

مقایسه ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش چهار نوع آلیاژ جوش روکش سخت با فولاد CK70 سخت کاری شده به منظور جایگزینی تیغه‌های برشی

سیدرضا امیرآبادی زاده^{۱*} و رضا اسلامی فارسانی^۲

۱- مربی، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

۲- استادیار گروه مواد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

*sr.amirabadi@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۴/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۲۵)

چکیده

تیغه‌های فولادی مورد استفاده برای برشکاری انواع پلاستیک‌ها، لاستیک‌ها، چوب و فلزات در اکثر موارد فولادهای پرکربن (نظیر فولاد CK70) می‌باشند که با استفاده از عملیات حرارتی سخت کاری سطحی، لایه سخت و قابل برشی بر روی آنها ایجاد می‌شود. در این تحقیق، از فولاد St37، به عنوان ماده جایگزین فولادهای پرکربن استفاده شد و با استفاده از چهار الکتروود مختلف و به روش جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود دستی، لایه روکشی سخت بر روی این فولاد اعمال گردید. در مرحله بعد آزمونهای آنالیز شیمیایی، متالوگرافی نوری، سختی و مقاومت به سایش بر روی نمونه‌ها انجام شد.

نتایج آنالیز شیمیایی انجام گرفته از فلز رسوب جوش نمونه الکتروودهای انتخابی نشان داد که حضور حدود ۰/۵ درصد کربن همراه عناصر آلیاژی کاربیدساز و سختی پذیری و با مقادیر مختلف تأثیر متفاوتی در میزان سختی و مقاومت به سایش داشتند بطوریکه در این تحقیق نمونه آلیاژ فلز رسوب Fe-Cr-Mo-V-W با کد WD دارای بهترین نتایج از نظر سختی و مقاومت به سایش بود. ساختار فلز رسوب نمونه حاصل از الکتروود WD دارای ساختار مارتزیت همراه با کاربیدهای آلیاژی با دانه بندی ریز به همراه کمی آستنیت باقی مانده بود. نتایج آزمون تیغه‌ها در شرایط کاربردی نشان داد که رسوب حاصل از الکتروود WD دارای سختی و مقاومت به سایش مطلوب و نیز قابلیت برش بالاتری از نمونه فولاد CK70 عملیات حرارتی سخت کاری شده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی:

تیغه فولادی برش، جوشکاری قوس الکتریکی، روکش سخت، CK70، جایگزینی

۱- مقدمه

مختلف از جمله فلزات، چوب، پلاستیک، لاستیک، کاغذ بکار می‌روند. جنس این تیغه‌ها عمدتاً از نوع فولادهای پرکربن

تیغه‌های فولادی، ابزارهایی هستند که به منظور برشکاری مواد

افزایش سختی پذیری می‌شود. مقدار کروم جهت کسب سختی ثانویه مناسب، ۴ تا ۱۲ درصد است، لذا در ترکیب الکترودهای مختلف تولیدی، مقدار کروم در این محدوده انتخاب می‌شود. ضمناً عنصر کروم به اکسایش در دمای بالا مقاوم است و به قابلیت سختی‌پذیری آلیاژ کمک می‌کند [۴]. وانادیم از افزایش اندازه دانه‌ها جلوگیری کرده و ضمن افزایش سختی، مقاومت به ضربه را بهبود می‌دهد. استفاده از وانادیم علاوه بر خاصیت برش، خاصیت مقاوم به سایش را در لبه‌های تیغه‌ها بهبود می‌بخشد. ضمناً وانادیم با رسوب کاربید وانادیم روی مرزدانه‌ها از افزایش اندازه دانه‌ها جلوگیری می‌کند [۵]. لذا از این عنصر هم به مقدار ۰/۵ درصد در فلز رسوب استفاده می‌شود.

مولیدن باعث افزایش سختی ثانویه و مقاومت به حرارت می‌شود و حضور تنگستن نیز خاصیت سختی و افزایش قابلیت برشکاری (در لبه تیغه‌ها) را به دنبال دارد. همچنین اثر عنصر مولیدن در ایجاد سختی ثانویه بیشتر از عنصر تنگستن است، به نحوی که در مقادیر بیش از ۱ درصد باعث افزایش قابل ملاحظه سختی می‌شود، ولی همین مسئله در مورد عنصر تنگستن در مقادیر بیش از ۲ درصد صادق است. لذا عنصر مولیدن کمتر از ۱ درصد (حدود ۰/۵ درصد) و مقدار تنگستن کمتر از ۲ (حدود ۱/۳ درصد) انتخاب می‌شود [۶].

تیغه‌های فولاد باید علاوه بر مقاومت به سایش و خاصیت برش، دارای مقاومت به حرارت نسبی باشند، چون در حین عملیات برش، نوک تیغه‌ها در اثر اصطکاک و برش با مواد مختلف گرم می‌شوند. لذا باید نوک تیغه به بازپخت در دماهای نسبتاً بالا مقاوم بوده و دارای خاصیت سختی ناشی از عملیات بازپخت باشد. لذا عنصر مولیدن غالباً در ترکیب شیمیایی استفاده می‌شود که افزایش سختی ناشی از عملیات بازپخت را به دنبال دارد. البته عناصر دیگر نظیر کروم و تنگستن نیز به این امر کمک می‌کنند. اما بالا رفتن بیش از حد سختی ثانویه موجب تردی زیاد می‌شود و این موضوع ممکن است در هنگام ضربه زدن تیغه‌ها برای برش زدن باعث ترک و کندگی لبه‌های تیغه شود. بر این اساس، محدودیت در مقدار مصرف مولیدن و تنگستن در آلیاژ جوش

(آلیاژی و غیرآلیاژی) با قابلیت عملیات حرارتی سخت کاری می‌باشند، به نحوی که پس از سخت کاری سطحی به سختی بالایی رسیده و امکان استفاده در شرایط برشکاری را پیدا می‌کنند.

امروزه فولادهای متعددی در صنعت برای تولید تیغه‌های فولادی با مصارف مختلف استفاده می‌شوند. براساس استاندارد DIN ۱۷۲۲۲، اصلی‌ترین این فولادها شامل CK70، CK75 و ۴۲CrMo۴ برای برش چوب، 2567 و 2542 برای برش فلزات و ۱/۲۴۳۶، ۱/۲۰۸۰ و ۱/۲۳۷۹ برای برش کاغذ و لاستیک هستند. تیغه‌های فولادی مذکور، ابتدا تحت عملیات ماشین کاری و سوراخ کاری قرار می‌گیرند و سپس روی لبه آنها عملیات حرارتی سخت کاری سطحی القایی یا شعله ای انجام می‌شود تا ساختار مارتنزیتی-آستنیتی ایجاد شود. با توجه به نوع کاربرد، سختی این تیغه‌ها بالاتر از HRC ۵۰ (۵۴-۶۰) است. البته میزان سختی لازم برای برش، به کاربرد تیغه و نوع ماده مورد برشکاری بستگی دارد. تیغه‌ها علاوه بر سختی باید مقاوم به سایش و ضربه نیز باشند، در غیر این صورت در مدت زمانی کم دچار ترک خوردگی شده و لبه تیغه‌ها کند می‌شود [۱].

فولادهای پرکربن مورد استفاده برای تهیه تیغه‌های برش، قیمت نسبتاً بالایی داشته و عملیات حرارتی سخت کاری سطحی بر روی آنها به امکانات خاص و نسبتاً گران قیمت نیاز دارد که شرایط کنترلی ویژه‌ای را می‌طلبند. امروزه روش‌های دیگری نیز برای سخت کاری سطحی مواد استفاده می‌شوند. جوشکاری، پاشش حرارتی، رسوب دهی الکتریکی و رسوب دهی بخار، اصلی‌ترین روش‌های مورد استفاده جهت عملیات سطحی هستند [۲].

جوشکاری، بیشترین استحکام پیوند بین رسوب و زیرلایه را فراهم می‌کند [۳]. در انتخاب نوع رسوب جوش جهت روکش سخت می‌بایست تأثیر عناصر آلیاژی مختلف از جمله Mo، Cr، W و V که در میزان سختی و مقاومت به سایش و نیز سختی ثانویه مؤثرند مورد بررسی قرار گیرند. مشخص شده است که عنصر کروم باعث افزایش مقاومت به سایش در دمای بالا و نیز

وجود دارد [۷].

روی خواص الکترودهای مخصوص روکش سخت انجام گرفت و با بررسی های ترکیب شیمیایی فلز جوش آنها، انتخاب شدند. ترکیب الکترودها از نوع آلیاژهای روکش سخت پایه آهن انتخاب گردیدند که دارای ساختار میکروسکوپی مارتنزیتی-آستنیتی همراه با کاربردهای آلیاژی می‌باشند. مشخصات این الکترودها در ادامه آمده است.

الف- الکتروود نوع WA: این الکتروود دارای روکش روتیلی است و فلز جوش آن (Fe-Cr-C) برای کاربردهایی با مقاومت خوب در برابر سایش همراه با تنش های فشاری و نیز مقاومت نسبتاً خوب در برابر ضربه و سایش فلز با فلز استفاده می‌شود. فاکتور نسبت روکش به مفتول آن عدد ۱/۹۸ و مطابق استاندارد DIN8555 معادل الکتروود E6-UM-55-GP است.

ب- الکتروود نوع WB: این الکتروود دارای روکش قلیایی بوده و فلز جوش آن (Fe-Cr-C-V-Mo) جهت تأمین خواص ضدسایشی انتخاب می‌شود. فاکتور نسبت روکش به مفتول آن عدد ۱/۶۸ و مطابق استاندارد DIN8555 معادل الکتروود E6-UM-60 است.

ج- الکتروود نوع WC: این الکتروود، دارای روکش قلیایی بوده و فلز جوش آن (Fe-Cr-C-V-Mo) به منظور تأمین خواص ضدسایشی انتخاب می‌شود. فاکتور نسبت روکش به مفتول آن نیز عدد ۱/۶۴ است. در ضمن مقدار وانادیم رسوب حاصل از این الکتروود بیشتر از نمونه WB است و مطابق استاندارد DIN8555 معادل الکتروود E6-UM-60 است.

د- الکتروود نوع WD: این الکتروود دارای روکش قلیایی است و فلز جوش آن (Fe-Cr-C-Mo-V-W) جهت تأمین خواص ضدسایشی و قابلیت برش انتخاب می‌شود. فاکتور نسبت روکش به مفتول آن عدد ۱/۶۱ و مطابق استاندارد DIN8555 معادل الکتروود E6-UM-60 است.

برای رسیدن به ترکیب شیمیایی مورد نظر، پس از انتخاب فرمولاسیون روکش الکترودها، نسبت به ساخت آنها اقدام شد. ساخت الکترودها در شرکت صنعتی آما انجام گرفت. در طراحی روکش الکترودها اولاً سعی شد که روکش های قلیایی و روتیلی (ترجیحاً قلیایی) انتخاب شود. چون باعث جذب

مسئله دیگری که در این آلیاژها با توجه کاربردشان مطرح است، وجود آستنیت باقی مانده به عنوان فاز نامطلوب در ساختار است. چون دو فاز آستنیت و مارتنزیت در کنار هم با ضرایب انبساط حرارتی مختلف، تمایل به ترک را در فصل مشترک زیاد می‌کنند. وجود وانادیم، مولیبدن و تنگستن محدوده فاز آستنیت را کاهش می‌دهند، لذا آستنیت باقی مانده کمتری در ساختار تشکیل می‌شود [۸]. از طرف دیگر، تیغه‌های فولاد CK70 پس از چند بار کند شدن و سپس ماشینکاری و تیز کردن مجدد، قابل تعمیر نیستند، زیرا عرض آن کم می‌شود. در حالی که در تیغه St37 در صورت کاهش ضخامت لایه جوش روکش سخت پس از دفعات ماشینکاری مکرر می‌توان مجدداً جهت تعمیر و اصلاح، با فرآیند جوشکاری، لایه روکش سخت بر روی لایه قبلی ایجاد نمود تا تیغه قابل استفاده مجدد شود.

با توجه به توضیحات اشاره شده، مبنی بر قیمت نسبتاً بالای تیغه‌های فولادی فعلی (ناشی از هزینه مواد اولیه و فرآیند سخت کاری) و از طرفی مزایای جوشکاری به عنوان روش ایجاد لایه روکش سخت، در این تحقیق، از فولاد St37، به عنوان ماده جایگزین فولادهای پرکربن استفاده شد و امکان ایجاد لایه سخت و قابل برش بر روی این فولادها (با خواص قابل رقابت با تیغه های فولادی مرسوم) با استفاده از روش جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود روکش دار (به جای عملیات حرارتی سخت کاری سطحی) بررسی گردیده است.

۲- مواد و روش تحقیق

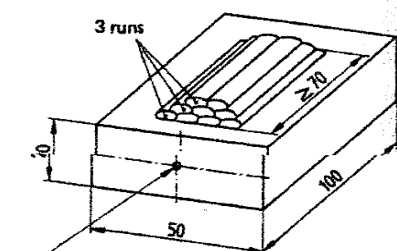
مواد اولیه مورد نیاز، شامل فولاد ساده کربنی و الکترودهای مختلف روکش سخت بودند. مشخصات این مواد به شرح زیر است:

۱- چهار قطعه فولاد ساده کربنی (St37) به ابعاد $12 \times 15 \times 20$ میلی متر

۲- چهار نوع الکتروود روکش سخت با ترکیب‌های مختلف (با کدهای WA، WB، WC و WD) که براساس مطالعاتی که بر

ب- آزمون سختی

برای تعیین میزان سختی فلز رسوب آزمون سختی بر روی لایه سوم به روش راکول C با دستگاه مدل Wolpert با نیروی اعمالی ۱۵۰ کیلوگرم انجام شد. لازم به ذکر است که برای افزایش دقت نتایج آزمون سختی، بر روی هر نمونه حداقل ۳ بار آزمون سختی سنجی انجام شد که متوسط نتایج آنها معیار سختی آن نمونه در نظر گرفته شد.



(الف)



(ب)

شکل (۱): نمونه آزمون: الف) شماتیک، ب) نمونه جوشکاری شده.

ج- آزمون سایش

آزمون سایش خراشان براساس روش پین بر روی دیسک مطابق استاندارد ASTM G99-04 بر روی لایه سوم انجام شد. لازم به ذکر است که نیروی اعمال معادل ۱۰۰N و مسافت سایش ۴۳۰۰ متر در نظر گرفته شد. همچنین در این آزمون از پین فولاد ابزار SPK عملیات حرارتی سختکاری شده با سختی ۶۵HRC استفاده شد.

قبل از انجام آزمون سایش نمونه ها با ترازوی با دقت ± 0.01

هیدروژن کمی در فلز رسوب شده و لذا بروز ترک های هیدروژنی به حداقل می رسند. ثانیاً از عناصر آلیاژی که باعث افزایش میزان سختی و سایش می شوند (نظیر کربن، کروم، مولیبدن، وانادیم و تنگستن) استفاده شد. حضور هر کدام از عناصر آلیاژی در فلز رسوب از طریق استفاده از پودرهای فروآلیاژی مانند فروکروم، فرومولیبدن، فروتنگستن و فرووانادیم در روکش الکتروود انجام شد. مفتول الکتروودهای انتخابی نیز از جنس فولاد غیرآلیاژی کم کربن ناآرام در نظر گرفته شدند. درصد عناصر آلیاژی در فلز جوش از طریق موازنه کردن درصد پودرهای آلیاژی در روکش تنظیم و ترکیب بدست آمده پس از چندین نمونه سازی (الکتروود) بدست آمد.

الکتروودهای انتخابی (با کدهای WC، WB، WA و WD)، همگی با قطر ۳/۲۵ میلی متر ساخته شدند. جهت بررسی خواص شیمیایی و مکانیکی فلز جوش الکتروودهای انتخابی، آزمون ترکیب شیمیایی مطابق با استاندارد DIN32525 انجام گرفت. همچنین چون سختی مورد نیاز در فلز رسوب نیز برای این تحقیق مهم بوده، لذا آزمون سختی و سایش نیز برای رسوب هر نوع الکتروود (پس از نهایی شدن فرمول) انجام گرفت. نحوه انجام آزمایشها به شرح زیر است.

الف- آنالیز شیمیایی

طبق استاندارد DIN32525، با هر نوع الکتروود، روی سطح یک ورق فولاد St37، سه لایه در چندین ردیف بطور مجزا جوشکاری شد (شکل ۱). علت اعمال سه لایه جوشکاری بر روی فولاد St37، کاهش اثر پدیده رقت است. (شکل ۲). همچنین حرارت بین لایه ای حداکثر 150°C حفظ گردید [۹]. پس از اتمام جوشکاری، سطح لایه آخر، تراشکاری و صیقل داده شد. سپس جهت انجام ترکیب شیمیایی، نمونه هایی به صورت قرص با قطر ۳۰ میلی متر تهیه و با دستگاه XRF (مدل ARL) تحت آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. جهت تعیین عنصر کربن نیز، براده هایی از نمونه های رسوب جوش به صورت جداگانه تهیه گردید و با استفاده از دستگاه CS (مدل ELTRA2000)، درصد کربن نمونه های مختلف اندازه گیری شد.



شکل (۲): تیغه فولاد St37، پس از روکش کاری سخت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز شیمیایی و ساختار میکروسکوپی

الف) آزمون شیمیایی

در جدول (۲)، نتایج آنالیز شیمیایی فلز رسوب حاصل از الکترودهای مختلف را ارائه شده است.

جدول (۲): نتایج آنالیز شیمیایی فلز رسوب الکترودهای انتخابی.

کد الکتروده	عناصر تشکیل دهنده (درصد وزنی)									
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	W	Fe	$\frac{Cr}{C}$	$\frac{K^*}{C}$
WA	۰/۵	۰/۶	۱/۹	۹/۵	-	-	-	پایه	۱۹	۱۹
WB	۰/۵	۰/۳	۰/۴	۷	۰/۵	۰/۵	-	پایه	۱۴	۱۶
WC	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۷/۵	۰/۴	۱/۱۰	-	پایه	۱۵	۱۸
WD	۰/۵	۰/۴	۰/۹	۶/۵	۰/۵	۰/۶	۱/۳	پایه	۱۳	۱۷/۸

همانطور که در جدول فوق مشاهده می شود مقادیر کربن در چهار نوع الکتروده انتخابی ثابت است ولی عناصر آلیاژی Cr، Mo، V و W متفاوت می باشند. برای مقایسه ترکیب آلیاژهای مذکور دو نسبت $\frac{Cr}{C}$ و نسبت $\frac{K^*}{C} = \frac{Cr+Mo+V+W}{C}$ محاسبه و مورد بررسی قرار می گیرند.

همانطور که مشاهده می شود:

بالاترین نسبت $\frac{Cr}{C}$ و $\frac{K^*}{C}$ مربوط به الکتروده WA می باشد در این الکتروده به علت عدم وجود عناصر آلیاژی مانند Mo و V و W، مقدار $\frac{K^*}{C}$ این نمونه برابر با $\frac{Cr}{C}$ آن می باشد. با توجه به دیگرام تعادلی Fe-C-Cr با مقادیر کروم ۱۰ درصد [۱۲]، آلیاژ

گرم وزن شدند و پس از انجام آزمون سایش (در مسافت ۴۳۰۰ متر) مجدداً قطعات وزن گردیدند تا اختلاف وزن ناشی از آنها تعیین و معیاری برای مقاومت به سایش بدست آید [۱۰].

ه- آزمون متالوگرافی

جهت آزمون متالوگرافی از میکروسکوپ نوری (مدل Olympus) استفاده شد. برای بررسی متالوگرافی، نمونه‌هایی عرضی تهیه و پس از سنباده‌زنی و پولیش با محلول کروندم ۰/۰۵ میکرومتر، تحت عملیات حکاکی با محلول نایتال ۳٪ قرار گرفتند و سپس مطالعه میکروسکوپی بر روی آنها انجام شد. لازم به ذکر است جهت تشخیص نوع فازهای ایجاد شده در هر نمونه، از محلول اچ خاص [۹] که در جدول (۱) ارائه شده استفاده گردید تا بتوان درصد حجمی فازهای تشکیل شده در هر نمونه را مشخص نمود.

جدول (۱): محلول حکاکی شده جهت ظاهر سازی فازها [۱۱]

محلول ۱: ۴ گرم اسید پیکریک + ۱۰۰ لیتر اتانول + یک میلی لیتر اسید کلریدریک
محلول ۲: ۱۰ گرم سدیم متابی سولفیت + ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر
روش اجرا: ۴۵ ثانیه در محلول ۱ + شستشو با اتانول + خشک کردن با هوای گرم + ۲۰ ثانیه در محلول ۲ + شستشو در آب + خشک کردن با هوای گرم

د- جوشکاری روکشی سخت بر روی لبه تیغه ها

پس از انتخاب مناسب ترین الکتروده از نظر خواص شیمیایی و مکانیکی، عملیات جوشکاری روی لبه تیغه فولاد St37 انجام گرفت. بدین منظور بر روی قطعه فولادی، سه لایه جوشکاری اعمال شد (شکل ۲). لازم به ذکر است که با توجه به قلیایی بودن روکش الکترودها قبل از مصرف در دمای 300°C به مدت ۲ ساعت خشک شدند. قطر الکترودهای انتخابی $3/25$ میلی متر بود و پارامترهای جوشکاری نیز شامل شدت جریان (۱۴۰-۱۳۰ آمپر)، ولتاژ (۲۴-۲۲ ولت) و سرعت (۱۵ سانتی متر بر دقیقه) نیز برای هر لایه یکسان انتخاب شد. دستگاه جوش مورد استفاده، رکتیفایر (مدل گام الکترونیک ۶۵۰A) بود و جوشکاری لایه ها با قطبیت DCRP انجام شد.

مارتنزیت، آستنیت و کاربید تشکیل شده است. جهت بررسی دقیق‌تر، ریزساختار هر نمونه در ادامه بررسی می‌شود.

ب-۱) ساختار نمونه WA

ساختار میکروسکوپی رسوب الکتروود نمونه WA شامل مارتنزیت+آستنیت به همراه کاربید کروم در مرزها است که در شکل (۳) مشاهده می‌شود. علت تشکیل مارتنزیت و آستنیت در ریزساختار این نمونه را باید براساس دمای تشکیل مارتنزیت (Ms) آلیاژ بررسی نمود. رابطه بین کرن و کروم با دمای Ms براساس رابطه (۱) به شرح زیر می‌باشد [۱۳] که برای آلیاژ مذکور:

$$Ms^{\circ}C = 383/11 - 207/42(\%C) - 20/65(\%Cr) \quad (1)$$

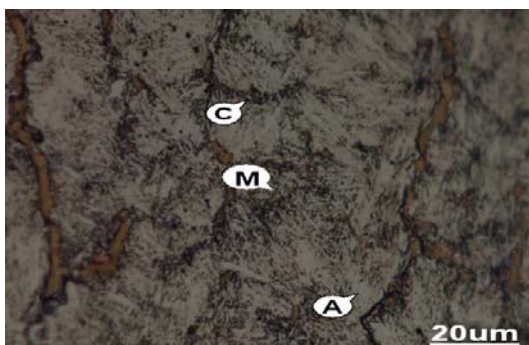
$$Ms^{\circ}C = 383/11 - 207/42(0/5) - 20/65(9/5) = 83/2^{\circ}C$$

در این آلیاژها دمای پایان استحاله مارتنزیت M_f از رابطه (۲) [۱۳] محاسبه می‌شود، لذا برای آلیاژ مذکور خواهیم داشت:

$$M_f^{\circ}C = Ms^{\circ}C - 215(\pm 10^{\circ}C) \quad (2)$$

$$M_f^{\circ}C = 83/2 - 215(\pm 10^{\circ}C) = -131^{\circ}C$$

با توجه به اینکه دمای تشکیل مارتنزیت $M_s = 83^{\circ}C$ و دمای پایان استحاله مارتنزیتی $M_f = -131^{\circ}C$ است. مشخص می‌گردد که در هنگام سرد شدن استحاله آستنیت به مارتنزیت به طور کامل رخ نداده است لذا در دمای محیط مقداری آستنیت باقی مانده در ریزساختار مشاهده می‌گردد. درخصوص کاربیدها نیز با توجه به مراحل انجماد آلیاژ از روی دیاگرام Fe-Cr-C مشخص گردید که کاربیدهای مذکور از نوع M_7C_3 می‌باشد [۱۴].



شکل (۳): ساختار فلز رسوب WA در لایه سوم حاوی مارتنزیت (M)، آستنیت (A) و کاربید M_7C_3 (C)

مذکور در شرایط هیپویوتکتیکی می‌باشد. همچنین رسوب این الکتروود نسبت به رسوب سایر الکتروودها از کروم بالاتری برخوردار است.

الکتروود WB با نسبت $Cr = 14$ و $K^* = 16$ دارای کروم کمتر نسبت به الکتروود WA بود، ولی دارای مقدار مولیبدن و وانادیم در ترکیب شیمیایی می‌باشد با توجه به دیاگرام تعادلی Fe-Cr-C [۱۲]، ترکیب آلیاژ مذکور هیپویوتکتیکی می‌باشد.

الکتروود WC با نسبت $Cr = 10$ و $K^* = 18$ دارای کرومی تقریباً معادل الکتروود WB بوده ولی از وانادیم بیشتری (۱/۱ درصد) در ترکیب شیمیایی برخوردار است، بر اساس تاثیر عناصر آلیاژی بر دیاگرام Fe-Cr-C [۱۲]، حضور وانادیم در مقادیر ذکر شده باعث تغییر انجماد آلیاژ به صورت یوتکتیک می‌گردد، در واقع حضور وانادیوم آلیاژ را از هیپویوتکتیک به یوتکتیک تغییر داده است.

الکتروود WD با نسبت $Cr = 13$ و $K^* = 17/5$ دارای کروم و مولیبدنی معادل الکتروود WC می‌باشد ولی در این الکتروود مقدار وانادیم نسبت به الکتروود WC کاهش و در مقابل عنصر آلیاژی تنگستن اضافه شده است. بررسی تاثیر عناصر آلیاژی بر دیاگرام فازی Fe-Cr-C [۱۲] مشخص می‌نماید که عنصر تنگستن مشابه وانادیم عمل نموده و باعث ایجاد آلیاژی با ترکیب یوتکتیک شده است.

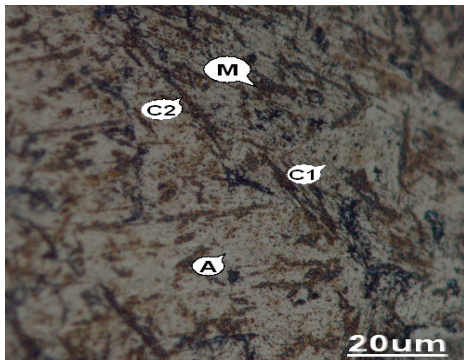
ب) تحلیل ساختارهای میکروسکوپی

جدول ۳ نتایج آزمون متالوگرافی نمونه‌های مختلف را ارائه می‌دهد

جدول (۳): در صد حجمی فازهای مختلف در فلز رسوب الکتروودهای انتخابی

نمونه	جزئیات ریزساختار (درصد حجمی)		
	کاربید	آستنیت	مارتنزیت
WA	۱۰	۴۰	۵۰
WB	۱۵	۲۵	۶۰
WC	۳۰	۳۰	۴۰
WD	۲۵	۵	۶۰

همانگونه که مشاهده می‌شود ریزساختار تمام نمونه‌ها از فازهای



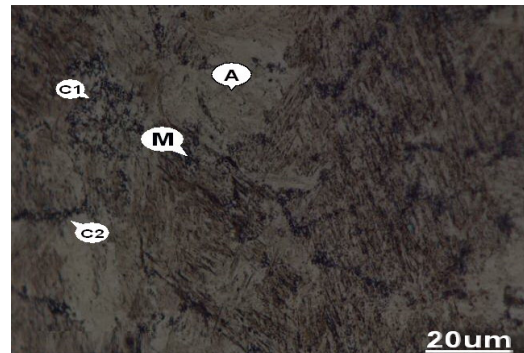
شکل (۵): ساختار فلز رسوب WC در لایه سوم حاوی مارتنزیت (M)، آستنیت (A) و کاربیدهای از نوع MC (C₁) و M₇C₃ (C₂)،

ب-۴) ساختار نمونه WD

شکل ۶ ریزساختار میکروسکوپی فلز رسوب WD را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۳) مشخص می‌گردد که ریزساختار این نمونه مشابه با سایر رسوب الکترودها شامل مارتنزیت + آستنیت و کاربید (آلیاژی) می‌باشد با این تفاوت که درصد حجمی آستنیت باقی مانده به شدت کاهش یافته است و درصد کاربید (آلیاژی) افزایش یافته است به نحوی که بالاترین مقدار کاربیدهای آلیاژی در بین تمام نمونه‌ها مربوط به رسوب الکتروود WD می‌باشد. علت کاهش درصد حجمی آستنیت ناشی از حضور عناصر آلیاژی W و Mo در کنار عنصر کروم در ترکیب شیمیایی رسوب حاصل می‌باشد [۱۴]. حضور این عناصر باعث کاهش محدود حلالیت آستنیت شده لذا باعث عدم پایداری در دمای محیط می‌گردد [۱۵]. همچنین کاربیدهای موجود در ریزساختار این نمونه مشابه با رسوب WC از نوع M₇C₃ و MC بسیار ریز و پراکنده در زمینه می‌باشند به نحوی که با مقایسه ریزساختار نمونه‌های WC و WD مشخص می‌گردد که کاربیدهای M₇C₃ و MC تشکیل شده در رسوب الکتروود WD از توزیع بسیار مناسب‌تری در زمینه نسبت به رسوب الکتروود WC برخوردار هستند. در این نمونه نیز M_s (۱۴۵°C) و M_f (-۷۰°C) دلیل حضور مارتنزیت به همراه آستنیت باقی مانده در ساختار می‌باشد.

ب-۲) ساختار نمونه WB

شکل ۴ ریزساختار میکروسکوپی فلز رسوب WB را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳ مشخص می‌گردد که ریز ساختار فلز جوش از ۶۰ درصد حجمی مارتنزیت و ۲۵ درصد حجمی آستنیت به همراه ۱۵ درصد حجمی کاربید (آلیاژی) تشکیل شده است. علت حضور آستنیت و مارتنزیت مشابه با الکتروود WA ناشی از دمای M_s (۱۳۵°C) و M_f (-۸۰°C) رسوب می‌باشد، کاربیدهای موجود در ریزساختار فلز رسوب نیز به دو دسته MC و M₇C₃ قابل تفکیک می‌باشند که در تصویر شکل (۴) قابل مشاهده هستند.



شکل (۴): ساختار فلز رسوب WB در لایه سوم حاوی مارتنزیت (M)، آستنیت (A) و کاربیدهای از نوع MC (C₁) و M₇C₃ (C₂)

ب-۳) ساختار نمونه WC

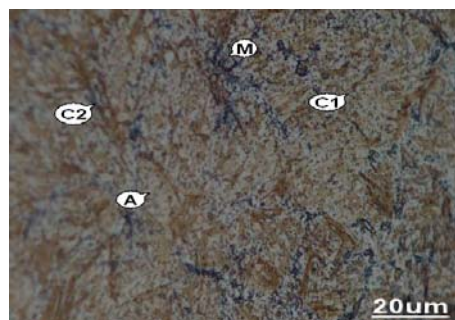
شکل (۵) ریزساختار میکروسکوپی فلز رسوب WC را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳ مشخص می‌گردد که ریزساختار این نمونه مشابه با رسوب WA و WB شامل مارتنزیت + آستنیت و کاربید (آلیاژی) است با این تفاوت که درصد حجمی کاربید در رسوب WC نسبت به WB افزایش یافته است، علت این امر ناشی از حضور عنصر آلیاژی وانادیم بیشتر نسبت به رسوب WB می‌باشد. حضور وانادیم در ترکیب شیمیایی این الکتروود باعث شده است که کاربیدهای M₇C₃ ظریف تر و ریزتر با پراکندگی بیشتری به همراه کاربیدهای MC در زمینه قرار گیرند. علت حضور مارتنزیت و آستنیت باقی مانده در نمونه فوق بدلیل دمای M_s (۱۲۵°C) و M_f (-۹۰°C) این آلیاژ می‌باشد.

همانطور که از نتایج جدول مشخص است سختی تمامی نمونه‌ها بیشتر از ۵۶HRC است که همگی برای کاربرد در تیغه برش مناسب می‌باشند ولی در بین تمام نمونه‌ها، نمونه جوشکاری شده WD از سختی بالاتری (۶۰/۵RC) نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار است. علت بالاتر بودن سختی این نمونه ناشی از حضور درصد حجمی بالای مارتنزیت (۶۰٪) و کاربیدهای آلیاژی (۳۵٪) و کم بودن آستنیت باقی مانده (۵٪) در ریزساختار این نمونه می‌باشد، علت سختی بالاتر فولاد CK70 نسبت به سایر نمونه‌ها نیز ناشی از درصد حجمی مارتنزیت بالا (۸۰٪) و آستنیت باقیمانده کم (۲۰٪) نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد.

جدول (۴) نتایج آزمون سایش (ASTM G99-04) را در مسافت ۴۳۰۰ متر ارائه می‌دهد، همانگونه که مشاهده می‌شود رابطه خوبی بین سختی و مقاومت به سایش خراشان در بین نمونه‌های مختلف وجود دارد به نحوی که با افزایش سختی مقاومت به سایش بهبود یافته است و مقدار کاهش وزن ناشی از سایش کمتر شده است.

۳-۳- نتایج آزمایش عملی تیغه

با توجه به نتایج آزمون سختی و سایش، فلز جوش نمونه WD جهت آزمایش عملی انتخاب شد. لذا یک نمونه قطعه فولاد St37 متناسب با ابعاد تیغه برش تهیه و روی لبه آن ۳ لایه با الکتروود WD جوشکاری شد و در شرایط واقعی کارکرد با تیغه فولادی Ck70 سخت کاری سطحی شده مقایسه گردید. شکل ۸ نتایج شرایط کارکرد واقعی تیغه‌ها را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل مشخص است عمر کارکرد نمونه جوشکاری شده با الکتروود WD، ۳۰ درصد بیشتر از نمونه Ck70 می‌باشد، ضمن آنکه تیغه روکش سخت WD قابل جوشکاری مجدد و مصرف دوباره می‌باشد ولی تیغه فولادی Ck70، قایل بازبایی نبود و باید کل تیغه تعویض گردد که از این نظر نیز صرفه اقتصادی به همراه دارد.



شکل (۶): ساختار فلز رسوب WD در لایه سوم حاوی مارتنزیت (M)، آستنیت (A) و کاربیدهای از نوع MC_1 و M_7C_3 (C₂)

در شکل ۷، ساختار میکروسکوپی تیغه برش مرسوم (تیغه عملیات حرارتی سخت کاری شده) CK70 ارائه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، ساختار تیغه فولادی CK70 بعد از عملیات حرارتی شامل ۸۰ درصد مارتنزیت و ۲۰ درصد حجمی آستنیت باقی مانده می‌باشد.



شکل (۷): ساختار تیغه عملیات حرارتی سخت کاری شده CK70 حاوی مارتنزیت (M) و آستنیت باقیمانده (A)

۳-۲- سختی و مقاومت به سایش

در جدول ۴، نتایج آزمون سختی و سایش نمونه‌های مختلف را ارائه می‌دهد.

جدول (۴): نتایج سختی و سایش فلز جوش الکتروودهای انتخابی.

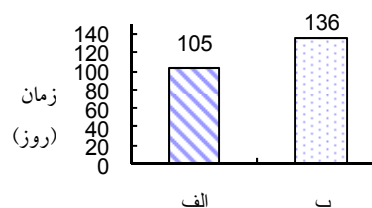
کد الکتروود	سختی (HRC)	میزان جرم ساییده شده (g)
WA	۵۶/۵	۲/۴
WB	۵۷/۵	۲/۲
WC	۵۸	۲/۱
WD	۶۰/۵	۱/۸
CK70 عملیات حرارتی سختکاری شده	۵۸/۵	۲

۵- تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی "ایجاد و بررسی خواص مکانیکی لایه سخت و قابل برش به روش جوشکاری بر روی تیغه فولادی" و با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تهران جنوب انجام پذیرفته است.

۶-مراجع

- [1] P. S. Doyen, "A New Technique for Welding Tool Steel", Welding Journal, Vol. 60, Vol. 9, pp. 25-28, 1981.
- [2] D. J. Kotecki and J. S. Ogborn, "Abrasion Resistance of Iron-Base Hard Facing Alloy", Welding Journal, Vol. 26, pp. 2695-2785, 1995.
- [۳] م. بینش، تکنیک های پوشش دادن- طراحی و کاربرد، نشر طراح، ۱۳۸۴.
- [4] B. Kulishenko, A. Balin and M. Filippov, "Electrodes for Hardfacing Components Subjected to Abrasive and Impact-Abrasive Effects", Welding International, Vol. 19, pp. 326-329, 2005.
- [5] X. H. Wang, F. Han, X. M. Liu, S. QU and Z. Zou, "Effect of Mo on the Microstructure and Wear Resistance of Fe-Based- Hardfacing Coatings", Materials Science and Engineering A, Vol. 489, pp. 193-200, 2008.
- [6] L. E. Sevansson, B. Gketoft, B. Ulander and H. K. D. H. Bhadeshia, "Fe-Cr-C Hardfacing Alloys for High Temperature Application", Journal of Materials Science, Vol. 2, pp. 1015-1019, 1986.
- [7] M. F. Buchely, J. C. Gutierrez, L. M. Leon and A. Toro, "The Effect of Microstructure on Abrasive Wear of Hardfacing Alloys", Wear, Vol. 259, pp. 52-61, 2005.
- [8] M. Kirchgabner, E. Badisch and F. Frank, "Behavior of Iron Based Hardfacing Alloys under Abrasion and Impact", Wear, Vol. 265, pp. 772-779, 2008.
- [9] DIN Handbook 8, Welding, DIN 32525, Part 4, 1998.
- [10] ASTM G99-04, Standard Test Method for Wear Testing with Apin-on-Disk Apparatus.
- [11] W. K. Collins and J. C. Waston, "Metallographic Etching for Carbide Volume Fraction of High-Chromium White Cast Iron", Materials characterization, Vol. 24, pp. 379-386, 1990.
- [12] R. Choteborsky, P. Hrabe, M. Muller, J. Sarkoca and M. Jirka, "Abrasive Wear of High Chromium Fe-Cr-C Hardfacing Alloys", Res. Agr. Eng., Vol. 4, pp. 192-198, 2008.
- [13] C. M. Chang, C. M. Lin, C. C. Hsieh, J. H. Chen, C. M. Fan and W. Wu, "Effect of Carbon Content on Microstructural Characteristics of the Hypereutectic Fe-Cr-C Claddings", Materials Chemistry and Physics, Vol. 117, pp. 257-261, 2009.



الف: نمونه تیغه CK75 عملیات سختکاری شده

ب: نمونه تیغه روکش سخت شده

شکل (۸): مقایسه مدت کارکرد تیغه های روکش سخت داده شده WD با نمونه عملیات سختکاری شده از جنس فولاد Ck75

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق هدف بررسی امکان جایگزینی چهار نوع فلز جوش الکتروود روکش سخت پایه Fe-Cr-C به جای فولاد Ck70 در شرایط کاری تیغه برش مورد مصرف در صنایع چوب بوده است که نتایج زیر حاصل گردیده است:

- ۱- نسبت $\frac{Cr}{C}$ و $\frac{K^*}{C}$ تمام رسوب الکتروودهای مصرفی با یکدیگر متفاوت بودند و همین امر باعث گردید تا ترکیب شیمیایی ۲ نوع از آنها (WA و WB) از نوع هیپویوتکتیکی و ۲ نوع دیگر (WC و WD) از نوع یوتکتیکی باشد.
- ۲- ریزساختار فلز رسوب تمام الکتروودها از فازهای مارتنزیت، آستنیت باقیمانده، کاربید تشکیل شده بود با این تفاوت که درصد فازهای مذکور در هر رسوب متفاوت بودند.
- ۳- ارتباط خوبی بین مقدار سختی و مقاومت به سایش لایه‌های روکش سخت وجود داشت به نحوی که با افزایش سختی مقاومت به سایش نیز افزایش یافت.
- ۴- بالاترین سختی و کمترین مقدار سایش (بهترین مقاومت به سایش) لایه روکش سخت مربوط به الکتروود WD با سختی $5HRC/60$ با ریزساختاری متشکل از ۶۰ درصد حجمی مارتنزیت و ۳۵ درصد حجمی کاربید های آلیاژی و ۵ درصد حجمی فاز آستنیت باقیمانده بود.
- ۵- در شرایط کاری واقعی، نمونه جوشکاری شده با الکتروود WD، ۳۰ درصد زمان کارکرد بیشتری را نسبت به فولاد Ck70 سخت کاری سطحی شده از خود نشان داد.

- [14] S. Atamert and H. K. D. H. Bhadeshia, "Microstructure and Stability of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 130, pp. 101-111, 1990.
- [15] C. Kim, S. Lee, J. Jung and, S. Ahn, "Effects of Complex Carbide Fraction on High-Temperature Wear Properties of Hardfacing Alloys Reinforced with Complex Carbides", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 349, pp. 1-11, 2003.