

تولید و بررسی خواص نانو کامپوزیت سطحی آلومینیوم / نانولوله کربنی (AI-CNT)

تولید شده با فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی

امین ربیعی زاده^{۱*}، احمد افسری^۲ و مهرداد محمدی^۳

چکیده

استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده به دلیل خواص آن مانند استحکام مخصوص بالا، سختی بالا و مقاومت در برابر سایش خوب در حال افزایش است. فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی یک روش بهسازی سطح نوین است که برای ساخت کامپوزیت سطحی توسعه یافته است. این فرآیند با استفاده از یک ابزار غیرمصرفی برای تولید حرارت اصطکاکی و عمل اغتشاش انجام می‌گیرد. در این مقاله، امکان انجام پراکندگی به صورت توده‌ای تقویت‌کننده نانو لوله کربن در کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم، با موفقیت مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها در معرض تعداد پاس‌های گوناگون فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی از یک تا چهار پاس قرار گرفتند. مشاهده‌های ریزساختاری با بکارگیری میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح بهسازی‌شده، انجام گرفت. خواص مکانیکی شامل ریزسختی و مقاومت به سایش، به گونه کامل ارزیابی شدند. خصوصیات سایشی کامپوزیت سطحی با استفاده از یک دستگاه آزمایش سایش پین بر روی دیسک، در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که سختی در سطح کامپوزیت تولیدشده چهار پاسه، ۱۹۵ ویکرز بود که دو برابر سخت‌تر نسبت به آلیاژ پایه آلومینیوم می‌باشد. همچنین، فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی، ضریب اصطکاکی را در مورد نمونه چهار پاس، در حدود ۵۰ درصد کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی، آلیاژ آلومینیوم، نانو لوله کربن، خواص مکانیکی.

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، دانشکده مهندسی، گروه مواد.

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، دانشکده مهندسی، گروه ساخت و تولید.

۳- مربی، مرکز آموزش علمی - کاربردی خانه کارگر شیراز، گروه مکانیک.

*- نویسنده مسئول مقاله: a.rabiezadeh@gmail.com

پیشگفتار

در سال‌های اخیر چندین روش بهسازی سطح همانند عملیات ذوب با لیزر انرژی بالا، پرتو الکترونی با انرژی بالا، اسپری پلاسما و ریخته‌گری جهت ساخت کامپوزیت‌های سطحی شبکه فلزی، توسعه پیدا کرده‌اند. در این بین، عملیات ذوب لیزری که فرایند مهندسی لیزر سطح^۱ نیز نامیده می‌شود، به گونه‌ای وسیع کاربرد دارد. در طی این فرآیند، لیزر باعث ذوب سطح از ماده پایه به همراه ماده ته‌نشین شونده می‌شود که معمولاً یک پودر کاربیدی (کاربید سیلیسیم، کاربید تیتانیم و غیره) یا ترکیبی از پودر کاربیدی و یک ماده پیوندی شامل کبالت، آلومینیوم یا نیکل است. ماده پوشش‌دهنده یا پیش از این ته‌نشین شده و یا به وسیله نازل مخصوص، همزمان با پرتوافکنی ستون لیزر به همراه گاز خنثی روی سطح تزریق می‌شود [۱].

در این روش‌های ارائه شده باید به این نکته توجه داشت که شکل‌گیری کامپوزیت سطحی بر اساس ایجاد فاز مایع در دماهای بالا صورت گرفته است. در این مورد، اجتناب از واکنش بین سطحی میان ذرات تقویتی و شبکه فلزی، سخت بوده و باعث تولید فازهای زیان‌آور می‌شود. از این گذشته، کنترل بحرانی پارامترهای فرآیند برای بدست آوردن ریز ساختار انجمادی ایده آل مورد نیاز است. بدیهی است اگر فرآیند تولید کامپوزیت سطحی در زیر نقطه ذوب ماده پایه اجرا شود، می‌تواند از مشکلات ذکر شده بالا جلوگیری شود.

کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با نانو ذرات در مقایسه با آلیاژهای تقویت نشده، دارای استحکام زیاد، مدول یانگ بالا و مقاومت به سایش مطلوب، خزش و خستگی خوب می‌باشند که باعث افزایش روز افزون کاربرد آن‌ها در صنایع حمل و نقل و هوافضا شده است. در بسیاری از شرایط کاری، عمر مفید قطعات وابسته به خواص سطحی آن‌ها، از جمله مقاومت در برابر سایش می‌باشد. در این گونه موارد شایسته است که تنها لایه‌ای از سطح قطعه تقویت شده و ترکیب و ساختار اولیه حجم درونی قطعه ثابت بماند. یکی از روش‌های تولید لایه سطح کامپوزیتی، روش فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی می‌باشد. با توجه به ویژگی‌ها و برتری‌های این روش نسبت به

روش‌های گذشته در ساخت نانو کامپوزیت‌های سطحی و همچنین، بهینه‌سازی پارامترهای موثر، ضرورت گسترش و پیشرفت در این زمینه برای کاربردهای پژوهشی و صنعتی وجود دارد [۲].

فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی^۲ (FSP) شیوه‌ای است که به تازگی به وسیله میشر^۳ [۳] برای بهسازی ریزساختاری و بهبود خواص مکانیکی فلزات ابداع شده است که بر اصول جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی^۴ (FSW) بنا شده است با این تفاوت که در این فرآیند جوشکاری در میان نیست و ابزار غیرمصرفی به درون قطعه رفته و دو ماده، شامل ماده پایه و ماده تقویت‌کننده را با هم مخلوط کرده و با تولید کامپوزیت پایه فلزی، خواص بهینه‌ای نسبت به فلز پایه بدست می‌آید. در این روش نیاز به یک ابزار سیلندری شکل است که شامل شانه^۵ و پین می‌باشد. با چرخش ابزار و تماس پین با سطح ماده، ناحیه انتخاب شده در اثر اصطکاک، گرم و دچار تغییر شکل پلاستیکی و اکستروژن شده و با ترکیب حرکت پیشروی ابزار، مواد به طور متلاطم از جلوی پین به پشت آن جریان می‌یابند. نقش اصلی شانه ابزار تمرکز حرارت اصطکاکی به وسیله جلوگیری از فرار و دور شدن ماده پلاستیک شده از ناحیه متلاطم می‌باشد و طی این پروسه، پودری که در طول خط حرکت پین ریخته شده است، با ماده پلاستیک شده مخلوط و در صورت بهینه کردن پارامترها، به صورت کاملاً همگن درون ماده مخلوط شده و کامپوزیت ذکر شده را به وجود می‌آورد [۴]. پین ابزار دو کار اصلی زیر را انجام می‌دهد:

- گرم کردن قطعه به وسیله اصطکاک
- حرکت دادن مواد بمنظور اتصال

گرما در اثر اصطکاک بین پین و قطعه کار و تغییر شکل پلاستیک قطعه تولید می‌شود. حرارت متمرکز شده باعث نرم شدن مواد اطراف پین و با تلفیق حرکت دورانی پین، باعث حرکت مواد از جلوی پین به عقب می‌گردد و بر اثر این فرآیند اتصال در حالت جامد رخ می‌دهد. بدیهی است که به علت ساختار هندسی پین، موادی که در اطراف پین

² -Friction Stir Processing

³ - Mishra

⁴ - Friction Stir Welding

⁵ - Shoulder

¹ - laser surface engineering (LSE)

در ابتدا روی قطعه کارهای مربوط به نانوکامپوزیت سطحی با استفاده از تیغه فرز اره‌ای شیاری به عمق ۳ میلی‌متر و عرض یک میلی‌متر ایجاد شد. سپس شیارها از پودر نانو لوله کربن پر و قطعه کار داخل گیره مخصوص روی میز ماشین بسته شد. شکل ۳ یک قطعه کار فرآوری شده را نشان می‌دهد. کلیه آزمایش‌های این پژوهش با سرعت دورانی ثابت (دقیقه/ دور) ۱۶۰۰، سرعت پیشروی ثابت (دقیقه/ میلی‌متر) ۱۶ انجام گرفت. زاویه انحراف ابزار نیز ۲° ثابت در خلاف جهت پیشروی در نظر گرفته شد. برای تولید نانو کامپوزیت سطحی، چهار قطعه کار با اجرای پاس‌های گوناگون تهیه گردید. مشخصات قطعه کارها در جدول ۳ آورده شده است. پس از انجام آزمایش‌ها، قطعه کارها از سطح مقطع قسمت فرآوری شده بریده و نمونه‌هایی از آن‌ها خارج گردید. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی شامل برش، مانیت، سنباده زنی‌های گوناگون (تا ۵۰۰۰)، پالیش، نم‌زدنی و اچ کردن مورد مطالعه میکروساختاری قرار گرفتند. سپس با دستگاه میکروسختی سنج، سختی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، با آزمون سایش‌سنجی، خواص سایشی ناحیه فرآوری شده قطعه کارها مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

بررسی ریز ساختاری

نمونه‌های آماده‌سازی شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM) با بزرگنمایی‌های بالای ۲۰۰۰ برابر، مورد مطالعه ریز ساختاری قرار گرفت و چگونگی توزیع نانو لوله‌های کربن در فلز پایه مشاهده گردید. با بررسی تصاویر میکروسکوپی، چگونگی توزیع نانوذرات در فلز پایه آشکار می‌شود.

در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، وقتی از آشکارساز الکترون‌های برگشتی^۳ استفاده می‌شود، اجزای ساختاری که دارای میانگین عدد اتمی بالاتری هستند روشن‌تر دیده می‌شوند در حالی‌که اجزای ساختاری که دارای عدد اتمی پایین‌تری هستند، به صورت تیره‌تر دیده می‌شوند.

حرکت می‌کنند، به‌خوبی با یکدیگر ترکیب می‌شوند [۵]. شکل ۱ نمای کلی این فرآیند را نشان می‌دهد.

فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی با بهره‌مندی از ویژگی‌های منحصر به فرد جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی می‌تواند بمنظور توسعه فرایندهای جدید، بر اساس مفهوم اصطکاک اغتشاشی مورد استفاده قرار گیرد [۶]. خواص ناشی از این فرایند عبارتند از:

- مقدار کم حرارت تولیدی
- جریان پلاستیک شدید از مواد
- اندازه دانه‌های خیلی ریز در منطقه اغتشاشی
- اصلاح عیوب ترک و تخلخل‌های ریخته‌گری
- اختلاط مکانیکی از لایه‌های سطحی و زیر

سطحی [۷].

نانو لوله‌های کربنی^۱ به دلیل دانسیته پایین (حدود 2 gr/cm^3) و مدول الاستیک بالای خود (حدود $1/8 \text{ GPa}$) بمنظور کاربرد در تقویت‌کننده کامپوزیت‌ها به‌عنوان مواد کارآمدی می‌باشند. به این دلیل در سال‌های اخیر این مواد بمنظور تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های زمینه‌فلزی، پلیمری و سرامیکی بکار رفته اند [۸]. مشخصات نانو لوله کربن بکارگرفته شده در این پژوهش در جدول ۲ مشاهده می‌شود. هدف از این پژوهش، تولید نانو کامپوزیت AI-CNT با استفاده از فرایند FSP و بررسی ریز ساختار و خواص مکانیکی و تریبولوژیکی لایه سطحی در مقایسه با آلیاژ پایه است.

مواد و روش پژوهش

در این پژوهش از ورق‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با ابعاد (۷۰*۲۰) میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر به‌عنوان فلز پایه و از پودر نانو لوله کربن به‌عنوان پودر تقویت‌کننده استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در جدول ۳ آورده شده است. ابزار شامل یک پین و شانه استوانه‌ای شکل بود و جنس آن از فولاد تندبر (HSS) انتخاب گردید. ابعاد ابزار شامل قطر پین ۵ میلی‌متر، قطر شانه ۱۸ میلی‌متر و ارتفاع پین ۳ میلی‌متر بود. شکل ۲ ابزار مورد استفاده در فرایند FSP در این پژوهش را نشان می‌دهد.

² - Scanning electron microscopy

³ - Backscattered Detector

¹ - Carbon nanotubes, CNTs

پیشروی ابزار که در جهت دورانی ابزار قرار می‌گیرند، با اعداد مثبت نشان داده شده‌اند. پس از اندازه‌گیری میکروسختی نقاط گوناگون در چهار نمونه، جهت مقایسه بهتر و بررسی میکروسختی نواحی گوناگون ناحیه فرآوری شده سطوح کامپوزیتی، پروفیل سختی مربوط به این چهار نمونه نسبت به خط مرکزی رسم شد. در شکل ۵ این پروفیل سختی قابل مشاهده است.

با بررسی بخش‌های گوناگون ناحیه فرآوری شده، می‌توان گفت که مقدار میکروسختی در اثر فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی در ناحیه فرآوری شده مربوط به نمونه یک (FSP بدون پودر نانو، یک پاس) پایین‌تر از مقدار سختی فلز پایه می‌باشد (در حدود ۶۰ ویکرز). با توجه به این‌که مقدار سختی در آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 استفاده شده ۱۰۷ ویکرز اندازه‌گیری شده بود و از آن‌جا که آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ جزء آلیاژهایی است که عملیات حرارت‌پذیر^۱ می‌باشند، فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی یک ناحیه نرم اطراف مرکز ناحیه فرآوری را در یک تعداد از آلیاژهای آلومینیومی عملیات حرارت پذیر بوجود می‌آورد، این وضعیت ناشی از شرایط بازپخت در نتیجه انحلال رسوبات تقویت‌کننده در ناحیه فرآوری شده می‌باشد که تغییر شکل پلاستیک شدید داده‌اند و دمای بالایی را در طول فرآیند FSP تجربه کرده‌اند [۹].

در نمونه‌های مربوط به سطوح کامپوزیتی می‌توان بیان کرد که افزایش تعداد پاس‌های اجرایی باعث توزیع یکنواخت‌تر نانو لوله‌های کربن در شبکه فلز پایه شده و همچنین اندازه دانه بندی را در ناحیه اغتشاشی ریزتر کرده است. مجموع این عوامل باعث افزایش میکروسختی در منطقه فرآوری شده است.

ارزیابی رفتار سایش

پس از آماده‌سازی اولیه شامل سمباده‌زنی و پالایش قطعه‌کارها، آزمون سایش به وسیله دستگاه سایش‌سنج از نوع پین روی صفحه، با اعمال نیروی ۵۰۰ گرمی روی پین، با سرعت سایش ۰/۰۴ (ثانیه/متر) در مسافت طی شده ۲۵۰ متر برای هر نمونه جداگانه انجام گرفت.

شکل ۴ توزیع نانو ذرات را نشان می‌دهد، همان‌گونه که در تصاویر SEM مشاهده می‌شود، زمینه که آلیاژ آلومینیوم می‌باشد و دارای میانگین عدد اتمی بالاتری نسبت به CNT است، روشن‌تر دیده می‌شود و ذرات پراکنده شده در آلیاژ که تیره‌ترند، تجمع نانو لوله‌های کربن می‌باشد. توزیع ذرات نانو در نمونه‌های یک پاسه (شکل ۴-a) و دو پاسه (شکل ۴-b) بیشتر به صورت تجمعی است که بیش‌تر در محل، نا پیوستگی‌ها و شکاف‌ها در فصل مشترک برخی از لایه‌های اختلاط، گیر افتاده بودند که حاصل اغتشاش کمتر و اختلاط مکانیکی ضعیف‌تر نانو لوله کربنی با ماده فلز پایه در تعداد پاس‌های کمتر می‌باشند. دلیل این نوع پراکندگی نایکنواخت این است که زمانی که از یک ماده تقویت‌کننده در زمینه فلزی استفاده می‌شود، فصل مشترک زمینه و جزء تقویت‌کننده دارای اهمیت زیادی است. با توجه به این موضوع که نانو لوله‌های کربنی به دلیل اندازه نانو متری و سطح ویژه بالای (۱۰۰ m²/gr) خود، به شدت آگلومره می‌شوند. در نمونه چهار پاسه (شکل ۴-c) توزیع نانو ذرات لوله کربنی به طور یکنواخت‌تری می‌باشد که این ناشی از انجام فرآوری با تعداد پاس‌های بیشتر می‌باشد که اجرای پاس‌های بیشتر، باعث کم‌شدن شکاف‌های بین فصل مشترک لایه‌های ناحیه فرآوری، شده است. در تصویر میکروسکپ الکترونی با بزرگنمایی ۶۰۰۰۰ برابر (شکل ۴-d) نانولوله‌های کربنی در ناحیه FSP شده به وسیله پیکان نشان داده شده‌اند که به صورت سطح مقطع‌هایی دایره‌ای از سطح خارج شده‌اند.

بررسی میکروسختی

نواحی گوناگون قسمت فرآوری شده نمونه‌ها با دستگاه میکروسختی‌سنج در عمق ۰/۱۲۱ میلیمتر پایین‌تر از سطح و اعمال نیروی (gf) ۲۰۰ در مدت زمان ۱۰ ثانیه، مورد آزمایش قرار گرفت و سختی آن‌ها نسبت به فلز پایه مقایسه گردید. اندازه‌گیری میکروسختی با فواصل ۲ میلی‌متری نسبت به خط مرکزی ناحیه فرآوری شده و در دو طرف خط مرکزی انجام شد. نقاط اندازه‌گیری شده در ناحیه پسروی ابزار که در خلاف جهت دورانی ابزار قرار می‌گیرند، با اعداد منفی و نقاط اندازه‌گیری شده در ناحیه

¹ - Heat-treatable Alloys

را کاهش داده است. شکل ۸ درصد کاهش نرخ سایشی نسبت به فلز پایه را نشان می دهد.

نتیجه گیری

۱- تولید سطح نانو کامپوزیت آلومینیوم/ نانولوله کربن با استفاده از فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی با موفقیت انجام گرفت.

۲- با اجرای فرایند FSP با چهار پاس، نانو ذرات لوله کربنی به گونه همگن تری نسبت به تعداد پاس های پایین تر، در فلز پایه توزیع شدند.

۳- اختلاط نانو ذرات لوله کربنی در سطح آلیاژ آلومینیوم به روش FSP باعث بهبود سختی در نانو کامپوزیت های سطحی نسبت به فلز پایه گردید.

۴- اجرای فرآیند FSP با تعداد پاس های بالاتر، باعث افزایش میزان سختی سطوح نانو کامپوزیتی گردید، به گونه ای که در فرایند با چهار پاس، سختی به ۱۹۵ ویکرز رسید که تقریباً دو برابر شده بود.

۵- ارزیابی سایشی و اصطکاکی فرایند برای نمونه های یک پاس، دو پاس و چهار پاس نشان داد که با افزایش تعداد پاس ها ضریب اصطکاکی کاهش یافته، به گونه ای که در نمونه چهار پاسه نصف نمونه فلز پایه می باشد.

۶- اختلاط نانو لوله های کربنی باعث کاهش نرخ سایشی در نمونه های کامپوزیتی شده است، به طوری که در نمونه چهار پاس نرخ سایش ۴۷٪ نسبت به فلز پایه کاهش پیدا کرده است.

ناحیه فرآوری شده رفتار سایشی و ضریب اصطکاکی قطعه کارها مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل های ۶ و ۷ ضریب اصطکاکی و نرخ سایشی قطعه کارها مقایسه شده است. در نمودارهای مربوط به ضریب اصطکاکی، دامنه تغییرات ضریب اصطکاکی تقریباً یکنواخت است و میانگین ضریب اصطکاکی بدست آمده برای نمونه فلز پایه (۰/۸۵) بیشتر از سایر نمونه هاست و پس از آن به ترتیب نمونه های یک پاس بدون پودر نانو (۰/۷۲) و یک پاس همراه پودر نانو (۰/۶۲) و چهار پاس با پودر نانو (۰/۴۲) دارای بیشترین ضریب اصطکاکی بودند.

ارزیابی این نمودارها نشان دهنده این موضوع است که این رفتار اصطکاکی حاکی از تغییرات پیوسته توپوگرافی سطح و یا شیمی سطح در جریان آزمایش می باشد و فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی، باعث کاهش نرخ سایشی در طی انجام آزمون سایش شده است که ناشی از ریزدانه شدن ناحیه اغتشاشی و توزیع یکنواخت نانو لوله های کربنی بر روی سطح است.

همچنین، بررسی نمودارهای نرخ سایشی نشان می دهد که نمودار مربوط به اجرای فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی بدون پودر نانو در سطح پایین تری نسبت به نمودار مربوط به فلز پایه می باشد و نمودارهای نرخ سایشی فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی با پودر نانو یک پاس، دو پاس و چهار پاس به ترتیب در سطح پایین تری قرار دارند و تاثیر اجرای فرآیند با پاس های بالاتر را نشان می دهد که باعث فوق ریز دانه شدن ماده پایه و توزیع یکنواخت تر نانو لوله های کربن با خاصیت مقاوم در برابر سایش سایشی بالا، در منطقه فرآوری شده و نرخ سایشی

References

- 1- C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, and W.H. Bingel, Calabrese M. Scripta Mater; 48:1451, 2003.
- 2- R. S. Mishra, and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.
- 3- W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, and G.B. Paterit. Application No. 9125978.8, 1991.
- 4- R. Nandan, T. DebRoy, and H.K.D.H. Bhadeshia, "Recent Advances in Friction Stir Welding-Process, Weldment Structure and

Properties", Progress in Materials Science, vol. 53, pp. 980-1023, 2008 .

5- B. London, M. Mahoney, B. Bingel, M. Calabrese, and D. Waldron, September. In: Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, pp. 27-28, 2001.

6- S.F. Hulbert and J.J. Klawitter, " An introduction to Bioseramics" Vol. 15, pp. 123-130, 1971.

7- R.S. Mishra, Z.Y. Ma and I. Charit, "Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite", Materials

Science and Engineering A, Vol.341, pp.307-310, 2003.

8- S. Rajiv, M. Murray and W. Mahoney, Friction Stir Welding and Processing., editors, p 1-5 DOI:10.1361/fswp, p001, 2007.

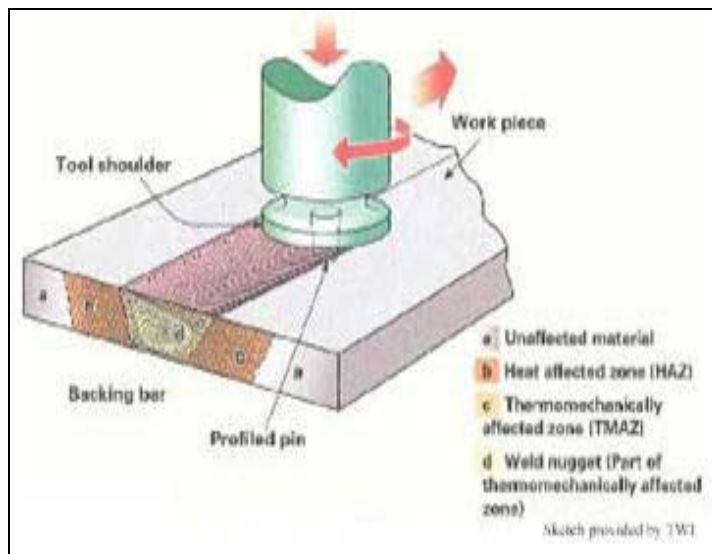
9- J.A. Querin, H.A. Rubisoff, and J.A. Schneider, "Effect of Weld Tool Geometry on Friction Stir Welded Ti-6Al-4V", Trends in

Welding Research, Proceedings of the 8th International Conference, pp. 108-112, 2009.

۱۰- پژوهشکده صنعت نفت تهران www.ripi.Ir

۱۱- ع. یزدانی "تولید کامپوزیت های نانوساختار آلومینیوم- کربید بور به روش اتصال تجمعی نورد" مجله مواد نوین، جلد ۱، شماره ۳، ص ۲۳-۳۲، بهار ۱۳۹۰.

پیوست‌ها



شکل ۱- نمای کلی از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی [۱].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم AA6061

Element	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Mn	Ti	Al
(wt%)	1.0	0.59	0.5	0.3	0.2	0.05	0.2	Rem



شکل ۲- ابزار مورد استفاده در فرایند FSP.

جدول ۲- مشخصات نانو لوله کربن چند دیواره (MWCNT) [۹].

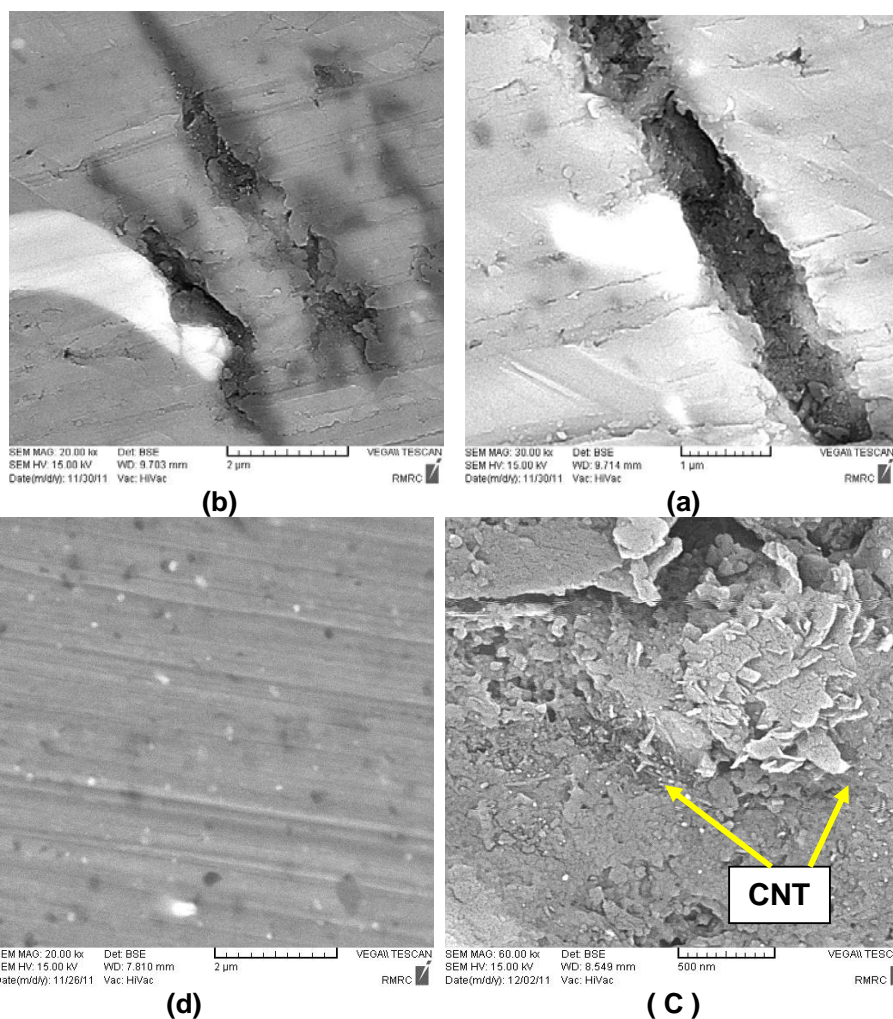
مقدار	مشخصه
۱۰- ۲۰ (nm)	قطر خارجی
۱۰ (μm)	طول
٪۲	درصد خاکستر
٪۹۵	خلوص
۲۵۰- ۲۸۰ (m ² /g)	سطح ویژه
٪۳	کربن آمورف



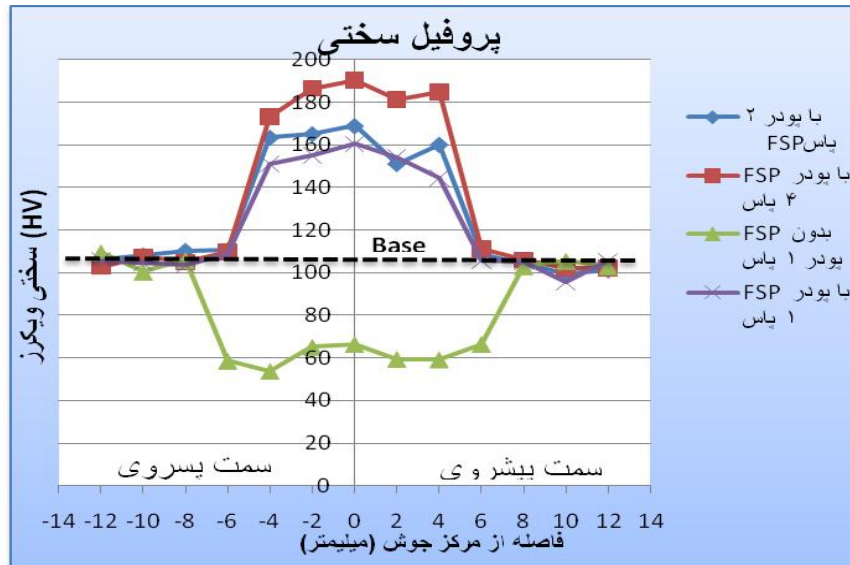
شکل ۳- قطعه کار فرآوری شده.

جدول ۳- مشخصات قطعه کارهای فرآوری شده

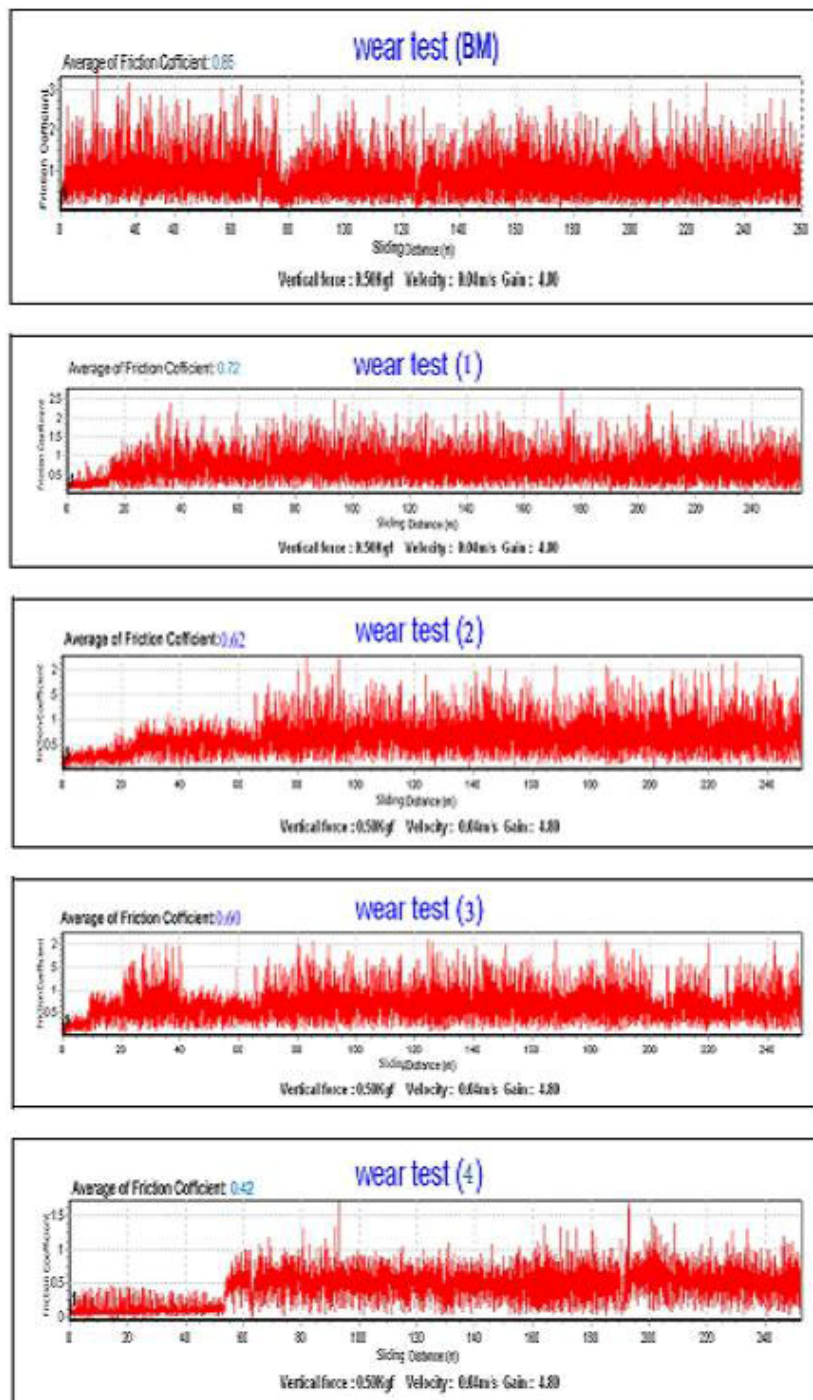
شماره قطعه کار	مشخصات قطعه کار
۱	FSP بدون پودر نانو
۲	FSP با پودر نانو یک پاس
۳	FSP با پودر نانو دو پاس
۴	FSP با پودر نانو چهار پاس



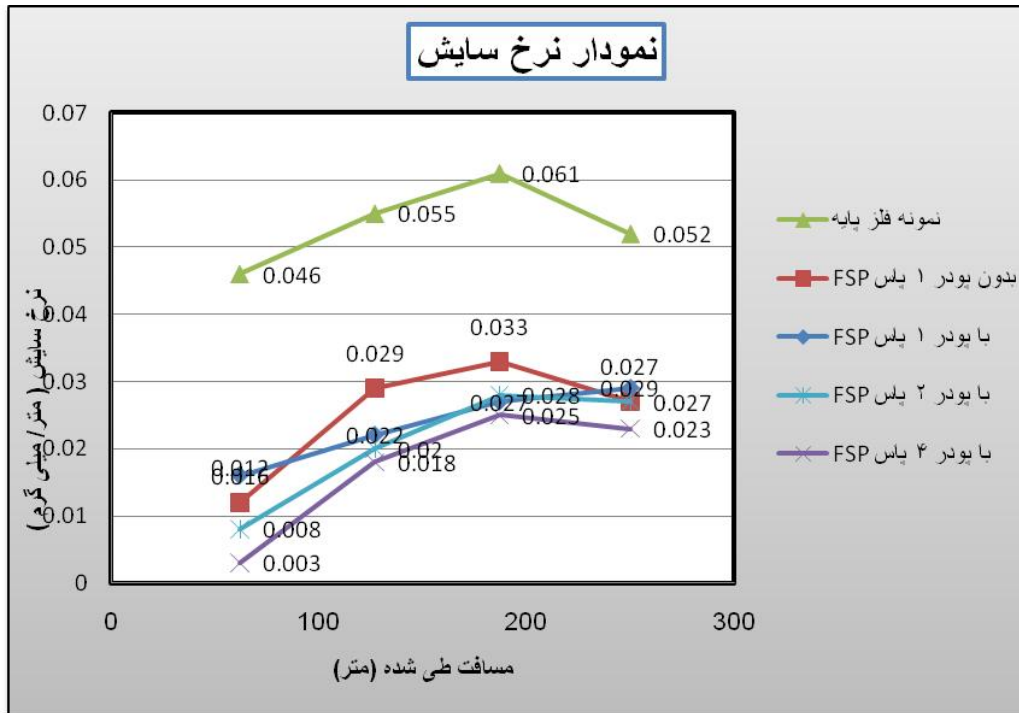
شکل ۴- توزیع ذرات نانو لوله کربن (a) نمونه یک پاسه، (b) نمونه دوپاسه، (c) نمونه چهارپاسه، (d) تصویر نمونه چهار پاسه با بزرگنمایی بیش تر.



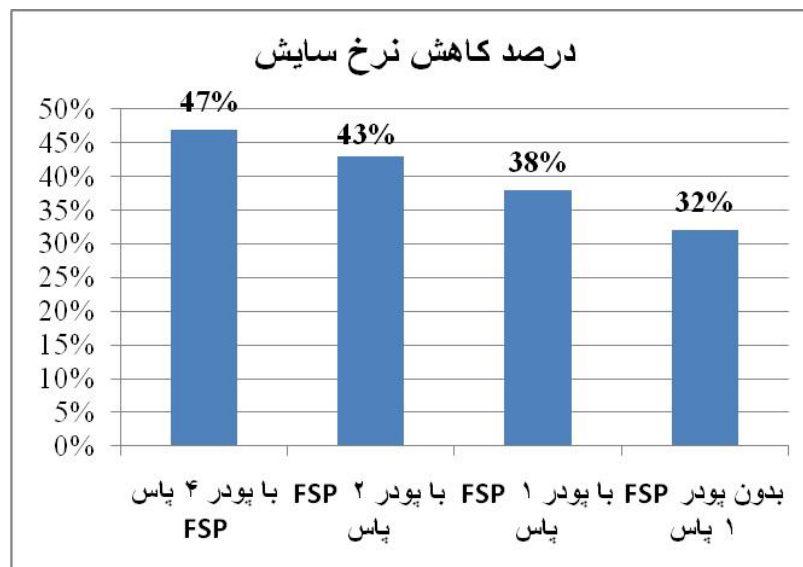
شکل ۵ - پروفیل سختی مربوط به نمونه های فرآوری شده



شکل ۶- تغییرات ضریب اصطکاک در نمونه های (ماده پایه)، (1 FSP بدون پودر نانو، 2 FSP با پودر نانو یک پاس، 3، 4 FSP با پودر نانو دو پاس، 4 FSP با پودر نانو چهار پاس).



شکل ۷- تغییرات نرخ سایش با مسافت لغزشی بین در فلز پایه و نمونه های فرآوری شده با FSP.



شکل ۸- درصد تغییرات نرخ سایشی نسبت به فلز پایه

