

## گواهی ارائه مقاله

ضمن تشکر و قدردانی از ارائه مقاله با عنوان:

بررسی و مقایسه پوشش های تک لایه کاربید وانادیم تشکیل شده توسط اکسید فلزی با روش نفوذ واکنشی حرارتی

(TRD) بر روی فولاد ابزار کربنی ۱/۱۵۴۵ در دماها و زمان های متفاوت

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:

غزاله بشارتی، سید عبدالکریم سجادی، محمد رضا نجاری سعادت آبادی، امید گنجی، رضا ابراهیمی

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



محمود نسیمی  
رئیس انجمن متالورژی و مواد ایران

بهروز خاتمی  
مدیر کنفرانس

شهراب ربانیکان  
مدیر علمی

عبدالحامید قنیهی  
رئیس انجمن علمی ریخته‌گری ایران



## بررسی و مقایسه پوشش‌های تک لایه کاربید وانادیم تشکیل شده توسط اکسید فلزی با روش نفوذ واکنشی حرارتی (TRD) روی فولاد ابزار کربنی ۱/۱۵۴۵ در دماها و زمان‌های متفاوت

غزاله بشارتی<sup>۱</sup>، سید عبدالکریم سجادی<sup>۲</sup>، محمدرضا نجاری سعادت‌آبادی<sup>۳</sup>، امید گنجی<sup>۴</sup>، رضا ابراهیمی<sup>۵</sup>

ghazalehbesharati@gmail.com

### چکیده

پوشش‌های کاربیدی باعث مقاوم سازی سطح فلزات در مقابل سایش، خوردگی و افزایش سختی سطح آنها می‌شود. نفوذ واکنشی حرارتی (TRD) با استفاده از حمام نمک مذاب، یکی از روش‌های مطلوب و با صرفه اقتصادی نسبت به سایر روش‌های مشابه می‌باشد. در این تحقیق از روش نفوذ واکنشی حرارتی برای ایجاد پوشش کاربید وانادیم در حمام اکسیدی بر روی فولاد ابزار کربنی ۱/۱۵۴۵ در دماهای ۸۰۰ °C و ۹۰۰ °C و زمان‌های ۴، ۵ و ۶ ساعت استفاده شد. جهت بررسی و مقایسه پوشش‌ها، آزمون‌های SEM، EDS، XRD و میکروسختی انجام شد. نتایج آزمون XRD حضور فاز کاربیدی  $V_6C_5$  را بر روی سطح زیرلایه مشخص نمود. همچنین مشخص شد با افزایش زمان و دمای غوطه‌وری، ضخامت و سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد بطوری که در دمای ۹۰۰ °C ضخامت پوشش تشکیل شده، در همه‌ی زمان‌ها بیشتر از دمای ۸۰۰ °C بود.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

کلمات کلیدی: پوشش کاربیدی، نفوذ واکنشی حرارتی، کاربید وانادیم، فولاد ابزار ۱/۱۵۴۵.

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

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

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

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

<sup>۵</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

## ۱- مقدمه

در فرایندهای شکل‌دهی سرد، عمر کاری و پایداری ابعادی ابزار و قالب‌ها نقش مهمی در کیفیت و بازده محصولات دارد [۱]. شکست قالب تحت شرایط تنش پیچیده‌ای اتفاق می‌افتد که ناشی از آسیب‌های مکانیکی مانند: خستگی، ضربه و سایش می‌باشد [۲]. پوشش‌های کاربردی به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی خوب، از اهمیت زیادی در صنعت برخوردار هستند و در صنایعی مانند اکستروژن، متالورژی پودر و ابزارهای برش، که در شرایط سایشی کار می‌کنند بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

تکنولوژی‌های مختلفی مانند رسوب شیمیایی بخار (CVD)، رسوب فیزیکی بخار (PVD) و نفوذ واکنشی حرارتی (TRD) برای تولید پوشش‌های سخت به منظور افزایش عمر کاری ابزارها، مخصوصاً فولادها به کار گرفته می‌شوند [۴]. هر دو روش PVD و CVD نیاز به تجهیزات گران قیمت و خلا بالا دارند. امکان اعوجاج قطعه کار در روش CVD به دلیل اعمال دمای پوشش‌دهی بالا ( $700-1200^{\circ}\text{C}$ ) وجود دارد. از طرفی به دلیل پایین بودن گستره دمایی در روش PVD ( $200-500^{\circ}\text{C}$ ) چسبندگی پوشش به قطعه مطلوب نیست [۶]. اما در مقایسه، روش TRD، اقتصادی‌تر است و استفاده از آن در صنعت مناسب‌تر می‌باشد و خواص سطحی بهتری روی فولادها دارد [۵].

TRD یک روش نسبتاً ساده است که اولین بار توسط شرکت Toyota برای ایجاد پوشش‌های کاربردی مورد استفاده قرار گرفت [۷]. سپس، این تکنولوژی توسط شرکت Arvin American برای کاربردهای صنعتی خریداری گردید [۸]. در این روش، کربن موجود در فولاد به سمت سطح نفوذ می‌کند و با عناصر تشکیل دهنده کاربید واکنش می‌دهد. سپس، یک پوشش کاربردی چسبنده بر روی سطح نمونه شکل می‌گیرد [۹]. تشکیل پوشش‌ها به روش TRD، توسط سه روش قابل انجام می‌باشد: (۱) حمام نمک، (۲) بستر سیال و (۳) پودر فشرده [۱۰]. روش حمام نمک مذاب نسبت به دو روش دیگر بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و ارزان‌تر می‌باشد. زیرلایه فولادی در یک حمام نمک که شامل بوراکس و عناصر تشکیل‌دهنده کاربیدها می‌باشد در دمایی بین  $850^{\circ}\text{C}$  و  $1150^{\circ}\text{C}$  و بازه زمانی ۱۵ دقیقه تا ۱۴ ساعت غوطه‌ور می‌شوند. در فرایند نفوذ واکنشی حرارتی یکی از فاکتورها در تعیین ضخامت پوشش، میزان کربن زیرلایه می‌باشد. میزان کربن زیرلایه باید بیشتر از  $0.4\%$  باشد [۱۱]. نفوذ اتم‌های کربن در زمینه آستنیتی، بسیار سریع‌تر از نفوذ این عنصر در لایه کاربیدی می‌باشد. با این وجود میزان کلی این عنصر در فولاد تاثیر مثبتی بر سرعت رشد ندارد. به عنوان مثال، در فولادها سرعت رشد لایه‌های کاربردی تحت تاثیر میزان کل کربن موجود نبوده بلکه عامل موثر میزان کربن موجود در زمینه آستنیتی می‌باشد [۱۲].

به طور کلی چهار فاکتور تاثیر گذار بر نرخ رشد پوشش عبارتند از: زمان نگهداری در حمام نمک، درجه حرارت حمام نمک، میل ترکیبی عناصر بین‌نشین و نوع فولاد زیرلایه. با افزایش دما، چگالی عیوب کریستالی در پوشش کاربیدی افزایش می‌یابد و در نتیجه آن، ضریب نفوذ کربن در پوشش افزایش می‌یابد البته غلظت عناصر تشکیل‌دهنده کاربید مانند کروم، وانادیم هم می‌توانند روی ضخامت پوشش تاثیر داشته باشند [۱۳].

تشکیل و رشد پوشش‌های کاربیدی در فرایند TRD عمدتاً توسط قوانین نفوذی کنترل می‌شود. بنابراین، سینتیک رشد پوشش کاربید وانادیم توسط قانون رشد پارابولیک می‌تواند شرح داده شود:

$$L^2 = Kt = K_0 \exp\left(-\frac{Q_{trd}}{RT}\right) t \quad TRD \quad (1)$$

که،  $L$  ضخامت پوشش (cm)،  $t$  زمان غوطه وری (s)،  $K$  ثابت نرخ رشد پارابولیک،  $K_0$  مقداری ثابت،  $Q_{trd}$  انرژی فعال‌سازی نفوذ اتم‌های کربن در پوشش کاربید وانادیم ( $J/mol$ )،  $R$  ثابت گازها ( $8.31415 J/mol$ ) و  $T$  دمای عملیات (K) می‌باشند. هر چند سینتیک رشد پوشش همیشه از معادله (۱) پیروی نمی‌کند اما در یکی از تحقیقات پیشنهاد شده است [۱۴]. علاوه بر این، آزمایشات نشان می‌دهند که ثابت  $K$  به دست آمده برای یک زیرلایه اغلب برای زیرلایه دیگری مناسب نیست. این نتیجه شاید ناشی از این می‌باشد که ضخامت پوشش فقط به دمای فرایند و زمان غوطه‌وری وابسته نیست و به نوع زیرلایه نیز بستگی دارد. در صورتی که تغییر ضخامت پوشش از رابطه (۱) پیروی کند رشد لایه توسط نفوذ کنترل می‌شود [۱۲].

Liu و همکاران [۱۵] رابطه بین نرخ رشد پوشش و نوع زیرلایه را توسط رابطه زیر شرح دادند:

$$L^2 = 4D_c X^2 t \quad (2)$$

که،  $D_c$  ضریب نفوذ کربن در پوشش کاربید وانادیم ( $cm^2/s$ ) می‌باشد. مقدار  $X$  برای زیرلایه‌های مختلف در بازه دمایی  $1050-900$  °C بین  $0.0727$  و  $0.0768$  می‌باشد. به دلیل تغییرات بسیار کوچک  $X$  ضخامت پوشش تشکیل شده روی زیرلایه‌های مختلف در دما و زمان مشابه باید یکسان شود. با این حال نتایج تحقیقات، تفاوت‌هایی در ضخامت پوشش روی زیرلایه‌های مختلف را نشان داده است [۱۶].

Gangi و همکاران [۱۷] روی تشکیل پوشش کاربید وانادیم به روش حمام نمک مذاب روی فولاد ابزار  $1545$  °C در دمای  $1000$  °C و زمان‌های غوطه‌وری  $8$ ،  $10$  و  $12$  ساعت تحقیقاتی را انجام داده‌اند. مشاهده کردند که با افزایش زمان غوطه‌وری در پوشش‌های کاربید وانادیم ضخامت پوشش افزایش داشت. به طوری

که بیشترین ضخامت در زمان ۱۲ ساعت گزارش شده است. همچنین، آزمون میکروسختی روند افزایش سختی را با افزایش زمان نشان داد و بطوری که بیشترین سختی حاصله ۱۸۹۰ ویکرز بود.

Fan و همکاران [۱۴] پوشش کاربید وانادیم را روی فولاد AISI H13 در حمام نمک به مدت ۶-۱ ساعت برای دماهای ۹۲۰ °C و ۱۰۰۰ °C ایجاد کردند. آنها مشاهده کردند که در دمای ۹۲۰ °C با افزایش زمان، ضخامت پوشش از ۱,۶۷ میکرومتر به ۴,۰۹ میکرومتر افزایش داشته است. همچنین در دمای ۱۰۰۰ °C با افزایش زمان، ضخامت پوشش از ۳,۱۲ میکرومتر به ۷,۶۸ میکرومتر افزایش یافت که می‌توان روند صعودی ضخامت با افزایش دما و زمان را مشاهده نمود. گزارش شده است که پوشش کاربید وانادیم تشکیل شده توسط فرایند TRD، شامل تک فاز VC می‌باشد. اگرچه، ساختار کریستالوگرافی کاربید وانادیم نسبتاً پیچیده است. کاربید وانادیم یکی از انواع کاربیدهای فلزی تحول یافته به صورت غیر استوکیومتری است و طیف گسترده‌ای ( - VC<sub>0.65</sub> VC<sub>0.90</sub>) دارد. بعلاوه مشاهده شده است که دانه‌های هم محور در سرتاسر پوشش شکل گرفته است اندازه دانه‌های هم محور، بتدریج از فصل مشترک تا نوک سطح افزایش یافته است. همانند این اتفاق برای فولاد W1 نیز مشاهده شده است. افزایش اندازه دانه‌ها شاید نتیجه‌ی اتم‌های کربن کم برای واکنش باشد که ناشی از فاصله نفوذی طولانی اتم‌های کربن و در نتیجه چگالی هسته‌زایی کم می‌باشد که باعث شکل‌گیری دانه‌های درشت شده است. بنابراین، وجود شیب اندازه دانه قابل درک است.

نتیجه مطالعات نشاد داد که تحقیقات کافی در زمینه تشکیل پوشش‌های کاربید وانادیم روی فولاد ابزار ساده کربنی در دماهای کمتر از ۱۰۰۰ °C و با استفاده از اکسیدهای وانادیم، به روش حمام نمک مذاب انجام نشده است. لذا هدف از انجام این پژوهش بررسی تشکیل پوشش‌های کاربید وانادیم به روش حمام نمک مذاب و با استفاده از اکسیدهای فلزی در دماهای ۸۰۰ °C و ۹۰۰ °C و زمان‌های غوطه‌وری ۴, ۵ و ۶ ساعت می‌باشد. علاوه بر این بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی از اهداف دیگر این پژوهش می‌باشد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

برای این پژوهش نمونه‌هایی از جنس فولاد ابزار ۱/۱۵۴۵ به عنوان زیرلایه استفاده شد که آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه و همچنین استاندارد آن در جدول ۱ آمده است. نمونه‌های دایره‌ای شکل به قطر ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر آماده شد. همچنین به منظور آویزان کردن نمونه‌ها در حمام نمک مذاب سوراخی در نمونه به قطر ۲ میلی‌متر ایجاد شد.

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

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

تمامی نمونه‌ها به منظور آماده‌سازی سطحی از سمباده شماره ۶۰ تا شماره ۲۰۰۰ پولیش شد و سپس به منظور رفع کامل آلودگی و اکسیدهای سطحی به مدت ۱۵ دقیقه در حمام اولتراسونیک با محلول استون شستشو داده شدند. مواد تشکیل‌دهنده حمام نمک مذاب شامل: بوراکس ( $Na_2B_4O_7$ ) به عنوان پُرکننده، اکسید وانادیم ( $V_2O_5$ ) به عنوان عامل کاربیدساز، آلومینیم (Al) به عنوان احیاکننده و سدیم فلوراید (NaF) به عنوان عامل سیال‌کننده حمام می‌باشند. از کوره الکتریکی برای آماده‌سازی حمام نمک مذاب استفاده شد. شرایط آزمایش و درصد وزنی مواد موجود در حمام در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲- شرایط آزمایش و مواد مورد استفاده در حمام اکسید وانادیم بر حسب درصد وزنی (%wt.).

Al	NaF	$V_2O_5$	$Na_2B_4O_7$	زمان (ساعت)	دما (°C)
۷/۴۳	۹/۹	۱۵	۶۷/۶۸	۴،۵،۶	۸۰۰
					۹۰۰
					۱۰۰۰

پس از اضافه کردن مواد تشکیل‌دهنده حمام‌ها به بوتله فلزی از جنس فولاد نسوز ۳۱۰ در دماهای ذکر شده در جدول ۲، به منظور همگن‌سازی و انحلال کامل مواد با یکدیگر محتوای حمام به مدت ۱۲۰ دقیقه در دمای ۱۰۰۰ °C قرار گرفت. سرانجام نمونه‌ها در حمام‌های وانادیم در زمان‌های تعیین شده غوطه‌ور شدند. بعد از اتمام فرآیند پوشش‌دهی، نمونه‌ها در ساعت‌های معین از حمام خارج و در روغن کوئنچ شدند. سپس نمونه‌ها به منظور حذف مواد باقیمانده و چسبیده حاصل از حمام نمک مذاب بر روی آنها، در آب جوش به مدت ۲۰ دقیقه و در حمام اولتراسونیک به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند. بعد از مراحل اشاره شده، نمونه‌ها به

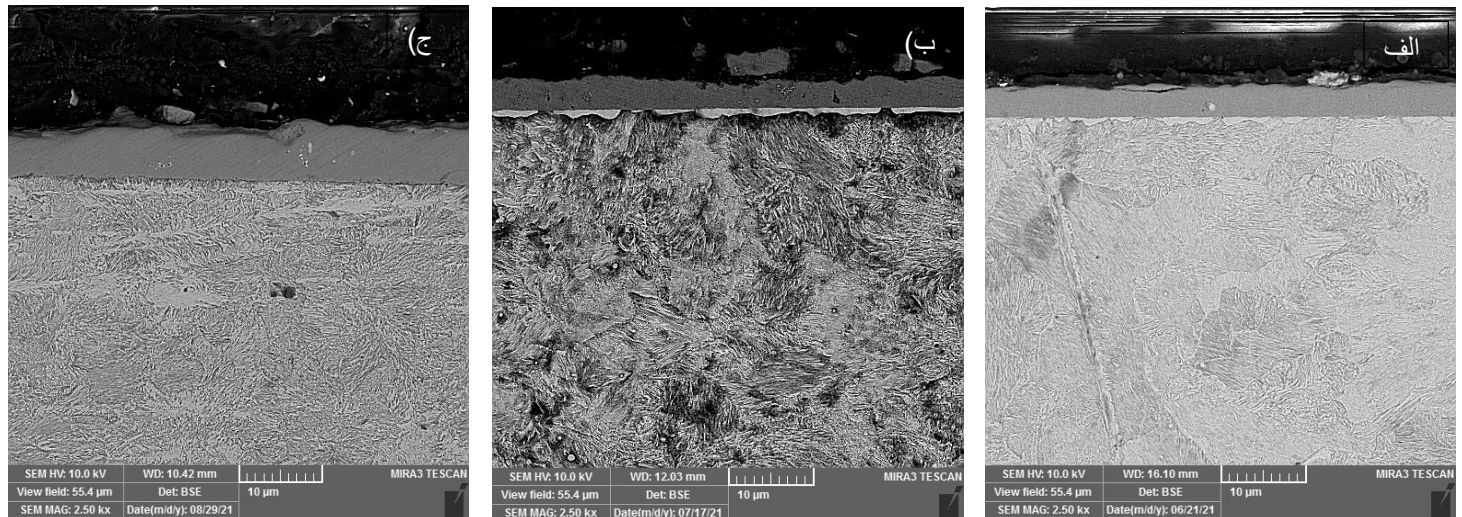
صورت مقطع عرضی توسط وایرکات برش داده و سپس سطح مقطع آنها تا سمباده ۲۰۰۰ پولیش و در محلول نایتال ۲٪ اچ شدند.

به منظور شناسایی نوع فازهای کاربیدی تشکیل‌شده در پوشش کاربید و انادیم از دستگاه پراش‌سنگ اشعه ایکس (XRD) استفاده شد. به منظور بررسی ریزساختار پوشش تشکیل شده، اندازه‌گیری ضخامت پوشش و تشخیص تغییرات عناصر تشکیل‌دهنده پوشش، میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM) مجهز به دستگاه طیف‌سنجی اشعه ایکس (EDS) مورد استفاده قرار گرفت. میزان میکروسختی پوشش‌ها با استفاده از دستگاه BUEHLER-1600 و با بار ۲۵ گرم در سطح مقطع نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که ضخامت و سختی نمونه‌ها حداقل ۵ مرتبه اندازه‌گیری و سپس میانگین آنها گزارش شده است.

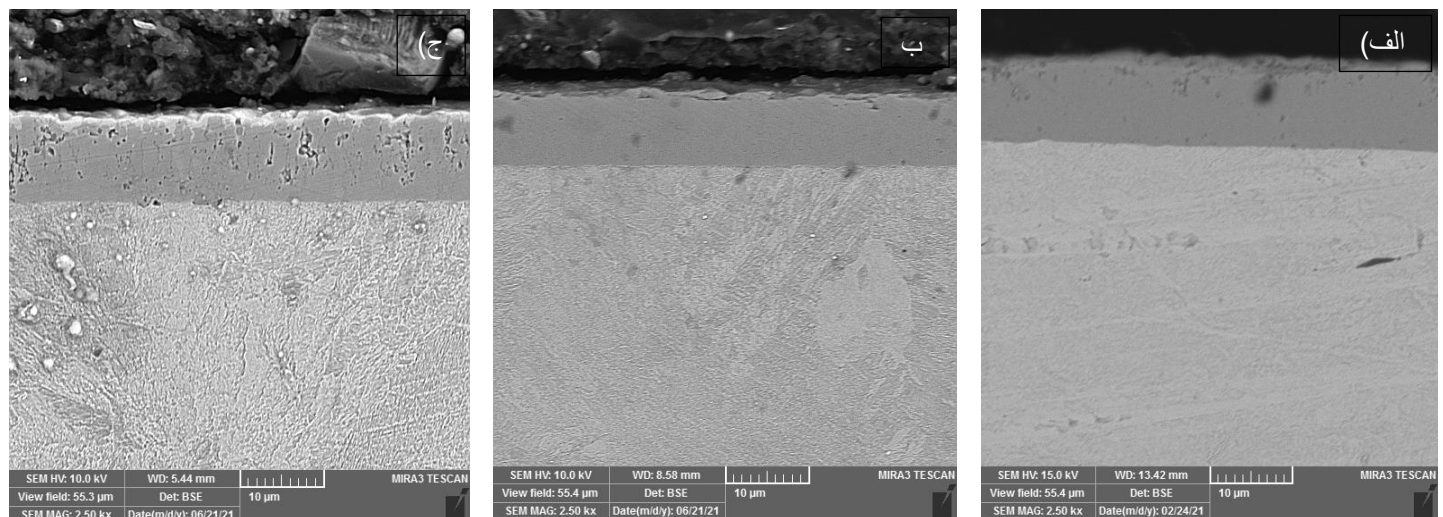
### ۳- نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوشش‌های کاربیدی تشکیل شده در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  در زمان‌های ۴، ۵ و ۶ ساعت در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  در تمام زمان‌های غوطه‌وری یک پوشش یکنواخت، متراکم و بدون تخلخل روی زیرلایه فولادی تشکیل شده است. همچنین هیچگونه ترکی در داخل پوشش در اثر استحاله فازی و یا سرد کردن مشاهده نشده است که بیانگر چسبندگی بالای این پوشش‌ها به زیرلایه می‌باشد. علاوه بر این فصل مشترک پوشش و زیرلایه در تمامی زمان‌های غوطه‌وری یکنواخت است. با افزایش زمان غوطه‌وری در حمام نمک مذاب فرصت نفوذ عنصر کاربیدساز به داخل زیرلایه و خروج اتم‌های کربن به سمت بیرون بیشتر فراهم شده و در نتیجه منجر به افزایش ضخامت خواهد شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوشش‌های کاربیدی تشکیل شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  در زمان‌های ۴، ۵ و ۶ ساعت در شکل ۲ نشان داده شده است. ضخامت پوشش‌های تشکیل شده در این دما نسبت به پوشش‌های تشکیل شده در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  افزایش داشته است زیرا افزایش دما باعث افزایش نرخ نفوذ عنصر کاربیدساز و انادیم به داخل زیرلایه به علت افزایش ضریب نفوذ با دما می‌شود. نتایج ضخامت سنجی پوشش‌های کاربید و انادیم در شکل ۳ گزارش شده است. در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  پوشش کاربید و انادیم در زمان‌های غوطه‌وری ۴ و ۵ ساعت بدون تخلخل و یکنواخت تشکیل شده است اما با افزایش زمان غوطه‌وری به ۶ ساعت فرایند اکسیدشدن و انادیم به جای تشکیل کاربید و انادیم رخ داده است زیرا در زمان‌های غوطه‌وری بالاتر فشار

هوای داخل کوره کمتر از بیرون شده و اکسیژن می‌تواند به داخل اتمسفر کوره وارد شود به همین علت تخلخل‌هایی در پوشش تشکیل شده در زمان غوطه‌وری ۶ ساعت مشاهده شده است.



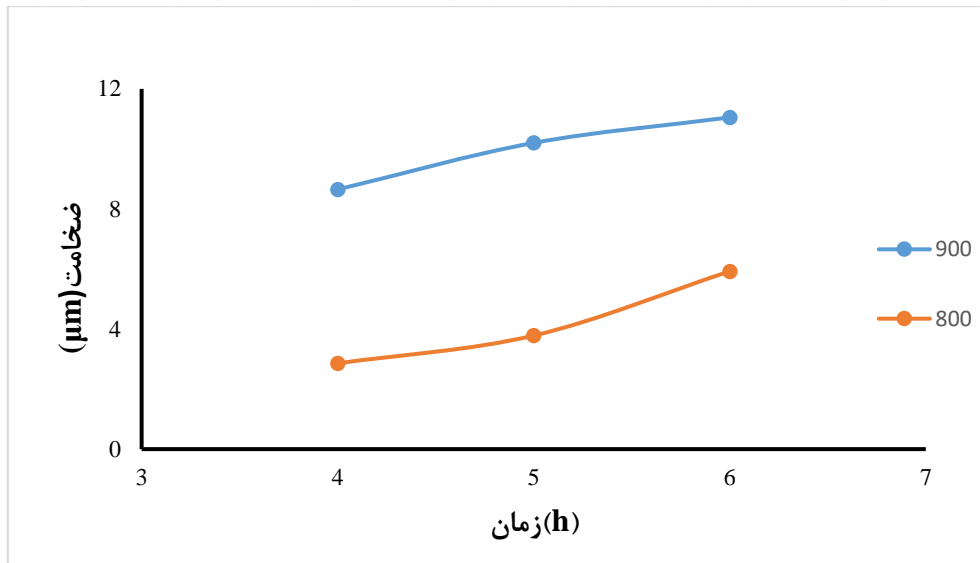
شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های: الف) ۴ ساعت، ب) ۵ ساعت، ج) ۶ ساعت فولاد ۱/۱۵۴۵ برای شرایط آزمایشی حمام اکسید وانادیم در دمای ۸۰۰ °C.



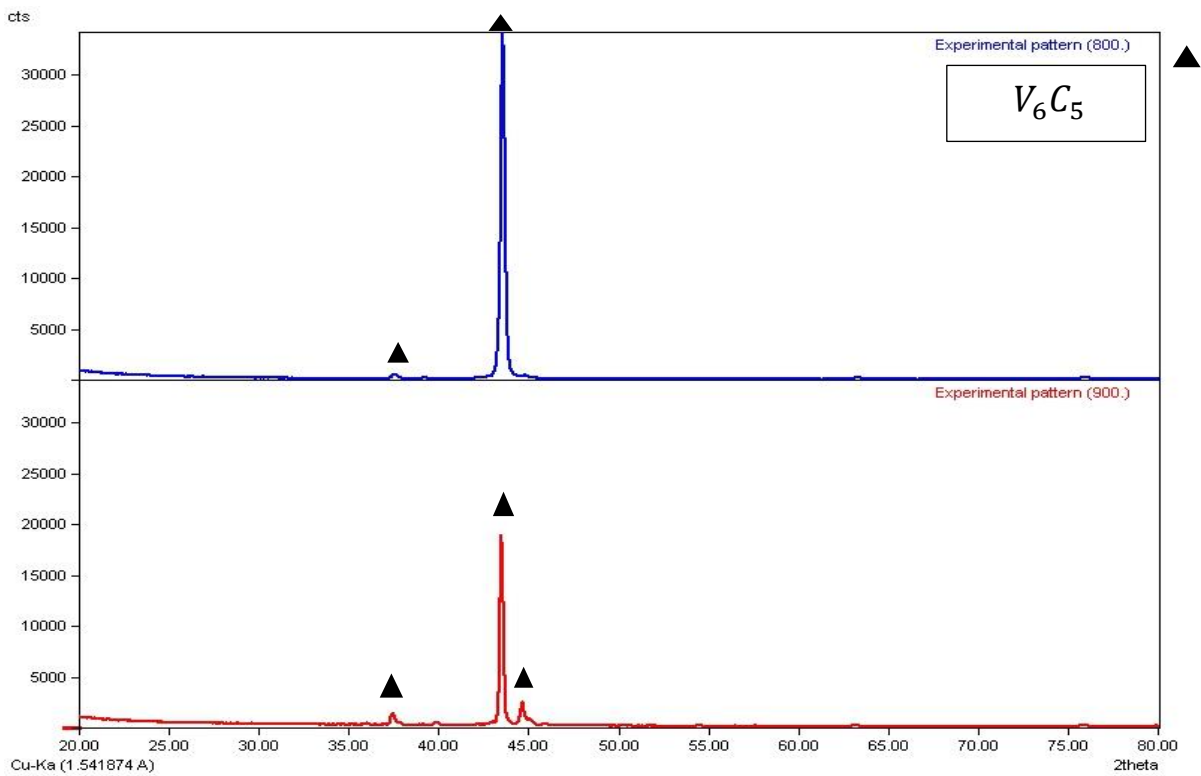
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های: الف) ۴ ساعت، ب) ۵ ساعت، ج) ۶ ساعت فولاد ۱/۱۵۴۵ برای شرایط آزمایشی حمام اکسید وانادیم در دمای ۹۰۰ (°C).

نتایج آزمون‌های پراش پرتو ایکس که در شکل ۴ نشان داده شده است. مشخص می‌کند که کاربید وانادیم در تمام دماها روی زیرلایه فولادی تشکیل شده است. همچنین مشاهده می‌شود فاز کاربید وانادیم با ترکیب  $V_6C_5$  برای حمام اکسید وانادیم تشکیل شده است که با نتایج سایر محققان تطابق دارد [۱۴، ۱۸].



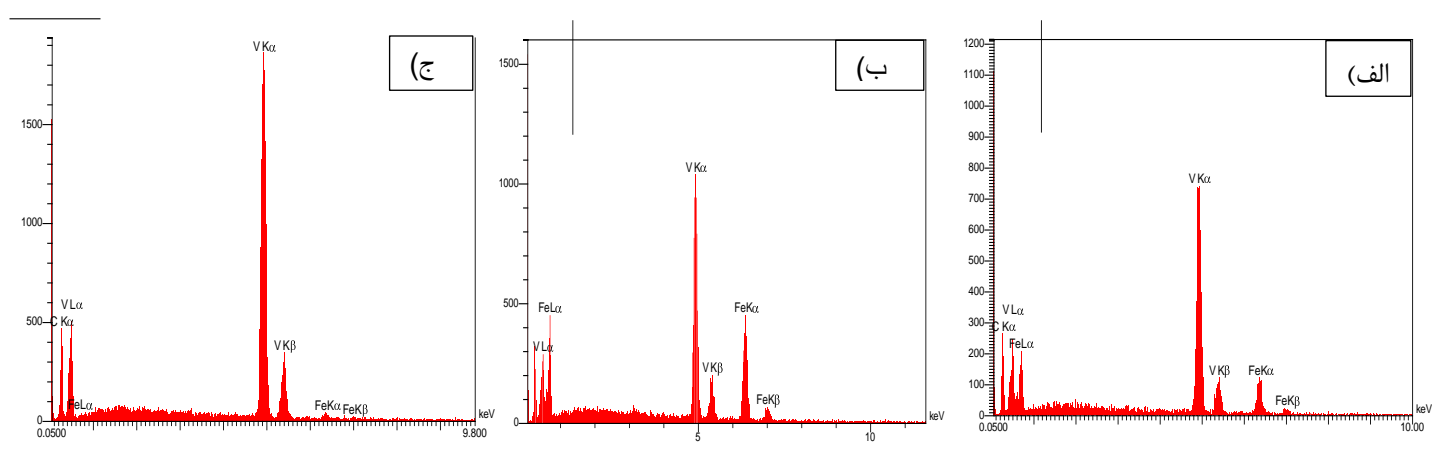


شکل ۳. ضخامت‌های مختلف پوشش کاربید وانادیم تشکیل شده بر روی فولاد ۱/۱۵۴۵ به وسیله روش حمام نمک مذاب برحسب دما و زمان غوطه‌وری.

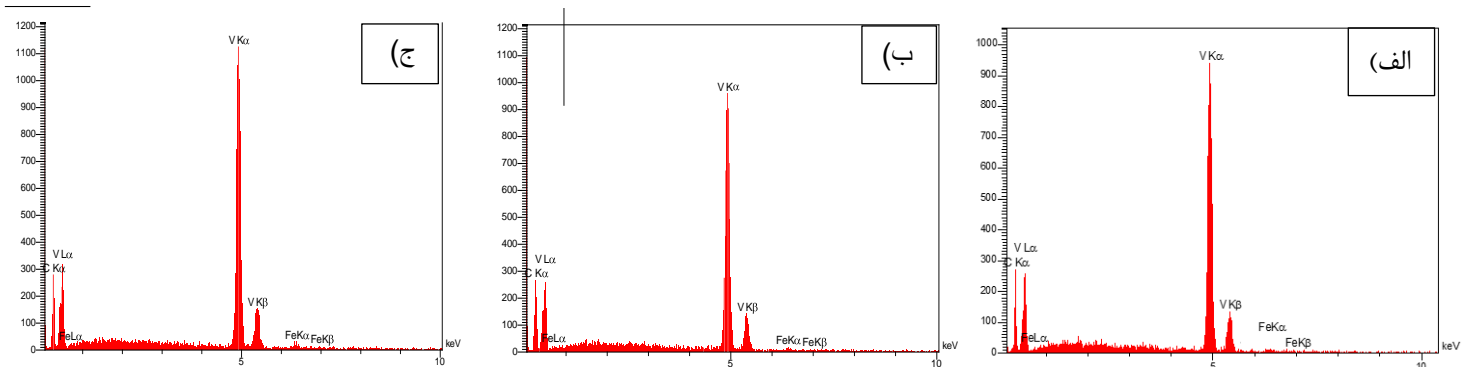


شکل ۴. مقایسه نتایج آزمون پراش پرتو ایکس فولاد ۱/۱۵۴۵ در دماهای ۸۰۰ و ۹۰۰ °C و زمان ۶ ساعت برای شرایط آزمایشی حمام اکسید وانادیم.

آنالیز EDS به صورت نقطه‌ای از پوشش گرفته شد. شکل ۵ و ۶ نتایج حاصل از آنالیز مربوط به پوشش‌های تشکیل شده در دمای ۸۰۰ °C و ۹۰۰ °C را به ترتیب نشان می‌دهد که مقادیر کمی آن در جدول ۲ ذکر شده است. فازهای وانادیم، کربن و آهن در پوشش مشاهده می‌شود. به دلیل وجود عناصر کاربیدساز در حمام و تشکیل کاربید در سطح، درصد اتمی کربن سطح نسبت به زیرلایه بیشتر است که این بیانگر شیب غلظتی کربن از زیرلایه به سطح می‌باشد. آهن حلالیت بسیار کمی در کاربید وانادیم دارد. به همین علت میزان آهن موجود در پوشش‌های کاربید وانادیم کم می‌باشد. در تمامی نمونه‌ها بیشترین شدت پیک مربوط به عنصر وانادیم می‌باشد. با افزایش زمان غوطه‌وری درصد عنصر وانادیم افزایش و کربن کاهش یافته است همانطور که می‌دانیم ضریب نفوذ کربن در پوشش کاربیدی بسیار کمتر از زیرلایه آستنیتی است با افزایش ضخامت پوشش نفوذ کربن سخت‌تر می‌شود و میزان آن کاهش می‌یابد. ذکر این نکته ضروری است که در داخل حمام اکسیدی هیچ عنصر آهنی وجود ندارد بنابراین نتیجه می‌شود تمام آهن موجود در پوشش از زیرلایه فولادی تامین شده است. در مراحل ابتدایی فرایند TRD با اضافه کردن آلومینیم به عنوان احیاکننده به حمام نمک مذاب، اکسید وانادیم احیا می‌شود. سپس اتم‌های وانادیم به زمینه آستنیتی زیرلایه فولادی نفوذ کرده و از طرف دیگر به دلیل وجود شیب غلظتی، اتم‌های کربن از زیرلایه به طرف سطح حرکت کرده و به دلیل میل شدید کربن با وانادیم منجر به تشکیل کاربید می‌شود.



شکل ۵. آنالیز EDS نمونه‌های: (الف) ۴ ساعت، (ب) ۵ ساعت و (ج) ۶ ساعت فولاد ۱/۱۵۴۵ برای شرایط آزمایشی حمام اکسید وانادیم در دمای ۸۰۰ °C.

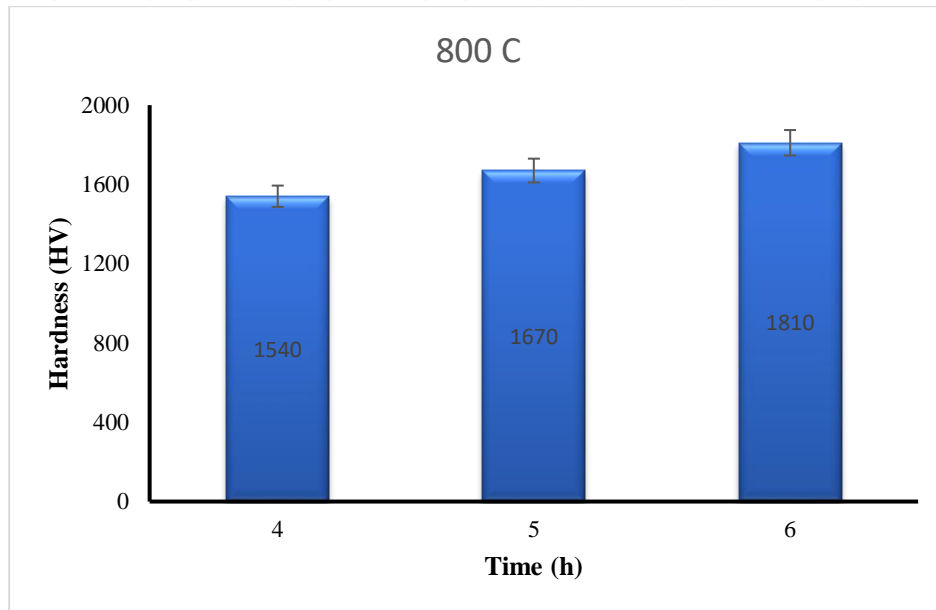


شکل ۶. آنالیز EDS نمونه‌های: (الف) ۴ ساعت، (ب) ۵ ساعت و (ج) ۶ ساعت فولاد ۱/۱۵۴۵ برای شرایط آزمایشی حمام اکسید وانادیم در دمای ۹۰۰ °C.

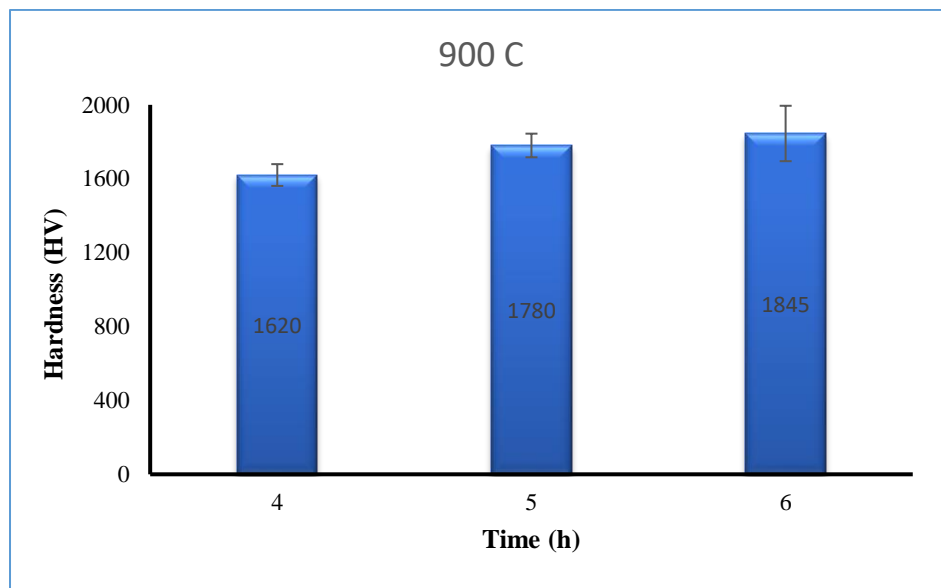
جدول ۲. آنالیز مقادیر کمی پوشش‌های کاربید وانادیم تشکیل شده در دمای ۸۰۰ و ۹۰۰ °C.

آهن (ka)		کربن (ka)		وانادیم (ka)			
درصد اتمی	درصد وزنی	درصد اتمی	درصد وزنی	درصد اتمی	درصد وزنی		
۲۰,۰۷	۳۶,۷۷	۵۵,۰۷	۲۱,۷۰	۲۴,۸۶	۴۱,۵۴	۸۰۰ °C	۴ ساعت
۰,۲۱	۰,۴۳	۶۲,۰۵	۲۷,۸۲	۳۷,۷۳	۷۱,۷۳	۹۰۰ °C	
۷,۷۳	۱۵,۷۵	۶۱,۳۹	۲۶,۸۹	۳۰,۸۷	۵۷,۳۶	۸۰۰ °C	۵ ساعت
۰,۴۴	۰,۹۱	۶۰,۷۲	۲۶,۶۹	۳۸,۸۴	۷۲,۴۰	۹۰۰ °C	
۰,۸۱	۱,۶۲	۵۹,۵۵	۲۵,۷۳	۳۹,۶۴	۷۲,۶۵	۸۰۰ °C	۶ ساعت
۰,۸۷	۱,۶۹	۵۷,۰۱	۲۳,۷۸	۴۲,۱۲	۷۴,۵۳	۹۰۰ °C	

نتایج سختی‌سنجی از سطح مقطع نمونه‌ها برای پوشش‌های کاربید وانادیم تشکیل شده در دماهای ۸۰۰ و ۹۰۰ °C به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. در هر دو دمای پوشش‌دهی سختی به میزان قابل توجهی نسبت به زیرلایه افزایش داشته است. مشاهده می‌شود که میزان سختی پوشش کاربید وانادیم با افزایش دمای پوشش‌دهی و افزایش زمان غوطه‌وری در حمام نمک مذاب افزایش داشته است. زیرا پوشش با ضخامت بیشتر مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل در مناطق اطراف تورفتگی‌ها ایجاد می‌کند که منجر به افزایش سختی خواهد شد.



شکل ۷. نتایج آزمون سختی سنجی برای پوشش کاربید وانادیم تشکیل شده روی فولاد ۱/۱۵۴۵ در دمای  $800^{\circ}\text{C}$ .



شکل ۸. نتایج آزمون سختی سنجی برای پوشش کاربید وانادیم تشکیل شده روی فولاد ۱/۱۵۴۵ در دمای  $900^{\circ}\text{C}$ .

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق از روش نفوذ واکنشی حرارتی برای ایجاد پوشش کاربید وانادیم در حمام اکسیدی روی فولاد ابزار کربنی ۱/۱۵۴۵ در دماهای ۸۰۰ و ۹۰۰ °C و زمان‌های ۴، ۵ و ۶ ساعت استفاده شد. از مهمترین نتایج حاصله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- فاز  $V_6C_5$  بر روی زیرلایه فولادی در حمام اکسید وانادیم تشکیل شد.

- با افزایش زمان و دمای غوطه‌وری، ضخامت پوشش کاربید وانادیم افزایش یافته است بطوری‌که ضخامت پوشش در همه‌ی زمان‌ها در دمای ۹۰۰ °C بیشتر از دمای ۸۰۰ °C می‌باشد.

- بررسی نتایج آزمون میکروسختی نشان داد که با افزایش زمان غوطه‌وری، سختی نمونه‌ها افزایش یافته است.

- در زمان‌های یکسان غوطه‌وری، سختی نمونه‌ای که در دمای ۹۰۰ °C پوشش‌دهی شده بود، بیشتر بود.

#### ۵- مراجع

- 1- C. Cosenza, L. Fratini, A. Pasta, F. Micari, Damage and fracture study of cold extrusion dies, Eng. Fract. Mech. 71 (2004) 1021–1033, [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(03\)00154-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(03)00154-1).
- 2- M. Geiger, B. Falk, Prediction of service life and failure probability of cold forging tools, CIRP Ann.Manuf. Technol. 50 (2001) 173–176, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62098-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62098-8).
- 3- A.L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S.J. Dowey, Plasma electrolysis for surface engineering, Surf. Coating. Technol. 122 (1999) 73–93, [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00441-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00441-7).
- 4- E. Poursaiedi and A. Salarvand, Effect of coating surface finishing on fatigue behavior of C450 steel CAPVD coated with (Ti,Cr)N, *J. Mater. Eng. Perform.*, 25(2016), No. 8, p. 3448.
- 5- S.L. Zhao, J. Zhang, Z. Zhang, S.H. Wang, and Z.G. Zhang, Microstructure and mechanical properties of (Ti,Al,Zr)N/ (Ti,Al,Zr,Cr)N films on cemented carbide substrates, *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, 21(2014), No. 1, p. 77.
- 6- Lim S. C., Lim C. Y. H., Lee K. S., *Wear*, 181-183 (1995); 901-912.
- 7- X. Liu, H. Wang, D. Li, Y. Wu, Study on kinetics of carbide coating growth by thermal diffusion process, *Surf. Coat. Technol.* 201 (2006) 2414–2418.
- 8- T. Arai, Thermo-reactive deposition/diffusion process for surface hardening of steels, *ASM Handbook, Heat Treating*, vol. 4, ASM Int. 1998, pp. 1000–1014.
- 9- 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.
- 10- T. Arai, The thermo-reactive deposition and diffusion process for coating steels to improve wear resistance, *Thermochem. Surf. Eng. Steels* 2015, pp. 703–735.
- 11- T. Arai, Thermochemical Surface Engineering of Steels, The thermo-reactive deposition and diffusion process for coating steels to improve wear resistance, (2015) 703-734.
- 12- ASM Metals Handbook, Vol. 4, "Heat treatment", 1998.
- 13- T Arai, Carbide Coating Process by Use of Molten Borax Bath in Japan, *J. Heat Treating*, Vol.1 (2-15), (1979) 15-22.

- 14- X.S. Fan, Z.G. Yang, C. Zhang, Y.D. Zhang, H.Q. Che, Surf. Evaluation of vanadium carbide coatings on AISI H13 obtained by thermo-reactive deposition/diffusion technique Coat. Technol. 205 (2010) 641.
- 15- X.J. Liu, H.C. Wang, D.W. Li, Y.X. Wu, Surf. Coat. Technol. 201 (2006) 2414.
- 16- X.J. Liu, Study on Vanadium Carbide Coating on Die Steels by Thermal Diffusion Process, Ph.D. Thesis, Wuhan University of Technology, China, 2007.
- 17- Omid Ganji, Seyed Abdolkarim Sajjadia., Zhi Gang Yang, Mostafa Mirjalili, Mohammad Reza Najari, On the formation and properties of chromium carbide and vanadium carbide coatings produced on W1 tool steel through thermal reactive diffusion (TRD).
- 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.