---مجلة علوم الرافدين, المجلد 17, العدد 2, خاص بالفيزياء, ص 22ـ32, 2006 ---

استخدام أوكسيد النيكل NiO كحاجز انتشاري لعملية الطلاء بالألمنيوم لسبيكة الصلب الأوستينايتي AISI 321

مؤيد عبد الله محمد **يحيى عبد الكريم السلمان**

قسم الفيزياء

كلية العلوم

جامعة الموصل

(تاريخ الاستلام 2005/9/7 ، تاريخ القبول 2006/3/27)

الملخص

تعد المركبات الألومينية الأكثر فعالية لمقاومة التأكسد والتآكل في درجات الحرارة العاليـة وذلـك لامتلاكها لادانة جيدة، فضلاً عن كونها قادرة على تكوين القشرة الأوكسيدية الواقية AL_2O_3 والتـي تعـد بدورها عازل حراري وكهربائي جيد ويتميز ببطئ معدلات نموها. حاولنا فـي هـذا البحـث تحـضير طلاءات الومينية على سطح سبيكة الصلب (AISI 321) باستخدام طريقة الـسمنته Pack-Cementation بعد أن تم تطعيم سطح السبيكة بطبقة رقيقة من أوكسيد النيكل باستخدام مواد لاصقة. وقد تم تعريض هذه الطلاءات لعمليات الأكسدة والتآكل الدوري في درجات حرارة عالية لتحديد مدى مقاومتها والتعرف على سلوكيتها ودراسة التراكيب لهذه الطلاءات عن طريق الفحص المجهري والأشعة السينية، تشير النتائج أن هذه الطلاءات لها مقاومة جيدة للتأكسد تحت الضغط الجوي الاعتيادي وفي درجة 900م°، في حـين لـم تقاوم التأكسد بوجود منصهر الملح Na_2SO_4 في درجة انصهاره 884م°.

Using of Nickel Oxide NiO as a Diffusion Barrier in Aluminide Coating on Austinitic Stainless Steel AISI 321

Moayad A. Mohammad **Yahya A. Al-Salman**

Deparment of Physics

College of Science

Mosul University

ABSTRACT

Aluminum compounds are the most effective to resist the oxidation and corrosion at high temperature, because it has a good ductility and its capability to form a protective oxide scale Al_2O_3, such Alumina scale is known as thermally and electrically insulator

and characterized with slow gowning rate. In this research we tried to prepare aluminide coating on austinitic stainless steel AISI 321, using a pack-cementation technique. The alloy surfaces were doped with a thin nickel oxide layer before aluminising using an adhesive materials. The coating produced was subjected to a cyclic oxidation and hot corrosion tests. The coating structure and coating behaviour after the treatment were studied using X-rays and optical microscope. The coatings produced were posses a high resistance to oxidation under atmospheric pressure at 900°C, but not in presence of a molten salt Na_2SO_4 at 884°C.

المقدمة

تعد ألمَنَة السبائك بطريقة السمنتة (Pack Cementation) الطريقة المثالية للحصول على سطح سبائكي مقاوم للعديد من أشكال التآكل في درجات الحرارة العالية ومنها الأكسدة والكبرتة والكربنة. وهذه التقنية هي إحدى أنواع الترسيب الكيميائي للبخار(Chemical Vapor Deposition) وتستخدم بشكلٍ واسع كونها من التقنيات التي لا تحتاج إلى معدات متطورة ومعقدة، فضلاً عن كونها مناسبة اقتصادياً ومضمونة النتائج .

وببساطة فإن العملية هي إغناء سطح السبيكة بالألمنيوم لضمان تكوين طبقة واقية من الألومينا α-Al_2O_3 عند درجات الحرارة العالية، ولكون هذا الأوكسيد هو من الأكاسيد المستقرة حرارياً وعازل كهربائياً ويتميز ببطء نموه.

ومن المعروف أن المنة سبائك النيكل والصلب الأوستينايتي والفيرايتي ينتج عنه تكوين المركبات الوسطية هي النيكل – ألمنيوم والحديد – ألمنيوم للنيكل والصلب على التوالي، وتعتمد تكون هذه الأطوار على نسبة تركز الألمنيوم وبموجب مخطط الأطوار المعروفة تبعاً لدرجة الحرارة والزمن وطريقة تنفيذ عملية الألمنة.

ويمكن تلخيص آلية تنفيذ الطلاء بطريقتين:

1. الطلاء الانتشاري (Diffusion Coating): وباستخدام هذه الآلية تتكون طبقة من NiAl أوCOAl أو FeAl على سطوح السبائك ذات الأساس Ni أو Co أو Fe على التوالي وبدرجات حرارة تتراوح بين 800-1000م°.

2. الطلاء بالتغطية (Overlay Coating): وغالباً ما تنفذ بعمليات ترسيب المعدن أو سبيكة المعادن مثل MCrAl و MCrAlY، حيث تمثل M واحداً من العناصر مثل Ni أو Co أو Fe بطريقة الترسيب الفيزيائي للبخار (PVD) أو الرش بالبلازما(Plasma Spraying) بدرجات حرارية واطئة نسبياً، لذا يخضع هذا النوع من الطلاء إلى عمليات تجانس حراري ما بعد الطلاء من أجل تعزيز الالتصاقية الجيدة للطلاء.

وأياً كانت التقنية المستخدمة تبقي مشكلة تناقص تركيز الألمنيوم عند السطح ومقدرته على تكـوين القشرة الأوكسيدية هو الذي سوف يحدد عمر الطلاء (Susan, 1999)، لأن تناقص تركيز الألمنيوم مـن السطح بسبب انتشاره إلى عمق السبيكة أو بسبب مساهمته في تكوين القشرة الأوكسيدية الواقيـة Al_2O_3 وتساقطها لمرات عديدة تتزايد مع ارتفاع درجات الحرارة، لذا وجه الباحثين أنظارهم لاسـتخدام المـواد السيراميكية كحواجز حرارية (Thermal Barrier) وتكتب اختصاراً (TBC) للتقليل من عمليات انتـشار الألمنيوم إلى عمق السبيكة. إن مشكلة استخدام المواد السيراميكية وبسبب اختلاف معامـل تمـددها مـع السبيكة ينتج عنها تكسر الطلاءات وتساقطها وتحديداً بسبب الإجهادات الحرارية التي ترافقها أثناء الخدمة وبالتالي فشلها مبكراً. لقد أثبتت الدراسة الشاملة لاستخدام المواد السيراميكية كحـواجز حراريـة والتـي أجريت من قبل الباحث (Levi, 2004)، أنه ما زال هناك الكثير على قائمة المواد الـسيراميكية تنتظـر الباحثين ومنها استخدام الطبقات المتعددة (Multilayer Coating)، في حين تؤكد بعض البحوث على أن استخدام Y_2O_3 قد أسهم في تعزيز مقاومة الطـلاء لظـروف التأكـسد (Houngninou et al., 2004) والتكبرت (Wada et al., 2001)، كما أثبتت دراسة أخرى (Katsman et al., 2000) أن طبقة الطـلاء NiAl، Ni_2Al_3 المحضرة بطريقة ترسيب النيكل والألمنيوم بعمليتين منفصلتين على سبيكة ذات أسـاس TiAl أظهرت مقاومة جيدة للتأكسد في درجات الحرارة العالية، وكذلك تفعل طبقة Ni_2Al_3 على سـبيكة الصلب الأوستينايتي 321 (سلمان، 2004).

أشارت إحدى الدراسات (Yu et al., 2005)، إلى أن استخدام المواد السيراميكية على طبقة الطلاء NiAl المرسبة من الحالة البخارية على سبيكة النيكل بواسطة الحزمة الإلكترونية يمكـن أن تقلـل مـن عمليات الانتشار المتبادل بين عناصر السبيكة وعناصر الطلاء، كما أظهرت دراسة أخرى بأن ترسـيب طبقة Ni_3Al بواسطة الرش بالبلازما على بعض سبائك الصلب مقاومة عالية للتأكسد والتآكـل بوجـود مزيج مـن المحلـول الملحـي Na_2SO_4 و 60% مـن V_2O_5 عنـد تعرضـها للـدورات الحراريـة (Buta singh and Prakas, 2002)، وأظهرت دراسة أخرى إلى أن إضافة بعـض العناصـر النـادرة (RE elements) وخاصةً Hf و pt لسبيكة NiAl لم تسهم في تعزيز مقاومتها للتأكسد والتآكل، بينما كان لعنصر الكروم Cr الدور الفعال في زيادة مقاومتها (Leyens et al., 2000)، ويعتقد أيـضاً أن لطريقـة ترسيب المركب NiAl دوراً في تعزيز مقاومته (Zhang et al., 1999).

ومما لا شك فيه أن مقاومة الطلاءات لاتعتمد فقط علـى تقنيـات الترسـيب ونوعيـة العناصـر المستخدمة، بل تحدد نوعية الطلاء الناتج، حيث أن الطلاءات المحضرة بترسيب عنصر النيكل قبل عملية الألمنة بطريقة السمنتة على سبيكة الصلب الأوستينايتي 321 أدى إلى تكـوين مركبـات وسـطية مـن النيكل – ألمنيوم بدلاً من حديد – ألمنيوم وأظهرت مقاومة جيدة للتأكسد والتكبرت بدرجـة 1000م عنـد مقارنتها بالطلاء الأولوميني البسيط (العبيدي، 2005)، إلاّ أن عمليات التبادل الانتـشاري بـين عناصـر الطلاء والسبيكة، أسهمت في تناقص تركيز الألمنيوم وتحول الأطوار الغنية للألمنيوم إلى الأطوار الغنيـة بالنيكل وبالتالي سهولة تكوين مركبات كبريتية للنيكل والحديد.

يهدف هذا البحث إلى دراسة سلوكية القشرة الواقية المتكونة على سطح الطلاء المحضر باستخدام أوكسيد النيكل كطبقة أولية قبل الألمنة، استخدمت الأشعة السينية للتعرف على الأطوار المتكونة لطبقة الطلاء الخارجية وكذلك نوع الأكاسيد، كما استخدم المجهر الضوئي لفحص بنيه الطلاء للمقاطع العرضية للطلاءات، وتمت دراسة حركية كلاً من التأكسد والتآكل بوجود المحلول الملحي Na_2SO_4 وبطريقة الدورات الحرارية.

الجزء العملي

تعد عملية تحضير العينة قبل عملية الطلاء وسيلة من الوسائل الضرورية لنجاح عملية الطلاء، تم تحضير العينة من الصلب الأوستيناتي نوع AISI 321 وبأبعاد (20 x 1mm) الجدول (1)، تم إجراء عملية إزالة الأكاسيد الموجودة على السطح وتحضير النموذج باستخدام الطرق المعروفة.

الجدول 1 : نسب العناصر المكونة للصلب الأوستيناتي AISI 321.

Alloy Type AISI321	C%	Mn%	Si%	Ni%	Cr%	S%	Ti	Fe
Stainless Steal	0.0544	1.477	0.607	8.936	18.636	0.0015	0.21	Balance

عملية الطلاء

تمت عملية الألمنة للعينة المحضرة باستخدام طريقة السمنتة (Pack Cementation) وهي إحدى طرق الطلاء الانتشاري. وقبل عملية الألمنة تم تغطية سطح العينة بطبقة رقيقة من أوكسيد النيكل NiO واستخدم في التغطية مادة لاصقة (Binder Material)، ثم غمرت العينة في بودقة تحتوي على مسحوق الطلاء الذي يتكون من مسحوق عناصر الطلاء وهما النيكل والالمنيوم ومسحوق منشط NH_4Cl وحشوة Al_2O_3 كما في الجدول (2)، ثم يوضع المسحوق والعينة المراد طلائها في بودقة مغلقة، وبعد ذلك وضعت البودقة في فرن كهربائي مفرغ من الهواء بدرجة (1000C°) ولمدة (4 ساعة).

الجدول 2 : نسب مكونات المسحوق المستخدم في الطلاء.

Material	Al_2O_3	NH_4Cl	Al	Ni
Wt %	71	4	12.5	12.5

عملية الأكسدة

تمت عملية الأكسدة بتهيئة العينة وذلك بتنظيفها بالماء والصابون، ثم تجفف العينة وتوزن بميزان حساس قبل الأكسدة لتثبيت الوزن الأصلي. يسخن الفرن إلى درجة الحرارة المطلوبة (900C°) يتم إدخال العينة إلى داخل الفرن، وبعد انقضاء الفترة الزمنية المحددة يتم إخراج العينة لتبرد إلى أن تصبح حرارتها

بدرجة حرارة الغرفة ويعاد وزنها مجدداً لمعرفة التغيير الحاصل في الوزن. وهكذا تتكرر العملية طيلة الفترة التي تتعرض لها العينة للأكسدة، وقد تم أكسدة العينة لفترة أكثر من (165) ساعة بطريقة أكسدة الدورات الحرارية (Thermal Cyclic Oxidation).

اختبار الكبرتة

تم إجراء اختبار الكبرتة على العينة المطلية باستخدام بودقات تحتوي على مسحوق الملح(Na_2SO_4) عند درجة انصهاره (884C°) بطريقة الدورات الحرارية، حيث بلغت مدة كل دورة (24) ساعة.

تم تهيئة العينة المطلية وذلك بتنظيفها بالماء والصابون، ثم تجفف وتوزن قبل الاختبار، ثم توضع في البودقة الحاوية على مسحوق الملح (Na_2SO_4) ويتم إدخالها إلى الفرن عند الدرجة الحرارية(884C°) ولمدة (24) ساعة، ثم تخرج من الفرن لتبرد، وبعد ذلك يتم وزنها لمعرفة التغيير الحاصل في الوزن. وبتكرار العملية حتى يصبح مجموع زمن بقائها في الفرن أكثر من (165) ساعة. ومن هذا الاختبار يتم التعرف على حركية الكبرتة (Kinetic of Sulphadation).

الفحص المجهري

أجريت الفحوصات المجهرية بعد كلاً من عمليتي الطلاء والأكسدة واختبار الكبرتة، وذلك بأخذ مقاطع من هذه العينات، وقد أجري عليها التنعيم (Grinding) باستخدام ورق تنعيم بدرجات (220 - 400 - 1200) ثم صقلت باستخدام محلول الألومينا، ثم غسلت بالماء والصابون وجففت، وبعد ذلك تمت عملية الإظهار (Etching) باستخدام محلول النايتال (Nital) الذي يتكون من (HNO_3 2%) والكحول النقي (98%).

التحليل السطحي

تم إجراء التحليل السطحي للعينات بطريقة حيود الأشعة السينية لمعرفة الأطوار المتكونة على سطوح العينات بعد كلاً من عمليات الطلاء والأكسدة والكبرتة، وذلك بمقارنتها مع الجداول القياسية.

النتائج والمناقشة

تشير نتائج الفحص المجهري للمقاطع العرضية للطلاءات الناتجة إلى وجود طبقة طلائية غير متجانسة السمك وتتميز باحتوائها على أكثر من طور واحد، أي طور أساسي يمثل قاعدة الطلاء (Coating Matrix) وآخر ثانوي يظهر بشكل جزر موزعة على قاعدة الطلاء، (الشكل 2)، كما أظهرت نتائج حيود الأشعة السينية نموذجاً للحيود يحتاج إلى الكثير من العناية في التحليل نظراً لكون أن المركبات المتكونة والأوكسيد NiO يتطابق مع أكثر من ذروة واحدة مع الطور NiAl الغني بالنيكل (Ni-rich NiAl) والذي يقترب تركيبه البلوري من الطور Ni_3Al، كما تشير نتائج الأشعة السينية إلى تكون الطور Cr_2Al (الجدول 3).

الجدول 3 : نتائج حيود الأشعة السينية (XRD) للعينة المطلية بدرجة حرارة (1000C°) لمدة (4 ساعات).

نوع الطور	الشدة النسبية
Ni_3Al	VS
Cr_2Al	VS
NiAl	S

S = strong VS = very strong

إن ظهور هذه الأطوار إنما تدل على أن أوكسيد النيكل المرسب أولاً لم يعترض انتشار عنصري الألمنيوم والنيكل إلى سطح السبيكة الأساس.

وبما أن تركيزنا في هذا البحث منصباً حول دراسة مقاومة الطلاء للتأكسد والتكبرت (بوجود منصهر الملح Na_2SO_4) بطريقة الدورات الحرارية، فسنتناول كلاً من هاتين العمليتين على انفراد.

1. تشير نتائج حركية الأكسدة للطلاء (الشكل 1)، إلى أن هناك تغير ملحوظ في الوزن خلال الساعتين الأوليتين، أي أن معدل التأكسد خلال هذه الفترة كان أكبر من الفترات اللاحقة، ويعزى ذلك إلى تكون القشرة أو القشرات الأوكسيدية، أما التذبذبات الحاصلة لبقية الفترة الزمنية فقد تكون ناشئة عن تساقط أجزاء من الأوكسيد المتشكل وسرعان مايستعيد هذا الأوكسيد تكونه بعملية الاندمال.

ومن الملاحظ من دراسة حركية التأكسد، عدم وجود تناقص في الوزن الحقيقي للنموذج طيلة فترة المعاملة، وهذا ما يؤكد حقيقة أن القشرة الأوكسيدية كانت توفر قدراً من الحماية للنموذج المطلي، ويؤكد الفحص المجهري للطلاء هذه الحقيقة كون أن طبقة الطلاء الألوميني لم تتعرض إلى التشققات التي تنشأ عادةً بسبب التأكسد الداخلي للطبقة بالرغم من تكون بعض الفجوات خاصة بالقرب من السطح الخارجي للطلاء (الشكل 3). إن اتباع عمليات الأكسدة الدورية كانت تهدف إلى التعجيل بتساقط القشرة الأوكسيدية الواقية بسبب نشوء الإجهادات الحرارية (الناتجة من اختلاف معامل التمدد الحراري للقشرة والسبيكة الاساس الذي يقود الى تمزق القشرة الاوكسيدية) وكذلك الاجهادات الميكانيكية الناشئة عن اختلاف حجم الاوكسيد المتكون وحجم المعدن المستهلك لتكون ذلك الاوكسيد، إلاّ أن ذلك لم يحدث وهذا قد يشير إلى الالتصاقية الجيدة للقشرة الأوكسيدية مع طبقة الطلاء، حتى لو افترضنا حدوث بعض التقشرات أثناء فترة التأكسد فإن سرعة استعادة تكون القشرة الأوكسيدية Al_2O_3 على السطح يدل على وجود وفرة من الألمنيوم لضمان تكونه من جديد في الدورات اللاحقة، وهذا الاستنتاج تعززه نتائج الأشعة السينية (الجدول 4)، التي تؤكد وجود القشرة الواقية Al_2O_3 في نهاية المطاف. كما تؤكد النتائج وجود الأوكسيد NiO، في حين لم يؤشر تكون الأكاسيد الثنائية (Spinal) مثل (Fe,Ni)O، ويبدو أن الأوكسيد NiO قد نما خلال مراحل التأكسد عن طريق أخذه بالأوكسجين (Oxygen Gettering) وربما تحول قسماً منه إلى الأوكسيد Ni_2O_3.

الجدول 4 : نتائج حيود الأشعة السينية (XRD) للعينة المؤكسدة بدرجة حرارة (900C°).

نوع الطور	الشدة النسبية
Al_2O_3	VS
NiO	VS
Ni_2O_3	S
NiAl	S

S = strong VS = very strong

ومما يجب ملاحظته أن طور الطلاء لم يتحول إلى الأطوار الأقل تركيزاً للألمنيوم مثل Ni_3Al كما هو متوقع، بل أصبح في الحالة المتوازنة (Stoichiometric NiAl) بعد أن كان يمثل الطور الغني بالنيكل، وهذا ما قد يفسر الدور الذي لعبه الأوكسيد NiO، حيث أن الطلاء بهذا الأوكسيد قبل عملية الألمنة يمكن أن يتسبب في تقليل الحرارة التي تتعرض لها طبقة الطلاء، وهذا بالتالي يقلل من احتمالية انتشار الألمنيوم إلى عمق السبيكة الأساس، وبذلك يحافظ على تركيز الألمنيوم عالياً عند سطح الطلاء ويساعد على ضمان استمرارية تكون القشرة الأوكسيدية الواقية Al_2O_3 من جهة، كما يقلل من الإجهادات الحرارية التي تتعرض لها طبقة الطلاء والتي قد ينشأ عنها تكسرات طبقة الطلاء من جهة أخرى.

أي أن الأوكسيد NiO يتصرف كحاجز حراري (Thermal Barrier)، وفي الوقت ذاته فإنه قد يقلل من احتمالية الانتشار المعاكس لعناصر السبيكة الأساسية والتي قد تسهم بدورها في تكوين أكاسيد ثنائية أسفل القشرة الواقية Al_2O_3 وهذه الأكاسيد الثنائية معروفة بانخفاض درجة انصهارها وإن تكونها يتسبب في انفصال القشرة الواقية وتساقطها، وفي هذه الحالة فإن الأوكسيد NiO يتصرف كحاجز انتشاري (Diffusion Barrier).

2. أظهرت نتائج حركية التأكسد بوجود المنصهر الملحي Na_2SO_4 (الكبرتة) وفي درجة حرارة انصهار الملح 880 م° (الشكل 1)، إلى عدم وجود تغير ملحوظ في الكتلة لغاية ما يقرب من 90 ساعة، حيث يبدأ بالتناقص المفاجئ، وهذا يعني بداية انهيار الطلاء، ولمتابعة هذا التناقص استمرت عملية الكبرتة حتى انقضاء الفترة الزمنية (170) ساعة، ومن ملاحظة الشكل (1)، يبدو أن الفترة الزمنية التي أعقبت الانهيار السريع، كان هناك فترة زمنية كان التناقص خلاله لايزيد عن 0.01 غم/سم^2، مما يعني أن الطلاء ما زال قادراً على تكوين القشرة الأوكسيدية الواقية Al_2O_3. أظهر الفحص المجهري لمقاطع الطلاء (الشكل 4)، تحوله إلى ما يشبه جزر طلائية بسبب حدوث ما يعرف بالتآكل ما بين الحبيبات (Intergranular Corrosion) وهذا يحصل عادةً عند حدوث تشقق أو تكسر وتساقط القشرة الأوكسيدية الواقية من بعض المواقع على السطح.

تظهر نتائج الأشعة السينية الجدول (5) إلى أن الطبقة الطلائية ما زالت تتمثل بـالطور المتـوازن NiAl مع وجود القشرة الأوكسيدية الواقية Al_2O_3، كما تؤكد وجود بعض المركبات الكبريتيـة للحديـد والنيكل NiS , FeS والأوكسيد NiO أن تكون المركبات الكبريتية مع بداية المراحـل الأولـى لعمليـات الكبرتة كانت السبب الرئيس في تساقط القشرة الأوكسيدية الواقية، أي بعـد 90 سـاعة، كـون أن هـذه المركبات تتميز بانخفاض درجة انصهارها من ناحية، وعدم مواءمتها مع القشرة الواقية من ناحية أخرى.

الجدول 5: نتائج حيود الأشعة السينية (XRD) للعينة المكبرتة في منصهر(Na_2SO_4) بدرجةحرارة(884C°).

نوع الطور	الشدة النسبية
Al_2O_3	VS
NiAl	S
NiO	VS
FeS	S
NiS	S

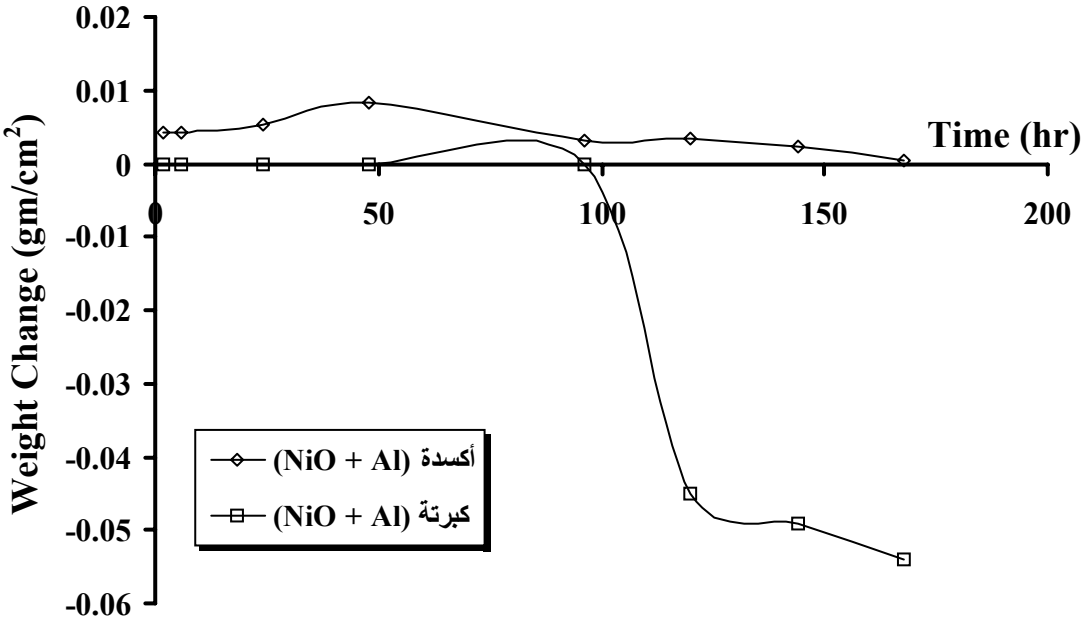
S = strong VS = very strong

ومن الجدير ملاحظة درجة الحرارة لعمليات الكبرتة وهي 884 م° مقارنة بدرجة حرارة التأكـسد 900 م° ومنها يمكن التعرف ببساطة على التأثير الذي أحدثه وجود المنصهر الملحي ودوره في التعجيـل بتساقط القشرة الواقية وبالتالي تقليل مقاومة الطلاء للتآكل.

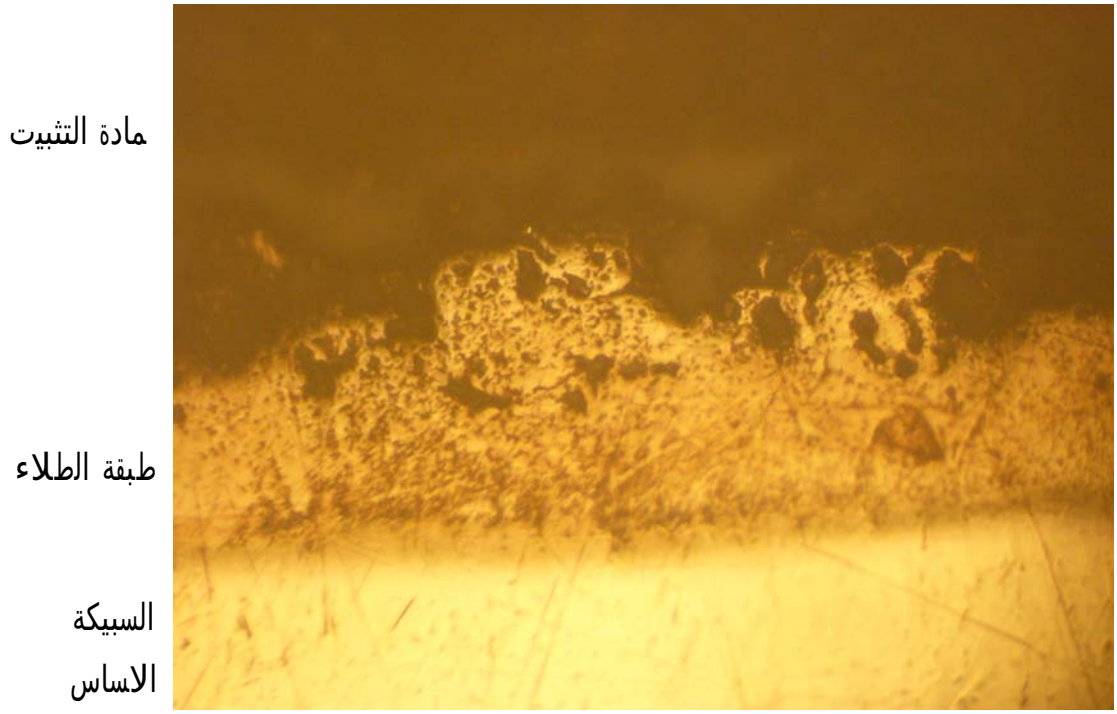
الاستنتاج

من النتائج التي حصلنا عليها ، يمكن استنتاج ما يأتي :

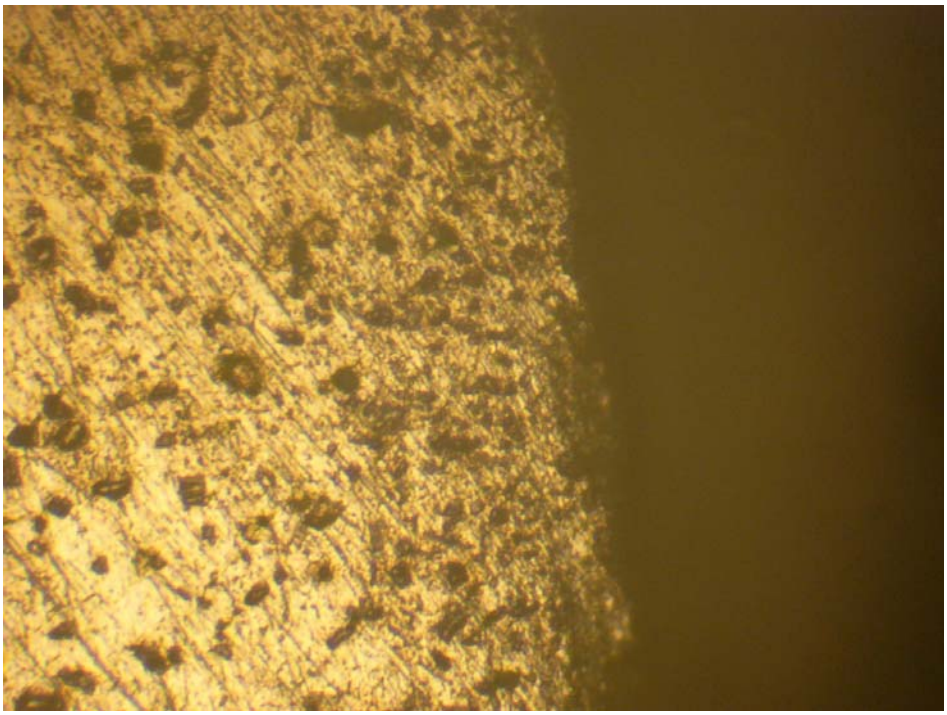
1. استخدام عنصري النيكل والألمنيوم كمزيج داخل بودقة الطلاء يفيد في الحصول على مركب طلائـي من NiAl بدلاً من FeAl.
2. استخدام أوكسيد النيكل كطلاء أولي قبل عملية الألمنة لايعيق انتشار الألمنيوم إلى داخل سطح السبيكة لتكوين الطبقة الطلائية.
3. يمكن أن يتصرف أوكسيد النيكل كحاجز حراري وبذلك تقل احتمالية استمرار انتشار الألمنيوم إلـى عمق السبيكة أثناء المعاملة الحرارية وبذلك يحافظ على تركيز الألمنيوم عالياً عند الـسطح لـضمان تكوين القشرة الأوكسيدية الواقية Al_2O_3.
4. يمكن استخدام هذا الأوكسيد (NiO) في الظروف التأكسدية ولا يصح استخدامه في الأجواء الحاويـة على الأملاح والمركبات الكبريتية.



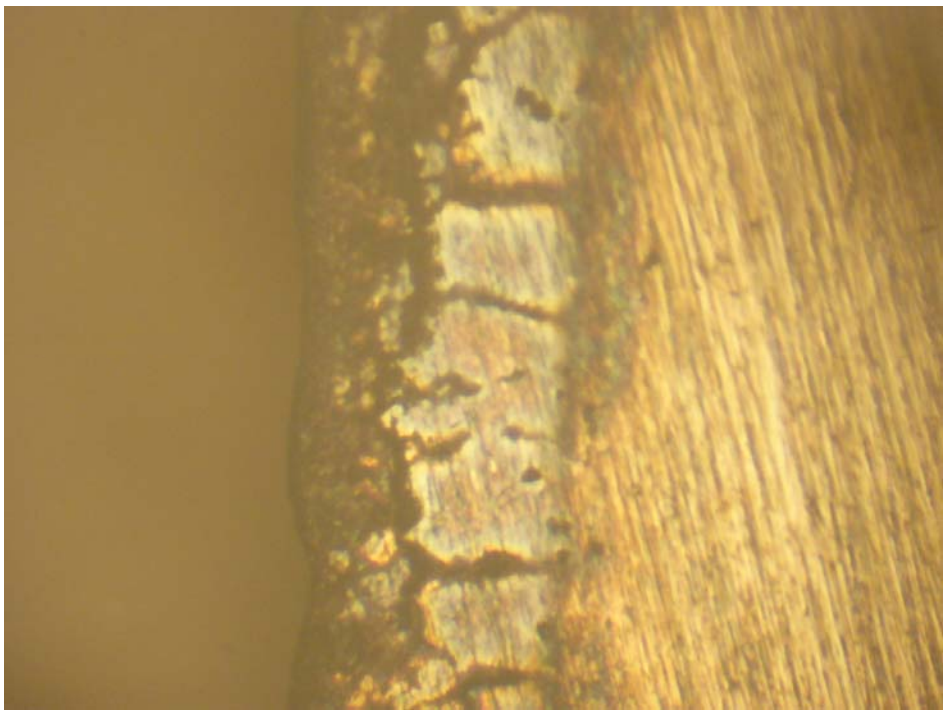
الشكل 1: العلاقة بين التغير الحاصل في الوزن مع الزمن لأكسدة السبيكة المطلية بالألمنيوم بعد تغطيتهـا بطبقة من أوكسيد النيكل NiO وكبرتة السبيكة نفسها.



الشكل 2 : التركيب المجهري للسبيكة المطلية بدرجة حرارة ($1000^{o}C$).



الشكل 3: التركيب المجهري للسبيكة المؤكسدة بدرجة حرارة (900^0C).



الشكل 4: التركيب المجهري للسبيكة المكبرتة في منصهر (Na_2SO_4) بدرجة حرارة (884^oC).

المصادر العربية

سلمان، يحيى عبدالكريم، 2004. تأثير تركيز النيكل على مقاومة التأكسد الدوري لسبيكة الفولاذ الأوستنايتي نوع 321، مجلة علوم الرافدين، المجلد 16، ص 5-11.

العبيدي، أدريس عيدان، 2005. التآكل الحار لطبقات الطلاء (Ni-Al) على الفولاذ المقاوم للصدأ 321، أطروحة ماجستير، كلية العلوم، جامعة الموصل.

المصادر الاجنبية

Buta Singh Sidhu and Prekash, S., 2003. Evaluation of the Corrosion Behaviour of Plasma-Sprayed Ni_3Al Coatings on Steel in Oxidation and Molten Salt Environments at 900C°, Surface and Coatings Technology, 16, pp.89-100.

Carlos, G., Levi, 2004. Emerging Materials and Processes for Thermal Barrier Systems, Solid State and Materials Sci., pp.77-91.

Donald Susan, 1999. Improved Corrosion Protection by In-Situ Intermetallic Composite Coating, Energy Research Center, Bethlehem, PA 18015.

Edaan, A., 2005. Hot Corrosion of Ni-Al Coatings on Stainless Steel AISI 321, M. Sc. Thesis, Mosul University.

Houngninou, C., Chevaliev, S. and Larpin, J.P., 2004. High Temperature Oxidation Behaviour of Aluminide Coating Obtained by Pack Cementation, Accepted in Materials Sci. and Erg.

Katsman, A., Ginzburg, A., Werber, T., Cohen, I. and Levin, L., 2000. Nickel-Aluminide Coating of TiAl by Two-Stage Process, Surface and Coatings Technology, Vol. 12, pp. 220-223.

Leyens, C., Pint, B.A. and Wright, I.G., 2000. Effect of Composition on the Oxidation and Hot Corrosion Resistance of NiAl Doped with Precious Metals, Surface and Coatings Technology, 13-14, pp.15-22.

Wada, K., Yan, L., Takahashi, M., Takahashi, K. and Furukawa, T., 2001. Degradation of Gas Turbine Blade Materials in Integrated Coal-Gasification Combined Cycle Plant, Materials at High Temperature Vol. 2, No. 18, pp.131-138.

Yu, Z., Hass, D.D. and Wadley, H.N.G., 2005. NiAl Bond Coats Made by A Directed Vapor Deposition Approach, Materials Sci. and Engineering. A 394, pp.43-52.