

## بررسی ریز ساختار و رفتار مکانیکی روکش‌های $Al-Cr/Al_2O_3$ تولید شده توسط فرآیند GTAW

مهدی رفیعی<sup>۱\*</sup>، حسین مستعان<sup>۲</sup>، سپهر اعتمادی<sup>۳</sup>

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

۲ استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

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



تاریخ دریافت:

۹۷/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش:

۹۸/۰۴/۰۲

مقاله

در این پژوهش، با استفاده از جوشکاری قوسی تنگستن-گاز، فرآیند روکش کاری با افزودن محصولات واکنش حاصل از آسیاب کاری پودرهای  $Cr-Al$  و  $Al-Cr_2O_3$  روی سطح فولاد CK45 انجام شد. پس از تولید روکش‌های سطحی  $AlCr_2$  و  $Al_2O_3-AlCr_2$  ارزیابی‌های ریزساختاری و ریزسختی روکش‌ها توسط میکروسکوپ‌های نوری، الکترونی روبشی و دستگاه ریزسختی سنج انجام گرفت. به منظور بررسی مقاومت سایشی روکش‌ها از دستگاه سایش پین روی دیسک استفاده شد. نتایج نشان داد محصول واکنش حاصل از ۲۰ ساعت آسیاب کاری مخلوط پودری  $Al-Cr$ ، محلول جامد  $Cr(Al)$  بود. بررسی آزمون تفرق اشعه ایکس از نمونه روکش کاری شده با پودر  $Al-Cr$ ، حاکی از تشکیل ترکیب بین فلزی  $AlCr_2$  در ساختار روکش ایجاد شده نیز بود. همچنین روکش کاری مخلوط پودری  $Al-Cr_2O_3$  منجر به ایجاد فازهای  $Al_2O_3$  و  $AlCr_2$  گردید. ریزسختی هر دو روکش ایجاد شده نسبت به فلز پایه افزایش نشان داد. ریزسختی در نمونه روکش کاری شده  $Al_2O_3-AlCr_2$  به حدود ۷۸۰ ویکرز رسید. مکانیزم غالب سایش در آزمون سایش کلیه نمونه‌ها، مکانیزم سایش خراشان برش‌ریز تشخیص داده شد. آزمون سایش برای نمونه جوشکاری شده با پودر  $AlCr_2$  کاهش وزنی در حدود ۰/۲ میلی گرم را نشان داد، درحالی‌که در روکش  $AlCr_2-Al_2O_3$  کاهش وزنی مشاهده نشد. ضریب اصطکاک نمونه روکش  $AlCr_2-Al_2O_3$  تا حدود مسافت ۲۰۰ متر، تقریباً ۰/۱۵ بود و از این مسافت به بعد به عدد ۰/۳۵ رسید. این افزایش در ضریب اصطکاک با توجه به ثابت بودن دیگر پارامترها نسبت به نمونه  $AlCr_2$ ، می‌تواند به درگیر شدن بیشتر ذرات  $Al_2O_3$  با نزدیک شدن به لایه‌های پایین‌تر روکش ربط داده شود.

فولاد ساده کربنی CK45، GTAW، رفتار سایشی، روکش کاری

واژگان کلیدی

## Evaluation of microstructure and mechanical properties of Al-Cr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> claddings produced by GTAW process

M. Rafiei<sup>1\*</sup>, H. Mostaan<sup>2</sup>, S. Etemadi<sup>3</sup>

1. Assitant Professor, Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2. Assitant Professor, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

3. MSc, Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

### Abstract

In this research, the cladding process was done using the mechanically alloyed Al-Cr and Al-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder mixtures by GTAW process on the surface of CK45 steel. After creating the AlCr<sub>2</sub> and AlCr<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> surface layers, the microstructural and microhardness of the claddings were studied by optical microscopy, scanning electron microscopy and microhardness measurements. In order to evaluate the wear resistance of the claddings, pin-on-disk wear test was done. It was found that after 20 h of MA of Al-Cr powder mixture, Cr(Al) solid solution was formed. XRD analysis of created cladding by this powder mixture indicated the formation of AlCr<sub>2</sub> phase. Also the cladding of Al-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder mixture led to the formation of AlCr<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phases. The microhardness of both claddings was higher than the base metal. Also the microhardness of AlCr<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cladding reached to about 780 HV. The predominant wear mechanism in wear test of both claddings was micro-cutting abrasive wear. The wear weight loss of AlCr<sub>2</sub> cladding was about 0.2 mg, while AlCr<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cladding did not show any weight loss. The friction coefficient of AlCr<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cladding after 200 m of sliding distance was about 0.15 which reached to about 0.35 at longer sliding distances. This increase in friction coefficient of this cladding as compared with AlCr<sub>2</sub> cladding was related to the presence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hard particles in this cladding.

### Keywords

CK45 steel, GTAW, Wear behavior, Cladding

## ۱- مقدمه

فولادهای کربنی کاربردهای فراوانی در ساخت قطعات دارند، زیرا خواص مکانیکی و قابلیت ماشین کاری مناسبی از خود نشان می‌دهند. از مهمترین مشکلات این دسته از فولادها مقاومت کم آن‌ها در برابر سایش و خوردگی است. برای این منظور، فولادهای ساده کربنی اغلب تحت عملیات سطحی قرار می‌گیرند [۲۰۱]. سخت کردن سطحی یکی از روش‌های اصلاح سطح است که برای بهبود خواص سطح، بدون تغییر در خواص زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. سخت کاری، روشی برای محافظت از ابزارهای فلزی یا قطعات مهم به منظور جلوگیری از فرسایش و سایش است. برای این منظور، توسط روش‌های جوشکاری، یک لایه نازک از ماده‌ای سخت و مقاوم به سایش، به سطح قطعه کار (فلز ضعیف) اضافه می‌شود. روکش کاری از روش‌های متداول برای دستیابی به خواص ترکیبی تعدادی از مواد در یک مجموعه به شمار می‌رود. در این روش، با ایجاد لایه‌ای سخت و مقاوم به سایش در سطح قطعه، عمر کاری قطعه افزایش می‌یابد. از این فرایند به عنوان مثال در میله کمپرسورها، شیرهای بخار، تجهیزات ترکیب کردن، پیچ‌های سانتریفیوژ، تجهیزات آب‌بندی، تیغه‌های فن، قالب‌ها و تجهیزات معدنی استفاده می‌شود [۳-۵]. در بحث سخت کاری سطحی، رقت نیز مطرح است، به طوری که در فرایند سخت کردن سطحی مقدار رقت باید تا حد ممکن کم باشد تا با تعداد لایه‌های کمتری بتوان به سختی مورد نظر دست یافت. عملیات جوشکاری به علت صرفه اقتصادی و ایجاد لایه‌های ضخیم و مقاوم، نسبت به عملیات حرارتی و آبکاری ارجحیت دارد. یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر برای ایجاد لایه‌های سطحی مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از روش جوشکاری GTAW است. البته لایه‌های ایجاد شده در این فرایند دارای ضخامت حدود دو برابر ضخامت لایه ایجاد شده توسط پرتو الکترونی و لیزر می‌باشند. روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز برای روکش کاری مورد استفاده قرار گرفته است که پوشش به دست آمده با این روش دارای استحکام و چسبندگی خوب به سطح نسبت به روش‌های دیگر است [۷۶]. نامکونگ و همکارانش ضمن انجام پژوهشی در مورد تاثیر عنصر کروم بر آلیاژ دوتایی پایه Fe-Al پیشنهاد کردند که عنصر کروم به عنوان دریافت کننده اکسیژن در مرحله اولیه اکسیداسیون عمل خواهد کرد، به گونه‌ای که نفوذ اکسیژن درون آلیاژ را محدود می‌کند و اکسیداسیون داخلی عنصر کربن به حداقل کاهش پیدا کرده و لذا این موضوع اجازه می‌دهد که اکسیداسیون داخلی به اکسیداسیون خارجی و مقدار بحرانی کمتر از کربن موجود در آلیاژ تغییر یابد [۸]. در پژوهشی که توسط سانگ و همکارانش صورت گرفت آنها پوشش‌هایی روی بسترهای فولادی با مقدار کربن متوسط با تکنولوژی روکش کاری لیزری ایجاد کردند. نوع پوششی که آنها در این تحقیق به عنوان ماده روکش استفاده کردند پودر آلیاژی خود گدازآور پایه آهن بود. آن‌ها مشاهده کردند که خواص مکانیکی لایه ترمیم شده به شدت

در مقایسه با بستر افزایش می‌یابد. آنها همچنین گزارش کردند که حساسیت به ایجاد ترک در لایه روکش کاری شده به شدت وابسته به شیب شیار V شکل بوده و شیار V شکل با شیب بیشتر می‌تواند بدون وجود ترک‌ها و حفرات ترمیم گردد [۹]. ژانگ و همکارانش با افزودن عنصر کروم با استفاده از روش لیزر به آلیاژ Al-Fe، دو رویداد را گزارش کردند. اول آنکه غلظت آلومینیوم در سطح افزایش یافته است، یعنی از غلظت آلومینیوم درون حجم قطعه کاسته شده و به سطح افزوده شده است و دوم آنکه افزودن کروم باعث کاهش غلظت بحرانی مورد نیاز برای تشکیل لایه  $\alpha-Al_2O_3$  شده است. یعنی با مقدار کمتری از عنصر آلومینیوم لایه  $\alpha-Al_2O_3$  تشکیل شده، که این موضوع باعث کاهش اثرات منفی افزودن آلومینیوم به آلیاژ خواهد شد [۱۰]. هاو و ژاو در تحقیقاتی که با روش لیزر انجام شد، تاثیر افزودن عنصر کروم به آلیاژ پایه Al-Fe را بررسی نمودند و نشان دادند که با افزودن کروم تا مقادیر بالاتر از ۵ درصد وزنی، این عنصر جانشین آهن در آلیاژ Al-Fe شده و نیروی محرکه نفوذ آلومینیوم از حجم قطعه به سطح افزایش پیدا می‌کند. همچنین مقاومت به خوردگی در آلیاژ سه‌تایی Fe-Cr-Al نسبت به آلیاژ دوتایی Al-Fe بهبود پیدا کرد [۱۱]. بویتوز و همکارانش مشخص نمودند که درصد اتمی کروم در کاربیدهای اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  موجود در سطح آلیاژ هایپرپونکتیکی Fe-Cr-Al تابعی از مقدار کروم آلیاژ بوده و با افزایش آن، کاربیدهای نوع  $M_7C_3$  افزایش می‌یابند. علاوه بر این، آنها مشخص نمودند که غلظت عناصر کروم و آهن در مقطع عرضی لایه روکش سخت یکسان نبوده و در مناطق مختلف، متفاوت می‌باشد [۱۲]. ثابت و همکارانش به بررسی تشکیل ترک در آلیاژ روکش سخت پایه C-Cr-Fe با روش جوشکاری TIG روی فولاد ساده کربنی پرداختند. آنها گزارش دادند که در آلیاژ روکش سخت پایه C-Cr-Fe به علت سختی بالا و تفاوت در ضریب انبساط حرارتی آلیاژ روکش سخت و فلز پایه، عملیات روکش کاری با تشکیل ترک‌های سطحی همراه است که باعث کاهش عمر مفید لایه‌های روکش سخت در شرایط سایش خراشان می‌شود. برای رفع این مشکل کاهش رقت فلز پایه و پیش گرم کردن توصیه شد [۱۳]. پوجار و همکارانش با موفقیت پوشش کامپوزیتی  $Ni-Cr/Al_2O_3$  با درصد‌های مختلف  $Al_2O_3$  را توسط فرایند لیزر تولید کردند که هیچ ترک و خلل و فرجی در این پوشش‌ها گزارش نشد. آنها نشان دادند که این پوشش‌ها توسط پیوند متالورژیکی به صورت پایدار و محکم به بستر می‌چسبند. همچنین گزارش شد که ذوب مجدد با لیزر می‌تواند پوشش را اصلاح کند و خواص مکانیکی آن را بهبود بخشد [۱۴]. کاپدیولا و همکارانش با انجام پژوهشی در رابطه با جدایش فازی در آلیاژ Fe-Cr-Al نشان دادند که ضریب نفوذ آلومینیوم در فریت نسبت به کروم بیشتر است. آلومینیوم به صورت ترجیحی تمایل به جدایش فاز  $\alpha$  دارد تا فاز  $\alpha'$ . این نتیجه این امکان را ایجاد می‌کند که تردی ۴۷۵ درجه سانتی‌گراد با افزودن آلومینیوم به دلیل کاهش فاصله عدم انحلال، کاهش یابد [۱۵].



مدت ۲۰ ساعت آسیاب کاری شدند. مخلوط پودری  $Al-Cr_2O_3$  بعد از ۲۰ ساعت آسیاب کاری مورد عملیات حرارتی قرار گرفت. عملیات حرارتی در زمان ۲ ساعت و در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد صورت گرفت. پودر  $Al-Cr$  بعد از ۲۰ ساعت آسیاب کاری آماده شد و نیازی به عملیات حرارتی نداشت. سپس پودرها توسط دستگاه پرس ۶۰ تن درون شیپارهای ایجاد شده روی سطح زیر لایه پرس گردیدند.

### ۲-۳- جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW)

جهت انجام جوشکاری قوسی تنگستن-گاز از یک دستگاه جوشکاری مدل WS TIG 200S به عنوان منبع تأمین انرژی استفاده شد. متغیرهای جوشکاری به کار رفته در این تحقیق در جدول ۳ آمده است.

گاز مورد استفاده جهت محافظت از حوضچه مذاب، آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ در نظر گرفته شد. الکتروود به کار رفته از جنس تنگستن با ۲ درصد توریا و قطر ۳/۲ میلی متر بود. جریان مورد استفاده در فرایند نیز جریان مستقیم با الکتروود قطب منفی (DCEN) در نظر گرفته شد. همچنین بعد از هر مرحله از جوشکاری به اندازه کافی زمان برای خنک شدن تا دمای محیط به قطعه‌ها داده شد تا شرایط اعمالی هر پاس جوشکاری دقیقاً مانند سایر پاس‌ها باشد.

شیار نمونه‌ها توسط مواد چربی زده، تمیز کاری شد و محصولات واکنش پس از انجام آسیاب کاری و عملیات حرارتی، درون شیپارها افزوده شد. سپس، توسط دستگاه پرس ۶۰ تن، پودرها درون شیپارها پرس شدند. از هر نمونه به تعداد ۲ عدد تهیه گردید. در نهایت جوشکاری قوسی تنگستن-گاز روی نمونه‌ها در دو پاس انجام شد.

### ۲-۴- ارزیابی‌های ریزساختاری

بررسی‌های هندسی مقاطع جوش و همچنین بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل ZEISS و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 435 VP انجام شدند. بدین منظور و برای تهیه نمونه‌های مورد نیاز، مناطقی از لایه‌های نشانده شده روی نمونه‌ها جهت بررسی‌های ریز ساختاری بریده شده و سطوح مقطع مورد نظر با کاغذهای سنباده با شماره‌های ۶۰، ۱۰۰، ۲۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ صاف گردید.

جدول ۲: ترکیب شیمیایی لایه‌های پیش نشست (%wt)

نام نمونه ها	Cr	Al	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Al-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	۳۵	۶۵
Al-Cr	۸۰	۲۰	---

گالانو و همکاران با استفاده از نتایج حاصل از مشاهدات میکروسکوپ الکترونی عبوری روی نمونه‌های پیرسازی شده نشان دادند که مقدار زیادی محلول جامد آلومینیوم در فاز فریت باعث جلوگیری از تردی در دمای ۴۷۵ درجه سانتی گراد می‌شود [۱۶]. رجینا و همکارانش با انجام پژوهش‌هایی در مورد تاثیر ترکیب شیمیایی آلیاژ Al-Cr-Fe نشان دادند که در این آلیاژ اگر مقدار Al کمتر از ۱۰ درصد وزنی باشد، در این صورت می‌توان این آلیاژ را جوش پذیر (بدون ترک) در نظر گرفت، در صورتی که با افزایش مقدار Al تا بالای ۱۱ درصد وزنی آلیاژ به ترک‌های هیدروژنی حساس می‌شود [۱۷]. دوپونت و آدامز با انجام عملیات حرارتی روی جوش آلیاژ Al-Cr-Fe نشان دادند که استفاده از دمای حداقل ۳۵۰ درجه سانتی گراد به عنوان دمای عملیات حرارتی پیش گرم و انجام عملیات حرارتی پس گرم تا دمای حداقل ۷۵۰ درجه سانتی گراد می‌تواند باعث کاهش ترک خوردن روکش Al-Cr=Fe گردد [۱۸]. با توجه به مطالعات ذکر شده مشاهده می‌شود که تحقیقی در زمینه ایجاد روش‌های  $Al-Cr/Al_2O_3$  و بررسی ریزساختار و رفتار مکانیکی آن‌ها انجام نشده است. لذا در این پژوهش به بررسی ریزساختار و رفتار مکانیکی این پوشش‌ها پرداخته می‌شود.

### ۲- مواد و روش تحقیق

#### ۲-۱- مواد اولیه

در این تحقیق از زیر لایه‌هایی از جنس فولاد ساده کربنی CK45 استفاده شد. جدول ۱ ترکیب شیمیایی فلز پایه را نشان می‌دهد. ابعاد مورد استفاده زیر لایه  $10 \times 10 \times 60$  میلی متر مکعب در نظر گرفته شد. همچنین سختی فولاد ساده کربنی، ۲۱۰ ویکرز اندازه گیری گردید. قبل از انجام جوشکاری، سطح فلز پایه توسط دستگاه فرز HAKRET ۳۱۵ صاف شده و شیاری به ابعاد  $1/5 \times 10 \times 60$  میلی متر مکعب در وسط قطعه ایجاد گردید. سپس توسط الکل، چربی زدایی سطح نمونه و داخل شیپارها انجام گرفت.

#### ۲-۲- پودرهای مصرفی جهت آلیاژ سازی

جهت ایجاد لایه روکش از پودرهای آلومینیوم، کروم و اکسید کروم با خلوص بالای ۹۹٪ و اندازه ذرات زیر ۱۰۰ میکرون استفاده شد. این پودرها در دو ترکیب ارائه شده در جدول ۲ با یکدیگر مخلوط و به

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد CK45

عناصر	Fe	C	Si	Mn	Cr	S	Al
درصد وزنی	۰/۱۴۳	۰/۱۲۸	۰/۰۰۱	۰/۵۲۸	۰/۰۰۱	۰/۱۲۸	۰/۰۱۴۳

جدول ۳: متغیرهای جوشکاری مورد استفاده در آلیاژسازی سطحی

نمونه	ولتاژ (V)	سرعت پیش روی (mm/min)	زاویه مشعل با سطح افق (درجه)	دبی گاز محافظ (l/min)	شدت جریان (A)
Al-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۵	۳۰	۷۵	۱۴	۲۰۰
Cr-Al	۱۵	۳۰	۷۵	۱۴	۱۸۵

نمونه‌ها سپس با محلول آلومینای ۰/۳ میکرون روی نمد پولیش شد و سپس توسط محلول‌های اچ مطابق جدول ۴، اچ شدند.

### ۲-۵- آزمون تفرق اشعه ایکس

به منظور شناسایی فازهای ایجاد شده در لایه‌های آلیاژی و ساختمان‌های بلوری ایجاد شده در سطح نمونه‌ها، از یک دستگاه پراش سنج پرتو ایکس از نوع Philips pw 3040 مجهز به لامپ تولید کننده پرتو  $Cu-K\alpha$  و نرم افزار X Pert High Score استفاده شد. در این آزمون جهت رویش نمونه، از زاویه ۱۰ تا ۱۰۰ درجه با اندازه پله‌های ۰/۵ درجه استفاده شد. زمان توقف ۷ ثانیه برای هر بازه در نظر گرفته شد.

### ۲-۶- بررسی رفتار مکانیکی

در این مطالعه، جهت تعیین ریزسختی نمونه‌های جوشکاری شده و تعیین سختی فازها در لایه‌های روکش کاری شده، از دستگاه ریزسختی مدل MHI با بار اعمالی ۲۰۰ گرم و زمان توقف ۱۰ ثانیه استفاده شد. همچنین برای انجام آزمون سایش از دستگاه سایش پین روی دیسک استفاده شد. آزمون مذکور در دمای محیط انجام پذیرفت. پین‌های مورد نیاز آزمون سایش از مرکز منطقه روکش شده کلیه نمونه‌ها ساخته شدند. همچنین فیکسچری برای نگهداری پین و بستن آنها روی گیره دستگاه سایش، طراحی و ساخته شد. پین‌های تهیه شده از قسمت روکش شده نمونه‌ها و زیر لایه با قطر ۴ و طول ۸ میلی‌متر توسط فرایند وایرکات تهیه شدند. سپس سطح پین‌ها توسط سمباده‌های ۲۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ صیقلی شد. قبل از انجام آزمون سایش، برای تعیین بار بحرانی، از پین نمونه روکش شده با  $Al-Cr$  استفاده شد. جنس

دیسک مورد استفاده در آزمون سایش از آلیاژ فسفر برنز C94300 انتخاب گردید. دلیل انتخاب این نوع دیسک کاربرد آن در بوش‌های سرعت بالا تحت فشارهای کم تا متوسط و ضریب اصطکاک کم و مقاومت به سایش آن می‌باشد. دیسک‌های مورد نظر به ضخامت ۵ میلی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر انتخاب شدند که توسط سنباده‌های ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ سطح آن‌ها سنباده زده شد و سپس روی نمد پولیش گردید. سرعت چرخش پین روی دیسک ۱۲۰ دور بر دقیقه و نیروی عمودی ۲۰ نیوتن با مسافت لغزش ۵۰۰ متر برای انجام آزمون سایش انتخاب گردید.

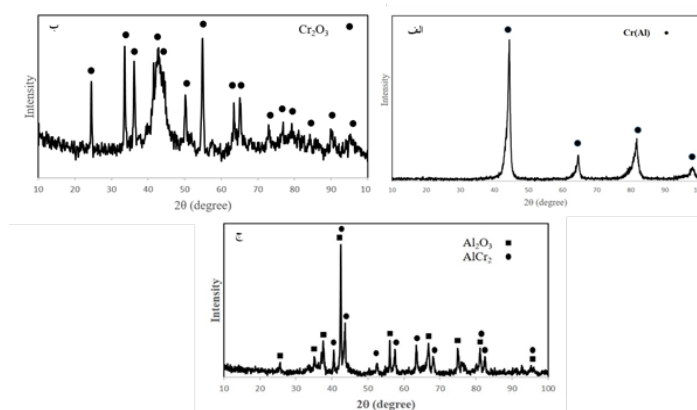
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- آزمون پراش اشعه ایکس پودرها

همانگونه که در بخش قبل شرح داده شد، پودرهای  $Al$  و  $Cr$  به مدت ۲۰ ساعت آسیاب کاری شدند که هدف از این کار تولید ترکیب بین فلزی  $AlCr_2$  بود. پس از اتمام عملیات آسیاب کاری، آزمون پراش اشعه ایکس انجام گرفت. شکل ۱ (الف) الگوی پراش اشعه ایکس پودر  $Al-Cr$  را بعد از ۲۰ ساعت آسیاب کاری نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که تمامی پیک‌ها در الگوی پراش اشعه ایکس مخلوط پودری  $Al-Cr$ ، تشکیل محلول جامد  $Cr(Al)$  را نشان می‌دهند. در این الگو پیک‌های عنصر کروم با شماره کارت (۱۲۵۰-۰۰-۰۰۱) مطابق با جدول ۵ که در آن زاویه پیک‌های الگوی مرجع و الگوی بدست آمده در این تحقیق مقایسه شده‌اند، به صورت جزئی به سمت زوایای بیشتر جابجا شده‌اند که دلیل آن انحلال  $Al$  در شبکه کروم و تشکیل محلول جامد  $Cr(Al)$  می‌باشد. در ادامه آسیاب کاری پودرهای  $Al$  و  $Cr_2O_3$  به مدت ۲۰ ساعت بر اساس واکنش (۱) به منظور تشکیل کامپوزیت  $AlCr_2-Al_2O_3$  انجام

جدول ۴: مشخصات محلول‌های اچ مورد استفاده

محلول ۱	۱۰ گرم $CuSO_4$ ، ۵۰ میلی گرم اسید هیدروکلریک، و ۵۰ میلی گرم $H_2O$	نمونه $Al-Cr$	۳۵ ثانیه
محلول ۲	۳۰٪ $HCl$ ، ۱۰٪ $HNO_3$ ، ۳۰٪ $H_2O$	نمونه $Al-Cr$	۳۰ ثانیه
محلول ۳	۵۰٪ $HNO_3$ ، ۵۰٪ $H_2O$	نمونه $Al-Cr_2O_3$	۹۰ ثانیه



شکل ۱: الگوی پراش اشعه ایکس (الف) مخلوط پودری  $Al-Cr$  بعد از ۲۰ ساعت آسیاب کاری، (ب) مخلوط پودری  $Al-Cr_2O_3$  بعد از ۲۰ ساعت آسیاب کاری و (ج) مخلوط پودری  $Al-Cr_2O_3$  بعد از ۲۰ ساعت آسیاب کاری و عملیات حرارتی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت.

(ب) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار پاس دوم ترکیب کامپوزیتی  $Al_2O_3-AlCr_2$  را نشان می‌دهد. فلز جوش این نمونه حاوی دندریته‌های ستونی از فازهای  $AlCr_2$  و  $Al_2O_3$  می‌باشد. حضور ذرات  $Al_2O_3$  در ریز ساختار فلز جوش این نمونه باعث ایجاد ساختار شبکه‌ای در فلز جوش این نمونه شده است. علت ایجاد این ساختار شبکه‌ای تفاوت مقاومت خوردگی ترکیب  $AlCr_2$  و  $Al_2O_3$  در حین اچ کردن می‌باشد. ترکیب  $Al_2O_3$  در ریز ساختار می‌تواند با قفل کردن مرزخانه‌ها از رشد دانه‌ها در حین جوشکاری جلوگیری نماید.

### ۲-۳- نتایج آزمون پراش اشعه ایکس روکش‌ها

شکل ۳ الگوی پراش اشعه ایکس از سطح روکش نمونه‌های  $AlCr_2$  و  $Al_2O_3-AlCr_2$  در دو پاس را نشان می‌دهد. ملاحظه گردید در نمونه  $Al_2O_3-AlCr_2$  پیک‌های  $AlCr_2$  و  $Al_2O_3$  در الگوی پراش اشعه ایکس دیده می‌شوند. شکل ۳ (الف) الگوی پراش اشعه ایکس از سطح نمونه  $AlCr_2$  را در دو پاس نشان می‌دهد. نتایج پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که علاوه بر محلول جامد  $Cr(Al)$  ترکیب بین فلزی  $AlCr_2$  نیز وجود دارد. این در حالی است که در پودر ۲۰ ساعت آسیاب کاری شده فقط پیک‌های محلول جامد  $Cr(Al)$  در نتایج پراش پرتو ایکس مشخص بود. این موضوع مشخص کننده این است که در حین فرایند روکش کاری مقداری از محلول جامد  $Cr(Al)$  در اثر حرارت بالای روکش کاری به ترکیب بین فلزی  $AlCr_2$  تبدیل شده است. در واقع حرارت بالا باعث می‌شود که ساختار محلول جامد  $Cr(Al)$  منظم گردد و بدین ترتیب ترکیب بین فلزی منظم  $AlCr_2$  تشکیل گردد. شکل ۳ (ب) الگوی پراش اشعه ایکس از سطح روکش نمونه  $AlCr_2-Al_2O_3$  را در دو پاس نشان می‌دهد. نتایج پراش پرتو ایکس نشان

شد. پس از عملیات آسیاب کاری آزمون پراش اشعه ایکس انجام گرفت که شکل ۱ (ب) الگوی پراش اشعه ایکس مخلوط پودری  $Al-Cr_2O_3$  بعد از ۲۰ ساعت آسیاب کاری را نشان می‌دهد.



پس از اتمام آزمون پراش اشعه ایکس و مشاهده پیک‌ها ملاحظه گردید که تمامی پیک‌ها مربوط به فاز  $Cr_2O_3$  با شماره کارت (۱۴۷۹-۰۰-۳۸) می‌باشند. ساختار منظم  $Al$  در آسیاب کاری به ساختار آمورف تبدیل شده است،  $Al$  با اکسید کروم واکنش نداده است و هیچ پیکی از  $Al$  مشاهده نشد. بدین منظور پودر آسیاب کاری شده به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد داخل کوره، عملیات حرارتی شد. شکل ۱ (ج) الگوی پراش اشعه ایکس این مخلوط پودری را بعد از اتمام عملیات حرارتی نشان می‌دهد.

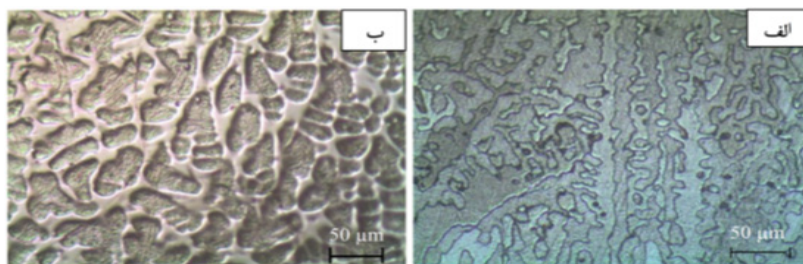
همانطور که مشخص است عملیات حرارتی در این دما منجر به انجام واکنش میان  $Al$  آمورف و اکسید کروم شده است. در واقع حرارت دهی پودر فعال شده باعث تامین انرژی فعالسازی واکنش میان  $Al$  و  $Cr_2O_3$  می‌شود که این موضوع باعث شکل‌گیری فازهای  $AlCr_2$  به شماره کارت (۱۲۳۹-۰۰-۰۲) و  $Al_2O_3$  به شماره کارت (۱۸۶۲-۰۱-۰۷۵) بعد از عملیات حرارتی می‌گردد.

### ۲-۳- بررسی‌های ریزساختاری فلز جوش

شکل ۲ ریزساختار فلز جوش در نمونه‌های روکش کاری شده  $AlCr_2$  و  $Al_2O_3-AlCr_2$  را نشان می‌دهد. شکل ۲ (الف) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار پاس دوم نمونه  $AlCr_2$  را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که ساختار جوش، ساختار انجماد دندریتی هم‌محور و دندریتی ستونی می‌باشد. شکل ۲

جدول ۵: مقایسه پیک‌های الگوی مرجع اشعه ایکس عنصر کروم و الگوی حاصل از ۲۰ ساعت آسیاب کاری مخلوط پودری  $Al-Cr$

اندیس صفحه پراش				
(۲۲۰)	(۲۱۱)	(۲۰۰)	(۱۱۰)	الگوی پراش اشعه ایکس مرجع عنصر کروم با شماره کارت (۱۲۵۰-)
۹۶/۸۱	۸۱/۵۰	۶۴/۱۷	۴۴/۱۴	زاویه پراش (۰۰-۰۰۱)
الگوی حاصل از ۲۰ ساعت آسیاب کاری مخلوط پودری $Al-Cr$				
۹۸/۱۷	۸۱/۸۰	۶۴/۷۰	۴۴/۳۹	(20)



شکل ۲: ریزساختار فلز جوش نمونه‌های (الف)  $AlCr_2$  و (ب)  $AlCr_2-Al_2O_3$ .



آن، باعث افزایش ریزسختی در این ناحیه نسبت به فلز زیرلایه می شود.

با توجه به شکل ۴ ریزسختی در فلز جوش روکش های  $AlCr_2$  و  $Al_2O_3-AlCr_2$  از ثبات قابل ملاحظه ای برخوردار است و نوسانات بسیار کمی در نتایج بدست آمده مشاهده می شود. این موضوع صحت نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس نمونه ها (شکل ۳) را نشان می دهد. ریزسختی در فلز جوش نمونه  $AlCr_2$  تقریباً برابر ۶۴۰ ویکرز است، در حالیکه ریزسختی فلز جوش نمونه  $Al-Al_2O_3$   $Cr_2$  تقریباً برابر ۷۸۰ ویکرز می باشد. دلیل این اختلاف را می توان به ریزساختار و فازهای موجود در فلز جوش نسبت داد. در نمونه  $AlCr_2$  ساختار بصورت دندریتی می باشد که در بیشتر مناطق فلز جوش از نوع دندریتی هم محور بوده است. فاز  $AlCr_2$  تنها فاز سختی است که در کنار محلول جامد  $Cr(Al)$  در سطح جوش نمونه  $AlCr_2$  مشاهده شد. اما در فلز جوش نمونه  $Al_2O_3-AlCr_2$  ریزساختار بصورت دندریت ستونی و شبکه ای می باشد. در نمونه ریزسختی کاری شده با پودر  $Al_2O_3-AlCr_2$  علاوه بر حضور فازهای  $AlCr_2$  و محلول جامد  $Cr(Al)$  فاز سخت  $Al_2O_3$  نیز حضور دارد که توزیع یکنواخت فاز سخت  $Al_2O_3$  در کل سطح روکش کاری شده باعث افزایش ریزسختی این نمونه نسبت به نمونه  $AlCr_2$  شده است.

#### ۲-۵- آزمون سایش

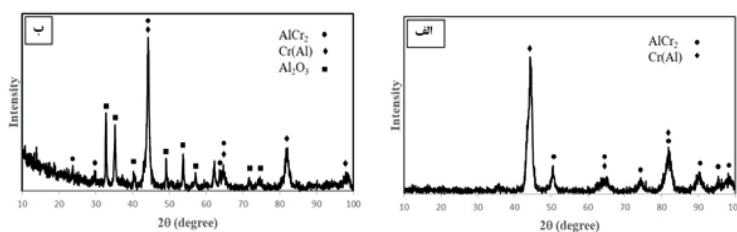
نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت برای پین هر سه نمونه بدون روکش و نمونه های روکش کاری شده  $AlCr_2$

دهنده تشکیل سه فاز است که این سه فاز عبارتند از محلول جامد  $Cr(Al)$ ، ترکیب بین فلزی  $AlCr_2$  و فاز  $Al_2O_3$  (شماره کارت های اشعه ایکس این فازها قبلاً اشاره شده است).

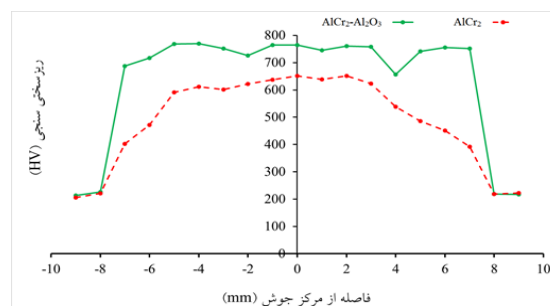
#### ۲-۴- آزمون ریزسختی سنجی

نتایج آزمون ریزسختی سنجی روکش های  $AlCr_2$  و  $Al_2O_3-AlCr_2$  در شکل ۴ ارائه شده است. در حالت کلی، سختی هر فلز با مقاومت آن در مقابل تغییر شکل تعریف می شود. بر همین اساس این نوع سختی سنجی را می توان به طور ذاتی به عوامل زیادی وابسته کرد. در این قسمت ریزسختی زیرلایه، منطقه HAZ و فلز جوش هر دو نمونه به صورت افقی مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می شود، ریزسختی زیرلایه فولاد کربنی CK45 تقریباً برابر ۲۱۰ ویکرز می باشد. این نتایج، نتایج مشابهی از توزیع ریزسختی فولاد کربنی CK45 را نشان می دهد که در تحقیقات گذشته نیز گزارش شده است [۱۹].

ریزسختی در منطقه متاثر از حرارت برای هر دو نمونه روکش کاری شده افزایش می یابد. این افزایش در روکش  $AlCr_2$  بصورت یکنواخت تر می باشد، ولی در روکش  $Al_2O_3-AlCr_2$  افزایش ریزسختی با شیب تندی مشاهده می شود. ریزسختی در منطقه متاثر از حرارت در روکش  $Al_2O_3-AlCr_2$  حدوداً به ۷۵۰ ویکرز می رسد و در روکش  $AlCr_2$  ابتدا در حدود ۴۰۰ ویکرز می باشد که با نزدیک شدن به فلز جوش به حدود ۶۵۰ ویکرز می رسد. ایجاد ریزساختار فریت ویدمن اشتاتن در منطقه متاثر از حرارت به دلیل ایجاد حرارت زیاد در این منطقه و سریع سرد شدن



شکل ۳: الگوهای پراش پرتو ایکس از سطح روکش های  $AlCr_2$  (الف) و  $AlCr_2-Al_2O_3$  (ب) پس از ۲ پاس روکش کاری.



شکل ۴: نمودار ریزسختی نمونه ها از مناطق مختلف.

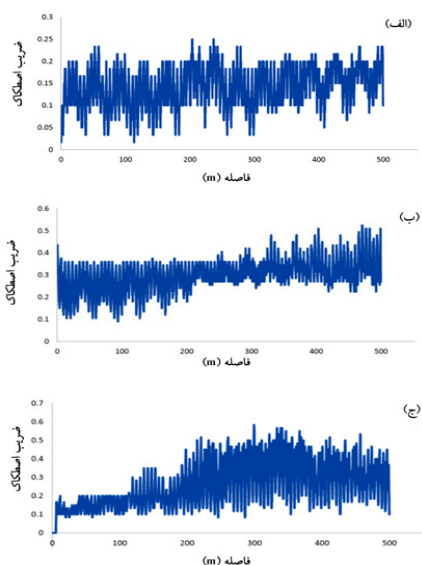
زیرلایه شده است. با افزایش سختی در نمونه‌های روکش کاری شده، نرخ سایش کاهش پیدا می‌کند و باعث بهبود رفتار سایشی در نمونه‌های روکش کاری شده می‌شود. کاهش متوسط ضریب اصطکاک در نمونه روکش  $Al_2O_3-AlCr_2$  نیز به همین دلیل می‌باشد. در واقع کاهش سایش باعث ایجاد ضریب اصطکاک کمتر می‌گردد.

شکل ۶ نمودار کاهش وزن بین نمونه‌های CK45،  $AlCr_2$  و  $Al_2O_3-AlCr_2$  را در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، کاهش وزن در بین نمونه‌های فولاد CK45 برابر ۱/۵ میلی‌گرم، بین نمونه‌های روکش کاری شده  $AlCr_2$  برابر ۰/۲ میلی‌گرم و بین نمونه‌های روکش کاری شده  $Al_2O_3-AlCr_2$  بدون کاهش وزن است.

نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های فولاد کربنی CK45 بدون روکش، کاهش وزن چشم‌گیری را دارد و بیشترین کاهش وزن را نسبت به دو نمونه‌های دیگر داشته است. در نمونه‌های فولاد کربنی CK45 مقدار عناصر آلیاژی ناچیز است و حضور آهن با درصد بسیار بالا به تنهایی رفتار سایشی مناسبی ایجاد نمی‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است که آلیاژسازی روی سطح باعث افزایش مقاومت به سایش می‌شود. در دو نمونه‌های روکش کاری شده، عناصر آلیاژی نسبت به نمونه‌های فولاد کربنی CK45 افزایش یافته است که این عناصر آلیاژی با یکدیگر ترکیبات بین‌فلزی سخت تشکیل داده و باعث افزایش خواص مکانیکی و بهبود رفتار سایشی در این دو نمونه شده است. همچنین این بهبود در رفتار سایشی و کاهش وزن نمونه‌های روکش شده را می‌توان اولاً به حضور

و  $Al_2O_3-AlCr_2$  در مقابل دیسک فسفر برنز در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) در شکل ۵ ارائه شده است. نوسان‌هایی در شکل قابل مشاهده است. این نوسانات در ضریب اصطکاک نشانگر پدیده‌ی چسبیدن- لغزش است که چسبندگی و جدایش در نقاط تماس بین دو سطح را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ ضریب اصطکاک در نمونه‌های فولاد کربنی CK45 تقریباً برابر ۰/۱۵ است که تقریباً در طی ۵۰۰ متر مسافت طی شده یکسان است. اما ضریب اصطکاک برای دو نمونه‌های روکش کاری شده‌ی دیگر روندی متفاوت را نشان می‌دهد. متوسط ضریب اصطکاک در نمونه‌های روکش  $AlCr_2$  در ۲۹۰ متر ابتدایی آزمون سایش تقریباً برابر ۰/۲۵ است و پس از آن تا انتهای آزمون سایش به مقدار ۰/۳ افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر میزان متوسط ضریب اصطکاک در آزمون سایش در بین نمونه‌های روکش  $AlCr_2$  بعد از مسافت ۲۹۰ متر اول به میزان ۲۰٪ افزایش پیدا کرده است. همانطور که در شکل ۵ (ج) مشاهده می‌شود، ضریب اصطکاک نمونه‌های روکش  $Al_2O_3-AlCr_2$  در ۱۱۰ متر ابتدایی آزمون سایش رفتاری متفاوتی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، ضریب اصطکاک در این نمونه در ۱۱۰ متر ابتدایی آزمون سایش تقریباً برابر ۰/۱۵ است و پس از آن با شیب ملایم این مقدار افزایش پیدا کرده و به مقدار ۰/۳۵ می‌رسد. به عبارت دیگر میزان متوسط ضریب اصطکاک در آزمون سایش در بین نمونه‌های روکش  $Al_2O_3-AlCr_2$  بعد از مسافت ۱۱۰ متر اول به میزان ۵۷٪ افزایش پیدا کرده است. علت نوسان شدید در نمودار ضریب اصطکاک این روکش را می‌توان به حضور ذرات سخت  $Al_2O_3$  در ریزساختار آن مربوط دانست. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون سایش مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک در دو نمونه‌های روکش کاری شده با افزایش مسافت، افزایش یافته است که این امر به دلیل افزایش سطح تماس بین با دیسک رخ داده است. به دلیل سختی کم دیسک آلیاژی فسفر برنز، با ادامه آزمون سایش، بین به راحتی درون دیسک فرورفته، بنابراین سطح تماس افزایش یافته و به تبع آن تعداد اتصالات موضعی و لحظه‌ای که بین پین و سطح دیسک ایجاد می‌شود، افزایش می‌یابد. با زیاد شدن تعداد این اتصالات، نیروی لازم جهت گسیختن آنها نیز افزایش یافته و در نتیجه ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد [۲۰].

سختی و نرخ سایش با یکدیگر در نیروی اعمالی و سرعت یکسان، رابطه‌ی عکس دارند و با افزایش مقدار سختی نرخ سایش کاهش می‌یابد. حضور فازهای سخت  $Al_2O_3$  و ترکیب بین فلزی  $AlCr_2$  در سطح نمونه‌های روکش کاری شده نسبت به نمونه‌های بدون روکش (زیرلایه) باعث افزایش سختی این منطقه نسبت به



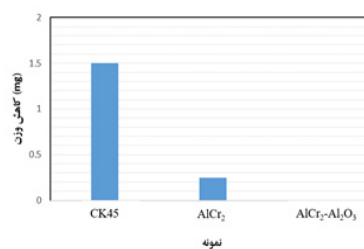
شکل ۵: نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایش برای نمونه‌های مختلف (الف) زیرلایه CK45، (ب) روکش  $AlCr_2$  و (ج) روکش  $Al_2O_3-AlCr_2$ .



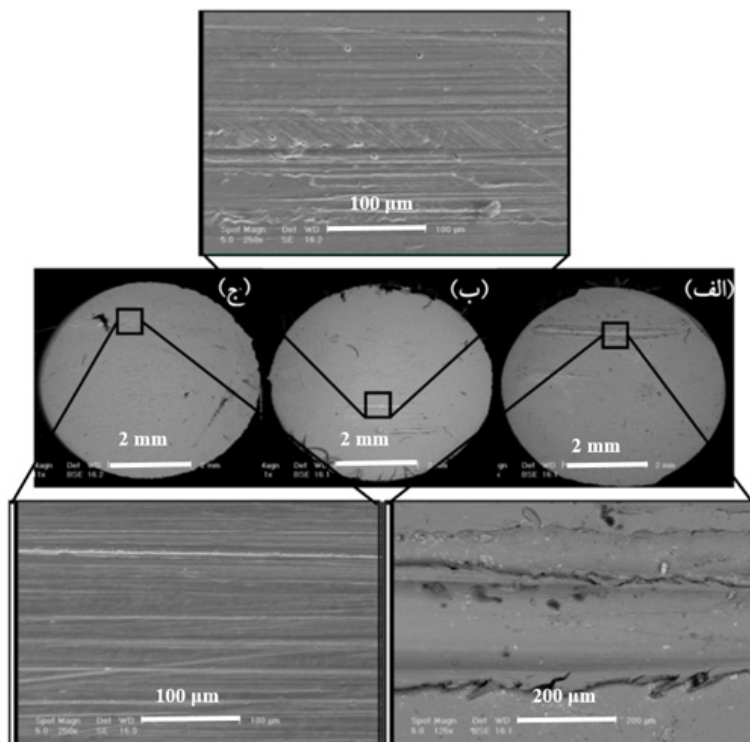
سه نمونه در این آزمون دچار سایش خراشان شده‌اند. در نمونه‌ی فولاد کربنی CK45 شیارهایی روی سطح آن مشاهده می‌شود که این شیارها از نوع سایش خراشان خیش ریز و خستگی ریز می‌باشد. سایش خراشان نوع خیش‌زدن مکانیزم سایشی است که تحت بار کم اتفاق افتاده و منجر به برداشت ماده کمی می‌گردد و معمولاً فرآیند جایجایی مواد از درون شیار به کناره‌های آن رخ می‌دهد که این موضوع در شکل ارائه شده، کاملاً مشهود است. همچنین در برخی از مناطق، مکانیزم سایش خستگی ریز اتفاق افتاده است که ناشی از خستگی سطح در اثر ترک خوردگی و کندی ناشی از خستگی است که به دلیل سیکل‌های تنش تریبولوژیکی تکرار شونده فعال می‌گردند [۲۱]. با توجه به شکل ۷ (ب و ج)، در سطوح سایش خراش‌های سطحی به صورت غیریکنواخت مشاهده می‌شود که با افزایش درصد ذرات تقویت کننده مقدار شیارهای سطحی و همچنین ذرات سایشی کاسته می‌شود. شیارهای حاصل در سطح سایش را می‌توان ناشی از عملکرد مکانیزم سایش خراشان خیش‌ریز و برش‌ریز دانست. در نمونه‌ی روکش کاری شده‌ی  $AlCr_2$  خراش محسوسی در مقایسه با فولاد کربنی CK45 روی سطح مشاهده نمی‌شود، اما نتایج سطحی حاکی از سایش خراشان از نوع خیش‌ریز و برش‌ریز است. مکانیزم برش‌ریز شدیدترین حالت سایش خراشان در مورد مواد نرم است که در آن مواد برداشت شده به صورت ورقه‌ای شکل، مشابه

مقادیر زیاد فازهای سخت تشکیل شده (مانند فاز  $Al_2O_3$ ، محلول جامد  $Cr(Al)$  و ترکیب بین فلزی  $AlCr_2$ ) در حین روکش کاری نسبت داد، چرا که با حضور فازهای سخت یاد شده سختی افزایش یافته و در نتیجه مقاومت سایشی روکش افزایش می‌یابد. علاوه بر سختی دلیل دیگر اختلاف زیاد مقاومت سایشی روکش با زیرلایه، ریزساختار تشکیل شده پس از فرآیند جوشکاری می‌باشد. تشکیل دندریت‌های ستونی و هم‌محور و همچنین ساختار شبکه‌ای از فازهای  $Al_2O_3$  و  $AlCr_2$  در فلز جوش نمونه‌های روکش کاری شده باعث افزایش مقاومت به سایش در این نمونه‌ها نسبت به زیر لایه می‌شود.

تصاویر SEM از سطح سایش بین‌ها در دو بزرگنمایی متفاوت در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، سطوح سایش بین‌ها در آزمون سایش در دمای پایین دچار تخریب زیادی نشده‌اند. هر



شکل ۶: نمودار کاهش وزن بین‌های مختلف پس از انجام آزمون سایش در دمای محیط.

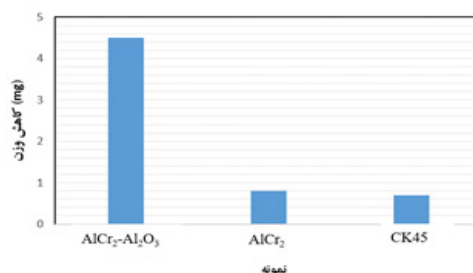


شکل ۷: تصاویر SEM از سطح سایش بین‌های مختلف در دمای محیط (الف) CK45، (ب)  $AlCr_2$  و (ج)  $AlCr_2-Al_2O_3$ .

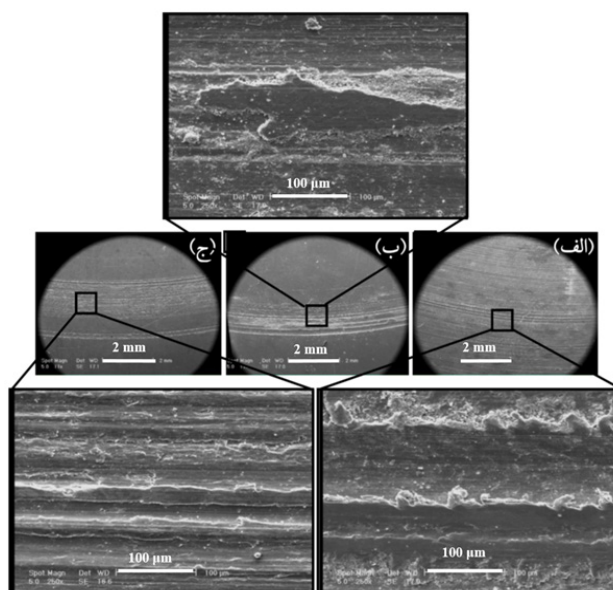
خراشان خیش‌ریز در این نمونه باعث شده است کاهش وزنی در پین این نمونه مشاهده نشود (شکل ۶).  
 شکل ۸ نمودار کاهش وزن دیسک فسفر برنز پس از سایش در برابر نمونه‌های پین فولاد CK45،  $AlCr_2$  و  $Al_2O_3-AlCr_2$  در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.  
 همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، کاهش وزن در دیسک تحت سایش با پین CK45 برابر  $0.4$  میلی‌گرم، نمونه‌ی روکش‌کاری شده‌ی  $AlCr_2$  برابر  $0.6$  و نمونه‌ی روکش‌کاری شده‌ی  $Al_2O_3-AlCr_2$  برابر  $4.5$  میلی‌گرم است که این موضوع نشان دهنده ایجاد سایش شدیدتر توسط پین سخت‌تر روی دیسک فسفر برنز می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که دیسک نمونه‌ی فولاد کربنی CK45 بدون روکش کمترین افت وزن را نسبت به دو نمونه‌ی دیگر داشته است. با توجه به نتایج ضریب اصطکاک، انتظار می‌رفت با افزایش ضریب اصطکاک، سایش افزایش یابد و میزان کاهش وزن در دیسک‌های فسفر برنز زیاد باشد. میزان کاهش وزن دیسک فسفر برنز طبق انتظار بوده، که این امر را می‌توان به چسبیده شدن ذرات سایش و ذرات آلیاژی سطح پین روی صفحات دیسک نسبت داد که با توجه به نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و سایش چسبان، این امر منطقی به نظر می‌رسد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح دیسک‌ها، پس از انجام آزمون سایش در برابر هر سه پین CK45،  $AlCr_2$  و  $Al_2O_3-AlCr_2$  در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) در شکل ۹ ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با توجه به خراش‌های ایجاد شده روی سطح می‌توان نتیجه گرفت

پلیسه حاصل از ماشین‌کاری فلزات، می‌باشند [۲۲]. در این مکانیزم همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، برداشت مواد با جابجایی کمی در مقایسه با اندازه شیار همراه است. نمونه‌ی روکش‌کاری شده‌ی  $Al_2O_3-AlCr_2$  رفتار سایشی بهتری نسبت به دو نمونه‌ی دیگر از خود نشان می‌دهد و تخریب سطحی بسیار کمی در اثر آزمون سایش روی سطح آن ایجاد شده است. همانطور که در شکل ۷ مشخص است، سایش در این نمونه از نوع خراشان خیش‌ریز و بصورت جزئی می‌باشد. با اعمال روکش کامپوزیتی بر سطح زیرلایه فولاد کربنی و افزایش سختی سطح نسبت به زیرلایه از میزان سایش خراشان کاسته شده و در سطح نمونه‌ی  $Al_2O_3-AlCr_2$  شیارهای ایجاد شده دارای عمق کمتری بوده و از تعداد آنها نیز کاسته شده است. حضور ذرات سخت در روکش کامپوزیتی  $(AlCr_2$  و  $Al_2O_3)$ ، منجر به تحمل بار اعمالی در آزمون سایش شده و بنابراین زمینه را از سایش و ایجاد شیارهای سطحی محافظت می‌کند. دلیل ناپیوسته بودن شیارهای سطحی را نیز می‌توان به حضور این ذرات در سطح سایش نسبت داد. همچنین وقوع سایش



شکل ۸: نمودار کاهش وزن دیسک فسفر-برنز پس از سایش در مقابل پین‌های مختلف در دمای محیط.



شکل ۹: تصاویر SEM از سطح سایش دیسک‌های فسفر برنزی در دمای محیط در برابر پین‌های (الف) CK45، (ب)  $AlCr_2$  و (ج)  $AlCr_2-Al_2O_3$ .

سختی بالایی در حدود ۷۵۰ ویکرز از خود نشان داد که در مقایسه با روکش  $AlCr_2$  بالاتر می‌باشد که علت آن تشکیل ترکیب بین فلزی  $AlCr_2$  و ذرات تقویت کننده  $Al_2O_3$  می‌باشد.

۶- بررسی سایش در دمای محیط نشان دهنده مقاومت سایشی بالاتر روکش  $AlCr_2-Al_2O_3$  نسبت به دو نمونه دیگر به خاطر سختی بالاتر این روکش بود.

۷- سطح سایش روکش های  $AlCr_2$  و  $AlCr_2-Al_2O_3$  در دمای محیط نشان دهنده سایش خراشان جزئی پس از انجام آزمون سایش پین روی دیسک بود.

که سایش در دیسکی که در مقابل پین فولاد کربنی CK45 قرار گرفته از نوع سایش خراشان خیش ریز و خستگی ریز است. در دو دیسک دیگر که در برابر پین های روکش کاری شده ساییده شده اند، سایش بیشتری اتفاق افتاده است. با توجه به کنده گی های روی سطح و خراش های ایجاد شده روی آن مشاهده می شود که سایش روی سطح دیسکی که در برابر پین  $AlCr_2$  قرار گرفته از نوع خراشان است و در برخی مناطق سایش چسبان نیز اتفاق افتاده است. در دیسک دیگر که در برابر نمونه ی روکش کاری شده ی  $Al_2O_3-AlCr_2$  قرار گرفته، روی سطح آسیب بیشتر و خراش های موازی و سطحی مشاهده می شود که نشان از سایش خراشان برش ریز و خیش ریز دارد. وقوع همزمان سایش خراشان و چسبان در این نمونه ها باعث افزایش ضریب اصطکاک این نمونه ها نسبت به نمونه بدون روکش می شود (شکل ۵).

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، با اضافه کردن پودرهای  $Al-Cr$  و  $Al-Cr_2O_3$  به شیارهای ایجاد شده روی فلز پایه فولاد CK45 و انجام جوشکاری قوسی تنگستن-گاز روی نمونه ها، روکش های سطحی تولید شدند و مورد ارزیابی های ریزساختاری، ریزسختی و مقاومت سایشی قرار گرفتند. نتایج زیر از پژوهش حاصل شد:

۱- الگوی پراش اشعه ایکس مخلوط پودری  $Al-Cr$  بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی نشان داد که محلول جامد  $Cr(Al)$  تشکیل شده است.

۲- الگوی پراش اشعه ایکس مخلوط پودری  $Al-Cr_2O_3$  پس از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی نشان داد که هیچ واکنشی بین  $Al$  و  $Cr_2O_3$  اتفاق نیفتاده است. همچنین این الگو نشان دهنده آمورف شدن ساختار آلومینیوم پس از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی بود. الگوی پراش این مخلوط پودری بعد از عملیات حرارتی در ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت نشان دهنده تشکیل کامل کامپوزیت  $AlCr_2-Al_2O_3$  بود.

۳- ریز ساختار فلز جوش در نمونه  $AlCr_2$  نشان دهنده ساختار انجماد دندریتی هم محور و دندریتی ستونی می باشد، در حالی که در نمونه  $AlCr_2-Al_2O_3$  ساختار جوش حاوی دندریت های ستونی و ساختار شبکه ای از فازهای  $AlCr_2-Al_2O_3$  بود.

۴- نتایج آزمون پراش پرتو اشعه ایکس از روکش های ایجاد شده نشان داد که در روکش  $AlCr_2$  علاوه بر فاز  $AlCr_2$ ، محلول جامد  $Cr(Al)$  نیز حضور دارد و در سیستم  $AlCr_2-Al_2O_3$  فازهای  $AlCr_2$ ، محلول جامد  $Cr(Al)$  و  $Al_2O_3$  تشکیل شده اند.

۵- آزمون ریزسختی سنجی نشان داد که روکش  $AlCr_2-Al_2O_3$



## ۵- مراجع

- [۱] م، کوبی، م، محمودی غزنوی، تکنولوژی جوشکاری، چاپ اول، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (۱۳۷۴).
- [2] C. Borcher, Microstructure and Mechanical Properties of Medium-Carbon steel Bonded on low-Carbon Steel by Explosive Welding, Journal of Materials and Design, 89(2015) 369-378.
- [۳] ع، رجایی، سخت کاری سطحی سوپر آلیاژهای پایه نیکل اینکونل ۷۱۸ با سوپر آلیاژهای پایه کبالت و پایه نیکل به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، گزارش علمی، (۱۳۹۲).
- [۴] م، صالحی، ف، اشرفی زاده، متالورژی سطح و تریبولوژی، انجمن علوم و تکنولوژی سطوح ایران، (۱۳۷۴) ۱۰۶-۵۵.
- [5] R. E. Reed-Hill, R. Abbaschian, Physical Metallurgy Principles, Thomson-Engineering. ISBN 0-534-92173-6, (2015).
- [۶] ا.ح، کوبی، تکنولوژی جوشکاری، انتشارات آزاده، (۱۳۷۴)، ۹۲-۱۰۰.
- [7] Guide for welding Iron Castings, An American National Standard, AWS D1-1, (2002)2-89.
- [8] J. Namkung, M.C. Kim. W.W. Park, Fabrication of Fe-Cr-Al base alloy strips by melt dragging and their oxidation resistance at elevated temperature, J. Materials processing technology, 52(2011)3394-3404.
- [9] J. Song, Q. Deng, C. Chen, D. Hu, Y. Li, Rebuilding of metal components with laser cladding forming, Applied Surface Science, 252(2006)7934-7940.
- [10] Z.G. Zhang, F. Gesmando, P.Y. Hou Criteria for the formation of protective Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> scales on Fe-Al and Fe-Cr-Al, Corrosion Science, 48(2006)741-765.
- [11] S. Hao, L. Zhao, D. He, Surface microstructure and high temperature corrosion resistance of arc-sprayed Fe Al Cr coating irradiated by high current pulsed electron beam, Nuclear instrument and method in physic research B, 312(2013)97-103.
- [12] S. Buytoz, Microstructural Properties of M7C3 Eutectic Carbides in Fe-Cr-C Alloy, Materials Letters, 60(2006)605-608.
- [۱۳] ح، ثابت، ش، میردامادی، ش، خیراندیش، م، گودرزی، مقایسه سختی و مقاومت به سایش لایه‌های سخت شده سطحی حاوی کروم بر روی فولاد ساده کربنی توسط فرآیند جوشکاری GTAW. سومین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن ریخته‌گران ایران، کرمان، (۱۳۸۸).
- [14] M.G. Pujar, R.K. Dayal, R.K.S. Raman, Microstructural and aqueous corrosion aspects of laser-surface-melted type 304 SS plasma-coated mild steel, J. Mater. Eng. Perform., 3(1994)412-418.
- [15] C. Capdivila, M.K. Miller, Phase separation kinetic in Fe-Cr-Al alloys, Acta materialia, 60(2012)4673-4684.
- [16] M. Galano, F. Audebert, I.C. Stone, B. Cantor, Transition Electron microscopic investigation on microstructure of Fe-Cr-Al alloys, Journal of material science, 34(1999)1791-1798.
- [17] J.R. Regina, J.N. Dupont, The effect of chromium on the weldability and microstructure of Fe-Cr-Al welding, Welding Journal, 86(2007)170-176.
- [18] J.N. Dupont, K.D. Adams, Improving the weldability of Fe-Cr-Al alloys through, TiC addition, Welding Journal, 90(2009)130-136.
- [19] H. Pouraliakbar, M. Hamedia, A.H. Kokabia, A. Nazarib, Designing of CK45 Carbon Steel and AISI 304 Stainless Steel Dissimilar Welds, Materials Research, 17(2014)106-114.
- [20] Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM Handbook, 18(1992).
- [۲۱] م، شمعانیان، م، حاجیان فروشانی، ارزیابی ریزساختار و رفتار سایشی چدن داکتیل زمینه فریتی پوشش داده شده با آلیاژ پایه نیکل پر کروم، علوم و مهندسی سطح، ۲۵ (۱۳۹۴) ۸۵-۹۵.
- [22] R. Arabi Jashvaghani, M. Jaberzadeh, H. Zohdi, M. Shamanian, Microstructural study and wear behavior of ductile iron surface alloyed by Inconel 617, Materials and Design, 54(2014)491-497.