------مجلة علوم الرافدين، المجلد 27، العدد 1، ص 118-124، 2018------

استخدام اوكسيد اليتيريوم (Y_2O_3) كحاجز انتشاري لعملية الطلاء بالألمنيوم لسبيكة الكوبلت Fsx414

يحيى عبد الكريم سلمان **عادل محمود علي**

قسم الفيزياء/ كلية العلوم/ جامعة الموصل قسم التقنيات الميكانيكية/ المعهد التقني

(أُستلم 28/ 7 /2013 ؛ قُبل 5 /5/2014)

الملخص

يتضمن البحث تحضير طلاءات ألومينية بطريقة السمنتة على سطح سبيكة الكوبلت (Fsx 414) المطعم بطبقة رقيقة من أوكسيد اليتيريوم. وقد تم تعريض هذه الطلاءات لعملية الأكسدة الدورية في درجات حرارة عالية لتحديد مدى مقاومتها والتعرف على سلوكيتها ودراسة التراكيب لهذه الطلاءات عن طريق الفحص المجهري. تشير النتائج إلى أن هذه الطلاءات لها مقاومة جيدة للتأكسد في درجات حرارة عالية $1000^{\circ}C$، وهذا قد يفسر الدور الذي لعبه الاوكسيد Y_2O_3 بوصفه حاجزا" حراريا" (Thermal Barrier) مرة، وبوصفه حاجزا" انتشاريا" (Diffusion Barrier) مرة أخرى.

الكلمات الدالة: أوكسيد اليتيريوم، الطلاء بالألمنيوم، سبيكة الكوبلت Fsx414.

The Use of Yttrium Oxide (Y_2O_3) as a Diffusion Barrier in Aluminized Coating on Cobalt Alloy Fsx414

***Yahya A. Al-Salman** ****Adel M. Ali**

**Department of Physics/ College of Science/ University of Mosul*

***Technical Institute/ Mosul /Iraq*

ABSTRACT

The research includes the preparation of aluminum coatings by method of pack-cementation on the surface of the alloy of the cobalt (Fsx 414) which doping with a thin layer of oxide yttrium. These coatings have been exposed to rotating oxidation process at a high temperatures to determine the range of resistance and to identify its behavior and studying the structures of these coatings by method of microscopic test. The results refer to that these coatings have good resistance for oxidation at high temperature 1000° C, and this may explain the role which barrier oxide played as a Y_2O_3 by it behaving as (Thermal Barrier) ones and as (Diffusion Barrier) another time.

Keywords: Oxide yttrium, aluminized coating, cobalt alloy Fsx414.

المقدمة

تستخدم سبائك ذات أساس كوبلت مثل سبيكة الكوبلت Fsx414 في التوربينات الغازية ومحركات الطائرات (Harris and Sikkenga, 2005)، لما تمتلك هذه السبائك من مقاومة للحرارة والأكسدة والتآكل، تتركب هذه السبيكة من الكروم والنيكل والتنكستن والكربون ولكل من هذه العناصر وظائفه في السبيكة. وهذه السبائك تنافس سبائك النيكل في الكلفة، إذ لا تحتاج إلى تقنيات عند صناعتها وذلك لأنها لا تتأكسد بسهولة، تمتاز هذه السبائك بالاستقرارية من ناحية المعاملة الحرارية. وتمتلك قابلية

جيدة للطرق (Forging range)، وعلى مدى واسع من درجات الحرارة. وذلك لكونها تستخدم في صناعة الرَيش التوربينية إذ يكون موقعها في مقدمة التوربين حيث تكون درجة الحرارة أعلى من أي مكان آخر في التوربين الغازي وتبقى تعمل لساعات طويلة في الوقود والهواء وتكون عرضة للتآكل من التلوث نتيجة احتراق الغاز ووجود الكبريت ومركباته في الوسط، لذا يتطلب أن تكون ذات مقاومة ممتازة للأكسدة والتآكل الحار وذات مقاومة عالية للاجهادات الحرارية. وكل هذا يتطلب المحافظة على المجموعة، أي على العناصر المكونة للسبيكة من الظروف القاسية للعمل. ومن أهم الطرائق التي تحافظ على السبيكة وإطالة عمرها هي الطلاء (Coating). قام الباحثون (Hougninou *et al*., 2004) بترسيب طبقة من اوكسيد الايتيريوم (Y_2O_3) قبل وبعد الالمنة بطريقة السمنتة للسبيكة (Fe-Cr)، حيث أظهرت السبيكة المطلية بأوكسيد الايتيريوم قبل عملية الطلاء بالألمنيوم اقل معدل للتأكسد وذلك لان هذه الطبقة تعمل كحاجز انتشاري يمنع انتشار عنصر الطلاء إلى داخل السبيكة وعناصر السبيكة من الانتشار إلى الخارج، في حين أظهرت العينة المطلية بأوكسيد اليتيريوم بعد الطلاء بالسمنتة معدل تأكسد عالي عند درجات الحرارة العالية بسبب تشقق طبقة (Y_2O_3) وتساقطها بعد فترة وجيزة.

أن الهدف الأساس من هذا البحث هو تطوير ودراسة تأثير الطلاء السيراميكي (Y_2O_3) المؤلمن على كفاءة وأداء سبيكةFsx414 للأكسدة وذلك من خلال تكوين حاجز حراري وانتشاري، وكذلك لتعريضها لدرجات حرارية عالية.

الجزء العملي

تمهيد

يتطرق هذا الجزء الى مجمل التجارب العملية التي أجريت ضمن مستلزمات إعداد البحث، إذ يتناول وصف المواد والأجهزة المستخدمة في عملية طلاء العينات وفي عملية اختبار الأكسدة للعينات المطلية وغير المطلية، كما اشتمل على الفحص المجهري للعينات.

المواد والأجهزة المستخدمة:

1-سبيكة أساس كوبلت نوع (Fsx 414). كما أن مكونات عناصر السبيكة الأساس مبينة في الجدول (1) وحسب شهادة المنتج.

الجدول 1 : النسب المئوية المكونة لسبيكة الكوبلت (Fsx 414) (Schilk, 2005)

Element	Co	Cr	Ni	Fe	W	C
Fsx414	Bal	28	10	1	8	0.25

2-فرن وجهاز تفريغ كهربائي وكذلك ميزان كهربائي حساس دقته (0.0001gm)، مجهر ضوئي، جهاز لتصوير العينات.

3-مسحوق الالمنيوم النقي (Al) ومسحوق كلوريد الامونيوم (NH_4Cl) بوصفه مادة منشطة وأوكسيد الالومينا (Al_2O_3) النقي لمنع تكتل المزيج، وأوكسيد اليتيريوم (Y_2O_3).

4-أنبوبة مصنوعة من مادة الكوارتز أو الالومينا مقاومة للحرارة مفتوحة من أحد الطرفين ومسدودة من الطرف الآخر بسداد.

تحضير العينات:

قطعت السبيكة المذكورة إلى أبعاد (10×10mm) وبسمك (3mm). تمت عملية التحضير على مرحلتين الأولى تم فيها إجراء عملية الإنهاء السطحي للعينات لإزالة الاكاسيد الموجودة على السطح باستخدام ورق التنعيم المصنع من مادة كاربيد السليكون وبدرجات نعومة مختلفة ابتداء" من درجة (2000-1200-800-400-220). أما العملية الثانية فقد تم فيها غسل العينات بالماء والصابون ومن ثم بالكحول لإزالة المواد الدهنية العالقة وللحصول على سطح ملائم لإجراء عملية الطلاء.

عملية الطلاء (Coating processes)

تمت عملية الطلاء باستخدام طريقة السمنتة pack cementation التي هي إحدى طرق الطلاء الانتشاري وللنماذج المحضرة التي تناولها البحث. تشمل هذه العملية غمر النموذج المراد طلائه في مزيج يتكون من معدن الطلاء الألمنيوم بنسبة 25% والمادة المنشطة التي عادة ما تكون من كلوريد الامونيوم (NH_4Cl) بنسبة 4% إضافة إلى مادة الالومينا بنسبة 71%. ويوضع المزيج والعينة المراد طلاؤها في بودقة مغلقة ثم توضع في فرن كهربائي مفرغ من الهواء بدرجة حرارة ($1000^{\circ}C$) ولمدة ثلاثة ساعات. ومن الجدير بالذكر انه تم أكساء النموذج بمسحوق اوكسيد اليتيريوم Y_2O_3 قبل عملية الطلاء وذلك باستخدام مواد عضوية رابطة binder materials على سطح العينة.

عملية الاكسدة (Oxidation processes)

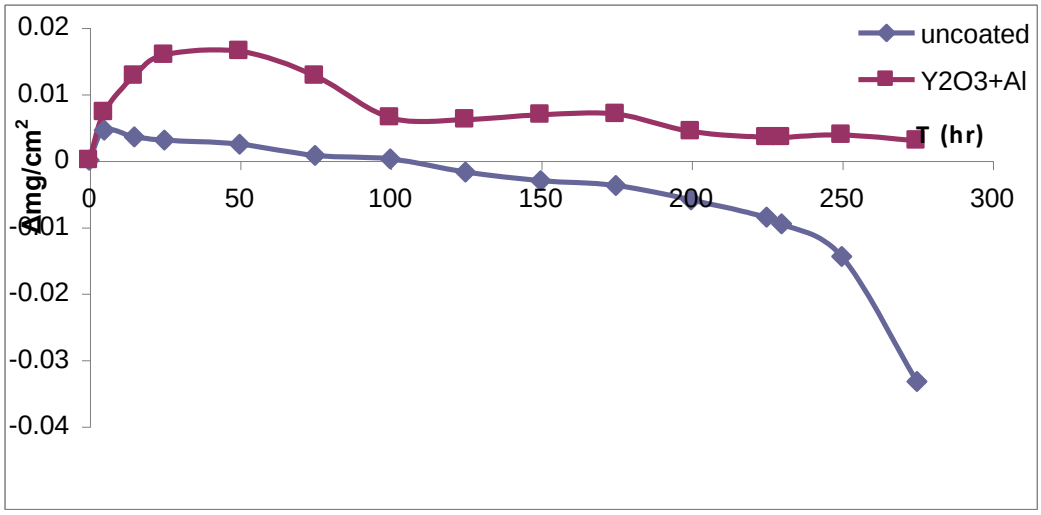
أجريت عملية الأكسدة بتهيئة العينة وذلك بتنظيف العينات تنظيفا جيدا بالماء والصابون، ثم تجفف العينة وتوزن بميزان حساس قبل الأكسدة لتثبيت الوزن الأصلي. يتم إدخال العينة إلى داخل الفرن ذو درجة حرارة ($1000^{\circ}C$). بعد انقضاء الفترة الزمنية (5 ساعات) المحددة تخرج العينة من الفرن لتبرد حتى درجة حرارة الغرفة ويعاد وزنها مجددا لمعرفة التغير الحاصل في الوزن لوحدة المساحة. وهكذا تتكرر العملية طيلة الفترة التي تتعرض لها، حتى أصبح مجموع زمن بقائها في الفرن أكثر من (275) ساعة. تم التعرف على حركية التأكسد، بطريقة اكسدة الدورات الحرارية (Thermal Cyclic Oxidation).

التركيب المجهري (Microstructure):

أجريت الفحوصات المجهرية باستخدام مجهر ضوئي ذو قوة تكبير (300X) على العينات المؤكسدة وذلك بأخذ مقاطع من العينات. وتم أجراء عملية التنعيم (Grinding) باستخدام ورق تنعيم بدرجات (220-400-1200-2000) ثم صقلت باستخدام محلول الالومينا (Al_2O_3)، وغسلت بالماء والصابون وجففت بعد ذلك تمت عملية الإظهار (Etching) باستخدام محلول النايتال (Nital) الذي يتكون من حامض النتريك (HNO_3) 2% والكحول النقي 98%. وبعدها تم تصوير العينات. باستخدام كاميرا نوع (Sony) بقوة (10 Megapixel).

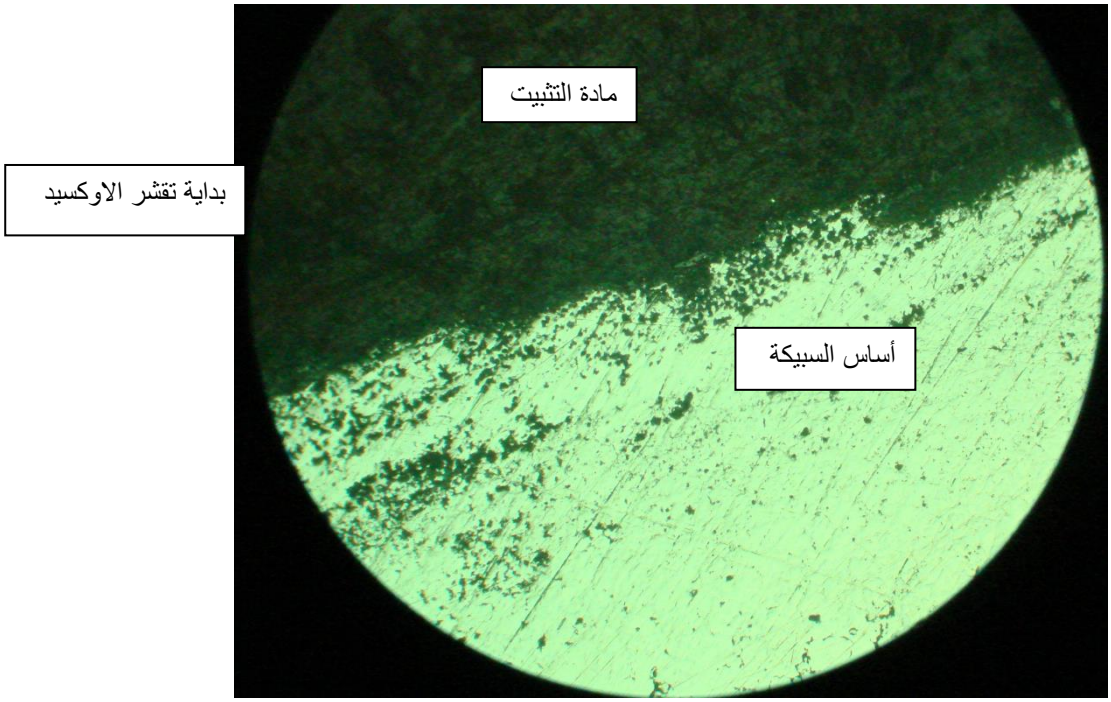
النتائج و المناقشة

أن النتائج التي تم الحصول عليها بعد أجراء عملية الطلاء والأكسدة لهذه النماذج موضحة في الشكل (1). الذي يمثل العلاقة بين التغير الحاصل في الوزن مع زمن الأكسدة للسبيكة (Fsx 414) المطلية بالألمنيوم بوجود الحاجز (Y_2O_3) وغير المطلية خلال تعرضها للدورات الحرارية.



الشكل1: علاقة التغير في الوزن مع زمن الأكسدة للسبيكة الكوبلت (Fsx414) المؤلمنة بوجود الحاجز الحراري (Y_2O_3) وغير المطلية بدرجة $1000\ ^{\circ}C$.

نلاحظ من الشكل (1) إن السبيكة Fsx414 غير المطلية لم تفقد من وزنها إلا بعد تعرضها لدرجة حرارة $1000^{\circ}C$ بعد (100) ساعة، بينما نجد أن الزيادة في الوزن رافقت الدورات الأولى ولغاية (100) ساعة، وهذا يعزى إلى تركيبة هذه السبيكة من الكروم (Cr) والنيكل (Ni) والتنكستن (W) والكربون (C)، انظر إلى الجدول (1). ويمكن تفسير ذلك إلى وجود الكروم Cr الذي يعمل على زيادة القوة والمقاومة للأكسدة عند الدرجات الحرارية العالية وأما النيكل Ni فيعمل على زيادة المتانة ويعمل الكاربون Cعلى زيادة الصلادة وأما التنكستن W فيعمل على زيادة الصلادة (Harris and Sikkenga, 2005). ففي هذه الحالة يمكن القول إن مقاومة الأكسدة للسبيكة تعتمد على طبقة الاكاسيد المتكونة، منها الكروم الذي يكوّن بتأكسده (كروميا Chromia) (Cr_2O_3) وهو أوكسيد صلب ومستقر في درجات الحرارة المرتفعة وكذلك وجود النيكل يؤدي إلى تكوين أكاسيد ثنائية $NiCr_2O_4$. ومن خلال ملاحظة الفحص المجهري لسبيكة Fsx414 المؤكسدة الموضحة في الشكل(2) هناك بداية لتساقط القشرة، قد يكون بسبب ترسيب كاربيدات الكروم $Cr_{23}C_6$ وهذا يعني ان الانهيار الذي أصاب السبيكة كان بسبب استنفاذ عنصر الكروم الذي لم يعد قادرا" على تكوين القشرة الاوكسيدية Cr_2O_3 او حتى الاكاسيد الثنائية ($NiCr_2O_3$, $FeCr_2O_4$). من الأسباب التي تؤدي الى فقدان الالتصاقية بين قشرة الأوكسيد والسبيكة في درجات الحرارة العالية هي تكون الفجوات (Voids) عند السطح البيني (السبيكة/القشرة) نتيجة تجمع الفراغات (Vacancies) المتكونة نتيجة الانتشار المتبادل وبالتالي انفصال القشرة الاوكسيدية (Strafford and Datta,1989)، ومع زيادة الزمن وازدياد سمك هذه الأكاسيد تتقشر وتتساقط بسرعة بشكل رقائق واضحة المعالم وقد اظهر الفحص المجهري لهذه الرقائق وكما موضح في الشكل (2) وهذا ما أدى إلى انهيار السبيكة، حيث بلغ الفقدان في الوزن حوالي ($0.0333\ mg/cm^2$) بعد نهاية فترة التعرض وهذا ما هو مبين في الشكل (1).

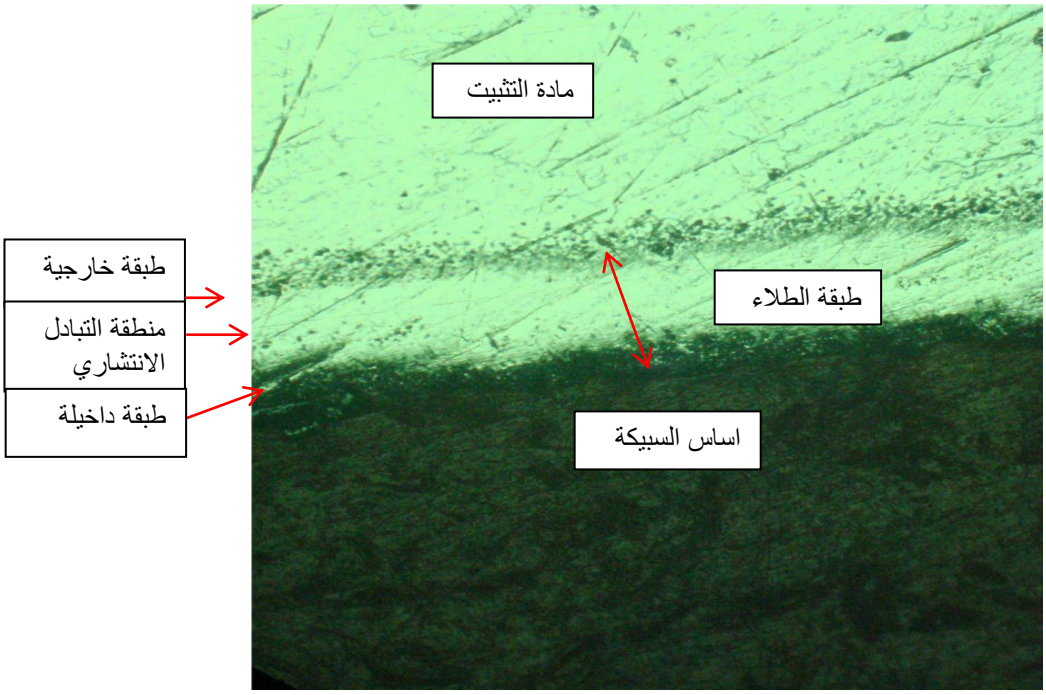


الشكل 2 : التركيب المجهري لسبيكة الكويلت Fsx414 المؤكسدة بدرجة $1000^{\circ}C$ (300X)

وعند مقارنة هذا النموذج مع النموذج المطلي بالألمنيوم بعد الاكساء بأوكسيد اليتيريوم (Y_2O_3) حيث لم نلاحظ أي فقدان في الوزن بل على العكس نلاحظ زيادة في الوزن حيث بلغت الزيادة حوالي ($0.0029\ mg/cm^2$) خلال 275 ساعة. ومن الملاحظ من دراسة حركية التأكسد، عدم وجود تناقص في الوزن الحقيقي للنموذج طيلة فترة التأكسد، وهذا ما يؤكد أن القشرة

الاوكسيدية كانت توفر قدرا" من الحماية للنموذج المطلي، ويؤكد الفحص المجهري للطلاء هذه الحقيقة كون أن طبقة الطلاء الالوميني لم تتعرض إلى التشققات التي تنشأ عادة بسبب التأكسد الداخلي للطبقة بالرغم من تكون بعض الفجوات خاصة بالقرب من السطح الخارجي للطلاء لاحظ الشكل (3). تشير النتائج من خلال هذا الفحص المجهري للمقطع العرضي للطلاء الناتج عن الألمنيوم، بوجود ثلاث مناطق متميزة باختلاف أسماكها وتراكيبها، أي منطقة خارجية ووسطى وداخلية: المنطقة الخارجية تكون طبقة طلاء واحدة، كما أنها تظهر تركيب متعدد الأطوار (Milt phase structure) ومن خلال مشاهدة المخطط الطوري (Phase Diagrams) للسبيكة الثنائية Al- Co (Hansen, 1985)، يظهر أن في درجات الحرارة بين 1050˚C-1000˚C وجود طور β-CoAl كطور مستقر يتكون في درجات الحرارية المنخفضة بنسبة كوبلت 48%-56% (atomic percent cobalt)، أي ما يعادل 65%-73% كنسبة وزنيه (Weight percent cobalt) وتوسع هذا الطور مع زيادة درجة الحرارة، أما الأطوار الأخرى الغنية بالألمنيوم مثلCO_2Al_5 Co_2Al_9 والتي تحتاج إلى نسب وزنيه اكبر من الألمنيوم قد تصل إلى 70% فمنها ما ينصهر بدرجة 943˚C مثل CO_2Al_9 ومنها ما ينصهر بدرجة 1170˚C مثل CO_2Al_5، وبما أن الطلاء المنجز في هذا البحث قد تم بدرجة 1000˚C فمن المناسب استبعاد الأطوار التي درجة انصهارها اقل من درجة تنفيد الطلاء، وبما أن نسبة الكروم في السبيكة هي 28% الجدول (1) وان نسبة ذوبان الكروم في الطور β-COAl لا تتجاوز 5% لذا فمن المتوقع أن تكون أطوار كروم – ألمنيوم كأطوار ثانوية داخل طبقة الطلاء، وكذلك يمكن تميزها من خلال ألوانها الظاهرة مما يعطي طبقة الطلاء مظهر متعدد الأطوار. أما بالنسبة للطبقة الداخلية ومن خلال مشاهدة نظام التوازن الحراري للنظام الثنائي ألمنيوم – كروم (Cr-Al Binary System) (Shunk,1969). يمكن تحديد الأطوار البينية (Intermediate Phases) وهي (Cr_2Al, $CrAl_4$, Cr_2Al_{11}, $CrAl_7$). ترتبط الأطوار الثلاثة الأولى مع التفاعلات اليوتكتيكية أما الطور (Cr_2Al) فيتكون من التحولات في الحالة الصلبة للكروم، وبين الطورين (Cr_5Al_8, Cr_4Al_9). تظهر خمسة أطوار مميزة (γ_1, γ_2, γ_3, γ_4, γ_5) في درجات الحرارة العالية وتشترك في التفاعلات اليوتكتيكية. كما أن قابلية ذوبان الألمنيوم في الكروم هي بحدود (45%) عند درجة حرارة أعلى من (900˚C) أما عند درجة الحرارة الاقل من (800˚C) هي بحدود (28%) (Taylor and Floyd,1952). من هذا المخطط نستنتج أن جميع الأطوار غنية بالألمنيوم. وبالعودة إلى مخطط الأطوار للنظام الثنائي (نيكل–ألمنيوم) (Hounginon, *et al.*, 2004)، نجد أن الأطوار جميعها غنية بالألمنيوم أيضا" وخاصة الطور NiAl المستقر والمتوازن ربما يكون هو الذي يمثل طبقة الطلاء الداخلية وربما يتواجد مع بقايا الطور Ni_2Al_3، كل هذه الاحتمالات واردة بسبب امتلاك سبيكة الكوبلت 10% من النيكل الجدول (1). ومن الملاحظ من خلال الفحص المجهري الشكل (3)، يتبين هناك وجود طبقة وسطى بين الطبقة الخارجية والداخلية، هي منطقة التبادل الانتشاري وتتميز بلون أصفر فاتح وتكاد تكون خالية من الترسبات، ومن النتائج المستحصلة يبدو أن اوكسيد اليتيريوم (Y_2O_3) يلعب دورا" مهما" في تحديد سمك الطلاء، من خلال عدم حدوث التحول الطوري لطبقة الطلاء الأساسية، وهو ما أكده الباحث (الجبوري، 2007) خلال ألمنة السبيكة (U500) بوجود الحاجز الحراري Y_2O_3 وهذا يدفعنا إلى الاعتقاد بان عملية الانتشار المعاكس Contract diffusion لكله من عنصر الطلاء (الألمنيوم) وعناصر السبيكة (الكوبلت)، تكاد تكون معدومة او أنها تحدث ببطئ شديد جدا"، أي أن عملية انهيار الطلاء (coating degradation) التي قد تحصل بسبب التبادل الانتشاري يمكن استبعادها على الاقل في هذه الدرجة وبهذا الزمن وهذا يعني إطالة عمر الطلاء. ومن ناحية اخرى فإن سهولة تفكك هذا الأوكسيد وانتشار ايوناته الى طبقة الطلاء خلال عملية الالمنة وتكوينه مركبات الألمنيوم– اليتيريوم (YAl_3)، وهذا ما أكده الباحث (حنو،2007) أن أوكسيد Y_2O_3 يتحلل كليا" او جزئيا" بالحرارة الى ايونات المعدن الموجبة وتنتشر هذه الايونات أثناء عملية الالمنة إلى داخل السبيكة، وان استقرارية اوكسيد اليتيريوم كما أكدها العديد من الباحثين (Lavin *et al.*, 1998) (إذ يضاف اوكسيد اليتيريوم Y_2O_3 لاعادة استقرارية اوكسيد الزركونيوم وتفككه بدرجات الحرارة العالية). وهو ما يعمل على زيادة الإعاقة لانتشار الألمنيوم مرة أخرى، ومن الملاحظ أن طلاء اوكسيد اليتيريوم ليس له تأثير فاعل على التركيب البلوري للطلاء، غير ان التركيب البنيوي للطلاء أظهر اختلافا"بسيطا"، من ملاحظتنا للشكل (3) إن الطبقة الخارجية أظهرت

اختلافا" في الحجم الحبيبي في الأطوار المترسبة. إتباع عمليات الأكسدة الدورية كان يهدف الى التعجيل بتساقط القشرة الاوكسيدية الواقية بسبب نشوء الاجهادات الحرارية (الناتجة من اختلاف معامل التمدد الحراري للقشرة والسبيكة الأساس الذي يقود الى تمزق القشرة الاوكسيدية)، وكذلك الاجهادات الميكانيكية الناشئة عن اختلاف حجم الاوكسيد المتكون وحجم المعدن المستهلك لتكوين ذلك الاوكسيد. إلا أن ذلك لم يحدث وهذا قد يشير إلى الالتصاقية الجيدة للقشرة الاوكسيدية Al_20_3 طيلة فترة التعرض. غير ان القشرة الاوكسيدية بصورة عامة قد انتشرت لتغطي السطح بأكمله لتوفر له الحماية اللازمة، هذا يعني ان طبقة الطلاء والتي تعمل بمثابة مستودع أو خزان للألمنيوم طيلة فترة الاختبار، في حين أن السبيكة غير المطلية التي أدخلت من أجل المقارنة قد تعرضت إلى الانهيار بعد ما يقارب (100) ساعة.



الشكل 3: التركيب المجهري للسبيكة الكوبلت Fsx414 المؤلمنة بوجود الحاجز (Y_2O_3) والمؤكسدة بدرجة $1000^{\circ}C$ (300X)

وهذا ما قد يفسر الدور الذي لعبه الاوكسيد Y_2O_3، حيث أن الطلاء بهذا الاوكسيد قبل عملية الالمنة يمكن أن يتسبب في تقليل الحرارة التي تتعرض لها السبيكة، وهذا بالتالي يقلل من احتمالية انتشار الألمنيوم إلى عمق السبيكة الأساس، وبذلك يحافظ على تركيز الألمنيوم عاليا" عند سطح الطلاء ويساعد على ضمان استمرارية تكون القشرة الاوكسيدية Al_2O_3 الواقية من جهة، كما يقلل من الاجهادات الحرارية التي تتعرض لها طبقة الطلاء والتي قد ينشأ عنها تكسرات طبقة الطلاء من جهة أخرى. أي أن أوكسيد Y_2O_3 يتصرف كحاجز حراري (Thermal Barrier)، وفي الوقت ذاته فإنه يقلل من احتمالية الانتشار المعاكس لعناصر السبيكة والتي قد تسهم بدورها في تكوين اكاسيد ثنائية أسفل القشرة الواقية Al_2O_3، وهذه الاكاسيد الثنائية معروفة بانخفاض درجة انصهارها وإن تكوّنها يتسبب في انفصال القشرة الواقية وتساقطها،وفي هذه الحالة فإن الأوكسيد Y_2O_3 يتصرف كحاجز انتشاري (Diffusion Barrier). أي أن وجود الطبقة الرابطة (Bond Coat) في الطلاء يقلل من الفرق بين الخصائص الميكانيكية الحرارية لطبقة السيراميك والأساس إضافة إلى زيادة عمر السبيكة خلال الدورات الحرارية. هذا ما أكده الباحث (Houngninou *et al.*, 2004)، على ان استخدام Y_2O_3 قد أسهم في تعزيز مقاومة الطلاء لظروف التأكسد والتكبرت.

الاستنتاجات

من النتائج التي حصلنا عليها يمكن استنتاج ما يلي:

1- أثبتت نتائج الاختبار إن الطلاء الناتج بوجود اوكسيد اليتيريوم يتمتع بأفضل مقاومة للتأكسد عند درجات الحرارة العالية ولفترات زمنية طويلة، أكثر من السبيكة غير المطلية.

2- استخدام عنصر الألمنيوم يفيد في الحصول على مركب طلائي غني بالألمنيوم .

3- استخدام أوكسيد اليتيريوم Y_2O_3 كطلاء أولي قبل عملية الالمنة يقلل من عملية انتشار الألمنيوم إلى داخل سطح السبيكة لتكوين الطبقة الطلائية.

4- يمكن أن يتصرف أوكسيد اليتيريوم Y_2O_3 كحاجز حراري ويقلل من احتمالية الانتشار المعاكس لعناصر السبيكة أثناء عملية التأكسد وبذلك يحافظ على تركيز الالمنيوم عاليا" عند السطح لضمان تكوين القشرة الاوكسيدية.

المصادر العربية

الجبوري، محمود أحمد حمود (2007). آلية تكون وانهيار الطلاء الألوميني بوجود بعض أكاسيد العناصر النادرة (TiO_2,DY_2O_3,Y_2O_3) على السبائك المحسنة. أطروحة دكتوراه، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة الموصل، العراق.

حنو، بهجت بهنام حنو (2007). تأثير إضافة الاكاسيد النادرة على التصاقية قشرات الالومينا على الطلاء الالوميني لسبيكة الكوبلت. أطروحة دكتوراه، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة الموصل، العراق.

المصادر الأجنبية

Hansen, M.P. (1985). "Constitution of Binary Alloys". 2ed, McCRAW Book company.

Harris, K.; Sikkenga, S. (2005). "Investment Cast Co-Alloys, Cannon-Muskegon Corporation (SPS Technologies). USA, pp. 1-7.

Hounginon, C.; Chevalier, S.; Larpin, J.P. (2004). High temperature oxidation behavior of aluminide coating obtained by Pack Cementation. *Ann. Chem. Sci. Mat.* **129**, 165-176.

Lavin, L.; Ginzburs, A.; Kliger, L. (1998). Controlled formation of surface layers by pack Aluminization, Surface and coating. *TECH*, 209-213.

Schike, P.W. (2005). Advanced gas turbine materials and coating. *GE Energy Schemectady*. NY GER-3569G.

Shunk, F.A. (1969). Constitution of binary alloys. *Research Metallurgist, Chicago*, **130**, 45-68.

Strafford, K.N.; Datta, P.K. (1989). Design of supplication resistance alloy. *Material Sci. and Techn.*, **115**, 765-778.

Taylor, A.; Floyed, W. (1952). The constitution of Nickel –Rich alloys of the Nickel-Chromium-Aluminum system. *J. the Institute of Metal*, **81**, 451.