

# سینتیک تشکیل پوشش کاربید وانادیم بر سطح فولاد DIN 1.2367

## بروش نفوذ واکنشی گرمایی

فرهاد فضلعلی پورو مهردادآقائی

دانشگاه صنعتی خواجه نصرالدین طوسی

### چکیده

مقاومت سایشی و خوردگی عالی به همراه چسبندگی و دوام حرارتی خوب پوشش های کاربیدی که به روش نفوذ واکنشی گرمایی ایجاد می شوند، این پوشش ها 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 DIN 1.2367 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 دما های ۹۵۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد، به مدت ۰/۵ تا ۴/۵ ساعت، انجام شد. از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آنالیز نقطه ای 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 می کند. 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 لایه ای با تخلخل پایین باید محدوده پایینی برای دمای عملیات انتخاب کرد.

کلمات کلیدی: پوشش سرامیکی، 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 پرهزینه در فرایندهای تولید بویژه آهنگری است که موجب تحمیل هزینه‌های بالا بر شرکت های 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، اجتناب‌ناپذیر 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 گران‌قیمت 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 به‌طور وسیع در صنایع (اکستروژن، نورد، برشکاری و فورج سرد) به‌کار 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 به‌دلیل 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 می‌شود. 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 VC, TiC, CrC، نسبت به ساختار مارتنزیتی، 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

## آماده‌سازی نمونه

برای بدست آوردن پارامترهای موثر بر ضخامت پوشش نمونه‌های لب‌ابعادی 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 مانت 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٪ به‌میله میکروسکوپ نوری صابیران، (بزرگنمایی تا ۶۰۰X)، مجهز به دوربین دیجیتالی و امکانات سنجش فاصله، با دقت ۰/۱ میکرومتر، متالوگرافی شده و ضخامت لایه پوشش بدست آمد.

### ریز سختی

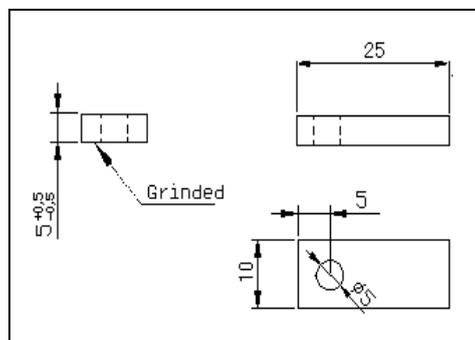
ریز سختی و یکرز از مقطع عرضی نمونه‌ها از سطح به عمق توسط میکرو هاردنس shimadzu و وزنه ۵۰ گرمی انجام گرفت.

### 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 بوهرلر 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.

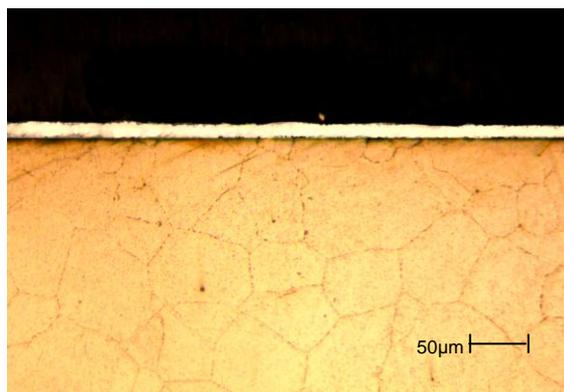
### فرایند نفوذ واکنشی گرمایی

نمونه‌ها در داخل جعبه‌های فولادی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتیمتر حاوی پودر فرو و انادیم بعنوان تأمین کننده عنصر کابله‌زا، 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 درپوش آنها با سیمان نسوز آلومینایی برای ممانعت از ورود هوا به داخل محفظه آب‌بندی شد. مشخصات پودر فرو و انادیم مصرفی در جداول ۲ و ۳ آمده است.

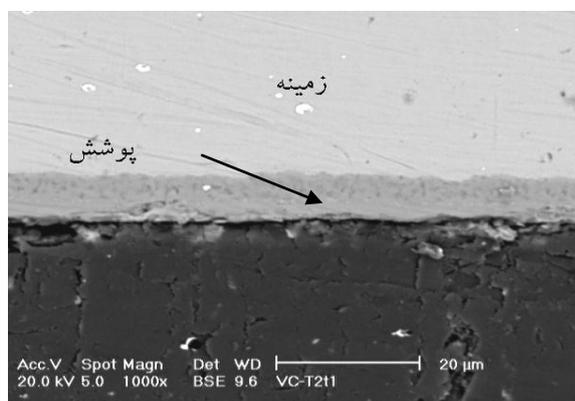
جدول ۲ آنالیز شیمیایی Fe-V

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

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

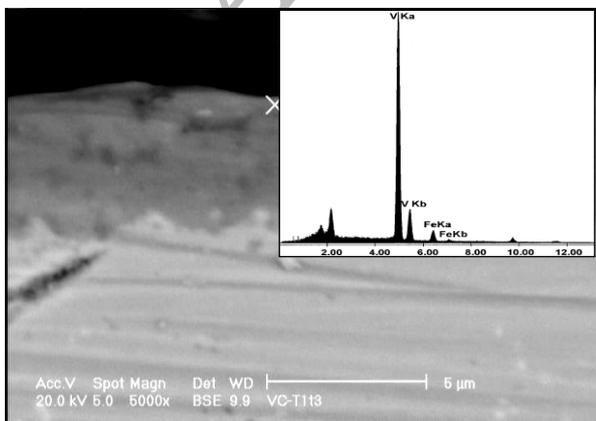


شکل ۲ تصویر میکروسکوپی لایه VC ایجاد شده در دمای ۹۵۰°C و زمان ۱/۵ ساعت.



شکل ۳ تصویر SEM-BSE از لایه VC

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



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

آنالیز نقطه ای EDX، برای وانادیم و آهن از سطح پوشش تا عمق نمونه تهیه شد.

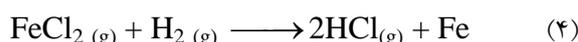
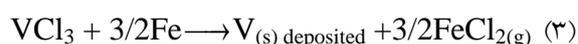
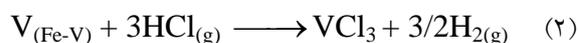
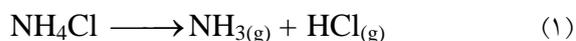
### آنالیز اشعه X (XRD)

برای شناسایی فاز های تشکیل شده در لایه پوشش، از نمونه ها 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 واکنش های ذیل وانادیم در محیط بصورت وانادیم اتمی آزاد می شود. این اتم ها توسط گاز HCl به سطح قطعه منتقل شده و بعد از رسوب، با اتم های کربن موجود در فولاد واکنش می دهد که نتیجه، ایجاد کاربید وانادیم می باشد [۹]. واکنش های مذکور در ذیل آمده است.

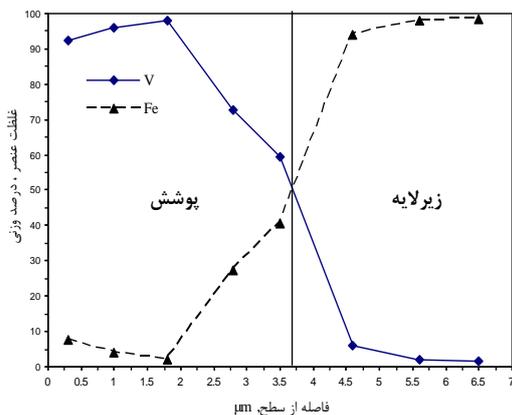


انرژی آزاد استاندارد واکنش های فوق در دماهای مختلف در جدول ۵ دیده می شود [۹].

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

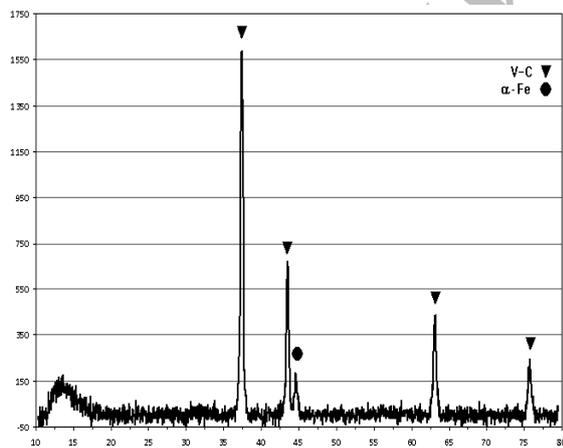
Number	Reaction	$\Delta G^\circ_f$ , kJ/g atom V				
		1273 K	1323 K	1373 K	1473 K	1523 K
1	$\text{V} + 2\text{HCl}_{(\text{g})} = \text{VCl}_2 + \text{H}_2(\text{g})$	-99.16	-91.58	-86.28	-74.23	-67.82
2	$\text{V} + 3\text{HCl}_{(\text{g})} = \text{VCl}_3 + 3/2\text{H}_2(\text{g})$	-194.26	-181.91	-171.67	-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	$\text{VCl}_3 + 2\text{Fe} = \text{V} + 2\text{FeCl}_2(\text{g})$	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 ، اتم های وانادیم نیز بداخل زمینه نفوذ می کنند. حضور اتم های آهن در پوشش، بدلیل نفوذ اتمی در دمای بالا و انجام واکنش های جانیشینی (شیمایی) می باشد.



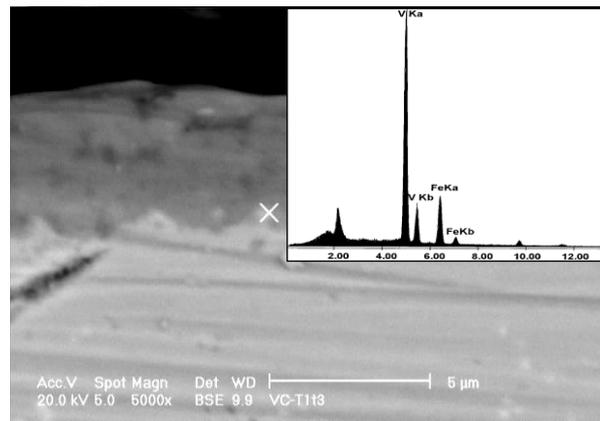
شکل ۷ تغییر غلظت وانادیم و آهن از سطح به طرف زمینه

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

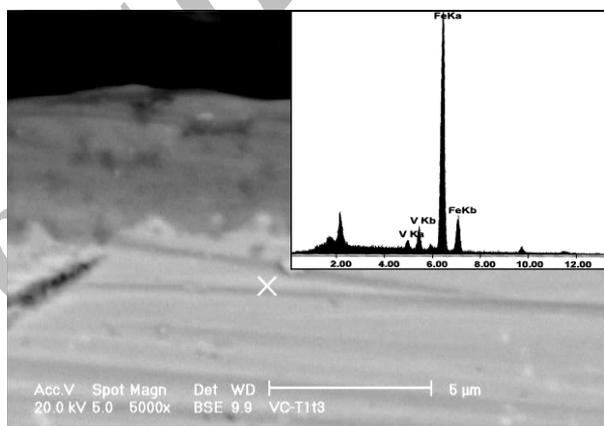


شکل ۸ الگوی پراش اشعه X از سطح نمونه

روشن است که با نفوذ کربن به سطح و تشکیل VC غلظت کربن در زیر سطح کاهش می یابد. این بدان معنی است که سختی و استحکام در این منطقه پایین تر از نواحی عمقی می باشد [۱۰]. این موضوع با اندازه گیری سختی از سطح به عمق مطابق شکل ۹ روشن می شود.



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

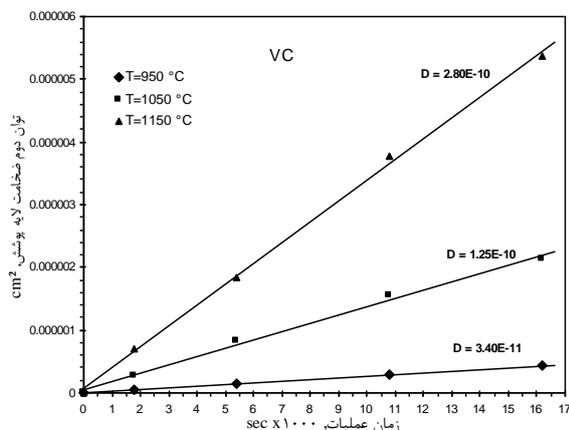


شکل ۶ پیک های وانادیم و آهن حاصل از EDX، در زمینه

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

در شکل ۷ نیز که با آنالیز نقطه ای EDX تهیه شده است (شرایط عملیات، زمان ۱/۵ ساعت و دمای ۹۵۰ °C)، تغییر غلظت وانادیم و آهن از سطح ب ه طرف زمینه دیده می شود. این شکل مطالب فوق را تأیید می کند و نشان می دهد 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 می آید که به روشنی بیان کننده رابطه خطی بین  $x^2, t$  می باشد. همچنین با توجه به ماهیت و دیمانسیون  $k$  (بر حسب  $\text{cm}^2/\text{s}$ )، دیده می شود که شیب این خطوط مقدار ضریب نفوذ در دماهای مخ تلف را نیز نشان می دهند بنابراین می توان گفت  $k$  همان ضریب نفوذ ( $D$ ) است.



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

### انرژی فعال سازی

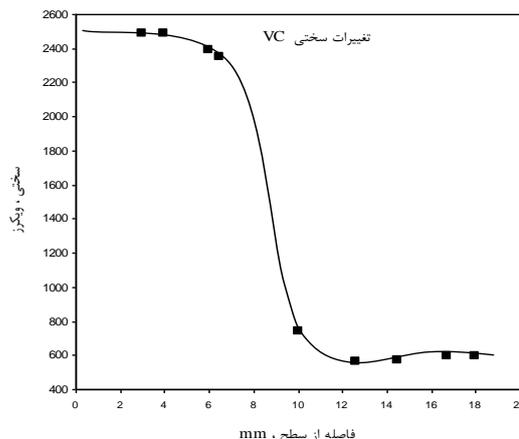
مطابق شکل ۱۱ با افزایش دما مقدار  $D$  (شیب خطوط) افزایش می یابد. با رسم تغییرات  $\ln D$  بر حسب  $1/T$  در شکل ۱۲ دیده می شود که این تغییرات خطی است:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q}{RT} \quad (7)$$

بنابراین یک رابطه نمائی بین  $D$  و  $T$  بر قرار است [۸]:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (8)$$

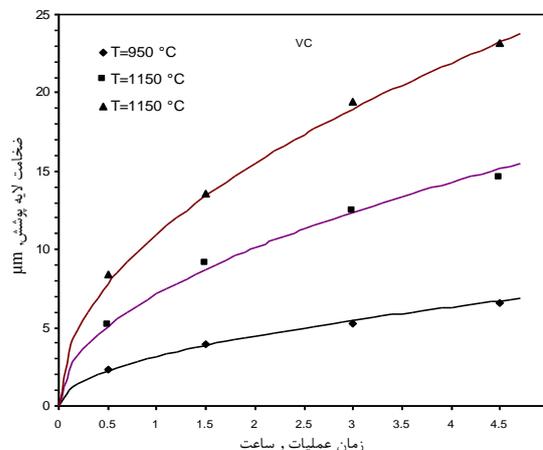
که در آنها  $Q$  انرژی اکتیواسیون،  $R$  ثابت گازها،  $D_0$  ثابت ضریب نفوذ و  $T$  دما بر حسب درجه کلوین است. از روی شیب آن مقدار  $Q$  و  $D_0$  را برای نفوذ کربن و رشد لایه VC بدست آورد [۱۰]. این یافته ها در توافق با نتایج Uger Sen [۴۵] می باشد.



شکل ۹ تغییرات سختی لایه کاربید وانادیم از سطح به عمق

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

با رسم ضخامت های بدست آمده در دماها و زمان های ذکر شده شکل ۱۰ حاصل شد.

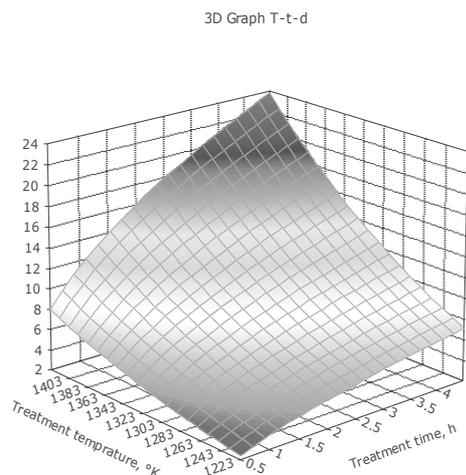


شکل ۱۰ ضخامت لایه کاربید وانادیم نسبت به زمان در دماهای مختلف عملیات.

لجوج به شکل ۱۰ می توان نتیجه گرفت که رابطه ضخامت لایه ایجاد شده با زمان عملیات یک رابطه سهموی می باشد.

$$\frac{x^2}{t} = k \quad (6)$$

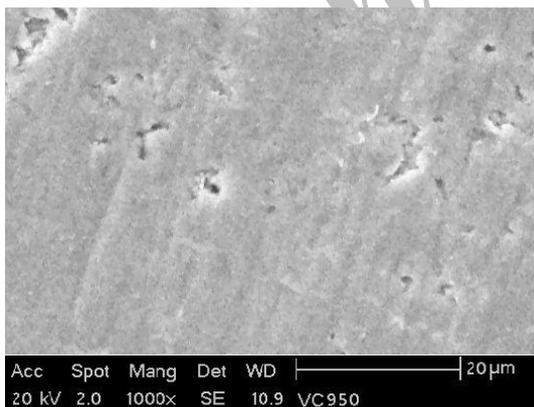
که در آن  $x$  ضخامت لایه،  $t$  زمان عملیات و  $k$  مقدار ثابت نرخ رشد لایه است.



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

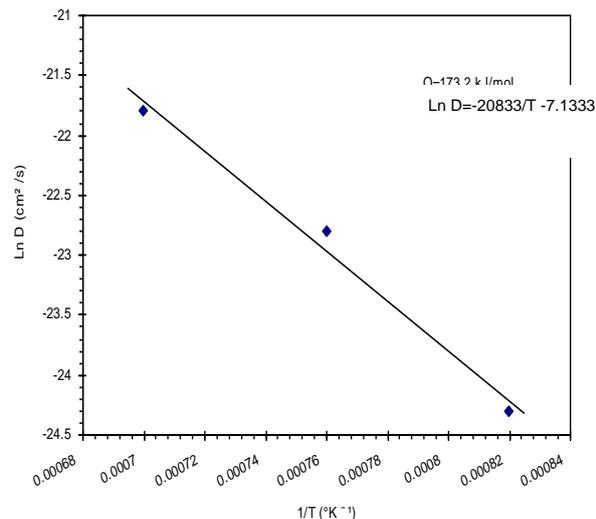
### تأثیر دمای فایند بر مورفولوژی پوشش VC

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



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

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



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 می آید که به حد کافی بالاتر از مقدار انرژی آزاد واکنش تشکیل کاربید وانادیم از ترکیب وانادیم و کربن یعنی  $92/4 \text{ KJ/mol}$  می باشد. این مطلب نشان می دهد که کنترل کننده فرایند پدیده نفوذ می باشد [۱۰]. از رابطه (۸) و با جاگذاری مقادیر بدست آمده از شکل ۱۲ ضریب نفوذ در هر دمایی از رابطه زیر بدست می آید:

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

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

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

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

VC حاکم است. لذا لایه ای که در دمای بالا تشکیل می شود نسبت به لایه ای که در دمای پایین رشد می کند. از غیر یکنواختی و تخلخل بالایی برخوردار است.

### نتیجه گیری

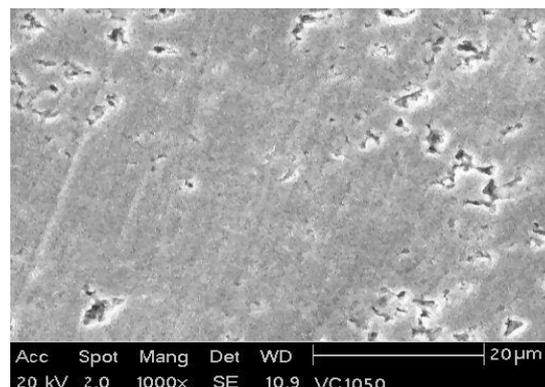
- با توجه به یافته های این تحقیق می توان نتیجه گرفت که:
۱. می توان از طریق روش نفوذ یک لایه کاربید وانادیم روی سطح فولاد ایجاد کرد.
  ۲. لایه ایجاد شده پیوسته و فشرده است.
  ۳. رابطه بین ضخامت لایه کاربیدی ایجاد شده و زمان عملیات در هر دمایی بصورت سهموی است.
  ۴. با افزایش زمان و دمای عملیات ضخامت لایه افزایش می یابد.
  ۵. ریز سختی لایه کاربید وانادیم  $50 \pm 2487$  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  $10 \times 7/98$  و  $173/2$  KJ/mol است.
  ۸. با افزایش دما مورفولوژی پوشش به سمت تخلخل بیشتر پیش می رود.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند از حمایت های آقایان مهندس هاشمی، مهندس آغداشی و دکتر خداپنده کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

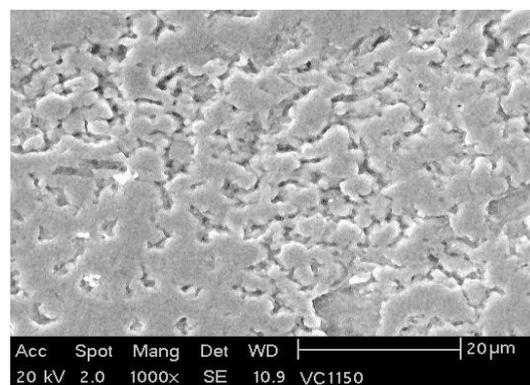
### مراجع

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 می شود 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 می دهد، تغییرات زیادی در مورفولوژی رخ داده و پوششی کاملاً متخلخل ایجاد شده است. یکی دیگر از محدودیت های فرایند نفوذدهی واکنش گرمایی، رشد اندازه دانه در ریز ساختار و اعوجاج در ابعاد قطعه در اثر بالا بودن دما می باشد.



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

با مراجعه به انرژی آزاد واکنش های جانیشینی (ایجاد وانادیم اتمی و واکنش ترکیب وانادیم با کربن) و همچنین رابطه آرنیوسی بدست آمده برای نفوذ این عنصر، می توان دلیل این تغییر مورفولوژی را اینگونه بی ان کرد. با افزایش دما سرعت واکنش های جانیشینی و سرعت نفوذ اتمی، در نتیجه سرعت ایجاد و رشد لایه افزایش می یابد و فرصت کافی برای آرایش اتمی وجود ندارد و بی نظمی در رشد دانه های

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.

Archive of SID