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

محمد قادری [۱*]، محسن رضا قلی زاده [۲]، سید محمود منیر واقفی [۳]

[۱و۲] دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، نجف آباد، اصفهان، ایران
[۳] دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

*** نویسنده مسئول: mo.ghaderi@yahoo.com**

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش: ../../....

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 ایزوترم حدود ۳ ساعت و گاز ورودی دستگاه اکسیژن انتخاب گردید. با توجه به داده های دستگاه و همچنین تصاویر SEM از سطح مقطع پوشش‌ها 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٪ می‌باشد. به علت سختی بالای پوشش HV_{100} ۱۰۸۵، تنش داخلی زیاد باعث شکست قسمتهایی از فصل مشترک پوشش و زیرلایه شده است.

کلمات کلیدی: پوشش الکترولس، Ni-B، اکسیداسیون، TGA، ایزوترم

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

Mohammad Ghaderi *, Mohsen Rezagholizadeh, Reza Ebrahimi-Kahrizsangi

[1,2] **Young Researchers and Elite Club, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan, Iran**

[3] **Associate professor, Materials Engineering Department, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Isfahan, Iran**

*** Corresponding Author: mo.ghaderi@yahoo.com**

Submission: ....,..,.. Acceptance: ....,..,..

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 HV_{100}1085, 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 جداره‌های خروجی گاز احتراق نظیر دودکش کوره‌ها و همچنین لوله های انتقال هوا گرم به داخل کوره ها می‌باشد و یا حتی در قطعات نظامی، صنایع هوایی و قطعات ریخته‌گی 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 توقفات زود هنگام، تخریب و خسارتهای مالی زیاد به منظور تعویض و جوشکاری نواحی خسارت دیده می‌شود. استفاده از پوشش‌های مناسب برای جلوگیری از اکسیداسیون می‌تواند هزینه تامین و نگهداری را تا حد ممکن کاهش دهد [۲].

امروزه پوشش‌های الکترولس یکی از روشهای پرکاربرد در صنایع است. این پوشش‌ها رفته رفته با بهبود پارامترهای آبکاری و خواص مکانیکی پوشش، جایگاه ویژه ای در صنایعی که تحت تاثیر عوامل خارجی نظیر محیطهای خورنده و سایشی به خود اختصاص داده‌اند. الکترولس پایه نیکل این از معروفترین دسته‌های آبکاری الکترولس می‌باشد [۳-۶] علت استفاده از نیکل به عنوان پایه برای آبکاری، خواص منحصربه فرد نیکل می‌باشد. از مزایای مهم این روش می‌توان 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 حمام‌هایی 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 پوشش‌های الکترولس Ni-P در مقایسه با پوشش‌های 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 روش‌ها

در این تحقیق از فولاد CK45 به عنوان زیرلایه پوشش الکترولس Ni-B استفاده شد. نمونه ها به شکل مکعب مستطیل به ابعاد ۱×۰/۴×۰/۴cm 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 نمونه‌ها تا درجه ۱۰۰۰ توسط کاغذ سنباده انجام گرفت سپس در استون تمیز شد و در مرحله بعد در محلول NaOH چربی‌زدایی گردید و در انتها در محلول ۱۰ درصد حجمی اسید سولفوریک اکسید زدایی و فعال سازی صورت گرفت. آبکاری نمونه‌ها 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 ۸۵±۲°C تنظیم‌شد.

بررسی رفتار اکسیداسیون پوشش الکترولس Ni-B توسط دستگاه TGA در دمای ۶۰۰°C و با نرخ حرارتی ۵°C/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 اتمسفر 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 ۵۰°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±2°C

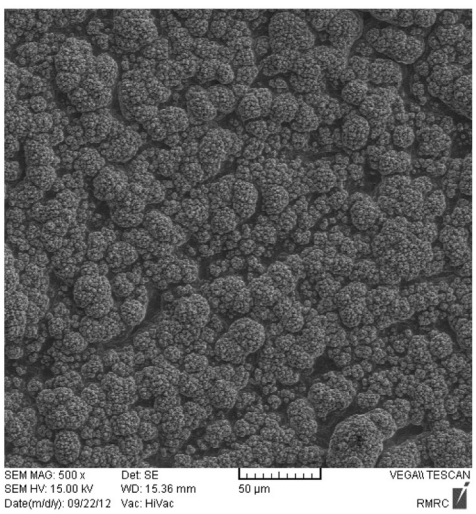
نرم افزار NETZSCH نویز گیری و تجزیه و تحلیل شد.
به منظور ارزیابی رفتار اکسیداسیون پوشش الکترولس، از دستگاه میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM Philips ML30) و آنالیز کمی EDAX استفاده شد. همچنین سختی پوشش توسط دستگاه میکرو سختی سنج توسط روش ویکرز با بار ۱N انجام گرفت.

بحث و نتایج

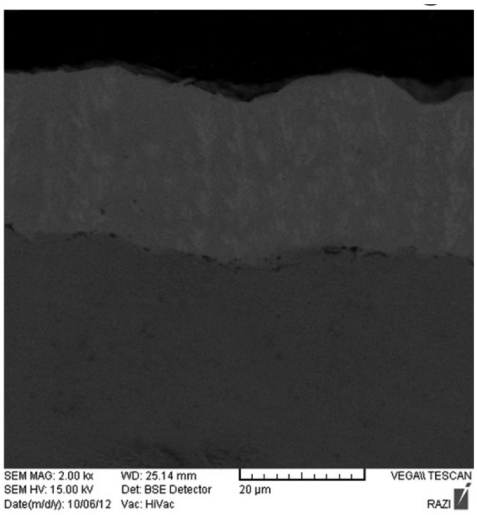
شکل ۱-الف تصویر SEM از سطح مقطع پوشش را نشان می دهد. با توجه به تصویر، ضخامت پوشش الکترولس Ni-B حدود ۲۵ µm می باشد. در شکل ۱-ب تصویر SEM مورفولوژی سطح پوشش الکترولس Ni-B را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ مشاهده میشود که مورفولوژی سطح پوشش شباهت زیادی به گل کلم (Cauliflower) و یا پوست پرتقال (Orange- peel) دارد. این ساختار از ویژگی های پوشش های الکترولس نیکل- فسفر و نیکل- بور می باشد [۱۳]. مورفولوژی سطح پوشش الکترولس Ni-B نسبت به پوشش Ni-P ریزتر می‌باشد [۱۴].
وزن اولیه نمونه قبل از آبکاری ۱۷۷۴ mg و وزن پوشش ۶۸ mg می‌باشد. سطح موثر نمونه تحت تاثیر اکسیداسیون برابر با ۲۴۸ mm بوده است. میزان اکسیداسیون پوشش پس از آزمون TGA در حدود ۱۴mg بوده است. با توجه به رابطه ۱ و با فرض عدم اکسیداسیون زیرلایه، درصد اکسیداسیون برای نمونه الکترولس تنها ۳/۷ درصد از پوشش تحت تاثیر اکسیداسیون در دمای ۶۰۰°C به مدت تقریبی ۱۷۲۰۰ ثانیه قرار گرفته است. بنابراین می‌توان گفت مقاومت به اکسیداسیون نمونه الکترولس Ni–B نسبت به پوشش‌های الکتریکی و پوشش های HVOF مقاومت بالاتری دارد [۱۵].

$$\frac{w_t - w_l}{w_t} \times ۱۰۰ \qquad (۱)$$

در اینجا wt وزن کل نمونه بعد از آزمون اکسیداسیون و wl 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 پوشش‌دهی دیگر بالا می باشد [۱۷-۱۹]. سختی پوشش الکترولس Ni-B بعد از عملیات حرارتی $۱۰۸۵\pm۵\ HV_{100}$ اندازی گیری شده است. درحالی که قبل از عملیات حرارتی سختی آن $۵۹۰\pm۵\ HV_{100}$ بدست آمده است. بنابراین تنش بالای پوشش امکان ترک دار کردن پوشش را تسهیل می کند 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 می باشد. به این معنی است که به جای اثرات آمورف، پیک های 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



ب

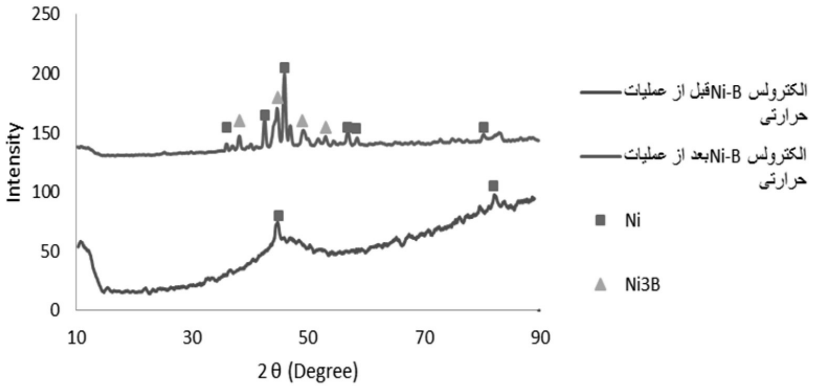


الف

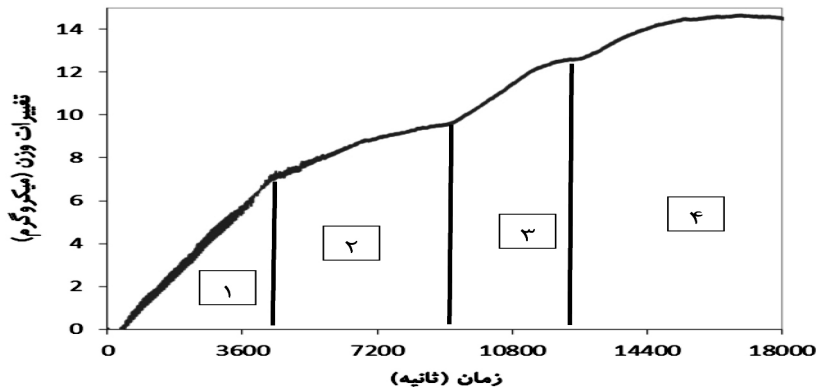
شکل ۱- تصویر SEM پوشش الکترولس Ni–B: الف) سطح مقطع پوشش ب) سطح پوشش

پوشش های الکترولس نیکل حدود ۳۳۰°C می باشد و افزایش دمای عملیات حرارتی منجر به کریستاله شدن بیشتر پوشش می گردد [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 می باشد. نتایج XRD و نیز تصویر سطح و سطح مقطع پوشش تشکیل فازهای اکسیدهای NiO_2، B_2O را ثابت می کند . همانطور که ملاحظه می شود، فاز Ni_3B که بعد از عملیات حرارتی پوشش ایجاد شده است در دمای ۶۰۰°C پایدار بوده و تجزیه نشده است. نمودار اکسیداسیون شامل چهار مرحله می باشد که در شکل آورده شده است. مرحله اول یا مرحله نخست شروع واکنش اکسیداسیون می باشد. 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.

در مرحله بعد سرعت اکسیداسیون به واسطه تشکیل و رشد فیلم‌های اکسیدی NiO و NiO_2 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 می کند. شدت اکسیداسیون منجر به جداسازی فصل مشترک زیرلایه و پوشش می‌شود. شیب افزایش وزن در این ناحیه بیشترین می باشد. به طوریکه در زمان بین ۹۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ اختلاف افزایش وزن نمونه تقریباً ۲/۵ mg بوده است. درصورتی که در ناحیه دوم (منطقه سهمی) تفاضل افزایش وزن ۱/۷ mg بوده است. در مرحله چهارم فازهای اکسیدی NiO تجزیه شده و فاز NiO_2 پایدار باقی می‌ماند. تشکیل اکسید شیشه ای B_2O غشای ضعیفی را برای اکسیداسیون بیشتر ایجاد می کند. 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.



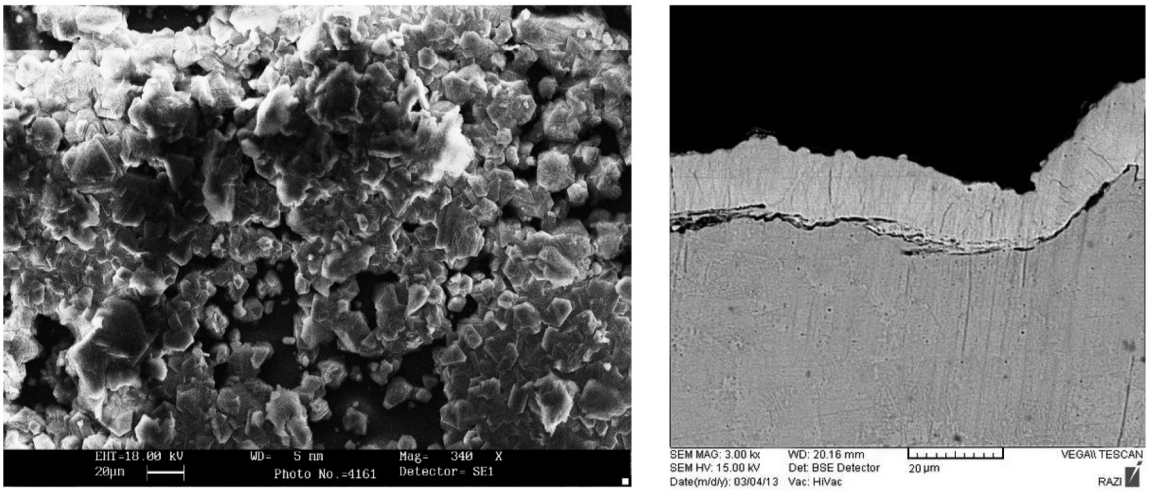
شکل ۲- منحنی XRD پوشش الکترولس Ni-B قبل و بعد از عملیات حرارتی



شکل ۳- منحنی اکسیداسیون TGA پوشش الکترولس Ni-B

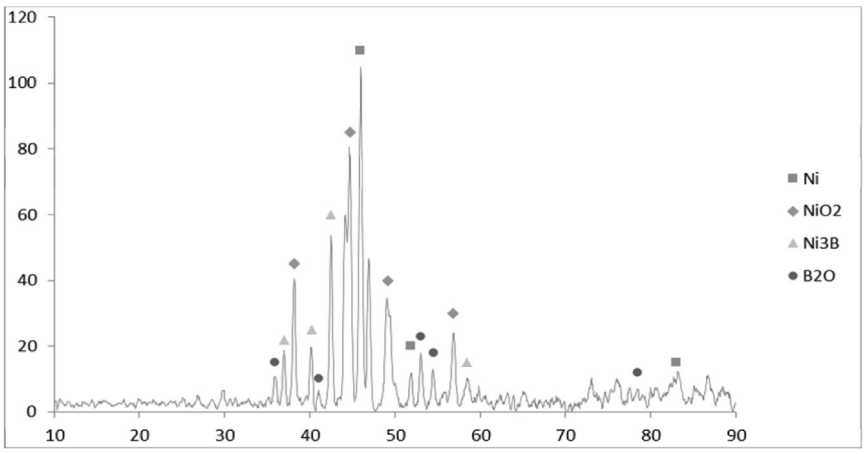
در شکل ۴ مشاهده می‌شود دمای بالا همراه با اتمسفر اکسیژن باعث ترک خوردگی پوشش شده و نفوذ اکسیژن در پوشش بیشتر شده است. همانطور که در تصویر مشخص است، ترکهای ریز بصورت موازی در پوشش ایجاد شده است. همچنین اکسیداسیون پوشش الکترولس Ni-B باعث جدا شدن فصل مشترک بین پوشش و زیرلایه شده است. رفتار نمودار در زمان 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 می شود. البته در موارد دیگر مشاهده شده است در شرایط غیر ایزوترم پوشش در دمای خاصی دچار تغییر ساختار اکسید می شود؛ به عنوان مثال، آهن با دار بودن یون سه ظرفیت می‌تواند تشکیل اکسیدهای غیر استکومتری FeO، Fe_2O_3، Fe_3O_4 را تشکیل داده و شیب تغییرات وزن در نمودار TGA عوض نماید. منحنی XRD از سطح پوشش الکترولس بعد از آزمون اکسیداسیون در شکل ۵ نشان می‌دهد. B_2O، NiO_2 فازهای جدید تشکیل شده در منحنی XRD نسبت به قبل از آزمون اکسیداسیون می‌باشد. بنابراین می توان 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 می باشد.

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.

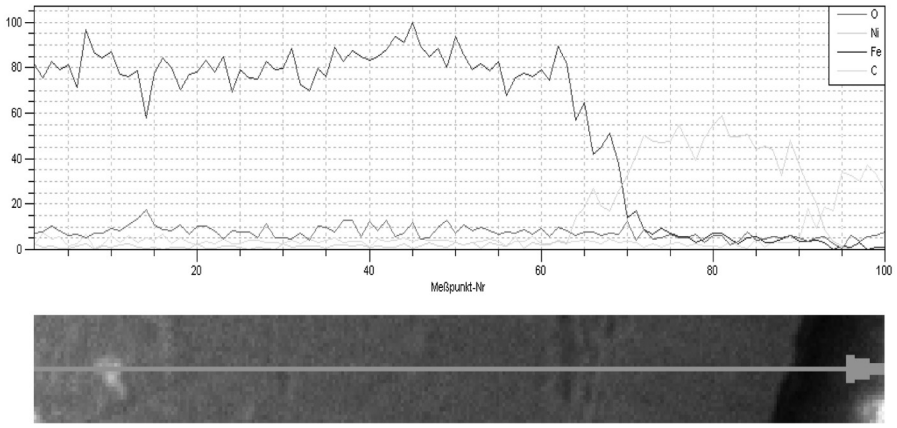


الف ب

شکل ٤- 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 ٤

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 می‌دهد:

۱- پوشش الکترولس Ni-B در شرایط آبکاری به صورت آمورف رسوب می کند و بعد از عملیات حرارتی فازهای Ni_3B، Ni، ایجاد می‌شود. همچنین اختلاف سختی پوشش قبل و بعد از عملیات حرارتی حدود HV_{100} ۵۰۰ می‌باشد. افزایش شدید سختی در پوشش به علت استحاله کریستالی در پوشش الکترولس Ni-B می‌باشد.

۲- سطح موثر پوشش در برابر اکسیداسیون برابر با ۲۴۸mm بوده است و پس از گذشت حدود ۳ ساعت در دمای ۶۰۰°C همراه با گاز اکسیژن حدود ۱۴ 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 می‌باشد.

۳- اکسیدهای NiO_2 و B_2O تنها فازهای تشکیل شده در سطح پوشش پس از اکسیداسیون بوده است. بنابراین می‌توان 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 نماییم.

مراجع

[۱] م. قادری، ح. ایزدی، ا. چمی، پ. صفایی، "بررسی و مقایسه رفتار اکسیداسیون AZ91C بدون پوشش و به همراه پوشش الکترولس نیکل ـ فسفر" چهاردهمین سمینار مهندسی سطح، انجمن خوردگی 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, pp. 1229–1237, Jul. 2005.

[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, pp. 709–712, 2008.

[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 pp. 2348–2354, 2010.

[5] V. K. Bulasara, O.Chandrashekar, R. Uppaluri, "Effect of surface roughness and mass transfer enhancement" chemical engineering research and design, Vol. 89, pp. 2485–2494, 2011.

[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, pp. 1532–1539, 2009.

[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, pp. 201–209, Feb. 2000.

[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, pp. 3569–3578, Aug. 2009.

[9] I. Sivandipoor, F. Ashrafizadeh, Synthesis and tribological behaviour of electroless Ni–P-WS2 composite coatings, Applied Surface Science, Vol. 263, pp. 314–319, 2012.

[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, pp. 259–262, 2003.

[11] M. Ghaderi, S.M. Monirvaghefi, A. Saeeidi, "Effect of roughness of the substrate on High-temperature wear behavior of electroless nickel-phosphorus coatings" Advanced material and technalogy, Vol. 2, pp. 24-30, 2013.

[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, pp. 550–557, Sep. 2002.

[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, pp. 5416–5418, 2007.

[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 pp. 31321-327, 2001.

[15] G. Britain, U. D. O. Hofmannt, and P. Chemie, "On the oxidation of nickel phosphorous alloys" vol. 34, no. 3, pp. 423–431, 1993.

[16]

[17] F. Delaunois, P. Lienard, "Heat treatments for electroless nickel–boron plating on aluminium alloys" Surface and Coatings Technology, Vol,. 160, pp. 239–248, 2010.

[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 pp. 2228–2238, 2011.

[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 pp. 6888–6894, Jan. 2006.

[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, pp. 28–33, Feb. 2005.

[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, pp. 771–779, 2011.