

بررسی رفتار اکسیداسیون پوشش الکترولس Ni-B در دمای ۶۰۰°C

محمد قادری^{۱*}، محسن رضا قلی زاده^۲، سید محمود منیر واقفی^۳

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، نجف آباد، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

* نویسنده مسئول: mo.ghaderi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۸/۰۵

چکیده:

در این تحقیق رفتار اکسیداسیون پوشش الکترولس Ni-B بر روی فولاد CK45 با استفاده از دستگاه TGA در دمای ۶۰۰°C ارزیابی شد. نمونه ها بعد از فرایند آبکاری در دمای ۴۰۰°C به مدت یک ساعت عملیات حرارتی شد. نرخ افزایش دما ۵°C/min مدت قرار گیری نمونه در دمای ایزو ترم حدود ۳ ساعت و گاز ورودی دستگاه اکسیژن انتخاب گردید. با توجه به داده های دستگاه و همچنین تصاویر SEM از سطح مقطع پوشش ها نشان داد که پوشش در زمان های حدود ۹۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ ثانیه تحت تاثیر دما و اکسیداسیون دچار ترک شده و میزان و شیب تغییرات وزن با شدت بیشتری تغییر کرده است. در نهایت میزان تغییرات وزن پس از آزمون ۱۴/۲ mg بوده است و درصد کل اکسید شدن پوشش بعد از آزمون حدود ۴٪ می باشد. به علت سختی بالای پوشش ۱۰۸۵ HV₁₀₀، تنش داخلی زیاد باعث شکست قسمتهایی از فصل مشترک پوشش و زیر لایه شده است.

کلمات کلیدی: پوشش الکترولس، Ni-B، اکسیداسیون، TGA، ایزو ترم

Oxidation behavior of electroless Ni-B coatings at 600 °C

M. Ghaderi ^{1*}, M. Rezagholizadeh², S.M. monir Vaghefi³

^{1,2} Young Researchers and Elite Club, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

³ Associate professor, Department of materials Engineering, Isfahan University of technology, Isfahan, Iran

* Corresponding Author: mo.ghaderi@yahoo.com

Submission: 2014, 06, 01 Acceptance: 2014, 10, 27

Abstract:

In this study the oxidation behavior of electroless Ni-B coatings on steel CK45 was evaluated using TGA at 600 °C. Samples after the plating process heat treated at 400 °C for an hour. The rate of temperature increase 5 °C/min and the duration of sample isotherm temperature at about 3 h and Oxygen was selected as the gas input TGA. According to data sets and also SEM images of cross-sections of the coatings showed that coatings at about 9,000 and 12,000 seconds influenced by temperature and oxidation have been crack and the amount and slope of weight more drastically changed in diagram TGA. The amount of change in weight after testing was 14 mg and the percent oxidation of the coating after the test was about 4%. Due to the high hardness of the coating HV₁₀₀1085, high internal stresses causing failure part of the interface between coating and substrate.

Keywords: electroless coating, Ni-B, oxidation, TGA, isotherm.

مقدمه

یکی از مشکلات عمده و مشترک در صنایع و کارخانه های تولیدی، اکسیداسیون جداره های خروجی گاز احتراق نظیر دودکش کوره ها و همچنین لوله های انتقال هوا گرم به داخل کوره ها می باشد و یا حتی در قطعات نظامی، صنایع هوایی و قطعات ریخته گری بالگرد نظیر بازوهای رابط، پوسته روغن و چرخ دنده که با دمای بالا روکار دارد تحت تاثیر اکسیداسیون قرار گیرد [۱]. اکسیداسیون این قسمتها که عمدتاً از ورقهای فولادی معمولی هستند باعث بروز توفقات زود هنگام، تخریب و خسارت های مالی زیاد به منظور تعویض و جوشکاری نواحی خسارت دیده می شود. استفاده از پوشش های مناسب برای جلوگیری از اکسیداسیون می تواند هزینه تامین و نگهداری را تا حد ممکن کاهش دهد [۲].

امروزه پوشش های الکترولس یکی از روشهای پر کاربرد در صنایع است. این پوشش ها رفته رفته با بهبود پارامترهای آبکاری و خواص مکانیکی پوشش، جایگاه ویژه ای در صناعی که تحت تاثیر عوامل خارجی نظیر محیطهای خوردنده و سایشی به خود اختصاص داده اند. الکترولس پایه نیکل این از معروفترین دسته های آبکاری الکترولس می باشد [۳-۶] علت استفاده از نیکل به عنوان پایه برای آبکاری، خواص منحصر به فرد نیکل می باشد. از مزایای مهم این روش می توان به یکنواختی رسوب مخصوصاً اگر قطعات کوچک و پیچیده باشند [۷]. امکان تولید پوشش کامپوزیتی و نانو ساختار از دیگر نکات قابل توجه این روش است [۸-۱۱]. خواص پوشش های Ni-B حاصل از حمام هایی که شامل سدیم بورهیدرید هستند، شبیه به پوششهای الکترولس Ni-P است. سختی پوششهای Ni-B بسیار زیاد است و این پوشش ها میتوانند در دماهای خیلی بالاتر نسبت به پوششهای کروم سخت، بکار برده شوند [۱۲]. مطالعات اکسیداسیون

پوشش های الکترولس Ni-P در مقایسه با پوشش های آندایزینگ سخت مقاومت بهتری از خود نشان داده است [۱]. در این تحقیق سعی بر تجزیه و تحلیل رفتار اکسیداسیون پوشش الکترولس Ni-B بر روی فولاد معمولی در دمای ثابت ۶۰۰°C شده است.

مواد و روش ها

در این تحقیق از فولاد CK45 به عنوان زیرلایه پوشش الکترولس Ni-B استفاده شد. نمونه ها به شکل مکعب مستطیل به ابعاد $1 \times 0.4 \times 0.4$ cm توسط دستگاه وایر کات (Wire cut) به منظور بالا بردن دقت ابعادی بریده شد. پیش از فرایند آبکاری، پیش عملیات نمونه ها قبل از ورود به حمام آبکاری الکترولس مطابق جدول ۱ انجام شد. یکنواختی سطوح نمونه ها تا درجه ۱۰۰۰ توسط کاغذ سنباده انجام گرفت سپس در استون تمیز شد و در مرحله بعد در محلول NaOH چربی زدایی گردید و در انتها در محلول ۱۰ درصد حجمی اسید سولفوریک اکسید زدایی و فعال سازی صورت گرفت. آبکاری نمونه ها توسط حمام آبکاری الکترولس Ni-B مطابق با جدول ۲ ساخته و مورد استفاده قرار گرفت. نیکل کلرید برای منبع یون نیکل و سدیم بورهیدرید به عنوان عامل احیا کننده مورد استفاده قرار گرفت. pH حمام توسط آمونیاک ۱۲/۵ و دمای حمام $85 \pm 2^\circ\text{C}$ تنظیم شد.

بررسی رفتار اکسیداسیون پوشش الکترولس Ni-B توسط دستگاه TGA در دمای ۶۰۰°C و با نرخ حرارتی $5^\circ\text{C}/\text{min}$ انجام گرفت. مدت آزمون اکسیداسیون در دمای ایزوترم ۶۰۰°C حدود ۱۰۰۰۰ ثانیه (تقریباً ۳ ساعت) بوده است. گاز ورودی دستگاه اکسیژن و فشار محفظه یک اتمفسر تنظیم شد. داده های بدست آمده توسط

جدول ۱: فرایند پیش عملیات نمونه ها قبل از آبکاری

مراحل	توضیحات
شست و شو	توسط استون به مدت ۱۵ دقیقه
سنباده زنی	توسط کاغذ سنباده تا درجه ۱۰۰۰
چربی زدایی	محلول ۲۵٪ وزنی NaOH در دمای 50°C به مدت ۲۰ دقیقه
اکسید زدایی	محلول ۱۰٪ وزنی HCl در دمای محیط به مدت ۱ دقیقه

جدول ۲: ترکیب شیمیایی و پارامترهای آبکاری الکترولس Ni-B

ترکیبات حمام	مقدار
Nickel chloride	20 g/l
Sodium borohydride	1 g/l
Ethylenediamine (98%)	64 ml/l
Sodium hydroxide	40 g/l
Thallium acetate	1 mg/l
pH	12.5
دما	$85 \pm 2^\circ\text{C}$

$$\frac{w_f - w_i}{w_i} \times 100 \quad (1)$$

در اینجا w_t وزن کل نمونه بعد از آزمون اکسیداسیون و w_i وزن کل نمونه قبل از آزمون اکسیداسیون می‌باشد.

یکی از عمده ترین مزیت پوشش الکترولس تخلخل پایین و نفوذ پذیری کمتر آن است. گزارش‌های داس و چین [۱۶] نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت پوشش تخلخل پوشش الکترولس بشدت کاهش می‌یابد. سختی پوشش‌های الکترولس Ni-B بعد از عملیات حرارتی نسبت به سایر روش‌های پوشش دهی دیگر بالا می‌باشد [۱۷-۱۹]. سختی پوشش الکترولس Ni-B بعد از عملیات حرارتی $100 \text{ HV} \pm 5 \text{ تا } 108 \pm 5$ اندازی گیری شده است. در حالی که قبل از عملیات حرارتی آن $100 \text{ HV} \pm 5$ بدست آمده است. بنابراین تنش بالای پوشش امکان ترک دار کردن پوشش را تسهیل می‌کند و جدایش فصل مشترک پوشش-زیرلایه هموارتر می‌شود. گزارشات نشان می‌دهد مقاومت به خوردگی کمتر پوشش نسبت به Ni-P به دلیل میکروترک‌های ذاتی درونی پوشش می‌باشد [۲۰].

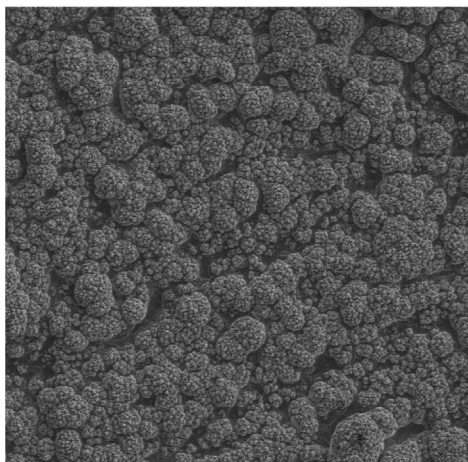
نتایج XRD پوشش الکترولس Ni-B قبل و بعد از عملیات حرارتی در شکل ۲ آورده شده است. نمونه قبل از عملیات حرارتی به صورت نیمه آمورف نیمه کریستالی رسوب کرده است. سطح پوشش عملیات حرارتی شده، بیانگر تغییر کامل ساختار نسبت به حالت قبل از عملیات حرارتی می‌باشد. به این معنی است که به جای اثرات آمورف، پیک‌های واضحی از دو فاز نیکل کریستالی (با شبکه FCC) و بورید نیکل Ni_3B (با شبکه تتراگونال و اورتورومبیک) در نمودار XRD بعد از عملیات حرارتی مشاهده می‌گردد. بر اساس نظرات برخی محققین حداقل دمای لازم برای وقوع استحاله آمورف به کریستال در

نرم افزار NETZSCH نوینز گیری و تجزیه و تحلیل شد. به منظور ارزیابی رفتار اکسیداسیون پوشش الکترولس، از دستگاه میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM Philips ML30) و آنالیز کمی EDAX استفاده شد. همچنین سختی پوشش توسط دستگاه میکروسختی سنج توسط روش ویکرز با بار ۱N انجام گرفت.

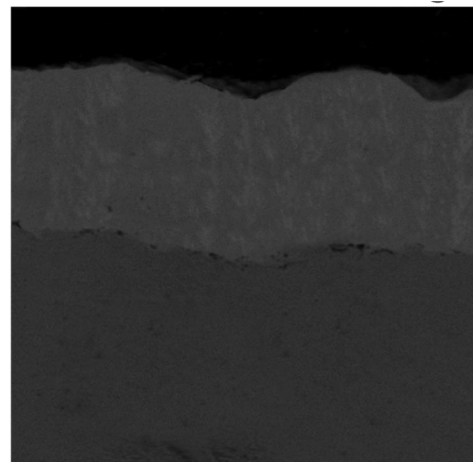
بحث و نتایج

شکل ۱-الف تصویر SEM از سطح مقطع پوشش را نشان می‌دهد. با توجه به تصویر، ضخامت پوشش الکترولس Ni-B حدود $25 \mu\text{m}$ می‌باشد. در شکل ۱-ب تصویر SEM مورفولوژی سطح پوشش الکترولس Ni-B را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ مشاهده میشود که مورفولوژی سطح پوشش شباهت زیادی به گل کلم (Cauliflower) و یا پوست پرتقال (Orange-peel) دارد. این ساختار از ویژگی‌های پوشش‌های الکترولس نیکل-فسفر و نیکل-بور می‌باشد [۱۳]. مورفولوژی سطح پوشش الکترولس Ni-B نسبت به پوشش Ni-P ریزتر می‌باشد [۱۴].

وزن اولیه نمونه قبل از آبکاری 1774 mg و وزن پوشش 68 mg می‌باشد. سطح موثر نمونه تحت تاثیر اکسیداسیون برابر با 248 mm^2 بوده است. میزان اکسیداسیون پوشش پس از آزمون TGA در حدود 14 mg بوده است. با توجه به رابطه ۱ و با فرض عدم اکسیداسیون زیرلایه، درصد اکسیداسیون برای نمونه الکترولس تنها $3/7$ درصد از پوشش تحت تاثیر اکسیداسیون در دمای 600°C به مدت تقریبی 17200 ثانیه قرار گرفته است. بنابراین می‌توان گفت مقاومت به اکسیداسیون نمونه الکترولس Ni-B نسبت به پوشش‌های الکترونیکی و پوشش‌های HVOF مقاومت بالاتری دارد [۱۵].



ب

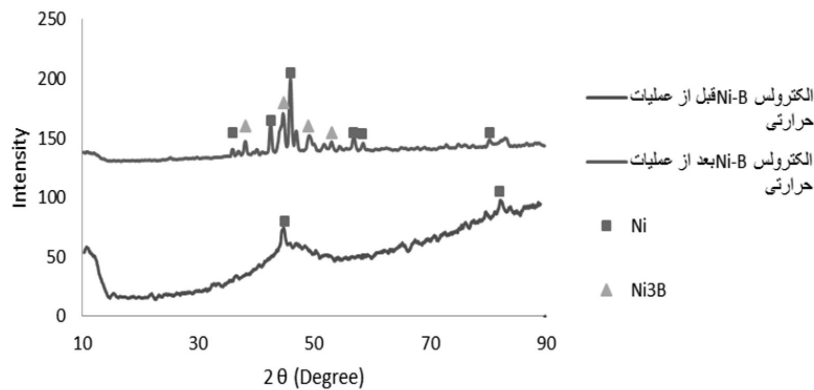


الف

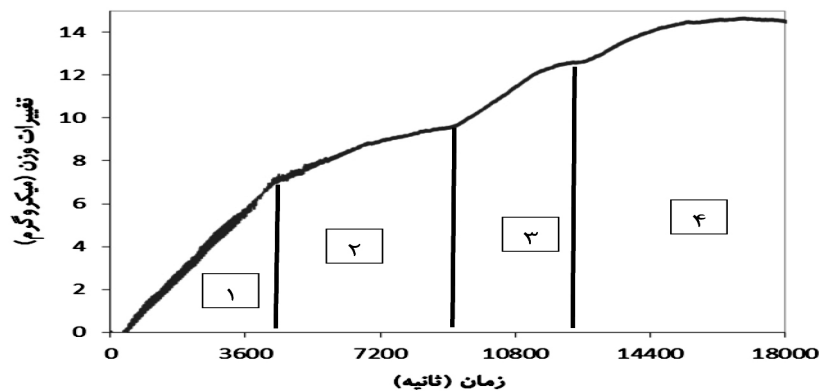
شکل ۱- تصویر SEM پوشش الکترولس Ni-B: الف) سطح مقطع پوشش ب) سطح پوشش

در مرحله بعد سرعت اکسیداسیون به واسطه تشکیل و رشد فیلم‌های اکسیدی NiO و NiO₂ امکان اکسیداسیون بیشتر کاهش یافته است. در واقع سطح موثر برای تشکیل اکسیدهای ناپایدار به تدریج کاهش یافته است. در مرحله سوم به علت شکست فیلم اکسیدی و گسترش ترکهای عرضی پوشش، امکان اکسیداسیون بیشتر را فراهم می‌کند. شدت اکسیداسیون منجر به جداسازی فصل مشترک زیرلایه و پوشش می‌شود. شیب افزایش وزن در این ناحیه بیشترین می‌باشد. به طوریکه در زمان بین ۹۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ اختلاف افزایش وزن نمونه تقریباً ۲/۵ mg بوده است. در صورتی که در ناحیه دوم (منطقه سهمی) تفاضل افزایش وزن ۱/۷ mg بوده است. در مرحله چهارم فازهای اکسیدی NiO تجزیه شده و فاز NiO₂ پایدار باقی می‌ماند. تشکیل اکسید شیشه ای B₂O₃ غشای ضعیفی را برای اکسیداسیون بیشتر ایجاد می‌کند. این لایه منجر به کاهش شدن اکسیداسیون می‌شود. در مرحله چهارم به واسطه تشکیل فیلم اکسیدی ثانویه، سرعت اکسیداسیون کاهش می‌یابد. همانطور که در نمودار شکل ۳ ملاحظه می‌شود، نمودار مجدداً رفتار سهمی داشته است. تشکیل اکسیدهای فلزی در ترکهای پوشش و مسدود شدن راه انتقال نفوذ اکسیژن را می‌توان دلیل اصلی تغییر رفتار نمودار بیان نمود.

پوشش‌های الکترولس نیکل حدود ۳۳۰°C می‌باشد و افزایش دمای عملیات حرارتی منجر به کریستاله شدن بیشتر پوشش می‌گردد [۲۱]. نمودار شکل ۳ نتایج آزمون اکسیداسیون TGA پوشش در دمای ۶۰۰°C را نشان می‌دهد. نمودار دستگاه TGA با شیب مثبت و با افزایش وزن همراه است. افزایش وزن نشان داده شده در نمودار TGA به دلیل اکسید شدن اجزای پوشش می‌باشد. نتایج XRD و نیز تصویر سطح و سطح مقطع پوشش تشکیل فازهای اکسیدهای NiO₂، B₂O₃ را ثابت می‌کند. همانطور که ملاحظه می‌شود، فاز Ni₃B که بعد از عملیات حرارتی پوشش ایجاد شده است در دمای ۶۰۰°C پایدار بوده و تجزیه نشده است. نمودار اکسیداسیون شامل چهار مرحله می‌باشد که در شکل آورده شده است. مرحله اول یا مرحله نخست شروع واکنش اکسیداسیون می‌باشد. اکسیداسیون پوشش الکترولس Ni-B در ابتدا با شیب یکنواختی تا ۷ mg افزایش وزن داشته است و در بین حدود ۵۰۰۰ تا ۹۰۰۰ ثانیه شیب نمودار از حالت خطی به سهمی تغییر یافته است. با توجه به سرعت گرمایش ۲۰°C/min، دمای کوره در مدت ۳۰ دقیقه (۱۸۰۰ ثانیه) به دمای ایزوترم می‌رسد. بنابراین نیمی از زمان مرحله اول صرف گرم شدن نمونه می‌شود. نوسانات در زمان‌های آغازین و در دماهای پایین به دلیل ناپایداری و عدم تعادل حرارتی زیاد می‌باشد.



شکل ۲- منحنی XRD پوشش الکترولس Ni-B قبل و بعد از عملیات حرارتی

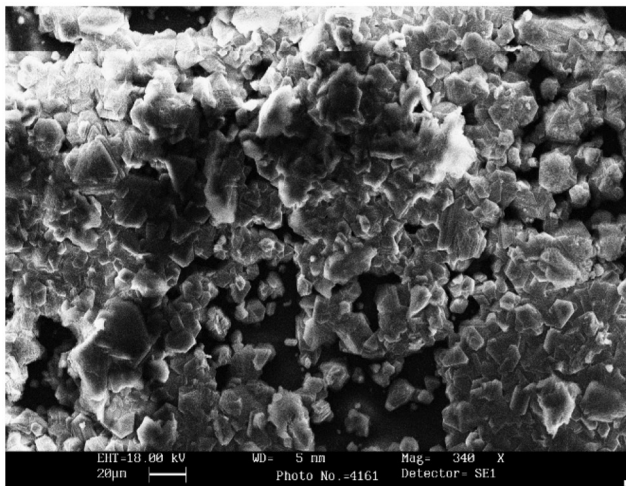


شکل ۳- منحنی اکسیداسیون TGA پوشش الکترولس Ni-B

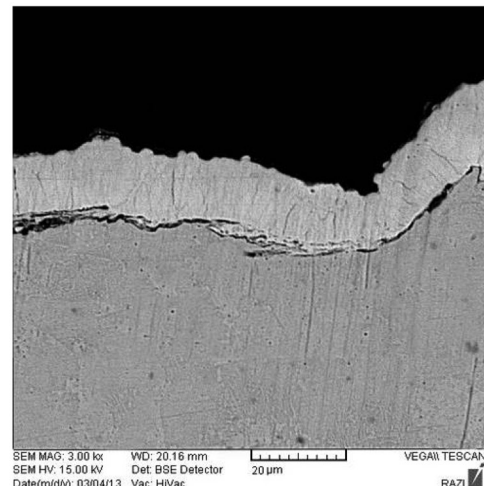
پوشش الکترولس بعد از آزمون اکسیداسیون در شکل ۵ نشان می‌دهد. NiO_2 ، B_2O فازهای جدید تشکیل شده در منحنی XRD نسبت به قبل از آزمون اکسیداسیون می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت تغییرات وزن صرفاً به جهت تشکیل اکسیدهای نیکل و بور می‌باشد. نتایج XRD بعد از گذشت ۲ ساعت از آزمون وجود فازهای اکسیدی NiO_2 و B_2O را نشان داد. این نشان می‌دهد که پایداری اکسید در طول آزمون اکسیداسیون در دستگاه TGA وجود دارد. پایداری اکسید نیکل یکی از عوامل موثر در مقاومت به اکسیداسیون می‌باشد.

شکل ۶ تصویر اسکن خطی از سطح مقطع پوشش را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد تغییر مسیر نفوذ اکسیژن در عرض پوشش با شیب غلظتی همراه نبوده است. بنابراین می‌توان گفت که پوشش در برابر نفوذ اکسیژن مقاومت خوبی از خود نشان داده است. همچنین نفوذ آهن در نیکل و نیکل در آهن به علت دمای پایین آزمون ایجاد نشده است.

در شکل ۴ مشاهده می‌شود دمای بالا همراه با اتمسفر اکسیژن باعث ترک خوردگی پوشش شده و نفوذ اکسیژن در پوشش بیشتر شده است. همانطور که در تصویر مشخص است، ترکهای ریز بصورت موازی در پوشش ایجاد شده است. همچنین اکسیداسیون پوشش الکترولس Ni-B باعث جدا شدن فصل مشترک بین پوشش و زیرلایه شده است. رفتار نمودار در زمان ۱۳۰۰۰ ثانیه تا پایان آزمون به صورت سهمی بوده است. در حین اکسیداسیون، ترک های ریز پوشش الکترولس Ni-B با تنش داخلی بالا در دمای ۶۰۰°C با اتصال به یکدیگر منجر به تولید ترکهای بزرگتری می‌شود و این باعث نفوذ بیشتر اکسیژن و در نتیجه افزایش شدت اکسیداسیون می‌شود. البته در موارد دیگر مشاهده شده است در شرایط غیر ایزو ترم پوشش در دمای خاصی دچار تغییر ساختار اکسید می‌شود؛ به عنوان مثال، آهن با دار بودن یون سه ظرفیت می‌تواند تشکیل اکسیدهای غیر استوکیومتری FeO ، Fe_2O_3 ، Fe_3O_4 را تشکیل داده و شیب تغییرات وزن در نمودار TGA عوض نماید. منحنی XRD از سطح

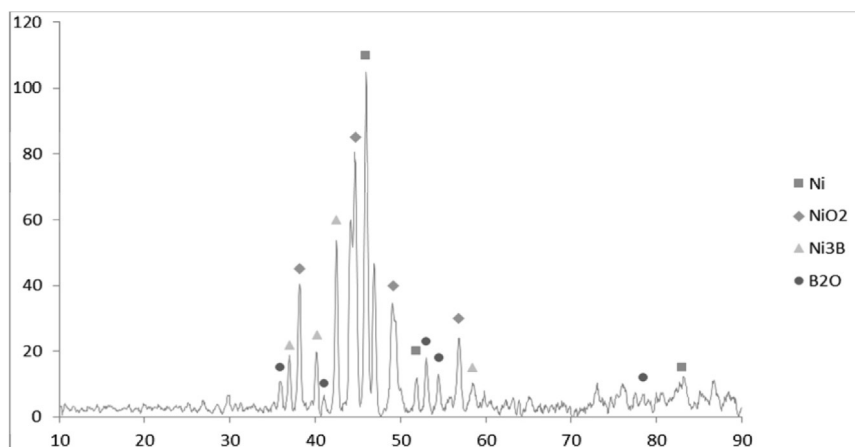


ب

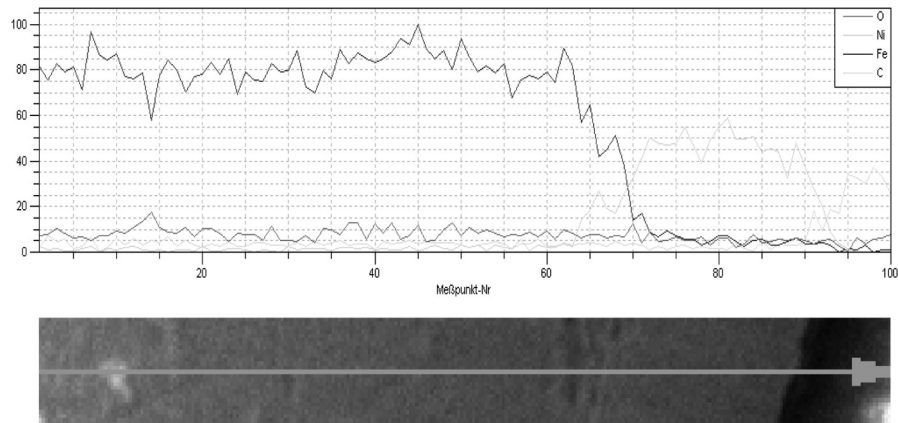


الف

شکل ۴- تصویر SEM پوشش الکترولس Ni-B بعد از آزمون TGA (الف) سطح مقطع پوشش (ب) سطح پوشش



شکل ۵- منحنی XRD پوشش الکترولس Ni-B بعد از آزمون اکسیداسیون توسط دستگاه TGA



شکل ۶- تصویر Line Scan از سطح مقطع شکل ۴

۳- اکسیدهای NiO_2 و B_2O تنها فازهای تشکیل شده در سطح پوشش پس از اکسیداسیون بوده است. بنابراین می توان گفت عامل افزایش وزن تشکیل این دو اکسید در پوشش بوده است. افزایش نرخ افزایش وزن در آزمون به دلیل ایجاد ترک در سطح پوشش می باشد. به طوری که ترک منجر به افزایش سطح موثر و ایجاد مکانهای مناسب برای تشکیل اکسید می نماید.

۴- نتایج آنالیز EDS خطی از سطح مقطع پوشش نشان می دهد که پوشش به عنوان یک صد قوی در برابر نفوذ اکسیژن به فصل مشترک و اکسیداسیون زیرلایه جلوگیری می کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از زحمات جناب آقای مهندس چمی مسئول آزمایشگاه دانشکده مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد بخاطر همکاری در انجام آزمون TGA و همچنین از جناب آقای دکتر ابراهیمی بخاطر کمک در نوشتن این مقاله صمیمانه تشکر می نمایم.

نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از آزمون اکسیداسیون پوشش الکترولس Ni-B توسط دستگاه TGA در دمای ۶۰۰°C به مدت تقریبی ۳ ساعت نشان می دهد:

۱- پوشش الکترولس Ni-B در شرایط آبکاری به صورت آمورف رسوب می کند و بعد از عملیات حرارتی فازهای Ni ، Ni_3B ، ایجاد می شود. همچنین اختلاف سختی پوشش قبل و بعد از عملیات حرارتی حدود 500 HV_{100} می باشد. افزایش شدید سختی در پوشش به علت استحاله کریستالی در پوشش الکترولس Ni-B می باشد.

۲- سطح موثر پوشش در برابر اکسیداسیون برابر با 248 mm^2 بوده است و پس از گذشت حدود ۳ ساعت در دمای ۶۰۰°C همراه با گاز اکسیژن حدود 14 mg افزایش وزن داشته است و این یعنی کمتر از ۴ درصد از پوشش اکسید شده است. بنابراین در مقایسه با سایر پوشش های دیگر در وضعیت های مشابه مقاومت به اکسیداسیون پوشش الکترولس Ni-B نسبتاً بالا می باشد.

مراجع

- [۱] م. قادری، ح. ایزدی، ا. چمی، پ. صفایی، "بررسی و مقایسه رفتار اکسیداسیون AZ91C بدون پوشش و به همراه پوشش الکترولس نیکل - فسفر" چهاردهمین سمینار مهندسی سطح، انجمن مهندسی سطح ایران، مهر ۱۳۹۲.
- [2] J. G. Mathieson, J. S. Truelove, and H. Rogers, "Toward an understanding of coal combustion in blast furnace tuyere injection," *Fuel*, vol. 84, no. 10, Jul. 2005, Pp. 1229–1237.
- [3] R. Elansezhian, B. Ramamoorthy, P. Kesavan Nair "Effect of surfactants on the mechanical properties of electroless (Ni-P) coating" *Surface & Coatings Technology*, Vol. 203, 2008, Pp. 709–712.
- [4] Z. Abdel Hamid, H.B. Hassan, A.M. Attyia, "Influence of deposition temperature and heat treatment on the performance of electroless Ni-B films" *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, 2010, Pp. 2348–2354.
- [5] V. K. Bulasara, O. Chandrashekar, R. Uppaluri, "Effect of surface roughness and mass transfer enhancement" *chemical engineering research and design*, Vol. 89, 2011, Pp. 2485–2494.

- [6] B. Jiang, L. Xiao, S.Hu, J. Peng, H. Zhang, "Optimization and kinetics of electroless Ni-P-B plating of quartz optical fiber" *Optical Materials*, Vol. 31, 2009, Pp. 1532-1539.
- [7] F. Delaunois, J. . Petitjean, P. Lienard, and M. Jacob-Duliere, "Autocatalytic electroless nickel-boron plating on light alloys," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 124, no. 2-3, Feb. 2000, Pp. 201-209.
- [8] a. a. Zuleta, O. a. Galvis, J. G. Castaño, F. Echeverría, F. J. Bolivar, M. P. Hierro, and F. J. Pérez-Trujillo, "Preparation and characterization of electroless Ni-P-Fe₃O₄ composite coatings and evaluation of its high temperature oxidation behaviour," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 203, no. 23, Aug. 2009, Pp. 3569-3578.
- [9] I. Sivandipoor, F. Ashrafzadeh, Synthesis and tribological behaviour of electroless Ni-P-WS₂ composite coatings, *Applied Surface Science*, Vol. 263, 2012, Pp. 314-319.
- [10] S.M. Monir Vaghefi, A. Saatchi, M. Ebrahimian-Hoseinabadi, "Deposition and properties of electroless Ni-P-B Ccomposite coatings" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 168, 2003, Pp. 259-262.
- [11] M. Ghaderi, S.M. Monirvaghefi, A. Saeedi, "Effect of roughness of the substrate on High-temperature wear behavior of electroless nickel-phosphorus coatings" *Advanced material and technology*, Vol. 2, 2013, Pp. 24-30,.
- [12] B. Q. Wang and Z. R. Shui, "The hot erosion behavior of HVOF chromium carbide-metal cermet coatings sprayed with different powders," *Wear*, vol. 253, no. 5-6, Sep. 2002, Pp. 550-557.
- [13] Y.S. Huang, F.Z. Cui, "Effect of complexing agent on the morphology and microstructure of electroless deposited Ni-P alloy" *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, 2007, Pp. 5416-5418.
- [14] Y. Chow, W. Lau, "Surface properties and Solderability Behaviour of Nickel-phosphorus and Nickel-boron Deposited by Electroless Plating" *Surface and Interface Analysis*. Vol. 45 , 2001, Pp. 31321-327.
- [15] G. Britain, U. D. O. Hofmannt, and P. Chemie, "On the oxidation of nickel phosphorous alloys" vol. 34, no. 3, 1993, Pp. 423-431.
- [16] Das L., Chin, D.T., "Electrochemical Porosity Measurement of EN Coating", *Plating and Surface finishing*, Vol. 84, 1996, Pp. 66-68.
- [17] F. Delaunois, P. Lienard, "Heat treatments for electroless nickel-boron plating on aluminium alloys" *Surface and Coatings Technology*, Vol., 160, 2010, Pp. 239-248.
- [18] S. Kalyan Das, P. Sahoo, "Tribological characteristics of electroless Ni-B coating and optimization of coating parameters using Taguchi based grey relational analysis" *Materials and Design*, Vol. 32, 2011, Pp. 2228-2238.
- [19] I. Baskaran, R. Sakthi Kumar, "Formation of electroless Ni-B coatings using low temperature bath and evaluation of their characteristic properties" *Surface & Coatings Technology*,. Vol. 200, Jan. 2006, Pp. 6888-6894.
- [20] Q. Rao, G. Bi, Q. Lu, H. Wang, and X. Fan, "Microstructure evolution of electroless Ni-B film during its depositing process," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 240, no. 1-4, Feb. 2005, Pp. 28-33.
- [21] T.S.N. Sankara Narayanan, K. Krishnaveni, S.K. Seshadri, "Electroless Ni-P/Ni-B duplex coatings: preparation and evaluation of microhardness, wear and corrosion resistance" *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 82, 2011, Pp. 771-779.