰/۹۴۶۷ ژول قرار دارد و پس از هر دوی این موارد کامپوزیت همگن HNC با جذب انرژی به میزان ۴۳/۸۵۶۱ ژول قرار دارد. این نتایج در جدول ۲ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که توانایی کامپوزیت FG در مقایسه با کامپوزیت HNC به میزان ۱۶/۱ درصد افزایش یافته است. این نتایج با توجه به نتایج حاصله از تست خمش بصورت کلی قابل پیش‌بینی بود چرا که در آن آزمایش مشاهده شده بود که حداکثر جابجایی ماندن قبل از ایجاد ترک در نمونه برای کامپوزیت FG بیش از کامپوزیت HNC است و این امر خود مدرکی دال بر بهبود خواص شکل پذیری کامپوزیت لایه ای نسبت به همگن است.

metal-matrix composites”, Composites: Part A 38 , 2007 : 484-494 .

[12] KV Arun, S Kumar, V Bagodi, "Fracture Toughness of Al/Al₂O₃/SiC MMC with Varied Temperature and Crack Configurations-An Experimental Study", International Journal of Material Science Innovations (IJMSI) 2013; 5: 256-270.

[13] B.Zahmatkesh, M.H.Enayati, "A novel approach for development of surface nanocomposite by friction stir processing", Materials Science and Engineering, A 527, 2010: 6734-6740 .

[14] E. R. I. Mahmoud, M. Takahashi, T. Shibayanagi and K. Ikeuchi, "Effect of friction stir processing tool probe on fabrication of SiC particle reinforced composite on aluminium surface", Science and Technology of Welding and Joining, 2009; 14: 413-425 .

[15] L.Suvarna, A.Kumar, "A novel approach for fabrication of Cu-Al₂O₃ surface composite by Friction Stir Processing" Procedia Materials Science, 2014; 5: 434-443 .

[16] Sobczak JJ, Drenchev L, "Metallic functionally graded materials: a specific class of advanced composites", J. Mater. Sci. Technol., 2013; 29(4): 297-316.

کامپوزیت به مقدار هجده درصد در سطح رسید. مشاهده شد که این توزیع سایه گون و ریزتر شدن نانوذرات و دانه بندی مناسبتر نسبت به توزیع یکنواخت در نمونه کامپوزیت HNC منجر به خواص مکانیکی برتر گردید. سختی نمونه FG نسبت به HNC به میزان ۱۵ درصد، مقاومت در مقابل خمش به میزان ۶۸ درصد و مقاومت در برابر جذب ضربه به میزان ۱۶ درصد ارتقا یافت. مسیر رشد ترک در نمونه FG پس از اندکی، از مسیر اولیه خود انحراف یافت که این حالت برای نمونه HNC اتفاق نیفتاد و ترک در این نمونه مسیر اولیه و اصلی خود را تا حین شکست قطعه دنبال کرد. سطح مقطع شکست در نمونه FG از حالت شکست نرم به حالت شکست ترد و شکست صفحه ای درآمد در صورتی که نمونه FG از ابتدا شکست صفحه ای را تجربه کرد. در سطح مقطع شکست هر دو نمونه عیوب چاله مانند (Dimple) مشاهده شد که اندازه و تعداد این عیوب در نمونه HNC بیشتر بود. از آنجایی که فرایند FSP یک فرایند ترمومکانیکی است لذا مجموع مشاهدات و نتایج بدست آمده بیانگر این مطلب بود که پارامترهای اثرگذار بر خواص مکانیکی کامپوزیت های ساخته شده، ریزساختار، چگونگی توزیع نانوذرات در ماتریس پایه و کسر حجمی ذرات افزودنی بودند.

۵- مراجع

- [1] Yoshinori Nishida, "Introduction to Metal Matrix Composites, Fabrication and Recycling". Springer, 2013.
- [2] Walter Krenkel: Ceramic Matrix Composites, Fiber Reinforced Ceramics and their Applications. Wiley-VCH, 2008.
- [3] Suresh G. Advani and Kuang-Ting Hsiao: Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs). Woodhead Publishing, 2012.
- [4] Verónica Torrijos Berlanas, "Fatigue and fracture behaviour of composites with metal matrix", phd thesis, University of Science and Technology, Akademia Górniczo-Hutnicza, 2013 .
- [5] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, "Friction Stir Welding and Processing", Materials Science and Engineering, R 50, 2005: 1-78.
- [6] Mishra, R.S., Ma, Z.Y., Charity, "Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite", Materials Science and Engineering, 2003: 307310.
- [7] Rajiv Sharan Mishra, Partha Sarathi De Nilesh Kumar, "Friction Stir Welding and Processing" Science and Engineering. Springer, 2014.
- [8] Jiao Pedro Machado da Gandra, "Preliminary Study on the Production of Functionally Graded Materials by Friction Stir Processing", phd thesis .
- [9] L. Mishnaevsky Jr, K. Derrien, D. Baptiste, "Effect of microstructure of particle reinforced composites on the damage evolution: probabilistic and numerical analysis", Composites Science and Technology, 2004; 64: 1805-1818.
- [10] Rajiv S. Mishra, Murray, W. Mahoney, "Friction Stir Welding and Processing", ASM International, Technology & Engineering, 2007.
- [11] Sedat Ozden, Recep Ekici, Fehmi Nair, "Investigation of impact behaviour of aluminium based SiC particle reinforced