

بررسی خواص مکانیکی و سایشی پوشش‌های نانوکامپوزیت

نیکل - اکسید سریم

حسین حسن نژاد

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

فاطمه خادمه مولوی

پژوهشکده فرآیند، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

(دریافت مقاله: ۹۲/۰۹/۰۶ - پذیرش مقاله: ۹۳/۱۲/۱۸)

چکیده

امروزه استفاده از پوشش‌های نانوکامپوزیت نیکل - اکسید سریم به جهت کاربردهای متفاوتی همچون مقاومت به خوردگی، مقاومت به اکسیداسیون، خواص کاتالیزوری و خواص مغناطیسی، بسیار گسترش یافته است. از آنجا که در بسیاری از این کاربردها مقاومت در برابر خراش بالا لازم است، در این پژوهش خواص سایشی پوشش‌های نانوکامپوزیت نیکل - اکسید سریم با استفاده از آزمون‌های نانودندانه گذار و نانوخرایش بررسی شد. با توجه به نتایج مشاهده گردید که نسبت مولی Ce/Ni در محلول پوشش‌دهی نقش بسیار حایز اهمیتی بر روی خواص تریبولوژی پوشش‌های نیکل - اکسید سریم دارد. با افزایش نسبت مولی Ce/Ni از ۰ به ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱ به سبب حضور و افزایش درصد اکسید سریم در پوشش‌های حاصله، سختی، مدول الاستیسیته و مقاومت به خراش پوشش افزایش و ضریب اصطکاک کاهش پیدا کرد. همچنین نتایج نشان دادند که با افزایش بیشتر این نسبت از ۰/۰۱ به ۰/۱ و ۰/۲، ضریب اصطکاک و مقاومت به خراش پوشش به سبب تشکیل حفرات و ترکها در سطح پوشش به ترتیب افزایش و کاهش پیدا می‌کند. بر طبق نتایج حاصله، پوشش بهینه از لحاظ مقاومت به سایشی، پوشش‌هایی هستند که از محلول آبکاری با نسبت مولی Ce/Ni=۰/۰۱ بدست می‌آیند. واژه‌های کلیدی: پوشش نانوکامپوزیت، نیکل - اکسید سریم، نانودندانه گذار، نانوخرایش، سایش.

Investigation of mechanical and wear properties of Ni-Cerium oxide nanocomposite coatings

H. Hassannejad

Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering,
Arak University

F. K. Molavi

Department of Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute

(Received 26 November 2013, accepted 9 March 2015)

Abstract

Recently, Ni-Cerium oxide nanocomposite coatings are of great interest and have been successfully used in many applications such as: high oxidation and corrosion resistance films, catalytic and magnetic. Many of these applications require high wear resistance. In this research, the nano-indentation and nano-scratch techniques were used to evaluate the wear properties of Ni-CeO₂ nanocomposite coatings. It can be seen from the results that the molar ratio of Ce/Ni in the deposition bath has an important role on the tribological properties of the coatings. It was observed that, by increasing the molar ratio of Ce/Ni from 0 to 0.001 and 0.01, the percent of cerium oxide in the coating increase. The increase in ceria percent in the coating makes an increase in elastic modulus and hardness of the coating and causes decrease in friction coefficient of the coating. Also, by increasing the molar ratio of Ce/Ni from 0.01 to 0.1 and 0.2, the friction coefficient and scratch resistance of the coating, owing to formation of cracks in the coatings, increase and decrease, respectively. So, high scratch and wear resistance coating was formed when the amount of molar ratio of Ce/Ni was 0.01.

Key words: Nanocomposite Coating, Ni-Cerium Oxide, Nano-indentation, Nano-scratch, Wear.

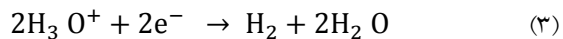
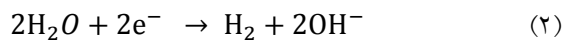
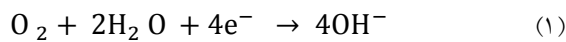
E-mail of corresponding author: H-Hasannejad@araku.ac.ir.

مقدمه

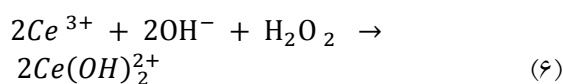
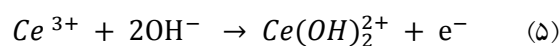
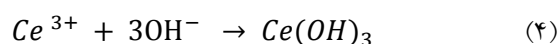
در سالهای اخیر، نیکل و آلیاژ نیکل حاوی نانوذرات اکسید سریم به سبب در برداشتن خواص عالی مکانیکی، مغناطیسی مقاومت به سایش، مقاومت به خوردگی و مقاومت به اکسیداسیون بسیار مورد توجه محققین مهندسی سطح قرار گرفته است [۱-۳]. همچنین کامپوزیت‌های پایه نیکل حاوی ذرات اکسید سریم در بسیاری از مقالات و تحقیقات به‌عنوان کاتالیزور مورد توجه محققین قرار گرفته شده است که برای مثال می‌توان به کاربردهایی نظیر تجزیه متانول، اکسیداسیون جزئی و احیای هیدروژن اشاره کرد [۴-۷]. از میان روش‌های مختلفی که برای تشکیل پوشش کامپوزیت نیکل-اکسید سریم وجود دارد، آبکاری کامپوزیتی یکی از روش‌های آسان و ارزان قیمت است. با توجه به امکان رسوب الکتروشیمیایی کاتدی و آندی اکسید سریم [۸-۱۴] از محلول حاوی یون سریم به تازگی روش جدیدی برای رسوب همزمان نیکل و اکسید سریم از محلول حاوی نمک‌های نیکل و سریم برای تشکیل پوشش نانوکامپوزیت نیکل-اکسید سریم پیشنهاد شده است [۱۵-۱۸]. شماتیک این فرآیند برای رسوب کامپوزیت نیکل-اکسید سریم در شکل ۱ نشان داده شده است. در این روش، در حین رسوب نیکل، به سبب قلیایی شدن موضعی کاتد و افزایش pH، هیدروکسید/اکسید سریم با انجام واکنش‌های زیر تشکیل می‌شود [۱۹-۲۰].

واکنش‌هایی که منجر به سبب افزایش pH بصورت

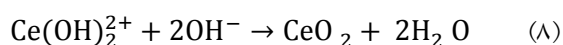
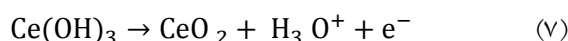
موضعی می‌گردند [۱۹-۲۰]:



تشکیل رسوب $\text{Ce}(\text{OH})_3$ و یا کمپلکس $\text{Ce}(\text{OH})_2^{2+}$ توسط واکنش‌های زیر:

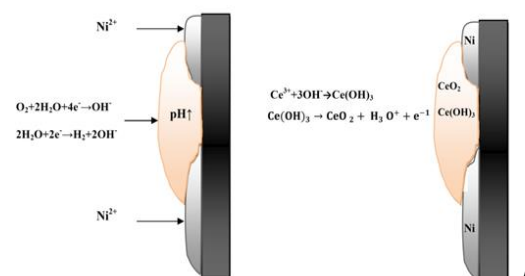


تشکیل اکسید سریم توسط واکنش‌های زیر:



در تحقیقات قبلی صورت گرفته [۱۵-۱۸]، مکانیزم تشکیل پوشش نانوکامپوزیت نیکل-اکسید سریم به روش جدید با استفاده از روش‌های پیشرفته الکتروشیمیایی مانند الیپسومتری درجا، امپدانس درجا و غیره بررسی شده و در ادامه خواص کاتالیزوری و خواص خوردگی این پوشش‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. اما تاکنون تحقیقی بر روی خواص مکانیکی و سایشی پوشش تهیه شده به این روش انجام نشده است. با توجه به کاربرد فراوان این پوشش به‌عنوان پوشش‌های مقاوم به سایش، در این تحقیق به بررسی خواص مکانیکی و سایشی پوشش‌های نانوکامپوزیت نیکل-اکسید سریم تهیه شده به روش جدید پرداخته می‌شود.

به تازگی ابزار نانو پیشرفت یافته مانند نانودانده گذار^۱ و نانوخراس^۱ میکروسکوپ نیروی اتمی در بررسی‌های



شکل ۱. شماتیک فرآیند رسوب پوشش نانوکامپوزیت نیکل-اکسید سریم به روش الکتروشیمیایی از محلول حاوی یون‌های نیکل و سریم [۱۷].

^۱ Nano indenter

خواص تریبولوژی و مکانیکی پوشش‌های نانوکامپوزیتی بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌است [۲۱-۲۴]. در تحقیق حاضر، پوشش نانوکامپوزیت نیکل-اکسید سریم به روش الکتروشیمیایی از محلول حاوی یون‌های نیکل و سریم تشکیل شد و در ادامه اندازه‌گیری‌های نانو فرورونده و نانوخراش بر روی پوشش تشکیل شده انجام شد و در انتها خواص سایشی آن مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تهیه پوشش‌های نیکل-اکسید سریم با استفاده از

یونهای نیکل و سریم

محلول پایه مورد استفاده برای تشکیل پوشش نیکل-اکسید سریم از انحلال ۰/۵ مول اسید بوریک^۱، ۰/۵ مول کلرید نیکل^۲ در محلول آب دیونیزه شده بدست آمد. در ادامه غلظت‌های مختلف نمک کلرید سریم^۳ به محلول پایه افزوده شد. برای تعدیل pH محلول، از اسید کلریدریک^۴ و محلول آمونیاک^۵ استفاده گردید. دمای محلول نیز در حدود ۲۵°C تنظیم شد (تمامی نمک‌ها از شرکت مرک^۶ تهیه شدند). در این تحقیق ورقه مسی پلی کریستالی خالص (۹۹/۹۹٪) بعنوان الکتروود کار استفاده گردید.

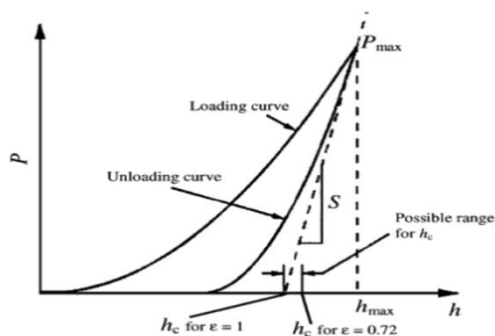
روش‌های مشخصه یابی

برای بررسی میکروساختار و مورفولوژی پوشش‌های نانوکامپوزیت نیکل-اکسید سریم از میکروسکوپ الکترونی (SEM (XL-30 Philips) مجهز به سیستم آنالیز عنصری و AFM (DS45-40) استفاده گردید. برای بررسی زبری سطح پوششها، زبری سنج Surtronic 25

انجام آزمون‌های نانودندانه گذار و نانوخراش

آزمون نانودندانه گذار

تست‌های نانودندانه گذار و نانوخراش با استفاده از دستگاه AFM (DS45-40) با استفاده از فرورونده الماس Berkovich انجام شد. اندازه‌گیری‌ها در سه مکان مختلف و به تعداد سه بار انجام شد. در شکل ۲ شماتیک نیرو بر عمق نشان داده شده‌است. از روی نتایج نانودندانه گذاری، عمق تماس، h_c از روی نیروی اعمال شده دندانه گذار P ، عمق کل نفوذ کننده، h_{max} و سفتی تماس $S(dP/dh)$ در ابتدای مرحله باربرداری از روی معادله ۱ محاسبه می‌گردد [۲۵ و ۲۶].



شکل ۲. شماتیک منحنی نیرو بر عمق بدست آمده از آزمون نانودندانه گذار توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) [۲۵].

$$h_c = h_{max} - \varepsilon P_{max}/S \quad (1)$$

در جایی که ε ثابت (۰/۷۵~ ε) بوده و سفتی تماس S ، از روی معادله رگراسیون و معادلسازی قسمت باربرداری منحنی نیرو بر حسب جابه‌جایی بدست می‌آید. مساحت

¹ Nano scratcher

² H₃BO₃

³ NiCl₂·6H₂O

⁴ CeCl₃·7H₂O

⁵ HCl

⁶ NH₄OH

⁷ Merck

نتایج و بحث

بررسی ساختار پوشش‌های نانوکامپوزیت نیکل-

اکسید سریم

تصاویر SEM مربوط به پوشش‌های نانوکامپوزیت نیکل-اکسید سریم بدست آمده از محلول آبکاری حاوی نسبت‌های مختلف یونی Ce/Ni در شکل ۳-الف نشان داده شده‌است. مشاهده می‌گردد که با افزایش نسبت Ce/Ni از ۰ به ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱، پوشش‌های بدست آمده دارای ساختاری همگن‌تری هستند. بر طبق نتایج حاصل از زبری سنجی سطح مشاهده گردید که با افزایش نسبت مولی Ce/Ni از ۰ به ۰/۰۱ مقدار زبری میانگین سطح (R_a) از ۲.۶ به ۰.۶ کاهش پیدا می‌کند. بر طبق تحقیقات پژوهشگران، یون‌های سریم به‌صورت همزمان منجر به افزایش تعداد جوانه‌های نیکل و جلوگیری از رشد جوانه‌های نیکل می‌شود که در ادامه سبب تشکیل پوشش‌هایی با دانه‌بندی ریزتر و مورفولوژی و سطح یکنواخت‌تر نسبت به پوشش نیکل خالص می‌شود [۲۷ و ۲۸].

با افزایش نسبت Ce/Ni از ۰/۰۱ به ۰/۱ در حمام آبکاری، بر روی سطح پوشش حفره و ترک مشاهده می‌گردد. افزودن بیشتر یون‌های سریم به محلول آبکاری منجر به تشکیل ترک‌های عمیق‌تر و حفرات بیشتر می‌گردد. علت تشکیل ترک در پوشش را به احتمال زیاد می‌توان به حضور اکسید سریم در پوشش نسبت داد، که با افزایش درصد اکسید سریم، به علت وجود آمدن تنش در پوشش، ترک در آن ایجاد می‌گردد. دلیل تشکیل حفرات در پوشش را نیز می‌توان به انحلال جزئی هیدروکسید سریم تشکیل‌شده بر روی سطح قبل از تبدیل آن به اکسید سریم نسبت داد [۲۰].

در شکل ۴ نتایج آنالیزهای XRD و XPS پوشش‌های کامپوزیتی نیکل و نیکل-اکسید سریم بدست‌آمده از محلول آبکاری حاوی نسبت‌های مختلف Ce/Ni آورده شده است. هیچ پیکی از اکسید سریم در طیف XRD

تماس A از روی عمق تماس با استفاده از معادله ۲ بدست می‌آید [۲۶ و ۲۵].

$$A = 24.5h_c^2 \quad (2)$$

مدول الاستیسیته نمونه، E_r ، از روی سفتی تماس S و مساحت سطح تماس دندان گذار نمونه بدست می‌آید (معادله ۳ [۲۶ و ۲۵]):

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} S}{2\beta \sqrt{A}} \quad (3)$$

در جایی که β فاکتور تصحیح شکل هندسی دندان گذار بوده ($\beta = 1.07$).

به‌علاوه سختی دندان گذار (H) که به‌عنوان مقاومت ماده در برابر اعمال تغییر فرم پلاستیک است را می‌توان از تقسیم بیشینه نیروی اعمالی بر مساحت سطح تماس از روی معادله ۴ محاسبه کرد [۲۶ و ۲۵]:

$$H = \frac{P_{max}}{A} \quad (4)$$

آزمون نانوخراش

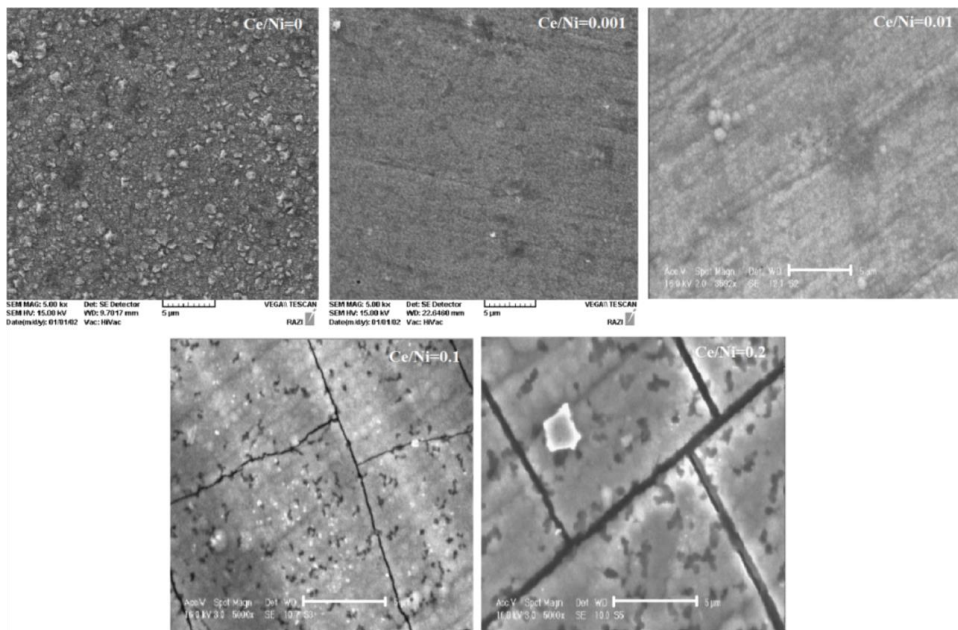
فرآیند آزمون خراش، ورود دندان گذار بر روی سطح نمونه و جابه‌جایی افقی آن است. آزمون خراش را می‌توان برای نمونه‌های توده و پوشش بکار برد. از روی نتایج خراش می‌توان عمق و پهناي خراش را که بیان‌کننده میزان مقاومت خراش و سایش نمونه است را محاسبه کرد. همچنین با استفاده از نتایج آزمون خراش می‌توان ضریب اصطکاک سطح نمونه را نیز بدست آورد. در تست خراش همزمان با کنترل نیروی نرمال واردشده از طریق فرورونده، نیروی عرضی مورد نیاز برای حرکت فرورونده بصورت عرضی بر روی سطح نمونه اندازه‌گیری می‌شود و ضریب اصطکاک f از طریق معادله ۵ بدست می‌آید [۲۶ و ۲۵].

$$f = \frac{P_L}{P} \quad (5)$$

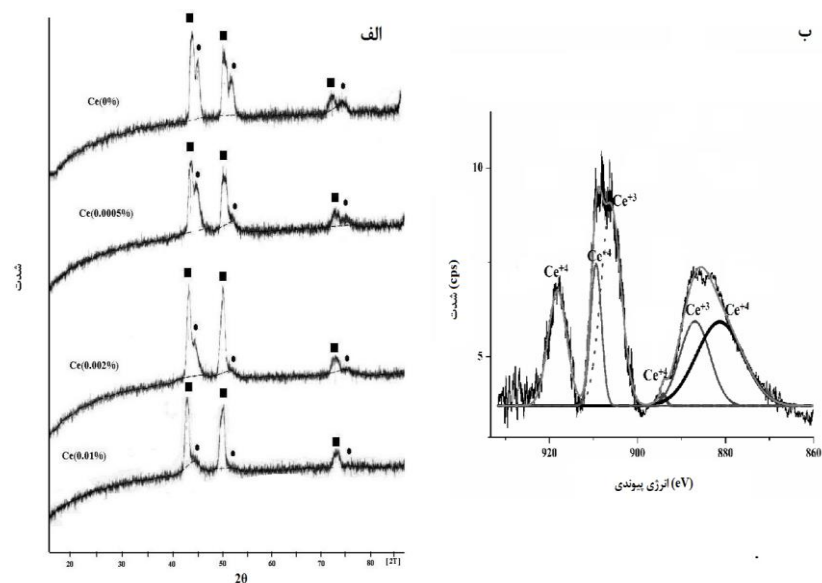
در جایی که P_L نشان‌دهنده نیروی عرضی و P نشان‌دهنده نیروی نرمال (عمودی) است.

استفاده گردید. اختلاف مابین Ce^{3+} و Ce^{4+} در طیف XPS برای Ce_{3d} قابل تشخیص است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب اکسید سریم بصورت استوکیومتری نبوده و نسبت $Ce(IV)$ به $Ce(III)$ برابر ۱/۱۷ است.

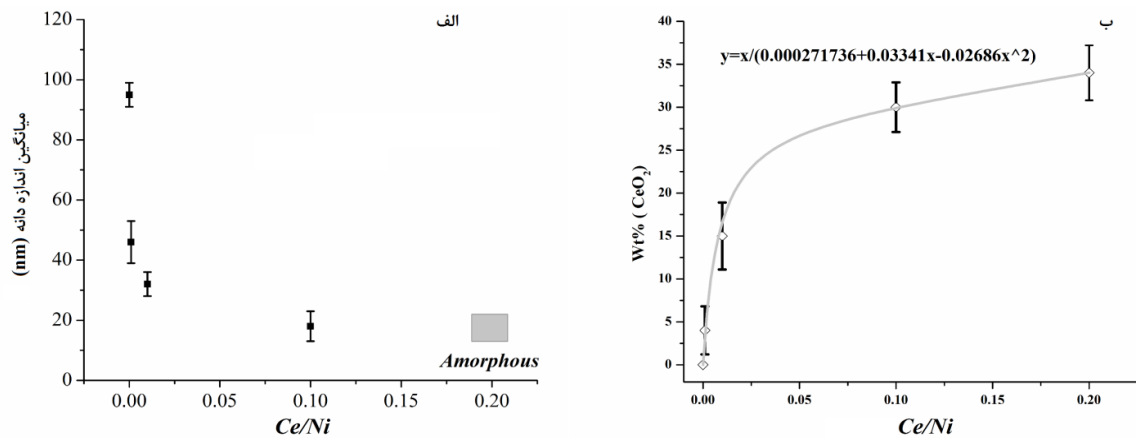
مشاهده نمی‌شود که بیان‌کننده آمورف بودن و یا بسیار ریز دانه بودن ساختار اکسید سریم باشد. برای بررسی بیشتر ساختار اکسید سریم از طیف سنجی XPS که ترکیب شیمیایی و حالت اکسیدی پوشش را مشخص می‌کند،



شکل ۳. تصاویر SEM مربوط به (ب) پوشش‌های نانوکامپوزیت نیکل - اکسید سریم بدست آمده از محلول آبکاری حاوی نسبت‌های مختلف یونی Ce/Ni (الف) ۰/۰۰۱ (ج) ۰/۰۱ (د) ۰/۱ (ه) و ۰/۲.



شکل ۴. نتایج آنالیزهای XRD (الف) و XPS (ب) پوشش‌های کامپوزیتی نیکل و نیکل - اکسید سریم بدست آمده از محلول آبکاری حاوی نسبت‌های مختلف Ce/Ni .



شکل ۵. الف) نمودار اندازه دانه نیکل برای پوشش‌های بدست‌آمده از محلول نیکل با غلظت‌های مختلف یون سریم محاسبه شده با استفاده از معادله شرر از نتایج XRD (ب) نمودار درصد وزنی اکسید سریم در پوشش نیکل-اکسید سریم بر حسب نسبت مولی Ce/Ni بدست آمده با استفاده از آنالیز EDS از روی سطح مشاهده شده در تصاویر SEM در شکل ۳.

ارزیابی خواص مکانیکی و سایشی

نتایج آزمون نانودندانه گذار

برای اندازه‌گیری سختی و مدول الاستیسیته سطح پوشش آزمون نانودندانه گذار با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی بر روی پوشش‌ها انجام شد. در شکل ۶-الف تصاویر میکروسکوپی نیروی اتمی از پوشش‌های تشکیل شده از محلول آبکاری حاوی نسبت‌های مختلف Ce/Ni که تحت آزمون نانودندانه گذار قرار گرفته‌اند آورده شده‌است. همانگونه که مشاهده می‌گردد با افزایش نسبت Ce/Ni اندازه دانه شروع به کاهش می‌کند که تاییدکننده نتایج XRD است. همچنین مشاهده می‌گردد که اندازه اثر باقی‌مانده دندانه گذار، با افزایش نسبت Ce/Ni کاهش می‌یابد که بیان‌کننده افزایش سختی پوشش با افزایش نسبت Ce/Ni است. در شکل ۷ نمودار سختی و مدول الاستیسیته پوشش‌های نیکل-اکسید سریم بر حسب نسبت Ce/Ni که از روی نمودارهای نیرو بر حسب جابه‌جایی (شکل ۶-ب) در آزمون نانو دندانه گذار بدست آمده نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد با افزایش نسبت Ce/Ni از ۰ به ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ سختی و مدول الاستیسیته پوشش بدست آمده افزایش پیدا می‌کند. عوامل متعددی

اندازه دانه نیکل برای پوشش‌های بدست آمده از محلول نیکل با غلظت‌های مختلف یون سریم با استفاده از معادله شرر محاسبه شد که در نمودار شکل ۵-الف آورده شده‌است. مشاهده می‌گردد که با افزایش غلظت یون سریم در محلول پوشش‌دهی، اندازه دانه نیکل کاهش پیدا می‌کند و در نهایت با افزایش بیشتر Ce/Ni، به سمت آمورف شدن پیش می‌رود.

نمودار درصد وزنی اکسید سریم در پوشش نیکل-اکسید سریم بر حسب نسبت مولی Ce/Ni در حمام آبکاری در شکل ۵-ب نشان داده شده‌است. از نمودار مشاهده می‌گردد که درصد وزنی اکسید سریم در پوشش با غلظت یون سریم در محلول پوشش در ارتباط بوده و با افزایش غلظت یون سریم در محلول پوشش‌دهی درصد اکسید سریم در پوشش افزایش پیدا می‌کند، همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش بیشتر نسبت یونی سریم/نیکل در محلول آبکاری از ۰/۱ به ۰/۲، مقدار درصد اکسید سریم تغییر محسوس نمی‌کند.

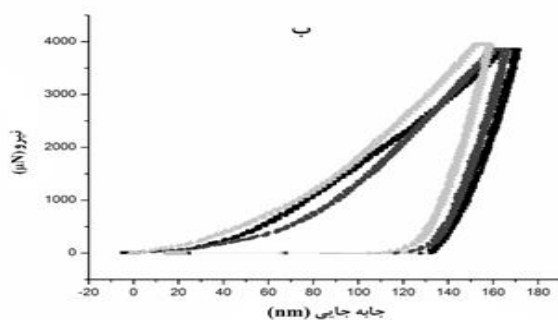
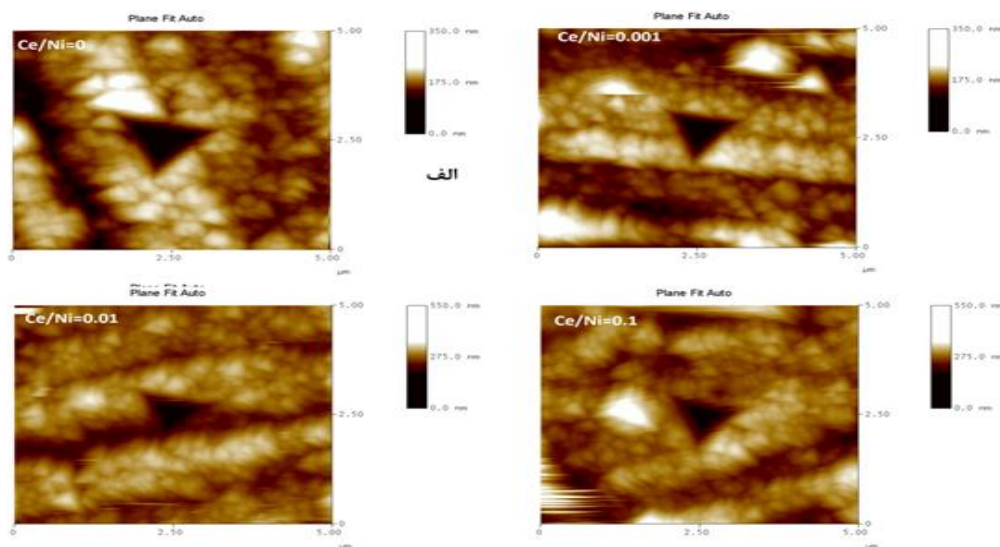
الاستیسیته مشاهده نمی‌گردد، بلکه مقدار آن‌ها نیز به مقدار اندکی کاهش می‌یابد که می‌توان به دلایل زیر اتفاق افتاده باشد:

۱. عدم افزایش محسوس در درصد اکسید سریم در پوشش
۲. افزایش ترک و حفره در پوشش (پوشش‌های همگن‌تر و متراکم‌تر نسبت به پوشش‌های غیرمتراکم از سختی و مدول الاستیسیته بالاتری برخوردار هستند [۳۲ و ۳۳])

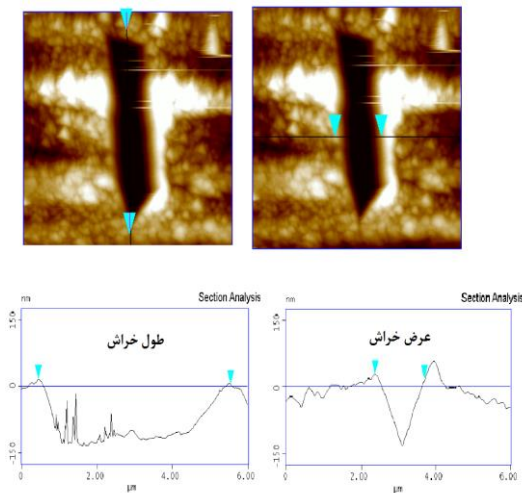
در افزایش سختی و مدول الاستیسیته با افزایش نسبت Ce/Ni شرکت دارند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. کاهش اندازه دانه نیکل با افزایش نسبت Ce/Ni که منجر به افزایش سختی و مدول الاستیسیته پوشش می‌گردد.
۲. حضور اکسید سریم در زمینه نیکل و افزایش مقدار آن با افزایش نسبت مولی Ce/Ni ، که به سبب سختی بالاتر اکسید سریم نسبت زمینه نیکلی منجر به افزایش سختی و مدول الاستیسیته پوشش می‌گردد [۲۹-۳۱].

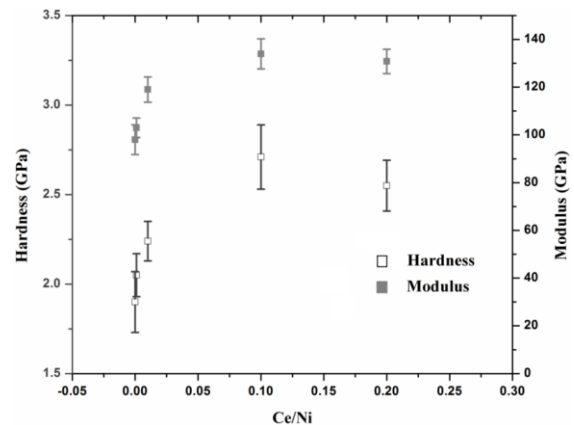
نکته حایز اهمیت دیگر این است که با افزایش بیشتر Ce/Ni از ۰/۱ به ۰/۲ نه‌تنها افزایشی در سختی و مدول



شکل ۶. الف) تصاویر میکروسکوپی نیروی اتمی از پوشش‌های تشکیل شده از محلول آبکاری حاوی نسبت‌های مختلف Ce/Ni ۰، ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ که تحت آزمون نانودندانه گذار گرفته‌اند، ب) نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی در آزمون نانودندانه گذار برای پوشش بدست آمده از محلول آبکاری با نسبت مولی ۰/۰۱.



شکل ۸. تصویر AFM از پوشش بدست‌آمده از محلول آبکاری با نسبت مولی $Ce/Ni=0/01$.

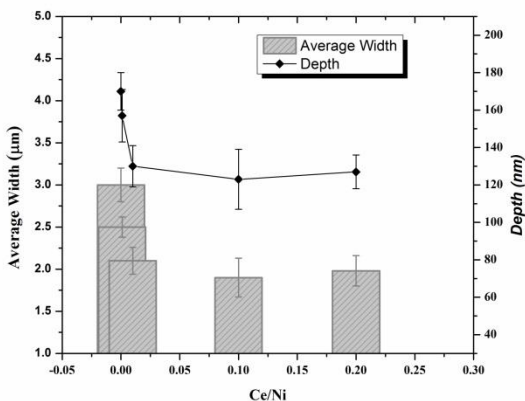


شکل ۷. نمودار سختی و مدول الاستیسیته پوشش‌های نیکل-اکسید سریم بر حسب نسبت مولی مختلف Ce/Ni بدست‌آمده از روی نمودارهای نیرو بر حسب جابه‌جایی (شکل ۶-ب) در آزمون نانو دندان‌گذار.

نتایج آزمون نانوخرش

در شکل ۸ نمونه‌ای از تصویر AFM از پوشش بدست آمده از محلول آبکاری با نسبت مولی $Ce/Ni=0/01$ که آزمون نانوخرش بر روی آنها انجام شده است، مشاهده می‌گردد. میانگین عمق و پهنای خراش‌ها در پوشش‌های بدست آمده از محلول آبکاری حاوی نسبت‌های مختلف Ce/Ni اندازه‌گیری شد و نتایج در نمودار شکل ۹ آورده شده است. با حضور یون سریم در محلول آبکاری و افزایش نسبت مولی Ce/Ni مشاهده می‌گردد که عمق و پهنای خراش‌ها کاهش یافته است. کاهش پهنای و عمق خراش‌ها می‌تواند معیاری برای افزایش مقاومت خراش و مقاومت به سایش پوشش باشد. علت افزایش مقاومت به سایش پوشش به سبب افزایش سختی و مدول الاستیسیته پوشش در اثر حضور ذرات اکسید سریم در زمینه نیکل است.

همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش نسبت Ce/Ni از ۰/۱ به ۰/۲ در محلول آبکاری، نه تنها عمق و پهنای خراش تشکیل شده بر روی سطح پوشش کاهش پیدا نمی‌کند بلکه با افزایش جزئی نیز همراه است که می‌تواند به:



شکل ۹. نمودار میانگین عمق و پهنای خراش‌ها در پوشش‌های بدست‌آمده از محلول آبکاری حاوی نسبت‌های مختلف یونی Ce/Ni .

۱. درصد ذرات اکسید سریم در پوشش برگردد که با افزایش نسبت Ce/Ni از ۰/۱ به ۰/۲ تغییر محسوسی پیدا نمی‌کند.
۲. تغییر ساختار زمینه نیکلی پوشش از نانوکریستالی به آمورف با افزایش نسبت Ce/Ni از مقدار ۰/۱ به ۰/۲ برگردد، که سبب کاهش سختی و مدول الاستیسیته و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی پوشش می‌شود.

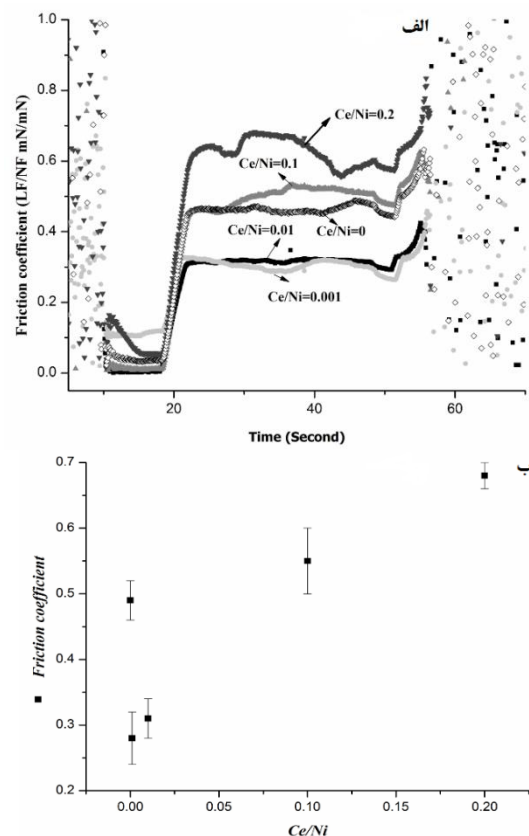
از روی نمودار مشاهده می‌گردد که حضور یون سریم در محلول پوشش‌دهی و در نتیجه آن حضور ذرات اکسید سریم در پوشش، منجر به کاهش ضریب اصطکاک پوشش می‌گردد، این موضوع در مطالعات سایر پژوهشگران نیز مشاهده شده است [۳۰ و ۳۲] که حضور نانوذرات اکسید سریم در پوشش نیکل منجر به کاهش ضریب اصطکاک پوشش می‌گردد. از روی نمودار همچنین می‌توان پی‌برد که با افزایش نسبت مولی Ce/Ni در محلول آبکاری از ۰ به ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱، ضریب اصطکاک پوشش کاهش پیدا می‌کند اما با افزایش بیشتر آن ضریب اصطکاک پوشش شروع به افزایش می‌کند به‌گونه‌ای که ضریب اصطکاک پوشش حاصل از محلول آبکاری حاوی نسبت مولی $Ce/Ni=0/2$ از ضریب اصطکاک پوشش نیکل خالص بیشتر می‌گردد. افزایش ضریب اصطکاک در پوشش‌های بدست آمده به وجود ترک‌ها و حفرات و افزایش زبری در سطح پوشش‌های تشکیل‌شده از محلول آبکاری با نسبت یونی بالاتر Ce/Ni برمی‌گردد که سبب افزایش ضریب اصطکاک می‌گردد.

نتیجه‌گیری

با افزودن نسبت مولی مختلف Ce/Ni به محلول آبکاری، پوشش‌های نانوکامپوزیت با درصد‌های مختلف Ce/Ni حاصل گردید. حضور اکسید سریم در پوشش منجر به ریزدانه شدن و درنهایت آمورف شدن نیکل زمینه گردید. نتایج نانو دندان‌گذار و نانوخراس نشان داد که نسبت مولی Ce/Ni در محلول پوشش‌دهی، نقش موثری بر روی نتایج دارد. با افزایش نسبت Ce/Ni از ۰ به ۰/۰۰۱، ۰/۰۱، سختی، مدول الاستیسیته و مقاومت به خراش پوشش افزایش و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد که به سبب حضور و افزایش درصد اکسید سریم در پوشش‌های حاصله با افزایش نسبت Ce/Ni است، همچنین با افزایش این نسبت از ۰/۰۱ به ۰/۱ و ۰/۲ مشاهده شد که ضریب

می‌تواند مربوط به افزایش حفرات و ترک در پوشش باشد که منجر به کاهش مقاومت به خراش پوشش در مقایسه با پوشش متراکم می‌شود [۳۲ و ۳۳].

در شکل ۱۰- الف نمودار ضریب اصطکاک بر حسب زمان در نسبت مولی مختلف Ce/Ni در محلول آبکاری آورده شده است. مشاهده می‌گردد که در ابتدا و انتهای نمودار نوسانات زیادی وجود دارد، این نوسانات به شروع خراش و پایان خراش مربوط می‌شود که نانودندان‌گذار وارد پوشش شده و از آن خارج می‌گردد [۴۵]. میانگین ضریب اصطکاک از روی نمودار محاسبه شده و در نمودار شکل ۱۰- ب آورده شده است.



شکل ۱۰. الف) نمودار ضریب اصطکاک بر حسب زمان برای پوشش‌های بدست آمده در نسبت مولی مختلف Ce/Ni (ب) نمودار میانگین ضریب اصطکاک بر حسب نسبت مولی Ce/Ni محاسبه شده از روی نمودار ۱۰- الف).

8. Y. Zhou, J. A. Switzer, *Growth of cerium(IV) oxide films by the electrochemical generation of base method*, Journal of Alloys Compound, 237(1996)1-9.
9. I. Zhitomirsky, A. Petric, *Electrochemical deposition of ceria and doped ceria films* Ceramic International, 27(2001) 149-155.
10. I. Zhitomirsky, A. Petric, *Electrolytic and electrophoretic deposition of CeO₂ films*, Materials Letters, 40(1999) 263-268.
11. J. Tang, Z. Han, Y. Zuo, Y. Tang, *A corrosion resistant cerium oxide based coating on aluminum alloy 2024 prepared by brush plating*, Applied Surface Science, 257(2011) 2806-2812.
12. A. Q. Wang, T.D. Golden, *Anodic Deposition of Cerium Oxide: I. Formation of Crystalline Thin Films*, Journal of Electrochemistry Science, 150(2003)616-620.
13. T. D. Golden, A. Q. Wang, *Anodic Deposition of Cerium Oxide Thin Films: II Mechanism Studies*, Journal of Electrochemistry Science, 150(2003) 621-624.
14. E. B. Li, G.E. Thompson, *In situ atomic force microscopy studies of the deposition of cerium oxide films on regularly corrugated surfaces*, Journal of Electrochemistry Science, 146(1999) 1809-1812.
15. H. Hasannejad, C. Mele, T. Shahrabi, B. Bozzini, *Ni/ceria composite electrodeposition, in situ ERS study*, Journal of Solid State Electrochemistry, 16(2012) 3429-3441.
16. H. Hasannejad, T. Shahrabi, M. Jafarian, A. Sabour Rouhaghdam, *EIS study of nano crystalline Ni-cerium oxide coating electrodeposition mechanism*, Journal of Alloys and Compounds, 509(2011)1924-1930.
17. H. Hasannejad, T. Shahrabi, *Economical deposition of Ni high cerium oxide nano composite coatings*, Surface Engineering, 28(2012) 418-423.
18. H. Hasannejad, T. Shahrabi, M. Jafarian, *Synthesis and properties of high corrosion resistant Ni-cerium oxide*

اصطکاک به سبب تشکیل حفرات و ترک‌ها در سطح پوشش شروع به افزایش کرد. بر طبق نتایج حاصله، پوشش بهینه از لحاظ خواص سایشی، پوشش‌هایی هستند که از محلول آبکاری با نسبت مولی $Ce/Ni=0/01$ بدست می‌آیند.

مراجع

1. J. Li, D. Xiong, Z. Huang, J. KongDai, *Effect of Ag and CeO₂ on friction and wear properties of Ni-base composite at high temperature*, Wear, 267(2009) 576-584.
2. Z. Zhang, X. Lu, B. Han, J. Luo, *Rare earth effect on the microstructure and wear resistance of Ni-based coatings*, Material Science Engineering, 454(2007)194-202.
3. B. Han, X. Lu, *Tribological and anti-corrosion properties of Ni-W-CeO₂ coatings against molten glass*, Surface Coating Technology, 202(2008) 3251-3256.
4. W. Yang, W. Chu, C. Jiang, J. Wen., W. Sun, *Cerium oxide promoted Ni/MgO catalyst for the synthesis of multi-walled carbon nano tubes*, Chinese Journal of Catalysis, 32(2011) 1323-1328.
5. P. Tang, L. Diamond, M. Macdonald, B. G. Mcmillan, J. Morrow, M. D. Spicer, A. Berlouis, M. Weston, *Impact of synthesis temperature on hydrogen storage and emission from Ni/Ce composite oxides*, International Journal of Hydrogen Energy, 34(2009)7296-7305.
6. L. Christian, C. Campos, A. Maria, I. Yasuyuki, R. Carlos, *Preparation and methanol oxidation catalysis of Pt-CeO₂ electrode*, Journal of Electroanalytical Chemistry, 581(2005) 206-215.
7. Y. Li, Q. Fu, *Flytzani-Stephanopoulos M, Low-temperature water-gas shift reaction over Cu- and Ni-loaded cerium oxide catalysts*, Applied Catalyst, 27(2000)179-191.

- deposits, *Surface and Coatings Technology*, 202(2008)1615.
28. K. L. Wang, Q. B. Zhang, M. L. Sun, X. G. Wei, Y. M. Zhu, *Rare earth elements modification of laser-clad nickel-based alloy coatings*, *Applied Surface Science*, 174(2001) 191-200.
 29. M. Li, S. Zhang, H. Li, Y. He, J.H. Yoon, T. Y. Cho, *Effect of nano-CeO₂ on cobalt-based alloy laser coatings*, *Journal of Materials Processing Technology*, 202(2008)107-111.
 30. N. S. Qu, D. Zhu, K. C. Chan, *Fabrication of Ni-CeO₂ nanocomposite by electrodeposition*, *Scripta Materialia*, 54(2006)1421-1425.
 31. S. Zhang, M. Li, T. Y. Cho, J. H. Yoon, C.G. Lee, Y. Z. He, *Laser clad Ni-base alloy added nano- and micron-size CeO₂ composites*, *Optics & Laser Technology*, 40(2008)716-722.
 32. H. Yahyaei, M. Mohseni, *Use of nano indentation and nano scratch experiments to reveal the mechanical behavior of sol-gel prepared nano composite films on polycarbonate*, *Tribology International*, 57(2013)147-155.
 33. A. Auezhan, S. Shinya, Ch. In-Sik, S. Yusuke, K. Hae-Jin, K. Dae-Eun, *An investigation of the tribological and nano-scratch behaviors of Fe-Ni-Cr alloy sintered by direct metal laser sintering*, *Materials and Design*, 47(2013)386-394.
 19. Y. Hamlaoui, F. Pedraza, C. Remazeilles, S. Cohendoz, C. Rebere, L. Tifouti and J. Creus, *Cathodic electrodeposition of cerium-based oxides on carbon steel from concentrated cerium nitrate solutions Part I. Electrochemical and analytical characterization*, *Material Chemistry Physics*, 113(2009)650-657.
 20. S. A. Hayes, Y. Pu, J. T. O'Keefe, J. M. O'Keefe, A. Stoffer, *The Phase Stability of Cerium Species in Aqueous Systems I. E-pH Diagram for the Ce-HClO₄-H₂O System*, *Journal of the Electrochemistry Science*, 149(2002) 623-630.
 21. S. Sundararajan, B. Bhushan, *Micro/Nano Tribology of ultra-thin hard amorphous carbon coatings using atomic /friction force microscopy*, *Wear* 678(1999)225-229.
 22. A. Hodzic, J. K. Kim, Z. H. Stachurski, *Nano-indentation and nano-scratch of polymer/glass interfaces. II: model of interphases in water aged composite materials*, *Polymer*, 42(2001)5701-5710
 23. A. Pauschitz, E. Badisch, D.V. Manish Roy, A. Shtansky, *On the scratch behaviour of self-lubricating WSe₂ films*, *Wear*, 267(2009)1909-1914.
 24. A. Amanov, S. Sasaki, C. In-Sik, S. Yusuke, K. Hae-Jin, K. Dae-Eun, *An investigation of the tribological and nano-scratch behaviors of Fe-Ni-Cr alloy sintered by direct metal laser sintering*, *Materials and Design*, 47(2013)386-394.
 25. W. C. Oliver, G.M. Pharr, *An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments*, *Journal of Materials Research*, 7(1992)1564.
 26. J. Mencik, *Determination of mechanical properties by instrumented indentation*. *Meccanica*, 42(2007)19-29.
 27. H. A. Sorkhabi, M. M. Haghghi, M. G. Hosseini, *Effect of rare earth (Ce, La) compounds in the electroless bath on the plating rate, bath stability and microstructure of the nickel-phosphorus nano-composite coating*, *Materials and Corrosion*, 64(2013)1104-1113.