تولید و بررسی خواص نانو کامپوزیت سطحی آلومینیوم/ نانولوله کربنی (Al-CNT) تولید شده با فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی

امین ربیعی زاده 1 ، احمد افسری 7 و مهرداد محمدی *7

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 می گیرد. دراین مقاله، امکان انجام پراکندگی به صورت تودهای تقویت کننده 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 بهسازی شده، انجام گرفت. خواص مکانیکی شامل ریزسختی و مقاومت به سایش، به گونه کامل ارزیابی شدند. خصوصیات سایشی کامپوزیت انجام شرفت. نتایج نشان دادند که سختی درسطح کامپوزیت تولیدشده چهار پاسه، 591 ویکرز بود که دو برابر سخت تر نسبت به آلیاژ پایه آلومینیوم می باشد. همچنین، فرآیند اصطکاکی – اغتشاشی، ضریب اصطکاکی را در مورد نمونه چهار پاس، در حدود 15 درصد کاهش داد.

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

¹⁻مربي، دانشگاه آزاد اسلامي واحد شيراز، دانشکده مهندسي، گروه مواد. -

²⁻استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، دانشکده مهندسی، گروه ساخت و

³⁻مربي، مركز آموزش علمي - كاربردي خانه كارگر شيراز،گروه مكانيك.

پیشگفتار

در سالهای اخیر چندین روش بهسازی سطح همانند عمليات ذوب با ليزر انرژي بالا، پرتو الكتروني با انرژي بالا، اسپری پلاسما و ریخته گری جهت ساخت کامپوزیت های سطحی شبکه فلزی، توسعه پیدا کرده اند. در این بین، عملیات ذوب لیزری که فرایند مهندسی لیزر سطح نیز نامیده می شود، به گونهای وسیع کاربرد دارد. در طی ایس فرآیند، لیزر باعث ذوب سطح از ماده پایه به همراه ماده تەنشىن شوندە مى شود كە معمولاً يىك يودر كاربيدى (کاربید سیلسیم، کاربید تیتانیم و غیره) یا ترکیبی از پودر کاربیدی و یک ماده پیوندی شامل کبالت، آلومینیوم یا نیکل است. ماده پوشش دهنده یا پیش از این تهنشین شده و یا بهوسیله نازل مخصوص، همزمان با پرتوافکنی ستون لیزر به همراه گاز خنثی روی سطح تزریق می شود [1]. در این روشهای ارائه شده باید به این نکته توجه داشت که شکل گیری کامپوزیت سطحی بر اساس ایجاد فاز مایع در دماهای بالا صورت گرفته است. در این مورد، اجتناب از واكنش بين سطحي ميان ذرات تقويتي و شبكه فلزي، سخت بوده و باعث تولید فازهای زیان آور می شود. از این گذشته، کنترل بحرانی پارامترهای فرآیند برای بدست آوردن ریز ساختار انجمادی ایده آل مورد نیاز است. بدیهی است اگر فرآیند تولید کامیوزیت سطحی در زیر نقطه ذوب ماده پایه اجرا شود، می تواند 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

¹ - laser surface engineering (LSE)

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 [2].

فرآیند اصطکاکی _ اغتشاشی (FSP) شیوهای است که به تازگی به وسیله میشرا [3] برای بهسازی ریزساختاری و بهبود خواص مکانیکی فلزات ابداع شده است کے بر اصول جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی ٔ (FSW) بنا شده است با این تفاوت که در این فرایند جوشکاری در میان نیست و ابزار غیرمصرفی به درون قطعه رفته و دو ماده، شامل ماده پایه و ماده تقویت کننده را با هم مخلوط کرده و با تولید کامیوزیت 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 می باشد 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 کاملا همگن درون ماده مخلوط شده و کامپوزیت ذکر شده را به وجود می آورد[4]. پین ابزار دو کار اصلی زیر را انجام می دهد:

- 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

حرکت میکنند ،بهخوبی با یکدیگر ترکیب می شوند [5]. شکل 1 نمای کلی این فرآیند را نشان میدهد.

فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی با بهره مندی از ویژگیهای منحصر به فرد جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی می تواند بمنظور توسعه فرایندهای جدید، بر اساس مفهوم اصطکاک اغتشاشی مورد استفاده قرار گیرد [6]. 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 ریخته گری
- اختلاط مكانيكي از لايههاى سطحى و زير سطحى[7].

نانو لولههای کربنی به دلیل دانسیته پایین (حدود نانو لولههای کربنی به دلیل دانسیته پایین (حدود $2 \, \mathrm{gr/cm}^3$) و مدول الاستیک بالای خود (حدود 1/8GPa) بمنظور کاربرد در تقویت کننده کامپوزیتها به به این دلیل در سالهای اخیر این مواد بمنظور تقویت کننده در کامپوزیتهای زمینه فلزی، پلیمری و سرامیکی بکار رفته اند [8]. مشخصات نانو لوله کربن بکار گرفته شده در این پژوهش تولید در جدول 2 مشاهده می شود. هدف از این پژوهش، تولید نانو کامپوزیت AI-CNT با استفاده از فرایند AI و بررسی ریز ساختار و خواص مکانیکی و تریبولوژیکی لایه سطحی در مقایسه با آلیاژ یایه است.

مواد و روش پژوهش

در این پژوهش از ورقهای آلیاژ آلومینیوم 6061 با ابعاد (70% 200) میلی متر و ضخامت 6 میلی متر به عنوان پودر فلز پایه و از پودر نانو لوله کربن به عنوان پودر تقویت کننده استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم 6061 در جدول 3 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 5 میلی متر ، قطر شانه 18 میلی متر و ارتفاع پین 3 میلی متر بود. شکل 2 ابزار مورد استفاده در فرایند FSP در این پژوهش را نشان می دهد.

² - Scanning electron microscopy

در ابتدا روی قطعه کارهای مربوط به نانوکامیوزیت سطحی با استفاده از تیغه فرز ارهای شیاری به عمق 3 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 3 یک قطعه کار فرآوری شده را نشان می دهد. کلیه آزمایشهای این پژوهش با سرعت دورانی ثابت (دقیقه/ دور)1600، سرعت پیشروی ثابت (دقيقه/ ميلي متر) 16 انجام گرفت. زاويه انحراف ابزار نیز °2 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 3 آورده شده است. پس از انجام آزمایشها، قطعه کارها از سطح مقطع قسمت فرآوری شده بریده و نمونه هایی از آنها خارج گردید. نمونهها پس از آمادهسازی شامل برش، مانت، سنباده زنیهای گوناگون (تا 5555)، پالیش، نمدزنی و اچ کردن مورد مطالعه میکروساختاری قرار گرفتند. سیس با دستگاه میکروسختی سنج، سختی آنها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، با آزمون سایشسنجی، خواص سایشی ناحیه

نتایج و بحث

بررسی ریز ساختاری

نمونههای آمادهسازی شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با بزرگنماییهای بالای 20000 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.

فرآوری شده قطعه کارها مورد ارزیابی قرار گرفت.

در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، وقتی از آشکارساز الکترونهای برگشتی استفاده می شود، اجزای ساختاری که دارای میانگین عدد اتمی بالاتری هستند روشن تر دیده می شوند در حالی که اجزای ساختاری که دارای عدد اتمی پایین تری هستند، به صورت تیره تر دیده می شوند.

³ - Backscattered Detector

¹ - Carbon nanotubes, CNTs

شكل 4 توزيع نانو ذرات را نشان مى دهد، همان گونـه که در تصاویر SEM مشاهده می شود، زمینه که آلیاژ آلومینیوم می باشد و دارای میانگین عدد اتمی بالاتری نسبت به CNT است، روشـنتـر دیـده مـیشـود و ذرات پراکنده شده در آلیاژ که تیرهترند، تجمع نانو لولههای کربن میباشد. توزیع ذرات نانو در نمونههای یک پاسه (شکل a–4) و دو پاسـه (شـکل d–b) بیشـتر بـه صـورت تجمعی است که بیشتر در محل، نا پیوستگی ها و شکافها در فصل مشترک برخی از لایه های اختلاط، گیر افتاده بودند که حاصل اغتشاش کمتر و اختلاط مکانیکی ضعیفتر نانو های لوله کربنی با ماده فلز پایه در تعداد پاسهای کمتر می باشند. دلیل این نوع پراکندگی نایکنواخت این است که زمانی که از یک ماده تقویت کننده در زمینه فلزی استفاده میشود، فصل مشترک زمینه و جزء تقویت کننده دارای اهمیت زیادی است. با توجه به این موضوع که نانو لولههای کربنی به دلیل اندازه نانو متری و سطح ویژه بالای ($100 \text{ m}^2/\text{gr}$) خود، به شدت آگلومره می شوند. در نمونه چهار پاسه (شکل A-C) توزیع نانو ذرات لوله کربنی به طور یکنواختتری می باشد که این ناشی از انجام فرآوری با تعداد پاس های بیشتر میباشد که اجرای پاسهای بیشتر، باعث کمشدن شكافهاى بين فصل مشترك لايههاى ناحيه فرآورى، شده است. در تصویر میکروسکپ الکترونی با بزرگنمایی 60000 برابر (شکل 4-d) نانولولههای کربنی در ناحیه FSP شده به وسیله پیکان نشان داده شدهاند که به صورت سطح مقطعهایی دایرهای از سطح خارج شدهاند.

بررسي ميكرو سختي

نواحی گوناگون قسمت فرآوریشده نمونهها با دستگاه میکروسختی سنج در عمق 0/121 میلیمتر پایینتر از سطح و اعمال نیروی (gf) 200 در مدت زمان 10 ثانیه، مورد آزمایش قرار گرفت و سختی آنها نسبت به فلز پایه مقایسه گردید. اندازه گیری میکروسختی با فواصل 2 میلیمتری نسبت به خط مرکزی ناحیه فرآوری شده و در دو طرف خط مرکزی انجام شد. نقاط اندازه گیری شده در ناحیه پسروی ابزار که در خلاف جهت دورانی ابزار قرار میگیرند، با اعداد منفی و نقاط اندازه گیری شده در ناحیه

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 5 این پروفیل سختی قابل مشاهده است.

با بررسی بخشهای گوناگون ناحیه فرآوری شده، می توان گفت که مقدار میکروسختی در اثر فرآیند اصطکاکی – اغتشاشی در ناحیه فرآوریشده مربوط به نمونه یک (FSP بدون پودر نانو، یک پاس) پایین تر از مقدار سختی فلز پایه می باشد (در حدود 60 ویکرز). با توجه به این که مقدار سختی در آلیاژ آلومینیوم 106-1460 استفاده شده 107 ویکرز اندازه گیری شده بود و از آنجا که آلیاژ آلومینیوم 6061 جزء آلیاژهایی است که عملیات حرارتپذیر می باشند، فرآیند اصطکاکی – اغتشاشی یک ناحیه نرم اطراف مرکز ناحیه فرآوری را در یک تعداد از آلیاژهای آلومینیومی عملیات خرارت پذیر بوجود می آورد، این وضعیت ناشی از شرایط خرارت پذیر بوجود می آورد، این وضعیت ناشی از شرایط بازپخت در نتیجه انحلال رسوبات تقویت کننده در ناحیه فرآوری شده می باشد که تغییر شکل پلاستیک شدید دادهاند و دمای بالایی را در طول فرآیند FSP تجربه کرده اند[9].

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

ارزیابی رفتار سایش

پس از آمادهسازی اولیه شامل سمبادهزنی و پالیش قطعه کارها، آزمون سایش به وسیله دستگاه سایشسنج از نوع پین روی صفحه، با اعمال نیروی 500 گرمی روی پین، با سرعت سایش 0/04 (ثانیه/ متر) در مسافت طی شده 250 متر برای هر نمونه جداگانه انجام گرفت.

¹ - Heat-treatable Alloys

سایش سایشی بالا، در منطقه فرآوری شده و نرخ سایشی را کاهش داده است. شکل 8 درصد کاهش نرخ سایشی نسبت به فلز پایه را نشان می دهد.

نتيجه گيري

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

FSP با جهار پاس، نانو ذرات لوله FSP با جهار پاس، نانو ذرات لوله کربنی به گونه همگن TSP نسبت به تعداد پاسهای پایین TSP پایین TSP بایین تر، در فلز پایه توزیع شدند.

3- اختلاط نانو ذرات لوله کربنی در سطح آلیاژ آلومینیم به روش FSP باعث بهبود سختی در نانو کامپوزیتهای سطحی نسبت به فلز پایه گردید.

4- اجرای فرآیندFSP با تعداد پاسهای بالاتر، باعث افزایش میزان سختی سطوح نانو کامپوزیتی گردید، به گونهایکه در فرایند با چهار پاس، سختی به 195 ویکرز رسید که تقریباً دو برابر شده بود.

5- ارزیابی سایشی و اصطکاکی فرایند برای نمونههای یک پاس، دو پاس و چهار پاس نشان داد که با افزایش تعداد پاسها ضریب اصطکاکی کاهش یافته، به گونهای که در نمونه چهار پاسه نصف نمونه فلز پایه میباشد.

6- اختلاط نانو لولههای کربنی باعث کاهش نرخ سایشی در نمونه در نمونههای کامپوزیتی شده است، به طوری که در نمونه چهار پاس نرخ سایش 47٪ نسبت به فلز پایه کاهش پیدا کرده است.

Refrences

- 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", Progressin Materials Science, vol. 53, pp. 980–1023, 2008.

ناحیه فرآوری شده رفتار سایشی و ضریب اصطکاکی قطعه کارها مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکلهای 6 و 7 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 (0/85) ضریب اصطکاکی بدست آمده برای نمونه فلز پایه (0/85) بیشتر از سایر نمونههاست و پس از آن به ترتیب نمونههای یک پاس بدون پودر نانو (0/72) و یک پاس همراه پودر نانو (0/62) و چهار پاس با پودر نانو (0/42) دارای بیش ترین 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 میباشد 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 لولههای کربنی بر روی سطح است.

همچنین، بررسی نمودارهای نرخ سایشی نشان میدهد که نمودار مربوط به اجرای فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی بدون پودر نانو در سطح پایین تری نسبت به نمودار مربوط به فلز پایه میباشد 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 پاسهای بالاتر را نشان میدهد که باعث فوق ریز دانه شدن ماده پایه و توزیع یکنواخت تر نانو لولههای کربن با خاصیت مقاوم در برابر

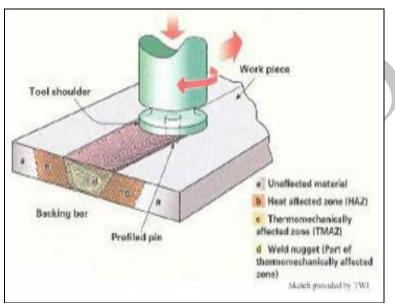
- 5- B. London, M. Mahoney, B. Bingel, M. Calabrese, and D. Waldron, September,. In: Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, pp. 27–28, 2001.
- 6- S.F. Hulbert and J.J. Klawitter, "An introduction to Bioseramics" Vol. 15, pp. 123-130, 1971.
- 7- R.S. Mishra, 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.

15- پژوهشکده صنعت نفت تهران www. ripi. Ir پژوهشکده صنعت نفت تهران -11 ع. یزدانی "تولید کامپوزیت های نانوساختار آلومینیوم-کاربید بور به روش اتصال تجمعی نورد" مجله مواد نوین، جلد1، شماره 3، ص 33-33، بهار 1395.

پيوستها



شکل3 نمای کلی از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی [1].

جدول 1- تركيب شيميايي آلياژ آلومينيوم 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





.FSP شکل $\mathbf{2}$ ابزار مورد استفاده در فرایند

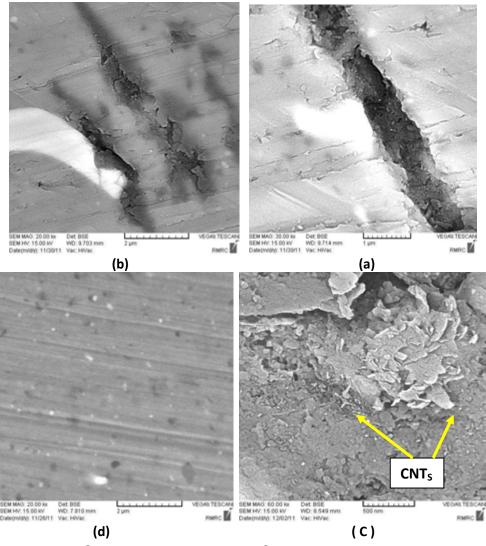
جدول 2- مشخصات نانو لوله كربن چند ديواره (MWCNT) [9].

مقدار	مشخصه
32– 42 (nm)	قطر خارجی
32(μm)	طول
7.4	درصد خاکستر
7/.;7	خلوص
472 – 4:2 (m ² /g)	سطح ويژه
7.5	كربن آمورف

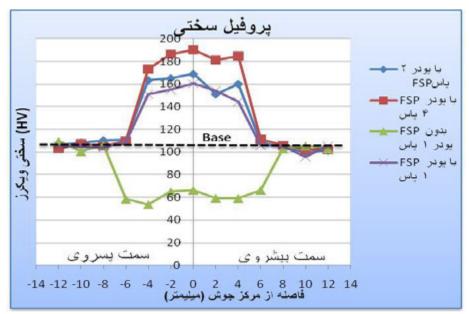


شکل5– قطعه کار فرآوری شده.

 شماره قطعه کار	مشخصات قطعه كار			
1	FSP بدون پودر نانو			
2	FSP با پودر نانو یک پاس			
3	FSP با پودر نانو دو پاس			
4	FSP با پودر نانو چهار پاس			

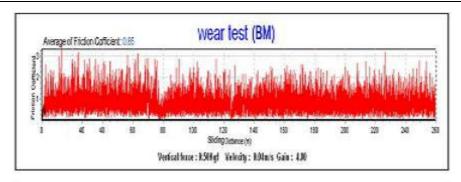


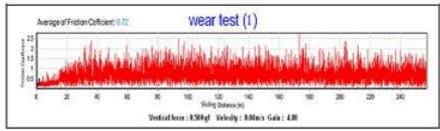
شکل6– توزیع ذرات نانو لوله کربن a)نمونه یک پاسه،b) نمونه دوپاسه،c) نمونه چهار پاسه، d) تصویر نمونه چهار پاسه با بزرگنمایی بیش تر.

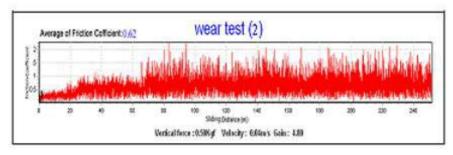


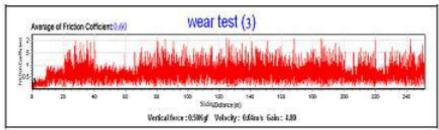
شكل 5 - پروفيل سختى مربوط به نمونه هاى فرآورى شده

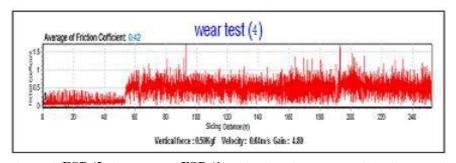




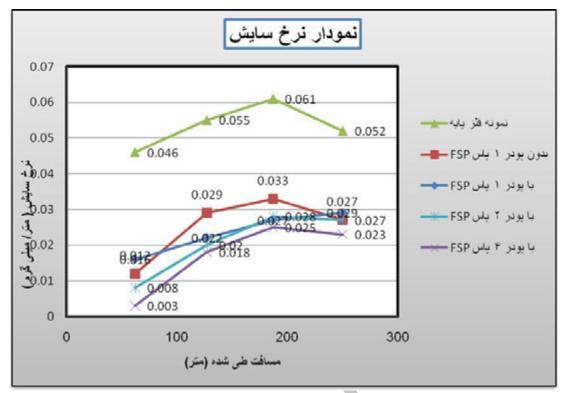




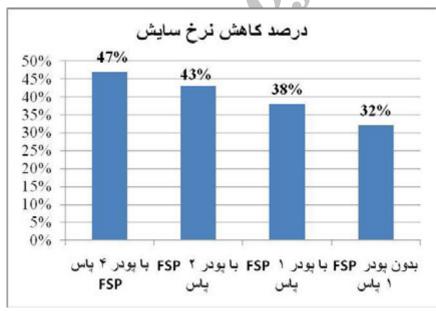




(3،سکل FSP بنون پودر نانو، FSP با پودر نانو یک پاس، FSP بنون پودر نانو یک پاس، FSP با پودر نانو دو پاس، FSP با پودر نانو یک پاس، FSP با پرداز نانو یک پرداز نانو یک



شکل 7- تغییرات نرخ سایش با مسافت لغزشی پین درفلز پایه و نمونه های فر آوری شده با FSP.



شكل 8-درصد تغييرات نرخ سايشي نسبت به فلز پايه