

## تأثیر مقادیر کروم و کربن بر ریزساختار و مقاومت به سایش آلیاژ روکش سخت پایه Fe-(6X)Cr-(X)C بر روی فولاد ساده‌ی کربنی ایجاد شده با فرآیند جوشکاری GTAW

حامد ثابت<sup>۱\*</sup>، شهرام خیر اندیش<sup>۲</sup>، شمس‌الدین میر دامادی<sup>۳</sup> و مسعود گودرزی<sup>۴</sup>

### چکیده

در این پژوهش، آلیاژهایی متفاوت با مقدار ثابت نسبت  $\frac{Cr}{C} = 6$ ، ولی مقادیر غلظت متفاوت کروم و کربن به روش جوشکاری GTAW روی فولاد ساده‌ی کربنی AISI ۱۰۱۰ ایجاد گردید. نتایج آزمون پراش پرتو X و متالوگرافی نوری و الکترونی مشخص کرد که ریزساختار نمونه‌ها متشکل از آستنیت و کاربید  $(Cr, Fe)_7C_3$  هستند. افزون بر این، مشخص شد که با افزایش کربن و کروم محتوی لایه‌های سخت، درصد حجمی کاربیدهای  $(Cr, Fe)_7C_3$  افزایش، درصد حجمی آستنیت کاهش و سختی سطحی افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج آزمون سایش مشخص نمود که با افزایش مقدار کروم و کربن در آلیاژهای هیپیوتکتیکی مقاومت به سایش افزایش می‌یابد. بررسی SEM سطوح ساییده شده‌ی نمونه‌ها مشخص نمود که ساز و کار سایش در نمونه‌های هیپیوتکتیکی از نوع شخم زنی در نمونه‌ی یوتکتیکی از نوع کندگی و در نمونه‌ی هایپریوتکتیکی از نوع ترک خوردن است.

واژه‌های کلیدی: Fe-Cr-C و  $\frac{Cr}{C} = 6$ ، ترکیب شیمیایی، ریزساختار، مقاومت به سایش.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.

۲- دانشیار دانشکده‌ی مهندسی مواد دانشگاه علم و صنعت تهران.

۳- استاد دانشکده‌ی مهندسی مواد دانشگاه علم و صنعت تهران.

۴- استاد یار دانشکده‌ی مهندسی مواد دانشگاه علم و صنعت تهران.

\*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: h.sabet@srbiau.ac.ir

## پیشگفتار

سایش یکی از مهم‌ترین عامل‌های تخریب قطعات مهندسی در صنعت است [۱]. عملیات جوشکاری به علت صرفه‌ی اقتصادی، ایجاد لایه‌های نسبتاً ضخیم، مقاوم نسبت به عملیات حرارتی، آبکاری و پوشش دادن در شرایط سایش خراشان و ضربه ارجحیت دارند [۲ و ۳]. ویژگی‌های لایه‌های سخت، تابعی از ترکیب شیمیایی، شرایط انجماد، سرعت سرد شدن (پس از انجماد)، ریزساختار و نوع، شکل و توزیع فازهاست [۴]. بر این اساس، لایه‌های سخت پایه‌ی آهنی بر اساس نوع سیستم آلیاژی بکار برده شده و یا ریزساختار میکروسکوپی تقسیم بندی می‌شوند [۵]. آلیاژ Fe-Cr-C متداول‌ترین گروه از آلیاژهای روکش سخت بشمار می‌رود زیرا از نظر هزینه نسبت به سایر آلیاژها اقتصادی‌تر است، این آلیاژها در شرایط سایش خراشان شدید مانند قطعات بکار رفته شده در صنایع سیمان و معدن به گونه‌ای گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶] (کچ گابنر و همکاران، ۲۰۰۸). مقاومت به سایش خراشان خوب این آلیاژها ناشی از وجود درصد حجمی بالایی از کاربیدها در یک زمینه‌ی چقرمه می‌باشد [۷]. نوع کاربیدهای ( $M_{23}C_6, M_7C_3, M_3C$ ) موجود در آلیاژهای Fe-Cr-C بستگی به میزان نسبت  $\frac{Cr}{C}$  آلیاژ دارد، این نسبت تعیین کننده‌ی کاربرد آلیاژ در شرایط متفاوت سایش است [۸]. مقاومت به سایش خراشان عالی در این آلیاژها هنگامی ایجاد می‌شود که نسبت  $\frac{Cr}{C}$  در محدوده‌ی ۵ تا ۸ قرار گیرد که در این نسبت، کاربیدهای  $(Cr, Fe)_7C_3$  با آستنیت (غنی از آهن و کروم) در ساختار ایجاد می‌شود [۹].

بیش‌تر پژوهش‌های انجام شده روی آلیاژ Fe-Cr-C، مطالعه‌ی ریزساختار و ارتباط آن با سختی بوده است، اما در خصوص نسبت  $\frac{Cr}{C}$  ثابت در این خانواده از آلیاژها مطالعاتی سیستماتیک و پیوسته‌ای انجام نشده است. این پژوهش به بررسی ارتباط بین ترکیب شیمیایی (% Cr و % C) در نسبت  $\frac{Cr}{C} = 6$  با ریزساختار و مقاومت به سایش در آلیاژهای روکش سخت Fe-Cr-C پرداخته است.

## مواد و روش پژوهش

فولاد ساده کربنی AISI ۱۰۱۰ به ابعاد  $10 \times 120 \times 200$  میلی‌متر به عنوان فلز زیر لایه مورد استفاده قرار گرفت، سطح نمونه‌ها پس از سنگ زنی و چربی زدایی با استن، توسط شش مخلوط با نسبت‌های وزنی خاص از مقادیر فروکروم و گرافیت کریستاله (به همراه ۲۰٪ وزنی سیلیکات سدیم) پوشش داده شدند، نسبت وزنی مخلوط پودرها در جدول ۱ ارائه شده است. سخت کاری سطحی به روش آلیاژسازی سطحی با استفاده از روش جوشکاری (GTAW) TIG انجام و تعدادی لایه سخت کنار هم ایجاد شدند. مشخصات فراسنج‌های جوشکاری (GTAW) (TIG) در جدول ۲ ارائه شده است. پس از آلیاژسازی سطحی، نمونه‌هایی از سطح جوشکاری شده جهت تعیین ترکیب شیمیایی، بررسی ریزساختار، پراش پرتو X و آزمون سختی سنجی و سایش تهیه شدند. تجزیه‌ی شیمیایی لایه‌های سخت به وسیله‌ی اسپکتروگرافی نشر نوری (OES) در یک میلی‌متری زیر سطح پس از سنگ زنی انجام و برای هر نمونه دست‌کم ۵ نقطه مورد تجزیه‌ی شیمیایی قرار گرفتند که میانگین نتایج آن‌ها معیار ترکیب شیمیایی هر نمونه در نظر گرفته شد. آزمون پراش سنجی پرتو X (XRD) به وسیله‌ی دیفراکتومتری مجهز به  $X^{\text{high}}$  Score با کاربرد اشعه‌ی  $CuK_{\alpha}$  ( $\lambda = 1/54 \text{ \AA}$ ) و فیلتر نیکلی انجام شد. جهت آزمون متالوگرافی، تمامی نمونه‌ها پس از آماده سازی با محلول نیتال ۲٪ اچ شدند. اجزای ریزساختاری هر یک از نمونه‌ها به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم الکترون برگشتی (BSE) تحت ولتاژ شتاب دهنده ۲۰KV بررسی شدند، همچنین، جهت تعیین درصد حجمی فازهای هر یک از نمونه‌ها، محلول اچ رنگی و یک دستگاه میکروسکوپ نوری مجهز به سیستم تحلیل تصویر (Image Analysis) بکار برده شد.

سختی لایه‌های سطحی به وسیله‌ی یک دستگاه سختی سنجی در مقیاس ویکرز با بار ۳۰۰۰۰ گرم نیوتن در یک میلی‌متری زیر سطح، پس از سنگ‌زنی انجام شد. برای هر نمونه، دست‌کم ۵ نقطه از سطح مربوطه مورد آزمون قرار گرفت که میانگین نتایج آن‌ها به عنوان معیار

سرد شدن تا دمای محیط، کاربیدهای اولیه  $(Cr, Fe)_7C_3$  با یوتکتیک  $\gamma + (Cr, Fe)_7C_3$  در ریزساختار وجود خواهند داشت (بندار و همکاران، ۲۰۰۸). شکل ۲- ب ریزساختار میکروسکوپی نمونه‌ی ۶ را نشان می‌دهد در این شکل کاربیدهای اولیه با شکل هگزاگونالی (شش گوش) در زمینه‌ی یوتکتیک  $\gamma + (Cr, Fe)_7C_3$  قابل مشاهده‌اند.

جدول ۴ مقدار مجموع کاربیدهای  $(Cr, Fe)_7C_3$  و آستنیت را در ریزساختار نمونه‌های گوناگون نشان می‌دهد، همان‌گونه که مشخص است، ریزساختار تمامی نمونه‌ها شامل کاربید و آستنیت است، نتایج داده‌های این جدول نشان می‌دهد که با افزایش کربن و کروم موجود در لایه‌های سخت، مقدار کاربیدهای  $(Cr, Fe)_7C_3$  افزایش و مقدار آستنیت کاهش می‌یابد. تغییر در مقادیر کاربیدها و آستنیت موجود در ریزساختار نمونه‌ها ناشی از تغییر ترکیب شیمیایی می‌باشد (آتامرت و بهادشیا، ۱۹۹۰). روی هم رفته، با افزایش کربن و کروم محتوی مذاب اکتیویته این عناصر افزایش و انرژی آزاد گیبس برای تشکیل کاربیدها  $[(Cr, Fe)_7C_3]$  به سمت مقدار منفی افزایش می‌یابد؛ لذا، تمایل به تشکیل کاربیدهای  $(Cr, Fe)_7C_3$  افزایش می‌یابد.

#### ب- سختی و مقاومت به سایش

جدول ۴ سختی سطح نمونه‌ها را نیز نشان می‌دهد، همان‌گونه که مشخص است، با تغییر درصد حجمی آستنیت و کاربیدها، سختی سطح نمونه‌ها تغییر می‌کند، نتایج این جدول نشان می‌دهند که با افزایش درصد حجمی کاربیدها  $[(Cr, Fe)_7C_3]$  سختی سطح افزایش می‌یابد به گونه‌ای که بیش‌ترین سختی (۸۰۹ HV) مربوط به نمونه‌ی ۶ با ترکیب شیمیایی  $C = 0.2/4$  و  $Cr = 22/24$  و ریزساختار ۸۶٪ کاربید و ۱۴٪ آستنیت می‌باشد.

شکل ۳ نتایج آزمون سایش نمونه‌های گوناگون را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، اندازه‌ی سایش (در مسافت ۴۳۰۰ متر) نمونه‌های هیپویوتکتیکی (نمونه‌های ۱ تا ۴) کم‌تر از نمونه‌ی یوتکتیکی (نمونه‌ی ۵) و هایپریوتکتیکی (نمونه‌ی ۶) می‌باشد، هم‌چنین، مقاومت

سختی سطح لایه‌ها در نظر گرفته شد. هم‌چنین آزمون سایش به روش ASTM G65 (ماسه‌ی خشک و چرخ لاستیکی) با نیروی ۱۳۰ نیوتن انجام شد و در انتها سطوح ساییده شده با میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد بررسی قرار گرفتند.

#### نتایج و بحث

##### الف- ترکیب شیمیایی و ریزساختار

جدول ۳ ترکیب شیمیایی لایه‌های سخت نمونه‌های گوناگون را نشان می‌دهد، همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تمامی نمونه‌ها دارای نسبت  $\frac{Cr}{C} \cong 6$  هستند، ولی مقدار کربن و کروم محتوی آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. هم‌چنین، نمونه‌های ۱ تا ۴ دارای ترکیب هیپویوتکتیکی و نمونه‌ی ۵ و ۶ به ترتیب دارای ترکیب یوتکتیکی و هایپریوتکتیکی می‌باشند. جهت تعیین فازها نمونه‌های ۱ (ترکیب هیپویوتکتیکی با کربن و کروم کمینه) و ۶ (ترکیب هایپریوتکتیکی با کربن و کروم بیشینه) انتخاب و مورد آزمون XRD قرار گرفتند.

الگوی پراش پرتو X از سطح نمونه‌ی ۱ با  $C = 0.43/1$  و  $Cr = 93/8$  و  $\frac{Cr}{C} = 6/2$  در شکل ۱- الف ارائه شده است. در این الگو، پیک‌های آستنیت و کاربیدهای  $(Cr, Fe)_7C_3$  به خوبی مشاهده می‌شود. بررسی ساز و کار انجماد آلیاژ یاد شده مشخص می‌کند در زیر دمای یوتکتیک، آستنیت اولیه به همراه ساختار یوتکتیک  $\gamma + (Cr, Fe)_7C_3$  وجود خواهد داشت که با سرد شدن تا دمای محیط این فازها پایدار خواهند ماند [۱۰] (بندار و همکاران، ۲۰۰۸). شکل ۲- الف ریزساختار میکروسکوپی نمونه‌ی ۱ را نشان می‌دهد که ساختار هیپویوتکتیکی حاوی دندریت‌های آستنیت اولیه و یوتکتیک  $\gamma + (Cr, Fe)_7C_3$  در این تصویر به خوبی قابل مشاهده‌اند.

الگوی پراش پرتو X از سطح نمونه‌ی ۶ با  $C = 0.2/4$  و  $Cr = 22/24$  و  $\frac{Cr}{C} = 6/0$  در شکل ۱- ب ارائه شده است. در این الگو، پیک‌های آستنیت و کاربیدهای  $(Cr, Fe)_7C_3$  مشاهده می‌گردد. بررسی ساز و کار انجماد آلیاژ یاد شده مشخص می‌کند که پس از انجماد و

این نمونه دارای خطوط عمیقی بوده و هیچ‌گونه کندگی یا ترک در سطح مشاهده نمی‌شود. لذا، می‌توان ساز و کار سایش نمونه ۱ را از نوع شخم زنی (micro ploughing) در نظر گرفت. شکل ۵- ب تصویر SEM از سطح سایش نمونه ۴ با ترکیب  $Cr = 11.62\%$  و  $C = 2.97\%$  (هیپوئوتکتیکی، نزدیک یوتکتیک) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، سطح ساییده شده‌ی این نمونه دارای خطوط نیمه عمیق به همراه کندگی‌هایی در سطح می‌باشد و هیچ‌گونه ترک در سطح این نمونه مشاهده نمی‌شود؛ لذا، می‌توان ساز و کار سایش نمونه ۴ (نزدیک یوتکتیک) را از نوع شخم زنی به همراه کندگی (micro mirco cutting + ploughing) در نظر گرفت.

شکل ۵- پ تصویر SEM از سطح سایش نمونه ۵ با ترکیب  $Cr = 21.32\%$  و  $C = 3.52\%$  (یوتکتیکی) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سطح ساییده شده‌ی این نمونه دارای کندگی‌هایی به همراه ترک‌های بسیار ریز است و خطوط سایش عمیقی در سطح مشاهده نمی‌شود لذا، ساز و کار سایش نمونه ۵ (یوتکتیکی) از نوع کندگی به همراه ترک (micro cutting + micro cracking) می‌باشد.

شکل ۶- الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۶ با ترکیب  $Cr = 24.22\%$  و  $C = 4.02\%$  (هایپروئوتکتیکی) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، سطح ساییده شده‌ی این نمونه دارای ترک‌های ریز و درشت در سطح می‌باشد و خطوط سایش (عمیق) و کندگی مشاهده نمی‌شود. شکل ۸ تصویر SEM سطح مقطع نمونه ۶ را پس از سایش نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، ترک به صورت عمود بر سطح سایش به سمت فلز پایه رشد کرده است لذا، ساز و کار سایش نمونه ۶ (هایپروئوتکتیکی) از نوع ترک خوردن (micro cracking) می‌باشد.

از سوی دیگر، بررسی سطح سایش نمونه ۶ (شکل ۶- پ) در مسافت ۱۰۰۰ متر مشخص می‌کند که در سطح این نمونه ترکی مشاهده نمی‌گردد؛ لذا، سایش کم‌تر این نمونه در مسافت‌های کم (۱۰۰۰ متر) ناشی از عدم تشکیل ترک در سطح می‌باشد. به بیان دیگر، در

به سایش نمونه‌ی یوتکتیکی (نمونه ۵) بیش‌تر از نمونه‌ی هایپروئوتکتیکی (نمونه ۶) می‌باشد و در مجموع بالاترین مقاومت به سایش مربوط به نمونه‌ی هیپوئوتکتیکی نزدیک یوتکتیک (نمونه ۴) می‌باشد.

مقایسه‌ی نتایج آزمون سایش با سختی نمونه‌ها مشخص می‌کند که در سیستم آلیاژی Fe-Cr-C، با افزایش سختی در نمونه‌های هیپوئوتکتیکی، مقاومت به سایش افزایش می‌یابد؛ لذا، بالاترین مقاومت به سایش مربوط به نمونه‌ی هیپوئوتکتیکی نزدیک یوتکتیک (نمونه ۴) است، ولی با افزایش سختی در نمونه‌های یوتکتیکی و هایپروئوتکتیکی (با وجود سختی بالاتر)، مقاومت به سایش کاهش می‌یابد.

جدول ۵ نتایج سختی سطوح ساییده شده‌ی نمونه‌های هیپوئوتکتیکی (۱ تا ۴) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سختی سطح این نمونه‌ها پس از سایش افزایش یافته است. شکل ۴ تصویر میکروسکوپی سطح مقطع نمونه ۴ را پس از آزمون سایش نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در سطح این نمونه فاز مارتنزیت تشکیل شده است، لذا افزایش سختی در سطح نمونه‌های هیپوئوتکتیکی ناشی از تغییر شکل آستنیت به مارتنزیت، در اثر تنش‌های اعمالی در هنگام سایش می‌باشد. این موضوع مشخص می‌کند که علت بالاتر بودن مقاومت به سایش نمونه‌های هیپوئوتکتیکی نسبت به نمونه‌های یوتکتیکی و هایپروئوتکتیکی تغییر فرم آستنیت به مارتنزیت در هنگام سایش بوده است. علت بالاتر بودن مقاومت به سایش نمونه ۴ (هیپوئوتکتیکی نزدیک یوتکتیک) نسبت به سایر نمونه‌های هیپوئوتکتیکی (۱ و ۲ و ۳) ناشی از بالاتر بودن درصد حجمی کاربیدهای  $(Cr, Fe)_7C_3$  می‌باشد (زوملزو و همکاران، ۲۰۰۲).

افزون بر این، بررسی شکل ۳ نشان می‌دهد که میزان سایش نمونه‌های ۵ و ۶ در مراحل نخستین سایش (۱۰۰۰ متر) کم‌تر از نمونه‌های ۳ و ۴ است. علت این موضوع با ساز و کار سایش مرتبط می‌باشد. شکل ۵- الف تصویر SEM از سطح سایش نمونه ۱ با ترکیب  $Cr = 8.93\%$  و  $C = 1.43\%$  (هیپوئوتکتیکی) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، سطح ساییده شده‌ی

- Chromium Cast Irons. Tribology International. 39:206-212. 2006.
- 2- S. Buytoz., M. Ulutan., and M. M. Yildirim., Dry Sliding Wear Behavior of TIG Welding Clad Composite Coatings. Applied Surface Science. 252:1313-1323. 2005.
- 3- M. F. Buchely., J. C. Gutierrez., L. M. Leon., and A. Toro., The Effect of Microstructure on Abrasive Wear of Hardfacing Alloys. Wear. 259:52-61. 2005.
- 4- C. Fan., M. Chen., C. M. Chang., and W. Wu., Microstructure Change Caused by  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  Carbides in High Chromium Fe-Cr-C Hardfacing Alloys. Surface and Coating Technology. 21:908-912. 2006.
- 5- D. K. Dwivedi., Microstructure and Abrasive Wear Behavior of Iron Base Hardfacing. Materials Science and Technology. 10:10-20. 2004.
- 6- M. Kirchgabner., E. Badisch., and F. Franek., Behavior of Iron-Based Hard-facing Alloys under Abrasion and Impact. Wear. 265:772-779. 2008.
- 7- J. Liu., L. Wang., and J. Huang., PTA Clad  $(Cr, Fe)_7C_3 / \gamma$ -Fe In Situ Ceramal Composite Coating. Journal of University of Science and Technology Beijing. 13.6: 538-541. 2006.
- 8- S. Atamert., and H. K. D. H. Bhadeshia., Microstructure and Stability of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys. Materials Science and Engineering. A130:101-111. 1990.
- 9- E. Zumelzu., I. Goyos., C. Cabezas., O. Poitz., and A. Parada., Wear and Corrosion Behaviour of High Chromium (14-30%Cr) Cast Iron Alloys. Materials Processing Technology. 128: 250-255. 2002.
- 10- A. Bondar., V. Ivanchento., A. Kozbv., and J. C. Todenac., Carbon-Iron Ternary Alloy Systems, Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data. MSIT. Group IV. Vol 11. Springer. Verlag Berlin Heidelberg. 1:56. 2008.

مسافت‌های بالاتر، به علت ایجاد تنش‌های پسماند، ترک در سطح تشکیل و باعث افزایش میزان سایش نمونه‌های ۵ و ۶ شده است.

### نتیجه‌گیری

- ۱- ریز ساختار تمامی لایه‌های سخت، حاوی آستنیت و کاربیدهای کروم  $(Cr, Fe)_7C_3$  بوده، ولی با ترکیب شیمیایی و نوع انجماد (هیپوتکتیکی / یوتکتیکی / هایپریوتکتیکی) متفاوت.
- ۲- با افزایش کربن و کروم محتوی لایه‌های سخت، درصد حجمی کاربیدهای  $(Cr, Fe)_7C_3$  افزایش، مقدار آستنیت در ریزساختار کاهش و سختی سطح نمونه‌ها افزایش می‌یابد.
- ۳- نتایج آزمون سایش مشخص می‌کنند که مقاومت به سایش نمونه‌هایی با ترکیب شیمیایی هیپویوتکتیکی با افزایش مقدار کربن و کروم افزایش می‌یابند. در ضمن بالاترین مقاومت به سایش مربوط به نمونه‌ی نزدیک یوتکتیک (نمونه‌ی ۴، با ترکیب هیپویوتکتیکی) می‌باشد.
- ۴- مقاومت به سایش نمونه‌های یوتکتیکی و هایپریوتکتیکی کم‌تر از آلیاژهای هیپویوتکتیکی است.
- ۵- ساز و کار سایش در نمونه‌های هیپویوتکتیکی با کربن کم و کروم کم شخم زدن و نمونه‌های هیپویوتکتیکی با کربن و کروم بالا شخم‌زدن به همراه کندگی می‌باشد.
- ۶- ساز و کار سایش نمونه‌ی یوتکتیکی کندگی به همراه ترک و نمونه‌ی هایپریوتکتیکی ترک خوردن می‌باشد.

### منابع

- 1 G.-Sapate, and A. B. Ramarao., Erosive Wear Behavior of Weld Hardfacing High

## پیوست‌ها

جدول ۱- نسبت وزنی مخلوط پودرها.

| شماره‌ی نمونه‌ها | ۱ | ۲   | ۳   | ۴   | ۵   | ۶ |
|------------------|---|-----|-----|-----|-----|---|
| فروکروم          | ۷ | ۷/۲ | ۷/۴ | ۷/۶ | ۷/۸ | ۸ |
| گرافیت کریستاله  |   |     |     |     |     |   |

جدول ۲- فراسنج‌های جوشکاری سطحی به روش GTAW (TIG).

| ۶۰         | زاویه‌ی راس الکتروود (درجه) | GTAW اتوماتیک | فرآیند                |
|------------|-----------------------------|---------------|-----------------------|
| آرگون خالص | گاز محافظ                   | DCEN          | قطبیت                 |
| ۸          | دبی گاز (Lit/min)           | ۱۰۰           | شدت جریان (A)         |
| ۸          | تعداد لایه‌های جوشکاری شده  | ۱۴            | ولتاژ (V)             |
| ۲۰         | درصد همپوشانی لایه‌ها       | ۳             | طول قوس (mm)          |
| ۲          | تعداد پاس‌ها روی هر لایه    | ۱۰            | سرعت جوشکاری (Cm/min) |
| ۰/۵        | حرارت ورودی هر لایه (Kj/mm) | EWTh-2        | نوع الکتروود          |

جدول ۳- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) لایه‌های سخت.

| نوع انجماد     | ترکیب شیمیایی |           |       |       |       |      |      | کد نمونه |   |
|----------------|---------------|-----------|-------|-------|-------|------|------|----------|---|
|                | Cr/C          | Fe        | Cr    | S     | P     | Mn   | Si   |          | C |
| هیپویوتکتیکی   | ۶/۲           | باقیمانده | ۸/۹۳  | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۲ | ۰/۱۳ | ۰/۱۱ | ۱/۴۳     | ۱ |
| هیپویوتکتیکی   | ۶/۳           | باقیمانده | ۱۲/۲۲ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۲ | ۰/۱۴ | ۰/۱۳ | ۱/۹۴     | ۲ |
| هیپویوتکتیکی   | ۶/۲           | باقیمانده | ۱۵/۳۲ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۲ | ۰/۱۴ | ۰/۱۲ | ۲/۴۵     | ۳ |
| هیپویوتکتیکی   | ۶/۲           | باقیمانده | ۱۸/۶۲ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۲ | ۰/۱۳ | ۰/۱۱ | ۲/۹۷     | ۴ |
| یوتکتیکی       | ۶/۱           | باقیمانده | ۲۱/۳۲ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۲ | ۰/۱۲ | ۰/۱۳ | ۳/۵۲     | ۵ |
| هایپر یوتکتیکی | ۶/۰           | باقیمانده | ۲۴/۲۲ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۲ | ۰/۱۳ | ۰/۱۲ | ۴/۰۲     | ۶ |

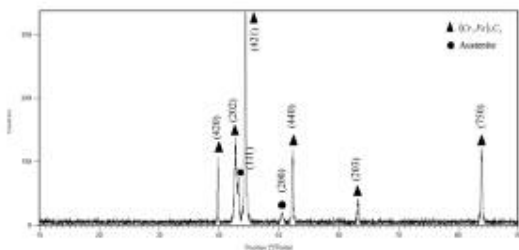
جدول ۴- ارتباط بین ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) و اندازه‌ی مجموع کاربیدهای  $(Cr, Fe)_7C_3$  - آستنیت نمونه‌ها و

## سختی سطح.

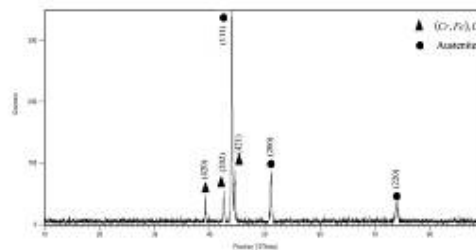
| شماره‌ی نمونه | ترکیب شیمیایی |       | ریزساختار (درصد) |                 |                 |              | نوع انجماد | آستنیت اولیه  | آستنیت یوتکتیکی | سختی سطح (HV) |
|---------------|---------------|-------|------------------|-----------------|-----------------|--------------|------------|---------------|-----------------|---------------|
|               | Cr            | C     | کل کاربید        | کل کاربید اولیه | کاربید یوتکتیکی | کاربید اولیه |            |               |                 |               |
| ۱             | ۱/۴۲          | ۸/۹۳  | ۲۷               | ۲۷              | ۷۳              | ۱۰           | ۶۳         | هیپویوتکتیک   | ۶۳              | ۵۰۷           |
| ۲             | ۱/۹۴          | ۱۲/۲۲ | ۴۱               | ۴۱              | ۵۹              | ۱۳           | ۴۶         | هیپویوتکتیک   | ۴۶              | ۵۸۵           |
| ۳             | ۲/۴۶          | ۱۵/۳۲ | ۵۳               | ۵۳              | ۴۷              | ۱۷           | ۳۰         | هیپویوتکتیک   | ۳۰              | ۶۴۲           |
| ۴             | ۲/۹۷          | ۱۸/۶۲ | ۶۴               | ۶۴              | ۳۶              | ۲۰           | ۱۶         | هیپویوتکتیک   | ۱۶              | ۷۰۱           |
| ۵             | ۳/۵۲          | ۲۱/۳۲ | ۷۶               | ۷۶              | ۲۴              | ۲۴           | -          | یوتکتیک       | -               | ۷۴۵           |
| ۶             | ۴/۰۲          | ۲۴/۲۲ | ۴۸               | ۸۶              | ۱۴              | ۱۴           | -          | هایپر یوتکتیک | -               | ۸۰۹           |

جدول ۵- نتایج سختی سطوح سائیده شده‌ی نمونه‌های هیپو یوتکتیکی.

| نمونه | ترکیب شیمیایی |      | سختی |
|-------|---------------|------|------|
|       | Cr            | C    |      |
| ۱     | ۸/۹۳          | ۱/۴۲ | ۷۶۲  |
| ۲     | ۱۲/۲۲         | ۱/۹۴ | ۷۸۷  |
| ۳     | ۱۵/۳۲         | ۲/۴۶ | ۸۱۴  |
| ۴     | ۱۸/۶۲         | ۲/۱۷ | ۸۳۵  |

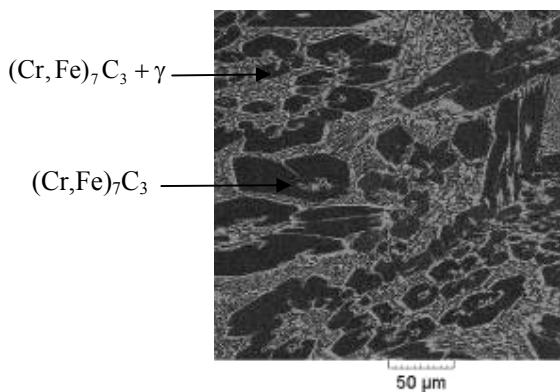


ب

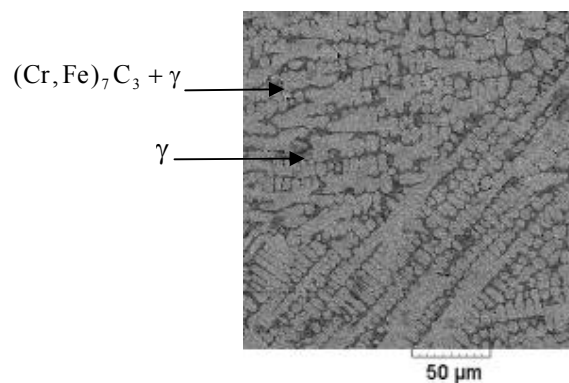


الف

شکل ۱- الگوی پراش پرتو X از سطح: الف- نمونه ۱؛ ب- نمونه ۶.

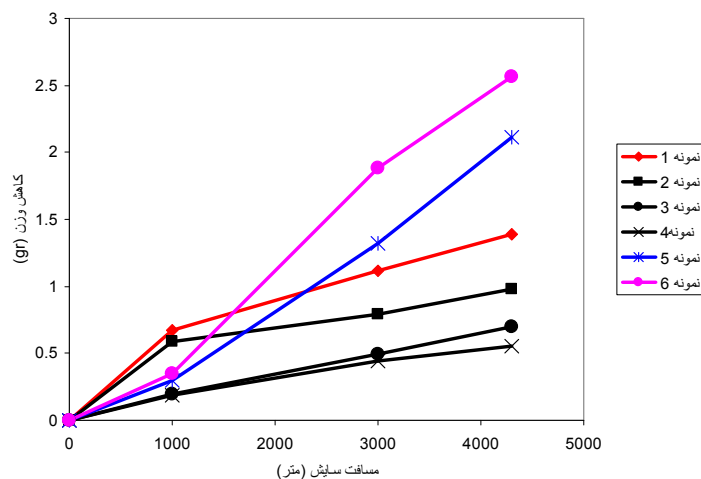


ب- نمونه ۶

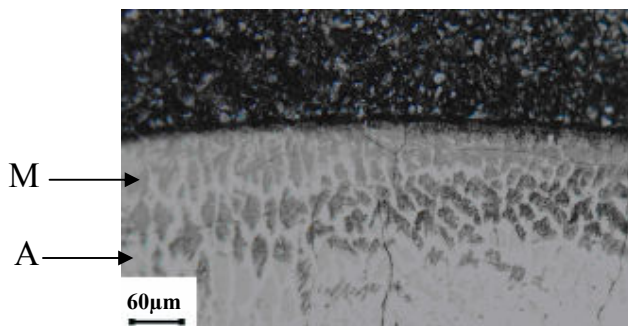


الف- نمونه ۱

شکل ۲- تصویر SEM نمونه های او ۶.

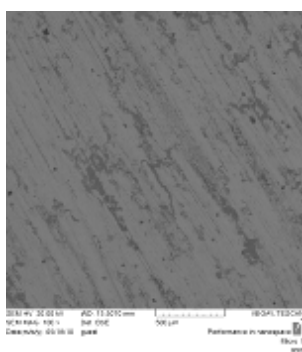


شکل ۳- منحنی سایش نمونه‌های گوناگون.

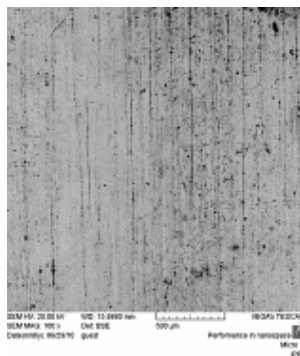


شکل ۴- تصویر متالوگرافی نوری از سطح مقطع نمونه ۴ پس از سایش.

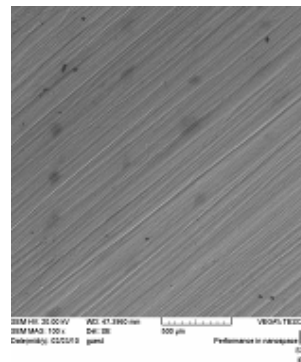
M=مارتنزیت A=آستنیت



پ



ب

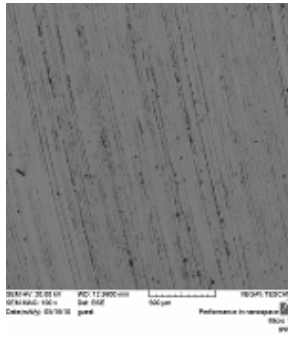


الف

شکل ۵- تصویر SEM از سطح سایش.

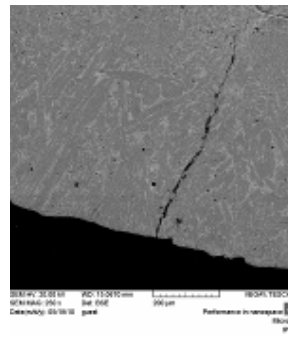
الف- نمونه ۱ (Cr=۰.۸/۹۳ و C=۰.۱/۴۳)    ب- نمونه ۴ (Cr=۰.۱۸/۶۲ و C=۰.۲/۹۷)    پ- نمونه ۵ (Cr=۰.۲۱/۳۲ و C=۰.۳/۵۲)





پ

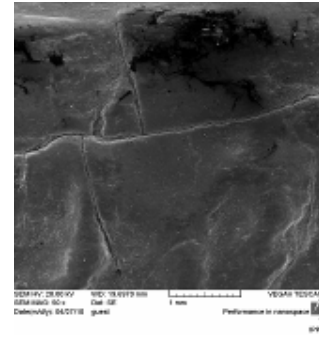
پ- سطح سایش در مسافت ۱۰۰۰ متر



ب

شکل ۶- تصویر SEM نمونه‌ی ۶.

ب- مقطع نمونه پس از سایش



الف

الف- سطح سایش

