

## بررسی اثر درجه رقت و لایه واسط بر مقاومت به سایش لایه روکش سخت پایه Fe-Cr-C جوشکاری شده به روش SMAW بر روی فولاد ساده کربنی

فرهاد عبدی<sup>۱</sup>، حامد ثابت<sup>۲\*</sup> و احمد خرم پور<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۲، ش ص: ۳۲-۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰)

### چکیده

در این تحقیق هدف، بررسی اثر درجه رقت و لایه واسط بر مقاومت به سایش لایه روکش سخت پایه Fe-Cr-C جوشکاری شده به روش SMAW بر روی فولاد ساده کربنی St37 می باشد، به همین منظور شش قطعه فولاد ساده کربنی St37 در ابعاد ۱۰×۲۰×۳۰ میلی متر به عنوان فلز پایه انتخاب و عملیات روکش کاری روی سه نمونه بدون لایه واسط و روی سه نمونه با لایه واسط انجام شد. بعد از انجام عملیات جوشکاری، آزمون سختی و سایش روی نمونه‌ها انجام شد. بررسی نتایج آزمون سختی نشان داد که با افزایش تعداد لایه روکش سخت، مقدار سختی در هر دو سری نمونه (با لایه واسط و بدون لایه واسط) مقدار سختی افزایش یافت به گونه‌ای که در نمونه‌های بدون لایه واسط این مقدار از ۵۰ راکول به ۵۶ راکول و در نمونه‌های با لایه واسط از ۳۱ راکول به ۵۱ راکول رسید. همچنین سختی نمونه با یک لایه روکش سخت بدون لایه واسط ۱۹ راکول از سختی نمونه با یک لایه روکش سخت با لایه واسط بیشتر شد. بررسی ریزساختاری نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای فازهای آستنیت، مارتنزیت و کاربید بوده‌اند و تنها تفاوت در میزان این فازها می‌باشد. نتایج آزمون سایش نشان داد که مقدار مقاومت به سایش در هر دو سری نمونه (با لایه واسط و بدون لایه واسط) با افزایش تعداد لایه‌های روکش سخت افزایش یافت به گونه‌ای که مقدار کاهش جرم برای نمونه‌های بدون لایه واسط از ۰/۲۲ گرم به ۰/۱۱ گرم و برای نمونه‌های با لایه واسط از ۰/۳۲ گرم به ۰/۱۹ گرم در مسافت ۳۰۰ متر رسید. همچنین به دلیل استحاله آستنیت به مارتنزیت در اثر تغییر شکل پلاستیک ناشی از سایش، با افزایش مسافت لغزش روند افزایشی جرم کنده شده از جسم کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** درجه رقت، جوشکاری SMAW، لایه واسط، سایش.

<sup>۱</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

<sup>۲</sup> - دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

<sup>۳</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

\*-نویسنده مسئول مقاله: h-sabet@kiau.ac.ir

## پیشگفتار

سایش یکی از مهمترین عوامل تخریب قطعات مهندسی در صنعت است که برای کنترل آن از روش های مختلف مانند عملیات حرارتی، آبکاری الکتریکی، روکش کاری سخت و... استفاده می شود. روکش کاری سخت ایجاد یک لایه محافظ بر روی سطح قطعات فلزی به وسیله جوشکاری است که دارای سختی بالا بوده و قطعه را در برابر عوامل محیطی همچون ضربه و سایش مقاوم تر می نماید. سایش قطعات و مجموعه های صنعتی یکی از مهمترین معضلات بخش صنعت و معدن می باشد و کمتر صنعتگری است که درگیر این مسئله نباشد. سایش در شرایط حاد و بحرانی می تواند باعث شکست و از کار افتادگی گردد که بدین ترتیب هزینه های سنگینی به دوش تولیدکنندگان ناشی از توقف و عقب افتادگی تولید می گذارد. یک راه حل، تولید قطعه جدید و جایگزینی آن با قطعات فرسوده یا سائیده شده می باشد ولی این انتخاب عمدتاً پرهزینه و وقت گیر است، لذا همواره بحث انتخاب مواد مناسب، بازرسی، نگهداری و تعمیر قطعات تحت سایش در صنعت مطرح می باشد [۱].

روکش کاری سخت یکی از روش های نوین جوشکاری سطحی می باشد که در این فرآیند، یک لایه نسبتاً ضخیم از فلز با ترکیبات فلزی سخت مانند کاربیدها توسط جوشکاری، پاشش یا روشهای دیگر روی سطح قطعات مورد نظر انباشته می شود. این فرآیند توسط آقایان وینستون و شرلی در کالیفرنیا ابداع و به دلیل پتانسیل بالا در روکش کاری توسط جوش و اتصال غیرمشابه به سرعت گسترش یافت. از مزایای دیگر این روش روکش دهی، این است که قطعات قابلیت تامین خواص نسبتاً متضاد به طور همزمان در یک قطعه را دارند. برای مثال خواصی از قبیل تردی و انعطاف پذیری را می توان در زیرلایه و سختی را در روکش ایجاد کرد. همچنین می توان به راندمان بالای این فرآیند نیز اشاره کرد. امروزه فرآیند روکش کاری سخت برای بازسازی و ترمیم قطعات، بخصوص قطعات صنایع سنگین، کشتی سازی و حمل و نقل ریلی مورد استفاده قرار می گیرند [۲].

خواص لایه های روکش سخت تابعی از ترکیب شیمیایی، شرایط انجماد، سرعت سرد شدن (بعد از انجماد)،

ریزساختار، نوع، شکل و نحوه توزیع فازهاست. آلیاژهای مورد استفاده جهت ایجاد لایه مقاوم به سایش روی فلزات پایه آهنی (فولاد کربنی و کم آلیاژ) به دو دسته عمده آلیاژهای آهنی و آلیاژهای غیرآهنی تقسیم بندی می شوند. آلیاژهای به کار رفته برای این منظور در دو دسته عمده زیر قرار دارند [۲]:

الف- آلیاژهای پایه Fe-Cr-C و ب- آلیاژهای پایه Fe-C-X (X یک عنصر کاربیدزا).

از میان آلیاژهای فوق، آلیاژهای پایه Fe-Cr-C متداول تر هستند که این به دلیل هزینه کمتر و خواص سایشی بهتر آنهاست. آلیاژهای Fe-Cr-C در کاربردهای مختلفی که شرایط سایش و فرسایش شدیدی حاکم بوده و بنابراین نیاز به مقاومت به سایش بالایی است، به کار برده می شوند. اساساً مقاومت به سایش و فرسایش استثنایی آن ها در نتیجه مقادیر نسبتاً زیادی از کاربیدهای سخت در یک زمینه چقرمه است [۳].

تحقیق بسیار جامع و مفصلی توسط ثابت [۴] صورت گرفته است که در آن آلیاژهای روکش سخت پایه Fe-Cr-C با نسبت وزنی Cr/C متفاوت به روش SMAW به صورت تک لایه و دو لایه بر روی فولاد ساده کربنی St32 ایجاد شده اند. مشاهدات این پژوهشگر نشان می دهد که در مورد هر دو الکتروود، با افزایش لایه های روکش، میزان رقت فلز روکش سخت شدیداً کاهش می یابد. با مقایسه میزان کروم در الکتروودهای با قطر متفاوت این نکته دریافت می شود که با افزایش قطر الکتروود، میزان کروم و کربن لایه سخت کاهش یافته است. این امر به دلیل افزایش حرارت ورودی لازم برای ذوب الکتروود با قطر بیشتر و در نتیجه افزایش میزان رقت لایه روکش سخت است. بنابراین میزان کروم و کربن آن کاهش یافته است.

محمدی خواه و همکارانش [۵] در تحقیقی لایه های روکش کاری سخت پایه Fe-Cr-C بر روی سطح فولاد ساده کربنی St52 ایجاد کردند و ریزساختار، سختی، مقاومت به سایش و طول عمر ورق فولادی ضد سایش جوشکاری شده (Carbadox) با ورق فولادی کوئنچ-تمپر شده تجاری مقایسه شده اند. بررسی SEM و XRD بر روی ورق های Carbadox و کوئنچ-تمپر شده تجاری

می‌دهد که مقاومت به سایش نمونه‌های روکش کاری شده نسبت به زیرلایه فولاد Mo40 افزایش قابل توجهی داشته است. این امر به حضور کاربیدهای تشکیل شده در پوشش نسبت داده شده است. مکانیزم سایش پیشنهادی این محققان از نوع سایش چسبان بوده که مشاهدات میکروسکوپی الکترونی ارائه شده توسط این پژوهشگران و حضور اکسیژن در طیف EDS سطح ساییده شده نیز به خوبی موید این مطلب است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش تعداد لایه‌های روکش درصد مارتنزیت تشکیل شده نیز کاهش می‌یابد که با مشاهدات صورت گرفته توسط ثابت [۴] همخوانی دارد. در این تحقیق هدف، بررسی همزمان اثر درجه رقت و لایه واسط بر مقاومت به سایش لایه روکش سخت پایه Fe-Cr-C جوشکاری شده به روش SMAW بر روی فولاد ساده کربنی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق از فولاد ساده کربنی St37 به عنوان فلز پایه (زیرلایه) استفاده شد و در مجموع ۶ قطعه با ابعاد  $10 \times 200 \times 300$  میلی‌متر برش داده شد. ورق فولاد ساده کربنی St37 پس از آماده سازی سطح، تحت آزمون آنالیز شیمیایی به روش اسپکتروگرافی نشر نوری ۳ قرار گرفت. لازم به ذکر است حداقل بر روی سه نقطه مختلف از سطح ورق St37 آنالیز انجام شد که متوسط نتایج به عنوان معیار ترکیب شیمیایی فلز پایه در نظر گرفته شد. ترکیب شیمیایی فلز پایه در جدول ۱ آورده شده است.

برای انجام عملیات جوشکاری جهت سخت‌کاری سطحی از الکتروود E6-UM-55 R استفاده شد. برای انجام لایه واسط بین فلز پایه و الکتروود سخت‌کاری سطحی از الکتروود E307-15 استفاده شد. آنالیز شیمیایی الکتروود سخت‌کاری سطحی و الکتروود واسطه در جدول ۲ آورده شده است.

عملیات جوشکاری به روش SMAW بر روی فولاد St37 با استفاده از الکتروود روکش کاری سخت E6-UM-55 R انجام شد. همچنین جهت بررسی اثر لایه

حاکی از حضور فازهای مارتنزیت، آستنیت و کاربیدهای  $C_{23}Cr_6$  بودند. نتایج آزمون سختی از سطح ورق‌ها بیانگر سختی بالاتر ورق‌های Carbadox نسبت به ورق‌های کوئنچ-تمپر تجاری بودند که علت آن وجود درصد حجمی بالاتر کاربیدهای  $C_{23}Cr_6$  در زمینه ورق‌های Carbadox می‌باشد. همچنین بررسی آزمون سایش بر اساس استاندارد ASTM G65 بیانگر مقاومت سایش بالاتر ورق‌های Carbadox نسبت به ورق‌های کوئنچ-تمپر تجاری بودند.

عظیمی و همکارانش [۶] در تحقیقی رفتار سایشی فولاد ساده کربنی روکش کاری شده با الکتروودهای پُرکروم-پُرکربن را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور دو نوع الکتروود پُرکروم - پُرکربن با ترکیب شیمیایی متفاوت بر روی فولاد St37 به روش جوشکاری قوسی فلز روپوش دار<sup>۱</sup> رسوب داده شد. سپس روکش‌ها از نظر ساختار میکروسکوپی، سختی و رفتار سایشی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آنان نشان می‌دهد که مقدار زیاد کروم به تنهایی باعث افزایش مقاومت به سایش در لایه‌های روکش نمی‌شود بلکه وجود ترکیب بهینه‌ای از کروم و عناصر آلیاژی کاربید ساز باعث افزایش موثر مقاومت به سایش می‌شود. به طور مثال وجود Mo و Nb در الکتروود پُرکروم نه تنها باعث ایجاد کاربیدهای NbC و استخوان ماهی شکل  $(Fe, Mo, Cr)_7C_3$  می‌شود بلکه باعث تغییر مورفولوژی کاربیدها، افزایش سختی و بهبود رفتار سایشی روکش می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که پوشش‌های پُرکروم-پُرکربن دارای مقاومت سایشی قابل ملاحظه و ضریب اصطکاک پایین تحت شرایط آزمون سایش لغزشی در دمای محیط می‌باشند.

امینی و همکاران [۷]، به بررسی ریزساختار و رفتار تریبولوژی روکش ایجاد شده توسط سیم جوش‌های UP6-GF-50 و UP6-GF-50-C که به کمک جوشکاری زیرپودری<sup>۲</sup> (SAW) پرداختند. بدین منظور آن‌ها روکش‌هایی را به صورت تک لایه و دو لایه بر روی فولاد Mo40 ایجاد نمودند. نتایج پژوهش این محققان نشان می‌دهد که ساختار لایه روکش ایجاد شده توسط هر دو سیم جوش شامل مارتنزیت، آستنیت باقی‌مانده و کاربید کروم  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  است. نتایج آزمون سایش نشان

<sup>3</sup> -Optical Emission Spectroscopy (OES)

<sup>1</sup> -Shielded Metal Arc Welding

<sup>2</sup> -Submerge Arc Welding (SAW)

جهت ایجاد لایه‌ی روکش کاری سخت و لایه واسط تا حد امکان ثابت باشند. شرایط عملیات جوشکاری در جدول ۳ آورده شده است.

همچنین جدول ۴ نحوه کد گذاری نمونه‌های جوشکاری شده در این تحقیق را ارائه می‌دهد.

واسطه در افزایش چقرمگی فصل مشترک لایه روکش کاری سخت و فلز پایه، بر روی سه قطعه از شش قطعه جوشکاری شده، لایه واسطه‌ای از جنس فولاد زنگ نزن SS307 با الکتروود E307-15 رسوب داده شد. میزان رقت نیز در اجرای عملیات جوشکاری هر لایه اندازه‌گیری شد. همچنین سعی شد تا متغیرهای عملیات جوشکاری

جدول ۱- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فلز پایه فولاد St37

C	Si	Mn	P	S	Fe
۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۸۹	۰/۰۳	۰/۰۳	باقیمانده

جدول ۲- آنالیز شیمیایی الکتروود سخت کاری سطحی و الکتروود واسطه (درصد وزنی)

کاربرد	نوع الکتروود	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
روکش سخت	E6-UM-55 R	۰/۷	۰/۶	۰/۷	۱۰	-	-
لایه واسط	E307-15	۰/۱	۰/۴	۴/۵	۲۰	۱۰	۱/۰

جدول ۳- شرایط انجام فرآیند جوشکاری

شدت جریان (A)	ولتاژ (V)	طول قوس (mm)	قطر الکتروود (mm)	سرعت جوشکاری (mm/min)	قطبیت	تعداد لایه	فرآیند
۱۵۰-۱۸۰	۳۰-۴۰	۳-۴	۴	۲۰۰-۲۲۰	DCEP	۱ و ۲ و ۳ و ۴	SMAW

جدول ۴- شرایط جوشکاری و کدگذاری نمونه‌ها

کد نمونه	تعداد لایه روکش سخت	تعداد لایه واسط
H-1	۱	-
H-2	۲	-
H-3	۳	-
H-E307-1	۱	۱
H-E307-2	۲	۱
H-E307-3	۳	۱

H: روکش سخت

و سپس پولیش با استفاده از محلول کروندوم ( $Al_2O_3$ ) ۰/۳ میکرومتر و ۰/۰۵ میکرو متر قرار گرفتند و سپس نمونه‌ها توسط محلول نایتال ۲ درصد برای ظاهرسازی تحت حکاکی قرار گرفتند. جهت بررسی ریزساختار از یک دستگاه میکروسکوپ نوری مدل OLAMPUS-BX52 مجهز به سیستم آنالیز تصویری<sup>۱</sup> استفاده شد.

آزمون سختی به روش راکول C، با نیروی اعمالی ۱۵۰ کیلوگرم طبق استاندارد ASTM E18-02 بروی سطح لایه‌های روکش سخت انجام گرفت، لازم به ذکر است که جهت افزایش دقت نتایج آزمون سختی ماکروسکوپی حداقل پنج نقطه از هر نمونه تحت آزمون قرار گرفت که متوسط نتایج آن‌ها معیار سختی سنجی سطح در نظر گرفته شد.

آزمون پراش پرتو  $X^2$  از سطح نمونه‌های روکش سخت شده انجام شد، برای این منظور از یک دستگاه دیفراکتومتر<sup>۳</sup> اشعه X مدل STAPI MP با طول موج ۱/۵۴ آنگستروم و اندازه گام<sup>۴</sup> ۰/۰۴ استفاده شد و سپس فازهای ایجاد شده به کمک نرم‌افزار Expert شناسایی شدند.

آزمون سایش به روش پین بر روی دیسک<sup>۵</sup> مطابق با استاندارد ASTM G99 انجام گردید. جهت انجام آزمون از دستگاه مدل FN-060 ساخت شرکت TANAM استفاده شد. جهت انجام آزمون سایش قطعاتی استوانه ای شکل به قطر ۱۰ میلی‌متر از داخل جوش‌ها تهیه و به عنوان پین در نظر گرفته شد و دیسک سخت که به عنوان ساینده مورد استفاده قرارگرفت از جنس فولاد VCN (AISI4340) به قطر ۱۸ سانتی متر و ضخامت ۱۰ میلی متر با سختی ۶۲ راکول C بود. آزمون با نیروی اعمالی ۱۰۰ نیوتن انجام و میزان کاهش وزن هر نمونه در مسافت های ۳۰۰ و ۶۰۰ و ۱۰۰۰ متر توسط ترازویی با دقت هزارم گرم اندازه گیری شد.

جهت بررسی دقیق تر ریزساختار، بررسی به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. برای این منظور از یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۶</sup> (SEM) مدل

بعد از انجام عملیات جوشکاری نمونه‌هایی جهت انجام آزمون‌ها از داخل جوش و در ابعاد مناسب به روش واترجت و وایرکات برش داده شده و سپس توسط دستگاه فرز و سنگ مغناطیس آماده آزمون های مختلف گردیدند. همچنین برای کاهش اثرات گرم شدن روی نمونه‌ها حین آماده سازی در فرزکاری و سنگ مغناطیس از خنک کاری توسط محلول آب و صابون استفاده شده است. در ادامه آزمون های متالوگرافی نوری، XRD، SEM، آنالیز شیمیایی، سختی و سایش بر روی نمونه‌ها انجام گرفت.

آزمون آنالیز شیمیایی به روش اسپکتروگرافی نشر نوری با دستگاه مدل AXFORD-UV حداقل بر روی سه نقطه مختلف از سطح نمونه‌های روکش سخت شده انجام شد که متوسط نتایج به عنوان معیار ترکیب شیمیایی در نظر گرفته شد. به منظور تعیین رقت هر لایه با توجه به ترکیب شیمیایی لایه‌ها از رابطه (۱) استفاده شد [۷]:

$$D = \frac{P_{x1} - P_{x2}}{P_{x3} - P_{x2}} \times 100 \quad (1)$$

D = میزان رقت (بر حسب درصد)

PX1 = غلظت عنصر X در لایه مورد نظر

PX2 = غلظت عنصر X در سیم جوش مصرفی

PX3 = غلظت عنصر X در زیرلایه مصرفی

لازم به ذکر است منظور از غلظت عنصر X، عناصر کربن، منگنز و کروم در ترکیب شیمیایی لایه می باشد که هر یک از عناصر کربن، منگنز و کروم در ترکیب شیمیایی لایه مورد نظر در رابطه فوق جاگذاری شده و درصد رقت هر یک از عناصر در لایه مربوطه بدست می‌آید. گفتنی است اندازه ی رقت هر لایه از میانگین مجموع رقت های بدست آمده از عناصر کربن، منگنز، کروم آن لایه، محاسبه گردید.

جهت بررسی میکروسکوپی ابتدا نمونه‌ها تحت آماده سازی اولیه شامل سنباده زنی با سنباده های ۱۰۰ تا ۲۵۰۰

<sup>5</sup> -Pin on Disk

<sup>6</sup> - Scanning Electron Microscopy(SEM)

<sup>1</sup> -Image Analysis

<sup>2</sup> -X-Ray Diffraction

<sup>3</sup> -Diffractometer

<sup>4</sup> .Step Size

دارد در حالی که در مورد نمونه‌های H-E307-1، H-E307-2 و H-E307-3 با افزایش تعداد لایه‌ها سختی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که سختی نمونه H-E307-1 که در آن یک لایه روکش سخت با لایه واسط انجام شده است به مراتب کمتر از سختی نمونه H-1 است که در آن یک لایه روکش سخت بدون لایه واسط انجام شده است.

AIS2300C تحت ولتاژکاری ۱۶ کیلو ولت در حالت تصویر برداری الکترون ثانویه<sup>۱</sup> (SE) استفاده شد. همچنین جهت بررسی دقیق تر فازها آزمون آنالیز نقطه ای<sup>۲</sup> به روش اسپکتروسکوپی انرژی پراکنده<sup>۳</sup> (EDS) انجام شد.

## نتایج و بحث

در شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس لایه اول کلیه نمونه‌ها نشان داده شده است. با توجه به اندیس گذاری پیک‌ها در این شکل مشاهده می‌شود فازهای تشکیل دهنده کلیه نمونه‌ها شامل آستنیت، مارتنزیت و کاربید کروم هستند که در جدول ۵ درصد این فازها ارائه شده است.

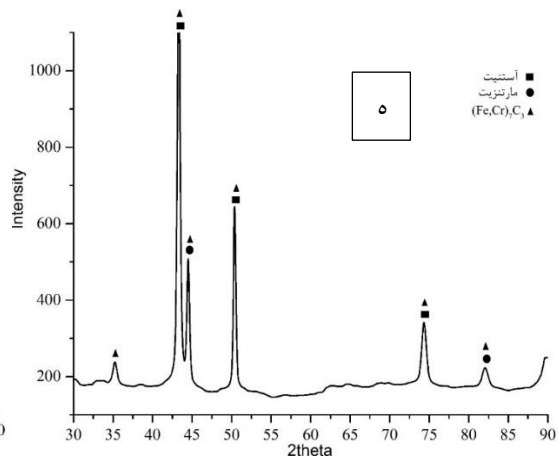
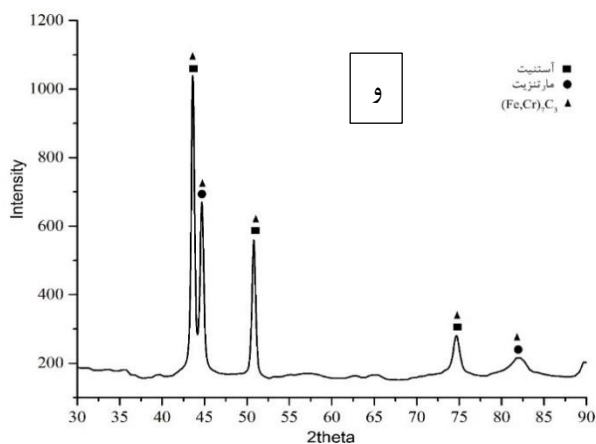
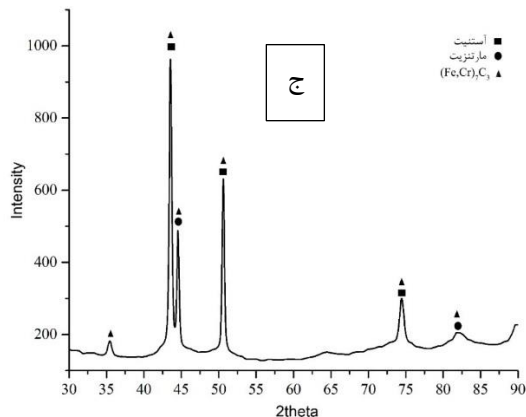
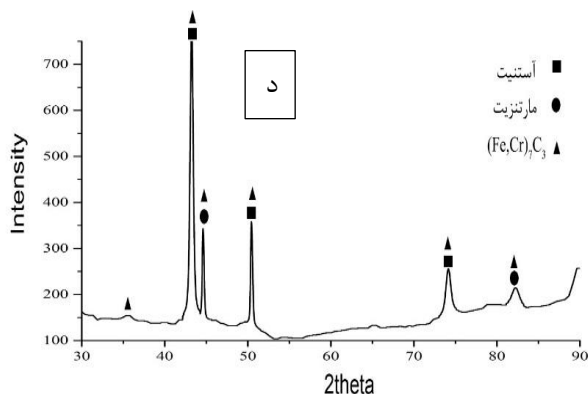
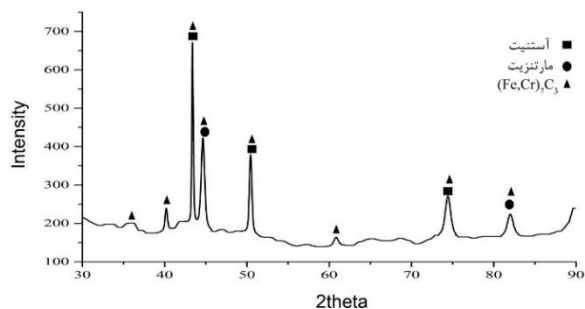
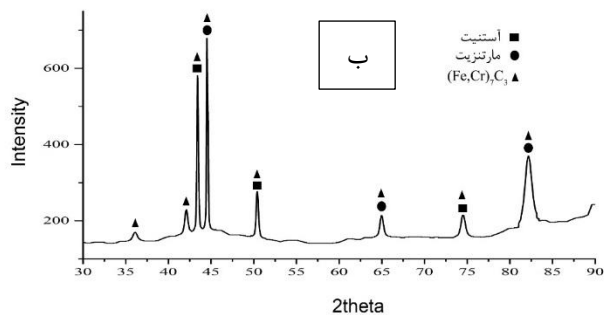
در شکل ۲ ریزساختار لایه اول مربوط به نمونه H-1 نشان داده شده است. در این تصویر نواحی روشن مربوط به آستنیت باقیمانده و نواحی تیره تیغه‌های مارتنزیتی است که در بزرگنمایی بالاتر واضح تر مشاهده می‌شود. در این لایه نیز به جهت شرایط انجمادی و سرعت انجماد بالا فرصت برای تشکیل فازهای تعادلی وجود نداشته و ریزساختار شامل آستنیت و مارتنزیت است. درصد حجمی فاز آستنیت، مارتنزیت و کاربید برای این نمونه اندازه گیری شد. از این رو درصد حجمی فاز آستنیت در این نمونه ۵۰٪، مارتنزیت ۴۷٪ و کاربید ۳٪ به دست آمد. شکل های ۳ تا ۸ ریزساختار نمونه‌ها را نشان می دهد. به طور خلاصه مشخصات ریزساختاری نمونه‌های مختلف در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۷ مقادیر سختی نمونه‌های مختلف را نشان می دهد. در شکل ۹ مقدار سختی راکول برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. در خصوص نمونه‌های بدون لایه واسط، سختی نمونه‌های H-1، H-2 و H-3 به ترتیب ۵۰، ۵۴ و ۵۶ راکول و برای نمونه‌های با لایه واسط، سختی نمونه‌های H-E307-1، H-E307-2 و H-E307-3 به ترتیب ۳۱، ۴۵ و ۵۱ راکول به دست آمده است. همان گونه که مشاهده می‌شود در خصوص سه نمونه H-1، H-2 و H-3 سختی نمونه‌ها افزایش نسبتاً کمی

<sup>3</sup> Energy Dispersive Spectroscopy(EDS)

<sup>1</sup> Secondary Electron(SE)

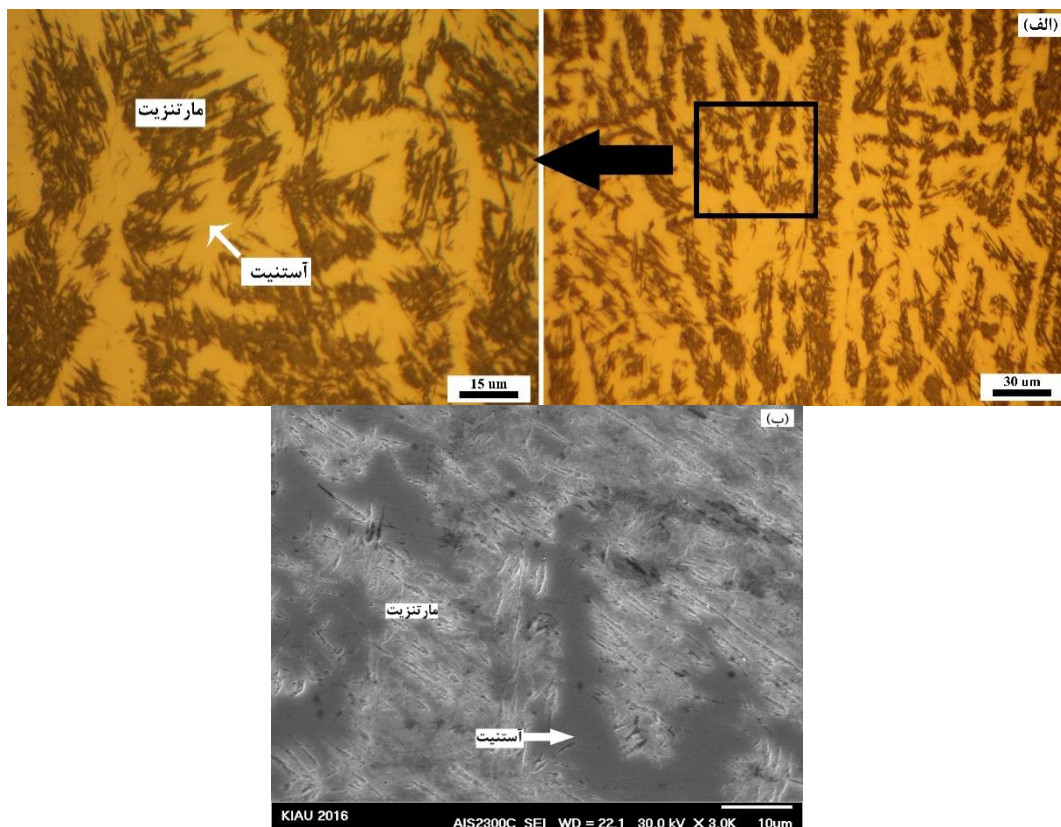
<sup>2</sup> Point Analysis



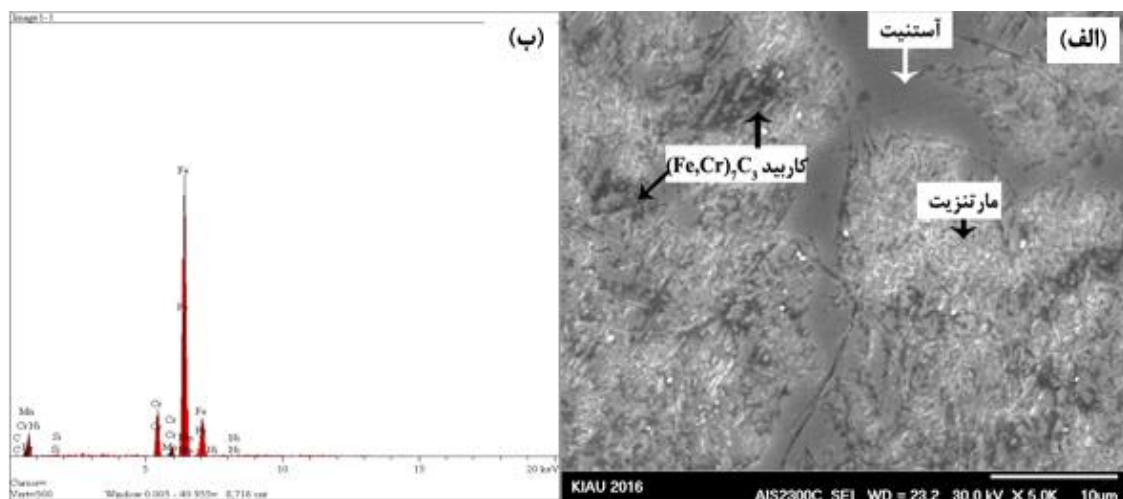
شکل ۱- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های الف- H-1، ب- H-2، ج- H-3، د- H-E307-1، ه- H-E307-2 و و- H-E307-3. فازهای آستنیت، مارتنزیت و کاربید بر روی شکل اندیس گذاری شده‌اند

جدول ۵- آنالیز ترکیب شیمیایی مناطق آستنیت، مارتنزیت و کاربید برای نمونه H-1

فاز	C	Si	Cr	Mn	Ni	Fe
کاربید (Fe,Cr) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	۱۰	۰/۱	۴۵	۰/۴	-	۴۴/۵
آستنیت	۱/۳	۰/۶	۹/۱	۱	۱/۱	باقی مانده
مارتنزیت	۰/۶	۰/۳	۷	۰/۴	۰/۴	باقی مانده

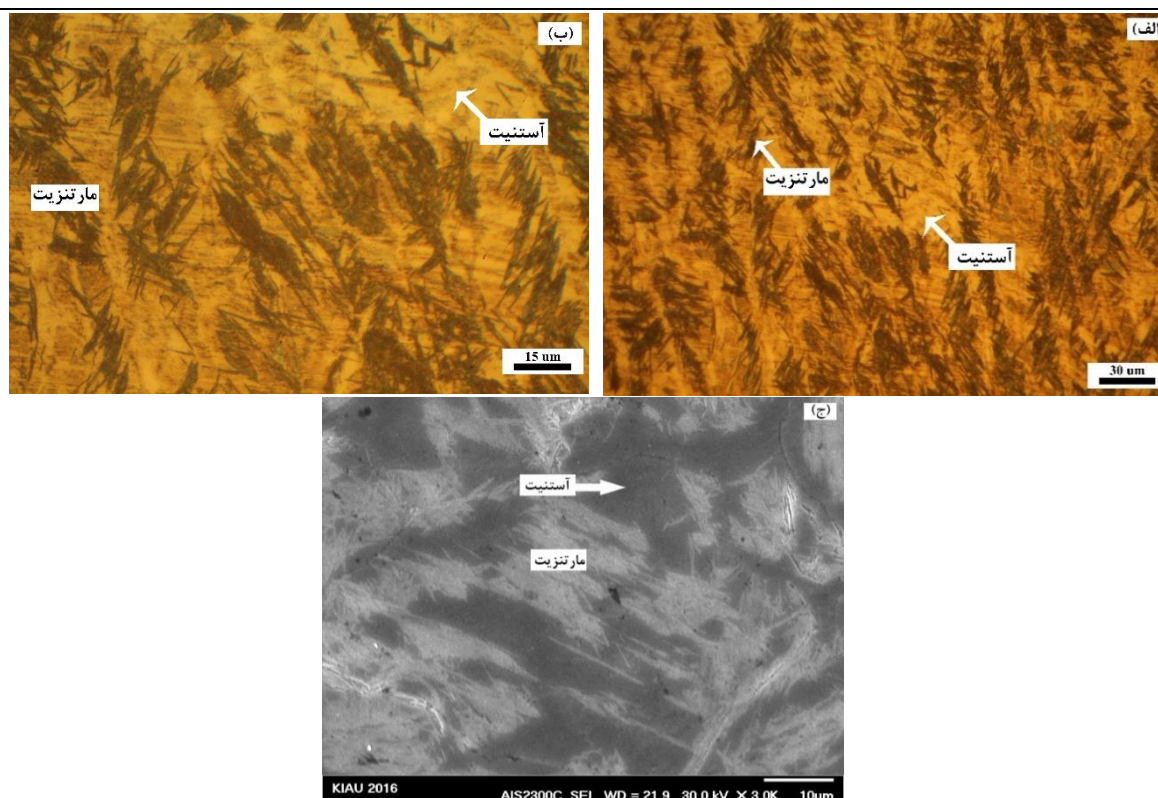


شکل ۲- الف) ریزساختار میکروسکوپی نوری لایه اول نمونه H-1. مناطق روشن آستنیت و مناطق تیغه‌ای تیره رنگ مارتنزیت را نشان می‌دهد. ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه H-1

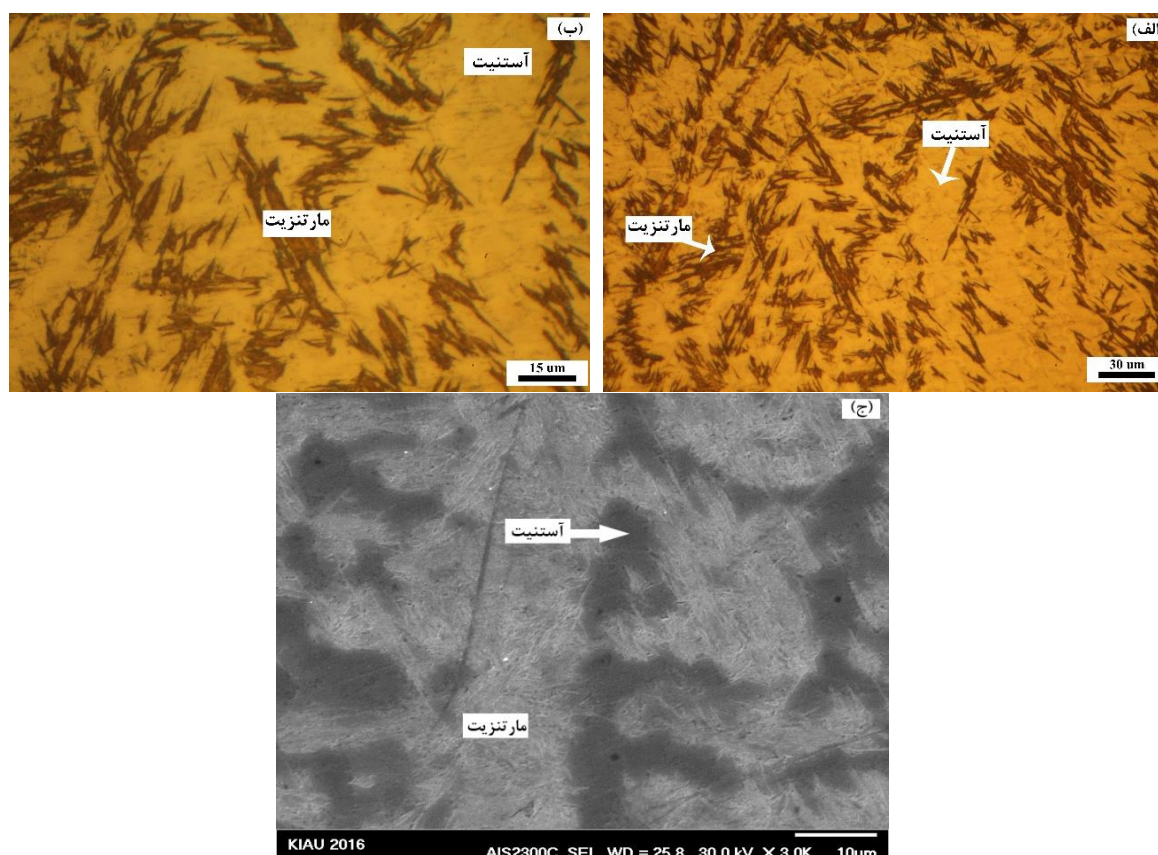


شکل ۳- الف) تصویر ریزساختار میکروسکوپی الکترونی نمونه H-1. ب) آنالیز EDS قسمت کاربید  $(Fe,Cr)_7C_3$

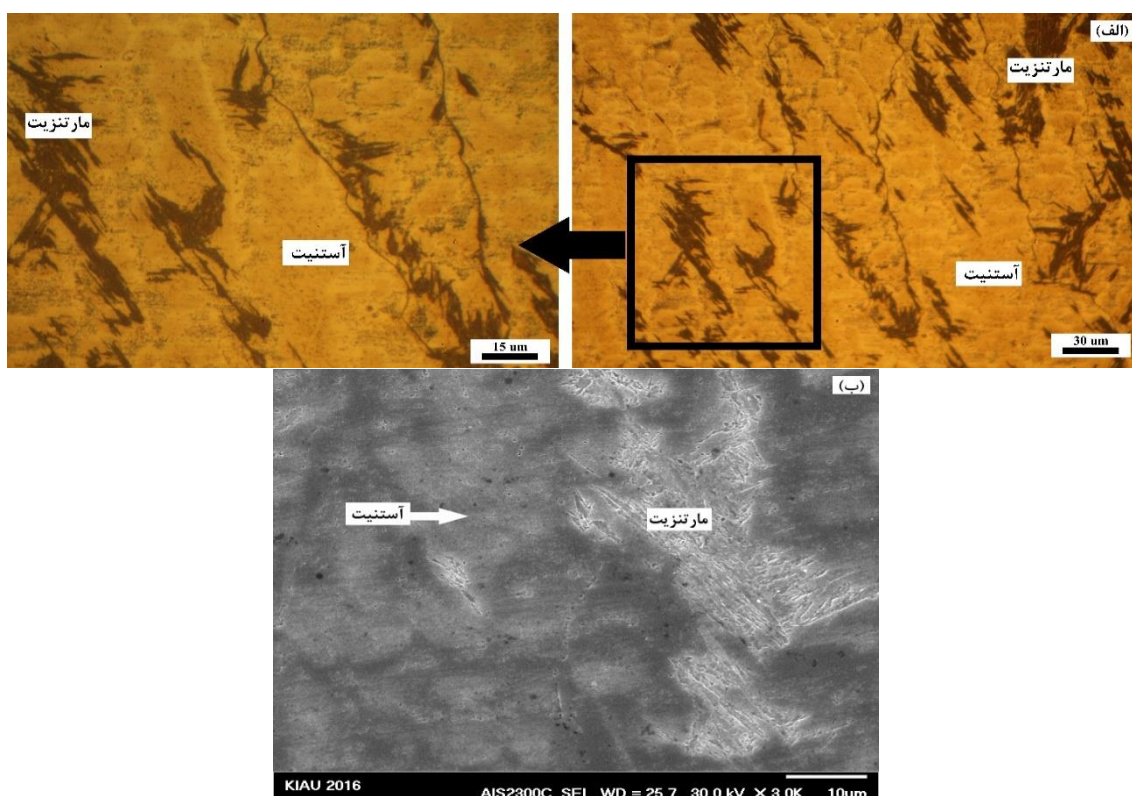




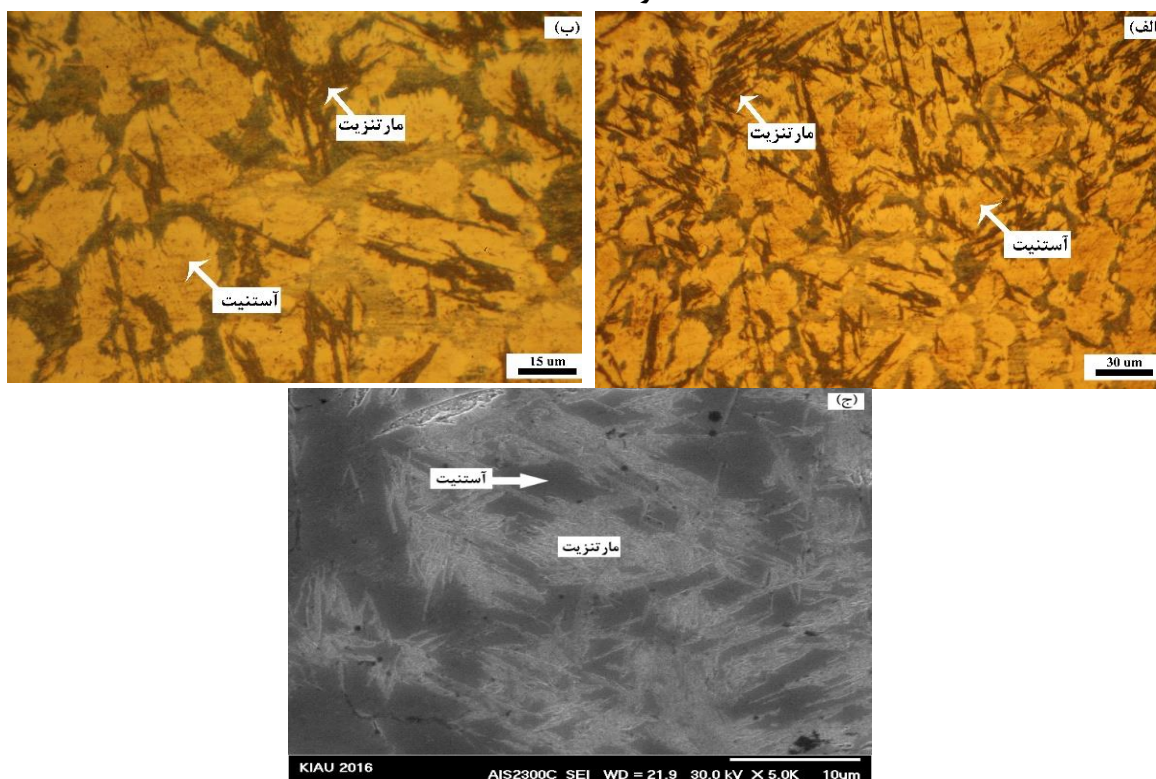
شکل ۴- الف و ب) تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار لایه دوم نمونه H-2. مناطق روشن مربوط به فاز آستنیت و مناطق تیره مربوط به مارتنزیت است. ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه H-2



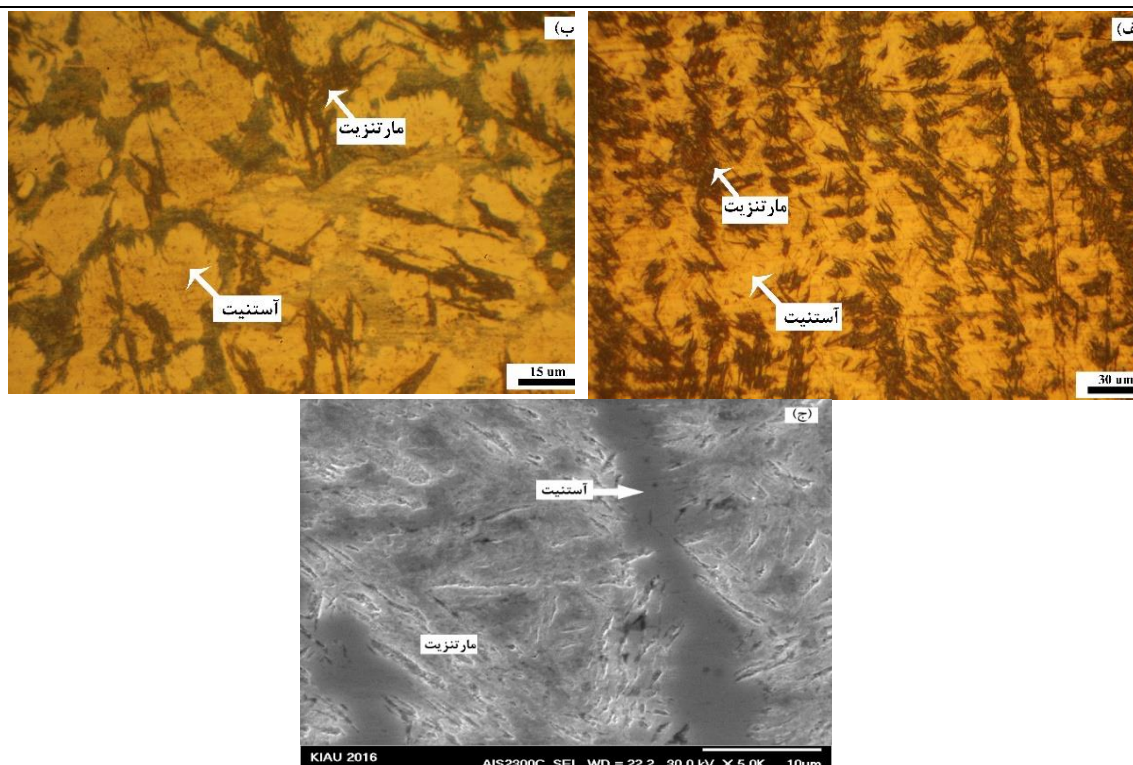
شکل ۵- الف و ب) تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار لایه سوم نمونه H-3. مناطق روشن مربوط به فاز آستنیت و مناطق تیره مربوط به مارتنزیت است. ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار نمونه H-3



شکل ۶- الف) تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار لایه اول روکش سخت شده در نمونه H-E307-1. مناطق تیره مربوط به مارتنزیت و مناطق روشن آستنیت باقی مانده را نشان می دهد. ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه H-E307-1



شکل ۷- الف و ب) ریزساختار لایه دوم نمونه H-E307-2 که در آن روکش سخت با لایه واسط صورت گرفته است. مناطق روشن مربوط به فاز آستنیت و مناطق تیره مارتنزیت است. ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه H-E307-2



شکل ۸- الف و ب) ریزساختار لایه سوم نمونه H-E307-3 که در آن روکش سخت با لایه واسط صورت گرفته است. مناطق روشن مربوط به فاز آستنیت و مناطق تیره مارتنزیت است. (ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

#### نمونه H-E307-3

#### جدول ۶- مشخصات ریزساختاری نمونه‌های مختلف

درصد حجمی فازها			ریزساختار	درصد رقت	شرایط		نمونه
کاربید	مارتنزیت	آستنیت			لایه واسط	رسوب سخت	
۳	۴۷	۵۰	A+M+C	۳۴	۰	۱	H-1
۶	۳۴	۶۰	A+M+C	۱۶	۰	۲	H-2
۸	۲۶	۶۶	A+M+C	۸	۰	۳	H-3
۳	۱۸	۷۹	A+M+C	۳۱	۱	۱	H-E307-1
۴	۲۶	۷۰	A+M+C	۱۴	۱	۲	H-E307-2
۶	۳۰	۶۴	A+M+C	۵	۱	۳	H-E307-3

ریزساختاری این سه نمونه با یکدیگر است. ریزساختار لایه اول نمونه H-1 شامل مارتنزیت، آستنیت باقی مانده و کاربید است که درصد حجمی مارتنزیت ۴۷٪ محاسبه شد. درصد حجمی مارتنزیت لایه دوم نمونه H-2 و لایه سوم نمونه H-3 به ترتیب ۳۴٪ و ۲۶٪ به دست آمد. مشاهده می‌شود که اختلاف درصد حجمی مارتنزیت لایه اول و لایه دوم ۱۳٪ است. در واقع درصد حجمی مارتنزیت لایه اول ۱۳٪ بیشتر از مارتنزیت لایه دوم است. اما همان گونه در نمودار سختی مشاهده شد سختی نمونه H-2، ۴ راکول از

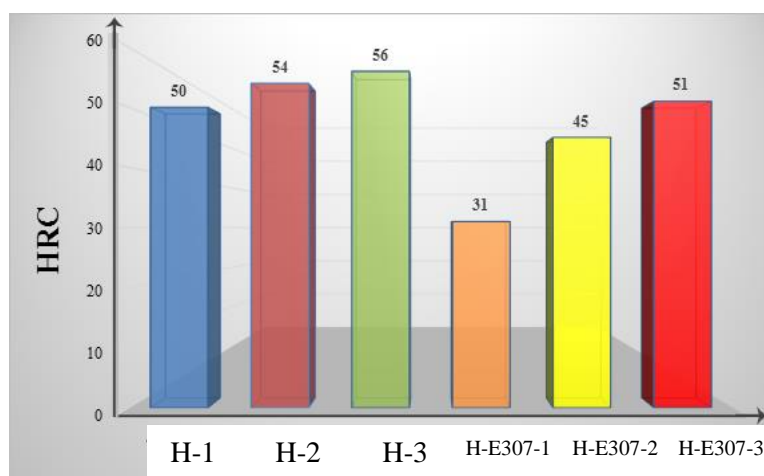
علت تفاوت مقادیر سختی نمونه‌های مختلف به تفاوت ریزساختار آن‌ها مربوط است. در واقع آنچه که سختی نمونه‌های مختلف را تعیین می‌کند اجزای ریزساختار آن‌ها است. از این رو در خصوص نمونه‌های روکش سخت شده آنچه که سهم بیشتری در تعیین سختی نمونه‌ها دارد درصد حجمی مارتنزیت ساختار است. مشاهده شد که سختی نمونه H-2، ۴ راکول از سختی نمونه H-1 بیشتر است و ایضاً ۲ راکول از نمونه H-3 کمتر است. تفاوت بین این مقادیر سختی چشمگیر نبوده و دلیل آن شباهت

نمونه H-1 بیشتر است. در مقایسه این دو نمونه مشاهده می‌شود که با وجود کاهش درصد حجمی مارتنزیت از لایه اول به لایه دوم اما سختی مقدار ۴ راکول افزایش یافته است. دلیل این امر آن است که با توجه به افزایش غلظت عناصر آلیاژی در لایه دوم نسبت به لایه اول با وجود اینکه درصد حجمی مارتنزیت ۱۳٪ کاهش یافته اما کاربیدهای ساختار افزایش یافته است و وجود این کاربیدهای سخت درون ساختار افت سختی ناشی از کاهش درصد حجمی مارتنزیت را جبران کرده است. همچنین مشاهده شد که مقدار کربن نیز در لایه دوم بیشتر از لایه اول است و مارتنزیت و آستنیت موجود در لایه دوم کربن بیشتری نسبت مارتنزیت و آستنیت لایه اول دارد. به عبارت دیگر با وجود کسر کمتر مارتنزیت موجود در لایه دوم اما به سبب بیشتر بودن غلظت کربن در آن، مارتنزیت و آستنیت سختی بالاتری نسبت به مارتنزیت و آستنیت لایه اول دارد. بر همین اساس سختی لایه سوم نمونه H-3 با وجود درصد

حجمی مارتنزیت کمتر از سختی لایه دوم نمونه H-2 و لایه اول نمونه H-1 بیشتر است اما همان طور که ذکر شد اختلاف مقادیر سختی چشمگیر نیست زیرا ریزساختار آن‌ها تفاوت چشمگیری با یکدیگر ندارد. مقدار کاهش وزن نمونه‌های مختلف در جدول ۸ آمده است. همانطور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود در هر نمونه با افزایش مسافت لغزش مقدار کاهش وزن افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش تعداد لایه‌های روکش سخت در هر مسافت مقدار کاهش وزن کاهش می‌یابد. همانطور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود مقدار کاهش وزن برای نمونه H-E307-1 در مسافت‌های ۳۰۰ متر، ۶۰۰ متر و ۱۰۰۰ متر به ترتیب ۰/۰۳۲ گرم، ۰/۰۳۶ گرم و ۰/۰۳۷ گرم به دست آمد. برای نمونه H-E307-2 این مقادیر به ترتیب ۰/۰۲۴ گرم، ۰/۰۲۷ گرم و ۰/۰۲۸ گرم و برای نمونه H-E307-3 به ترتیب ۰/۰۱۹ گرم، ۰/۰۲۵ گرم و ۰/۰۲۶ گرم حاصل شد.

جدول ۷- سختی نمونه‌های مختلف

مقدار سختی	درصد رقت	شرایط		نمونه
		لایه واسط	رسوب سخت	
۵۰	۳۴	۰	۱	H-1
۵۴	۱۶	۰	۲	H-2
۵۶	۸	۰	۳	H-3
۳۱	۳۱	۱	۱	H-E307-1
۴۵	۱۴	۱	۲	H-E307-2
۵۱	۵	۱	۳	H-E307-3



شکل ۹- مقادیر سختی راکول سی برای نمونه‌های مختلف.

در خصوص نمونه‌های روکش سخت با لایه واسط (نمونه های H-E307-1، H-E307-2 و H-E307-3) مشاهده شد با افزایش تعداد لایه‌ها درصد حجمی آستنیت موجود درون ریزساختار کاهش یافت و در عوض مارتنزیت و کاربید بیشتری درون ساختار تشکیل شد. نتایج سختی این نمونه‌ها نیز نشان داده که با افزایش تعداد لایه‌ها به دلیل افزایش درصد حجمی مارتنزیت سختی نیز افزایش یافته است. حال با توجه به افزایش مقدار سختی و مقاومت زمینه در برابر تغییر شکل پلاستیک ناشی از سایش، در جدول ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد لایه‌ها مقدار جرم از دست رفته کاهش می‌یابد. همچنین در جدول ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش مسافت لغزش در هر نمونه مقدار جرم از دست رفته افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است در اثر طی مسافت بیشتر تغییر شکل بیشتری به سطح سایش اعمال می‌شود و در نتیجه مقدار جرم از دست رفته افزایش می‌یابد.

مشاهده می‌شود در این نمونه نیز با افزایش مسافت لغزش مقدار کاهش جرم افزایش می‌یابد. همچنین در مسافت لغزش ثابت، با افزایش تعداد لایه‌ها مقاومت به سایش افزایش می‌یابد. در نمونه‌های روکش سخت بدون لایه واسط (نمونه های H-1، H-2 و H-3) همان گونه که مشاهده شد ریزساختار شامل درصدهای مختلف آستنیت، مارتنزیت و کاربید است. مشاهده شد که با افزایش تعداد لایه‌های روکش سخت به سبب افزایش غلظت عناصر آلیاژی فاز آستنیت پایدارتر و مقدار مارتنزیت تشکیل شده کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که در خصوص این نمونه‌ها کاربیدهای تشکیل شده و کربن موجود در مارتنزیت و آستنیت موجب افزایش سختی با افزایش تعداد لایه‌ها شد. با افزایش سختی سطح لایه‌های جوشکاری مقاومت این لایه در برابر تغییر شکل پلاستیک ناشی از سایش بیشتر شده و در نتیجه مقدار جرم از دست رفته کاهش می‌یابد.

جدول ۸- مقدار کاهش وزن نمونه‌های مختلف پس از سایش

نمونه	مسافت لغزش	مقدار کاهش وزن پس از سایش (gr)
H-1	۳۰۰	۰/۰۲۲
	۶۰۰	۰/۰۲۷
	۱۰۰۰	۰/۰۲۹
H-2	۳۰۰	۰/۰۱۶
	۶۰۰	۰/۰۲۳
	۱۰۰۰	۰/۰۲۵
H-3	۳۰۰	۰/۰۱۱
	۶۰۰	۰/۰۱۹
	۱۰۰۰	۰/۰۲۱
H-E307-1	۳۰۰	۰/۰۳۲
	۶۰۰	۰/۰۳۶
	۱۰۰۰	۰/۰۳۷
H-E307-2	۳۰۰	۰/۰۲۴
	۶۰۰	۰/۰۲۷
	۱۰۰۰	۰/۰۲۸
H-E307-3	۳۰۰	۰/۰۱۹
	۶۰۰	۰/۰۲۵
	۱۰۰۰	۰/۰۲۶

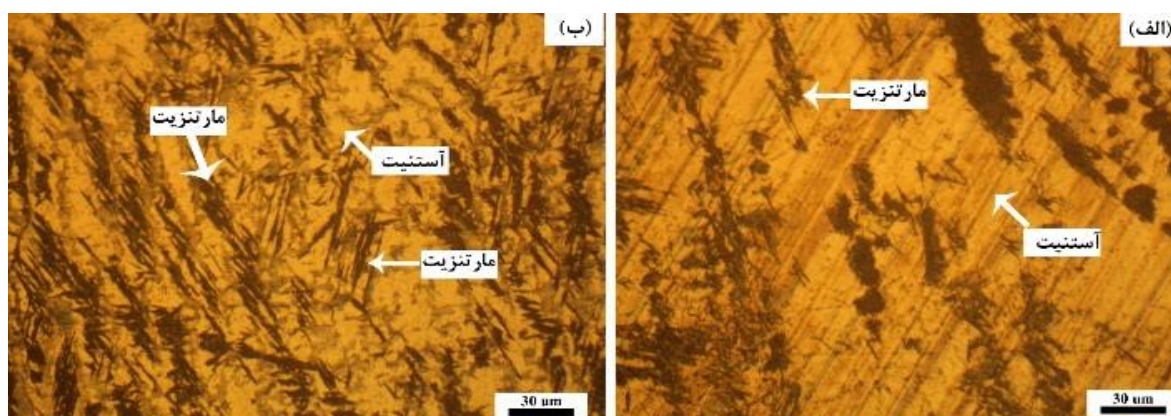
به منظور بررسی تأثیر لایه واسط بر روی رفتار سایشی نمونه‌های روکش سخت، نمونه H-1 که در آن یک لایه روکش سخت بدون لایه واسط و نمونه H-E307-1 که در آن یک لایه روکش سخت با لایه واسط صورت گرفته است مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

همان گونه که در جدول ۸ مشاهده می‌شود مقدار ماده جدا شده از جسم در نمونه H-1 کمتر از نمونه H-E307-1 است که این امر نشان دهنده مقاومت به سایش بهتر نمونه H-1 (بدون لایه واسط) نسبت به نمونه H-E307-1 (با لایه واسط) است. دلیل این امر هم آن است که همان گونه که در ریزساختار این دو نمونه مشاهده شد درصد حجمی آستنیت باقیمانده در نمونه H-E307-1 به مراتب بیشتر از آستنیت باقی‌مانده نمونه H-1 است. این موضوع در تصاویر ۲ و ۶ قابل مشاهده است.

همچنین در جدول ۸ میزان کاهش وزن نمونه‌های H-2، H-E307-2، H-3 و H-E307-3 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان گونه که در جدول ۸ مشاهده می‌شود اختلاف سایش این نمونه‌ها با یکدیگر به اندازه نمونه‌های با یک لایه روکش سخت نیست که دلیل آن تشابه ریزساختاری بیشتر آن‌ها از نظر درصد حجمی آستنیت و مارتنزیت با یکدیگر است. به طور کلی در شکل ۱۱ روند تغییرات نرخ سایش برای همه نمونه‌ها نشان داده شده است.

نکته قابل توجه دیگر در جدول ۸ آن است که با افزایش مسافت لغزش در هر نمونه شیب تغییرات کاهش جرم کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش مسافت لغزش روند افزایشی ماده جدا شده از نمونه افت می‌کند. دلیل این امر آن است که حین فرآیند سایش آستنیت باقی‌مانده درون ساختار به مارتنزیت تبدیل می‌شود. همان گونه که گفته شد حین فرآیند سایش سطح نمونه تحت تغییر شکل شدید پلاستیک قرار می‌گیرد در اثر این تغییر شکل پلاستیک شدید، آستنیت باقی‌مانده درون ساختار به مارتنزیت تبدیل شده و مقاومت به سایش را در مسافت‌های بالا افزایش می‌دهد [۵].

در اثر پدیده تبدیل آستنیت به مارتنزیت با اعمال تنش که به پدیده<sup>۱</sup> TRIP موسوم است، با افزایش کرنش کسر حجمی آستنیت به تدریج کاهش می‌یابد زیرا استحاله آستنیت به مارتنزیت رخ می‌دهد. همین استحاله آستنیت به مارتنزیت موجب بهبود خواص سایشی می‌شود [۶]. برای بررسی این پدیده به عنوان مثال ریزساختار نمونه H-E307-1 ریزساختار قبل و پس از آزمون سایش مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۰ (الف) تصویر ریزساختاری این نمونه قبل از آزمون سایش و در شکل ۱۰ (ب) تصویر ریزساختاری مقطع عرضی این نمونه پس از سایش در مسافت ۱۰۰۰ متر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پس از آزمون سایش کسر حجمی آستنیت کاهش و کسر حجمی مارتنزیت افزایش یافته است.

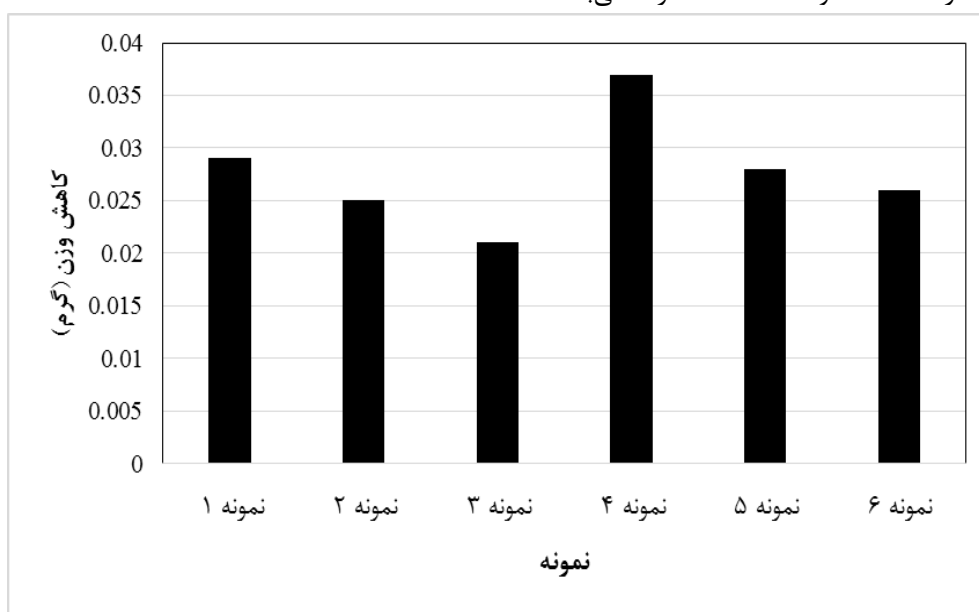


شکل ۱۰- تصویر ریزساختار میکروسکوپی نوری نمونه H-E307-1 (الف) قبل از آزمون سایش، (ب) پس از آزمون سایش در مسافت ۱۰۰۰ متر

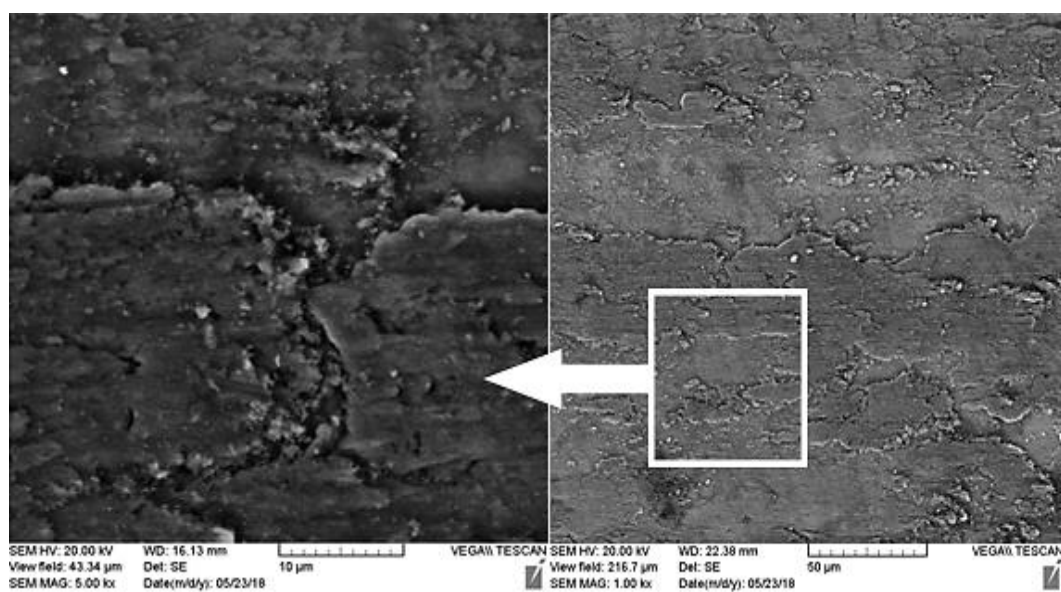
<sup>۱</sup>Transformation Induced Plasticity

و با ادامه دار شدن حرکت نسبی بین و دیسک حین سایش سطح سایش به صورت ورقه ورقه شده و از نمونه جدا می‌شود.

در شکل ۱۲ تصویر سطح سایش نمونه H-1 در دو بزرگنمایی مختلف نشان داده شده است. با دقت در این تصویر مشاهده می‌شود که سطح سایش به صورت ورقه ورقه درآمده که این مشخصه نشان دهنده سایش ورقه‌ای شده یا تورقی است. همان گونه که گفته شد بر اساس نظریه سایش تورقی، در اثر تغییر شکل پلاستیک ناشی از سایش، سطح سایش کارسخت شده و مستعد اشاعه ترک می‌باشد



شکل ۱۱- مقدار کاهش وزن نمونه‌های مختلف در مسافت ۱۰۰۰ متر



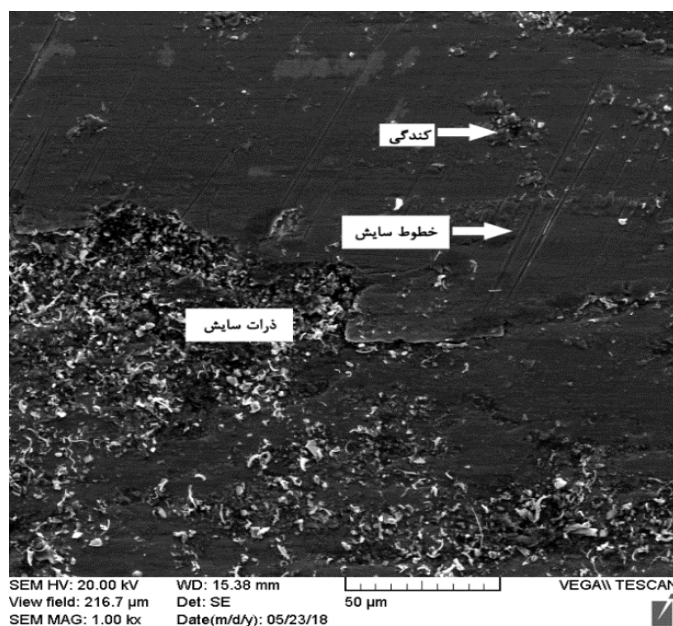
شکل ۱۲- تصویر سطح سایش نمونه H-1

کارسختی آن‌ها باشد. همچنین در اثر سایش و اصطکاک بین دو فلز (پین و دیسک سایش) دما بالا می‌رود و با بالا رفتن دما نرخ اکسیداسیون این ذرات جدا شده از جسم افزایش می‌یابد و لذا ذرات اکسیدی پدید می‌آیند که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات اکسیدی به صورت روشن مشخص می‌شوند. دلیل روشن دیده شدن این ذرات اکسیدی پدیده شارژ الکترون است که الکترون‌های باریکه الکترونی میکروسکوپ بر روی سطح این اکسیدها تجمع کرده و در نتیجه موجب روشن دیده شدن آن‌ها می‌شود.

تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح سایش نمونه H-E307-1 در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. در این شکل نیز خطوط سایش کم‌عمق، مناطق گندگی و ذرات سایش بر روی سطح مشخص است. به طور خلاصه میکرومکانیزم‌های سایش برای هر نمونه در جدول ۹ آورده شده است.

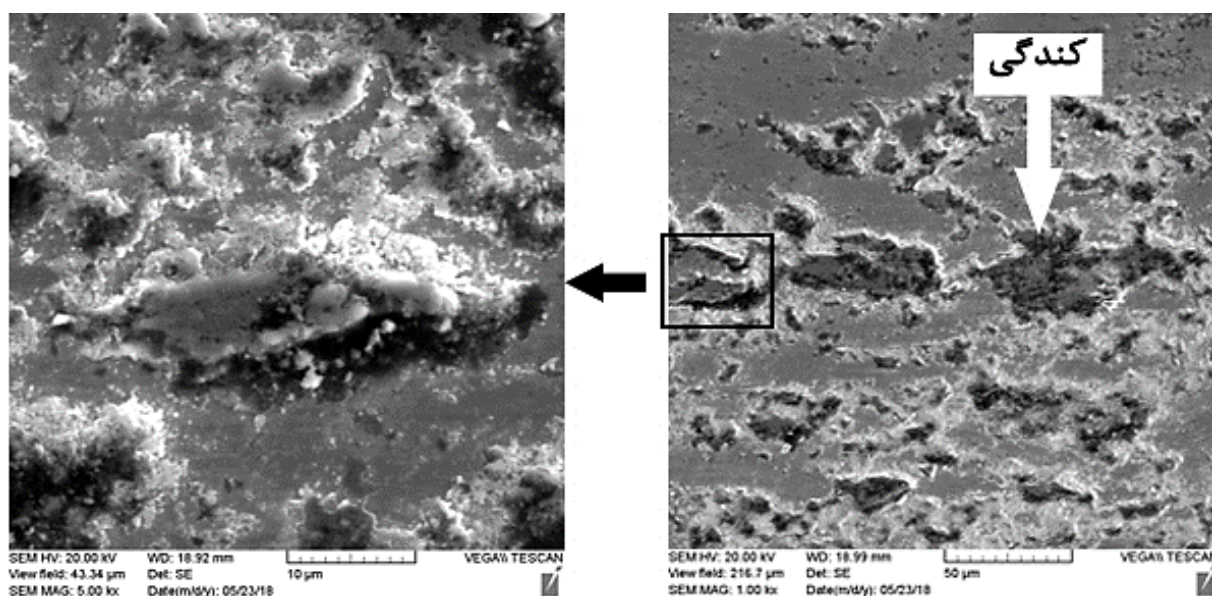
در شکل ۱۳ سطح سایش نمونه H-2 نشان داده شده است. در این شکل همان‌گونه که مشاهده می‌شود خطوط سایش کم‌عمق موازی با جهت لغزش در سایش، مناطق گندگی و ذرات سایش ۱ مشخص است. این خطوط سایش مشخصه مکانیزم سایش خراشان است که در اثر حرکت نسبی پین و دیسک بر روی نمونه ایجاد می‌شود و هر چه سختی نمونه بیشتر باشد عمق این خطوط و خراش‌ها کمتر خواهد بود. قسمت‌های گندگی ممکن است در اثر مکانیزم سایش چسبندگی ایجاد شده باشند. به طور کلی انتقال ماده از یک سطح به سطح دیگر حین حرکت نسبی از طریق فرآیندهایی نظیر جوش فاز جامد و یا اتصال موضعی بین سطوح در تماس با هم سایش چسبنده نامیده می‌شود که در اثر آن قسمتی از ماده جدا می‌شود.

ماده حین فرآیند سایش، به دفعات می‌تواند به جلو و عقب انتقال پیدا کرده و نهایتاً ذرات سایش را تشکیل دهند. تشکیل این ذرات می‌تواند به طور مستقیم ناشی از قابلیت

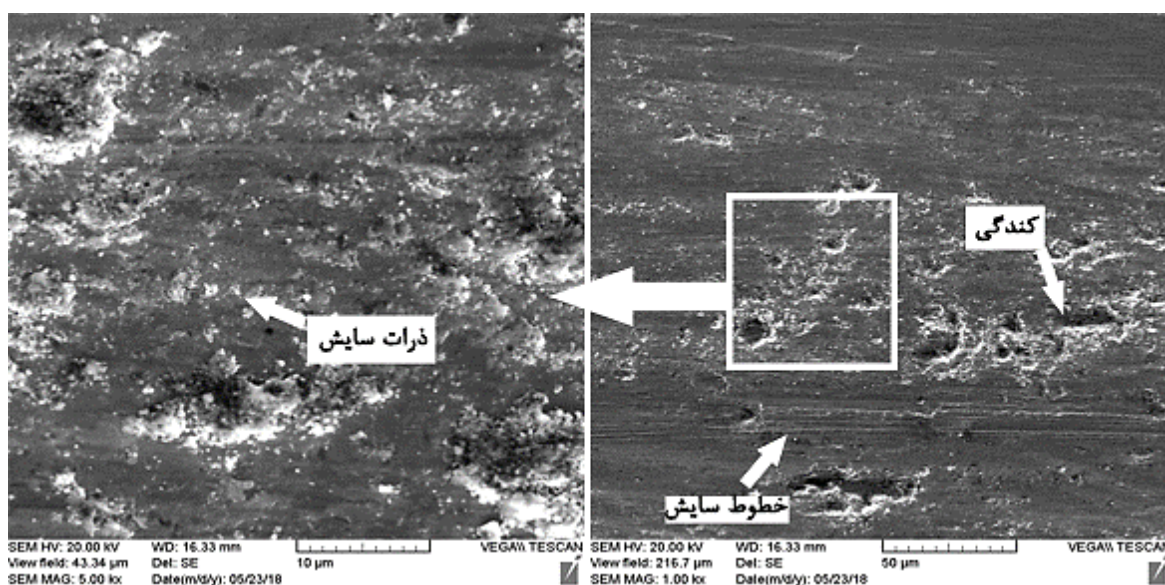


شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه H-2





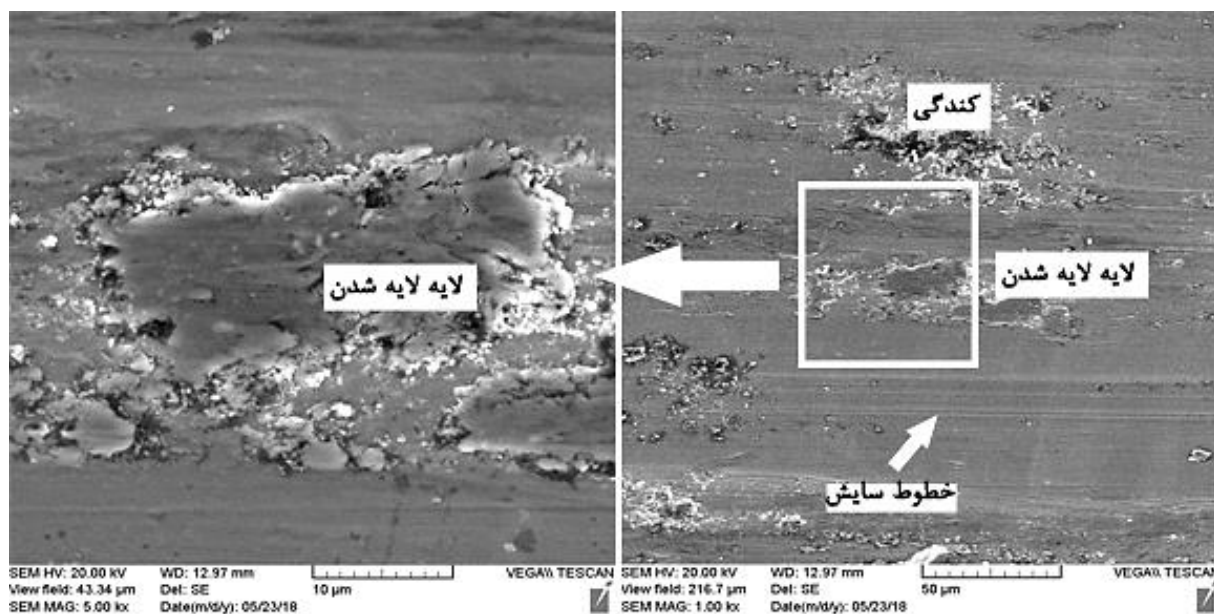
شکل ۱۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه H-3. وجود مناطق کندگی در این سطح مشهود است



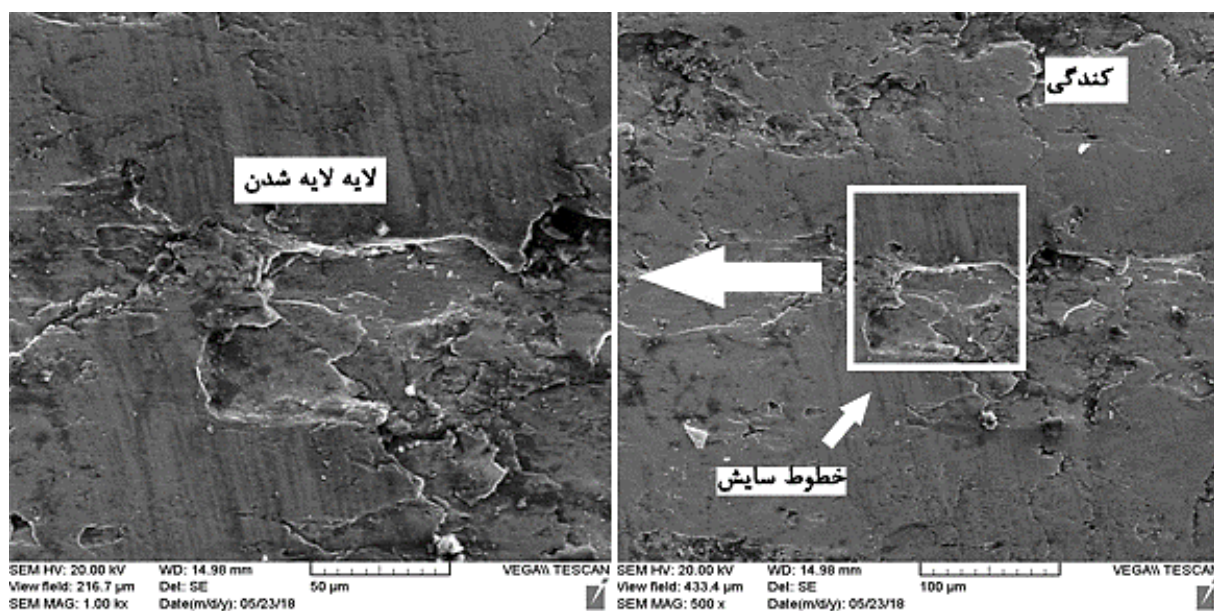
شکل ۱۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه H-E307-1

ریزترک‌ها ناشی از تغییر شکل پلاستیک مداوم و چرخه‌ای در اثر سایش پدید می‌آیند که در نهایت موجب جدا شدن ماده از سطح و ذرات سایش را تشکیل می‌دهند. جدول ۹ میکرومکانیزم سایش برای نمونه‌های مختلف را ارائه می‌دهد.

در شکل ۱۶ و ۱۷ به ترتیب سطح سایش نمونه H-E307-2 و H-E307-3 نشان داده شده است. در این دو تصویر نیز قسمت‌های کندگی، لایه لایه شدن و خطوط سایش به خوبی قابل مشاهده است. با دقت تصاویر در بزرگنمایی بالا حفرات عمیق و ترک‌های ریزی در قسمت لایه لایه شدن به چشم می‌خورد. در واقع این حفرات و



شکل ۱۶- سطح سایش نمونه H-E307-2



شکل ۱۷- سطح سایش نمونه H-E307-3

جدول ۹- میکرومکانیزم سایش برای نمونه‌های مختلف

میکرومکانیزم سایش	نمونه
مکانیزم سایش تورقی	H-1
مکانیزم سایش خراشان+چسبان	H-2
مکانیزم سایش چسبان	H-3
مکانیزم سایش چسبان+خراشان	H-E307-1
مکانیزم سایش چسبان+خراشان	H-E307-2
مکانیزم سایش چسبان+خراشان	H-E307-3

## نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی اثر درجه رقت و لایه واسط بر روی سختی و خواص سایشی روکش سخت فولاد ساده کربنی پرداخته شد که با تحلیل نتایج به دست آمده از آزمون مکانیکی نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- تمامی نمونه ها دارای فازهای آستنیت، مارتنزیت و کاربید بوده اند و تنها تفاوت نمونه ها، در میزان این فازها می باشد.
- ۲- با افزایش تعداد لایه روکش سخت، مقدار سختی در هر دو سری نمونه (با لایه واسط و بدون لایه واسط) مقدار سختی افزایش یافت. به گونه ای که در نمونه های بدون لایه واسط این مقدار از ۵۰ راکول به ۵۶ راکول و در نمونه های با لایه واسط از ۳۱ راکول به ۵۱ راکول رسید.

- ۳- سختی نمونه با یک لایه روکش سخت بدون لایه واسط ۱۹ راکول از سختی نمونه با یک لایه روکش سخت با لایه واسط بیشتر شد.
- ۴- مقدار مقاومت به سایش در هر دو سری نمونه (با لایه واسط و بدون لایه واسط) با افزایش تعداد لایه های روکش سخت افزایش یافت. به گونه ای که مقدار کاهش جرم برای نمونه های بدون لایه واسط از ۰/۰۲۲ گرم به ۰/۰۱۱ گرم و برای نمونه های با لایه واسط از ۰/۰۳۲ گرم به ۰/۰۱۹ گرم در مسافت ۳۰۰ متر رسید.
- ۵- به دلیل استحاله آستنیت به مارتنزیت در اثر تغییر شکل پلاستیک ناشی از سایش، با افزایش مسافت لغزش روند افزایشی جرم کنده شده از جسم کاهش می یابد.

## References:

[1] Davis J. R , 1990 , "Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys", ASM International, Institute of Materials, pp.430-439.

۲- بهرامی علی، امینی کامران، ثابت حامد، ۱۳۹۴، "تاثیر نوع الکتروود و تعداد پاس بر خواص سایشی و ریزساختار روکش ایجاد شده به روش زیر پودری بر روی فولاد کم آلیاژ 42CrMo4"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره دوم، صص: ۹۹-۱۱۶.

۳- ثابت حامد، امیرآبادی زاده سید رضا، صادقی محمد، میرزامحمد نوید، ۱۳۸۸، "بررسی ریزساختار و مقاومت به سایش لایه رویه سخت پایه Fe-C-Nb بر روی فولاد ساده کربنی"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال سوم، شماره سوم، صص: ۴۳-۵۰.

۴- ثابت، حامد، ۱۳۹۵، "اثر نسبت Cr/C بر ریزساختار و عمر خستگی حرارتی آلیاژ روکش سخت پایه Fe-Cr-C"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال دهم، شماره دوم، صص: ۴۳-۴۵.

۵- محمدی خواه.م ، ثابت.ح، میرزامحمد.ن، هادی زاده.ا، عطالهی.ع، ۱۳۹۱، "بررسی و مقایسه ریز ساختار، سختی و مقاومت به سایش ورق های فولادی روکش سخت پایه Fe-Cr-C (Carbidox) با ورق فولادی کوئنچ-تمپر شده تجاری"، سمپوزیم فولاد ۹۱.

۶- عظیمی.ق و شمعانیان.م، ۱۳۸۷، "روکش کاری فولادهای ساده کربنی با الکتروودهای پر کروم-پر کربن و ارزیابی ریز ساختار و رفتار سایشی"، علوم و مهندسی سطح ۶.

7- Amini, K., Bahrami, A., & Sabet, H., 2015, "Evaluation of Microstructure and Wear Behavior of Iron-based Hard-facing Coatings on the Mo40 Steel" International Journal of ISSI, pp. 1-8.

۸- ثابت حامد، ۱۳۹۲، "بازسازی قطعات تحت سایش به روش جوشکاری"، نشر فنی امیر.

۹- محمدی خواه مهدی، ثابت حامد، میرزا محمد نوید، هادی زاده اکبر، محرابیان سعید، شکیب سروش، ۱۳۹۱، "بررسی ریزساختار و مقاومت به سایش خراشان خشک و مرطوب لایه روکش سخت پایه Fe-C-B بر روی فولاد ساده کربنی"،

- فصلنامه فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ششم، شماره اول، صص: ۹۶-۸۹.
- ۱۰- محمدی خواه مهدی، ثابت حامد، شکوه فر علی، محرابیان سعید، هادی زاده اکبر، ۱۳۸۹، "بررسی و مقایسه ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش لایه های سخت کامپوزیتی ایجاد شده به روش جوشکاری FCAW حاوی TiC و TiCN بر روی فولاد ساده کربن"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال چهارم، شماره اول، صص: ۳۱-۲۱.
- 11- Grainger, S., & Blunt, J., 1998, "Engineering Coatings: Design and Application" Elsevier, pp. 42-55.
- 12- Bach, F. W., Möhwald, K., Laarmann, A., & Wenz, T., 2006, "Modern Surface Technology" John Wiley & Sons, pp. 11-23.
- 13- Graça, S., Colaço, R., & Vilar, R., 2007, "Indentation Size Effect in Nickel and Cobalt Laser Clad Coatings", Surface and Coatings Technology, pp. 538-548 .
- 14- The James F.1973 "The Procedure Hand Book of Arc Welding" , The Lincoln Electric Company.
- 15- Committee, A. I. H., 1992, "ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology" ASM International, Institute of Materials, pp. 1429-1439.
- 16- Modi, O., Prasad, B., Jha, A., Deshmukh, V., & Shah, A., 2004, "Effects of Material Composition and Microstructural Features on Dry Sliding Wear Behaviour of Fe-TiC Composite and a Cobalt-Based Stellite" Tribology Letters, pp. 129-138 .
- 17- Ballis, W., 1993, "Welding, Brazing and Soldering", ASM International, Institute of Materials ,Vol.6 , pp. 833-850 .
- 18- Hardsurfacing Application Manual, 1991, "A Guide for Selection Use of Hardfacing Welding Alloy", Teledyne Canada HARFAC-McKay: Publication, pp. 1-15.
- 19- Kou, S. , 2003 , "Welding Metallurgy", Hoboken: NJ: John Wiley & Sons, Inc., pp. 3-33.
- 20- Vanmuysen, L., 1972 , "Hardfacing with Co-Cr-X Alloys by Arc-Welding Processes" Cobalt, pp. 67-78 .
- 21- AWS A5.13, 1980 "Specification for Solid Surfacing Welding Rods and Electrodes, pp. 9-19.