

# اثر نسبت Cr/C بر ریزساختار و عمر خستگی حرارتی آلیاژ روکش سخت پایه Fe-Cr-C

حامد ثابت<sup>\*۱</sup>

۱- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

\*h-sabet@kiauo.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۳۰)

## چکیده

در تحقیق حاضر 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 ST 32 جوشکاری گردیدند. سپس نمونه هایی تهیه و آزمون های آنالیز شیمیایی (OES)، متالوگرافی نوری، SEM، XRD، و خستگی حرارتی بر روی آنها انجام شد. نتایج آزمون پراش پرتو X (XRD) نشان داد که ریز ساختار لایه روکش سخت نمونه روکش شده با الکتروود (پر کربن - پر کروم) AB شامل کاربید اولیه و یوکتیک  $\gamma + (Cr, Fe)_7C_3$  و نمونه روکش سخت شده با الکتروود (کم کربن - کم کروم) SD شامل آستنیت و مارتنزیت می باشد. تصاویر متالوگرافی نوری و الکترونی، آنالیز نقطه ای و نقشه توزیع عناصر نیز حضور فازهای فوق را تایید نموده است. نتایج آزمون خستگی حرارتی مشخص نمود در مجموع کلیه نمونه ها، بالاترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش شده با الکتروود (کم کربن - کم کروم) SD قطر ۴ میلی متر در حالت تک لایه با کمترین (غلظت عنصر کروم) درصد حجمی آستنیت باقی مانده و کاربید  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  با ریز ساختار اولیه آستنیت، مارتنزیت و کاربید  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  می باشد، کمترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود (پر کربن - پر کروم) AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در شرایط دو لایه با ریزساختار اولیه متشکل از کاربیدهای اولیه  $(Cr, Fe)_7C_3$  و یوکتیک  $\gamma + (Cr, Fe)_7C_3$  می باشد. همچنین مشخص گردید که ارتباط معکوسی بین سختی و عمر خستگی حرارتی وجود دارد و نمونه هایی با سختی بالاتر از عمر خستگی حرارتی کمتری (به علت تشکیل فازها و کاربیدهای پایدار و غیر قابل تجزیه) برخوردار هستند.

## واژه های کلیدی:

Fe-Cr-C، ریز ساختار، روکش سخت، خستگی حرارتی

## ۱- مقدمه

انجماد)، ریزساختار، نوع، شکل و توزیع فازهاست [۱-۳]. بر همین اساس لایه های روکش سخت پایه آهنی بر اساس نوع سیستم آلیاژی بکار برده شده و یا ریزساختار میکروسکوپی تقسیم بندی می شوند [۱ و ۳]. بر اساس نوع سیستم آلیاژی، لایه های روکش سخت به دو دسته حاوی Fe-Cr-C و Fe-C-X تقسیم بندی می شوند [۴]. آلیاژ Fe-Cr-C متداول ترین گروه از

سایش یکی از مهمترین عوامل تخریب قطعات مهندسی در صنعت است [۱]. عملیات جوشکاری به علت صرفه اقتصادی و ایجاد لایه های نسبتاً ضخیم و مقاوم نسبت به عملیات حرارتی، آبکاری و پوشش دادن در شرایط سایش خراشان و ضربه ارجحیت دارند [۱-۲]. خواص لایه های روکش سخت تابعی از ترکیب شیمیایی، شرایط انجماد، سرعت سرد شدن (بعد از

آلیاژهای روکش سخت محسوب می‌گردد زیرا از نظر هزینه نسبت به سایر آلیاژها اقتصادی‌تر می‌باشد، این آلیاژها در شرایط سایش خراشان شدید مانند قطعات مورد استفاده در صنایع سیمان و معدن به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مقاومت به سایش خراشان خوب این آلیاژها ناشی از وجود درصد حجمی بالایی از کاربیدها در یک زمینه چقرمه می‌باشد [۴۰]. یکی از مباحث موجود در مورد عملکرد این آلیاژها در صنایع فولاد سازی (غلتک های نورد گرم) تشکیل ترک و کنده شدن لایه های روکش سخت می‌باشد. از آنجایی که در طی عملیات نورد گرم سطح روکش غلتک به طور مداوم سرد و گرم می‌شود، لذا ترک های مذکور از نوع ترک های خستگی حرارتی می باشند [۵-۶]. بررسی ها نشان می دهد عوامل موثری بر عمر خستگی حرارتی یک آلیاژ موثر است که مهمترین آنها عبارتند از: ترکیب شیمیایی، ریز ساختار میکروسکوپی، سیکل گرم و سرد شدن [۵]. تحقیقات زیادی در خصوص، مقاومت به سایش آلیاژهای روکش سخت پایه Fe-Cr-C انجام شده است [۷-۱۰]، ولی تحقیقات محدودی در خصوص تشکیل ترک و خستگی حرارتی این خانواده از آلیاژهای روکش سخت انجام شده است. ثابت و همکارش در تحقیقی [۱۱] به بررسی نسبت Cr/C بر حساسیت به ترک لایه رسوبی مقاوم به سایش بر قطعات ریختگی چدن خاکستری GG25 روکش سخت شده به روش جوشکاری SMAW به همراه لایه واسط و بدون لایه واسط در شرایط دولایه و تک لایه پرداختند. نتایج تحقیق آنها مشخص نمود که طول ترک به ازای واحد سطح در رسوبات دو لایه، بیشتر از تک لایه می‌باشد که علت آن را حضور کسر حجمی بالاتر کاربیدها در رسوبات دو لایه و کاهش چقرمگی آنها نسبت به رسوبات تک لایه ذکر نمودند. همچنین آن‌ها مشخص نمودند که رسوبات پیشگرم شده طول ترک کمتری نسبت به رسوبات بدون پیشگرم دارند که علت آن را کاهش سرعت سرد شدن با اعمال پیشگرم و در نتیجه کاهش کرنش حرارتی دانستند. در تحقیقی که Liang Ma و همکارانش [۱۲] به بررسی تشکیل ترک و تنش های باقیمانده در روکش های سخت کاربرد

کروم پرداختند، مشخص شد که جوشکاری باعث ایجاد انقباض و انبساط های نامساوی بین لایه و زیرلایه می‌شود، که در نهایت باعث ایجاد تنش و کرنش های قابل توجهی در لایه روکش سخت می‌شود. آنها در توجیح این موضوع عنوان نمودند که وقتی تنش ها در یک منطقه افزایش یابند، ترک به دلیل تنش های منطقه ای ایجاد می‌شود و تنش های باقیمانده در مناطق مختلف ممکن است باعث ایجاد پوسته ای شدن و ورقه ای شدن روکش شوند. در تحقیق دیگری ثابت و همکارانش [۱۳] به بررسی تشکیل ترک در آلیاژ روکش سخت پایه Fe-Cr-C بر روی فولاد ساده کربنی پرداختند آنها گزارش دادند که در آلیاژ روکش سخت پایه Fe-Cr-C به علت سختی بالا و تفاوت در ضریب انبساط حرارتی آلیاژ روکش سخت و فلز پایه، عملیات روکش کاری سخت با تشکیل ترک های سطحی همراه است که باعث کاهش عمر مفید لایه های روکش سخت در شرایط سایش خراشان می‌شود، برای رفع این مشکل آنان کاهش رقت فلز پایه و پیشگرم کردن را توصیه نمودند. در تحقیقی Hou [۱۴] گزارش نمود که افزودن عنصر مولیبدن در محدوده ۲ تا ۶ درصد باعث بهبود مقاومت به شوک حرارتی آلیاژ روکش سخت می گردد، همچنین Hornung و همکارانش [۱۵] گزارش نمودند که در شرایط سایش ضربه ای نرخ سرد شدن بعد از جوشکاری بر تشکیل ترک های سطحی موثر می باشد. از آنجایی که نسبت Cr/C (ترکیب شیمیایی) نقش تعیین کننده ای بر (ریزساختار) [۱۳ و ۱۴] و عملکرد خستگی حرارتی آلیاژ دارد لذا در این تحقیق مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته شده است.

## ۲- روش انجام تحقیق

جهت انجام آزمون ها از ورق فولادی کم کربن ST 32 به ابعاد ۱۲×۲۰×۲۰ میلی متر به عنوان فلز پایه استفاده شد، جهت انجام آزمونها ۸ عدد صفحه فولادی تهیه و عملیات جوشکاری به روش SMAW با دونوع الکتروود روکش دار پایه Fe-Cr-C (تولید شرکت ASKANAK-TURKEY) با نام های تجاری SD-ABRA (پر کربن - پر کروم) و SD-60 (کم کربن - کم

کروم) مطابق جدول ۱ انجام شد. جدول ۲ ترکیب شیمیایی الکترودهای مصرفی را ارایه می دهد.

جدول (۱): شرایط جوشکاری نمونه ها

کد تجاری الکتروده	روش جوشکاری	قطبیت	تعداد لایه ها	قطر الکتروده (mm)	شدت جریان (A)	حرارت ورودی جوشکاری (J/mm)
SD-60	SMAW	DCEN	۱	۳/۲۵	۱۷۰	۳۰۰
			۲			
			۱	۴/۰	۲۱۰	۳۶۵
			۲			
SD-ABRA	SMAW	DCEN	۱	۳/۲۵	۱۷۰	۳۰۰
			۲			
			۱	۴/۰	۲۱۰	۳۶۵
			۲			

جدول (۲): ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) الکترودهای مورد استفاده در این تحقیق

کد تجاری الکتروده	C	Si	Mn	Cr	Fe
SD-60	۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۴۳	۶/۰	باقیمانده
SD-ABRA	۴/۵۲	۰/۲۲	۰/۴۱	۳۶/۰	باقیمانده

متالوگرافی نوری به کمک یک دستگاه میکروسکوپ نوری مدل Olympus BX51M مجهز به سیستم Image Analysis در حالت بعد از اچ (با محلول اچ نایتال ۵ درصد) بر روی نمونه ها انجام گردید، علاوه بر این جهت شناسایی فازها از نمونه های آماده سازی شده توسط یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA/TESCAN مجهز به سیستم تصویر برداری الکترون برگشتی<sup>۲</sup> و الکترون ثانویه<sup>۳</sup> با ولتاژ ۲۰ kv استفاده شد. همچنین آنالیز نقطه ای<sup>۴</sup> (EDS) و نقشه توزیع عناصر<sup>۵</sup> از زمینه و رسوبات جهت تشخیص بهتر ریز ساختار انجام شد. پراش پرتو X (XRD) توسط یک دیفراکتومتر<sup>۶</sup> مدل STAPI MP مجهز به سیستم PERT High Score X<sup>۷</sup> با استفاده از پرتو  $CuK_{\alpha}$  ( $\lambda = 1/54 \text{ \AA}$ ) و فیلتر نیکی انجام شد، برای این منظور دیفراکتومتری جهت رویش نمونه ها از زاویه ۱۰ تا ۱۱۰ درجه با اندازه پله های ۰/۰۴ درجه و زمان توقف ۸ ثانیه برای هر

بعد از عملیات جوشکاری، نمونه هایی از قطعات جوشکاری شده تهیه شدند و آزمونهای آنالیز شیمیایی، متالوگرافی نوری، پراش پرتو X، SEM، سختی و خستگی حرارتی انجام شد. ترکیب شیمیایی لایه روکش سخت به روش اسپکتروگرافی نشر نوری (OES) در فاصله یک میلی متر از سطح بعد از سنگ زنی سطح گرده های جوش مطابق استاندارد ASTM E1999 انجام شد. برای این منظور از دستگاه مدل OXFORD استفاده شد و ترکیب شیمیایی هر نمونه در دو نقطه از سطح با دقت ۰/۰۱ درصد تعیین گردید و متوسط ترکیب شیمیایی دو نقطه، به عنوان ترکیب شیمیایی لایه روکش سخت در نظر گرفته شد. همچنین درجه رقت<sup>۱</sup> لایه های روکش سخت بعد از تعیین آنالیز شیمیایی هر لایه از رابطه زیر تعیین گردید [۱۶]:

$$\text{درصد کروم لایه} = \frac{\text{درصد کروم الکتروده}}{100} \times 100 - \text{درصد رقت}$$

ج- خارج نمودن نمونه ها از کوره و خنک کردن نمونه ها به کمک اسپری آب به مدت ۳۰ ثانیه  
 د- قرار دادن مجدد نمونه ها درون کوره و گرم و سرد کردن مجدد  
 لازم به ذکر است سیکل گرم و سرد کردن نمونه ها تا تشکیل یک ترک سراسری بر روی سطح نمونه روکش سخت انجام گردید.

### ۳- نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی لایه های روکش سخت نمونه های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

پله تنظیم و آزمون مربوطه انجام شد. جهت بررسی سختی سطح از دستگاه سختی سنجی راکول C (HRC) مدل Oxford با بار ۱۰۰ کیلوگرم مطابق با استاندارد ASTM E18 استفاده شد و حداقل سختی ۳ نقطه از گرده های جوش تعیین گردید که متوسط نتایج آنها به عنوان معیار سختی سطح در نظر گرفته شد. آزمون خستگی حرارتی نیز به شرح زیر (مشابه شرایط کاری غلتک های نورد) در نظر گرفته شد و حداقل بر روی ۲ نمونه انجام گردید که متوسط نتایج آنها معیار عمر خستگی حرارتی لایه روکش سخت در نظر گرفته شد:

الف- گرم کردن نمونه ها تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد در کوره الکتریکی  
 ب- نگهداری به مدت زمان ۳ دقیقه در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد

جدول (۳): ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) لایه های روکش سخت شده

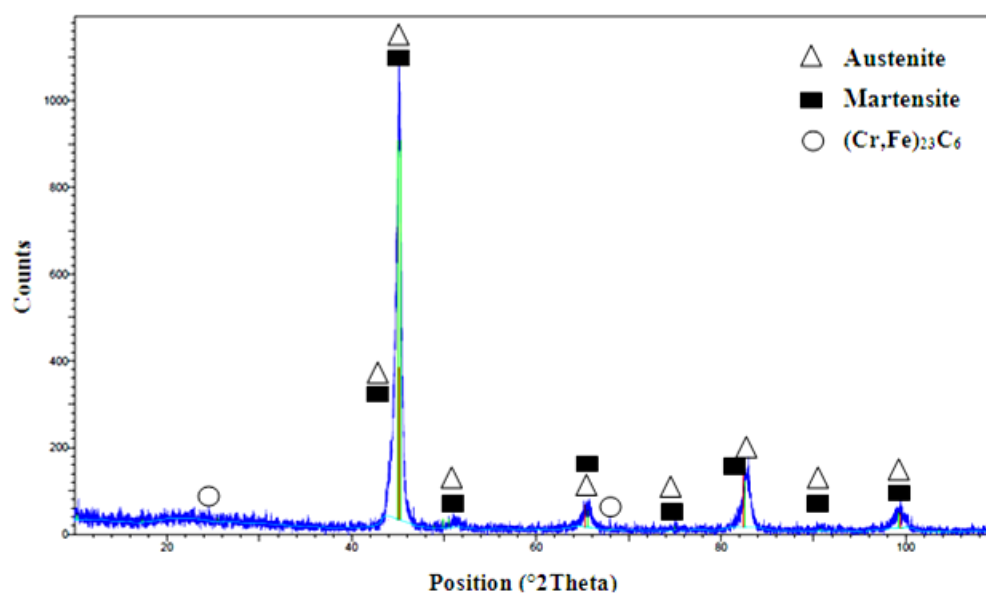
کد تجاری الکتروود	تعداد لایه ها	C	Si	Mn	Cr	Fe	Cr/C	درصد رقت
SD Ø ۳/۲۵	تک لایه	۰/۲۸	۰/۳۳	۰/۳۱	۳/۵۶	باقیمانده	۱۲/۷	۴۰
	دو لایه	۰/۴۱	۰/۴۴	۰/۳۳	۵/۷۱	باقیمانده	۱۳/۹	۵
SD Ø ۴/۰	تک لایه	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۲۲	۳/۰	باقیمانده	۱۵/۷	۵۰
	دو لایه	۰/۲۹	۰/۳۷	۰/۲۹	۴/۶۵	باقیمانده	۱۶/۱	۲۴
AB Ø ۳/۲۵	تک لایه	۴/۳۲	۰/۲۹	۰/۲۳	۳۱/۱۰	باقیمانده	۷/۲	۱۵
	دو لایه	۴/۵۱	۰/۲۳	۰/۳۸	۳۵/۰	باقیمانده	۷/۸	۳
AB Ø ۴/۰	تک لایه	۳/۲۹	۰/۳۱	۰/۲۶	۲۳/۳۵	باقیمانده	۷/۰	۳۵
	دو لایه	۴/۴۰	۰/۲۵	۰/۳۳	۳۴/۸۰	باقیمانده	۷/۹	۵

همانگونه که از جدول ۳ مشخص است با افزایش تعداد لایه های جوشکاری شده از یک لایه به دو لایه (برای هر دو نوع الکتروود) مقدار درصد رقت (امتزاج) فلز روکش سخت با زیر لایه (فولاد ساده کربنی) کاهش یافته است. برای مثال با توجه به نتایج جدول ۳ مشخص است که درصد رقت در نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر از ۴۰ درصد در حالت تک لایه به ۵ درصد در حالت دو لایه کاهش یافته است و یا در نمونه های روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۴/۰ میلی متر درصد رقت از ۴۰ درصد در حالت تک لایه به ۵ درصد در حالت دو لایه کاهش یافته است.

میلی متر درصد رقت از ۳۵ درصد در حالت تک لایه به ۵ درصد در حالت دو لایه کاهش یافته است. در نتیجه ترکیب شیمیایی فلز روکش سخت در حالت تک لایه و دو لایه با یکدیگر متفاوت بوده و در حالت دو لایه ترکیب شیمیایی فلز روکش به ترکیب شیمیایی الکتروود نزدیک تر شده است. از طرفی مقایسه ترکیب شیمیایی نمونه های روکش سخت شده با الکتروودهای قطر ۳/۲۵ و ۴/۰ میلی متر (SD یا AB) در حالت تک لایه نشان می دهد که درصد وزنی کربن و کروم در نمونه

جوشکاری شده با الکتروود قطر ۳/۲۵ میلی متر می باشد در نتیجه درصد رقت با افزایش حرارت ورودی جوشکاری افزایش یافته و این امر سبب کاهش غلظت عناصر کروم و کربن در ترکیب شیمیایی لایه روکش سخت شده است. نتایج پراش پرتو X نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه در شکل ۱ ارائه شده است.

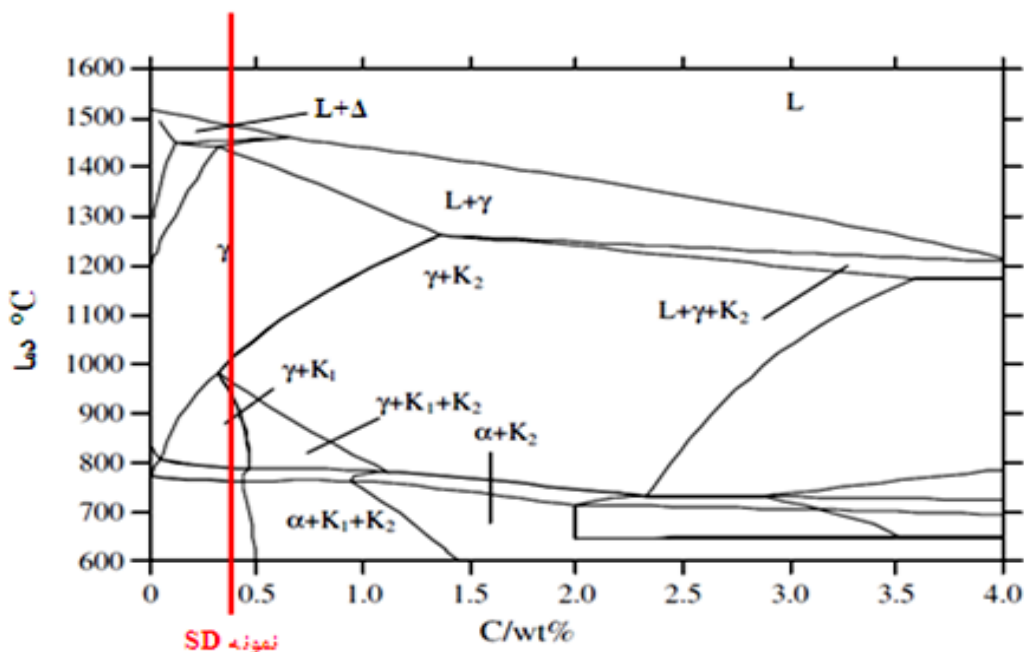
های قطر ۳/۲۵ میلی متر بیشتر از نمونه های روکش سخت شده با الکتروود قطر ۴/۰ میلی متر می باشد که این کاهش در نمونه های روکش سخت شده در حالت دو لایه نیز مشاهده می شود. از آنجایی که با افزایش قطر الکتروود در جوشکاری به روش الکتروود دستی شدت جریان جوشکاری افزایش می یابد [۳ و ۱۶]، لذا حرارت ورودی در هنگام جوشکاری با الکتروود قطر ۴/۰ میلی متر (در حالت تک لایه و دو لایه) بالاتر از نمونه



شکل (۱): الگوی پراش پرتو X نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه

تبدیل می گردد به نحوی که در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد فقط فاز آستنیت پایدار است و در ادامه به علت سرعت سرد شدن نسبتاً بالا فقط امکان تشکیل کاربیدهای  $(Cr,Fe)_23C_6$  به مقدار بسیار ناچیز فراهم است لذا پس از عبور از دمای Ms، استحاله آستنیت به مارتنزیت رخ می دهد. علت تشکیل مارتنزیت و آستنیت ناشی از غلظت عناصر کروم و کربن و سرعت سرد شدن بالا می باشد [۱۶]. رابطه میان مقدار کروم و کربن محتوی آستنیت با دمای شروع تشکیل مارتنزیت (MS) و همچنین دمای پایان استحاله مارتنزیت (Mf) به صورت زیر می باشد [۱۸]:

فازهای مشخص شده مربوط به این نمونه با ترکیب شیمیایی  $C=0/41\%$  و  $Cr=5/71\%$  شامل آستنیت و مارتنزیت و کاربیدهای  $(Cr, Fe)_23C_6$  می باشد. شکل ۲ دیاگرام فازی آهن - کربن در مقدار کروم ۶ درصد را نشان می دهد. با توجه به ترکیب شیمیایی، انجماد آلیاژ SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه با ترکیب  $C=0/41\%$  و  $Cr=5/71\%$  توسط دیاگرام مذکور میسر است. همانگونه که از دیاگرام مشخص است انجماد آلیاژ در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد با جوانه زنی فریت  $\Delta$  از مذاب شروع گشته و در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی گراد تحول پری تکتیک رخ می دهد با کاهش جزئی دما، در دمای ۱۴۱۰ درجه سانتی گراد تمامی فریت  $\Delta$  به فاز آستنیت



شکل (۲): دیاگرام فازی آهن-کربن با مقدار ۶ درصد وزنی کروم  $K_1 = (Cr,Fe)_{23}C_6$ ،  $K_2 = (Cr,Fe)_7C_3$  [۱۷]

شیمیایی لایه های روکش سخت درصد حجمی کاربیدهای  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  بسیار ناچیز بوده و در مقابل فازهای آستنیت باقی مانده پایدار و مارتنزیت در ریز ساختار تشکیل شده است.

جدول ۴ درصد وزنی عناصر، نسبت کروم به کربن، دمای تشکیل و پایان استحاله مارتنزیت و همچنین درصد فازهای تشکیل شده در نمونه های روکش سخت شده با الکتروود SD را ارائه می دهد. همانگونه که از جدول مذکور مشخص است به علت پایین بودن درصد وزنی کربن و کروم موجود در ترکیب

جدول (۴): درصد(وزنی) کروم و کربن دمای  $M_s$  و  $M_f$  و درصد فازها در لایه های روکش سخت شده با الکتروود SD.

ریز ساختار(درصد حجمی)			دمای پایان استحاله $M_f$ مارتنزیت (°C)	دمای تشکیل استحاله مارتنزیت $M_s$ (°C)	درصد رقت	Cr/C	Cr	C	تعداد لایه-ها	کد تجاری الکتروود
$(Cr,Fe)_{23}C_6$	M	A								
۳	۸۵	۱۲	۲۵	۲۵۰	۴۰	۱۲/۷	۳/۵۶	۰/۲۸	تک لایه	SD Ø ۳/۲۵
۵	۷۵	۲۰	-۳۵	۱۸۰	۵	۱۳/۹	۵/۷۱	۰/۴۱	دو لایه	
۲	۹۰	۸	۵۵	۲۸۰	۵۰	۱۵/۷	۳/۰	۰/۱۹	تک لایه	SD Ø ۴/۰
۳	۸۲	۱۵	۲	۲۲۷	۲۴	۱۶/۱	۴/۶۵	۰/۲۹	دو لایه	

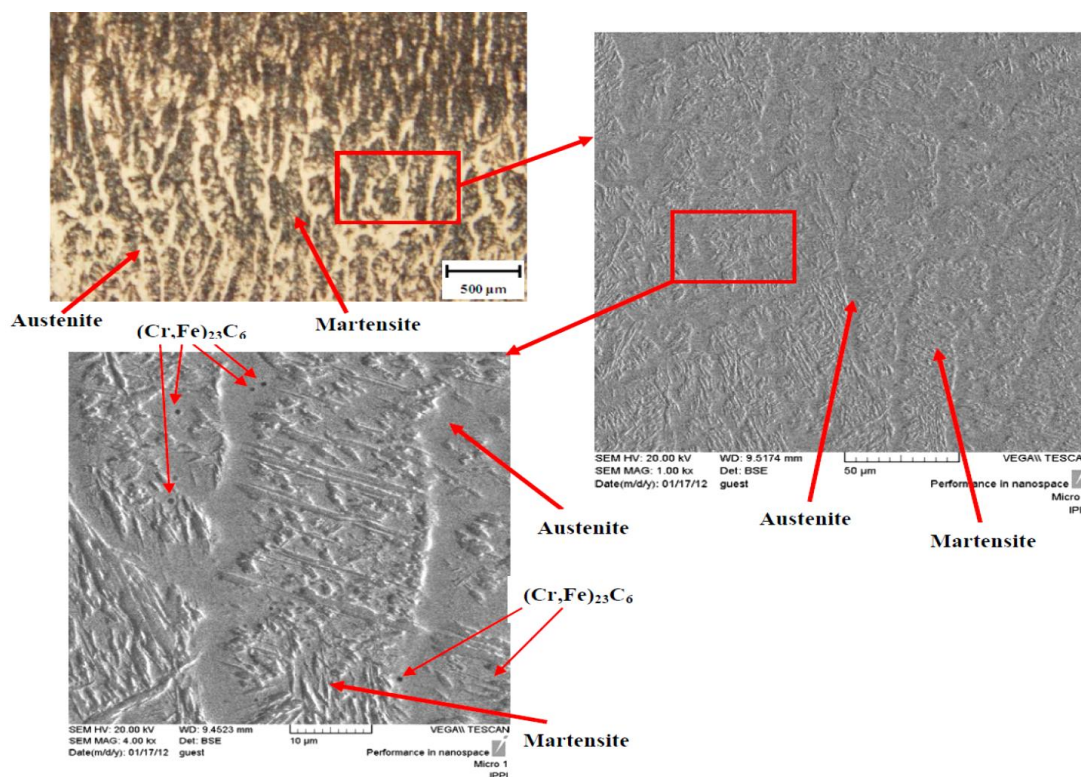
فاز آستنیت از ۱۲ درصد در حالت تک لایه به ۲۰ درصد در حالت دو لایه افزایش یافته همچنین درصد حجمی مارتنزیت با افزایش تعداد لایه ها از ۸۵ درصد در حالت تک لایه به ۷۵

از طرفی مقایسه نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت تک لایه و دو لایه، نشان می دهد که با افزایش تعداد لایه ها از حالت تک لایه به دو لایه درصد حجمی

درصد حجمی آستنیت از ۸ درصد در حالت تک لایه به ۱۵ درصد در حالت دو لایه و کاهش درصد حجمی مارتنزیت از ۹۰ درصد در حالت تک لایه به ۸۲ درصد در حالت دو لایه شده است.

شکل ۳ تصویر ریزساختار نمونه روکش سخت شده با الکتروند SD قطر ۳/۲۵ میلی متر را در حالت دو لایه نشان می دهد. همانگونه که از شکل مشخص است مناطق تیره ساختار مارتنزیت با ۷۵ درصد حجمی و مناطق روشن نشانگر زمینه آستنیتی با ۲۰ درصد حجمی می باشد. همچنین در تصاویر SEM گرفته شده از نمونه روکش سخت شده که در شکل ۳ ارائه شده است تیغه های مارتنزیت به همراه مقادیر کم کاربیدهای  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  قابل مشاهده است.

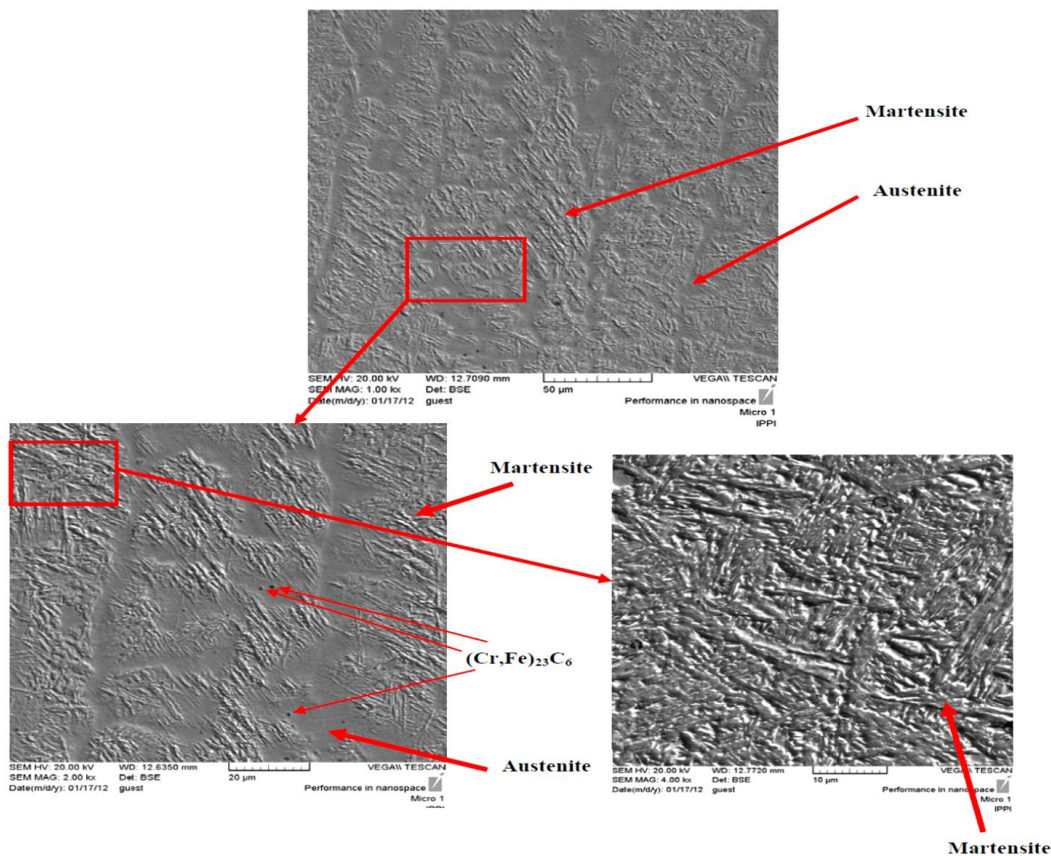
درصد در حالت دو لایه کاهش می یابد. علت این امر ناشی از کاهش دمای MS از ۲۵۰ به ۱۸۰ درجه سانتی گراد از حالت تک لایه به دو لایه و همچنین کاهش دمای Mf از ۲۵ درجه سانتی گراد در حالت تک لایه به ۳۵- درجه سانتی گراد در حالت دو لایه می باشد. افزایش درصد حجمی آستنیت و کاهش درصد حجمی مارتنزیت بواسطه کاهش دمای تشکیل و پایان استحاله مارتنزیت در نمونه روکش سخت شده با الکتروند SD قطر ۴/۰ میلی متر از حالت تک لایه به دو لایه نیز مشاهده می گردد به نحوی که با کاهش دمای Ms از ۲۸۰ درجه سانتی گراد در حالت تک لایه به ۲۲۷ درجه سانتی گراد در حالت دو لایه و همچنین کاهش دمای Mf از ۵۵ درجه سانتی گراد در حالت تک لایه به ۲ درجه سانتی گراد در حالت دو لایه سبب افزایش



شکل (۳): تصویر ریز ساختار میکروسکوپی نمونه روکش سخت شده با الکتروند SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه

حجمی به همراه مقادیر کم کاربیدهای  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  در زمینه آستنیتی (۱۵ درصد حجمی) قابل مشاهده است.

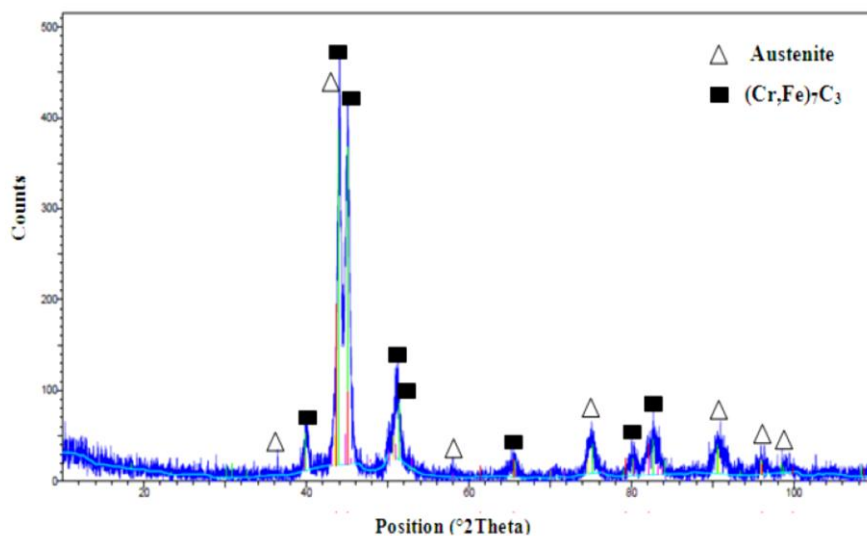
شکل ۴ تصویر SEM از لایه دوم نمونه روکش سخت شده با الکتروند SD قطر ۴/۰ میلی متر را نشان داده است. همانگونه که از شکل مشخص است فازهای مارتنزیت تیغه ای با ۸۲ درصد



شکل (۴): تصویر SEM نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD قطر ۴/۰ میلی متر در حالت دو لایه

همانگونه که از شکل مشخص است فازهای تشکیل شده در این نمونه شامل کاربیدهای  $(Cr,Fe)_7C_3$  و فاز آستنیت می باشد.

شکل ۵ الگوی پراش پرتو X در نمونه روکش سخت شده با الکتروود قطر ۳/۲۵ میلی متر را در حالت دو لایه نشان می دهد.

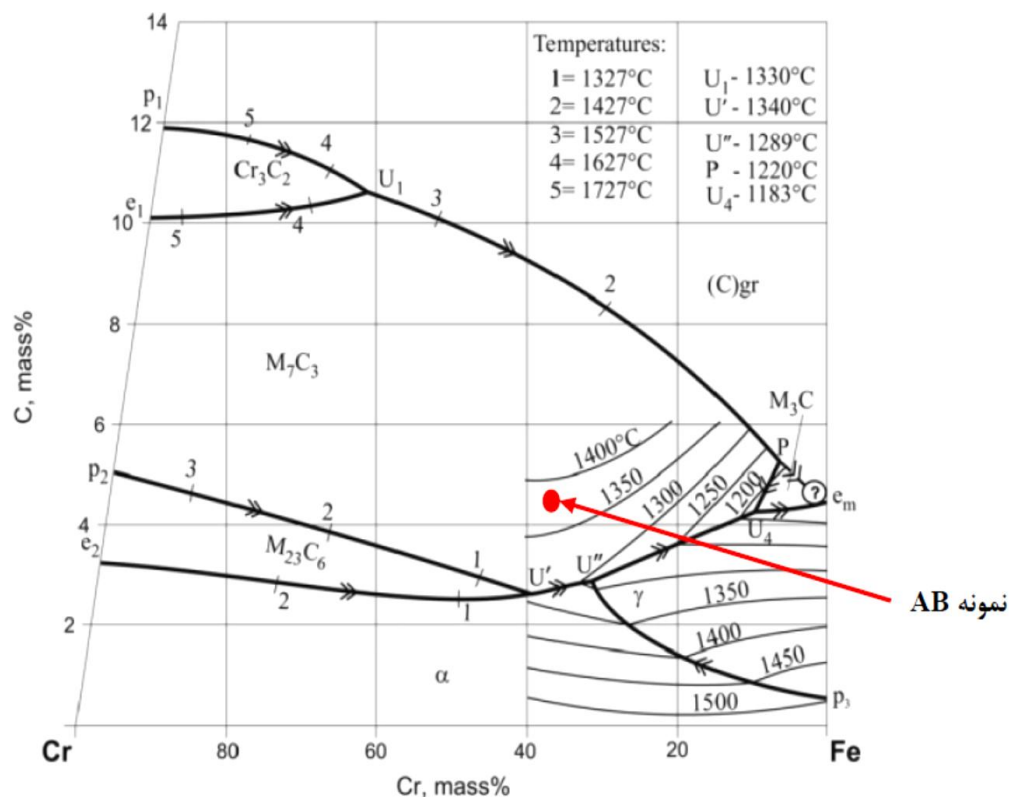


شکل (۵): الگوی پراش پرتو X نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه



شود و در نهایت استحاله یوتکتیک  $L \rightarrow \gamma + (Cr,Fe)_7C_3$  در دمای ۱۲۸۰ درجه سانتی گراد رخ می دهد. بعد از انجماد و سرد شدن سریع نمونه تا دمای محیط زمان کافی برای انجام استحاله های تعادلی وجود نداشته و به علت حضور مقدار کربن و کروم بالا در آلیاژ دمای استحاله آستنیت به مارتنزیت  $M_s$  به زیر دمای محیط منتقل شده که در نتیجه آن استحاله آستنیت به مارتنزیت رخ نداده و کاربیدهای اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  به همراه یوتکتیک  $\gamma + (Cr,Fe)_7C_3$  در ساختار تشکیل شده است.

جهت بررسی دقیق تر، مراحل انجماد آلیاژ بررسی می گردد. دیاگرام تعادلی آلیاژ Fe-Cr-C روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه در شکل ۶ نشان داده شده است. انجماد آلیاژ Fe-Cr-C با ترکیب شیمیایی هایپر یوتکتیکی شامل  $C = 4.51\%$  و  $Cr = 35\%$  با جوانه زنی و رشد کاربیدهای اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  در دمای ۱۳۸۰ درجه سانتی گراد شروع گشته و با افزایش زمان انجماد، کاهش درجه حرارت و رشد کاربیدهای  $(Cr,Fe)_7C_3$  در حین انجماد، کربن محتوی مذاب کاهش یافته و به ترکیب یوتکتیک نزدیک می



شکل (۶): دیاگرام تعادلی Fe-Cr-C با مقدار ۳۵ درصد وزنی کروم و ۴/۵ درصد کربن [۱۹]

میدهد که با افزایش تعداد لایه ها از حالت تک لایه به دو لایه درصد حجمی کاربید اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  از ۳۴ درصد به ۴۸ درصد افزایش می یابد، همچنین درصد یوتکتیک  $\gamma + (Cr,Fe)_7C_3$  از ۶۶ درصد در حالت تک لایه به ۵۲ درصد

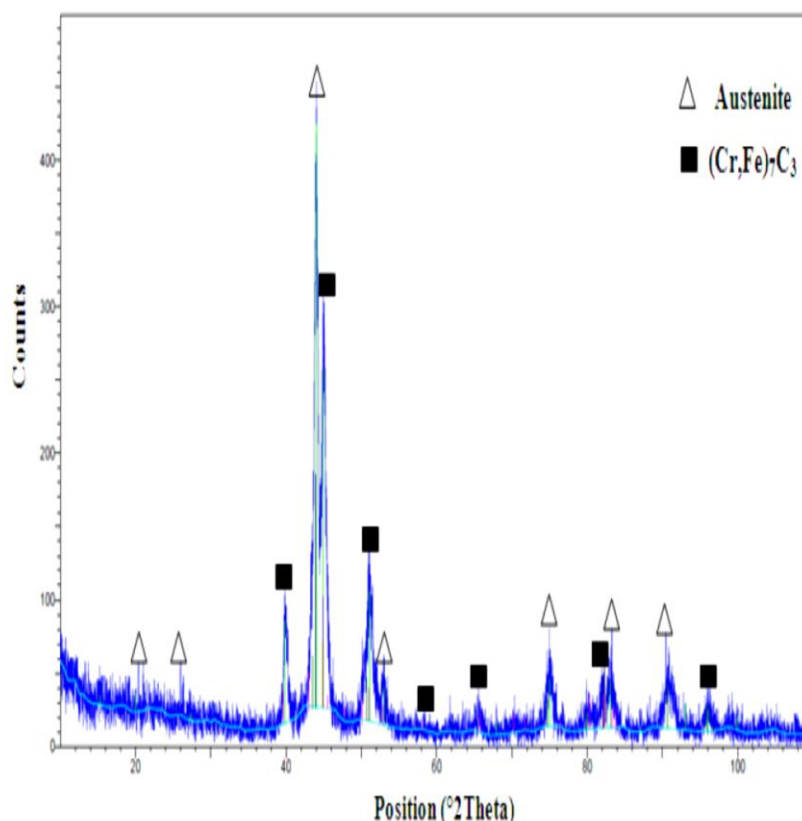
جدول ۵ درصد حجمی فازهای کاربید اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  و یوتکتیک  $\gamma + (Cr,Fe)_7C_3$  نمونه های روکش سخت شده با الکتروود AB را نشان می دهد. مقایسه نمونه روکش سخت شده با الکتروود قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت تک لایه و دو لایه نشان

درصد در حالت تک لایه به ۵۹ درصد در حالت دو لایه) در نمونه های روکش سخت شده با الکتروود قطر ۴/۰ میلی متر نیز مشاهده می گردد که علت این امر ناشی از کاهش درجه رقت (از ۳۵ درصد در حالت تک لایه به ۵ درصد در حالت دو لایه) بواسطه افزایش درصد وزنی کربن از ۳/۲۹ به ۴/۴ و همچنین افزایش درصد وزنی کروم از ۲۳/۳۵ به ۳۴/۸۰ در ترکیب شیمیایی لایه ها بوده است.

در حالت دو لایه کاهش یافته است که علت این امر ناشی از کاهش درصد رقت از ۱۵ درصد در حالت تک لایه به ۳ درصد در حالت دو لایه، افزایش درصد(وزنی) کربن از ۴/۳۲ به ۴/۵۱ و همچنین افزایش درصد(وزنی)کروم از ۳۱/۱۰ درصد به ۳۵ درصد می باشد. از طرفی افزایش درصد حجمی کاربیدهای اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  (از ۲۸ درصد در حالت تک لایه به ۴۱ درصد در حالت دو لایه) و کاهش یوتکتیک  $\gamma + (Cr,Fe)_7C_3$  (از ۷۲

جدول(۵): درصد(وزنی)کروم و کربن به همراه درصد رقت و درصد فازها در لایه های روکش سخت شده با الکتروود AB

ریز ساختار(درصد حجمی)		درصد رقت	Cr/C	Cr	C	تعداد لایه ها	کد تجاری الکتروود
یوتکتیک $\gamma + (Cr,Fe)_7C_3$	کاربید اولیه						
۶۶	۳۴	۱۵	۷/۲	۳۱/۱۰	۴/۳۲	تک لایه	AB ۳/۲۵Ø
۵۲	۴۸	۳	۷/۸	۳۵	۴/۵۱	دو لایه	
۷۲	۲۸	۳۵	۷/۰	۲۳/۳۵	۳/۲۹	تک لایه	AB ۴/۰Ø
۵۹	۴۱	۵	۷/۹	۳۴/۸۰	۴/۴۰	دو لایه	

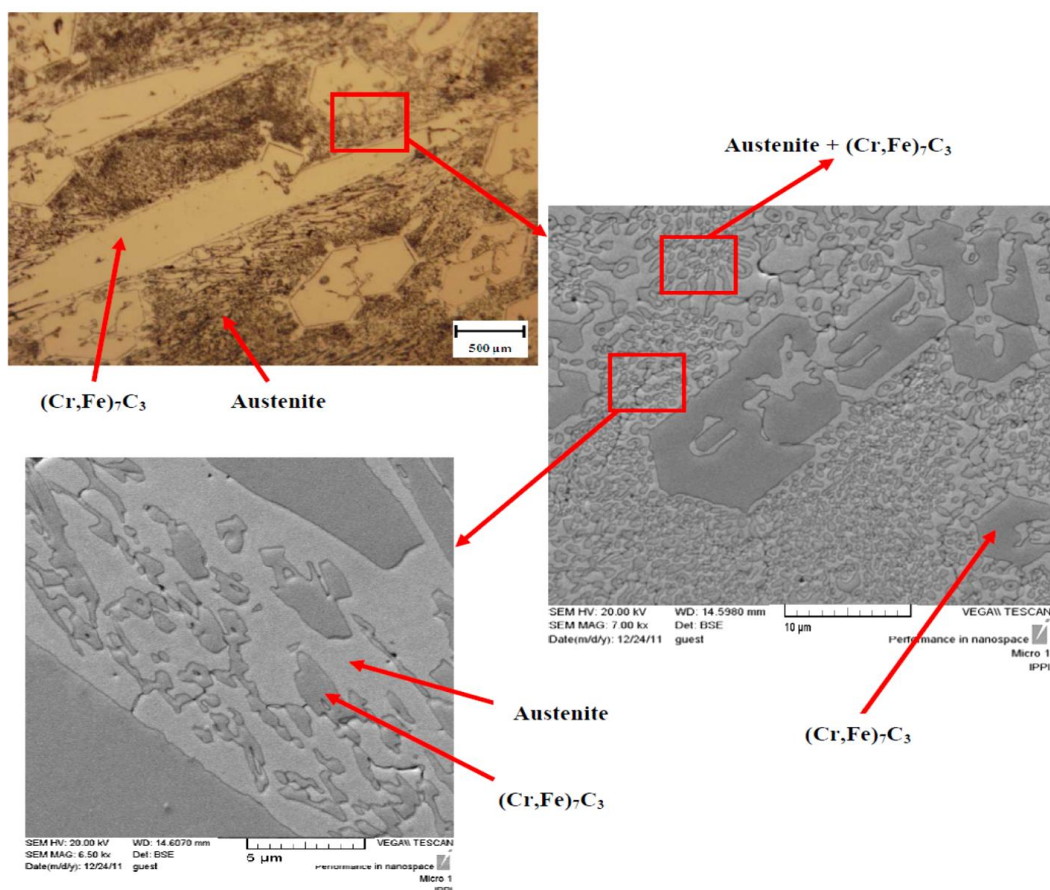


شکل(۷): الگوی پراش پرتو X نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۴/۰ میلی متر در حالت دو لایه

روکش سخت از کاربیدهای اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  و یوتکتیک  $\gamma + (Cr,Fe)_7C_3$  تشکیل شده است.

تصاویر متالوگرافی نوری و SEM مربوط به لایه دوم نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در شکل ۸ ارائه شده است. کاربیدهای  $(Cr,Fe)_7C_3$  بصورت مناطق روشن و زمینه یوتکتیک  $\gamma + (Cr,Fe)_7C_3$  بصورت مناطق تیره تر در شکل نشان داده شده است.

شکل ۷ الگوی پراش پرتو X نمونه روکش سخت شده با الکتروود قطر ۴/۰ میلی متر را در حالت دو لایه نشان می دهد. فازهای تشکیل شده در این نمونه نیز شامل ۴۱ درصد کاربید اولیه به همراه ۵۹ درصد یوتکتیک  $\gamma + (Cr,Fe)_7C_3$  می باشد. مراحل انجام آلیاژ های پریوتکتیک فوق با ترکیب شیمیایی ۴/۴۰ درصد کربن و ۳۴/۸۰ درصد کروم مشابه با آلیاژ روکش سخت شده با الکتروود قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه می باشد که قبلاً توضیح داده شده است. لذا ریز ساختار میکروسکوپی لایه

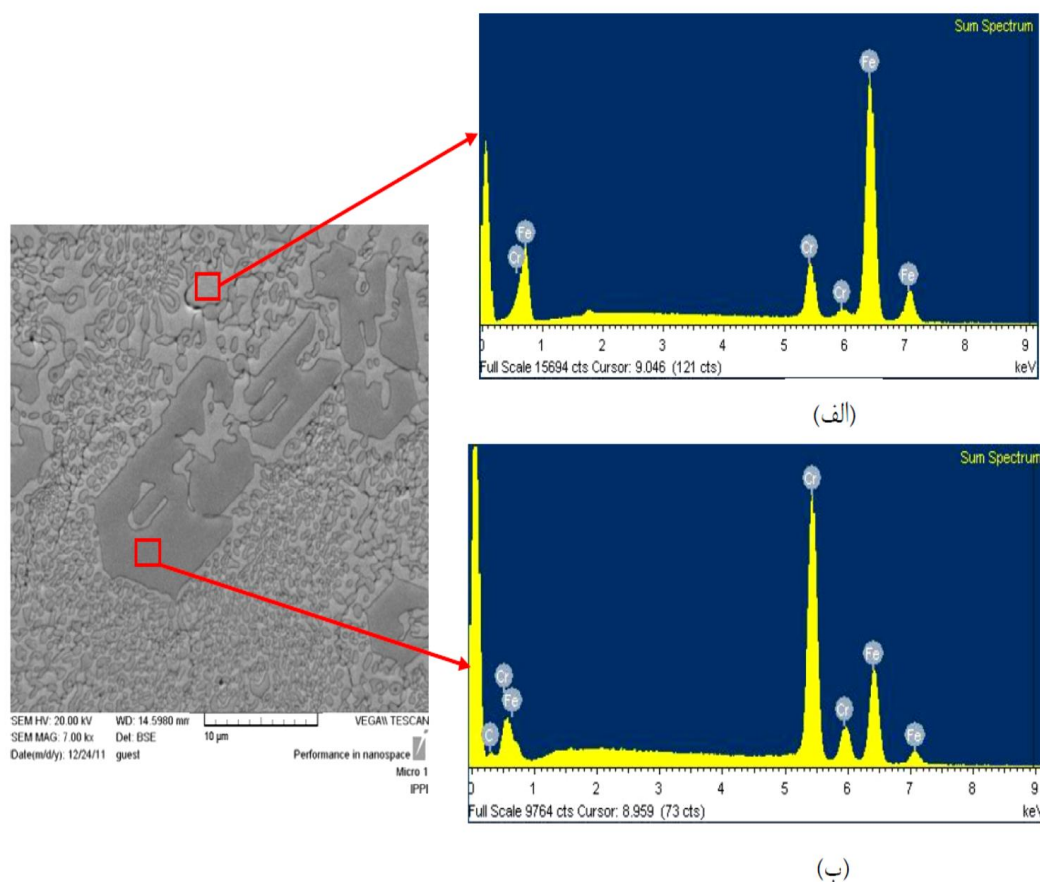


شکل (۸): تصویر ریز ساختار میکروسکوپی نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه

همانگونه که در شکل ۹ الف مشاهده می گردد فاز آستنیت یوتکتیک، غنی از آهن و مقادیر کم کروم می باشد و همچنین آنالیز نقطه ای از کاربید  $(Cr,Fe)_7C_3$  در شکل ۹ ب نشان دهنده

شکل ۹ بیانگر آنالیز نقطه ای EDS از آستنیت یوتکتیک و کاربیدهای اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  در نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه می باشد.

حضور مقادیر بالایی از آهن و کروم و کربن می باشد. همچنین جدول ۶ نتایج آنالیز EDS فازهای آستنیت یوتکتیک و کاربید اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  را ارایه می دهد.



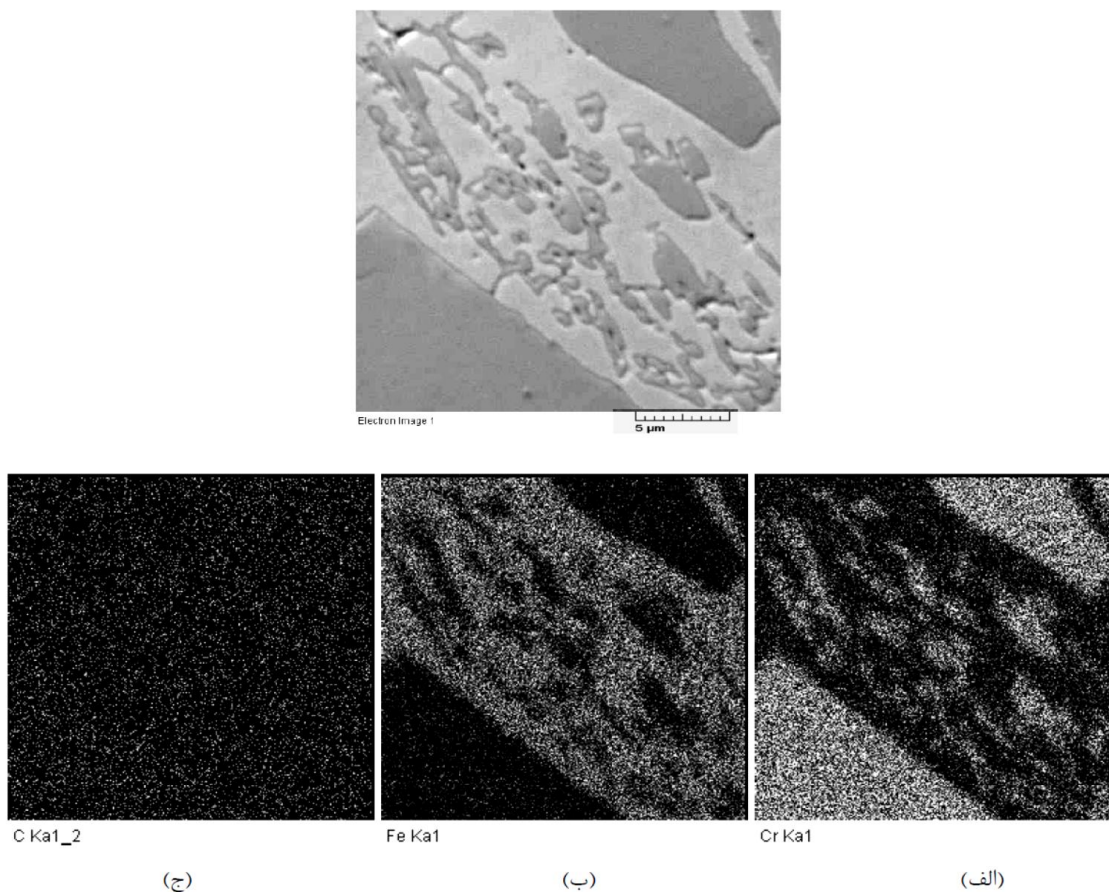
شکل (۹): آنالیز نقطه ای EDS نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه: (الف): آستنیت یوتکتیک و (ب): کاربید اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$

جدول (۶): آنالیز عنصری EDS فازهای مشخص شده در شکل ۹.

C	Fe	Cr	فاز
۲/۱	۹۱/۱	۶/۸	آستنیت یوتکتیک (درصد وزنی)
۲۲	۱۸	۵۵	کاربید اولیه (درصد اتمی)

کربن با توزیع نسبتاً یکنواخت هم در کاربیدهای اولیه و هم در کاربید یوتکتیک و آستنیت یوتکتیک توزیع شده است.

نقشه توزیع عناصر آلیاژی مختلف در نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانگونه که در شکل مشخص است عنصر کروم بیشتر در کاربیدهای اولیه و کاربیدهای یوتکتیک تمرکز دارند. در مقابل عنصر آهن در آستنیت یوتکتیک تمرکز دارد و



شکل (۱۰): توزیع عناصر مختلف در نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه: (الف): توزیع عنصر کروم، (ب): توزیع عنصر آهن و (ج): توزیع عنصر کربن

HRC ۵۸ در حالت دو لایه) افزایش یافته است علت این امر ناشی از افزایش نسبت Cr/C (در هر دو نوع الکتروود SD، AB) بواسطه کاهش درصد رقت از حالت تک لایه به حالت دو لایه و همچنین تغییرات ساختاری در لایه های روکش سخت می باشد. این موضوع برای نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD و AB) قطر ۴/۰ میلی متر نیز صادق است، در این نمونه ها با افزایش تعداد لایه ها، سختی (سطح) از حالت تک لایه به حالت دو لایه افزایش یافته است. از طرفی مقایسه سختی در حالت تک لایه و دو لایه نمونه های روکش سخت شده با الکتروود SD و AB با قطر های مختلف نشان می دهد که سختی سطح نمونه

جدول ۷ نتایج آزمون سختی سنجی از سطح نمونه های روکش سخت شده مختلف را ارائه می دهد. همانگونه که از نتایج جدول ۷ مشخص است با مقایسه سختی سطح نمونه های روکش سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت تک لایه و دو لایه با افزایش تعداد لایه ها مقدار سختی در سطح به میزان HRC ۶ (از HRC ۴۵ در حالت تک لایه به HRC ۵۱ در حالت دو لایه) افزایش یافته است. همچنین با مقایسه سختی سطح نمونه های روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت تک لایه و دو لایه با افزایش تعداد لایه ها میزان سختی در سطح به میزان HRC ۴ (از HRC ۵۴ در حالت تک لایه به

های مختلف جوشکاری شده با الکترودهای قطر ۳/۲۵ و ۴/۰ میلی متر می باشد. اصولاً با افزایش قطر الکتروود در جوشکاری الکتروود دستی حرارت ورودی جوشکاری افزایش یافته [۳] و به تبع آن رقت افزایش می یابد و ترکیب شیمیایی (نسبت Cr/C) لایه روکش سخت به فلز زیر لایه نزدیکتر می شود و لذا افزایش سختی از نرخ کمتری برخوردار خواهد بود [۱۰ و ۱۶].

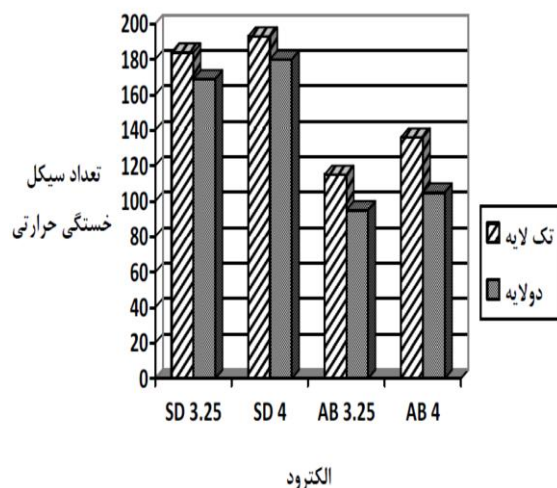
های روکش سخت شده در حالت تک لایه با الکتروود قطر ۳/۲۵ میلی متر بالاتر از نمونه روکش سخت شده با الکتروود قطر ۴/۰ میلیمتر است. این موضوع برای حالت دو لایه نیز صادق است. علت این امر ناشی از تفاوت در درصد رقت، نسبت Cr/C و تغییرات ساختاری لایه های روکش سخت می باشد که علت این تفاوت ها نیز ناشی از حرارت ورودی جوشکاری متفاوت نمونه

جدول (۷): نتایج سختی سنجی از سطح لایه های روکش سخت شده با الکتروود SD و AB

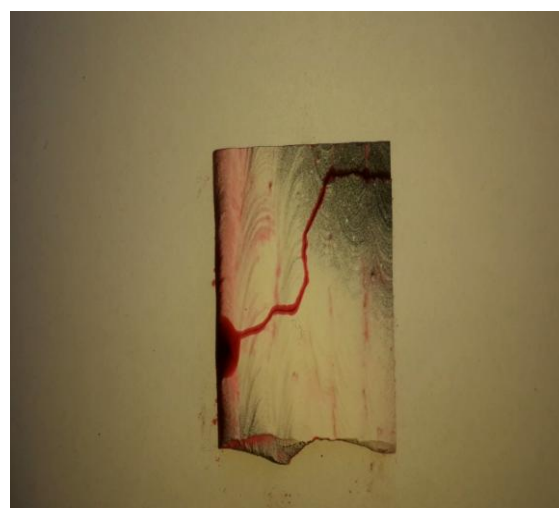
Cr/C	درصد رقت	حرارت ورودی J/mm	HRC سختی	تعداد لایه ها	کد تجاری الکتروود
۱۲/۷	۴۰	۳۰۰	۴۵	تک لایه	SD ۳/۲۵Ø
۱۳/۹	۵		۵۱	دو لایه	
۱۵/۷	۵۰	۳۶۵	۳۰	تک لایه	SD ۴/۰Ø
۱۶/۱	۲۴		۴۳	دو لایه	
۷/۲	۱۵	۳۰۰	۵۴	تک لایه	AB ۳/۲۵Ø
۷/۸	۳		۵۸	دو لایه	
۷/۰	۳۵	۳۶۵	۵۰	تک لایه	AB ۴/۰Ø
۷/۹	۵		۵۵	دو لایه	

جدول ۸ و ۹ نتایج آزمون خستگی حرارتی نمونه های روکش سخت شده با الکتروود SD و AB را ارائه می دهد. شکل ۱۲ نتایج آزمون خستگی حرارتی نمونه های مختلف را نشان می دهد.

شکل ۱۱ تصویر ترک خستگی حرارتی ایجاد شده (بعد از آزمون مایع نافذ) را بر روی نمونه روکش کاری سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه نشان می دهد.



شکل (۱۲): نتایج آزمون خستگی حرارتی نمونه های مختلف



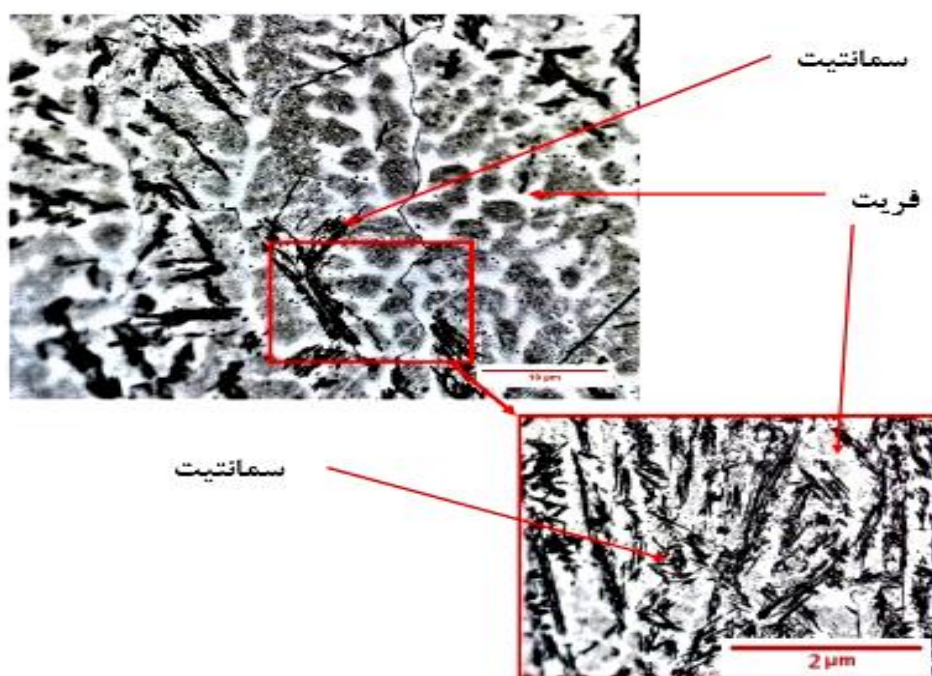
شکل (۱۱): تصویر ترک خستگی حرارتی ایجاد شده بر روی نمونه روکش کاری سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه

جدول (۸): نتایج آزمون خستگی حرارتی نمونه های روکش سخت شده با الکتروود SD

ریز ساختار (درصد حجمی)			تعداد سیکل خستگی حرارتی	Cr/C	Cr	C	تعداد لایه ها	کد تجاری الکتروود
(Cr,Fe) <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	M	A						
۳	۸۵	۱۲	۱۸۴	۱۲/۷	۳/۵۶	۰/۲۸	تک لایه	SD ۳/۲۵∅
۵	۷۵	۲۰	۱۶۹	۱۳/۹	۵/۷۱	۰/۴۱	دو لایه	
۲	۹۰	۸	۱۹۳	۱۵/۷	۳/۰	۰/۱۹	تک لایه	SD ۴/۰∅
۳	۸۲	۱۵	۱۸۰	۱۶/۱	۴/۶۵	۰/۲۹	دو لایه	

نمونه های روکش سخت شده با الکتروود SD از فاز مارتنزیت، آستنیت و کاربید های  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  تشکیل شده است. از آنجایی که سیکل گرم و سرد شدن نمونه ها (۶۰۰ درجه سانتی گراد تا دمای محیط) در محدوده دمایی تجزیه مارتنزیت و آستنیت بوده است [۲ و ۱۸] لذا تغییرات ساختاری در نمونه های روکش سخت در اثر سیکل های خستگی حرارتی رخ داده است. شکل ۱۳ ریزساختار نمونه های روکش کاری سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه را بعد از اعمال سیکل های خستگی حرارتی نشان می دهد.

بررسی نتایج جدول ۸ و شکل ۱۲ مشخص می نماید که بالاترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD قطر ۴ میلی متر در شرایط تک لایه می باشد (۱۹۳ سیکل) و کمترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در شرایط دو لایه می باشد (۱۶۹ سیکل). علت این امر ناشی از تفاوت درصد حجمی فازهای تشکیل شده در ریزساختار می باشد. اصولاً ریز ساختار میکروسکوپی بر عمر خستگی حرارتی موثر می باشد [۲ و ۸]. بررسی جدول ۸ مشخص می نماید که ریزساختار کلیه



شکل (۱۳): ریزساختار نمونه روکش کاری سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه بعد از اعمال سیکل های خستگی حرارتی

کم [۱۳] ( $2/4 \times 10^{-6} \text{ m/m K}$ ) شرایط را برای تمرکز تنش در اطراف کاربیدهای مذکور (وزمینه) افزایش داده و عمر خستگی حرارتی کاهش می یابد. لذا مشاهده می گردد که کمترین عمر خستگی حرارتی در نمونه های روکش سخت شده با الکتروود SD مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود  $3/25$  میلی متر در حالت دو لایه با حداکثر آستنیت باقی مانده و کاربید  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  در ریزساختار میکروسکوپی می باشد و بالاترین عمر خستگی حرارتی نیز مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود  $4$  میلی متر در حالت تک لایه با کمترین (غلظت عنصر کروم) درصد حجمی آستنیت باقی مانده و کاربید  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  می باشد.

بررسی نتایج جدول ۹ و شکل ۱۲ مشخص می نماید که بالاترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر  $4$  میلی متر در شرایط تک لایه می باشد (۱۳۶ سیکل) و کمترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر  $3/25$  میلی متر در شرایط دو لایه می باشد (۹۵ سیکل).

همانگونه که از شکل ۱۳ مشخص است فازهای مارتزیت و آستنیت در ریزساختار نمونه روکش کاری سخت شده با الکتروود SD قطر  $3/25$  میلی متر در حالت دو لایه در اثر اعمال سیکل های خستگی حرارتی به فازهای فریت و سمانتیت تجزیه شده اند و در نهایت ساختار میکروسکوپی نمونه به فازهای فریت، سمانتیت و کاربید  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  تبدیل شده است. علت اختلاف در عمر خستگی حرارتی نمونه های مختلف روکش سخت شده با الکتروود SD ناشی از ترکیب شیمیایی (عنصر کروم) و درصد حجمی کاربیدهای  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  می باشد. از آنجایی که عنصر کروم در ریزساختار این نمونه ها در فاز آستنیت حل شده است لذا با افزایش غلظت این عنصر در ترکیب شیمیایی لایه روکش سخت تجزیه شدن آستنیت (غنی از کروم) کندتر صورت می پذیرد [۱۲ و ۱۸ و ۲۰]، لذا حضور آستنیت با ضریب انبساط کم (به علت حضور عنصر کروم) [۱۳] ( $5/2 \times 10^{-6} \text{ m/m K}$ ) در ریزساختار شرایط را برای تمرکز تنش و کاهش عمر خستگی حرارتی مهیا می نماید. از طرفی با افزایش غلظت کربن و کروم در ترکیب شیمیایی لایه روکش سخت درصد حجمی فاز  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  با ضریب انبساط

جدول (۹): نتایج آزمون خستگی حرارتی نمونه های روکش سخت شده با الکتروود AB

ریز ساختار (درصد حجمی)		تعداد سیکل خستگی حرارتی	Cr/C	Cr	C	تعداد لایه ها	کد تجاری الکتروود
یوتکتیک	کاربید اولیه						
$\gamma + (Cr, Fe)_7C_3$		۱۱۵	۷/۲	۳۱/۱۰	۴/۳۲	تک لایه	AB 3/25Ø
		۹۵	۷/۸	۳۵	۴/۵۱	دو لایه	
		۱۳۶	۷/۰	۲۳/۳۵	۳/۲۹	تک لایه	AB 4/0Ø
		۱۰۵	۷/۹	۳۴/۸۰	۴/۴۰	دو لایه	

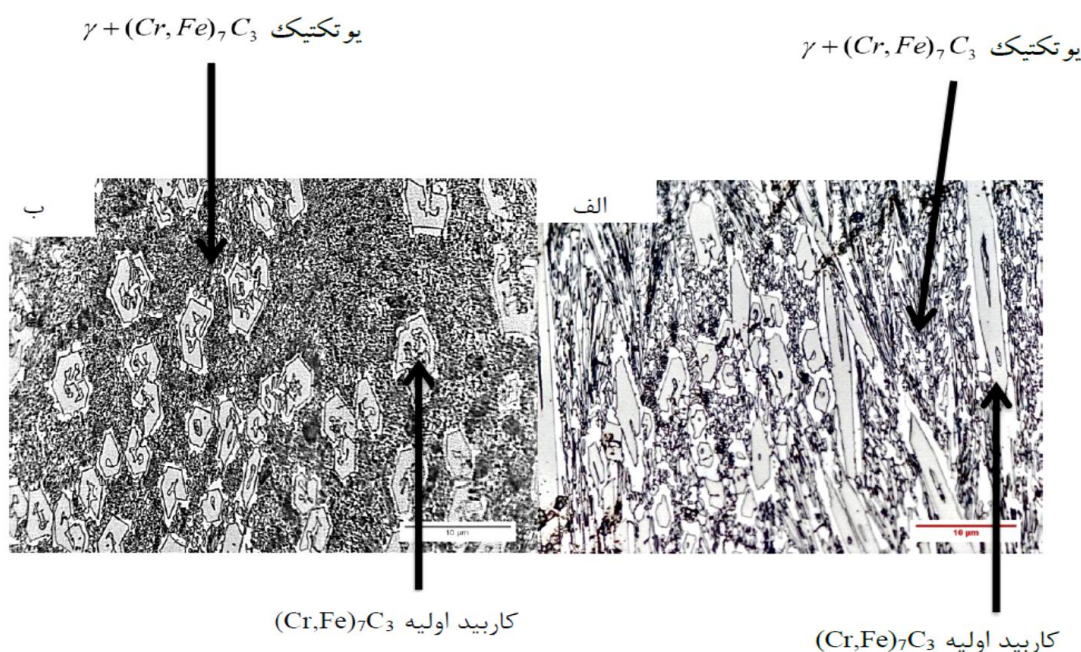
یوتکتیک  $\gamma + (Cr, Fe)_7C_3$  می باشد و تفاوت آنها در درصد حجمی فازهای مذکور می باشد. بررسی نتایج آزمون خستگی حرارتی (جدول ۹) مشخص می نماید که با افزایش درصد حجمی کاربیدهای اولیه  $(Cr, Fe)_7C_3$  عمر خستگی حرارتی کاهش می یابد که علت این امر ناشی از ضریب انبساط حرارتی

علت اختلاف در عمر خستگی حرارتی نمونه های روکش سخت شده با الکتروود AB مرتبط با ریزساختار میکروسکوپی (درصد حجمی فازها) می باشد. همانگونه که از جدول ۹ مشخص است ریزساختار میکروسکوپی نمونه های روکش سخت شده با الکتروود AB شامل کاربیدهای اولیه  $(Cr, Fe)_7C_3$  و



های روکش سخت شده با الکتروود AB طی سیکل های گرم و سرد شدن خستگی حرارتی تغییرنموده اند. شکل ۱۴ ریز ساختار نمونه روکش کاری سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه را بعد از اعمال سیکل های خستگی حرارتی نشان می دهد. همانگونه که از شکل ۱۴ مشخص است ریزساختار نمونه بعد از اعمال سیکل های خستگی حرارتی حاوی کاربیدهای اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  و یوتکتیک  $\gamma + (Cr,Fe)_7C_3$  می باشد و تغییری در ریزساختار رخ نداده است.

(کم) کاربیدهای مذکور می باشد [۱۲-۱۳]. اصولاً کاربیدهای  $(Cr,Fe)_7C_3$  از ضریب انبساط حرارتی کمی برخوردار بوده و با افزایش این فاز درصد حجمی آستنیت کاهش می یابد لذا با افزایش درصد حجمی کاربیدهای  $(Cr,Fe)_7C_3$  در ریزساختار شرایط برای افزایش تمرکز تنش در حین سیکل های گرم و سرد شدن خستگی حرارتی افزایش می یابد. از طرفی به علت بالا بودن غلظت عناصر کروم کربن در نمونه های روکش سخت شده با الکتروود AB، فاز آستنیت موجود در ریزساختار غنی از عناصر مذکور بوده که امکان تجزیه شدن آنها طی سیکل های خستگی حرارتی میسر نبوده (و بسیار کند صورت می پذیرد)، به عبارت دیگر ریزساختار نمونه



شکل (۱۴): ریزساختار نمونه روکش کاری سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در حالت دو لایه بعد از اعمال سیکل های خستگی حرارتی: (الف): مقطع طولی و (ب): مقطع عرضی

$(Cr,Fe)_{23}C_6$  با ریز ساختار اولیه آستنیت، مارتزیت و کاربید  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  می باشد، و کمترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در شرایط دو لایه با ریزساختار اولیه متشکل از کاربیدهای اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  و یوتکتیک  $\gamma + (Cr,Fe)_7C_3$  می باشد. از آنجایی

از طرفی با مقایسه نتایج جدول ۸ و ۹ و همچنین شکل ۱۲ مشخص می گردد که در مجموع کلیه نمونه ها بالاترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD قطر ۴ میلی متر در حالت تک لایه با کمترین (غلظت عنصر کروم) در صد حجمی آستنیت باقی مانده و کاربید

مارتنزیت و کاربید  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  می باشد، و کمترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در شرایط دو لایه با ریزساختار اولیه متشکل از کاربیدهای اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  و یوتکتیک  $(Cr,Fe)_7C_3 + \gamma$  می باشد.

۶- ارتباط معکوسی بین سختی و عمر خستگی حرارتی وجود دارد و نمونه هایی با سختی بالاتر از عمر خستگی حرارتی کمتری (به علت تشکیل فازها و کاربیدهای پایدار و غیر قابل تجزیه) برخوردار هستند.

### ۵- تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج در قالب طرح پژوهشی انجام شده است که از مسئولین محترم تشکر و قدردانی می‌شود.

### ۶- مراجع

- [1] ح. ثابت، "بازسازی قطعات تحت سایش به روش جوشکاری"، شرکت کاوش جوش، ۱۳۹۲.
- [2] Metal's Handbook "Friction, Lubrication, and Wear Technology", ASM, Vol 18, pp 320-336, 2003.
- [3] ح. ثابت، "متالورژی و تکنولوژی جوشکاری"، چاپ دوم، نشر فنی امیر، ۱۳۹۴.
- [4] ح. ثابت، ش. میردامادی، ش. خیراندیش و م. گودرزی "مروری بر فرآیندهای سخت کاری سطحی از طریق جوشکاری"، جوشکاری، شماره ۵۱، ص ۶۵-۶۰، پاییز ۱۳۸۷.
- [5] Weld Surfacing and Hardfacing, The Welding Institute Abington Cambridge, pp 32-46, 1980.
- [6] "The Practical Reference Guide For Hardfacing", AWS, pp 1-20, 2003.
- [7] D. K. Dwivedi "Microstructure and Abrasive Wear Behavior of Iron Base Hardfacing", Materials Science and Technology, Vol 10, pp. 10-20, 2004.
- [8] ح. ثابت، ش. میردامادی، ش. خیراندیش و م. گودرزی، "تأثیر مقادیر کروم و کربن بر ریز ساختار و مقاومت به سایش آلیاژ روکش سخت پایه  $Fe-(6X)Cr-(X)C$  بر روی فولاد ساده کربنی ایجاد شده با

که نمونه های روکش سخت ارتباط نزدیکی بین ریزساختار میکروسکوپی و سختی (و مقاومت به سایش خراشان) وجود دارد، نتایج این تحقیق مشخص می نماید که ارتباط معکوسی بین سختی و عمر خستگی حرارتی (جدول های ۸ و ۹) وجود دارد و نمونه هایی با سختی بالاتر از عمر خستگی حرارتی کمتری (به علت تشکیل فازها و کاربیدهای پایدار و غیر قابل تجزیه) برخوردار هستند.

### ۴- نتیجه گیری

- در این تحقیق اثر نسبت Cr/C بر ریز ساختار و عمر خستگی حرارتی آلیاژ روکش سخت پایه Fe-Cr-C ایجاد شده به روش الکتروود دستی بر روی فولاد ساده کربنی بررسی و نتایج زیر حاصل گردید:
- ۱- ریز ساختار آلیاژ روکش سخت پایه Fe-Cr-C با نسبت (وزنی)  $16/1 < Cr/C < 12/7$  در نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD متشکل از ساختار آستنیت - مارتنزیت و کاربید  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  می باشد.
  - ۲- ریز ساختار آلیاژ روکش سخت پایه Fe-Cr-C با نسبت (وزنی)  $7/9 < Cr/C < 7/0$  در نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB شامل ساختار کاربید اولیه  $(Cr,Fe)_7C_3$  اولیه و یوتکتیک  $(Cr,Fe)_7C_3 + \gamma$  می باشد.
  - ۳- بالاترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD قطر ۴ میلی متر در شرایط تک لایه می باشد (۱۹۳ سیکل) و کمترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD قطر ۳/۲۵ میلی متر در شرایط دو لایه (۱۶۹ سیکل) می باشد.
  - ۴- بالاترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۴ میلی متر در شرایط تک لایه می باشد (۱۳۶ سیکل) و کمترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود AB قطر ۳/۲۵ میلی متر در شرایط دو لایه (۹۵ سیکل) می باشد.
  - ۵- در مجموع کلیه نمونه ها، بالاترین عمر خستگی حرارتی مربوط به نمونه روکش سخت شده با الکتروود SD قطر ۴ میلی متر در حالت تک لایه با کمترین (غلظت عنصر کروم) در صد حجمی آستنیت باقی مانده و کاربید  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  با ریز ساختار اولیه آستنیت،

- [۱۶] ج. عزیز پور، ح. ثابت و م. اسماعیلیان، "اثر نسبت Cr/C بر سختی و میزان چسبندگی لایه روکش سخت پایه Fe-Cr-C بر روی فولاد ساده کربنی"، دوازدهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی، انجمن جوشکاری و آزمایشهای غیر مخرب ایران ۶ الی ۷ دی ماه اصفهان، ۱۳۹۰.
- [17] D. Li, L. Liu, Y. Zhang, C. Ye, X. Ren, Y. Yang & Q. Yang, "Phase Diagram Calculation of High Chromium Cast Irons and Influence of its Chemical Composition", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 340-345, 2009.
- [۱۸] ح. ثابت، ش. میردامادی، ش. خیراندیش و م. گودرزی، "بررسی ریزساختار و مشخصات کاربردهای  $(Cr, Fe)_7C_3$  در آلیاژ هایپرینکتیک روکش سخت پایه Fe-Cr-C"، فصلنامه عملی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال پنجم، شماره اول، صفحه ۲۸، بهار ۱۳۹۰.
- [19] A. Bonder, V. Ivanchen Tov, A. Kozbv & J. C. Todenac, "Carbon-Iron-Ternary Alloy Systems, Phase Diagrams – Crystallographic and Thermodynamic Data", MSIT, Group IV, Springer, Verlag, Berlin Heidelberg, Vol. 11, pp 1-56, 2008.
- [20] S. Kumar, K. P. Mondal & A. K. Jha, "Effect of Microstructure and Chemical Composition of Hardfacing Alloy on Abrasive Wear Behavior", *Materials Science and Technology*, Vol 8, pp.10-20, 2000.
- فرآیند جوشکاری GTAW، مجله علمی پژوهشی مواد نوین، جلد ۱، شماره ۱، صفحه ۲۵، پاییز ۱۳۸۹.
- [9] H. Sabet, Sh. Kheirandish, Sh. Mirdamadi & M. Goodarzi "The Microstructure and Abrasive Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys with the Composition of Hypoeutectic, Eutectic and Hypereutectic at Cr/C =6", *Tribology Letters*, Vol. 44, No. 2, pp. 237-245, 2011.
- [۱۰] ح. ثابت، ش. میردامادی، ش. خیراندیش و م. گودرزی، "مقایسه سختی و مقاومت به سایش لایه های سخت شده سطحی حاوی کروم بر روی فولاد ساده کربنی توسط فرآیند جوشکاری GTAW"، سومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی ایران و انجمن ریخته گران ایران، کرمان، ۱۳۸۸.
- [۱۱] ح. ثابت و الف. داود آبادی فراهانی، "بررسی نسبت Cr/C بر حساسیت به ترک لایه رسوبی مقاوم به سایش بر قطعات ریختگی چدن خاکستری GG25"، هشتمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی ایران، تهران، ۱۳۸۸.
- [12] M. Liang Ma, H. Cheng, J. Jiaren, H. Rob, X. Yongsong, S. Zhong & S. Liu, "Cracks Formation and Residual Stress In Chromium Carbide Overlays", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 31, pp. 320-337, 2008.
- [۱۳] ح. ثابت، ح. کیپور و س. آراسته، "بررسی تشکیل ترک در آلیاژ روکش سخت پایه Fe-Cr-C بر روی فولاد ساده کربنی"، فصلنامه انجمن جوشکاری و آزمایشهای غیر مخرب ایران، شماره ۷۱، ص ۴۰-۴۴، ۱۳۹۲.

## ۶- پی نوشت

- [1] Degree of Dilution  
 [2] Back Scattered Electron (BSE)  
 [3] Secondary Electron (SE)  
 [4] Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)  
 [5] Mapping of Element  
 [6] Diffractometer
- [14] Q. Y. Hou, "Influence of molybdenum on the microstructure and properties of a FeCrBSi alloy coating deposited by plasma transferred arc hardfacing", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 225, pp. 11-19, 2013
- [15] J. Hornung, A. Zikin, K. Pichelbauer, M. Kalin & M. Kirchgaßner, "Influence of cooling speed on the microstructure and wear behavior of hypereutectic Fe-Cr-C hardfacings", *Materials Science & Engineering*, Vol. 576A, pp. 243-251, 2013.