



بررسی و مشخصه‌یابی تشکیل پوشش کاربید کروم روی فولاد ابزار کربنی DIN:1/1545 در محیط پودر فشرده به روش نفوذ واکنشی حرارتی (TRD)

مینا دادخواه^۱ - سید عبدالکریم سجادی^۲ - امید گنجی^۳

چکیده

پوشش‌های کاربیدی به علت خواص خوب سایشی که دارند از اهمیت بالایی در صنعت برخوردار می‌باشند و اغلب برای افزایش طول عمر قالب‌های کشش و فرم و به طور کلی ابزاری که در معرض نیروهای سایشی قرار دارند استفاده می‌شوند. امروزه فرایندهای پوشش دهی گوناگونی به کار گرفته می‌شود که یکی از آنها فرایند نفوذ واکنشی حرارتی (TRD) است که در این روش یک لایه سخت کاربیدی و یا نیتریدی روی سطح قطعات و قالب‌های صنعتی تشکیل می‌شود. در این تحقیق از فرایند نفوذ واکنشی حرارتی به روش پودر فشرده (Pack Cementation) برای تشکیل پوشش‌های سخت کاربیدی حاوی فروکروم روی فولاد ابزار کربنی ۱/۱۵۴۵ در دمای ۱۰۰۰ °C و زمان‌های ۳، ۵، ۷ و ۹ ساعت استفاده شد. برای بررسی لایه پوششی تشکیل شده، آزمون‌های SEM، XRD، EDS، و میکروسختی انجام شد. نتایج نشان داد که لایه پوششی حاوی محلول جامد (Fe-Cr) و کاربیدهای کروم (Cr_3C_2 و Cr_7C_3) است. همچنین مشخص شد که ضخامت لایه پوشش 13μ و بیشترین میزان سختی نیز 2344HV است که در زمان‌های بیشتر فرایند بدست آمده است.

کلمات کلیدی: نفوذ واکنشی حرارتی، پوشش‌های سخت کاربیدی، پودر فشرده، کاربید کروم

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد، Dadkhah2976@gmail.com

^۲ استاد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ دکتری، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد



۱- مقدمه

در فرایندهای شکل دهی سرد، ابزارآلات نقش بسیار مهمی در کیفیت محصولات و بهره‌وری تولید دارند [۱]. شکست ابزارآلات به دلیل صدمات مکانیکی نظیر سایش و خستگی تحت شرایط تنشی پیچیده در سطح قالب اتفاق می‌افتد [۲]. به همین دلیل مواد ایده‌آل ابزار با ساختار انتقالی یعنی از یک ساختار سخت به نرم و همچنین سختی مواد را به طور تدریجی از سطح به داخل ماده کاهش می‌دهد [۳]. لایه‌های کاربیدی به دلیل داشتن خواص فیزیکی و مکانیکی خوب، طی سال‌های اخیر اهمیت به‌سزایی در صنعت داشته‌اند و اغلب برای افزایش طول عمر قالب‌ها در آهنگری گرم و سرد، قالب‌های تیوبی، اکستروژن، قالب‌های متالورژی پودر و به طور کلی ابزارآلاتی که در معرض نیروهای سایشی قرار دارند استفاده می‌شوند [۴ و ۵]. جهت افزایش طول عمر ابزارآلات و قالب‌ها و بهبود عملکرد سطحی، فرایندهای مختلفی از پوشش‌دهی سخت وجود دارد که می‌توان به روش‌های رسوب شیمیایی فاز بخار (CVD)، رسوب فیزیکی فاز بخار (PVD) و نفوذ واکنشی حرارتی (TRD)، نیتراسیون و اسپری حرارتی اشاره کرد. هر دو روش رسوب شیمیایی فاز بخار و رسوب فیزیکی فاز بخار نیازمند خلأ و اتمسفر کنترل شده به همراه تجهیزاتی پیچیده و گران قیمت می‌باشند. در مقایسه، روش نفوذ واکنشی حرارتی علاوه بر تجهیزات نسبتاً ساده و ارزان قیمت، با محیط زیست نیز سازگار بوده و دارای ویژگی‌های دیگری نظیر استحکام چسبندگی عالی پوشش از لحاظ متالورژیکی بر روی سطح زیرلایه حتی برای پوشش‌های ضخیم، ضریب اصطکاک پایین، سختی و مقاومت به سایش بهتر، یکنواختی پوشش در حفرات نازک و همچنین قابلیت سخت کردن سطح و هسته قطعه به طور همزمان می‌باشد [۶-۱۳]. البته روش نفوذ واکنشی حرارتی مانند سایر روش‌های دیگر محدودیت‌هایی نیز به همراه دارد از جمله: عمر کوتاه کاری مواد محیط پودر فشرده [۱۴]. در فرایند TRD در محدوده دمایی ۸۰۰ تا ۱۰۵۰ یک لایه کاربیدی توسط فرایند نفوذ کربن از زیرلایه فولادی به سطح به وجود می‌آید [۱۲]. فرایند نفوذ واکنشی حرارتی یک عملیات ترموشیمیایی است که توانایی ایجاد پوشش‌های سرامیکی چگال و فشرده کاربیدی، نیتریدی و یا کربونیتریدی را روی سطح زیرلایه و مخصوصاً فولادها دارد [۱۱، ۱۳، ۱۴]. اساساً این فرایند سه مرحله مهم را شامل می‌شود [۱۱]: الف) عنصر فلزی کاربیدساز به زیر لایه نفوذ کرده و در مقابل کربن از زیر لایه خارج می‌شود که این نفوذ عناصر فلزی به زیر لایه باعث ایجاد یک لایه پوششی با خواص سایشی عالی می‌شود. ب) بین فلز و کربن در سطح واکنش اتفاق می‌افتد و موجب جوانه‌زنی کریستال‌های کاربید فلزی در مراحل اولیه فرایند می‌شود. ج) ضخامت پوشش‌ها بر اساس قانون رشد به صورت سهمی وار انجام می‌شود [۱۱]. عناصر کاربیدساز عناصری هستند که باعث تشکیل کاربیدها می‌شوند که نسبت به کاربیدها زیرلایه دارای تغییرات انرژی گیبس منفی



تری می‌باشند که این امر سبب پایداری بیشتر این کاربردها نسبت به کاربردها زیر لایه از لحاظ ترمودینامیکی می‌شود. عناصر کاربیدساز برای زیرلایه‌های پایه آهنی عبارتند از: تیتانیوم (Ti)، زیرکنیوم (Zr)، هافنیم (Hf)، وانادیوم (V)، نیوبیوم (Nb)، تانتالم (Ta)، کروم (Cr)، تنگستن (W)، مولیبدن (Mo) و منگنز (Mn) می‌باشند [۱۵]. به‌طور کلی فرایند نفوذ واکنشی حرارتی به سه روش مختلف بستر سیال، پودر فشرده و حمام نمک مذاب انجام می‌شود. [۱۱ و ۱۶]. نیروی محرکه برای واکنش شیمیایی بین عناصر کاربید سازو کربن، تمایل شدید این عناصر به کربن می‌باشد. واکنشی که در آن پوشش‌های ضخیم توسط نفوذ حرارتی کربن از داخل به سطح و یا به عبارتی از قسمت غنی به سمت قسمت فقیر، تشکیل می‌شوند [۱۳]. در فرایند نفوذ واکنشی حرارتی یکی از فاکتورهای تعیین ضخامت پوششی، میزان کربن در زیرلایه می‌باشد [۱۳ و ۱۷ و ۱۸]. مقدار کربن باید در فولاد بیشتر از ۰/۴٪ باشد. میزان کربن در زیرلایه بخصوص به شکل محلول جامد در افزایش ضخامت لایه پوششی سهیم می‌باشند [۱۷، ۱۱، ۶]. به‌طور معمول ضخامت پوششی که به روش TRD تولید می‌شود بین ۲ تا ۲۰ μm می‌باشد [۱۹ و ۱۶]. در رابطه با فولادهای پرکربن پرآلیاژی، انحلال کاربردهای عناصر آلیاژی در فاز زمینه، با بالا بردن میزان کربن در محلول جامد، ضخامت پوشش را افزایش می‌دهد [۱۳]. همچنین نفوذ جزئی آهن و دیگر عناصر از زیرلایه به سمت لایه های کاربیدی وجود دارد [۴]. به طور کلی عواملی که بر نرخ رشد پوشش در فرایند TRD تأثیر دارند که عبارتند از: ۱- درجه حرارت کوره، ۲- مدت زمان نگهداری در کوره، ۳- میل ترکیبی عناصر بین نشین مانند نیتروژن، کربن یا بور، ۴- نوع فولاد زیرلایه ۵- غلظت عناصر تشکیل دهنده کاربید مانند وانادیوم، کروم و یا تیتانیوم [۱۷، ۱۱، ۶]. پوشش‌ها برای کاربردهای خاص به خواص متفاوتی نیازمند می‌باشند. عملکرد کلی پوشش‌ها بستگی به استحکام چسبندگی بین پوشش و زیرلایه دارد [۲۰]. پوشش‌های تولید شده با فرایند TRD متشکل از لایه‌هایی هستند که شامل دانه های بلوری کاربیدی بسیار ریزی می‌باشند و به همین دلیل پوشش‌های تولید شده با فرایند TRD از روش‌های پوشش‌دهی دیگر مانند PVD و CVD برتری دارد [۱۳]. فرایند نفوذ واکنش حرارتی به روش جامد یا همان پودر فشرده (Pack cementation) در دماهای آستنیت فولادی و در محیط جامد پودری انجام می‌شود. در این روش طی فرایند محفظه غیر قابل شارژ می‌باشد اما دیگر با مشکل تمیزکاری نمک مذاب از سطح نمونه‌ها مواجه نیستیم. از مزیت‌های این روش می‌توان به همسان بودن میزان حرارت، حرارت‌دهی سریع، پاکسازی اتمسفر و نیاز نداشتن به تمیزکاری بعد از پایان فرایند اشاره کرد. اما در مقابل به میزان زیادی از گاز آرگون در طی فرایند نیاز است و همچنین نمونه باید اطرافش کاملاً با پودر پوشیده شود و در پودر سیال باشد که نیاز به پودر آلیاژی را بالا می‌برد و در مقابل هزینه فرایند پوشش‌دهی افزایش می‌یابد [۲۱]. در روش پودر فشرده نیز باید از بوت‌های فلزی مقاوم به حرارت استفاده کرد. در این روش معمولاً از فرو کروم و فرو وانادیوم به عنوان تأمین کننده عناصر کاربیدساز استفاده می‌شود و عامل فعال کننده و عامل پرکننده محفظه واکنش به ترتیب آمونیوم کلرید



(NH₄Cl) و آلومینا (Al₂O₃) می باشند. از مزایای این روش می توان به ثابت بودن ابعاد قطعات بعد از انجام فرایند اشاره نمود. همچنین در این روش دیگر نیازی به ذوب کردن مواد نداریم و تمامی واکنش ها در حالت جامد انجام می گیرد. در پژوهش حاضر عاملی که آن را از دیگر پژوهش ها متمایز می کند بررسی روش نفوذ واکنشی حرارتی اما با روش پودر فشرده و در محیط عامل کاربیدساز فروکروم توسط فعال کننده NH₄Cl در یک دمای ثابت و ۴ زمان متفاوت و مشاهده تأثیر زمان روی میزان سختی و ضخامت پوشش می باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

برای انجام این تحقیق از نمونه های مکعبی شکل به ابعاد ۱^{cm} × ۱^{cm} × ۱^{cm} از جنس فولاد ابزار ۱/۱۵۴۵ که آنالیز ترکیب شیمیایی و استاندارد آن در جدول ۱ آمده، استفاده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد ابزار ۱/۱۵۴۵ بر حسب درصد وزن (%Wt)

| C | Si | Mn | S | P |
|------|------|------|------|------|
| 1.04 | 0.16 | 0.19 | 0.01 | 0.01 |

نمونه های وایرکات شده برای آماده سازی سطحی تا سمباده شماره ۲۰۰۰ پولیش شدند و برای حذف آلودگی های سطحی در حمام اولتراسونیک محلول استون به مدت ۱۵ دقیقه شستشو داده شدند. ۴ بوتله فولاد ضدزنگ با ابعاد و ضخامت های یکسان با درصدهای برابر از فروکروم و جهت پوشش دهی با استفاده از کوره الکتریکی آماده شدند. به طور خلاصه در جدول ۲ شرایط آزمایش ها و درصد وزنی مواد موجود در محفظه واکنش نشان داده شده است.

جدول ۲- شرایط آزمایش ها و مواد مورد استفاده در محیط پودر فشرده بر حسب درصد وزنی (%Wt)

| T (°C) | t (h) | Fe-Cr | Al ₂ O ₃ | NH ₄ Cl |
|--------|----------|-------|--------------------------------|--------------------|
| ۱۰۰۰ | ۳،۵،۷،۱۰ | ۶۰ | ۳۰ | ۱۰ |

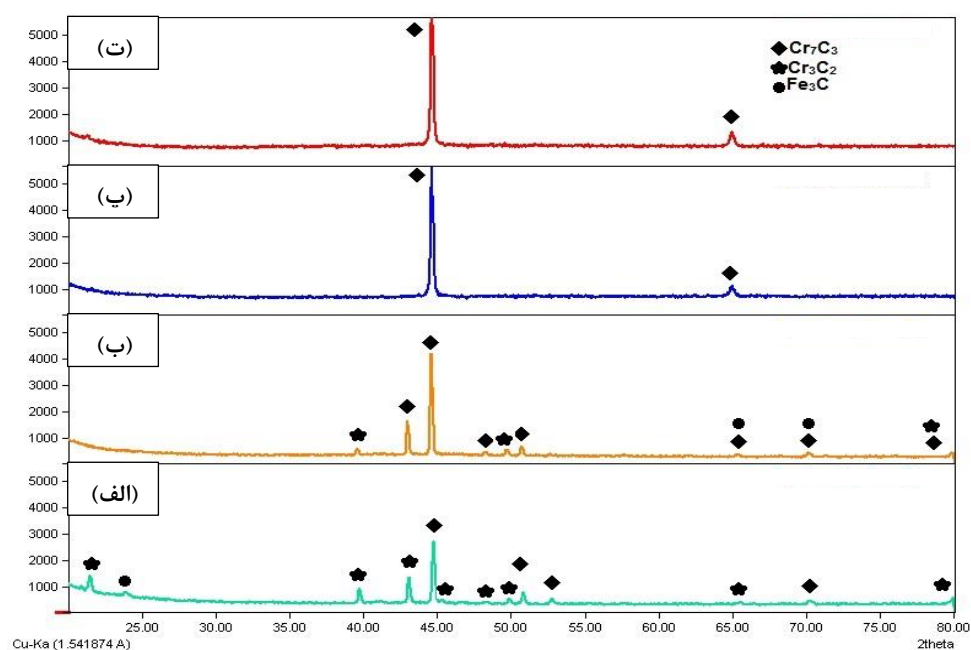
در ابتدا مواد تشکیل دهنده محفظه های واکنش به مدت ۱۰ دقیقه و دور ۲۰۰ rpm با دستگاه آسیاب گلوله ای به خوبی مخلوط شدند و برای هر بوتله ۴۰ گرم پودر آماده شد. پس از گذشت زمان های تعیین شده، نمونه ها از داخل بوتله ها خارج شدند. نمونه ها برای انجام بررسی های بعدی ابتدا مانع و جهت متالوگرافی تا سمباده شماره ۲۰۰۰ پولیش و در نهایت با محلول نایتال ۲٪ اچ شدند. برای شناسایی نوع فاز یا فازهای تشکیل شده در لایه پوششی از دستگاه تفرق سنج اشعه ایکس (XRD) و طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)



استفاده، همچنین برای بررسی و مطالعه ریزساختار و اندازه ضخامت پوشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و برای تعیین میزان سختی پوشش‌های ایجاد شده از دستگاه میکرو سختی‌سنج استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

نتایج آزمون های میکروسکوپ الکترونی و پراش پرتو ایکس نشان دادند که لایه کاربید کروم در تمام زمان های آزمایش روی زیرلایه فولادی تشکیل شده است. نتایج مربوط به آزمون پراش پرتو ایکس از سطح نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۳ برمی‌آید فاز کاربید کروم به دو صورت Cr_7C_3 و Cr_3C_2 داخل پوشش تشکیل شده است که این مشاهدات با نتایج سایر محققان مطابقت دارد [۲۴،۲۳،۲۲]. تشکیل فاز Cr_7C_3 و Cr_3C_2 نشان می‌دهد که لایه پوشش کاربید کروم می‌باشد که در دیگر پژوهش‌ها نیز به آن اشاره شده است.



شکل ۳- نتایج مربوط به آزمون XRD برای سطح نمونه‌های پوشش داده شده در دمای ۱۰۰۰ $^{\circ}$ C و زمان های الف) ۳ساعت (ب) ۵ساعت (پ) ۷ساعت (ت) ۹ساعت

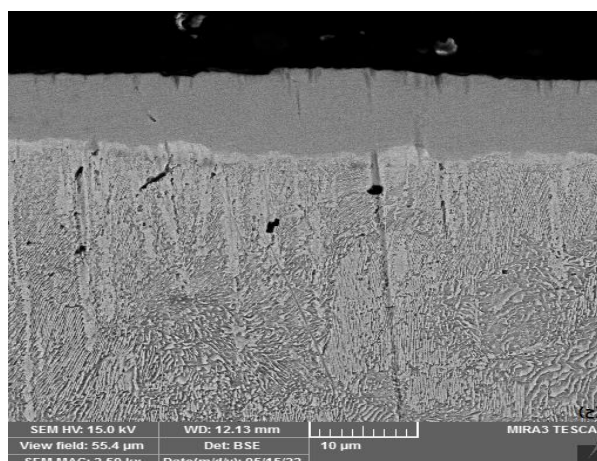
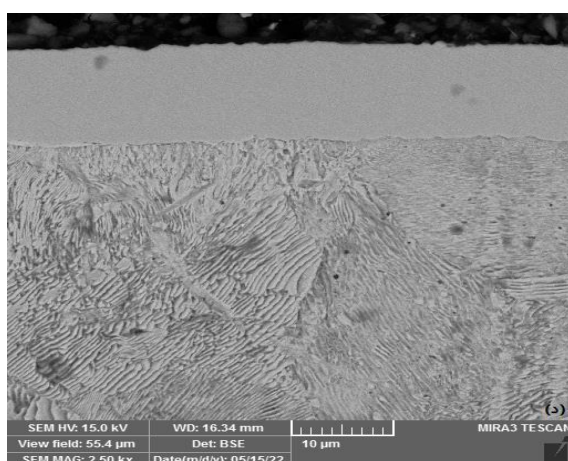
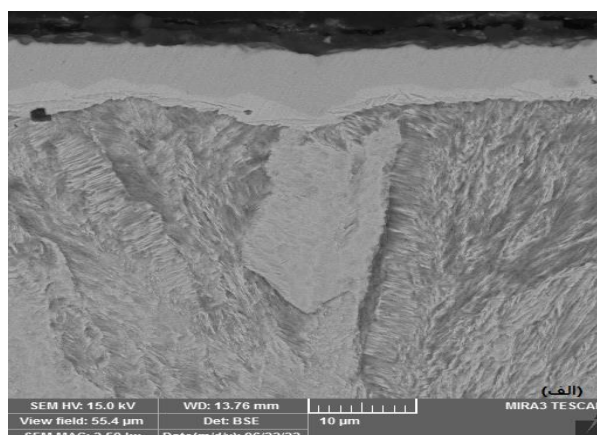
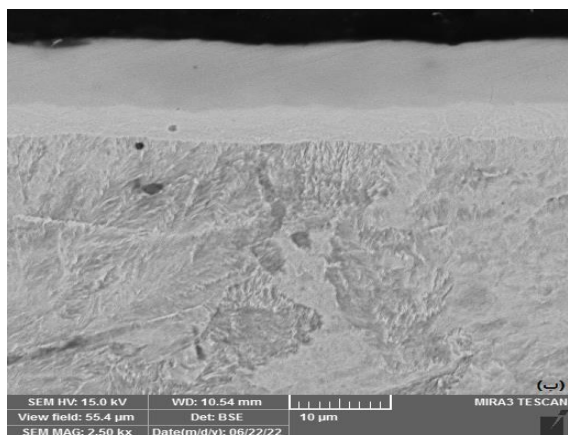


نتایج به دست آمده از سختی سنجی نمونه ها نشان داد که سختی پوشش در تمام زمان ها در مقایسه با سختی زیرلایه و سختی لایه محلول جامد به طور چشم گیری افزایش داشته است. نتیج سختی سنجی و میزان سختی پوشش، لایه محلول جامد و زیرلایه و همچنین ضخامت پوشش در تمام زمان ها را در جدول ۳ آمده است. هرچه زمان انجام آزمایش بیشتر بوده است میزان سختی گزارش شده نیز بیشتر است و برای زمان ۹ ساعت سختی بالاتری گزارش شده است. سختی پوشش کاربید کروم در ۹ ساعت ۲۳۴۴ ویکرز به دست آمد.

جدول ۳- نتایج آزمون سختی سنجی و ضخامت برای پوشش کاربید کروم در ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد برای زمان های ۳، ۵، ۷ و ۹ ساعت

| زمان فرایند (h) | 3 | 5 | 7 | 9 |
|---------------------------------------|------|------|------|------|
| ضخامت پوشش (μ) | 5 | 9 | 10 | 13 |
| پوشش (HV) | 1288 | 1854 | 2198 | 2344 |
| فصل مشترک پوشش و لایه محلول جامد (HV) | 946 | 1078 | 1144 | 1288 |
| لایه محلول جامد (HV) | 726 | 748 | 766 | 812 |
| زیرلایه (HV) | 572 | 481 | 650 | 464 |

در شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه های الف (۳ساعت، ب) ۵ساعت، ج) ۷ساعت و د) ۹ساعت به ترتیب برای شرایط آزمایشی پودر فشرده کروم نشان داده شده است. همان طور که قابل مشاهده است لایه پوششی کاربید کروم بدون تخلخل و ناپیوستگی به صورت یکنواخت و فشرده تشکیل شده است و با افزایش زمان ضخامت پوشش افزایش یافته است بیشترین ضخامت مربوط به بیشترین زمان یا همان ۹ ساعت می باشد اما هرچه زمان افزایش یافته است ضخامت لایه محلول جامد با افزایش زمان کاهش یافته است و در زمان های پایین ضخامت لایه محلول جامد بیشتر است. و در زمان ۵ ساعت بهترین ضخامت از لایه محلول جامد را داریم. در زمان ۹ ساعت نیز لایه محلول جامد با ضخامت خیلی خیلی کم و به صورت ناپیوسته در بعضی قسمت ها تشکیل شده است.



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه های (الف) ۳ساعت، (ب) ۵ساعت، (ج) ۷ساعت و (د) ۹ ساعت برای شرایط پودر فشرده فرو کروم

در شکل ۴ قسمت (ج) مشاهده می شود ضخامت لایه محلول جامد خیلی کاهش یافته است و در قسمت (د) لایه محلول جامد به صورت ناپیوسته و با ضخامت های خیلی کم تشکیل شده است که دلیل آن این است که در زمان های اولیه یعنی قسمت های الف و ب شکل ۳ اتم های کروم موجود در بستر جامد به سطح نمونه نفوذ کرده و به علت تمایل بیشتر آن ها با آهن نسبت به کربن، ابتدا لایه ای از محلول جامد با ضخامت تقریباً ۳ میکرومتر در ۳ ساعت (قسمت الف) و ضخامت ۴ تا ۵ میکرومتر در ۵ ساعت (قسمت ب) روی سطح زیر لایه تشکیل می شود. با ادامه فرایند نفوذ، اتم های کربن از زیر لایه خودشان را به سطح نمونه رسانده و زمانی که اتم های کروم به غلظت تعادلی رسیدند با اتم های کربن روی سطح واکنش می دهند و ترکیب می شوند و جوانه زنی لایه کاربید کروم روی لایه محلول جامد اتفاق می افتد با گذشت زمان و نفوذ بیشتر اتم های کربن

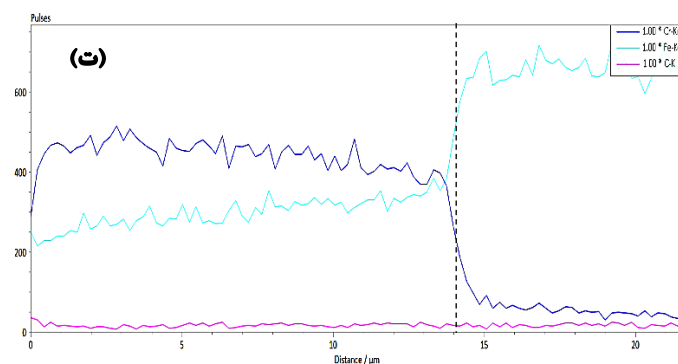
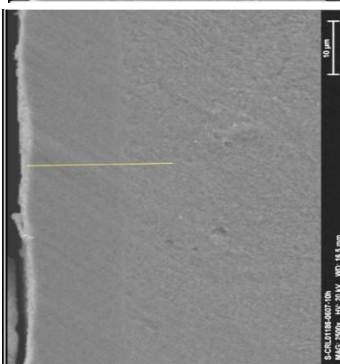
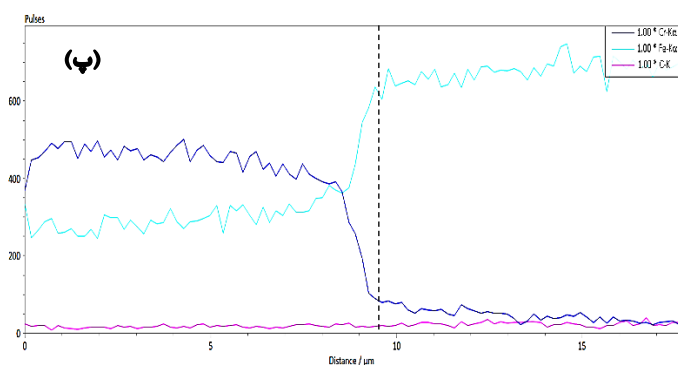
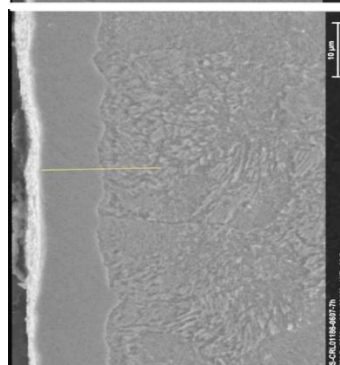
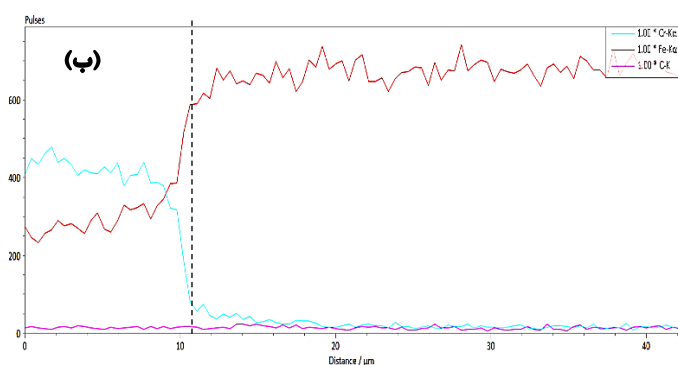
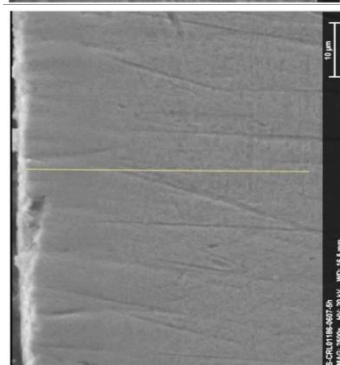
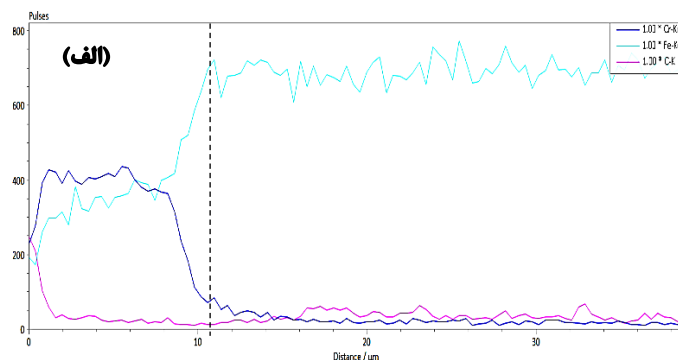
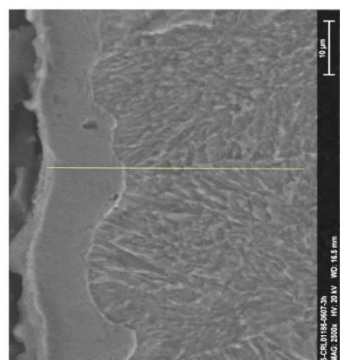


و تجزیه شدن لایه محلول جامد ضخامت لایه پوششی کاربید کروم افزایش پیدا می کند [۲۵] که در شکل ۳ قسمت ج و د دیده می شود.

برای بررسی بیشتر نمونه های پوشش داده شده در زمان های ۳، ۵، ۷ و ۹ ساعت از آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد که در شکل ۵ که به ترتیب مربوط به زمان های ۳، ۵، ۷ و ۹ ساعت می باشد مشخص است که غلظت عنصر کربن و عنصر کاربیدساز (کروم) از مرکز به سطح در حال افزایش و در مقابل غلظت عنصر آهن از سطح به مرکز در حال کاهش می باشد. در نمودارهای لاین تغییر شیب نشان دهنده نفوذ عناصر است. محدوده بین ناحیه غنی و فقیر از عناصر که در آن غلظت ها به صورت شیب دار در حال تغییرند محدوده لایه محلول جامد شناخته می شود که ضخامت آن معمولاً بیشتر از ۱۵ μm نمی باشد، که در شکل ۵ قسمت ب زمان ۵ ساعت ناحیه لایه محلول جامد بیشترین ضخامت را دارد.



iMat 2022



شکل ۵ - نتایج آزمون EDS محیط پودر جامد فرو کروم روی فولاد ۱/۱۵۴۵ در زمان های الف) ۳ (ب) ۵ (پ) ۷ (ت) ۹ ساعت و دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد



۴- نتیجه گیری

- لایه پوششی تشکیل شده روی زیرلایه فولادی ۱/۱۵۴۵ بوسیله فرایند نفوذ واکنشی حرارتی با روش پودر فشرده و همچنین استفاده از پودر جامد فرو کروم، شامل فازهای محلول جامد (Fe-Cr) و کاربیدی Cr_3C_2 و Cr_7C_3 می باشد.
- با افزایش زمان انجام فرایند ضخامت پوشش کاربید کروم افزایش پیدا کرده و بیشترین میزان ضخامت مربوط به بالاترین زمان یعنی ۹ ساعت می باشد.
- در زمان های اولیه انجام فرایند ناحیه ای از لایه محلول جامد آهن-کروم تشکیل شده که با افزایش زمان، ضخامت این ناحیه به دلیل تجزیه شدن و خروج اتمهای کروم از آن، کاهش پیدا کرده است.
- نتایج آزمون میکروسختی نشان می دهد که میزان سختی پوشش با افزایش زمان و ضخامت، افزایش یافته و بیشترین میزان سختی مربوط به زمان ۹ساعت به مقدار ۲۳۴۴ ویکرز می باشد.

۵- منابع

1. C. Cosenza, L. Fratini, A. Pasta, et al. Damage and fracture study of cold extrusion dies, Eng.Fract.Mech. 71(7-8)(2004)1021-1033.
2. M. Geiger, B. Falk. Prediction of service life and failure probability of cold forging tools. Manuf.Tech. 50(1)(2001) 173-176.
3. T Arai, Carbide Coating Process by Use of Molten Borax Bath in Japan, J. Heat Treating, Vol.1 (2-15).(1979) 15-22.
4. H. Tavakoli, S.M. Mousavi Khoie, et al. Journal of Alloys and Compounds, Vol. 583(2014)382-389.
5. A.L.Yerokhin, X. Nie, et al, Surface Coating & Technology, Vol. 122(1999)73-93
6. T Arai, Carbide Coating Process by Use of Molten Borax Bath in Japan, J. Heat Treating, Vol.1 (2-15).(1979) 15-22
7. T. Arai, ASM Handbook 4, ASM International, Ohio, (1991) 448.ASM Handbook 4, ASM International, Ohio, (1991)448.



8. Nakanishi, K., Takeda, H., et al, Fluidized bed carbide coating process development and its application, The 8th International Congress on Heat Treatment of Materials, Heat and Surface 92, Japan (1992) 507.
9. Oliveira, C.K.N., Muñoz Riofano, et al. Evaluation of hard coatings obtained on AISI D2 steel by thermo reactive deposition treatment. Surface and Coatings Technology, 201 (2006) 1880–1885.
10. Y.J.Zhang, H.Chen, et al. Effects technological condition and substrate material on TD coating, Applied Mechanics and Materials, Vol.590 (2014) 271-275.
11. 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.
12. 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.
13. T. Arai, Thermochemical Surface Engineering of Steels, The thermo-reactive deposition and diffusion process for coating steels to improve wear resistance, (2015) 703-734.
14. 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.
15. T. Arai, S. Harper, Thermoreactive Deposition/Diffusion Process for Surface Hardening of Steels, in: J.R. Davis (Ed.), Metals Handbook, 10th edition 4, ASM, USA, (1991) 448–453.

۱۶- محمد علی شیرین بیان، علی شفیعی، محمد رضا ابوطالبی، بررسی سینتیک تشکیل پوشش کاربید وانادیم بر روی فولاد ابزار D2 به روش نفوذ فعال حرارتی (TRD) با استفاده از حمام نمک بوراکس، چهارمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و جامعه علمی ریخته گری ایران).

17. 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.
18. X.S. Fan, Z.G. Yang, Z.X. Xia, C. Zhang, H.Q. Che, The microstructure evolution of VC coatings on AISI H13 and 9Cr18 steel by thermoreactive deposition process, J.Alloy. Compd. 505 (1) (2010) 15–18.
19. W.Hongfu, W.Huachang, et al. Vanadium Carbide Coating Growth on Die Steel Substrate in Borax Salt Bath, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed, Vol.25 (4), (2010) 600-603.



iMat 2022



- 20- J. Stallard, S. Poulat, D.G. Teer, The study of the adhesion of a TiN coating on steel and titanium alloy substrates using a multi-mode scratch tester, Tribol. Int. 39 (2006) 159–166.
- 21-Wei, C.-Y. and F.-S. Chen, Thermoreactive deposition/diffusion coating of chromium carbide by contact-free method. Materials Chemistry and Physics, 2005.91(1) 192-199.
- 22 .M.A Elhelaly et al. Characterization and Kinetics of Chromium Carbide Coatings on AISI O2 Tool Steel Performed by PackCementation Volume 31(1) january2022
- 23.A.Gunen et al .Characteristics and high temperature wear behavior of chrome vanadium carbide composite coatings produced by thermo-reactive diffusion 402 (2020)
- 24.A.Gunen et al . Properties and tribological performance of ceramic-base chromium and vanadium carbide composite coatings 81 (2019) 333-344.
- 25.Omid Ganji, Seyed Abdolkarim Sajjadi. Tribological properties of duplex coatings of chromium-vanadium carbide produced by termo-reactive diffiusion(TRD) , November 2021