

# پوشش کربونیتريدکروم به روش غوطه‌وری در حمام نمک دمای پایین بر روی فولاد ۱،۲۲۱۰ DIN

غلامرضا خلیج و سید محمد موسوی خوبی

**چکیده:** با غوطه‌وری نمونه‌های نیتروژن‌دهی شده در حمام نمک حاوی پودر فروکروم، لایه سخت و مقاوم به سایش کربونیتريدکروم در دماهای کمتر از  $700^{\circ}\text{C}$  بر روی قطعات فولادی شکل می‌گیرد. این فرآیند به نشست و نفوذ فعال حرارتی (TRD) موسوم است. در این تحقیق، اثر دما و زمان پوشش‌دهی، درصد وزنی و اندازه دانه پودر فروکروم بر ترکیب، ضخامت و سختی پوشش بر روی فولاد ۱،۲۲۱۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها مؤید این مطلب است که در همه حالات، ساختار پوشش شامل کربونیتريدکروم می‌باشد و با افزایش دما و زمان فرآیند، درصد وزنی و ریزدانه شدن پودر فروکروم، ضخامت و سختی افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** کربونیتريدکروم، پوشش سخت، پوشش دمای پایین، حمام نمک

## ۱. مقدمه

ایجاد پوشش‌های سخت توسط نیتريد، کاربرد یا کربونیتريد فلزات واسطه روش مرسوم برای بهبود مقاومت سایش قطعات فولادی است.

این امر با فرایندهای نشست فیزیکی از بخار (PVD) و نشست شیمیایی از بخار (CVD) قابل دستیابی است و هر دو روش مزایا و معایب خاص خود را دارند. CVD معمولاً شامل فرایندهای دمای بالا ( $700-1200^{\circ}\text{C}$ ) به منظور دستیابی به نشست یکنواخت عنصر پوشش است. اگرچه، این دماهای بالا ممکن است منجر به پیچش شدید در قطعات عملیات شده گردد. PVD که می‌تواند در  $500-200^{\circ}\text{C}$  شکل بگیرد، زیر دمای تمپر فولادهای ابزار، به تجهیزات گران قیمت و پیچیده‌ای نیاز دارد. به دلیل مقدار محدود نفوذ که در طی فرایندهای نشست از بخار صورت می‌گیرد، چسبندگی پوشش ضعیف‌تر از عملیات نفوذی است.

روش دیگر پوشش‌های سخت، نشست و نفوذ فعال حرارتی (TRD) است، به‌طور معمول، این فرآیند یک فرآیند دمای بالاست،  $800-1200^{\circ}\text{C}$  صورت می‌گیرد. در TRD، یک کاربیدزا نظیر  $Cr$ ،  $Ti$  و  $V$  با یک فرآیند ترموشیمیایی روی سطح نشانده می‌شود و با کربن که از زیر لایه به سطح نفوذ کرده است، واکنش می‌دهد.

نیروی محرکه نفوذ کربن، پایداری ترمودینامیکی ترکیبات سطحی ایجاد شده است. TRD می‌تواند در یک حمام نمک یا بستر سیال انجام شود [1].

اثر دما و زمان بر ضخامت پوشش (d) با دو معادله زیر بیان می‌شود:

$$d^2 = k \cdot t \quad (1)$$

$$k = k_0 \cdot \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

که در این روابط: d ضخامت پوشش (cm)، t زمان (sec)، k ثابت سرعت رشد ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )،  $k_0$  قسمت ثابت k، Q انرژی فعال‌سازی ( $\text{kJ/mol}$ )، T دمای مطلق ( $^{\circ}\text{K}$ ) و R ثابت گازها می‌باشد. محدودیت اصلی فرآیند TRD این است که زیرلایه فولادی باید شامل حداقل ۳٪ وزنی کربن باشد و گرنه ضخامت پوشش به‌شدت محدود می‌شود. با این حال، نشان داده شده است که پوشش‌های کاربرد، نیتريد و کربونیتريد وانادیوم، با پیش‌عملیاتی که سطح را از بین‌نشین‌ها (کربن، نیتروژن) غنی می‌کند (کربن‌دهی، نیتروژن‌دهی، نیتروکربن‌دهی)، می‌توانند با نرخ سریع‌تری رشد کنند [2].

نیتروژن‌دهی یا نیتروکربن‌دهی فولادها معمولاً یک لایه خارجی کاملاً تغییر یافته (لایه ترکیبی)، شامل کربونیتريد آهن  $Fe_2(N, C)$ ،  $\epsilon$ -، نیتريد‌های آلیاژی، و یک منطقه قسمتی تغییر یافته (ناحیه نفوذی)، شامل نیتروژن در محلول جامد و توزیع گسترده‌ای از نیتريد‌ها و کاربیدهاست.

در طی پوشش‌دهی TRD، اتم‌های بین‌نشین به سطح مهاجرت می‌کنند و موجب تغییراتی در ریزساختار نزدیک سطح می‌گردند. این اثر به‌طور خلاصه توسط Chicco و همکارانش بررسی شده

مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۴/۴ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۸/۱۸ به تصویب نهایی رسیده است.

غلامرضا خلیج، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، باشگاه پژوهشگران جوان، gh\_khalaj@yahoo.com  
دکترسید محمد موسوی خوبی، استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

باقیمانده Fe؛ درصد وزنی) می‌باشد. کلیه نمونه‌ها با استفاده از سمباده کاربیدسیلیسیم تا مش ۸۰۰ سمباده زده شده و در پایان به منظور چربی‌زدایی، در استن شستشو داده شدند. فرایند پوشش کربونیتريد کروم، شامل دو مرحله نیتروژن‌دهی و پوشش‌دهی می‌باشد. مواد مورد استفاده در نیتروژن‌دهی شامل سیانید سدیم (NaCN)، کربنات سدیم (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) و کلرید پتاسیم (KCl) و در حمام پوشش‌دهی شامل پودر فرو کروم (Fe-Cr)، کلرید سدیم (NaCl) و کلرید کلسیم (CaCl<sub>2</sub>) می‌باشد.

## ۲-۲. روش انجام فرایند

حمام نیتروژن دهی با ترکیب ۳۰٪ وزنی NaCN، ۲۵٪ Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> و ۴۵٪ KCl در دمای ۵۷۰°C به مدت ۱۲ ساعت پیرسازی (هوادهی) شد و سپس نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت درون حمام غوطه‌ور شدند [10]. پس از عملیات نیتروژن‌دهی، نمونه‌ها در آب گرم کونچ شدند. در این پژوهش از پودر فرو کروم حاوی ۸۰٪ کروم استفاده شد و با توجه به نمودار تعادل فازي NaCl-CaCl<sub>2</sub>، ترکیب یوتکتیک این دو نمک، به عنوان ترکیب حمام انتخاب شد [11].

به منظور بررسی اثر دمای فرایند، درصد وزنی و اندازه دانه پودر فرو کروم، حمام پوشش‌دهی با ترکیب ۲۳٪ وزنی NaCl و ۶۷٪ وزنی CaCl<sub>2</sub> ذوب و در دماهای ۵۵۰، ۶۲۵ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و سپس پودر فرو کروم با درصدهای وزنی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ و اندازه دانه‌های ۲۳۰ و ۵۰۰ مش به آرامی به آن اضافه شد. در آخر نمونه‌ها، بدون پیرسازی حمام، داخل نمک مذاب قرار گرفتند. به منظور یکنواخت‌سازی حمام مذاب، هر نیم ساعت یک بار، محلول توسط یک میله فولادی هم‌زده می‌شد. پس از گذشت زمان‌های ۲، ۶، ۱۰ و ۱۴ ساعت نمونه‌ها به آرامی از حمام خارج شده و در هوا سرد شدند. برای حذف نمک‌های چسبیده به سطح، فقط شستشو در آب گرم کافی می‌باشد.

## ۲-۳. آزمایش‌های میکروسکوپی

سطح نمونه‌ها قبل از آزمایش میکروسکوپی تا حد ۰/۳ میکرون پولیش شد.

جهت تعیین ضخامت پوشش، بعد از اچ کردن نمونه‌ها، از یک میکروسکوپ نسوری OLYMPUS مدل PMG3 مجهز به میکرومتر دیجیتالی OLYMPUS-OSM-D4 با دقت ۰/۱ میکرون استفاده شد. آزمایش ریز سختی‌سنجی با دستگاه ریزسختی‌سنج SHIMADZU مدل M، تحت بار ۱۵ گرم و زمان بارگذاری ۱۵ ثانیه و به روش ویکرز انجام شد. برای بررسی ترکیبات ایجاد شده در سطح، از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) توسط دستگاه اشعه ایکس PHILIPS مدل PW1140/90 با لامپ آند مسی از نوع PW2253/20 تحت شرایط جریان ۳۰ mA و ولتاژ

است [3]. آنها متوجه کاهش کلی در عمق ناحیه نفوذی نیتروکربن‌دهی از ۱۶۰ میکرون به ۸۰ میکرون، تغییر شکل ظاهر کربونیتريد در ناحیه نفوذی و محو کامل لایه ترکیبی اولیه شدند. مدارکی وجود دارد که پوشش‌های سخت کربونیتريد کروم می‌توانند در دماهای پایین (زیر ۷۰۰°C)، با نیتروژن‌دهی یا نیتروکربن‌دهی پیش از عملیات TRD، صورت بگیرد. با غنی‌سازی سطح از اتم‌های بین‌نشین در طی نیتروژن‌دهی یا نیتروکربن‌دهی، نرخ‌های بالاتر تشکیل پوشش TRD در دماهای پایین انتظار می‌رود. مطالعه دقیق منابع دو نوع تحقیقات را نشان داد. اول مجموعه‌ای از ثبت اختراع توسط Arai و همکارانش در آزمایشگاه مرکز تحقیق و توسعه Toyota بود.

نویسندگان ادعا کردند که لایه‌های CrN با ضخامت ۸ میکرون روی زیرلایه‌های نیتروژن‌دهی شده، پس از ۵۰ ساعت در ۵۷۰°C در حمام بستر سیال شکل گرفته است [4-6].

تحقیق منتشر شده دیگر در منابع علمی توسط Ohta و همکارانش [7] بود، که پوشش کربونیتريد کروم با نیتروژن‌دهی، و به دنبال آن عملیات TRD در ۷۰۰-۵۳۰°C در حمام نمک ایجاد می‌شود. آنها یافتند که یک ناحیه سیاه در محدوده ۲-۴ میکرون درست زیر لایه پوشش قرار گرفته‌است، که در آن آهن به عنوان عنصر اصلی مشاهده می‌شود. نفوذ نیتروژن از این منطقه به سطح دلیل ایجاد ناحیه سیاه فرض می‌شود. فرایند TRD در این موارد می‌تواند با معادله زیر بیان شود:



که [N, C] نشان‌دهنده نیتروژن و کربن در محلول جامد هستند. عملیات بالا تمامی نیتروژن که در طی نیتروژن‌دهی اولیه به درون ماده نفوذ کرده است را تخلیه می‌کند. در پایان یک عملیات TRD طولانی، زیرلایه به چیزی شبیه ریزساختار اصلی اش برمی‌گردد و یک لایه سخت و نازک نیتريد (یا کربونیتريد) کروم روی سطح را می‌پوشاند. استفاده از حمام‌های نمک باعث کاهش خطر اعوجاج، توزیع یکنواخت محیط مذاب و در نتیجه ایجاد پوشش یکنواخت در تمام نقاط قطعه می‌شود. از مزایای این حمام‌ها، پایداری حرارتی خوب، سادگی و ارزان قیمت بودن تجهیزات و مواد اولیه می‌باشد [2].

در این تحقیق سعی شده است اثر درصد وزنی و اندازه دانه پودر فرو کروم و همچنین دما و زمان غوطه‌وری بر ضخامت و سختی پوشش کربونیتريد کروم مورد بررسی قرار بگیرد.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. مواد اولیه

نمونه‌های اصلی مورد استفاده در انجام این پژوهش، از جنس فولاد ۱.۲۲۱۰ (۱/۱۶) C، ۰/۶ Cr، ۰/۲ Mn، ۰/۲۶ Si، ۰/۰۵۸ V و

جدول ۱. تغییرات ضخامت و سختی پوشش بر حسب دما، درصد وزنی و اندازه دانه پودر فروکروم.

(نیتروژن دهی اولیه ۳ ساعت در  $570^{\circ}\text{C}$ ، زمان و شش دهی ۱۰ ساعت)

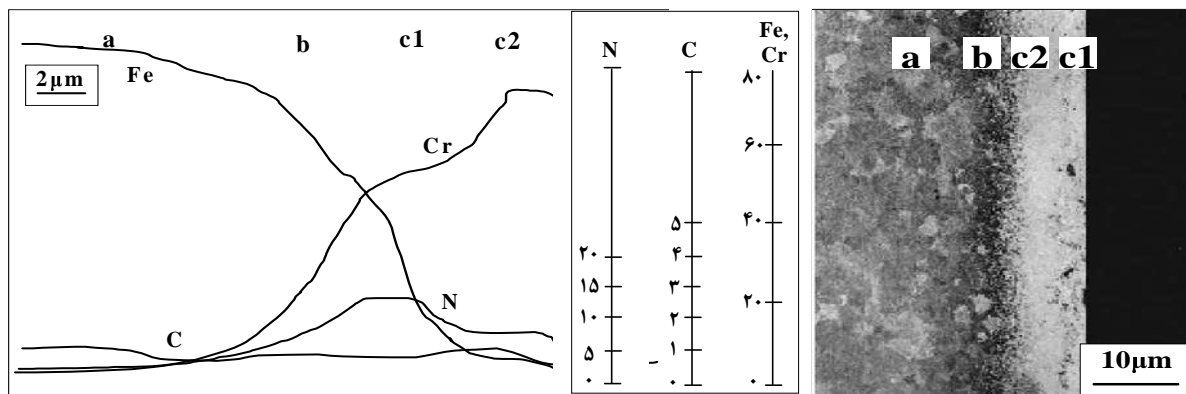
اندازه دانه (مش)	درصد وزنی	ضخامت ( $\mu\text{m}$ )			سختی (HV)
		$550^{\circ}\text{C}$	$625^{\circ}\text{C}$	$700^{\circ}\text{C}$	
۲۳۰	۱۰	۰/۹	۲/۰	۳/۷	(۱۳۶۰)
۲۳۰	۱۵	۱/۲۵	۲/۴	۴/۸	(۱۴۲۰)
۲۳۰	۲۰	۱/۵	۲/۸	۶/۰	(۱۵۰۰)
۵۰۰	۱۰	۱/۱	۲/۵	۵/۲	(۱۴۰۰)
۵۰۰	۱۵	۱/۳	۳/۰	۷/۳	(۱۴۸۰)
۵۰۰	۲۰	۱/۷	۳/۵	۷/۵	(۱۵۴۰)

جدول ۲. تغییرات ضخامت و سختی پوشش بر حسب زمان.

(نیتروژن دهی اولیه ۳ ساعت در  $570^{\circ}\text{C}$ ، دمای پوشش دهی  $700^{\circ}\text{C}$ )

اندازه پودر (مش)	درصد وزنی	زمان غوطه‌وری (h)	ضخامت ( $\mu\text{m}$ )	سختی (HV)
۵۰۰	۲۰	۲	۲	۱۳۳۰
۵۰۰	۲۰	۶	۴/۳	۱۴۶۰
۵۰۰	۲۰	۱۰	۷/۵	۱۵۴۰
۵۰۰	۲۰	۱۴	۸	۱۶۰۰

شکل ۲ نتیجه آنالیز WDS و نیم‌رخ نمونه را نشان می‌دهد. با دقت در تغییرات عناصر دیده می‌شود که در لایه سفید (ناحیه نفوذی، منطقه c1 و c2) غلظت نیتروژن و کروم زیاد و غلظت آهن کم است؛ اما در ناحیه خاکستری (لایه ترکیبی، منطقه b) غلظت نیتروژن و کروم کم و غلظت آهن زیاد است. کربن نیز در هر دو لایه نسبتاً غنی است.



شکل ۲. ریز ساختار و تغییر غلظت عناصر در پوشش کربونیتريدکروم

فولاد ۱.۲۲۱۰، فروکروم: ۲۰٪ و ۵۰۰٪؛  $700^{\circ}\text{C}$  و ۱۰ ساعت (نیتروژن دهی: ۳ ساعت و  $570^{\circ}\text{C}$ )

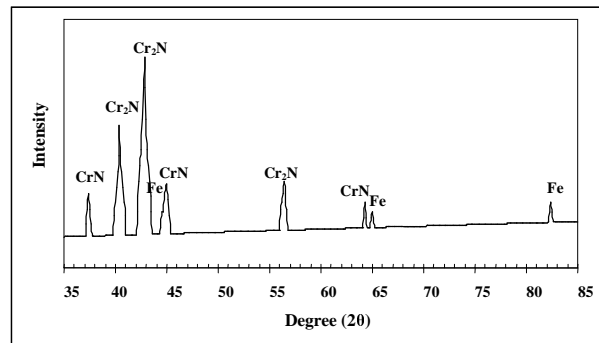
۴۰ kV استفاده شد. به منظور بررسی نحوه توزیع عناصر در سطح، از آنالیز WDS توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی جارویی (SEM)، Cambridge مدل Stereo Scan 360 با آنالیزور WDS، ساخت شرکت Microspec و آشکارساز، شمارنده گاز تناسبی (Gas Proportional Counter) استفاده شد. برای شناسایی عناصر سنگین (*Cr* و *Fe*) از ولتاژ  $20\text{ kV}$  و کریستال *LiF* و برای عناصر سبک (*N* و *C*) از ولتاژ  $10\text{ kV}$  و کریستال LOD استفاده شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. ساختار پوشش

نتایج آزمایش‌ها ضخامت‌سنجی و ریز سختی‌سنجی در جدول ۱ و ۲ آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود؛ تغییرات درصد و اندازه دانه پودر و دما و زمان فرایند تأثیر بسزایی روی ضخامت و سختی لایه ایجاد شده دارد.

شکل ۱ نتیجه حاصل از آنالیز اشعه ایکس را برای نمونه پوشش داده شده، نشان می‌دهد. بررسی طیف‌های فوق نشان‌دهنده حضور ترکیبات *CrN*، *Cr<sub>2</sub>N*، *CrN* و *Fe* در سطح می‌باشد.

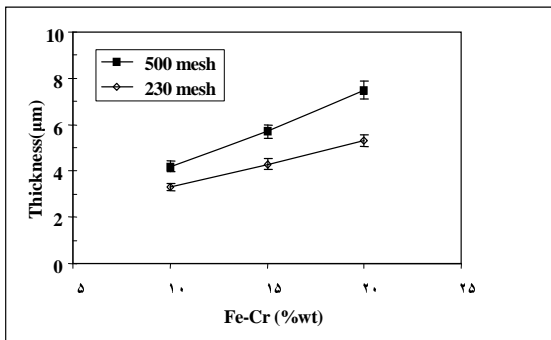


شکل ۱. آنالیز XRD پوشش کربونیتريدکروم.

(فروکروم: ۲۰٪ و ۵۰۰٪؛  $700^{\circ}\text{C}$  و ۱۰ ساعت)

دمایی  $500-700^{\circ}\text{C}$ ، انرژی آزاد تشکیل  $Cr_2(N,C)$ ، منفی تر از انرژی آزاد تشکیل  $Cr(N,C)$  می باشد [13] (جدول ۳) و در دمای مربوطه هر عاملی که منجر به افزایش میزان کروم اتمی در محیط گردد باعث افزایش تشکیل  $Cr_2(N,C)$  و کاهش میزان  $Cr(N,C)$  می گردد.

به عبارت دیگر، افزایش درصد وزنی فروکروم، منجر به افزایش  $Cr_2(N,C)$  و کاهش  $Cr(N,C)$  می شود.



شکل ۴. تغییرات ضخامت پوشش بر حسب مقدار فروکروم. (فولاد ۱۰، ۲۲۱۰، ۱۰ ساعت،  $700^{\circ}\text{C}$ )

جدول ۳. انرژی آزاد تشکیل  $Cr_2N$  و  $CrN$  در گستره دمایی  $500-700^{\circ}\text{C}$  [۱۳]

ترکیب	انرژی آزاد (kJ/mol)		
	$700^{\circ}\text{C}$	$600^{\circ}\text{C}$	$500^{\circ}\text{C}$
$Cr_2N$	-۲۲۸/۶۵۵	-۲۱۳/۱۵۸	-۱۹۸/۶۳۶
$CrN$	-۱۷۹/۸۴۱	-۱۷۰/۲۸۵	-۱۶۱/۳۱۱

### ۳-۳. تاثیر اندازه دانه فروکروم

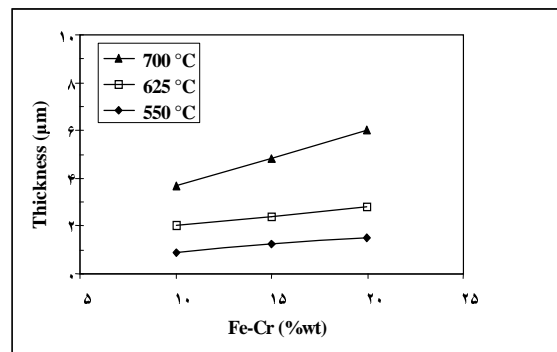
همان گونه که از شکل های ۳ و ۴ پیداست، با ریزدانه شدن پودر فروکروم، ضخامت پوشش افزایش می یابد.

به علت جرم حجمی بیشتر فروکروم نسبت به نمک مذاب، امکان ته نشین شدن پودرها و عدم توزیع یکنواخت و تامین نشدن کروم کافی برای تشکیل پوشش وجود دارد.

با کاهش اندازه دانه پودر، شدت جدایش و نشست کاهش می یابد و از آنجا که حل شدن کروم در محیط از طریق سطح دانه های فروکروم صورت می گیرد، با ریزدانه شدن فروکروم، در واحد حجم، سطوح بیشتری برای حل شدن کروم فراهم می شود و از این جهت است که میزان کروم اتمی در محیط زیاد می شود.

با توجه به نتایج حاصل از XRD، با استدلالی مشابه افزایش درصد وزنی فروکروم بر فازهای تشکیل شده، در اینجا نیز می توان گفت که با ریزدانه شدن پودر فروکروم مورد استفاده، مقدار  $Cr_2(N,C)$  افزایش و مقدار  $Cr(N,C)$  و  $(Fe-Cr)(N,C)$  کاهش می یابد.

مشاهده تصاویر متالوگرافی نشان می دهد که سطح پوشش داده شده با کربونیتريد کروم، شامل یک لایه سفید و یک لایه خاکستری درست در زیر لایه سفید می باشد.



شکل ۳. تغییرات ضخامت پوشش بر حسب مقدار فروکروم. (فولاد ۱۰، ۲۲۱۰، ۱۰ ساعت، فروکروم ۲۳۰ مش)

نتایج آنالیزهای XRD، نشان دهنده حضور فازهای نیتريد کروم ( $CrN$ )، نیتريد دی کروم ( $Cr_2N$ ) و آهن در سطح می باشد. از سوی دیگر، نتایج حاصل از انجام آنالیز WDS در این تحقیق و کارهای سایر محققین [7,12] نشان می دهد که در لایه سفید (ناحیه نفوذی) غلظت نیتروژن و کروم زیاد و غلظت آهن کم است؛ اما در ناحیه خاکستری (لایه ترکیبی) غلظت نیتروژن و کروم کم و غلظت آهن زیاد است.

کربن نیز در هر دو لایه نسبتاً غنی است. لایه های غنی از کروم و نیتروژن شامل کربن هستند و بنابراین لایه ها باید  $Cr_2(N,C)$  و  $Cr(N,C)$  بیان شود؛ به همین ترتیب لایه خاکستری رنگ نیتريد آهن- کروم نیز دارای کربن می باشد و به صورت کربونیتريد آهن- کروم  $(Fe-Cr)(N,C)$  نشان داده می شود.

در نتیجه پوشش کربونیتريد کروم شامل سه لایه است: (۱)  $Cr_2(N,C)$  در سطح (منطقه c1)، (۲)  $Cr(N,C)$  در داخل لایه نفوذی (منطقه c2) و (۳) ترکیب کربونیتريد آهن- کروم در لایه ترکیبی (منطقه b).

### ۳-۲. تاثیر درصد وزنی

نتایج به دست آمده در شکل های ۳ و ۴ حاکی از این مطلب است که افزایش درصد وزنی فروکروم، منجر به افزایش ضخامت لایه می شود. علت این مسئله این است که با افزایش درصد وزنی فروکروم، مقدار کروم اتمی بیشتری در محیط ایجاد می شود و لذا در سطح قطعه مقدار بیشتری کروم می تواند با اتم های کربن و نیتروژن موجود در زیرلایه واکنش داده و باعث رشد بیشتر لایه سفید شود.

آنالیز XRD نشان می دهد که با افزایش درصد وزنی فروکروم، مقدار  $Cr_2(N,C)$  افزایش و مقدار  $(Fe-Cr)(N,C)$  و  $Cr(N,C)$  کاهش می یابد. محاسبات انجام شده نشان می دهد که در گستره

به همین دلیل است که ضخامت نهایی پوشش، تقریباً با ضخامت لایه نیتريدی اولیه برابر می‌باشد.

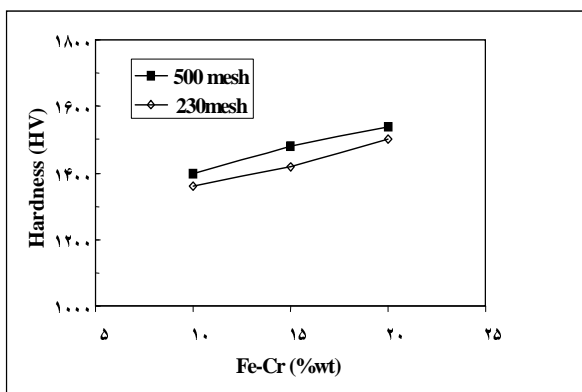
بنابراین تاثیر افزایش زمان غوطه‌وری نیز مانند افزایش سایر پارامترها می‌باشد؛ یعنی در هر زمانی، ضخامت کلی پوشش ثابت است.

با این توضیح که افزایش زمان، موجب افزایش ضخامت لایه کربونیتريدکروم و کاهش ضخامت لایه کربونیتريد آهن-کروم می‌شود.

### ۳-۶. سختی لایه

سختی پوشش کربونیتريدکروم بسته به شرایط پوشش‌دهی، بین ۱۶۰۰-۱۲۰۰ ویکرز تغییر می‌نماید.

با توجه به این که سختی فاز  $Cr(N,C)$ ، در حدود ۱۱۰۰ ویکرز و سختی فاز  $Cr_2(N,C)$  در حدود ۱۶۰۰ ویکرز می‌باشد [14] می‌توان نتیجه گرفت که هر عاملی که منجر به افزایش  $Cr(N,C)$  در لایه شود، منجر به کاهش سختی و هر عاملی که منجر به افزایش  $Cr_2(N,C)$  شود، منجر به افزایش سختی لایه می‌گردد. بررسی جدول ۱ و ۲ و شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش پارامترهایی نظیر زمان فرآیند، درصد وزنی و ریزدانه شدن فروکروم، سختی لایه افزایش می‌یابد.



شکل ۶. تغییرات سختی پوشش بر حسب مقدار فروکروم. (فولاد ۱.۲۲۱۰، ۱۰ ساعت، ۷۰۰°C)

نتایج حاصل از آنالیز XRD نیز نشان می‌دهد که با افزایش زمان فرآیند، درصد وزنی و ریزدانه شدن فروکروم، مقدار  $Cr_2(N,C)$  موجود در لایه افزایش یافته و مقدار  $Cr(N,C)$  کاهش می‌یابد. لذا سختی لایه بالاتر می‌آید. از سوی دیگر نشان داده شد که با افزایش دما، علاوه بر  $Cr(N,C)$ ، مقدار  $Cr_2(N,C)$  نیز افزایش می‌یابد.

بنابراین می‌توان گفت که بالا رفتن سختی در اثر افزایش دما، بخاطر بیشتر شدن مقدار  $Cr_2(N,C)$  می‌باشد.

### ۳-۴. تاثیر دمای فرآیند

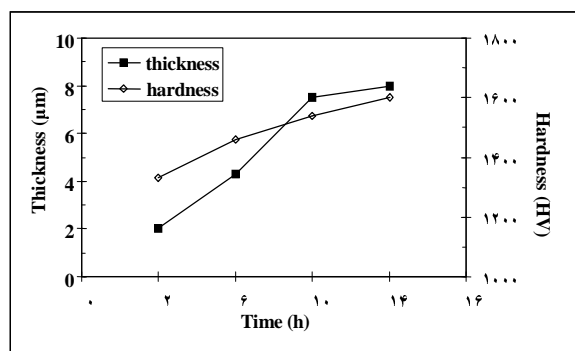
شکل ۳ نشان می‌دهد که افزایش دمای فرآیند به میزان قابل توجهی منجر به افزایش ضخامت لایه سفید می‌شود.

دلیل این امر، افزایش

حل شدن کروم اتمی در محیط از یک طرف و همچنین افزایش نفوذ کروم به درون زیرلایه، از طرف دیگر می‌باشد.

همانگونه که مشاهده می‌شود، این افزایش ضخامت، در دماهای بالاتر مشهودتر می‌باشد.

از نظر فازهای تشکیل شده نیز می‌توان گفت که با افزایش دما مقادیر  $Cr(N,C)$  و  $Cr_2(N,C)$  افزایش می‌یابد؛ چرا که با افزایش دما انرژی لازم برای تشکیل  $Cr(N,C)$  و  $Cr_2(N,C)$  منفی‌تر می‌شود.



شکل ۵. تغییرات ضخامت و سختی پوشش بر حسب زمان غوطه‌وری. (فولاد ۱.۲۲۱۰، فروکروم ۲۰٪ و ۵۰۰ mesh، ۷۰۰°C)

### ۳-۵. تاثیر زمان پوشش‌دهی

بمانند بسیاری از پوشش‌های نفوذی، ضخامت پوشش کربونیتريدکروم با افزایش زمان غوطه‌وری افزایش می‌یابد، اما این افزایش ضخامت محدودیت دارد و از این نظر، مکانیزم رشد پوشش با سایر پوشش‌های نفوذی متفاوت است.

بررسی شکل ۵ نشان می‌دهد که افزایش ضخامت لایه سفید تا هنگامی ادامه می‌یابد که ضخامت لایه سفید تشکیل شده در سطح تقریباً به ضخامت لایه نیتريدی اولیه برسد (۸ میکرون) و پس از آن، رشد متوقف می‌شود و با افزایش زمان پوشش‌دهی، افزایشی در ضخامت لایه مشاهده نمی‌شود.

عامل اصلی در ایجاد پوشش کربونیتريدکروم، عملیات نیتروژن‌دهی اولیه می‌باشد.

لذا رشد تا زمانی ادامه می‌یابد که نیتروژن به اندازه کافی در زیرلایه موجود باشد و هنگامی که غلظت نیتروژن در زیرلایه به صفر می‌رسد، عملاً رشد لایه متوقف می‌شود.

[5] Arai T., Nakanishi K., Takeda H., Tachikawa H., European Patent 471 276, 1991.

[6] Arai T., Fujita H., Sugimoto Y., Ohta H., Moriyama S., Sato A., "Method for the surface treatment of an iron or iron alloy article", U. S. Patent 4,818,351, 1989.

[7] Ohta Y., Sugimoto Y., Arai T., "Low temperature salt bath coating of chromium carbonitride", Heat & Surface Conference, Kyoto, Japan, Jap. Teach. Inf. Ser., 1992, p. 503.

[8] Arai T., Harper S., "Thermoreactive Deposition & Diffusion process", ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, ASM International, USA, 1991, p. 448.

[9] Arai T., "Development of carbide and nitride coatings by thermo-reactive deposition and diffusoin", 3rd International Conference on Surface Modification Technologies, Neucatel, Switzerland, TMS Soc., 1990, p. 587.

[10] Godding A.D., ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, ASM International, USA, 1991, P. 329.

[11] Levin E.M., Robbins C.R., Murdie H.F., "Phase diagram for ceramists", The American Ceramic Society, Vol.1, 1985, P. 384.

[12] King P.C., Reynoldson R.W., Brownrigg A., Long J.M., Surf. Coat. Technol., Vol. 179, 2004, pp. 18-26.

[13] Brain I., "Thermochemical data of pure substances" VCH, 3rd Edition, 1995, p. 567.

[14] Hawley G. G., "The condensed chemical dictionary", Van Nostrand Reinhold Company, 10th Edition, 1981.

#### ۴. نتیجه گیری

- ۱- با استفاده از حمام‌های نمک کلریدی مذاب، می‌توان پوشش سخت و مقاوم به سایش کربونیتريد کروم را در دماهای پایین‌تر از  $700^{\circ}\text{C}$  بر روی فولادهایی که قبلاً عملیات نیتروژن‌دهی بر روی آنها صورت گرفته است، ایجاد نمود.
- ۲- ساختار پوشش تشکیل شده به ترتیب از سطح به طرف داخل شامل کربونیتريد کروم ( $\text{Cr}(\text{N},\text{C})$ ) و ( $\text{Cr}_2(\text{N},\text{C})$ ) و کربونیتريد آهن- کروم ( $(\text{Fe}-\text{Cr})(\text{N},\text{C})$ ) می‌باشد.
- ۳- بسته به شرایط مختلف پوشش‌دهی، سختی بین  $1600\text{HV}$ - $1200\text{HV}$  تغییر می‌کند، بدین صورت که افزایش دما و زمان فرآیند، درصد وزنی و ریزدانه شدن فروکروم منجر به افزایش سختی لایه می‌شود. چرا که با افزایش این پارامترها، میزان  $\text{Cr}_2(\text{N},\text{C})$  موجود در لایه افزایش می‌یابد.
- ۴- ضخامت نهایی پوشش با ضخامت لایه نیتريدی اولیه برابر می‌باشد و تغییر شرایط پوشش‌دهی، فقط نسبت کربونیتريد کروم به کربونیتريد آهن- کروم را تغییر می‌دهد.

#### مراجع

- [1] Nakanishi K., Takeda H., Tachikawa H., Arai T., The 8th International Congress on Heat Treatment of Materials, Heat and Surface 92, Kyoto Nagoya, Japan, 1992.
- [2] Arai T., Fujita H., Sugimoto Y., Ohta Y., "Vanadium carbonitride coating by immersing into low temperature salt bath", Proceedings of the 6th International Conference on Heat Treatment of Metals, ASM International, Chicago, USA, 1988.
- [3] Chicco B., Borbidge W.E., Summerville E., Mater. Sci. Eng., Vol. A, No. 266, 1999, pp. 62-72.
- [4] Arai T., Fujita H., Endo J., Sugimoto Y., Ohta Y., "Method of treating the surface of iron alloy materials", U. S. Patent 4,765,847, 1989.