

## گواهی ارائه مقاله

ضمن تشکر و قدردانی از ارائه مقاله با عنوان:

تشکیل کاربرد کروم روی فولاد ابزار ۱۵۴۵ با استفاده از فرایند نفوذ واکنشی حرارتی  
(TRD) در شرایط مختلف و بررسی مشخصات آن

در دهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مواد و متالورژی

و

پانزدهمین همایش ملی مشترک انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن علمی ریخته‌گری ایران

در تاریخ ۲۵ و ۲۶ آبان ماه سال ۱۴۰۰ - تهران، تهران

این گواهی به نویسندگان مقاله:

محمدرضا تجاری سعادت آبادی، سید عبدالکریم سجادی، رضا ابراهیمی، امید گنجی

اعطای می‌گردد. موفقیت روزافزون شما را در پیشرفت علم و فناوری، از خداوند متعال خواستاریم.



محمود ذبیلی احمدآبادی  
رئیس انجمن متالورژی و مواد ایران

بهیچی پالیزدار  
دبیر کنفرانس

شهرام رابکان  
دبیر علمی

عبدالحامید قندی  
رئیس انجمن علمی ریخته‌گری ایران



## تشکیل کاربید کروم روی فولاد ابزار ۱۵۴۵ با استفاده از فرایند نفوذ واکنشی حرارتی (TRD) در شرایط مختلف و بررسی مشخصات آن

محمد رضا نجاری سعادت آبادی<sup>۱</sup>، سید عبدالکریم سجادی<sup>۲</sup>، رضا ابراهیمی<sup>۳</sup> امید گنجی<sup>۴</sup>

reza121290@yahoo.com

### چکیده

فولادهای ابزار به دلیل رفتار مکانیکی و تریبولوژیکی خوبی که دارند در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند قالب‌ها و ابزار برش، جایی که استحکام مکانیکی بالا و مقاومت عالی در برابر سایش مورد نیاز است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملیات اصلاح سطح ساده‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین راه برای بهبود مقاومت مکانیکی، الکتروشیمیایی و مقاومت در برابر سایش فولادها است. در این تحقیق سطح فولاد ابزار ۱۵۴۵ با استفاده از فرایند نفوذ واکنشی حرارتی (TRD) به روش غوطه‌وری در حمام نمک مذاب با استفاده از اکسیدهای فلزی در سه دمای مختلف  $800^{\circ}\text{C}$ ،  $900^{\circ}\text{C}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  و سه زمان غوطه‌وری متفاوت ۴، ۵ و ۶ ساعت پوشش داده شده است. ویژگی‌های ساختاری این پوشش‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و (EDS) بررسی شد. نتایج به خوبی نشان داد که دمای پوشش‌دهی  $800^{\circ}\text{C}$  برای تشکیل کامل پوشش کاربید کروم کافی نیست و در این دما تنها جوانه‌هایی از کاربید کروم مشاهده می‌شود. نتایج XRD نشان داد که پوشش کاربید کروم شامل فازهای  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ،  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  و  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  است. همچنین مشخص شد که ضخامت و سایر مشخصات لایه کاربید کروم بستگی به دما و مدت زمان فرآیند پوشش‌دهی دارد بطوری که با افزایش دما و زمان پوشش‌دهی، ضخامت و سختی لایه کاربید کروم افزایش دارد.

کلمات کلیدی: نفوذ واکنشی حرارتی، TRD، پوشش سخت کاربیدی، کاربید کروم.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه فردوسی مشهد.

<sup>۲</sup> استاد مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه فردوسی مشهد.

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه فردوسی مشهد.

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه فردوسی مشهد.

## ۱- مقدمه

فولادها به علت خواص بسیار خوب مکانیکی که دارند به طور گسترده‌ای در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲،۱]. فولادهای ابزار به دلیل رفتار مکانیکی و تریبولوژیکی خوبی که دارند در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند قالب‌ها در اکستروژن، آهن‌گری گرم و سرد، قالب‌های لاستیک و پلاستیک، قالب‌سازی، قالب‌های متالورژی پودر و ابزار برش، جایی که استحکام مکانیکی بالا و مقاومت عالی در برابر سایش مورد نیاز است، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳،۴،۱۸]. در نتیجه، تحقیقات زیادی برای بهبود خواص مکانیکی فولادها انجام شده است [۱،۲،۵]. عملیات اصلاح سطح ساده‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین راه برای بهبود مقاومت مکانیکی، الکتروشیمیایی و مقاومت در برابر سایش فولادها است، زیرا مشکلاتی مانند خستگی، سایش و خوردگی اغلب از سطح قطعات فولادی شروع می‌شود [۵،۶]. بنابراین اصلاح سطح قطعات به جای تعویض کل حجم آن مقرون به صرفه می‌باشد. مثال‌هایی از اصلاح سطح شامل ایجاد لایه‌های سخت سرامیکی، بوریدی، کاربیدی و پوشش‌های کامپوزیتی روی سطح فلز می‌باشند [۵،۷]. پوشش‌های سطحی محافظ را می‌توان با استفاده از روش‌های زیادی تشکیل داد که متداول‌ترین آن‌ها رسوب شیمیایی فاز بخار (CVD) و رسوب فیزیکی فاز بخار (PVD)، پاشش حرارتی (TS) و روش نفوذ واکنشی حرارتی (TRD) است [۸-۱۰]. هر کدام از روش‌های ذکر شده دارای مزایا و معایبی هستند به عنوان مثال، روش‌های PVD و CVD نیاز به خلأ، اتمسفر کنترل شده و تجهیزات گران قیمت و پیچیده دارند و استحکام چسبندگی پوشش با زیر لایه کافی نمی‌باشد [۱۱،۱۲] از طرفی، در روش TS پوشش تشکیل شده دارای تخلخل زیادی می‌باشد [۱۳]. روش نفوذ واکنشی حرارتی همانند سایر روش‌های مرسوم محدودیت‌هایی نیز به همراه دارد در این روش درصد کربن زیرلایه فولادی باید بالاتر از ۰/۳ درصد وزنی باشد هم‌چنین به علت بالا بودن دمای پوشش‌دهی که معمولاً بالاتر از دمای آستنیت می‌باشد میکروساختار قطعه طی فرایند تغییر می‌کند و امکان تغییر ابعادی وجود دارد [۱۴]. از طرفی روش نفوذ واکنشی حرارتی نه تنها نیاز به تجهیزات نسبتاً ساده و ارزان قیمت دارد بلکه با محیط زیست سازگار می‌باشد و هم‌چنین پوشش تشکیل شده با این روش دارای ویژگی‌هایی از جمله: از لحاظ متالورژیکی دارای استحکام چسبندگی عالی روی قطعه، سختی و مقاومت به سایش بهتر، یکنواختی پوشش و ضریب اصطکاک پایین می‌باشد. هم‌چنین توسط این روش سطح و هسته قطعه هم‌زمان سخت می‌شوند [۱۲،۱۴،۱۵].

فرایند TRD باعث ایجاد یک لایه کاربیدی توسط نفوذ کربن از زیرلایه فولادی به سطح در محدوده دمایی  $800^{\circ}\text{C}$  تا  $1050^{\circ}\text{C}$  می‌شود [۱۱]. در روش TRD تولید پوشش‌های سخت کاربیدی به سه روش می‌تواند انجام شود: ۱- روش حمام نمک مذاب، ۲- بستر سیال و ۳- پودر فشرده، که روش حمام نمک مذاب نسبت به سایر روش‌ها ارزان‌تر می‌باشد و بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۶-۱۹، ۲۴]. به‌طور کلی چهار فاکتور

مهم بر نرخ رشد پوشش در فرایند TRD به روش حمام‌نمک مذاب تاثیر دارند که عبارتند از: ۱- مدت زمان نگهداری در حمام نمک مذاب ۲- درجه حرارت حمام نمک ۳- نوع فولاد و ۴- میل ترکیبی عناصر بین نشین مانند کربن، البته غلظت عناصر تشکیل‌دهنده کاربیدساز مانند وانادیم و کروم هم می‌توانند روی ضخامت پوشش تاثیر داشته باشد [۲۰، ۱۷، ۱۶].

امروزه پوشش‌های کاربیدی تک لایه مانند پوشش کاربید کروم، پوشش کاربید نایوبیم و پوشش کاربید وانادیم به طور گسترده استفاده می‌شوند. این پوشش‌ها به علت خواص خوبی که دارند مانند مقاومت سایشی، ضریب اصطکاک کم و مقاومت به خوردگی عالی آنها به طور معمول برای افزایش عمر قطعات صنعتی به کار برده می‌شوند [۲۱، ۱۸]. گنجی و همکاران [۲۲]، پوشش‌های تک لایه کاربید کروم و کاربید وانادیم را با استفاده از روش TRD روی زیر لایه فولادی ۱۵۴۵ در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  و زمان‌های غوطه‌وری ۸، ۱۰ و ۱۲ ساعت ایجاد کردند. نتیجه حاصل از آزمون پراش اشعه X برای پوشش‌های کاربید کروم نشان داده‌است که لایه کاربید کروم با فرمول  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  برای تمامی زمان‌های غوطه‌وری بر روی زیرلایه فولادی تشکیل شده‌است. همچنین آن‌ها گزارش کرده‌اند که با افزایش دما و زمان پوشش‌دهی ضخامت و میزان سختی لایه کاربیدی افزایش داشته‌است. به طوری که بیشترین ضخامت و سختی پوشش کاربید کروم برای زمان غوطه‌وری ۱۲ ساعت به میزان ۲۰ میکرون و ۱۷۸۲ ویکرز حاصل شده‌است. در تحقیقی دیگر Zhihua و همکاران فرایند TRD [۲۳] را با روش غوطه‌وری در حمام نمک مذاب روی سه نوع فولاد ابزار سرد شامل  $\text{T10}$ ،  $\text{Cr12}$  و  $\text{GCr15}$  در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  و زمان ۴ ساعت انجام داده‌اند. آن‌ها گزارش کرده‌اند که پوشش ترکیبی از فازهای  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  و مقدار جزئی (Cr)  $(\text{Fe})_7\text{C}_3$  می‌باشد همچنین پوشش با ضخامت یکنواخت و هموار تشکیل شده‌است. آنها نشان دادند که میزان سختی پوشش تشکیل شده روی زیرلایه فولاد بعد از فرایند TRD بیشتر از ۲۰۰۰ HV است که سختی بین پوشش و زمینه به آرامی انتقالی می‌باید. هم‌چنین بیان کردند که دو عامل مهم در افزایش سختی سطح، زمان غوطه‌وری و نوع فولاد زیر لایه می‌باشند.

هدف از انجام این تحقیق تشکیل پوشش کاربید کروم روی زیر لایه فولادی ۱۵۴۵ در دما و زمان‌های مختلف و بررسی پوشش‌های تولید شده از لحاظ خواص مکانیکی، خواص فیزیکی، شناسایی تأثیر عوامل اصلی (زمان، دما) بر مکانیزم تشکیل این پوشش‌ها می‌باشد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

فولاد ابزار سرد کار سخت شونده در آب (۱۵۴۵) به عنوان زیر لایه در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. این فولاد از نوع فولادهای ساده کربنی بسیار کم آلیاژی می‌باشد و جز ارزان‌ترین فولادهای ابزار می‌باشد به

همین علت ایجاد یک پوشش کاربیدی سخت روی آن می‌تواند ارزش افزوده قابل ملاحظه‌ای را ایجاد کند. آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه و همچنین استاندارد آن در جدول ۱ گزارش شده‌است.

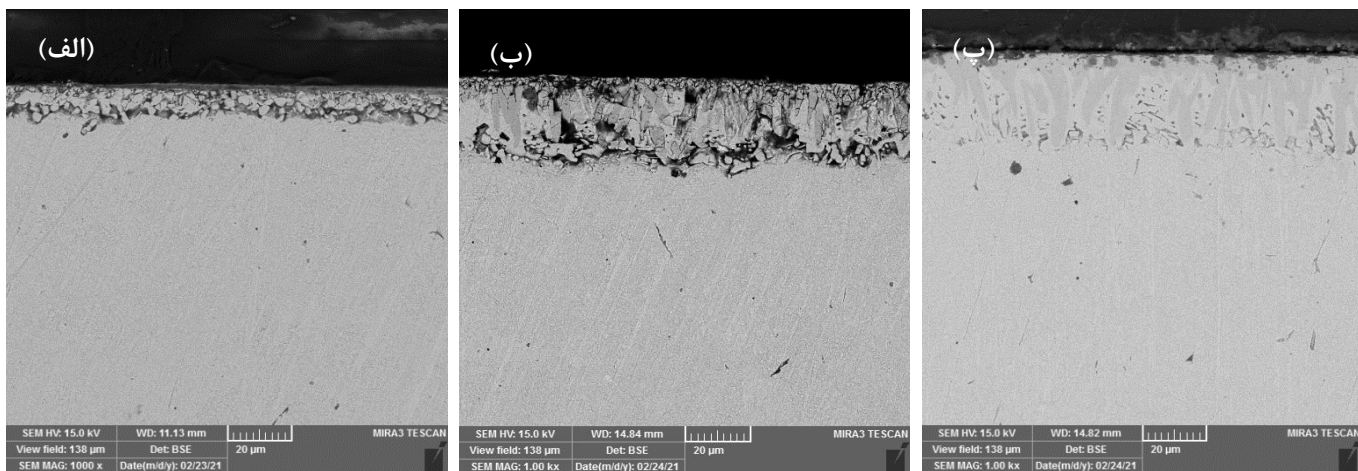
جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد ابزار ۱۵۴۵ برحسب درصد وزنی (% wt.)

	C	Si	Mn	S	P
<b>Standard</b>	1/00-1/10	0/10-0/25	0/10-0/25	<0/02	<0/02
<b>Sample</b>	1/04	0/16	0/19	0/01	0/01

ابتدا میلگرد فولادی ۱۵۴۵ توسط وایر کات به نمونه‌های دایره‌ای شکل به قطر ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر تبدیل شد. سپس یک سوراخ به قطر ۲ میلی‌متر به منظور آویزان کردن نمونه در حمام ایجاد شد. بعد از مراحل اشاره شده بالا تمامی نمونه‌ها جهت آماده‌سازی سطحی از سمباده ۸۰ تا ۲۰۰۰ پولیش شدند، هم‌چنین به منظور حذف آلودگی‌های سطحی نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در حمام اولتراسونیک محلول استون شستشو شدند. از پودرهای بوراکس (۶۹/۷۸ درصد وزنی) به عنوان عامل پرکننده حمام، اکسید کروم (۱۵ درصد وزنی) به عنوان عامل کاربیدساز، آلومینیم به عنوان عامل احیاکننده (۵/۳۳ درصد وزنی) و سدیم فلوراید به عنوان عامل سیال‌کننده (۹/۹ درصد وزنی) در این تحقیق استفاده شد. به منظور جلوگیری از شوک حرارتی نمونه‌ها قبل از غوطه‌ور شدن در حمام نمک مذاب، به مدت ۱۵ دقیقه در کوره پیشگرم در دمای ۴۰۰ °C قرار گرفتند. سپس یک میلگرد فولادی روی بوتله قرار گرفت و نمونه‌ها در دمای آزمایش به منظور انجام فرایند TRD توسط سیم نسوز در داخل حمام نمک غوطه‌ور شدند. حمام اکسید کروم در سه دمای ۸۰۰ °C، ۹۰۰ °C و ۱۰۰۰ °C آماده شد و در هر حمام مذاب ۳ نمونه به مدت زمان‌های ۵،۴ و ۶ ساعت غوطه‌ور بودند. پس از پایان فرایند پوشش‌دهی، نمونه‌ها از حمام نمک خارج و بلافاصله در روغن در دمای محیط کویچ شدند، سپس برای حذف آلودگی‌های سطحی، مخصوصاً مواد باقیمانده حمام که به نمونه‌ها چسبیده بودند ابتدا نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در آب ۱۰۰ °C جوشانده و بعد از آن ۱۵ دقیقه در حمام اولتراسونیک در محلول استون قرار داده شدند. به منظور بررسی سطح مقطع پوشش و ریز ساختار آن، نمونه‌ها توسط وایر کات برش داده شده و از قسمت سطح مقطع آن مانت شد. سپس نمونه مانت شده تحت عملیات سمباده‌زنی از مش ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ قرار گرفت و بعد از آن روی نمدهاوی خمیر الماس پولیش شده، و توسط محلول نایتال ۳ درصد اچ شدند.

### ۳- نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پوشش کاربید کروم تشکیل شده در حمام اکسید کروم در دماهای  $800^{\circ}\text{C}$ ،  $900^{\circ}\text{C}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  در زمان‌های غوطه‌وری ۴، ۵ و ۶ ساعت به ترتیب در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در زمان‌های ۴ و ۵ ساعت، یک پوشش غیریکنواخت و متخلخل به ترتیب با میانگین ضخامت  $11/15$  و  $26/117$  روی زیرلایه فولادی تشکیل شده است. با افزایش زمان غوطه‌وری به ۶ ساعت، مشاهده می‌شود که به شدت از میزان تخلخل پوشش کاسته شده، اما باز هم میزان کمی تخلخل در آن مشاهده می‌شود. پوشش در این حالت دیگر به صورت ذرات ناپیوسته از یک دیگر نیست بلکه تقریباً به صورت پیوسته تشکیل شده است. به عبارت دیگر با افزایش زمان غوطه‌وری، فرصت برای نفوذ عناصر تشکیل‌دهنده پوشش کاربیدی بیشتر بوده و ذرات ناپیوسته تشکیل شده در زمان ۵ ساعت توانستند به یک دیگر بپیوندند و از میزان تخلخل بکاهند. به منظور پی بردن به عناصر تشکیل‌دهنده پوشش، آنالیز EDS به صورت نقطه‌ای از پوشش‌های  $800^{\circ}\text{C}$  گرفته شد که مقادیر آن در جدول ۲ ذکر شده است.



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پوشش تشکیل شده در حمام اکسید کروم در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  در زمان غوطه‌وری: الف) ۴ ساعت، ب) ۵ ساعت و پ) ۶ ساعت.

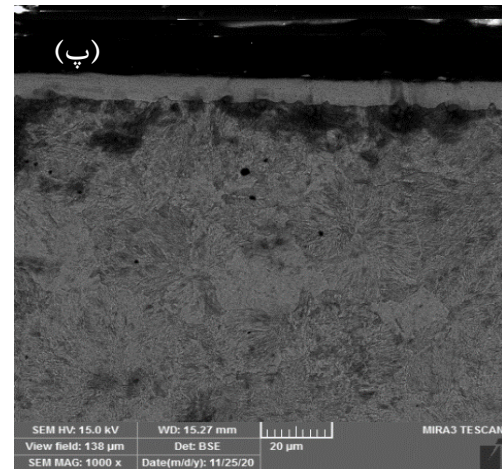
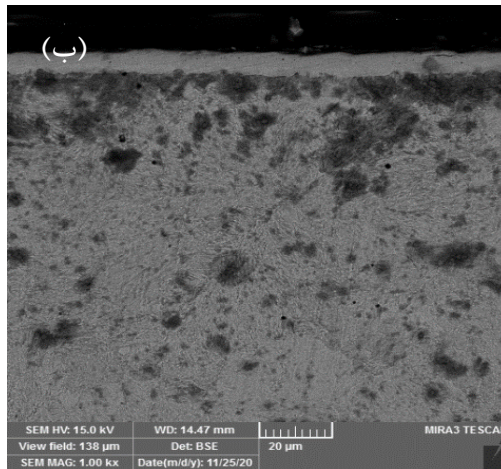
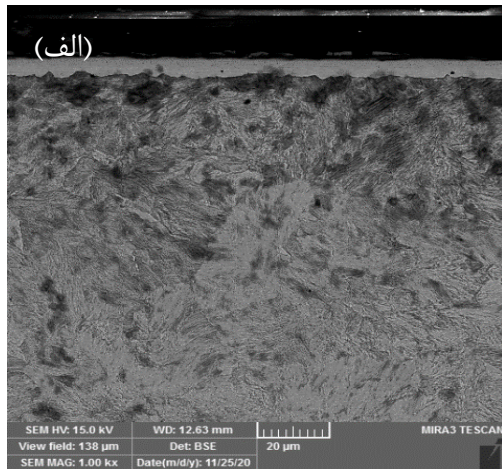
در مدت زمان ۴ ساعت و دمای  $800^{\circ}\text{C}$  میزان کمی عنصر کروم به داخل زیرلایه فولادی نفوذ کرده و با آهن و کربن موجود در زیرلایه به ترتیب محلول جامد آهن-کروم و جوانه‌های کاربید کروم را تشکیل داده است. با افزایش زمان غوطه‌وری به ۵ و ۶ ساعت، از میزان آهن پوشش کاسته شده و میزان کروم و کربن آن افزایش داشته است و در زمان غوطه‌وری ۶ ساعت رگه‌هایی به صورت خاکستری تیره در پوشش مشاهده می‌شود که حاوی کروم بالاتری هستند.

جدول ۱۹- نتایج آنالیز کمی EDS از پوشش تشکیل شده در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  در زمان‌های ۵، ۴ و ۶ ساعت.

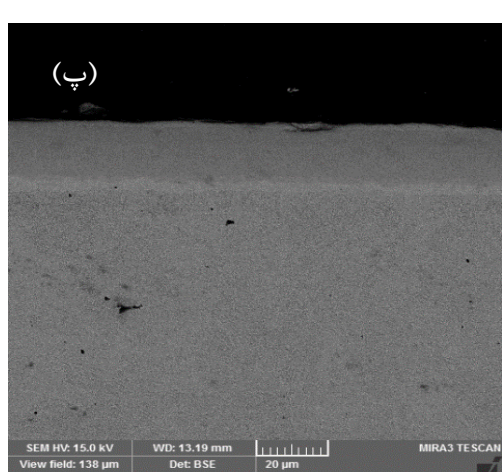
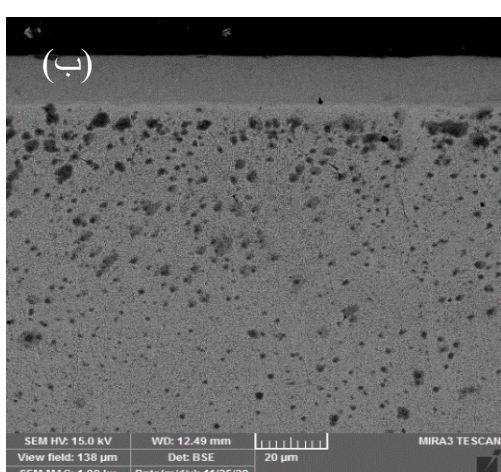
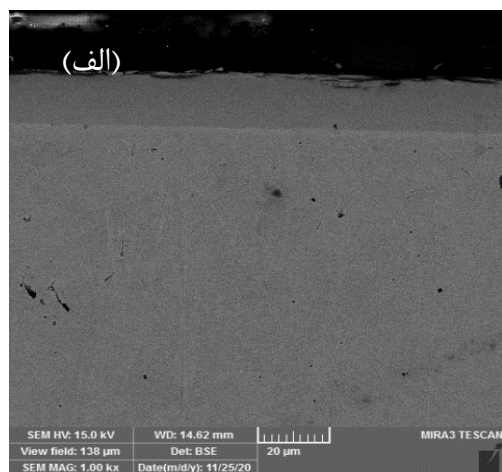
آهن		کربن		کروم		زمان غوطه‌وری
درصد اتمی	درصد وزنی	درصد اتمی	درصد وزنی	درصد اتمی	درصد وزنی	
۷۰/۶۶	۹۰/۳۸	۲۷/۶۴	۷/۵۹	۱/۷	۲/۰۳	۴ ساعت
۵۳/۴۲	۸۲/۱۳	۴۴/۵۰	۱۴/۷۱	۲/۰۸	۳/۱۶	۵ ساعت
۵۲/۰۲	۷۵/۲۵	۴۴/۳۰	۱۹/۶۶	۳/۶۸	۵/۰۹	۶ ساعت

به طور کلی دمای پوشش دهی  $800^{\circ}\text{C}$  برای تشکیل یک پوشش کاربیدی ایده‌آل ناکافی می‌باشد و تنها جوانه‌هایی از کاربید کروم در این شرایط تشکیل شده‌است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  تمامی پوشش‌ها یکنواخت و بدون تخلخل و متراکم روی زیر لایه فولادی با میانگین ضخامت  $5/14$ ،  $8/88$  و  $9/73$   $\mu\text{m}$ ، به ترتیب برای زمان‌های غوطه‌وری ۴، ۵ و ۶ ساعت تشکیل شده‌است. با مقایسه این پوشش‌ها با پوشش‌های تشکیل شده در دمای  $800^{\circ}\text{C}$ ، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دما به میزان  $100^{\circ}\text{C}$  دیگر پوشش به صورت متخلخل و ذرات گسسته از هم نیست بلکه در این شرایط، نفوذ عنصر کاربید ساز کروم به داخل زیرلایه و نفوذ کربن به سطح به میزان کافی انجام شده و یک پوشش یکپارچه از کاربید کروم تشکیل شده‌است. آنالیز EDS به صورت نقطه‌ای از پوشش‌های  $900^{\circ}\text{C}$  گرفته شد که مقادیر آن در جدول ۳ ذکر شده‌است. مشاهده می‌شود که درصد کربن و کروم پوشش‌های تشکیل شده در این دما نسبت به پوشش‌های دمای  $800^{\circ}\text{C}$  به شدت افزایش داشته‌است. باید توجه داشت که ترکیب شیمیایی زیرلایه فولادی فاقد عنصر کروم می‌باشد و تمام کروم موجود در پوشش توسط حمام تامین شده‌است [۲۲] همچنین کربن موجود در لایه کاربیدی از زیرلایه فولادی تامین می‌شود.

با افزایش دمای حمام به  $1000^{\circ}\text{C}$  ضخامت پوشش تشکیل شده نسبت به دمای  $900^{\circ}\text{C}$  در هر ۳ زمان غوطه‌وری افزایش داشته‌است. ضخامت اندازه‌گیری شده برای زمان‌های غوطه‌وری ۴، ۵ و ۶ ساعت به ترتیب  $17/30$ ،  $17/75$  و  $18/06$   $\mu\text{m}$  می‌باشد. بررسی پوشش‌های تشکیل شده در دو دمای  $900^{\circ}\text{C}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  و زمان‌های غوطه‌وری متفاوت نشان می‌دهد که تاثیر دما بر افزایش ضخامت این پوشش‌های کاربیدی بیشتر از تاثیر زمان غوطه‌وری است [۱۳، ۲۲].



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پوشش تشکیل شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  در زمان غوطه‌وری: (الف) ۴ ساعت، (ب) ۵ ساعت و (پ) ۶ ساعت.



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پوشش تشکیل شده در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  در زمان غوطه‌وری: (الف) ۴ ساعت، (ب) ۵ ساعت و (پ) ۶ ساعت.

نتایج آنالیز EDS به صورت نقطه ای برای پوشش‌های تشکیل شده در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  در جدول ۴ گزارش شده است. با مقایسه نتایج EDS حاصل از دماهای  $900^{\circ}\text{C}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  نتیجه می‌شود که افزایش دما باعث افزایش نرخ نفوذ عنصر کابیدساز کروم به داخل زیرلایه به علت افزایش ضریب نفوذ با دما می‌شود. حضور بیشتر عنصر کروم در لایه پوشش کروم ایجاد شده در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  در تمامی زمان‌های غوطه‌وری در مقایسه با پوشش‌های تشکیل شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  بیانگر احتمال بیشتر واکنش آن با کربن و تشکیل کاربید کروم است که باعث رشد لایه می‌باشد.



جدول ۳- نتایج آنالیز کمی EDS از پوشش تشکیل شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  در زمان‌های ۵، ۴ و ۶ ساعت.

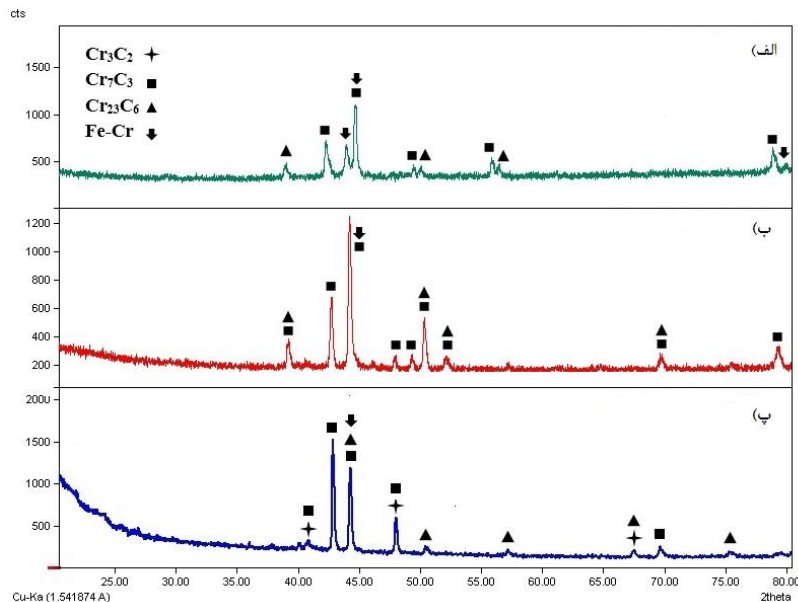
آهن		کربن		کروم		زمان غوطه‌وری
درصد اتمی	درصد وزنی	درصد اتمی	درصد وزنی	درصد اتمی	درصد وزنی	
20/78	40/05	59/58	24/70	19/64	35/25	۴ ساعت
۱۶/۳۲	۲۸/۴۷	55/80	22/14	۲۷/۸۸	۴۹/۳۹	۵ ساعت
۱۲/۸۷	۲۶/۲۱	57/99	23/73	۲۹/۱۴	۵۰/۰۶	۶ ساعت

جدول ۴- نتایج آنالیز کمی EDS از پوشش تشکیل شده در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  در زمان‌های ۵، ۴ و ۶ ساعت.

آهن		کربن		کروم		زمان غوطه‌وری
درصد اتمی	درصد وزنی	درصد اتمی	درصد وزنی	درصد اتمی	درصد وزنی	
۴/۹۰	۹/۹۵	۶۳/۹۳	۳۱/۱۶	۳۱/۱۷	۵۸/۸۹	۴ ساعت
۱/۶۵	۳/۳۸	۶۴/۰۹	۳۱/۳۴	۳۴/۲۶	۶۵/۲۸	۵ ساعت
۱/۱۸	۲/۳۹	۶۳/۳۲	۳۰/۷۳	۳۵/۵۰	۶۶/۸۸	۶ ساعت

نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس برای پوشش‌های تشکیل شده در زمان غوطه‌وری ۶ ساعت و دماهای  $800^{\circ}\text{C}$ ،  $900^{\circ}\text{C}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پوشش تشکیل شده در دماهای  $800^{\circ}\text{C}$  و  $900^{\circ}\text{C}$  شامل فازهای کاربید کروم از جمله  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  و  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  و فاز محلول جامد آهن-کروم تشکیل شده است. فاز غالب در دمای پوشش دهی  $800^{\circ}\text{C}$  و  $900^{\circ}\text{C}$  به ترتیب محلول جامد آهن-کروم و فاز  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  می‌باشد. فاز پایدار  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  به دلیل کافی نبودن میزان کربن در این دو دما تشکیل نشده است. نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس برای پوشش‌های تشکیل شده در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد که فازهای کاربید کروم به صورت  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ،  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  و  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  و فاز محلول جامد آهن-کروم به صورت موفقیت‌آمیز

تشکیل شده است که در دیگر پژوهش‌ها به آن اشاره شده است [۲۲، ۱۷]. مقایسه الگوی پراش حاصل از پوشش‌های کاربیدی تشکیل شده در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  با پوشش‌های کاربیدی تشکیل شده در دو دمای  $800^{\circ}\text{C}$  و  $900^{\circ}\text{C}$  مشخص می‌کند که با افزایش دما امکان تشکیل فازهای کاربید کروم افزایش می‌یابد. الگوی پراش اشعه ایکس برای پوشش تشکیل شده در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  فاز نشان می‌دهد که فاز پایدار کاربید کروم  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  تشکیل شده است که بیانگر این مطلب است که در این دما نرخ نفوذ کربن بالا بوده و کربن کافی برای تشکیل فاز پایدار کاربید کروم فراهم شده است. به طور کلی از نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس مشخص شد که احتمال تشکیل کاربیدهای کروم روی زیرلایه فولادی  $1545$  با افزایش دما افزایش می‌یابد.



شکل ۵- الگوهای پراش اشعه ایکس از پوشش کاربید کروم تشکیل شده در زمان غوطه‌وری ۶ ساعت در: (الف)  $800^{\circ}\text{C}$ ، (ب)  $900^{\circ}\text{C}$  و (پ)  $1000^{\circ}\text{C}$  روی فولاد  $1545$ .

نتایج حاصل از سختی‌سنجی نمونه‌های پوشش داده شده و زیرلایه فولادی به طور خلاصه در جدول ۵ گزارش شده است. سختی پوشش‌های تشکیل شده در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  در حد سختی گزارش شده برای لایه محلول جامد آهن-کروم می‌باشد که توسط محققان دیگر گزارش شده است [۱۷]. همانطور که گفته شد با افزایش زمان غوطه‌وری در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  جوانه‌های کاربید کروم رشد کرده و به میزان آن اضافه می‌شود به همین دلیل در زمان غوطه‌وری ۶ ساعت میزان سختی پوشش افزایش داشته است. سختی پوشش‌های تشکیل شده در دماهای  $900^{\circ}\text{C}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  در مقایسه با سختی زیرلایه به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش داشته است. واضح است که با افزایش دما امکان تشکیل فازهای کاربید کروم بیشتر می‌شود. علاوه بر این هرچه

ضخامت لایه پوشش بیشتر باشد می‌توان مقادیر سختی بیشتری را بدست آورد. زیرا لایه‌های ضخیم‌تر مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل در نواحی اطراف تورفتگی دارند [۱۳].

جدول ۵- نتایج آزمون سختی سنجی پوشش‌های تشکیل شده در  $800^{\circ}\text{C}$ ،  $900^{\circ}\text{C}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  برای زمان‌های ۴، ۵، ۶ و ساعت.

$1000^{\circ}\text{C}$			$900^{\circ}\text{C}$			$800^{\circ}\text{C}$			دمای غوطه‌وری
۶	۵	۴	۶	۵	۴	۶	۵	۴	زمان غوطه‌وری (ساعت)
۱۵۱۰	۱۴۰۰	۱۱۹۳	۱۲۷۸	۱۱۷۹	۱۱۱۴	۹۲۰	۸۹۶	۷۸۰	سختی پوشش (HV)
۴۲۸	۴۲۸	۴۲۰	۳۹۵	۳۸۰	۴۱۰	۳۷۰	۳۵۰	۳۵۰	سختی زیر لایه (HV)

#### ۴- نتیجه گیری

- در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  و در تمامی زمان‌های غوطه‌وری، شرایط برای تشکیل یک لایه کامل و پیوسته از کاربید کروم کافی نبود و تنها جوانه‌هایی از کاربید کروم در این شرایط تشکیل شد.  
 - در دماهای پوشش‌دهی  $900^{\circ}\text{C}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  یک لایه کاربیدی پیوسته و متراکم و بدون تخلخل در تمامی زمان‌های غوطه‌وری روی زیرلایه فولادی تشکیل شد.  
 - با افزایش دما و زمان غوطه‌وری، ضخامت پوشش کاربیدی به دلیل نفوذ بیشتر عنصر کاربیدساز به داخل زیرلایه و واکنش آن با کربن و تشکیل کاربید بیشتر افزایش داشت.  
 - فازهای تشکیل شده در پوشش، کاربید کروم  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ،  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  و  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  بودند، البته در دماهای  $800^{\circ}\text{C}$  و  $900^{\circ}\text{C}$  فاز پایدار کاربید کروم  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  تشکیل نشد. همچنین فاز محلول جامد آهن-کروم در تمام دماهای پوشش‌دهی تشکیل شد.  
 - آزمون میکروسختی نشان داد که سختی پوشش تشکیل شده از سختی زیرلایه بیشتر می‌باشد و با افزایش دما و زمان غوطه‌وری سختی پوشش کاربیدی افزایش داشته است.

#### ۵- مراجع (بایستی تماماً با انگلیسی نوشته شود بجز مرجع آخری که فارسی است)

- 1- ASM Handbook, Volume 1: Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys, ASM International, 1990 ISBN: 978-0-87170-377-4, P. 1063.
- 2- D.T. Llewellyn, R.C. Hudd, Steels: Metallurgy and applications, (1998) (ISBN: 978-0-7506-3757-2, pp400).

- ۳- H. Tavakoli, S.M. Mousavi Khoie, et al. Journal of Alloys and Compounds, Vol. 583 (2014) 382-389.
- ۴- A.L.Yerokhin, X. Nie, et al, Surface Coating & Technology, Vol. 122 (1999) 73-93.
- ۵- E.J. Mittemeijer, M.A.J. Somers, Thermochemical surface engineering of steels, 62 Woodhead Publishing. (Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, 2015).
- ۶- J.R. Davis, Surface engineering for corrosion and wear resistance, ASM International, Materials Park, USA, 2001 ISBN 0-87170-700-4.
- ۷- M. Bozidar, M. Stupnisek, Improvements in thermo reactive deposition of carbide layers, Surf. Eng. 23 (1) (2007) 52-55.
- ۸- R.F. Bunshah, Handbook of hard coatings: deposition technologies, Properties and Application, Noyes Publications, New Jersey, 2001.
- ۹- J.R. Davis, Surface hardening of steels: Understanding the basics, ASM International, Materials Park, 2002.
- ۱۰- H.Pouraliakbara, G.Khalaj, et al. Duplex ceramic coating produced by low temperature thermo-reactive deposition and diffusion on the cold work tool steel substrate: Thermodynamics, kinetics and modeling, Ceramics International 41 (2015) 9350-9360.
- ۱۱- H.Pouraliakbara, G.Khalaj, et al. Duplex ceramic coating produced by low temperature thermoreactive deposition and diffusion on the cold work tool steel substrate: Thermodynamics, kinetics and modeling, Ceramics International 41 (2015) 9350-9360.
- ۱۲- T. Arai, Thermochemical Surface Engineering of Steels, The thermo-reactive deposition and diffusion process for coating steels to improve wear resistance, (2015) 703-734.
- ۱۳- Ali Günen, Müge Kalkandelen, Characteristics and high temperature wear behavior of chrome vanadium carbide composite coatings produced by thermo-reactive diffusion, Surface & Coatings Technology 402 (2020) 126402.
- ۱۴- W.Hongfu, W.Huachang, et al. Composition Variation of Borax Salt during the Process of Vanadizing by Thermal Diffusion, Vol.27 (2), (2011) 394-397.
- ۱۵- T Arai, Carbide Coating Process by Use of Molten Borax Bath in Japan, J. Heat Treating, Vol.1 (2-15), (1979) 15-22.
- ۱۶- B.L.Strahin, D.D. Shreeram, et al. Properties and Tribological Performance of Vanadium Carbide Coatings on AISI 52100 Steel Deposited by Thermoreactive Diffusion, JOM, Vol 69 (7), (2017) 1160-1164.
- ۱۷- A. Ghadi, M. Soltanieh, Effect of carbon presence in the substrate and salt bath on the formation of chromium coating layers on steel through TRD process, J. Ceram. Process. Res. 16 (2015) 657-661.

- ۱۸- S. Sen, Influence of chromium carbide coating on tribological performance of steel, Mater. Des. 27 (2006) 85–91.
- ۱۹- C.Y. Wei, F.S. Chen, Thermoreactive deposition/diffusion coating of chromium carbide by contact-free method, Mater. Chem. Phys. 91 (2005) 192–199.
- ۲۰- X.S. Fan, Z.G. Yang, C. Zhang, Y.D. Zhang, H.Q. Che, Evaluation of vanadium carbide coatings on AISI H13 obtained by thermo-reactive deposition/diffusion technique, Surf.Coat. Technol. 205 (2010) 641–646.
- ۲۱- W.Jin, .Meng, et al. Properties of the Functionally Gradient Chromium-Niobium Carbide Coating Obtained by Thermo-Reactive Deposition Technique, Key Engineering Materials Vol.753, (2017) 129-133.
- ۲۲- Omid Ganji, Seyed Abdolkarim Sajjadi, On the formation and properties of chromium carbide and vanadium carbide coatings produced on W1 tool steel through thermal reactive diffusion (TRD), Ceram. Int.
- ۲۳- Y.Zhihua, W.Zhijun, et al, Preparation and Property of Chromium Carbide Thermal Diffusion Coating on Cold Working Die Materials, Journal of Wuhan University of Technology Mater.Sci.Ed. Vol.25(4), (2010) 596-599.
- ۲۴- محمد رضا نجاری سعادت آبادی، امید گنجی، سید عبدالکریم سجادی، « بررسی و مقایسه پوشش‌های تک لایه کاربید وانادیم و کاربید کروم تشکیل شده توسط اکسیدهای فلزی با روش نفوذ واکنشی حرارتی (TRD) روی فولاد ابزار کربنی DIN:۱/۱۵۴۵»، هشتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مواد و متالورژی ایران، آبان ۱۳۹۸.