

بررسی رفتار سایشی پوشش WC/Ni اعمال شده به روش جوشکاری TIG بر روی فولاد St52

مجید رشیدی، علیرضا اعلائی، مسعود کسیری

مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۵/۰۷/۱۲ - پذیرش مقاله: ۹۶/۰۳/۱۰)

چکیده

آلیاژسازی سطحی توسط فرآیند TIG یکی از روش‌های بهبود خواص سطحی در فولادها است. این روش بدون تغییر خصوصیات زیرلایه صورت می‌گیرد. آلیاژسازی از طریق افزودن عنصر آلیاژی مدنظر قبل و یا در حین ذوب سطحی انجام می‌شود. در این پژوهش با استفاده از نیکل و ذرات تقویت کننده کاربید تنگستن آلیاژسازی سطحی توسط فرآیند جوشکاری قوس تنگستن-گاز با جریان اعمالی ۱۳۰ آمپر بر روی فولاد St52 انجام گردید. همچنین تأثیر افزایش درصد پودر WC بر روی سختی سطح نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. دامنه افزایش سختی پوشش‌های ایجاد شده بین ۲۲۵ تا ۶۸۰ ویکرز اندازه‌گیری شد که این مقدار در نمونه بدون پوشش حدود ۱۸۰ ویکرز است. ارزیابی ریزساختاری از سطوح ساییده شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. مقاومت سایشی نمونه‌ها بوسیله دستگاه سایش رفت و برگشتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از سطوح سایش نشان داد که در حالت کلی افزایش مقدار ذرات تقویت کننده WC باعث افزایش مقاومت زمینه در برابر تغییر فرم شده و در نهایت سبب بهبود مقاومت سایش نمونه‌ها می‌گردد. نتایج تست سایش نشان داد که با افزایش درصد ذرات تقویت کننده کاربید تنگستن تا ۸۰٪ وزنی مقدار کاهش وزن نمونه‌ها کمتر شده و نرخ سایش نمونه‌ها تا مقدار $100 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ کاهش می‌یابد. واژه‌های کلیدی: کاربید تنگستن، سخت کاری سطحی، TIG، مقاومت به سایش.

The Wear Behavior of Coated WC/Ni Imposed by TIG Welding Method on St52 Steel

Majid Rashidi, Alireza Alaei, Masoud Kasiri

Advanced Materials Research Center, Faculty of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

(Received 3 October 2016, accepted 31 May 2017)

Abstract

Surface alloying by TIG process, is one of the techniques to improve the surface properties of the steels. This method can be conducted without changing the substrate properties. Alloying is carried out by adding certain alloying elements before or during surface melting. In this study, Surface alloying is done using nickel and Tungsten Carbide reinforcement particles, and by gas Tungsten arc welding process on steel St52. Surface melting was conducted with applied current of 130 mA and the effect of increasing the percentage of WC powder on surface hardening of the samples were evaluated. The range of increasing hardness the coatings made between 225 to 680 Vickers was measured and the amount hardness of the uncoated sample is about 180 Vickers. Infrastructure assessment of worn surfaces was performed by scanning electron microscopy SEM. Typical abrasion resistance was evaluated by means of reciprocating wear machine. The results of wear surfaces showed that by increasing the amount of WC reinforcement particles, the matrix strength against changing the form is increased, and eventually causes to improve the wear resistance of the samples. The wear test results showed that with increasing percentages of Tungsten Carbide reinforcement particles up to 80%, the amount of weight loss were significantly reduced, and the wear rate of the samples decreases up to $100 \text{ mm}^3/\text{Nm}$.

Keywords: surface hardening, Tungsten Carbide, wear resistance, TIG.

E-mail of Corresponding author: alaei45alireza@gmail.com.

مقدمه

است. سرعت این فرآیندها زیاد بوده و با انتخاب متغیرهای مناسب ایجاد لایه‌های سطحی آلیاژی یا کامپوزیتی با ضخامت تا چندین میلیمتر قابل حصول هستند. اما این روش‌ها به دلیل هزینه زیاد مقرون به صرفه نبوده و نیز با توجه به در دسترس نبودن در کشور با محدودیت استفاده روبرو هستند یکی از روش‌هایی که در سالهای اخیر برای ایجاد لایه های سطحی مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از قوس TIG است. لایه‌های ایجاد شده در این روش با لایه‌های ایجاد شده توسط پرتوهای پرنانژی (پرتو لیزر و پرتو الکترونی) تفاوت کمی دارند. بعنوان مثال لایه ایجاد شده در روش TIG دارای ضخامتی در حدود دو برابر ضخامت لایه ایجاد شده در روش‌های پرتوالکترونی و لیزر است [۴]. در پژوهش حاضر از مخلوطی از پودرهای نیکل و کاربید تنگستن جهت آلیاژسازی سطحی فولاد St52 استفاده گردید انرژی لازم برای ذوب و آلیاژسازی نیز توسط فرآیند قوس تنگستن تأمین شد. سپس لایه‌های سطحی آلیاژی شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مرتبط با دستگاه سنجش انرژی طیف پرتو و پراش سنجی پرتو X تحت مطالعات ریزساختاری قرار گرفتند. همچنین ارزیابی خواص آن‌ها توسط سختی‌سنجی میکروسکوپی و دستگاه سایش صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از فولاد St52 (مطابق با استاندارد DIN) به عنوان زیرلایه استفاده شد. نتایج آنالیز کوانتومتری این نمونه در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین برای رویه کاری از پودر WC با اندازه ذرات متوسط ۸۰ میکرومتر و پودر Ni خالص (۹۹/۸٪) استفاده شد.

ابتدا شش نمونه مکعب مستطیل از جنس فولاد St52 به ابعاد $(20 \times 5 \times 0.8)$ cm آماده گردید. در قسمت میانی هریک از نمونه‌ها بخشی به ابعاد $(20 \times 1/5)$ cm برای ایجاد روکش و انجام آزمون‌های بعدی در نظر گرفته شد. نمونه‌ها ابتدا

امروزه عملیات سطحی آلیاژهای مهندسی از اهمیت فراوانی برخوردار شده است و دلیل آن نیز استفاده روز افزون سطوح اجزا و قطعات مهندسی در صنعت است. در این راستا متالورژی سطح نیز ارزش و اهمیت خود را به اثبات رسانیده است. متالورژی سطح در حقیقت علم و روشی است که به کمک آن می‌توان بدون تغییر دادن جنس و زمینه، قطعات مهندسی با کیفیت بهتری تهیه نمود. این قطعات همچنین در مقابل سایش، خوردگی و اکسیداسیون مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. امروزه همچنین پوشش‌های کامپوزیتی به دلیل دارا بودن خواصی چون مقاومت به سایش، سختی، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون و یا خصوصیات خود روغن‌کاری مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند [۱]. دارا بودن این خواص برتر آن‌ها را قادر به کاربرد در زمینه‌هایی مانند مته‌های حفاری و موتورهای احتراقی نموده است. برخی ذراتی که به عنوان فاز دوم مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارتند از ZrO_2 ، SiC ، Al_2O_3 ، WC . خواص پوشش به دست آمده علاوه بر نوع زمینه تا حد زیادی وابسته به ذرات فاز دوم و نحوه تولید آن‌هاست [۲]. کاربید تنگستن ماده‌ای کامپوزیتی با زمینه فلزی است که به طور گسترده‌ای در ابزار برش، دریل، پانچ و مواد پوشش سخت به کار می‌رود. پوشش کامپوزیتی نیکل-کاربید تنگستن، به دلیل مقاومت در برابر خوردگی بالا ناشی از حضور نیکل و سختی و مقاومت به سایش بالا ناشی از کاربید تنگستن، یک پوشش مناسب محسوب می‌گردد و می‌تواند جایگزین مناسبی برای پوشش‌های کروم سخت باشد. نیکل از جمله مهمترین عناصر آلیاژی است که برای آلیاژسازی و افزایش خواص مکانیکی می‌توان به فولادها اضافه نمود. آلیاژسازی سطحی با استفاده از نیکل و کاربید تنگستن موجب افزایش سختی و مقاومت به سایش در سطح قطعات می‌شود [۳]. در سالهای اخیر جهت تامین انرژی ذوب سطحی مورد نیاز از روش‌هایی همچون لیزر و پرتو الکترونی استفاده شده

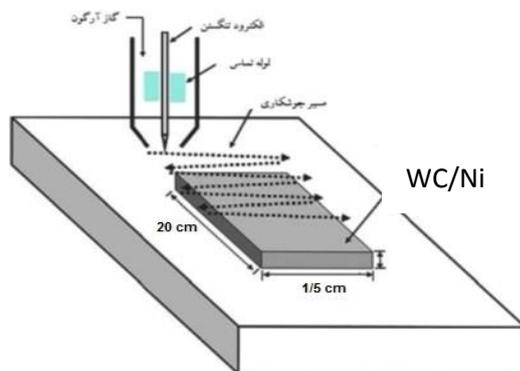
حجمی WC، نمونه ۴ با پانزده درصد حجمی WC، نمونه ۵ نیز با بیست درصد حجمی WC پوشش داده شدند. به منظور اتصال موقت و اولیه پودر مذکور بر روی نمونه‌های فولادی، پودر با مقدار کمی چسب CMC^۱ آغشته و با استفاده از شابلون مقوایی روی سطح نمونه‌ها اعمال گردید، سپس نمونه‌ها به مدت یک ساعت در هوای آون در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و خشک شدند.

توسط دستگاه سنگ مغناطیسی پرداخت گردید، سپس در طی چند مرحله به کمک استون تمیزکاری سطحی شدند تا سطح آن‌ها عاری از هرگونه اکسید و چربی گردد. در این پژوهش برای آلیاژسازی سطحی از پودر WC با اندازه ذرات متوسط ۸۰ میکرومتر و همچنین پودر نیکل خالص با نسبت ۱۲ درصد حجمی به صورت ثابت برای همه نمونه‌ها استفاده شد. نمونه ۱ بدون حضور ذرات WC، نمونه ۲ با پنج درصد حجمی WC، نمونه ۳، با ده درصد

جدول ۱. آنالیز شیمیایی فولاد St52 برحسب درصد وزنی.

کربن	منگنز	سیلیسیم	فسفر	گوگرد	مس	نیکل	کروم	وانادیم	آهن
۰/۲۱	۱/۳۵	۰/۴۹	۰/۰۳۵	۰/۰۳۶	۰/۱۷	۰/۶	۰/۱	۰/۰۰۳	۹۷/۵۴

در شکل ۱ طرحواره روش مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۱. طرح وارده روش مورد استفاده.

برای ایجاد پوششش، فراهم کردن دمای لازم و دستیابی به لایه‌های مورد نظر از روش جوشکاری قوسی تنگستن - گاز استفاده شد. پارامترهای مورد سنجش و آزمون شده در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۲. پارامترهای فرآیند سخت کاری سطح به روش جوشکاری قوس تنگستن-گاز.

شماره نمونه	درصد وزنی Ni	درصد وزنی WC	شدت جریان (A)
۱	۱۰۰	۰	۱۳۰
۲	۶۰	۴۰	۱۳۰
۳	۴۰	۶۰	۱۳۰
۴	۳۰	۷۰	۱۳۰
۵	۲۰	۸۰	۱۳۰

پس از ایجاد لایه رویه سختی توسط جوشکاری TIG سطح نمونه‌ها به صورت کامل ناهموار درآمد و ضخامت پوشش حدود ۲ الی ۳ میلی‌متر رسید. به همین منظور همه نمونه‌ها تحت عمل سنگ‌زنی توسط سنگ مغناطیسی قرار گرفتند و ضخامت پوشش با انجام این مرحله به ۱mm کاهش پیدا کرد. سنگ‌زنی عملیات بسیار حساسی بوده و

^۱ Carboxy methyl cellulose

برای انجام آزمون سایش پس از انجام عملیات سنگ زنی و آماده شدن سطح نمونه‌ها، از هر نمونه پوشش داده شده، نمونه‌هایی با ابعاد $cm (9 \times 5 \times 0.8)$ برش داده شد و در آزمون سایش مورد استفاده قرار گرفتند. مقدار سایش از روی کاهش وزن یا کاهش حجم نمونه به دست می‌آید. مقدار سایش بستگی به نیرو، مسافت، محیط، روش انجام آزمون و سرعت دارد. می‌توان به کمک لودسل^۲ به صورت پیوسته، نیروی اصطکاک و با داشتن نیروی اعمالی عمودی، ضریب اصطکاک را به دست آورد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری اصطکاک در استاندارد وجود دارد مانند پین روی دیسک و سایش رفت و برگشتی که بسته به شرایط کاری، روش مناسب همراه با دما، سرعت، روان‌کار، نیرو و مسافت مناسب اختیار می‌شود. در روش رفت و برگشتی، جسم در حال آزمون توسط یک پین تحت نیرو قرار می‌گیرد و پس از طی مسافت معین، کاهش وزن (حجم) آن برحسب مسافت به دست می‌آید و در منحنی مناسب گزارش می‌شود. قبل از آزمون یا قبل از وزن کردن، نمونه‌ها با محلول‌های غیر کلردار و محلول‌هایی که تشکیل فیلم نمی‌دهند تمیز و خشک می‌شوند تا جسم خارجی روی آن نباشد. بعد از آن نمونه تا دقت 0.0001 گرم وزن می‌شوند. سپس نیروی مناسب اعمال و مسافت لازم طی می‌شود. در حین کار نبایستی آزمون قطع شود. پس از آزمون نمونه برداشته و تمیز می‌شود. اندازه‌گیری کاهش وزن حداقل در سه نوبت پس از طی مسافت‌های معین انجام می‌شود. آزمون سایش خشک به صورت رفت و برگشت، در دمای محیط در دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان انجام گرفت. پین مورد استفاده در این آزمون از جنس فولاد بلبرینگ DIN 52100 با سختی حدود ۶۴ راکول سی، ارتفاع ۵۰ میلی متر و شعاع عرقچین ۵ میلی متر بود که در یک مسیر رفت و برگشتی به طول ۸ سانتی متر و با سرعتی معادل 0.168 متر بر ثانیه روی نمونه

باید باربرداری به آرامی و کم کم انجام می‌گرفت، زیرا امکان از بین رفتن و نازک شدن لایه رویه سختی شده وجود داشت. بنابراین هر موقع که سطح به صورت صاف و صیقلی درآمد از سنگ‌زنی بیشتر خودداری شد.

برای انجام آزمون متالوگرافی از مقطع عرضی تمامی نمونه‌ها، نمونه‌هایی به ابعاد $cm (2/5 \times 4 \times 0.8)$ توسط وایرکات (EDM)^۱ برش داده شدند و در مانت قرار گرفتند، به منظور بررسی ریز ساختار پوشش، فصل مشترک و زیرلایه، نمونه‌ها توسط سنباده‌های ۶۰ الی ۲۰۰۰ سنباده‌کاری و سپس پولیش گردیدند. پس از آن نمونه‌ها در محلول نایتال ۴ درصد (۹۶ میلی لیتر الکل + ۴ میلی لیتر اسید نیتریک یک مولار) اچ گردید. جهت مطالعات میکروسکوپی، از دستگاه میکروسکوپ نوری LYMPUS مدل BH-2 استفاده شد.

برای انجام آزمون ریزسختی از مقطع عرضی تمامی نمونه‌ها، نمونه‌هایی به ابعاد $cm (2/5 \times 4 \times 1)$ توسط وایرکات برش داده و آزمون ریز سختی بر روی آن‌ها صورت گرفت جهت بررسی ریزسختی قسمت‌های مختلف نمونه‌ها از دستگاه ریزسختی سنجی Buhler Microme در دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شد. فرو رونده این دستگاه یک هرم مربع القاعده الماسی با زاویه سطح جانبی ۱۳۶ درجه بود. در نتیجه اعمال نیروی ۱۰۰ gr که در زمان ۱۰ ثانیه اعمال می‌شود، حفره‌ای لوزی شکل در سطح کاملاً صیقلی پدید آمد و مقدار سختی محاسبه شد. پروفیل سختی اندازه‌گیری شده با رسم منحنی سختی برحسب فاصله از سطح پوشش به سمت زیرلایه به دست آمد جهت جلوگیری از تداخل حوزه کرنش اثرات ریزسختی مجاور هم، فاصله بین دو ریزسختی در راستای افقی و از سطح روکش به سمت زمینه $0.25mm$ در نظر گرفته شد.

² Load Cell

¹ Electro discharge machining

دیگر فازها است. از آنجایی که دمای حوضچه مذاب در روش جوشکاری قوس تنگستن-گاز در حدود ۲۵۰۰ درجه سانتیگراد است و نقطه ذوب کاربید تنگستن ۲۸۵۰ درجه سانتیگراد است انتظار می‌رود که ذرات کاربید تنگستن اعمالی بدون تجزیه شدن در ساختار باقی بمانند، البته احتمال اینکه برخی از ذرات ریز تر در حین فرآیند و تماس با مذاب زمینه نیکل، دچار ذوب سطحی شوند و یا تجزیه شوند نیز است. به همین علت با افزایش مقدار کاربید تنگستن ساختار دندردیتی ریز تر می‌شود چرا که ذرات کاربید تنگستن در مذاب به عنوان مانعی در برابر رشد دندردیت ها عمل می‌کند و در ساختار حاصل از انجماد در بین دندردیت‌های زمینه قرار می‌گیرند. در حالت کلی در جوشکاری‌های سطحی به منظور آلیاژسازی یا افزودن ذرات تقویت کننده، ریزساختار در پایین حوضچه مذاب در ابتدا به صورت صفحه‌ای بوده و به سمت مرکز و بالای حوضچه به حالت دندردیتی در می‌آید. مورفولوژی مذاب منجمد شده توسط شیب حرارتی (G) در مذاب نزدیک فصل مشترک جبهه انجمادی و سرعت رشد (R) کنترل می‌شود. با کاهش نسبت G/R، ریزساختار فصل مشترک از حالت صفحه‌ای به سلولی و سپس به دندردیتی تبدیل می‌شود. در پایین حوضچه مذاب به دلیل بالا بودن این نسبت ابتدا جبهه انجمادی به صورت صفحه‌ای و سپس با آزاد شدن گرمای نهان انجماد این نسبت کاهش می‌یابد و ساختار به دندردیت تبدیل می‌شود. البته در سطح هم به دلیل تماس مذاب با محیط اطراف، سرعت انجماد بالا بوده و دوباره ساختار به دندردیتی بسیار ریز تبدیل می‌شود [۳]. در بررسی ریزساختارها مشاهده می‌شود که روند تبدیل انجماد از صفحه‌ای به ستونی و سپس به دندردیتی به خوبی انجام نمی‌شود که علت این پدیده را می‌توان حضور ذرات کاربید تنگستن در محلول مذاب دانست که با فعال کردن مکانیزم جوانه زنی غیرهمگن سبب ایجاد ریزساختاری به صورت دندردیتی در سراسر مقطع عرضی می‌شود [۱۴ و ۹].

سایش حرکت می‌کند. آزمون سایش تحت بار ثابت ۶۰ نیوتن انجام گرفت که پس از طی مسافت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ متر کاهش وزن نمونه‌ها توسط ترازوی GIBERTINIE 42 S-B اندازه‌گیری شد. جدول ۳ پارامترهای مربوط به آزمون سایش را نشان می‌دهد. نتایج نمودارهای کاهش وزن و آزمون‌های ضریب اصطکاک در انتخاب نمونه‌هایی با ضریب اصطکاک کمتر به منظور بکار بردن قطعات در مکان‌هایی که لازم است سر و صدای ناشی از اصطکاک قطعات را کاهش دهیم، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲ و ۳]. اصطکاک فرآیند هدر رفت انرژی و استهلاک قطعات است. داده‌های حاصل از آزمون سایش شامل نمودارهای کاهش وزن، ضریب اصطکاک، تصاویر میکروسکوپی از سطح سایش و ذرات سایش هستند.

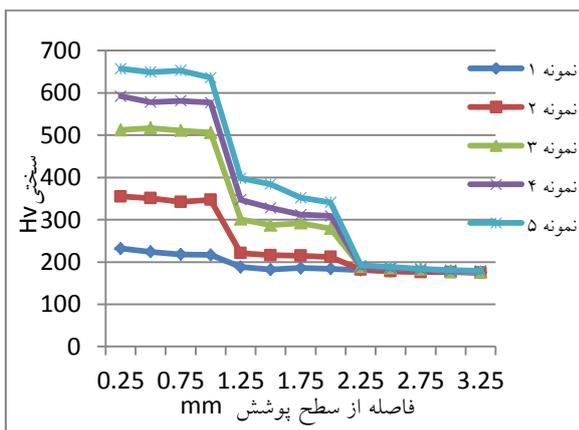
جدول ۳. پارامترهای مربوط به آزمون سایش.

پارامترهای سایش	وضعیت
شرایط سایش	سایش خشک
بار اعمالی (نیوتن)	۶۰
سرعت سایش (متر بر ثانیه)	۰/۱۶۸
مسافت سایش (متر)	۱۰۰۰
دما	دمای اتاق

نتایج و بحث

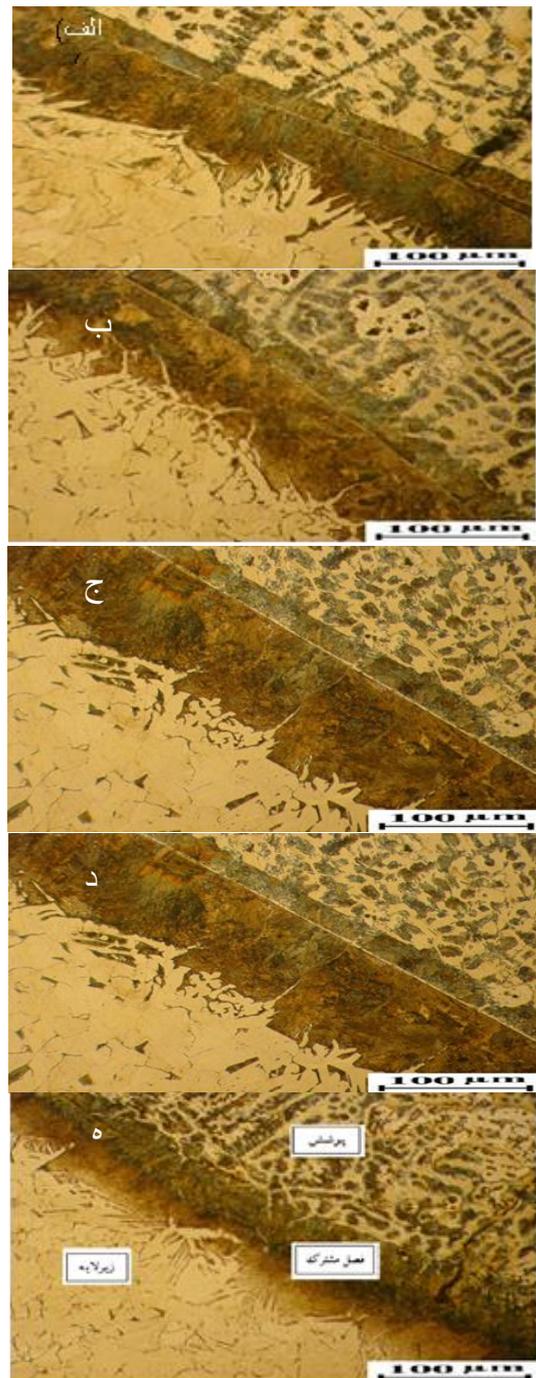
شکل ۲ مقطع جانبی پوشش‌های ایجاد شده با آمپراژ ۱۳۰ را در بزرگنمایی ۱۰۰ میکرومتر نشان می‌دهد. این تصاویر نشان‌دهنده تشکیل پوشش با حداقل تخلخل است که با استفاده از روش لایه‌نشانی به روش جوشکاری TIG قابل دستیابی است. بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری نشان می‌دهد که این پوشش‌ها ساختار دندردیتی داشته که در نتیجه انجماد سریع در طی فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز به وجود آمده است. دلیل دیگر به دست آمدن ساختار دندردیتی تفاوت زیاد بین نقطه ذوب آهن و

بودن ذرات تقویت‌کننده کاربرد تنگستن و همین‌طور شرایط انجماد سریع در جوشکاری، سختی نسبتاً بالایی دارند که می‌توانند در کنار مقاومت به خوردگی بالا، منجر به مقاومت پوشش در برابر سایش در محیط‌های خورنده شوند [۳۴]. سختی نمونه‌های حاوی در صد وزنی بیشتر تقویت‌کننده کاربرد تنگستن بیش از سختی نمونه‌های با درصد وزنی کمتر تقویت‌کننده است که به دلیل سختی نسبتاً بالای فاز کاربرد تنگستن است. دلیل افت سختی در فصل مشترک، اثر رقت ناشی از ذوب جزئی زیرلایه است. از آن‌جا که تشکیل پوشش با سرعت زیاد رخ داده و امکان ذخیره تنش‌های پسماند (که بسته به تفاوت ضرایب انبساط حرارتی زیرلایه، کششی یا فشاری هستند) در پوشش وجود دارد، نفوذ از زیرلایه و کاهش تدریجی سختی موجب افزایش چسبندگی و کاهش تردی پوشش گشته و عاملی مطلوب ارزیابی می‌شود که می‌تواند از وقوع ترک در پوشش جلوگیری نماید. این نوع فصل مشترک، چسبندگی و خواص مکانیکی مطلوبی ایجاد می‌کند [۵].



شکل ۳. نمودار ریز سختی نمونه‌ها با ترکیب پوشش‌های مختلف.

بررسی سطح سایش و ذرات سایش نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips مدل 30XL مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۶ میزان کاهش وزن در اثر تست سایش را بر حسب مسافت طی شده به ترتیب



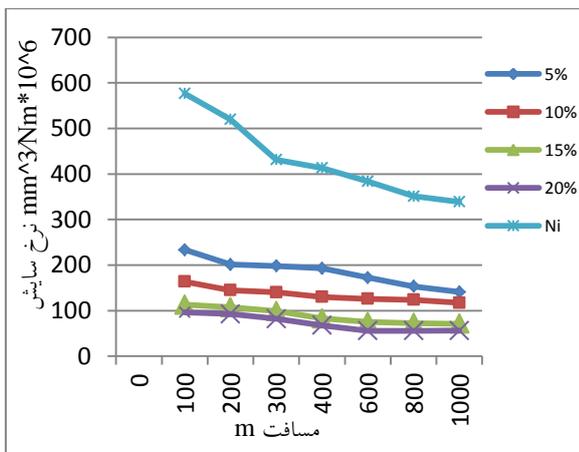
شکل ۲. ریزساختار مقطع عرضی پوشش ایجاد شده (الف) نمونه ۱، (ب) نمونه ۲، (ج) نمونه ۳، (د) نمونه ۴، (ه) نمونه ۵.

نتایج ریزسختی نمونه‌ها در شکل ۳ ارایه شده است. دامنه سختی پوشش‌های ایجاد شده بین ۲۲۵ تا ۶۸۰ ویکرز است در حالی که سختی فولاد مورد نظر بدون اعمال پوشش ۱۸۰ ویکرز است که این افزایش سختی نشان می‌دهد که پوشش‌های کامپوزیتی تشکیل شده بدلیل دارا

جدول ۴: محاسبه چگالی پوشش.

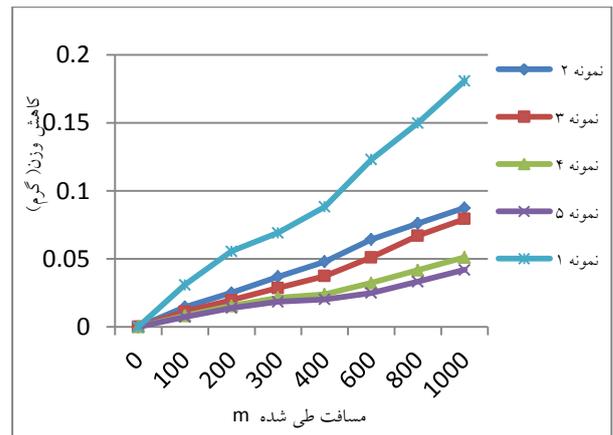
شماره نمونه	چگالی پوشش g/cm^3
۱	۸.۹
۲	۱۰.۸۷
۳	۱۱.۹۴
۴	۱۲.۶۲
۵	۱۳.۰۸

شکل ۵ نمودار نرخ سایش در مورد پوشش بدون ذرات تقویت کننده و تأثیر افزایش مقدار ذرات تقویت کننده را نشان می‌دهد. همان طور که از این نمودار مشاهده می‌شود نرخ سایش در مورد پوشش ایجاد شده در نمونه ۲ به مراتب کمتر از پوشش نمونه ۱ است و بر همین اساس با افزایش مقدار ذرات تقویت کننده کاربید تنگستن به صورت ترکیب $80\%WC-20\%Ni$ این نرخ سایش کمتر و مقاومت به سایش افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع را می‌تواند به افزایش سختی پوشش بواسطه افزودن ذرات تقویت کننده مرتبط باشد، همچنین مشاهده می‌شود در نمونه ۲، پس از طی مسافت ۲۰۰ متر ابتدایی تا حدود ۶۰۰ متر شیب نمودار نرخ سایش کاهش یافته علت می‌تواند ناشی از تجمع نابه جایی‌ها و ایجاد کار سرد در لایه‌های زیر سایش باشد [۶ و ۷].



شکل ۵. نمودار نرخ سایش، پوشش بدون ذرات تقویت کننده و تأثیر افزایش مقدار ذرات تقویت کننده.

برای نمونه‌های ۵، ۴، ۳، ۲، ۱ را نشان می‌دهد. با مقایسه نمودارها با هم مشخص می‌شود که با افزایش مقدار پودر کاربید تنگستن در پوشش ایجاد شده مقاومت به سایش افزایش یافته است و بیشترین مقاومت به سایش مربوط به نمونه ۵ است.



شکل ۴. نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت طی شده برای نمونه‌های ۵، ۴، ۳، ۲، ۱.

بمنظور محاسبه نرخ سایش از رابطه زیر استفاده شد [۷].

$$W_r = \frac{\Delta m}{F \cdot L \cdot \rho} \cdot 10^6 \quad (1) \text{ رابطه}$$

W_r نرخ سایش بر حسب mm^3/Nm

Δm کاهش وزن بر حسب mg

F نیروی اعمالی بر حسب N و ضریب 10^6 برای تبدیل

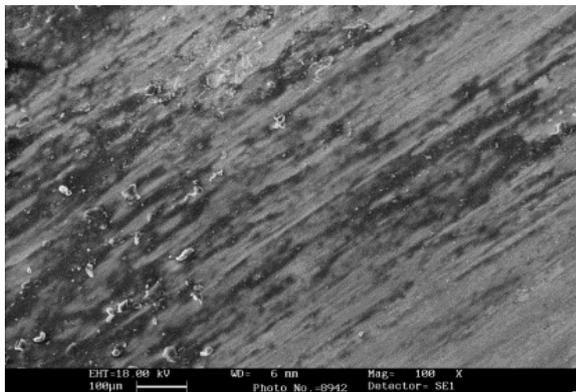
واحد است

L مسافت طی شده بر حسب متر

ρ چگالی پوشش بر حسب g/cm^3

$$\rho_{Ni} = 8.9 \text{ g/cm}^3 \text{ و } \rho_{Wc} = 15.6 \text{ g/cm}^3$$

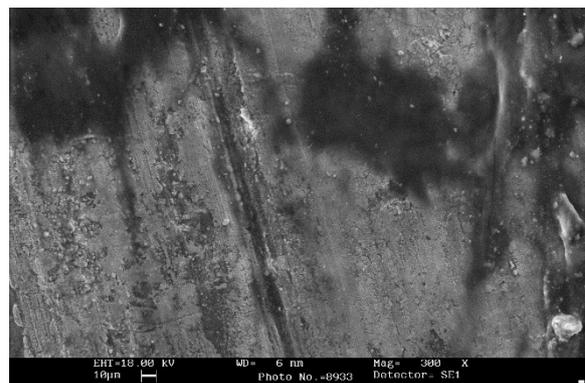
نابجایی‌ها، این نابجایی‌ها به هم پیوسته و یک سری حفرات تشکیل می‌شود. با گذشت زمان، حفره‌ها به هم می‌پیوندند و در نهایت یک ترک به موازات سطح شکل می‌گیرد. وقتی طول ترک به حد بحرانی رسید، ماده بین ترک و سطح به صورت یک ذره ورقه‌ای شکل از سطح جدا می‌شود [۱۰]. در تئوری بعدی که تنش‌های فشاری در سطح نام دارد، بیان می‌شود هنگامی که دو سطح لغزش در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، به واسطه بارگذاری مکرر، ناهمگونی‌های سطح نرم‌تر به راحتی تغییر شکل یافته و برخی از آنها شکسته می‌شوند. ناهمگونی‌های سطح سخت‌تر روی سطح نرم‌تر، تغییر شکل برشی پلاستیک ایجاد کرده و یک حالت کشیدگی در زیر سطح ایجاد می‌شود. با زیاد شدن این تغییر شکل‌ها ترک‌هایی در زیر سطح جوانه می‌زنند. با وجود تنش فشاری بالا ترک‌ها تمایل دارند به موازات سطح و در یک عمقی که بستگی به خواص ماده و ضریب اصطکاک دارد، اشاعه یابند. در مکان‌های ضعیف و معین این ترک‌ها سطح را از عمق برش داده و ذرات سایش به صورت ورقه‌های نازک و طولیل پدید می‌آید. ضخامت ذره سایش ورقه‌ای بسته به موقعیت رشد ترک در زیر سطح دارد و توسط نیروهای عمودی و مماسی کنترل می‌گردد [۶ و ۹].



شکل ۷. سطح سایش نمونه ۲ پوشش 40%Wc+60%Ni

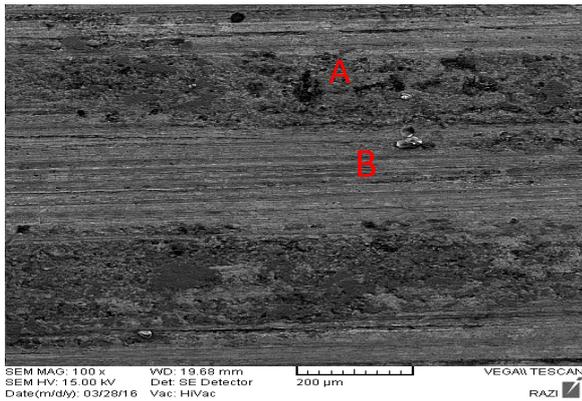
شکل ۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش نمونه با ترکیب 40%Wc+60%Ni را نشان می‌دهد. همان

در حالت کلی، اگر مقدار کسر حجمی ذرات تقویت کننده کاربرد تنگستن بیش از حد افزایش یابد، مقدار فاز زمینه بین ذرات کاربرد تنگستن کاهش یافته و حتی در بعضی موارد این کاهش به حدی است که ذرات WC با هم در تماس قرار می‌گیرند که این موضوع باعث کاهش تأثیرات حمایتی ذرات تقویت کننده در کاهش نرخ سایش می‌شود و بنابراین کاهش نرخ سایش با سرعت کمتری صورت گرفته و در بعضی موارد نیز باعث افزایش نرخ سایش می‌شود [۸]. تصاویر مشاهده شده در شکل ۶ سطح سایش نمونه‌های بدون حضور ذرات تقویت کننده کاربرد تنگستن را نشان می‌دهند. با توجه به شکل سطح سایش دیده می‌شود که مکانیزم سایش در ابتدا به صورت خراشان با عمق زیاد شیارها در سطح پوشش است و با به هم پیوستن شیارهای عمیق روی سطح، ذرات به صورت ورقه‌ای از سطح جدا شده‌اند و یک سری ذرات ورقه‌ای روی سطح وجود دارد که به علت توقف سایش هنوز از سطح جدا نشده‌اند. بنابراین مکانیزم سایش در این نمونه به صورت ترکیبی خراشان - ورقه‌ای است [۹].



شکل ۶. سطح سایش نمونه ۱ پوشش Ni خالص بدون حضور ذرات تقویت کننده.

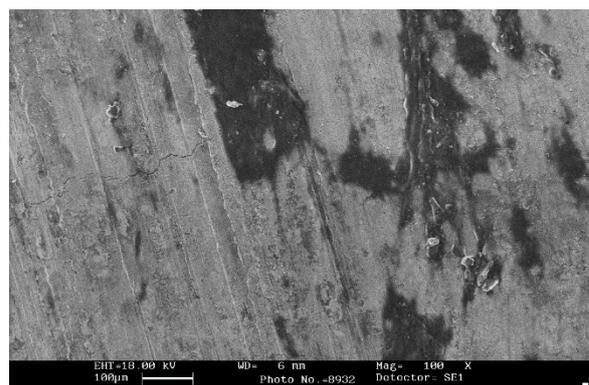
در توجیه این مکانیزم سایش ورقه‌ای دو نظریه وجود دارد، اولین نظریه تئوری تجمع نابجایی‌ها در زیر سطح است. با افزایش مسافت لغزش، نابجایی‌ها در فاصله کوتاهی از سطح تجمع می‌کنند. با افزایش دانسیته



شکل ۹. سطح ساییده شده نمونه ۴ پوشش 70% Wc+30% Ni

همین طور که دیده می‌شود کنده گی‌هایی در سطح سایش وجود دارد که مربوط به تجمع ذرات تقویت کننده کاربید تنگستن و کنده شدن آنها از سطح است. مکانیزم سایش به صورت چسبان است با انجام آنالیز EDS از سطح سایش شکل ۱۰، حضور ذرات Ca که مربوط به پین است و همچنین مقدار قابل توجهی اکسیژن نمایان است، بنابراین با طی مسافت سایش اکسیداسیون نیز رخ داده است. شکل ۱۱، تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح ساییده شده نمونه‌ای با ترکیب پوشش 70% Wc+30% Ni را نشان می‌دهد. وجود نرخ سایش کم و میزان جرم از دست رفته پوشش پس از طی ۱۰۰۰ متر مسافت سایش، نشان دهنده مقاومت به سایش خوب پوشش است. با مشاهده تصویر، شکل ۱۱ میزان کندگی‌هایی در سطح نمونه با شدت کم دیده می‌شود که نشان دهنده این است که مکانیزم سایش در نمونه ۵ بیشتر متمایل به سایش چسبان است. در حالت کلی افزایش ذرات تقویت کننده WC باعث افزایش مقاومت زمینه در برابر تغییر فرم می‌شود که این مسأله باعث بهبود مقاومت سایشی مواد می‌گردد [۷و۸].

طور که از تصویر مشاهده می‌شود سایش بر روی سطح به صورت خراش‌های ایجاد شده مشاهده می‌گردد. همانطور که از تعریف سایش خراشان مشخص است، این نوع سایش زمانی رخ می‌دهد که سطح سخت و زبر (ابزار ساینده) در مقابل یک سطح نرم‌تر حرکت لغزشی داشته و در آن فرو رفته و یک سری شیارهایی را بوجود می‌آورد که در این نمونه هم به همین گونه است. در این نمونه به دلیل اینکه ذرات کاربید تنگستن حضور کم رنگی دارند که باعث افزایش سختی پوشش ایجاد شده شوند، سطح نرم بوده و در اثر انجام حرکت لغزشی در برابر ابزار ساینده سطح شیارهایی در سطح نمونه ایجاد می‌شود که بیان کننده مکانیزم سایش خراشان است. تصویر میکروسکوپ الکترونی گرفته شده در شکل ۸ نشان می‌دهد که همچنان مکانیزم سایش خراشان با استفاده از پوشش با ترکیب 60% Wc+40% Ni مکانیزم غالب است، همین طور که از تصویر مشاهده می‌شود با طی مسیر سایش شیارهای با عمق کمتر از پوشش با ترکیب 40% Wc+60% Ni در سطح ایجاد شده است که ناشی از بیشتر شدن نسبت ذرات تقویت کننده کاربید تنگستن به زمینه نرم نیکل است.

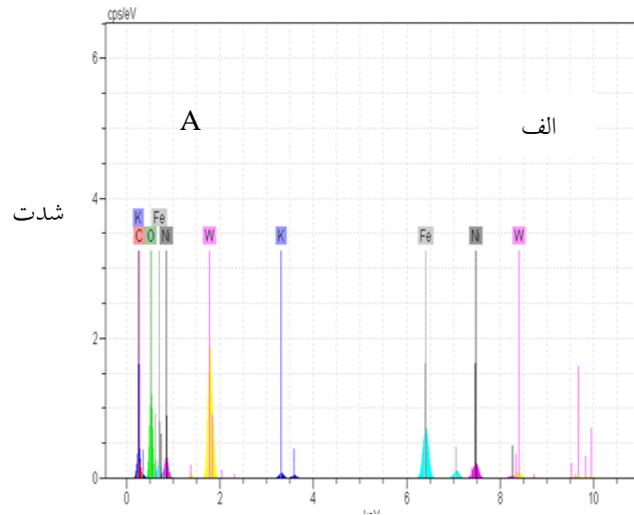


شکل ۸. سطح سایش نمونه ۳ پوشش 40% Wc+60% Ni



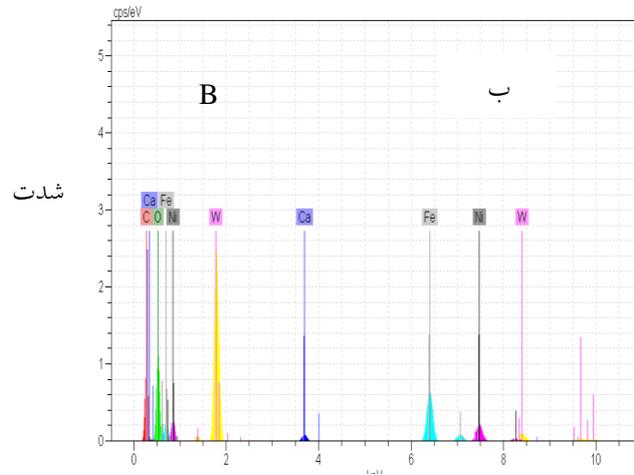
شکل ۱۱. سطوح ساییده شده نمونه ۷ پوشش ۸۰٪ Wc+۲۰٪ Ni

در نمونه ۵ به دلیل تماس دو فلز و بار اعمالی زیاد مکانیزم سایش چسبان، مکانیزم غالب است. ذرات جدا شده در اثر سایش دائم میان سطوح تماسی رد و بدل می‌شوند. این ذرات می‌توانند به صورت براده آزاد گردند و یا با نورد شدن ذرات کنده شده بین مسیر حرکت پین و سطح نمونه تشکیل لایه‌ای از ذرات جدا شده میان سطوح ساییده را دهند. با طی مسیر سایش و کنده شدن این ذرات که به سطح چسبیده‌اند، باعث کنده شدن ذرات تقویت کننده از سطح پوشش نیز می‌شوند. در شکل ۱۲، ذرات کنده شده از سطح سایش نشان داده شده است، همچنین در شکل ۱۱، ترکی ایجاد نشده است. در حقیقت در صورتی که ترکی ایجاد شود نتیجه کارسختی بوده و در صورتی که در مراحل اولیه سایش مشاهده شوند، می‌توانند در مراحل بعدی با کاهش شدید جرم همراه شوند، اما مشاهده این ترک‌ها در مراحل پایانی از آزمون سایش نشان می‌دهد که پوشش مقاومت زیادی در برابر سایش دارد و پس از تحمل میزان بالایی از تنش‌های ناشی از سایش، همچنان این پدیده در مراحل اولیه خود قرار دارد [۹].



انرژی Kv

Element	[wt.-%]
Carbon	5.99
Oxygen	25.13
Potassium	0.92
Iron	24.83
Nickel	12.06
Tungsten	25.59

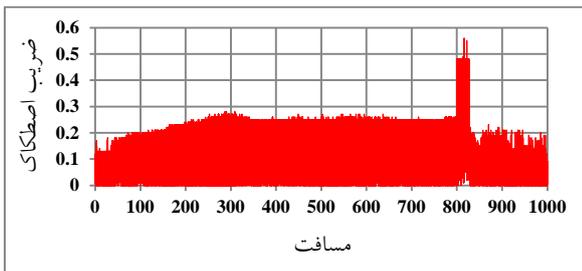


انرژی Kv

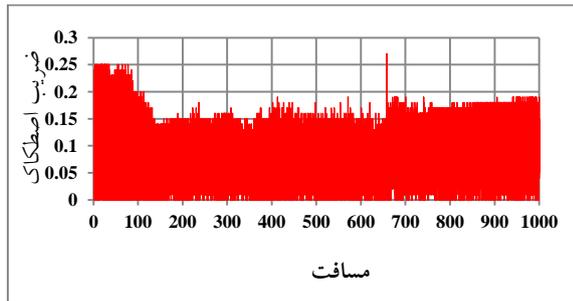
Element	[wt.-%]
Tungsten	17.95
Carbon	19.22
Oxygen	24.98
Calcium	0.42
Iron	14.09
Nickel	7.69

شکل ۱۰. آنالیز EDS از سطح سایش نمونه ۶ الف : نقطه A ب :

نقطه B.



شکل ۱۶. نمودار ضریب اصطکاک مربوط به نمونه ۴.

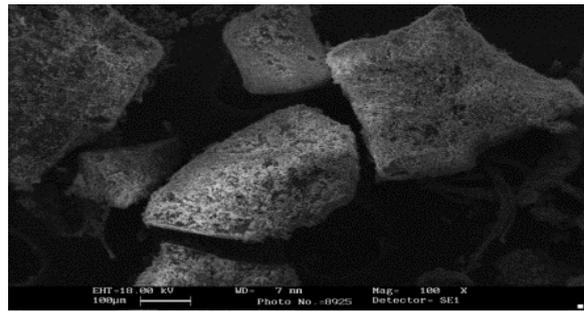


شکل ۱۷. نمودار ضریب اصطکاک مربوط به نمونه ۵.

همان طور که از نتایج آزمون سایش و مقادیر ضریب اصطکاک دیده می‌شود، با افزایش مقدار پودر مواد تقویت کننده (پودر کاربید تنگستن) می‌توان شاهد کاهش ضریب اصطکاک و افزایش مقاومت به سایش بود [۹ و ۱۰]. کاهش مقدار ضریب اصطکاک را با رابطه زیر می‌توان توضیح داد، حرارت ایجاد شده در اثر اصطکاک، منبع تعیین کننده دمای سطوح سایش است. با توجه به اینکه تست سایش در دمای محیط انجام شده است می‌توان نتیجه گرفت که حرارت ناشی از اصطکاک پین بر روی سطح سایش، دمای سطح سایش را تعیین می‌کند. همچنین طبق رابطه زیر با افزایش نیروی اعمالی و سرعت لغزش، حرارت ایجاد شده در سطح افزایش می‌یابد [۱۱].

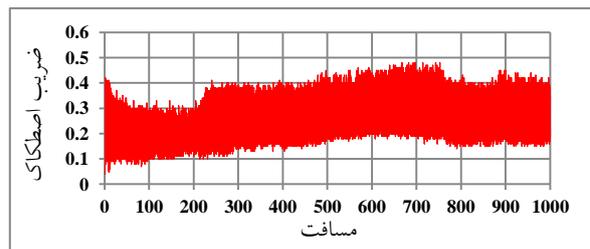
$$Q = \mu WV \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه Q نرخ حرارت ایجاد شده (ژول بر ثانیه)، μ ضریب اصطکاک، W نیروی اعمالی (نیوتن) و V سرعت لغزش (متر بر ثانیه) است. افزایش دما می‌تواند دو اثر متناقض بر روی سیستم سایشی اعمال کند. اثر اول کاهش استحکام و افزایش نرمی است که باعث افزایش سایش می‌شود. همچنین اثر دیگر افزایش دما، افزایش نرخ

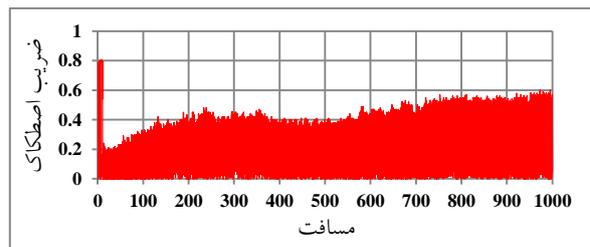


شکل ۱۲. ذرات کنده شده از سطح نمونه ۵ با بزرگنمایی ۲۰۰۰.

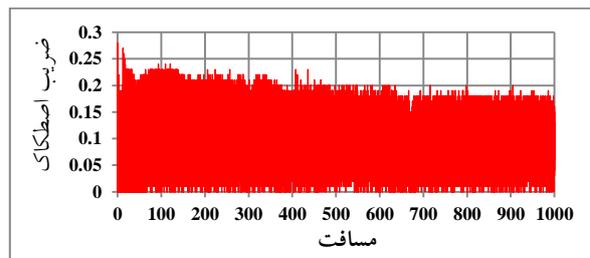
شکل‌های ۱۳ تا ۱۷ نمودارهای ضریب اصطکاک برای نمونه‌های پوشش داده شده تحت مقادیر پودر متفاوت را نشان می‌دهند. در حالت کلی ضریب اصطکاک پایین پوشش دلالت بر این موضوع دارد که پوشش ایجاد شده دارای مقاومت به سایش مناسب است.



شکل ۱۳. نمودار ضریب اصطکاک مربوط به نمونه ۱.



شکل ۱۴. نمودار ضریب اصطکاک مربوط به نمونه ۲.



شکل ۱۵. نمودار ضریب اصطکاک مربوط به نمونه ۳.

لغزش از سطح جدا نشود و ضریب اصطکاک کم باشد [۱۴].

نتیجه گیری

پوشش کامپوزیتی WC-Ni بر روی زیرلایه فولاد St52 با روش جوشکاری قوس تنگستن- گاز با موفقیت اعمال شد و نتایج بدست آمده از آزمون سایش این پوشش به بحث و بررسی گذاشته شد و در پایان نتایج زیر بدست آمد:

۱- انجام آزمون سایش بر روی قطعات نشان داد که با اعمال پوشش WC/Ni با افزایش ذرات فاز تقویت کننده (WC) مقاومت به سایش نمونه‌ها بیش از ۵۰٪ بهبود یافته است.

۲- تصاویر (SEM) از سطوح خراشیده شده نمونه با ترکیب 70% WC-30% Ni نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پودر کاربرد تنگستن تغییر حالت مکانیزم سایش رخ داده است و مکانیزم غالب در این حالت سایش چسبان به همراه سایش اکسیداسیون است.

۳- بررسی نتایج ریز سختی نشان داد که، افزایش مقدار فاز تقویت کننده کاربرد تنگستن در پوشش منجر به جوانه‌زنی غیرهمگن و ریزدانه‌تر شدن ساختار می‌شود، بنابراین می‌توان به سختی بیشتری دست یافت، مقدار سختی بدست آمده در نمونه پوشش داده شده با ترکیب 80% WC-20% Ni مقدار ۶۸۰ ویکرز است.

۴- بررسی نتایج حاصل از نمودارهای ضریب اصطکاک حاکی از آن است که با افزایش مقاومت به سایش و کاهش نرخ سایش ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایشی کاهش می‌یابد.

مراجع

1. Rickerby, S. David, and Allan Matthews. *Advanced surface coatings: a handbook of surface engineering*. Blackie. Chapman and Hall, (1991).

اکسیداسیون در سطح سایش است که می‌تواند باعث تشکیل فیلم اکسیدی پایدار در سطح شود. تشکیل فیلم اکسیدی در سطح سایش باعث کاهش تماس فلز با فلز شده و در نتیجه نرخ سایش و ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد [۱۱]. نمودار ضریب اصطکاک نمونه ۱ نشان می‌دهد که درگیری و سطح تماس پین با پوشش زیاد بوده و با توجه به مقاومت به سایش کم و مکانیزم سایش ورقه‌ای که ایجاد می‌گردد ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. با بررسی نمونه ۲ مشاهده می‌شود که با تبدیل مکانیزم سایش به خراشان ضریب اصطکاک نسبت به نمونه ۱ کاهش می‌یابد. در مورد نمونه‌های ۴ و ۵ با توجه به نرخ سایش کم و مقاومت به سایش خوب پوشش به علت حضور درصد بیشتری از ذرات تقویت کننده کاربرد تنگستن، مکانیزم سایش در این دو حالت از نوع چسبان و اکسیداسیون است و متوسط ضریب اصطکاک در نمونه ۴ به مقدار ۰/۱۱ و در نمونه ۵ به مقدار ۰/۰۹ می‌رسد که نسبت به نمونه ۱ با متوسط ضریب اصطکاک ۰/۰۲۴ و نمونه ۲ با متوسط ضریب اصطکاک ۰/۰۲۱ مقدار ضریب اصطکاک به کمترین مقدار خود رسیده است چرا که به واسطه مقاومت سایشی خوب سطح تماس، درگیری پین با پوشش کم بوده است. همچنین مشخص شد که بهینه‌ترین حالت اعمال پوشش، ترکیب WC-80% Ni 20% است در این حالت مکانیزم سایش چسبان و کمترین میزان ضریب اصطکاک ایجاد می‌شود که ناشی از افزایش مقاومت به سایش به واسطه وجود استحکام پیوند بالا، بین ذرات تقویت کننده کاربرد تنگستن اضافه شده، با پوشش نیکلی اعمالی است. همچنین ذرات پودر WC دارای سختی و استحکام بالایی می‌باشند که به دلیل این سختی بالا، خود این ذرات مقاومت به سایش بالایی دارند [۱۲ و ۱۳]. از طرف دیگر استحکام پیوند بین ذرات کاربرد تنگستن و زمینه زیاد بوده که این مسئله باعث می‌شود که در حین آزمون سایش در مواجهه با ابزار ساینده و با افزایش بار اعمالی این ذرات به راحتی در حین

13. M.J. Schneider, M.S., Chatterjee, *Introduction to Surface Hardening of Steels, ASM Handbook, Volume 4A, pages 389-400*(2013).
14. M. Zhong, W. Liu, *Formation of WC/Ni hard alloy coating by laser cladding of W/C/Ni pure element powder blend*, International Journal of Refractory metals & hard materials, 24(2006)453-460.
2. Florio, J. John, and J. Daniel Miller, eds. *Handbook of coating additives*. CRC Press, (2004).
3. G.Tosun, *Ni-WC Coating on AISI 1010 Steel Using TIG: Microstructure and Microhardness*, Springer, King Fahd University of Petroleum and Minerals (2013).
4. W. Lucas, *TIG and PLASMA Welding, Handbooks in welding technology*, series (1990).
5. F. Madadi, F. Ashrafizadeh, M. Shamanian, *Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM*, Journal of Alloy and Compounds, 510(2012)71-77.
۶. جمالی محسن، مقیمی حیدر و هنریخش عباس، بررسی نقش آلیاژسازی سطحی فولاد AISI 1045 با کرم توسط فرآیند TIG بر خواص سایشی، هفتمین سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی (۱۳۸۵).
۷. صفری مرتضی، شفیع علی، امینی کامران، بررسی تاثیر عملیات زیر صفر عمیق بر سختی و رفتار تریبولژیکی فولاد 1/3255، مواد نوین، تابستان (۱۳۹۴).
8. W. Ding, H. Jiang, X. Zeng, D. Li, and S. Yao, *The surface modified composite layer formation with boron carbide particles on magnesium alloy surfaces through pulse gas tungsten arc treatment*, Applied surface science, 253(2007)3877-3883.
۹. قدحی فرزین و حیدرزاده سهی محمود، بررسی تاثیر ذوب سطحی توسط روش TIG بر ریز ساختار و خواص سایشی پوشش‌های WC-Co اعمال شده به روش پلاسما اسپری در اتمسفر آزاد، نهمین کنگره سالانه انجمن مهندسين متالورژی ایران، آبان (۱۳۸۴).
10. Z. Lio, et. al, *Preparation of WC-Co Composite Powder by Electroless Plating and Application in Laser Cladding*, Materials letters, 60(2006)1956-1959.
11. I.M. Hutchings, *Tribology: Friction and wear of engineering materials*, Department of materials science and metallurgy, University of Cambridge, (1992).
12. Xinhong, Wang, et al. *Fabrication of multiple carbide particles reinforced Fe-based surface hardfacing layer produced by gas tungsten arc welding process*. Surface and Coatings Technology 203.8(2009)976-980.