

# سینتیک تشکیل پوشش کاربید وانادیم بر سطح فولاد DIN 1.2367

## بروش نفوذ واکنشی گرمایی

فرهاد فضلعلی پورو مهرداد آقائی

دانشگاه صنعتی خواجه نصرالدین طوسی

### چکیده

مقاومت سایشی و خوردگی عالی به همراه چسبندگی و دوام حرارتی خوب پوشش‌های کاربیدی که به روش نفوذ واکنشی گرمایی ایجاد می‌شوند، این پوشش‌ها را از لحاظ تکنولوژیکی مورد توجه ساخته است. این تحقیق به بررسی سینتیک رشد پوشش کاربید وانادیم (VC) در سطح فولاد به روش نفوذ واکنشی گرمایی، پرداخته است. تشکیل پوشش کاربید وانادیم، با قرار دادن فولاد گرمکار ۱،۲۳۶۷ DIN در محیط غنی از وانادیم حاوی پودر فرو وانادیم، کلرید آمونیم و آلومینا، و ایجاد ترکیب بین وانادیم محیط با کربن موجود در سطح فولاد در دماهای ۹۵۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد، به مدت ۰/۵ تا ۴/۵ ساعت، انجام شد. از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی رویشی (SEM) مجهز به آنالیز نقطه‌ای EDX و اشعه X برای مطالعه پوشش استفاده شد. بسته به زمان و دمای عملیات، ضخامتی بین ۲/۳ تا ۲۳/۲ میکرومتر ایجاد شد. مشخص شد که ضخامت لایه نسبت به زمان عملیات، از رابطه سهموی پیروی می‌کند. همچنین رابطه ارنیوسی برای انرژی اکتیواسیون نفوذ بدست آمد و از روی آن ثابت نفوذ و انرژی اکتیواسیون نفوذ کربن برترتیب  $7.98 \times 10^{-4} \text{ Cm}^2/\text{s}$  و  $173.2 \text{ KJ/mol}$  مشخص شد. نهایتاً مشخص شد که برای ایجاد لایه‌ای با تخلخل پایین باید محدوده پایینی برای دمای عملیات انتخاب کرد.

کلمات کلیدی: پوشش‌های گرمایی، کاربید وانادیم، نفوذ واکنشی گرمایی، فولاد گرمکار، سینتیک.

## Kinetics of vanadium carbide coating produced on DIN 1.2367 hot work steel by thermo reactive diffusion method

F. Fazlalipour and M. Aghaie

Materials Engineering Group, Mechanical Engineering Department,  
Khaje Nasir Toosi University of Technology Tehran Iran

**Abstract:** Excellent wear resistance, impact resistance together with good thermal stability of carbide coatings that created by Thermo Reactive Diffusion (TRD), makes it favorable in technological respect. This research investigated kinetics of vanadium carbide coating on DIN:1.2367 hot work steel. These processes carried out in solid medium containing powders of ferro-vanadium, ammonium chloride and alumina. To investigate the kinetics of these processes, coating layer thickness measured for 0.5, 1.5, 3 and 4.5 hours at different temperatures of 950, 1050 and 1150 °C. According to time and temperature, layer thickness obtained between 2.3 to 32.2 μm. X-ray diffraction analyses, optical and scanning electron microscope with EDX spot analyser employed to characterize coating layer properties. Relation between temperature and activation energy obtained as Arrhenius equation and growth rate constant and activation energy obtained,  $7.98 \times 10^{-4} \text{ Cm}^2/\text{s}$  and  $173.2 \text{ KJ/mol}$  correspondingly. Finally characterized that to obtain minimum porosity in coating layer, processes must carry out in low temperature as far as possible.

**Keywords** Vanadium Carbide, Hot Work Steel, Thermo Reactive Diffusion, Ceramic Coating, Kinetics.

E-mail of corresponding author (s): f\_fazlali@sina.kntu.ac.ir, maghaei@kntu.ac.ir

## مقدمه

تخریب قالب یکی از فرایندهای نامطلوب و پر هزینه در فرایندهای تولید بویژه آهنگری است که موجب تحمیل هزینه‌های بالا بر شرکت‌های آهنگری می‌شود. در فرایند آهنگری، ماهیت فرایند و عوامل دخیل در آن مانند دما، فشارهای بالای شکل‌دهی و تکراری بودن این فشارها، گرم و سرد شدن مکرر قالب و حضور پوسته اکسیدی در سطح قطعه داغ و روان کار موجب تشدید تخریب و سایش در قالب‌های آهنگری می‌شود. فولاد گرمکاری که در ساخت قالب‌های آهنگری استفاده می‌شوند، به‌تنهایی دارای قابلیت لازم برای تأمین کلیه خواسته فوق نیست. از طرفی استفاده از مواد ضد سایش، برای ساخت قالب، از نظر هزینه گران بوده و نمی‌تواند خواص دیگری نظیر مقاومت به ضربه را تأمین کند. بنابراین استفاده از یک پوشش مناسب که تحمل این شرایط کاری سخت را داشته باشد، اجتناب ناپذیر است. پوشش‌های سخت از جنس کاربید عناصر واسطه که برای اهداف مقاومت سایشی در شرایط سخت بکار می‌روند، از طرق گوناگونی نظیر رسوب شیمیایی بخار (CVD) و یا رسوب فیزیکی بخار (PVD) ایجاد می‌شوند که خود مستلزم تجهیزات پیچیده و گران قیمت هستند. از طرفی بدلیل محدود بودن میزان نفوذ چسبندگی پایین تری دارند و ضخامت کمی را ارائه می‌دهند [۱]. فرایند نفوذ واکنشی گرمایی یکی از فرایندهای پوشش‌دهی در حوزه مهندسی سطح برای افزایش عمر ابزارهای شکل‌دهی می‌باشد [۲] که بدون نیاز به تجهیزات پیچیده و با هزینه پایین می‌تواند لایه‌ای از کاربید عناصر وانادیم، تیتانیم، کروم و نایبیم را روی فولادهایی که دارای حداقل ۰.۳ درصد کربن باشند ایجاد کند [۳]. بدلیل مزیت اخیر این فرایند به طور وسیع در صنایع (اکستروژن، نورد، برشکاری و فورج سرد) به کار می‌رود و افزایش عمر ایجاد شده در این روش تا ۱۰ برابر گزارش شده است [۱]. این روش برای اولین بار توسط پرفسور "تورو آرای" در مرکز

تحقیقات تویوتا در سال ۱۹۷۱ به ثبت رسیده است، که بنام فرایند نفوذ دهی تویوتا (Toyota Diffusion-Process) نیز شناخته می‌شود. در این فرایند فولاد در یک محیط جامد، مایع یا گاز غنی از اتم‌های عناصر کاربیدزا نظیر Nb, Cr, V, Ti قرار می‌گیرد. این عناصر، در دمای بالا، با کربن سطح فولاد ترکیب شده و یک لایه بسیار سخت و مقاوم به سایش از کاربید این عناصر (VC, CrC, TiC, NbC) ایجاد می‌شود. تحقیقات قبلی که در زمینه پوشش‌دهی فولادهای ابزار با این روش انجام شده بیشتر بر روی عناصر تیتانیم و کروم و یا در محیط گازی و یا مایع انجام شده است [۴-۷] در این تحقیق از عنصر کاربیدزای وانادیم و محیط جامد (پودر) استفاده شده است. انتخاب وانادیم به دلیل مقاومت سایشی و سختی بالای کاربید آن و کاربرد صنعتی این نوع پوشش بود [۴]. همانگونه که گفته شد بدلیل کاربرد صنعتی پوشش کاربید وانادیم اطلاعات علمی کمی از این فرایند انتشار یافته است لذا نیاز به بررسی علمی آن احساس می‌شد. در این فرایند، پیوند ایجاد شده بین لایه و زمینه از نوع نفوذی و متالورژیکی بوده و چسبندگی عالی ارائه می‌دهد. بنابراین مانع از کنده شدن لایه در اثر تنش‌های زیاد آهنگری می‌شود. پوشش‌هایی که بروس نفوذ واکنشی گرمایی ایجاد می‌شوند بدلیل ماهیت سرامیکی و پایداری حرارتی ترکیبات CrC, TiC, VC، نسبت به ساختار مارتزیتی، مقاومت بالایی در برابر نرم شدن از خود نشان می‌دهند. بنابراین برای قالب‌های آهنگری که در معرض نرم شدن و افت مقاومت سایشی هستند، مناسب می‌باشد [۸].

## روش آزمایش

## آماده سازی نمونه

برای بدست آوردن پارامترهای موثر بر ضخامت پوشش نمونه‌ای با ابعادی که به ترتیب در شکل ۱ نشان داده شده، از فولاد گرمکار ۲۳۶۷،۱ تهیه شد. ترکیب شیمیایی فولاد مذکور، توسط آنالیز با دستگاه کوآتومتر ARL Fisons، در جدول ۱ آمده است.

<sup>1</sup>- Thermo Reactive Diffusion (TRD)

<sup>2</sup>- Tohru Arai

جدول ۳ دانه بندی پودر Fe-V

Mesh	Percent
۶۰	۶۵
۱۰۰	۲۳
۱۴۰	۱۲

نمونه‌ها در کوره الکتریکی مقاومتی قابل برنامه‌ریزی در دماهای ۹۵۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، و برای هریک از این دماها بمدت زمان‌های ۰/۵، ۱/۵، ۳ و ۴/۵ ساعت، شارژ شدند. ترکیب شیمیایی پودر پوشش کاری در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴ ترکیب شیمیایی پودر پوشش کاری

Fe-V	NH <sub>4</sub> Cl	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	نفتالین
۱۵	۵۵	۲۰	۱۰

### متالوگرافی نوری

نمونه‌ها بعد از خارج شدن از جعبه‌ها و تمیز کاری با برس و هوای فشرده، از مقطع عرضی برش و مانع گرم شدند. سمباده‌زنی با سمباده‌های ۱۶۰، ۳۶۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ و پولیش با اکسید آلومینیم ۳ میکرون انجام گرفت. نمونه‌ها بعد از حکاکی با محلول نایتال ۴٪ بوسیله میکروسکوپ نوری صایران، (بزرگنمایی تا X ۶۰۰)، مجهز به دوربین دیجیتالی و امکانات سنجش فاصله، با دقت ۰/۱ میکرومتر، متالوگرافی شده و ضخامت لایه پوشش بدست آمد.

### ریز سختی

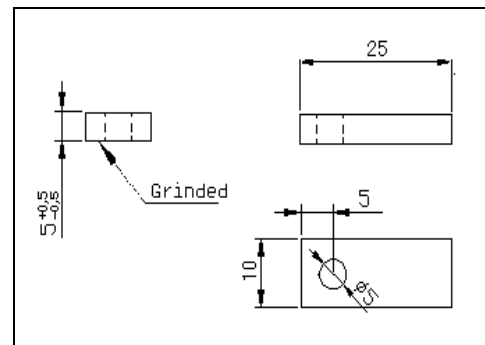
ریز سختی ویکرز از مقطع عرضی نمونه‌ها از سطح به عمق توسط میکرو هاردنس shimadzu و وزنه ۵۰ گرمی انجام گرفت.

### میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

نمونه‌ها پولیش شده، از مقطع عرضی و از سطح، توسط میکروسکوپ روبشی Philips XL30 و بروش الکترون-های ثانویه SE و برگشتی<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفتند و

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد ۲۳۶۷، ۱

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S
۰/۴۴	۰/۳۳	۰/۴۹	۴/۷۷	۰/۱۴	۲/۷۵	۰/۴۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۲



شکل ۱ ابعاد نمونه برای پوشش دهی در شرایط مختلف. ابعاد به Cm

ابتدا نمونه‌ها سنگزنی و سپس برای رسیدن به شرایط سطحی یکسان با سمباده ۱۰۰۰ بوهلر به مدت ۳۰ ثانیه پرداخت شدند، سپس در محلول تری کلرو اتیلن به مدت یک دقیقه چربی زدایی و خشک شدند. عملیات مختلف زیر روی آنها انجام شد.

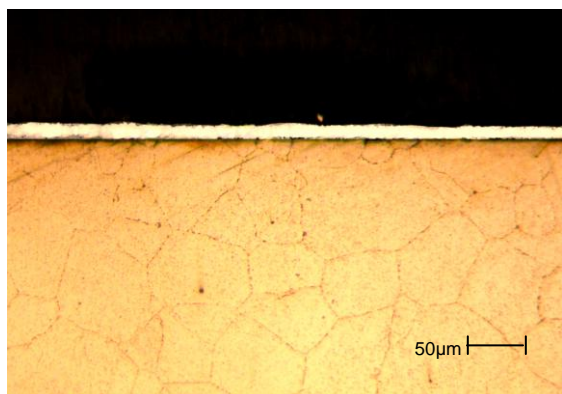
### فرایند نفوذ واکنشی گرمایی

نمونه‌ها در داخل جعبه‌های فولادی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتیمتر حاوی پودر فرو وانادیم بعنوان تأمین کننده عنصر کابیدزا، پودر اکسید آلومینیم با مش ۲۰۰ بعنوان پودر خشی، پودر کلرید آمونیم بعنوان فعال کننده و پودر نفتالین برای ممانعت از اکسید شدن، قرار گرفتند و در پوش آنها با سیمان نسوز آلومینایی برای ممانعت از ورود هوا به داخل محفظه آب‌بندی شد. مشخصات پودر فرو وانادیم مصرفی در جداول ۲ و ۳ آمده است.

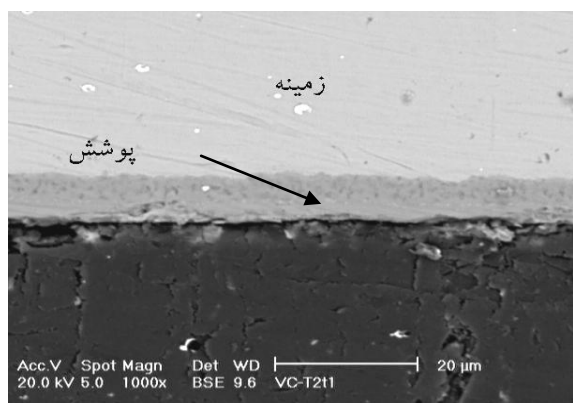
جدول ۲ آنالیز شیمیایی Fe-V

Element	Percent
V	۵۷/۲
Si	۲/۹۵
Al	۲/۷۵
Fe	۳۷/۱

<sup>۱</sup>BSE(Back Scattered Electron)

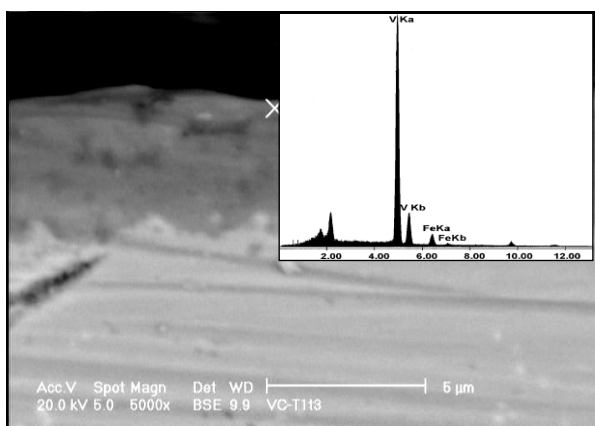


شکل ۲ تصویر میکروسکوپی لایه VC ایجاد شده در دمای ۹۵۰°C و زمان ۱/۵ ساعت.



شکل ۳ تصویر SEM-BSE از لایه VC

در شکل‌های ۴، ۵ و ۶، تغییرات پیک‌های وانادیم و آهن حاصل از EDX، به ترتیب در سطح، فصل مشترک و زیر لایه دیده می‌شود (شرایط عملیات، زمان ۴/۵ ساعت و دمای ۹۵۰°C).



شکل ۴ پیک‌های وانادیم و آهن حاصل از EDX، در سطح نمونه

آنالیز نقطه‌ای EDX، برای وانادیم و آهن از سطح پوشش تا عمق نمونه‌ها تهیه شد.

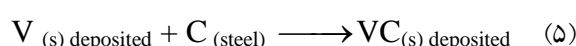
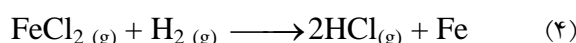
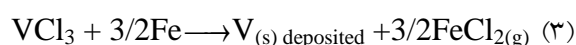
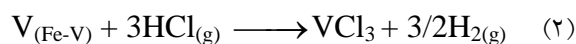
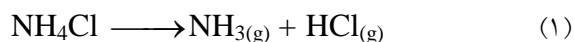
### آنالیز اشعه X (XRD)

برای شناسایی فازهای تشکیل شده در لایه پوشش، از نمونه‌ها توسط دستگاه Philips pw-۳۷۱۴ الگوی تفرق Cu Kα با طول موج ۱/۴۵Å تهیه شد.

### بحث بر روی نتایج

#### مکانیزم فرایند نفوذ واکنشی گرمایی

در فرایند نفوذ واکنشی گرمایی در حین عملیات مطابق واکنش‌های ذیل وانادیم در محیط بصورت وانادیم اتمی آزاد می‌شود. این اتم‌ها توسط گاز HCl به سطح قطعه منتقل شده و بعد از رسوب، با اتم‌های کربن موجود در فولاد واکنش می‌دهد که نتیجه، ایجاد کاربید وانادیم می‌باشد [۹]. واکنش‌های مذکور در ذیل آمده است.



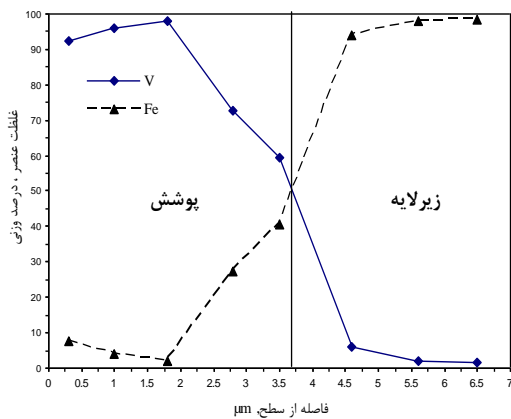
انرژی آزاد استاندارد واکنش‌های فوق در دماهای مختلف

در جدول ۵ دیده می‌شود [۹].

جدول ۵ انرژی آزاد استاندارد واکنش‌های جانشینی وانادیم در دماهای مختلف [۹].

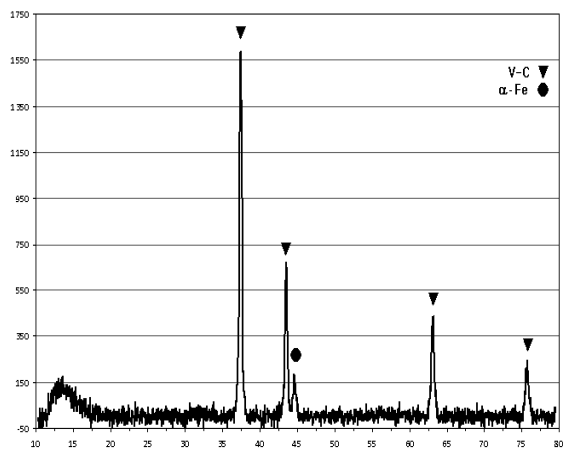
Number	Reaction	$\Delta G_f^\circ$ , kJ/g atom V				
		1273 K	1323 K	1373 K	1473 K	1523 K
1	$\text{V} + 2\text{HCl}_{(\text{g})} = \text{VCl}_2 + \text{H}_2(\text{g})$	-99.16	-91.58	-86.28	-74.23	-67.82
2	$\text{V} + 3\text{HCl}_{(\text{g})} = \text{VCl}_3 + 3/2\text{H}_2(\text{g})$	-194.26	-181.91	-171.67	-161.65	-137.50
3	$\text{V} + 4\text{HCl}_{(\text{g})} = \text{VCl}_4(\text{g}) + 2\text{H}_2(\text{g})$	-23.06	-15.61	-8.15	6.76	14.22
4	$2\text{VCl}_3(\text{g}) = \text{VCl}_2 + \text{VCl}_4(\text{g})$	-131.32	-107.90	-117.97	-138.12	-148.20
5	$\text{VCl}_2 + \text{Fe} = \text{V} + \text{FeCl}_2(\text{g})$	74.95	68.75	68.23	39.47	30.70
6	$\text{VCl}_4(\text{g}) + 2\text{Fe} = \text{V} + 2\text{FeCl}_2(\text{g})$	26.53	24.93	18.23	4.84	-1.86
7	$\text{VCl}_3(\text{g}) + 3/2\text{Fe} = \text{V} + 3/2\text{FeCl}_2(\text{g})$	-43.02	-49.80	-60.58	-83.87	-86.39
8	$\text{Fe} + 2\text{HCl}_{(\text{g})} = \text{FeCl}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$	0.58	2.70	0.50	-2.20	-3.098

علاوه بر نفوذ کربن به سمت پوشش و تشکیل کاربید وانادیم، اتم‌های وانادیم نیز بداخل زمینه نفوذ می‌کنند. حضور اتم‌های آهن در پوشش، بدلیل نفوذ اتمی در دمای بالا و انجام واکنش‌های جانیشینی (شیمیایی) می‌باشد.



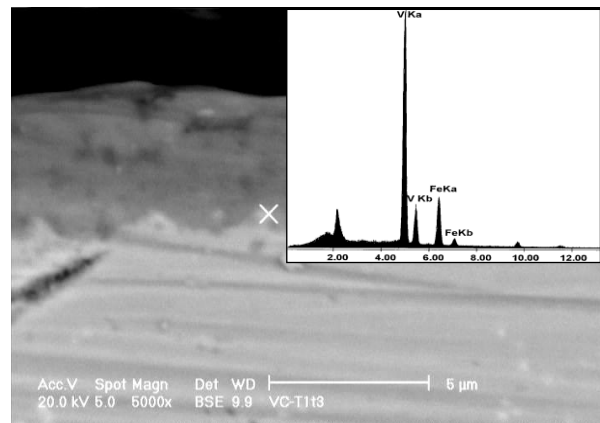
شکل ۷ تغییر غلظت وانادیم و آهن از سطح به طرف زمینه

شکل ۸ الگوی پراش اشعه X از سطح نمونه (شرایط عملیات، زمان ۱/۵ ساعت و دمای ۹۵۰ °C) فازهای تشکیل شده را نشان می‌دهد.

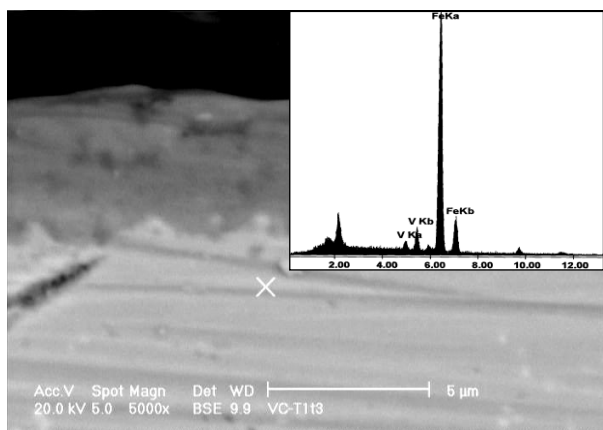


شکل ۸ الگوی پراش اشعه X از سطح نمونه

روشن است که با نفوذ کربن به سطح و تشکیل VC غلظت کربن در زیر سطح کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که سختی و استحکام در این منطقه پایین‌تر از نواحی عمقی می‌باشد [۱۰]. این موضوع با اندازه‌گیری سختی از سطح به عمق مطابق شکل ۹ روشن می‌شود.



شکل ۵ پیک‌های وانادیم و آهن حاصل از EDX، در فصل مشترک

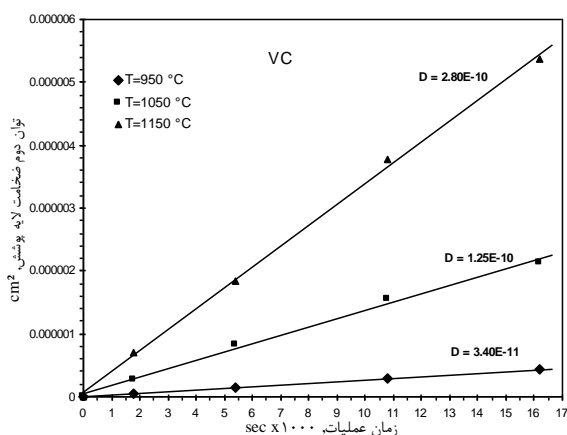


شکل ۶ پیک‌های وانادیم و آهن حاصل از EDX، در زمینه

مطابق این شکل‌ها دیده می‌شود که در سطح (شکل ۴) پیک وانادیم دارای بیشترین شدت بوده و شدت پیک‌های آهن کم است. با رسیدن به فصل مشترک (شکل ۵) شدت پیک‌های آهن نیز بیشتر می‌شود. در عمق قطعه یعنی در زمینه (شکل ۶) دیده می‌شود که پیک وانادیم به مقدار قابل توجه کم شده و در عوض پیک‌های آهن به شدت افزایش می‌یابد. نتیجه این که از سطح به عمق مقدار وانادیم کم شده و مقدار آهن افزوده می‌شود.

در شکل ۷ نیز که با آنالیز نقطه‌ای EDX تهیه شده است (شرایط عملیات، زمان ۱/۵ ساعت و دمای ۹۵۰ °C)، تغییر غلظت وانادیم و آهن از سطح به طرف زمینه دیده می‌شود. این شکل مطالب فوق را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که اولاً، لایه تشکیل شده غنی از وانادیم بوده، ثانیاً،

برای تحقیق بیشتر این موضوع با رسم نمودار توان دوم ضخامت با زمان نمودار شکل ۱۱ بدست می‌آید که به روشنی بیان کننده رابطه خطی بین  $x^2, t$  می‌باشد. همچنین با توجه به ماهیت و دیمانسیون  $k$  (بر حسب  $\text{cm}^2/\text{s}$ )، دیده می‌شود که شیب این خطوط مقدار ضریب نفوذ در دماهای مختلف را نیز نشان می‌دهند بنابراین می‌توان گفت  $k$  همان ضریب نفوذ ( $D$ ) است.



شکل ۱۱ تغییرات توان دوم ضخامت کاربید وانادیم نسبت به زمان در سه دما

### انرژی فعال سازی

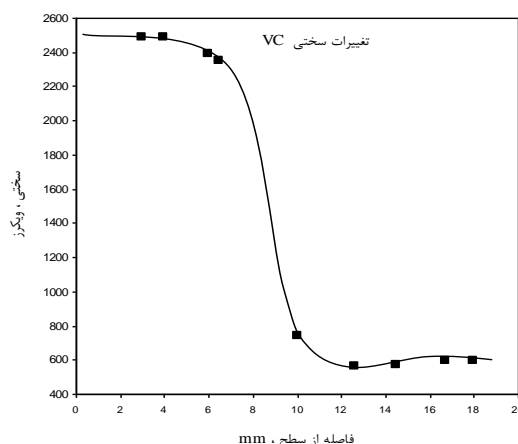
مطابق شکل ۱۱ با افزایش دما مقدار  $D$  (شیب خطوط) افزایش می‌یابد. با رسم تغییرات  $\ln D$  بر حسب  $1/T$  در شکل ۱۲ دیده می‌شود که این تغییرات خطی است:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q}{RT} \quad (۷)$$

بنابراین یک رابطه نمایی بین  $D$  و  $T$  برقرار است [۸]:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (۸)$$

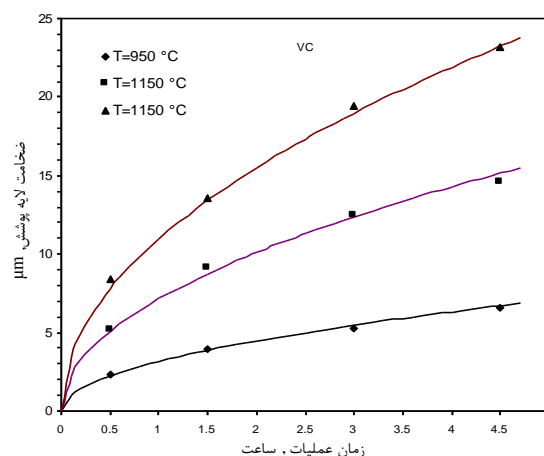
که در آنها  $Q$  انرژی اکتیواسیون،  $R$  ثابت گازها،  $D_0$  ثابت ضریب نفوذ و  $T$  دما بر حسب درجه کلون است. از روی شیب آن مقدار  $Q$  و  $D_0$  را برای نفوذ کربن و رشد لایه VC بدست آورد [۱۰]. این یافته‌ها در توافق با نتایج Uger Sen [۴۵] می‌باشد.



شکل ۹ تغییرات سختی لایه کاربید وانادیم از سطح به عمق

### بررسی تأثیر دما و زمان بر ضخامت لایه پوشش (سینتیک فرایند)

با رسم ضخامت‌های بدست آمده در دماها و زمان‌های ذکر شده شکل ۱۰ حاصل شد.

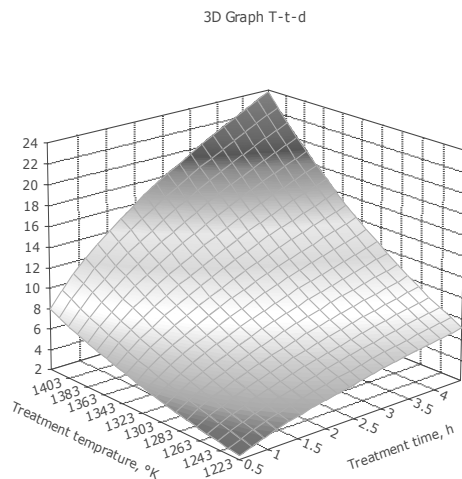


شکل ۱۰ ضخامت لایه کاربید وانادیم نسبت به زمان در دماهای مختلف عملیات.

با رجوع به شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که رابطه ضخامت لایه ایجاد شده با زمان عملیات یک رابطه سهموی می‌باشد.

$$\frac{x^2}{t} = k \quad (۹)$$

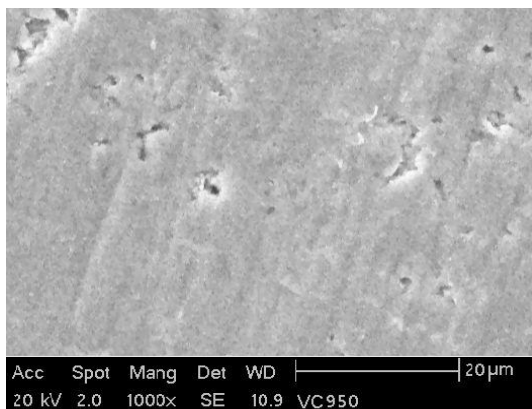
که در آن  $x$  ضخامت لایه،  $t$  زمان عملیات و  $k$  مقدار ثابت نرخ رشد لایه است.



شکل ۱۳ سطح تغییرات ضخامت نسبت به تغییرات هم‌زمان دما و زمان.

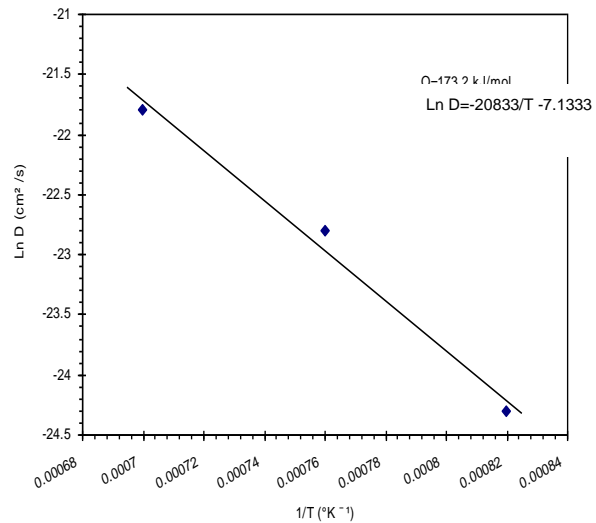
### تأثیر دمای فرایند بر مورفولوژی پوشش VC

بررسی‌های انجام شده با SEM مشخص نمود که در عملیات نفوذ واکنشی گرمایی با افزایش دما از  $950^{\circ}\text{C}$  تا  $1150^{\circ}\text{C}$ ، در مدت زمان ثابت ۱/۵ ساعت، لایه ایجاد شده از یک پوشش بدون تخلخل و پیوسته به حالت متخلخل و غیر یکنواخت تغییر می‌کند. در شکل ۱۴ تصویر SEM از سطح نمونه بعد از عملیات نفوذ واکنشی گرمایی در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  دیده می‌شود.



شکل ۱۴ تصویر SEM از سطح نمونه بعد از عملیات نفوذ واکنشی گرمایی در دمای  $950^{\circ}\text{C}$

مطابق شکل ۱۴ دیده می‌شود که لایه‌ای تقریباً با تخلخل پایین ایجاد شده است. همچنین شکل ۱۵ تصویر میکروسکوپی لایه را بعد از عملیات در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ نمودار تغییرات LnD بر حسب  $1/T$

برای این حالت مقدار  $D$ ،  $7.98 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  و مقدار  $Q$   $173/2 \text{ KJ/mol}$  بدست می‌آید که به حد کافی بالاتر از مقدار انرژی آزاد واکنش تشکیل کاربید وانادیم از ترکیب وانادیم و کربن یعنی  $92/4 \text{ KJ/mol}$  می‌باشد. این مطلب نشان می‌دهد که کنترل کننده فرایند پدیده نفوذ می‌باشد [۱۰]. از رابطه (۸) و با جاگذاری مقادیر بدست آمده از شکل ۱۲ ضریب نفوذ در هر دمایی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D = 7.98 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{20833}{T}\right) \quad (9)$$

از رابطه (۶) و (۹)، ضخامت لایه بر حسب دما و زمان حاصل می‌شود:

$$x = 0.028 \sqrt{t \cdot \exp\left(-\frac{20833}{T}\right)} \quad (10)$$

با ترسیم رابطه (۱۰) در شکل ۱۳، سطحی سه بعدی از زمان، دما و ضخامت بدست می‌آید. در این شکل دیده می‌شود که ضخامت متغیر وابسته از متغیرهای مستقل دما و زمان است.

VC حاکم است. لذا لایه‌ای که در دمای بالا تشکیل می‌شود نسبت به لایه ای که در دمای پایین رشد می‌کند. از غیر یکنواختی و تخلخل بالایی برخوردار است.

### نتیجه گیری

با توجه به یافته‌های این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که:

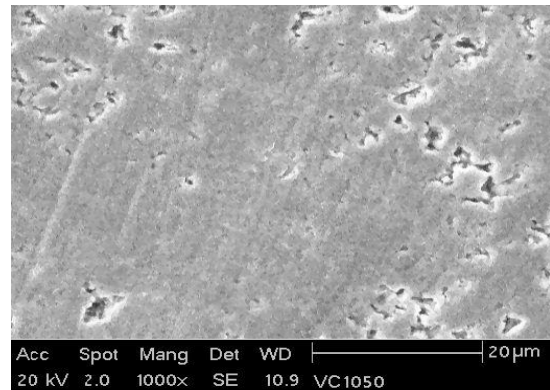
۱. می‌توان از طریق روش نفوذ یک لایه کاربید وانادیم روی سطح فولاد ایجاد کرد.
۲. لایه ایجاد شده پیوسته و فشرده است.
۳. رابطه بین ضخامت لایه کاربیدی ایجاد شده و زمان عملیات در هر دمایی بصورت سهموی است.
۴. با افزایش زمان و دمای عملیات ضخامت لایه افزایش می‌یابد.
۵. ریز سختی لایه کاربید وانادیم  $2487 \pm 50$  ویکرز است.
۶. تشکیل لایه کاربید وانادیم یک پدیده نفوذی بوده رابطه آرنیوس در رابطه انرژی اکتیواسیون با دما صادق است.
۷. ثابت نفوذ و انرژی اکتیواسیون نفوذ کربن در شبکه کریستالی کاربید وانادیم بترتیب مقادیر  $10^{10} \times 7/98$  و  $173/2$  KJ/mol است.
۸. با افزایش دما مورفولوژی پوشش به سمت تخلخل بیشتر پیش می‌رود.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های آقایان مهندس هاشمی، مهندس آغداشی و دکتر خدابنده کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

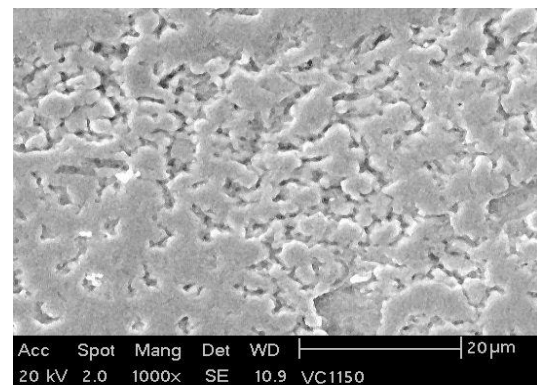
### مراجع

1. J. Fritz, H. D. Russ, *Preliminary Research For The Development Of Hot Forging Die...*, College of Engineering and Technology of Ohio University, (2004)27-57.



شکل ۱۵ تصویر میکروسکوپی لایه را بعد از عملیات در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$

با مقایسه این شکل با شکل ۱۴ دیده می‌شود که میزان تخلخل زیاد و لایه تقریباً غیر یکنواخت تر شده است. نهایتاً در شکل ۱۶ که پوشش VC ایجاد شده در دمای  $1150^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد، تغییرات زیادی در مورفولوژی رخ داده و پوششی کاملاً متخلخل ایجاد شده است. یکی دیگر از محدودیت‌های فرایند نفوذدهی واکنش گرمایی، رشد اندازه دانه در ریز ساختار و اعوجاج در ابعاد قطعه در اثر بالا بودن دما می‌باشد.



شکل ۱۶ تصویر میکروسکوپی لایه را بعد از عملیات در دمای  $1150^{\circ}\text{C}$

۱۱۵۰

با مراجعه به انرژی آزاد واکنش‌های جانیشینی (ایجاد وانادیم اتمی و واکنش ترکیب وانادیم با کربن) و همچنین رابطه آرنیوسی بدست آمده برای نفوذ این عنصر، می‌توان دلیل این تغییر مورفولوژی را اینگونه بیان کرد. با افزایش دما سرعت واکنش‌های جانیشینی و سرعت نفوذ اتمی، در نتیجه سرعت ایجاد و رشد لایه افزایش می‌یابد و فرصت کافی برای آرایش اتمی وجود ندارد و بی‌نظمی در رشد دانه‌های



2. S. Babu, D. Ribeiro, R. Shivpuri, *Material and Surface Engineering For Precision Forging Dies*, Ohio Aerospace Institute and National Center for Manufacturing Sciences, (1999)14-16 ,72-110.
3. S. Babu, *A Material Based Approach to Creating Wear Resistant...*, Ohio State University , (2004)12-65 .
4. B. Chicco, W.E. Borbidge , E. Summerville, *Experimental study of vanadium carbide and carbonitride coatings*, Materials Science and Engineering, A266(1999)62-72.
5. U. Sen, *Kinetics of niobium carbide coating produced on AISI 1040 steel by thermo-reactive deposition technique*, Materials Chemistry and Physics, 86(2004)189-194.
6. U. Sen, *Kinetics of titanium nitride coatings deposited by thermo-reactive deposition technique*, Vacuum, 75(2004)339-345.
7. S. Sen, *A study on kinetics of Cr<sub>x</sub>C coated high-chromium steel by thermo reactive diffusion technique*, Vacuum, 79(2005) 63-70.
8. T. Arai, *Thermoreactive diffusion Process*, Metals HandBook, 4(1994)448-453.
9. N. Gidikova, *Vanadium boride coatings on steel*, Materials Science and Engineering, A278 (2000)181-186.
10. S.M.M. Khoe, A. Ata, A.Emel Geçkinli, N. Bozkurt, *VC & NbC coating on din 115crv3 steel in molten borax bath*, Materials science forum, 163-165(1994)627-632.