

اثر ایجاد روکش کامپوزیتی حاوی دی‌بوراید تیتانیوم به روش جوشکاری توپودری بر رفتارهای سایش و سختی فولاد ساده کربنی

سیدرضا امیرآبادی زاده*

علی شکوه فر

احسان رحیمی بالائی

حامد ثابت

حسین ابراهیم نژاد خالجیری

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

در این کار پژوهشی، سه لایه جوش کامپوزیتی حاوی ذرات دی‌بوراید تیتانیوم (TiB_2) بر روی فولاد ساده کربنی ST37 به وسیله فرآیند جوشکاری توپودری توسط سیم‌جوش‌های حاوی ۱۰۰٪ پودر TiB_2 و دیگری حاوی ۵۰٪ پودر TiB_2 به همراه ۵۰٪ پودر آهن اعمال شد. سپس از آزمون‌های سایش و سختی‌سنجی برای بررسی رفتار سختی و سایش نمونه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد حجمی TiB_2 در ریزساختار، سختی لایه‌ها افزایش یافت. همچنین بالاترین مقاومت به سایش مربوط به لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش حاوی ۵۰٪ پودر TiB_2 و پس از آن مربوط به لایه اول نمونه جوشکاری شده با سیم جوش حاوی ۱۰۰٪ پودر TiB_2 بود. بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح سایش نمونه‌ها نیز نشان داد که با افزایش درصد حجمی TiB_2 در لایه‌ها، عمق خطوط سایش به ترتیب در لایه‌های سوم و دوم، کاهش و مقدار کندگی ذرات از سطح نیز به ترتیب در لایه‌های سوم و دوم نسبت به لایه اول افزایش یافت. همچنین مشخص شد که مکانیزم سایش با افزایش لایه‌ها، از شخم‌زنی به کندگی تغییر کرد. واژه‌های کلیدی: لایه کامپوزیتی، فولاد ساده کربنی، دی‌بوراید تیتانیوم، سختی، مقاومت سایشی.

Creation Effect of Composite Coating Containing Titanium Diboride through Flux Cored Arc Welding on the Wear and Hardening Behaviors of Low Carbon Steel

S. R. Amirabadizadeh

Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

A. Shokouhfar

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

E. Rahimi-Balai

Department of Material Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

H. Sabet

Department of Material Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

H. Ebrahimnezhad-Khaljiri

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this research, 3 layer composite weld containing Titanium diboride (TiB_2) on low carbon steel (ST37) was carried out through flux cored arc welding via flux cored electrodes containing 100% TiB_2 and 50-50 TiB_2 -Fe. Then, wear and microhardness tests were used for surviving hardness and wear behavior of samples. The obtained results showed that by increasing volume percent of TiB_2 in microstructure, the hardness of layers increased. Also, the highest wear resistance belonged to third layer of sample with 50% TiB_2 and thereafter, belonged to first layer of sample with 100% TiB_2 . The scanning electron microscopic investigation of samples wear surfaces indicated that by increasing volume fraction of TiB_2 into layers, the depth wear scratches in the third and second layers decreased and segregation of wear debris in these layers increased, compared with first layer. Also, it was found that by increasing the layers, wear mechanism changed from ploughing to cutting.

Keywords: Composite Layer, Low carbon Steel, Titanium Diboride, Hardness, Wear Resistance.

طراحی قطعات مهندسی می‌باشد. برای کاهش این پدیده راه‌کارهای مختلفی از جمله جایگزینی با مواد مقاوم به سایش بالاتر و یا استفاده از روش‌های مختلف تقویت سطح، استفاده می‌شود [۱]. براساس بررسی‌های انجام شده جوشکاری یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای تقویت سطح فلزات به خصوص فولادها می‌باشد. با کمک این روش

۱- مقدمه

امروزه سایش در بسیاری از قطعات و مجموعه‌های مهندسی پدیده‌ای حائز اهمیت است و همواره تخریب‌های ناشی از سایش مواد به خصوص فلزات یکی از نگرانی‌های مهم مهندسی و محققان در

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: sr.amirabadi@yahoo.com

حاوی ذرات سرامیکی از جمله TiB_2 می‌باشد [۱۱] که در طی دهه گذشته به خاطر حل مشکل تریبولوژیکی و ایجاد کاربرد جدید تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. انواع مختلف بوراید، مانند دی‌بوراید تیتانیوم و آهن، به صورت گسترده به شکل کامپوزیت زمینه فلزی بر روی فولادها استفاده می‌شود [۱۲]. بیشتر تحقیقات بر روی ترکیب $Fe-TiB_2$ تمرکز کرده‌اند و بر روی دیگر ترکیبات از جمله $Fe-TiB_2-Fe_2B$ تحقیقات کمتری انجام شده است. دارابارا و همکاران [۱۳] بر روی فولاد صفحه‌ای به کمک روش قوس انتقالی پلاسمایی ذرات TiB_2 و همچنین افزودن ذرات بور به صورت پودری را بررسی کردند. نتایج گزارش شده بیان می‌کند که مخلوط پودر عاری از بور نقش بسیار مهمی در تشکیل لایه‌ها زمانی که این پودر به صورت مذاب در داخل فولاد حل می‌شود، دارد. به طوری که محدوده انجماد را کاهش داده و منجر به شکل‌گیری لایه‌های هموزن ضخیم‌تر می‌شود. همچنین در نمونه‌های عاری از پودر بور کریستال‌های TiB_2 در نمودار سه فازی یوتکتیک $Fe-TiB_2-Fe_2B$ شکل گرفت به طوری که میکروساختار زمینه تقریباً به وسیله دی‌گرام دو تایی $Fe-B$ قابل بیان است. همچنین در این کار تحقیقاتی گزارش شده است که افزودن بور باعث افزایش میکروسختی می‌شود که به علت حضور ذرات سخت بوراید آهن است.

ژانگ و همکاران [۱۴] به طریق مشابه کامپوزیت $Fe-TiB_2$ را بر روی فولاد نرم نشانده‌اند و آن را مشخصه‌یابی کرده‌اند. همچنین این محققین گرادیان توزیع تقویت‌کننده TiB_2 را در راستای افقی و عمودی بررسی کردند. نتایج به دست آمده این‌گونه گزارش شد که تقویت‌کننده TiB_2 می‌تواند به وسیله تیتانیوم B_4C سنتز شود. نتایج نشان داد که شکل، اندازه و کسر حجمی تقویت‌کننده TiB_2 در راستای عمودی نسبت به راستای افقی تغییر می‌کند که به علت تغییر دانسیته جرمی و سرعت انحلال می‌باشد. همچنین گزارش شد که سرعت انحلال برای همه سطح پوشش به طور چشم‌گیری بر روی تقویت‌کننده TiB_2 تاثیر می‌گذارد. با افزایش انحلال پوشش، دانه‌های TiB_2 تمایل دارند تا به شکل سوزنی در انتهای لبه‌های پوشش باشند. در حالی که در مرکز پوشش تمایل دارند به شکل دانه‌ای باشند.

وو و همکاران [۱۵] نقایص در سنتز پوشش کامپوزیتی حاوی TiB_2 را بررسی کردند. نتایج نشان داد که نقایص به صورت ماکرو و میکرو در پوشش کامپوزیتی حاوی ذرات TiB_2 ظاهر می‌شوند که بسیار به شرایط فرآیند حساس هستند. گرمای ورودی تاثیر بسیار زیادی بر سنتز این پوشش دارد. نقایص کلی میکرو در این پوشش عموماً آخال‌های سرباره و ترک‌ها می‌باشند. آخال‌های سرباره در این پژوهش به صورت کلی ترکیبی از کربن و آلومینا هستند که باعث ترک در پوشش اولیه می‌شود. این نقایص تمایل دارند که در سرعت‌های حلالیت کم ظاهر شوند و با افزایش سرعت حلالیت میزان این نقایص کاهش می‌یابد.

با توجه به مرور تحقیقات قبلی (که در بالا به آن‌ها اشاره شد)، تاکنون فعالیتی در زمینه ایجاد پوشش کامپوزیتی زمینه آهنی حاوی ذرات سرامیکی TiB_2 به روش جوشکاری توپودری بر روی فولاد ساده کربنی انجام نشده است. بنابراین هدف اصلی از کار پژوهشی حاضر، ایجاد این پوشش کامپوزیتی بر روی فولاد ساده کربنی و تاثیر آن بر روی رفتار سایش و سختی فولاد مذکور می‌باشد.

می‌توان لایه‌های مقاوم به سایش و کامپوزیتی بر روی سطح فولاد ایجاد کرد. مزیت استفاده از روش جوشکاری در مقایسه با روش‌های دیگر بهبود سطح فولادها، هزینه کم، ایجاد چسبندگی مناسب، سرعت پوشش‌دهی بالا و همچنین تنوع در انواع پوشش می‌باشد [۲ و ۳].

از نقطه‌نظر مهندسی جوش، امروزه جوشکاری توپودری^۱ به خاطر داشتن ویژگی‌هایی مانند کارپذیری آسان و موثر، امکان ماشینی کردن فرآیند، نرخ رسوب‌دهی بالاتر و استفاده از آن در محدوده‌ی وسیعی از کاربردها بسیار مورد توجه مهندسیین و محققان قرار گرفته است [۳ و ۴]. براساس بررسی‌های انجام شده، جوشکاری توپودری، فرآیندی نفوذی است که با استفاده از سیم‌جوش‌های حاوی پودر با سرعت ثابت توسط یک تفنگ جوشکاری انجام می‌شود. گرمای مورد نیاز برای ذوب فلز پایه، سیم‌جوش و عناصر موجود در پودر در داخل سیم‌جوش از طریق ایجاد قوس بین قطعه کار و الکترود ایجاد می‌شود [۵]. هر چند از این فرآیند برای اتصال قطعات فولادی استفاده می‌شود، اما کاربرد اصلی آن در آلیاژسازی و سخت‌کاری سطحی فولادها می‌باشد [۳].

لازم به ذکر است که سخت‌کاری سطحی، در واقع تکنولوژی بهبود سطح است که در آن یک آلیاژ با طراحی ویژه روی سطح به منظور افزایش خواص سطح و با توجه به خواص آلیاژهای انتخابی، جوش داده می‌شود. در این فرآیند بین پوشش و زمینه پیوند متالورژیکی تشکیل می‌شود. روش‌های مرسوم سخت‌کاری سطحی شامل جوشکاری اکسی استیلین، جوشکاری با الکترود تنگستنی، جوشکاری قوس انتقالی پلاسم، جوشکاری توپودری و زیرپودری^۲ (SMAW) است [۸-۶].

کرونادو و همکارانش [۹] چهار نوع رسوب مختلف جوش را بررسی کردند که از طریق دو فرآیند جوشکاری توپودری و زیرپودری اعمال شدند و ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش خراشان آن‌ها را تحلیل کردند. این محققان دریافتند که سخت‌کاری سطحی با استفاده از FCAW مقاومت به سایش خراشان بالاتری را نسبت به SMAW ایجاد می‌کند. همچنین در فرآیند FCAW، آلیاژ سخت‌پوشی که مقدار تیتانیوم بیش‌تری دارد، بیش‌ترین مقاومت را در برابر سایش خراشان دارد. زیرا ریزساختار آن از یک زمینه‌ی یوتکتیک همراه با کاربیدهای غنی از تیتانیوم که به عنوان مانعی در برابر برش با ذرات ساینده عمل می‌کنند، تشکیل شده است. این افراد گزارش کردند که به طور کلی هیچ رابطه‌ای بین سختی و مقاومت به سایش خراشان مشاهده نکردند و دلیل این امر را این‌گونه توضیح دادند که نقش کاربیدها و ریزساختار بسیار مهم‌تر از نقش سختی در مقاومت سایشی است.

سپات و رامارآو [۱۰] اثر ذرات ساینده را بر رفتار سایش فرسایشی پوشش ایجاد شده توسط جوشکاری توپودری بر روی چدن‌های دارای کروم بالا بررسی کردند و دریافتند که کسر حجمی بالای کاربید کروم در هنگام سایش با ذرات ساینده نرم‌تر از خودشان مفید واقع می‌شوند و افزایش مقاومت سایشی را در پی دارند. اما هنگامی که تست سایش با ذرات ساینده‌ی سخت‌تر از کاربید کروم انجام شود، این کسر حجمی بالا از کاربید مضر واقع شده و منجر به افزایش شدید سایش می‌شود.

با توجه به مطالب بیان شده، یکی از روش‌های بهبود خواص سطحی فولادها، ایجاد کامپوزیت زمینه فلزی حاوی عناصر آلیاژی یا

^۱Flux cored arc welding^۲Submerged arc welding

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- مواد

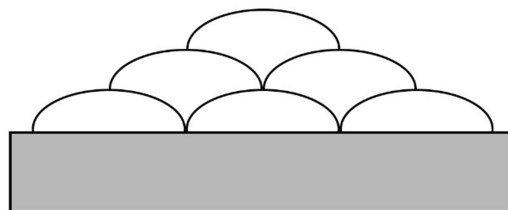
قطعه‌ی فولاد St37 نورد شده با ابعاد $10 \times 20 \times 40$ mm³ تهیه و به عنوان فلز پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلز پایه و ترکیب سیم جوش مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده‌اند. ذرات سرامیکی TiB₂ با نسبت وزنی ۱۰۰ درصد با کد W₁ و با نسبت وزنی ۵۰ درصد به همراه ۵۰ درصد پودر آهن با کد W₂ نیز توسط شرکت صنعتی آما ساخته شدند. ذرات TiB₂ دارای سختی HV ۳۴۰۰ و ساختار کریستالی هگزگونال می‌باشند.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلز پایه و مفتول سیم جوش

عصر	درصد وزنی	
	فلز پایه	سیم جوش
کربن	۰/۱۴	۰/۰۴
سیلیسیم	۰/۰۴	۰/۵
منگنز	۱/۴۰	۱/۷
گوگرد	۰/۰۳۸	—
آهن	باقیمانده	باقیمانده

۲-۲- ساخت نمونه

در گام نخست توسط دستگاه فرز حدود ۱ mm از سطح ورق‌های فولادی برای حذف اکسیدهای سطحی لایه‌برداری شد. سپس سطح آن‌ها با سنباده‌های ۱۰۰ و ۴۰۰ سنباده زده شد. برای از بین بردن لایه‌های چربی روی سطح از استون استفاده شد. سپس توسط دمش هوای گرم سطح ورق‌های فولادی خشک شد. در گام بعدی، جوشکاری توپودری توسط سیم‌جوش‌ها با کدهای W₁ و W₂ با گاز محافظ آرگون-دی‌اکسید کربن با نسبت ۸۰ - ۲۰ درصد انجام پذیرفت. علت انتخاب گاز دی‌اکسید کربن در کنار گاز آرگون پایداری بیشتر قوس الکتریکی و جلوگیری از پاشش مذاب بوده است. عملیات جوشکاری برای تمام نمونه‌ها با دبی ثابت گاز محافظ و گرمای ورودی جوشکاری انجام پذیرفت و با استفاده از هر سیم جوش، ۳ نمونه با تعداد ۱، ۲ و ۳ لایه تهیه شد که در مجموع با توجه به ۲ نوع سیم جوش، ۶ نمونه جوشکاری شدند که در شکل ۱ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که انتخاب وضعیت لایه‌ها و نحوه نشان دادن آن‌ها بر روی هم بر اساس استاندارد ISO 6847 انجام شده است. در جدول ۲ پارامترهای جوشکاری نمونه‌ها آورده شده است.



شکل ۱- نحوه رسوب پاس‌های جوش برای ایجاد روکش

جدول ۲- پارامترهای جوشکاری نمونه‌ها

فرآیند	FCAW
دستگاه جوشکاری	GAAM ELECTRIC/ PARS MIG602
قطر سیم (mm)	۱/۲
طول قوس (mm)	۲-۳
ولتاژ (V)	۲۸-۳۰
شدت جریان (A)	۲۹۰-۳۰۰
تعداد لایه‌های جوش	۱ و ۲ و ۳
نوع گاز محافظ	CO ₂ +Ar
دبی گاز محافظ (L/min)	۱۰-۱۲
قطبیت	DCEP
سرعت ورود سیم (cm/min)	۷۰
سرعت جوشکاری (cm/min)	۲۴-۲۵

۲-۳- سختی سنجی

سختی‌سنجی ماکروسکوپی از سطح هر یک از لایه‌ها به روش راکول C با بار ۱۰۰ کیلوگرم و با استفاده از دستگاه مدل Waki بعد از سنگ‌زنی ۱ mm از گرده جوش‌های هر لایه انجام شد. برای این منظور حداقل سختی ۳ نقطه مختلف تعیین گردید که متوسط نتایج آنها به عنوان معیار سختی هر لایه در هر نمونه در نظر گرفته شد. همچنین سختی‌سنجی میکروسکوپی بر روی لایه آخر (سوم) انجام پذیرفت. برای این منظور میکروسختی با دستگاه HVS-1000 مدل JOCO تحت بار ۱۰۰ گرم انجام شد.

۲-۴- پراش اشعه ایکس

با توجه به این نکته که در سیم جوش‌ها و فلز پایه (ST37)، نوع فازهای تشکیل شده در هر لایه از هر نمونه یکسان می‌باشد، آزمون پراش اشعه ایکس^۱ (XRD) بر روی لایه بالایی (سوم) انجام شد. برای این منظور آزمون XRD توسط یک دستگاه XRD مدل Philips انجام گردید و برای هر نمونه سرعت حرکت ۲ درجه بر دقیقه در نظر گرفته شد. در انتها نیز طیف‌های حاصله از این آزمایش به کمک برنامه Xpert تجزیه، تحلیل و شناسایی شدند.

۲-۵- بررسی میکروسکوپی

بررسی میکروسکوپی توسط میکروسکوپ الکترونی روشی^۲ (SEM) بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای این منظور از یک دستگاه SEM مدل VEGA/TESCA با ولتاژ کاری ۲۰kV مجهز به سیستم‌های الکترون ثانویه، اسپکترومتری تفکیک انرژی و الکترون برگشتی استفاده شد. همچنین از میکروسکوپ نوری مدل Prior England برای انجام مطالعات ساختاری استفاده شد.

^۱X-ray diffraction

^۲Scanning electron microscope

۶-۲- سایش

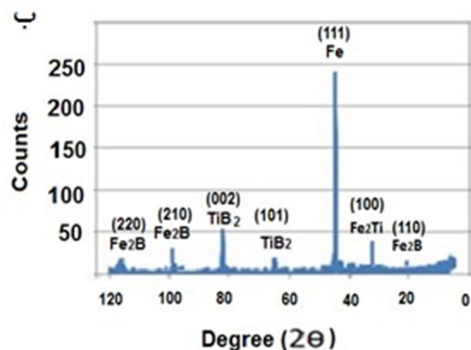
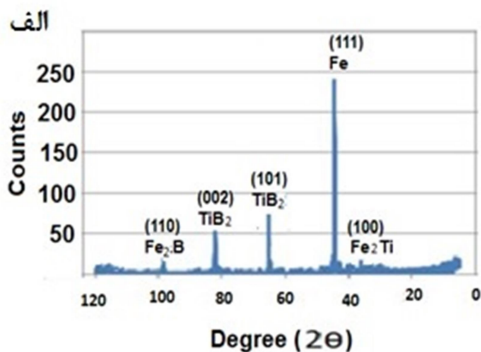
آزمون سایش مطابق استاندارد ASTM G65 (ماسه خشک و چرخ لاستیکی) با نیروی اعمالی ۱۳۰ نیوتن بر روی هر لایه از نمونه‌های تهیه شده انجام شد. برای این منظور ذرات کروی کوآرتز با اندازه دانه AFS 50/70 با دبی ثابت (۳۵۰ گرم در دقیقه) به عنوان ذرات ساینده استفاده شدند. علاوه بر این سرعت چرخش صفحه دوار ۲۰۰ دور در دقیقه و مسافت طی شده ۴۳۰۹ متر در نظر گرفته شد (درجه A استاندارد ذکر شده). آزمون در فواصل طی شده ۱۰۰۰ متری، قطع و نمونه‌ها با ترازوی دیجیتال با دقت ± 0.1 گرم وزن شدند و در انتها منحنی مقدار کاهش وزن ناشی از سایش بر حسب فاصله لغزش رسم شد. لازم به ذکر است پس از قطع آزمون و وزن کردن آن، برای بررسی فاصله دوم، سوم و چهارم نمونه جدید با همان مشخصات قرار داده شدند. این عمل بدین منظور انجام شد تا از تاثیر پارامترهایی مانند دما، ذرات ریز ایجاد شده بین نمونه و سطح ساینده جلوگیری نشود تا نتایج بدست آمده دارای دقت و صحت بیشتری باشند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- فازهای شناسایی شده توسط آزمون XRD

شکل ۲-الف الگوی پراش اشعه ایکس لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 را نشان می‌دهد. براساس این شکل می‌توان فهمید که فازهای شناسایی شده برای لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 شامل فاز آهن (فریت) و فازهای TiB_2 ، Fe_2B و Fe_2Ti هستند. شکل ۲-ب الگوی پراش اشعه ایکس لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 را نشان می‌دهد. فازهای شناسایی شده برای لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 نیز شامل فاز آهن (فریت) و فازهای TiB_2 ، Fe_2B و Fe_2Ti هستند.

با مقایسه الگوهای پراش ایکس، لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش‌های W_1 و W_2 (شکل‌های ۲-الف و ب) مشخص می‌شود که الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها در تعداد پیک‌های فازهای متفاوت و همچنین ارتفاع پیک‌های مربوط به فازهای TiB_2 و Fe_2Ti یکسان نیستند، به نحوی که در لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 (شکل ۲-الف) ارتفاع پیک فاز TiB_2 نسبت به نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 بالاتر است. در مقابل، ارتفاع پیک فاز Fe_2Ti در نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 بلندتر از نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 است و تعداد پیک فاز Fe_2B در نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 بلندتر و بیشتر از نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 است. لذا این موضوع مشخص می‌نماید که فاز TiB_2 در لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 بیشتر از لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 می‌باشد و در مقابل فازهای Fe_2Ti و Fe_2B در نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 بیشتر از نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 می‌باشند. براساس بررسی‌های انجام شده، علت تشکیل فازهایی غیر از TiB_2 در هر نمونه، ذوب سطحی یا انحلال جزئی فاز TiB_2 در مذاب می‌باشد، به نحوی که می‌توان گفت ذرات دی‌بوراید تیتانیوم در هنگام ایجاد قوس الکتریکی و با توجه به دمای بالای حوضچه مذاب ($2800-3200^\circ C$) در مذاب حل شده‌اند و در هنگام انجام فازهای Fe_2Ti و Fe_2B تشکیل شده است [۱۷].



شکل ۲- الگوی پراش پرتو ایکس لایه سوم نمونه های جوشکاری شده، (الف) با سیم جوش W_1 ، (ب) با سیم جوش W_2

۳-۲- بررسی ریزساختاری

شکل ۳-الف تصویر میکروسکوپی نوری فلز پایه را نشان می‌دهد که از دانه های فریت و پرلیت با ۱۵ درصد حجمی پرلیت و ۸۵ درصد فریت می‌باشد. ساختار میکروسکوپی فلز رسوب در لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 در شکل ۳-ب ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، در این ساختار ذرات چند ضلعی TiB_2 با اندازه متوسط ۴۰ میکرومتر و ذرات کروی شکل TiB_2 و Fe_2Ti به اندازه کمتر از ۱۰ میکرومتر وجود دارد. در این تصویر همچنین ساختار یوتکتیک شامل فازهای $Fe_2B + \alpha$ نیز مشاهده می‌شود. شکل ۳-ج تصویر میکروسکوپی نوری لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل مشخص است ریز ساختار این نمونه در لایه سوم متشکل از ذرات TiB_2 ، Fe_2Ti و یوتکتیک $\alpha + Fe_2B$ می‌باشد، که درصد حجمی ذرات TiB_2 در این نمونه کمتر از نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 می‌باشد که ناشی از درصد وزنی کمتر پودر TiB_2 در سیم جوش W_2 و حضور پودر آهن در سیم جوش W_2 می‌باشد.

بررسی شکل‌های ۳-ب و ۳-ج نتایج به دست آمده از آزمون پراش اشعه X را تایید می‌کند. همچنین مشخص می‌نماید که ذرات Fe_2Ti و TiB_2 تشکیل شده از مذاب به مراتب از اندازه کوچک‌تری نسبت به نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 دارند. اندازه ذرات Fe_2Ti لایه سوم در نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 در حدود ۲ میکرومتر و اندازه ذرات TiB_2 تشکیل شده از مذاب در حدود ۳ میکرومتر می‌باشد در حالی که در لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1

رقت جوشکاری با افزایش لایه‌های رسوبی، کاهش درصد حجمی فاز فریت و افزایش درصد حجمی فازهای Fe_2B ، TiB_2 و Fe_2Ti در ریزساختار می‌باشد [۱۹].

نتایج آزمون سختی میکروسکوپی نمونه‌های جوشکاری شده با سیم جوش W_1 و W_2 در لایه سوم در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به جدول ۴ مشخص می‌شود که سختی میکروسکوپی زمینه، در نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 بیشتر از سختی میکروسکوپی نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 می‌باشد. با توجه به این که زمینه موجود در ریز ساختار هر دو نمونه شامل یوتکتیک $\alpha + Fe_2B$ می‌باشد، بنابراین می‌توان گفت که اختلاف ناشی از سختی میکروسکوپی ناشی از درصد حجمی یوتکتیک می‌باشد [۲۰]. با فرض این که درصد حجمی یوتکتیک $\alpha + Fe_2B$ در لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 بیشتر از لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 باشد و با توجه به علت تجزیه شدن بیشتر TiB_2 در نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 می‌توان بیان کرد که عنصر بور بیشتری در فاز فریت حل می‌شود. بنابراین سختی میکروسکوپی فاز فریت نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 از W_1 بیشتر است که باعث افزایش سختی میکروسکوپی نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 در مقایسه با سیم جوش W_1 می‌گردد.

جدول ۳- نتایج آزمون سختی از سطح لایه های مختلف نمونه‌ها

نمونه	W_1	W_2
فلز پایه	۳۲	۳۲
لایه اول	۴۴	۳۹
لایه دوم	۴۵	۴۰
لایه سوم	۴۸	۴۱

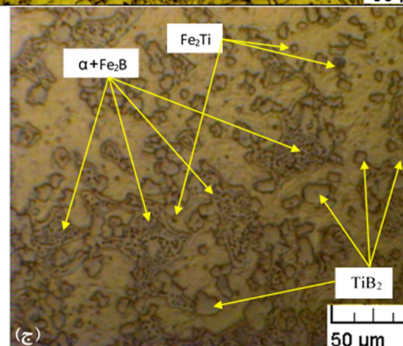
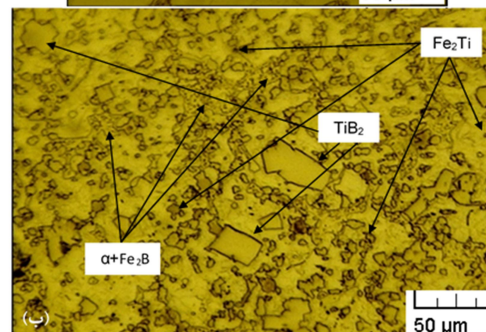
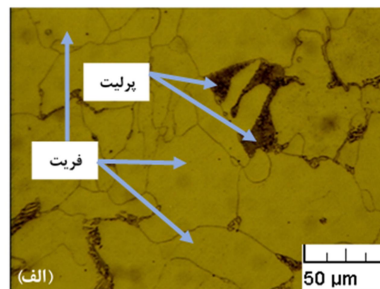
جدول ۴- سختی سنجی میکروسکوپی نمونه های جوشکاری شده با سیم جوش W_1 و W_2 در لایه سوم

سیم جوش مصرفی	W_1	W_2
سختی زمینه ($Fe_2B + \alpha$) HV0.1	۳۵۷	۳۷۶

۴-۳- مقاومت به سایش

نتایج آزمون سایش در جدول ۵ و همچنین شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. براساس جدول ۵ بالاترین مقاومت سایش برای لایه سوم نمونه W_2 و پس از آن لایه اول نمونه W_1 می‌باشد. علت این پدیده را می‌توان در کاهش چسبندگی ذرات TiB_2 با زمینه مرتبط دانست، زیرا عنصر آهن در نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 به عنوان یک پیوند دهنده ذرات با زیرلایه استفاده شده است. نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 ، فقط حاوی پودر TiB_2 است که با افزایش تعداد لایه‌های جوشکاری شده مقدار TiB_2 در سطح افزایش یافته است (جدول ۵). علت این افزایش در درصد حجمی فاز TiB_2 در ریز ساختار همانگونه که قبلاً اشاره شد ناشی از کاهش درجه رقت می‌باشد. براین اساس با افزایش درصد حجمی ذرات TiB_2 و کاهش مقدار آهن کل،

اندازه ذرات Fe_2Ti حدود ۵ میکرومتر و اندازه ذرات TiB_2 تشکیل شده از مذاب ۴/۵ میکرومتر می‌باشد.



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ نوری: (الف) فلز پایه، (ب) لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 ، (ج) لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2

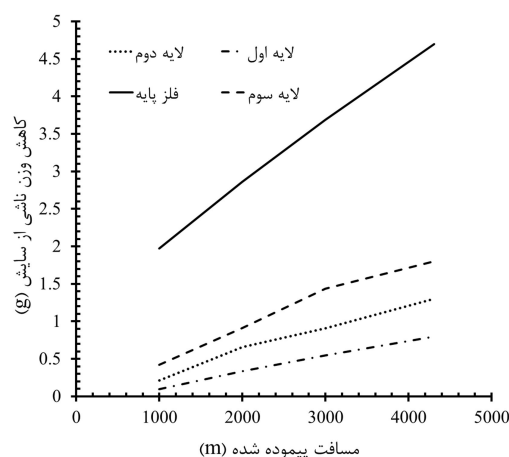
۳-۳- سختی سنجی

جدول ۳ نتایج آزمون سختی میکروسکوپی از سطح نمونه‌ها را ارائه می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، سختی لایه اول نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 از نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 بیشتر است. همچنین سختی لایه دوم و سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 از W_2 بیشتر است. علت افزایش سختی لایه‌های اول، دوم و سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 نسبت به نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 ناشی از بیشتر بودن میزان TiB_2 در سیم جوش نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 نسبت به سیم جوش W_2 می‌باشد [۱۸]. با بررسی جدول ۳ مشخص می‌شود که در نمونه‌های جوشکاری شده با سیم جوش W_1 و W_2 ، لایه سوم دارای حداکثر سختی می‌باشد که علت آن افزایش درصد حجمی دی‌بوراید تیتانیوم در ریز ساختار لایه سوم نسبت به لایه‌های قبلی می‌باشد. این افزایش درصد حجمی در ریز ساختار ناشی از کاهش

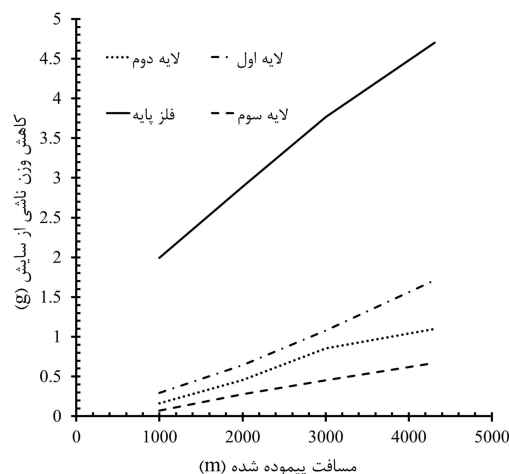
چسبندگی ذرات TiB_2 به زمینه کاهش پیدا می‌کند [۲۱]. این پدیده باعث توده‌ای شدن ذرات TiB_2 در سطح رسوب می‌شود. با توجه به آن که چسبندگی ذرات TiB_2 وابسته به احاطه شدن این ذرات توسط مذاب آهن می‌باشد [۲۱ و ۲۲]، لذا با شکل‌گیری ذرات توده‌ای در سطح، نسبت سطح به حجم ذرات کاهش می‌یابد. در اثر این اتفاق نیز مقدار مذاب احاطه کننده توده‌ها (مذاب آهن) با کاهش روبرو خواهد شد و در نتیجه چسبندگی ذرات توده‌ای به زمینه نیز کم شد که باعث کاهش مقاومت به سایش نمونه‌ها می‌شود.

جدول ۵- میزان وزن کسر شده هر نمونه بر حسب گرم پس از پایان آزمون سایش در مسافت ۴۳۰۹ متر

نمونه	W_1	W_2
فلز پایه	۴/۷	۴/۷
لایه اول	۰/۸	۱/۷۱
لایه دوم	۱/۳	۱/۱
لایه سوم	۱/۸	۰/۶۷



شکل ۴- نمودار سایش نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1



شکل ۵- نمودار سایش نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2

بررسی شکل ۴ مشخص می‌نماید که در نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 ، شیب نمودار سایش برای لایه اول و دوم تقریباً ثابت است. این موضوع نشان‌دهنده کنترل سایش توسط ذرات TiB_2 است و می‌توان نتیجه گرفت که به علت حضور آهن بیشتر در لایه‌های اول و دوم چسبندگی ذرات به زمینه مناسب بوده است. ولی در لایه سوم پس از مسافت ۳۰۰۰ m شیب سایش کاهش می‌یابد. علت بروز این رفتار می‌تواند در این باشد که تا قبل از مسافت ۳۰۰۰ m ذرات رسوبی (که چسبندگی کمی با زمینه دارند) کنترل کننده سایش می‌باشند و بعد از کنده شدن در مسافت بیشتر از ۳۰۰۰ m، ساختار یوتکتیکی $\alpha+Fe_2B$ موجود در سطح کنترل کننده سایش بوده است.

بررسی شکل ۵ مشخص می‌نماید که در نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 شیب نمودار سایش برای لایه‌های اول تا سوم ثابت است که نشان دهنده عدم تغییرات مهم در سطح سایش است. نتایج آزمون سایش نمونه‌های مختلف در لایه‌های متفاوت ثابت می‌کند که افزایش مقاومت به سایش ارتباط مستقیم با افزایش سختی ناحیه پوشش و درصد حجمی فازهای مختلف در سطح ندارد. به گونه‌ای که سختی لایه‌ها با افزایش تعداد لایه‌ها در هر نمونه به علت کاهش رقت زمینه افزایش داشته است.

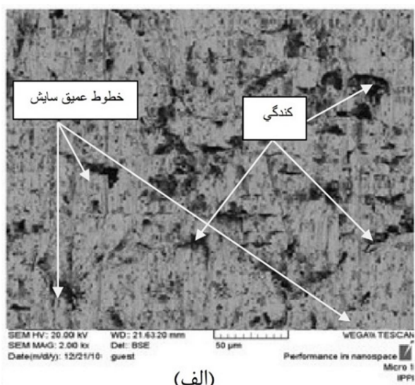
لازم به ذکر است که به منظور به دست آوردن یک لایه کامپوزیتی مطلوب با روش اضافه نمودن ذرات سخت به زمینه دو موضوع قابل توجه می‌باشد. نخست پراکندگی یکنواخت رسوبات در سطح و موضوع دیگر احاطه شدن هر ذره توسط فاز زمینه به نحوی که ذرات در سطح تجمع نکرده و تشکیل مناطق توده‌ای ندهند [۲۱ و ۲۲]. در صورت عدم وجود این دو موضوع ذرات به طور کامل توسط فاز زمینه احاطه نمی‌شوند، در نتیجه چسبندگی آن‌ها به سطح کاهش یافته و کندگی آن‌ها از سطح در هنگام سایش با سهولت انجام می‌پذیرد. با توجه به نتایج آزمون سایش، بهترین عملکرد برای لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 است. با توجه به این که درصد وزنی TiB_2 در سیم جوش W_1 بیشتر از W_2 است، ولی نتیجه سایش نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 بهتر از نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 می‌باشد که علت آن ناشی از حضور درصد حجمی بالاتر فاز Fe_2B در نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 نسبت به نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 می‌باشد. فاز Fe_2B دارای سختی بالایی (HV ۲۲۰۰) بوده و به علت تشکیل از حالت مذاب از چسبندگی بالاتری به زمینه برخوردار می‌باشد [۱۲].

عامل بعدی می‌تواند کوچک‌تر بودن ذرات TiB_2 در لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 نسبت به لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 باشد. کوچک‌تر بودن ذرات TiB_2 باعث افزایش نسبت سطح به حجم این ذرات در زمینه می‌شود. در نتیجه میزان چسبندگی ذرات TiB_2 به زمینه در اثر افزایش انرژی کشش سطحی افزایش می‌یابد که باعث کاهش کندگی ذرات از سطح می‌شود.

۳-۵- میکرو مکانیزم سایش فلز پایه

شکل ۶ تصویر SEM سطح سایش فولاد پایه در مسافت ۴۳۰۹ m را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، خطوط سایش عمیق در سطح نمونه ایجاد شده است. بنابراین می‌توان بیان کرد که میکرو مکانیزم سایش خراشان این نمونه شخم‌زنی عمیق است.

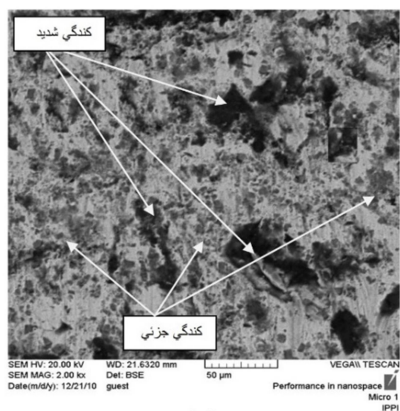
سایش لایه اول وجود دارد. بنابراین میکرومکانیزم سایش نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 در لایه دوم، شخم‌زنی نسبتاً کم عمق به همراه کندگی می‌باشد. سطح سایش لایه سوم در شکل ۸-ج ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، خطوط سایش بسیار کم عمق به همراه کندگی‌هایی به مراتب بیشتر از لایه های اول و دوم در سطح به چشم می‌خورد. بنابراین میکرومکانیزم سایش لایه رسوبی سوم شامل کندگی به همراه شخم‌زنی بسیار کم عمق می‌باشد.



(الف)

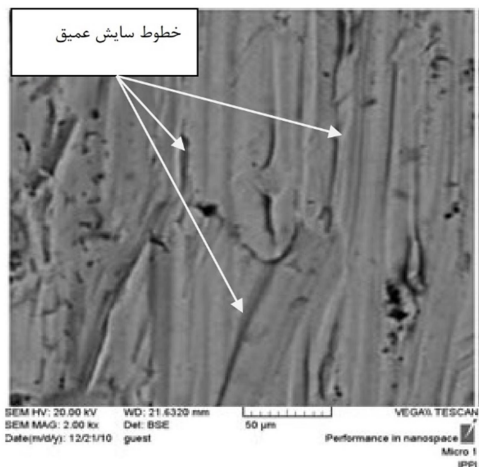


(ب)



(ج)

شکل ۷- تصویر SEM از سطح سایش نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 در مسافت ۴۳۰۹ متر، الف) لایه اول، ب) لایه دوم، ج) لایه سوم



شکل ۶- تصویر SEM از سطح سایش فلز پایه در مسافت ۴۳۰۹ متر

شکل ۷، تصویر SEM سطوح سایش نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 در لایه‌های مختلف بعد از مسافت سایش ۴۳۰۹ متر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۷-الف مشخص است، خطوط سایش عمیق به همراه کندگی‌هایی در سطح مشاهده می‌شود. بنابراین میکرومکانیزم سایش لایه اول نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_1 شامل شخم‌زنی با خطوط سایش عمیق به همراه کندگی می‌باشد. با توجه به شکل ۷-ب می‌توان فهمید که در سطح لایه دوم، خطوط سایش کم عمق به همراه کندگی‌های بیشتری نسبت به لایه رسوبی اول مشاهده می‌شود. بنابراین میکرومکانیزم سایش لایه دوم، شخم‌زنی با خطوط کم عمق همراه با کندگی است. بررسی شکل ۷-ج نیز نشان می‌دهد که در سطح لایه سوم، خطوط سایش وجود ندارد و فقط کندگی‌هایی در سطح مشاهده می‌شود که مقدار کندگی‌ها بسیار بیشتر از لایه‌های رسوبی اول و دوم است. بنابراین میکرومکانیزم سایش لایه سوم کندگی است.

علت این رفتار سایشی در نمونه W_1 به این دلیل می‌باشد که در سطح سایش لایه رسوبی اول (که در شکل ۶-الف نشان شده است)، مقدار کمی TiB_2 وجود دارد. بنابراین زمینه بیشتر در معرض سایش می‌باشد. در لایه رسوب دوم (که در شکل ۷-ب ارائه شده است)، درصد حجمی TiB_2 افزایش یافته است. در نتیجه هم زمینه و هم ذرات TiB_2 هم‌زمان در معرض سایش می‌باشند. در لایه رسوبی سوم (که شکل ۷-ج ارائه شده است)، با افزایش درصد حجمی TiB_2 در سطح، ذرات ساینده با فاز TiB_2 درگیر بوده و باعث کندگی آن‌ها از سطح شده است. شکل ۸، تصویر SEM سطوح سایش نمونه‌های جوشکاری شده با سیم جوش W_2 در لایه‌های مختلف بعد از مسافت ۴۳۰۹ متر را نشان می‌دهد. با بررسی شکل ۸-الف می‌توان فهمید که خطوط سایش عمیق به همراه کندگی‌های جزئی در سطح وجود دارد. بنابراین میکرومکانیزم سایش لایه اول نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 شخم‌زنی به همراه کندگی جزئی (ذرات TiB_2) می‌باشد. شکل ۸-ب سطح سایش نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 را در لایه دوم نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که خطوط سایش عمیق به همراه خطوط سایش کم عمق در سطح سایش به همراه کندگی‌هایی به مراتب بیشتر از سطح

مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نهایی به دست آمده به صورت خلاصه به شرح ذیل است:

۱- در لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش حاوی ۵۰ درصد پودر TiB_2 و ۵۰ درصد پودر آهن نسبت به لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش حاوی ۱۰۰ درصد پودر TiB_2 ، درصد حجمی فاز TiB_2 کاهش و درصد حجمی فاز فریت، Fe_2Ti و Fe_2B افزایش یافته است.

۲- سختی میکروسکوپی زمینه در لایه اول، دوم و سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش حاوی ۵۰ درصد پودر TiB_2 و ۵۰ درصد پودر آهن نسبت به لایه‌های اول، دوم و سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش حاوی ۱۰۰ درصد پودر TiB_2 بالاتر می‌باشد که علت آن حضور درصد حجمی بالاتر فاز Fe_2B در زمینه است.

۳- افزایش درصد حجمی فاز Fe_2B در لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش حاوی ۵۰ درصد پودر TiB_2 و ۵۰ درصد پودر آهن نسبت به لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش حاوی ۱۰۰ درصد پودر TiB_2 ، تاثیر مستقیمی بر افزایش مقاومت به سایش دارد.

۴- افزایش درصد حجمی فاز TiB_2 در سطح لایه سوم نمونه جوشکاری شده با سیم جوش حاوی ۱۰۰ درصد پودر TiB_2 تاثیر مستقیمی بر افزایش سختی داشته، ولی تاثیر مستقیمی بر بهبود مقاومت به سایش نداشته است.

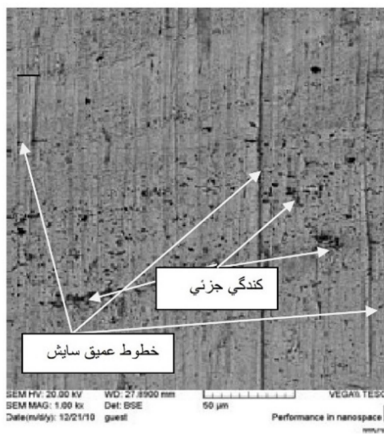
۵- با افزایش تعداد لایه‌ها در نمونه جوشکاری شده با سیم جوش حاوی ۱۰۰ درصد پودر TiB_2 ، میکرومکانیزم سایش لایه اول، شخم‌زنی عمیق همراه با کندگی، در لایه دوم، شخم‌زنی کم عمق به همراه کندگی و در لایه سوم، کندگی شدید می‌باشد.

۶- با افزایش تعداد لایه‌ها در نمونه جوشکاری شده با سیم جوش حاوی ۵۰ درصد پودر TiB_2 و ۵۰ درصد پودر آهن، میکرومکانیزم سایش لایه اول، شخم‌زنی عمیق به همراه کندگی جزئی، در لایه دوم، شخم‌زنی نسبتاً کم عمق به همراه کندگی و در لایه سوم، کندگی به همراه شخم‌زنی بسیار کم عمق می‌باشد.

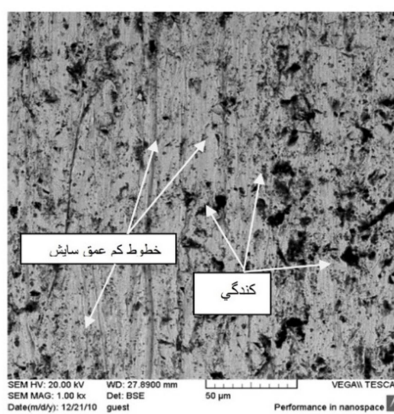
از مزایای استفاده از روش ایجاد پوشش کامپوزیتی حاوی ذرات سرامیکی TiB_2 به روش جوشکاری این است که می‌توان ذرات سرامیکی با اندازه دلخواه و ایجاد لایه‌های متفاوت و دلخواه با توجه به شرایط سایشی نمونه‌های فولادی تولید کرد. بنابراین تحقیق حاضر کمکی است تا شرایط لازم برای تولید صنعتی قطعات با مقاومت سایشی بالا با استفاده از پوشش کامپوزیتی به روش جوشکاری توپودری را فراهم نماید.

۵- مراجع

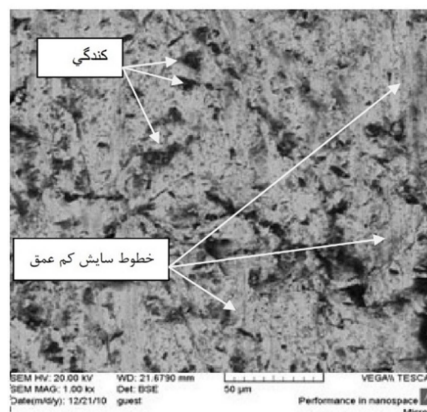
- [1] Liu D., Liu R. and Wei Y., Effects of Titanium Additive on Microstructure and Wear Performance of Iron-Based Slag-Free Self-Shielded Flux-Cored Wire. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 207, pp. 579-586, 2012.
- [2] ثابت ح.، تکنولوژی و متالورژی جوشکاری. نشر فنی امیر، ۱۳۸۷.
- [3] Olson D. L., Siewert T. A., Liu S. and Edwards G. R., *Metals Handbook-Vol 6-Welding, Brazing and Soldering*. American Society for Metals, 1993.
- [4] Katherasan D., Sathiya P. and Raja A., Shielding Gas Effects on Flux Cored Arc Welding of AISI 316L (N) Austenitic Stainless Steel joints. *Materials & Design*, Vol. 45, pp. 43-51, 2013.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸- تصویر SEM از سطح سایش نمونه جوشکاری شده با سیم جوش W_2 در مسافت ۴۲۰۹ متر، (الف) لایه اول، (ب) لایه دوم، (ج) لایه سوم

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، سه لایه کامپوزیتی زمینه فلزی حاوی ذرات سرامیکی دی‌بوراید تیتانیوم روی فولاد ساده کربنی به روش جوشکاری توپودری اعمال شد و اثر این لایه بر خواص سایشی و سختی فولاد

- [22] Dallaire S., Development of Cored Wires for Improving the Abrasion Wear Resistance of Austenitic Stainless Steel. *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 456-462, 1997.
- [5] Katherasan D., Elias J. V., Sathiya P. and Haq A. N., Flux Cored Arc Welding Parameter Optimization Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Procedia Engineering*, Vol. 38, pp. 3913-3926, 2012.
- [6] Rao N. V., Reddy G. M. and Nagarjuna S., Weld Overlay Cladding of High Strength Low Alloy Steel with Austenitic Stainless Steel – Structure and Properties. *Materials and Design*, Vol. 32, No. 4, pp. 2496-2506, 2011.
- [7] Molleda F., Mora J., Molleda F. J., Mora E., Carrillo E. and Mellor B. G., A Study of the Solid-Liquid Interface in Cobalt Base Alloy (Stellite) Coatings Deposited by Fusion Welding (TIG). *Materials Characterization*, Vol. 57, No. 4-5, 227-231.
- [8] Lu S-P., Kwon O-Y., Kim T-B. and Kim K-H., Microstructure and Wear Property of Fe-Mn-Cr-M-V Alloy Cladding by Submerged Arc Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 147, No. 2, pp. 191-196, 2004.
- [9] Coronado J. J., Caicedo H. F. and Gomez A. L., The Effects of Welding Processes on Abrasive Wear Resistance for Hardfacing Deposits. *Tribology International*, Vol. 42, No. 5, pp. 745-74, 2009.
- [10] Sapate S. G. and RamaRoa A.V., Erosive Wear Behaviour of Weld Hardfacing High Chromium Cast Irons: Effect of Eroding Particles. *Tribology International*, Vol. 39, No. 3, pp. 206-212, 2006.
- [11] Cha L., Lartigue-Korinek S., Walls M. and Mazerolles L., Interface Structure and Chemistry in a Novel Steel-Based Composite Fe-TiB₂ Obtained by Eutectic Solidification. *Acta Materialia*, Vol. 60, No. 18, pp. 6382-6389, 2012.
- [12] Darabara M., Papadimitriou G. D. and Bourithis L., Tribological Evaluation of Fe-TiB₂ Metal Matrix Composites. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, No. 2, pp. 246-253, 2007.
- [13] Darabara M., Papadimitriou G. D. and Bourithis L., Production of Fe-TiB₂ Metal Matrix Composites on Steel Surface. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, No. 6, pp. 3518-3523, 2006.
- [14] Zhang P., Wang X., Guo L., Cai L. and Sun H., Characterization of in Situ Synthesized TiB₂ Reinforcements in Iron-Based Composite Coating. *Applied Surface Science*, Vol. 258, No. 4, pp. 1592-1608, 2011.
- [15] Wu D., Wang X., Zhang P., Cai L. and Sun H., Defects in the in Situ Synthesized TiB₂/Fe Composite Coatings during PTA Process. *Applied Surface Science*, Vol. 257, No. 23, pp. 10119-10125, 2011.
- [16] Pierson H. O., Handbook of Refractory Carbides and Nitrides. Noyes Publish, New Jersey, 1996.
- [17] Du B., Fabrication of in Situ Fe-Ti-B Composite Coating by Laser Cladding. *Surface Review and Letters*, Vol. 20, No. 3-4, pp. 1-8, 2013.
- [18] Du B., Zou Z., Wang X. and Qu S., Laser Cladding of in Situ TiB₂/Fe Composite Coating on Steel. *Applied Surface Science*, Vol. 254, No. 20, pp. 6489-6494, 2008.
- [19] Ziemnicka-Sylwester M., Gai L. and Miura S., Effect of (Ti:B) Atomic Ratio on Mechanical Properties of TiB₂-Fe Composites “in Situ” Fabricated via Self-Propagating High-Temperature Synthesis. *Materials & Design*, Vol. 69, pp. 1-11, 2015.
- [20] Springer H., Aparicio Fernandez R., Duarte M. J., Kostka A. and Raabe D., Microstructure Refinement for High Modulus in-Situ Metal Matrix Composite Steels via Controlled Solidification of the System Fe-TiB₂. *Acta Materialia*, Vol. 96, pp. 47-56, 2015.
- [21] Seong-Hun C., Correlation of Microstructure with the Wear Resistance and Fracture Toughness of Hardfacing Alloys Reinforced with Complex Carbides. *Metallurgical and Materials Transaction*, Vol. 31, No. 12, pp. 3041-3049, 2000.