دراسة بعض العوامل المؤثرة في كفاءة إكساء سطوح الريش التوربينية بطريقة الرش الحراري

إسماعيل خليل جاسم، أنوار خالد فرمان
وزارة العلوم والتكنولوجيا ، دائرة علوم المواد
قسم الفيزياء ، كلية التربية إبن الهيثم، جامعة بغداد

الخلاصة

تم تحضير طلاءات من مادة مركبة سيرمتية ذات اساس من مادة الالومينا بنسب مختلفة مع مادة رابطة معدنية من نيكل – المنيوم باستخدام طريقة الرش الحراري باللهب (Flame Thermal Spraying) .

أجريت عملية الطلاء على قواعد من سبيكة الانكونيل المستخدمة في الريش التوربينية بعد ان تم تقطيعها وتخشينها بطريقة العصف الحبيبي (Grit Blast) . تم دراسة العوامل المؤثرة على الاكساء بالاعتماد على مجموعة متغيرات مثل المسامية ، الصلادة ، مسافة الرش ، سمك الطلاء ، المعاملة الحرارية ، اضافة الى تأثير نسب المادة الرابطة المضافة . على ضوء الاختبارات التجريبية تم اختيار الطلاء السيرمتي الذي يحتوي على(50%) من المادة الرابطة كأفضل طلاء يمتاز بخواص ميكانيكية وحرارية جيدة .

لقد لوحظ بأن القيم المستحصلة من المسامية والصلادة تتأثر بصورة واضحة بفعل المعاملة الحرارية المناسبة للعينات (Heat Treatment) ، كما اعطت نتائج البنية المجهرية حالة انتشار وتجانس مع ترابط تسابكي بين مكونات مادة الطلاء السيرمتي .

أخيرا تم إختبار مدى صمود الطلاء السيرمتي عند مديات درجات حرارية عالية ولفترات زمنية طويلة ولعدة مرات،فقد أظهرت النتائج وجود تماسك وترابط جيد لطبقات

الطلاء السيرمتي عند اجراء الدورة الحرارية (Thermal Cycling) لمرتين عند درجة حرارة (1000°C) ولمدة (8hr) .

المقدمة

أحدثت التطورات الكبيرة في تكنولوجيا هندسة السطوح الى تطبيقات عملية لحماية الاجزاء المعرضة الى التلف واعادتها الى الخدمة وتقليل الكلفة وتحسين الاداء عن طريق عمليات الرش الحراري لكي تعطي غطاءا حاميا بسمك يتراوح (50mμ – 2mm) من مواد الطلاء والتي تشمل المعادن والسبائك والمواد السيراميكية والمواد المركبة ولمختلف التطبيقات الصناعية (2-1) .

ان أهم الاجزاء الهندسية المعرضة للفشل هي الريش التوربينية (Turbine Blades) في المحرك التوربيني، وذلك بسبب كونها اجزاء دوارة تعمل في درجات حرارة عالية وبوجود أوساط آكلة (4-3) . لذلك فان هذه الريش التوربينية تصنع عادة من سبائك فائقة (Superalloys) نظرا لأمتلاكها خواص فيزيائية وميكانيكية جيدة مثل مقاومة التآكل الحار (Hot Corrosion) والاستقرارية الحرارية الجيدة (Thermal Stability) فضلا عن المقاومة الجيدة ضد التأكسد (Oxidation) (5) .

ان المادة الهندسية المستخدمة والملائمة لهذه الظروف في تصنيع الريش التوربينية هي أحد أنواع سبيكة الأنكونيل (Inconel) ذات الأساس النيكلي (6-5) وهي ذات كلفة عالية لذلك فان إعادة تأهيل وإرجاع هذه الريش التوربينية الى الخدمة ثانية بعد حماية ومعالجة السطوح من التشققات (Cracks) يعد ذا أهمية وجدوى إقتصادية كبيرة (Economically Effective) .

إن ظروف عمل هذه الريش التوربينية هو تعرضها لدرجات حرارة عالية مما يسبب لها التعرية (Erosion) بسبب حركة الغازات عالية السرعة ، فضلا عن تأثير عمليات التشغيل والاطفاء التي تؤدي ايضا الى حدوث تشوه في الأبعاد القياسية للريش مع تشققات وعيوب سطحية في حافاتها (Surface Damage) ، مما يضعف خواصها الميكانيكية ويجعلها عرضة الى اشكال الفشل المختلفة أو الكسر (Fracture) (7) .

لقد بذل الباحثون في السنوات العشرة الاخيرة الجهد الكبير في مجال تحسين مقاومة السبائك المستخدمة في تصنيع الريش التوربينية أو عن طريق استخدام طرائق

الحماية المختلفة التي لم تثبت نتائجها كفاءة جيدة بعد لحماية عيوب الريش التوربينية (4-8) .البحث الحالي يعد من المحاولات الجديدة في القطر لإنتاج مواد مركبة سيرمتية ذات أساس من الالومينا (Al_2O_3) وقوته تكون عن طريق مادة رابطة معدنية على شكل دقائق من سبيكة (Ni-Al) وباستخدام تقنية الرش الحراري باللهب (Thermal Spray) يمكن استخدامه لحماية اسطح الرش التوربينية من العيوب السطحية .

الجانب العملي

تم استخدام مسحوق الألومينا المصنع من شركة (Metco) كمادة أساس وبحجم حبيبي (20-45mμ)، والذي يمتاز بخصائص عزلية جيدة فضلا عن مقاومته للبلى (Wear) عند الدرجات الحرارية العالية ، اما مسحوق المادة الرابطة (Bond Coating) فتم استخدام مسحوق ($Ni_{80}Al_{20}$) المصنع من شركة (Amdry) وبحجم حبيبي (30-50mμ) وذلك لمقاومته الجيدة للتأكسد عند الدرجات الحرارية العالية وإمتيازه بقوة تلاصق جيدة ما بين القواعد الأساسية (Substrate) وطبقات الإكساء السيراميكية .

إستخدمت قواعد الطلاء من الريش التوربينية (Turbine Blades) المصنعة من سبيكة الأنكونيل ، وحُللت عناصر هذه السبيكة بجهاز المطياف الذري الكتلي (Atomic Mass Spectroscopy) فضلا عن المواد المركبة المستخدمة في عملية الطلاء وقورنت نتائجها بالمواصفات القياسية والموضحة في جدول رقم (1) .

حُضرت عينات المادة المركبة السيرمتية من أخذ نسب مختلفة من مسحوق المادة الرابطة ونسب وزنية مقدارها % (25, ,35 ,50 ,75) وتم إضافتها الى مسحوق المادة الأساس من الألومينا . استخدم خلاط كهربائي ذو كرات من التفلون لمدة (2hr) لخلط المزيج مع إجراء معاملة حرارية أولية عند (150 °C) لمدة (2hr) قبل عملية الطلاء لغرض تجفيف دقائق المساحيق من تأثير الرطوبة والحصول على دقائق لدنة تكون مؤهلة لإنتاج طلاءات ذات قوة تلاصق جيدة مع المادة الأساس .

أسطح عينات قواعد الأنكونيل حُضرت قبل عملية الرش الحراري بإستخدام جهاز عصف حبيبي (Grit Blast) لغرض زيادة خشونتها، وذلك من خلال إستخدام حبيبات كاربيد السليكون (SiC) بمدى اقطار من (0.7-1.5mm) ، وقد حددت خشونة العينات (Roughness) من خلال جهاز فحص الخشونة (Mahr Perthen) بمدى يتراوح ما بين (35-55 μm) .

الشكل (1-a) يوضح البنية المجهرية لمسحوق (SiC) المستخدم بعملية التخشين اما الشكل (1-b) يمثل البنية المجهرية لسطح طبقة الأنكوينل المصنعة منها الريش التوربينية بعد تنظيفه وتخشينه بالقصف بوساطة كاربيد السليكون .

تم إستخدام منظومة الرّش باللهب (Flame Spraying System) المصنعة محليا والموجودة في جامعة بغداد / قسم الفيزياء والموضحة في شكل (2) لرش المسحوق السيرمتي المحضر (Cermets Powder) نحو قاعدة الطلاء، الحرارة اللازمة لصهر مساحيق الطلاء السيرمتية تم الحصول عليها من خلال احتراق الوقود الغازي (Fuel gases) والتي تشمل غازي الأوكسجين والأستيلين، أما مساحيق المواد المركبة فانها تتغذى من فتحة متصلة بمسدس الرش من الجهة العلوية ، بينما يعمل ضغط الهواء المسلط على حمل القطرات المنصهرة بسرعة بإتجاه القاعدة الأساس .

تمّ إختبار أفضل معلمات رّش من خلال إجراء سلسلة تجارب أولية لغرض الحصول على طبقات طلاء ذات قوة تلاصق جيدة وسمك معين ، حيث تم الإعتماد على المعلمات: زاوية الرش ، المسافة بين مسدس الرش والقواعد ، نسبة المادة الرابطة والحجم الحبيبي لمساحيق مواد الطلاء .

تمّ دراسة التركيب الدقيق للطلاءات بعد الرش بإستخدام المجهر الالكتروني الماسح (Scanning Electronic Microscope) لملاحظة طوبوغرافية أسطح العينات فضلا عن عدة فحوصات مثل المسامية (Porosity) بطريقة الغمر لأرخميدس (Immersion Method) وإختبار الصلادة بطريقة فيكرز (hardness Vickers) أو تعريض عينات الطلاء الى دورات حرارية (Thermal Cycling) لفترات زمنية مختلفة .

النتـــــائج والمناقـــــشة

بعد إكمال عملية الرش والحصول على طبقة المواد المركبة الناتجة من إضافات وزنية مختلفة لمسحوق الألومينا الى مسحوق نيكل – المنيوم وبنـــسـب % (25, 35, 50, 75) تمّ إجراء عدة إختبارات مثل المسامية والصلادة لطبقة الطلاء المنتجة ، لقـد وجد أن الطلاء السيرمتي ذو النسبة (50%) يحمل معلمات مثاليـة للـرش الحـراري ، الجدول (2) يوضح النتائج المستحصلة والتي يلحظ فيها بأن أقـل نـسبة مـسامية تـم الحصول عليها بحدود (10.52%) ، ولغرض تقليل هذه النسبة في مادة الطلاء السيرمتية أجريت المعاملة الحرارية عند (1000°C) ولفترة زمنية (1.5hr) . لقد لوحظ تغيـر ملحوظ في الإنخفاض الى (5.44%) وقد أوعز الى تكوين مناطق ترابط بـين طبقـات الطلاء السيرمتية بسبب حدوث عمليات تلبيد وإنتشار بـين الـذرات ومحاولتهـا غلـق المسامات بعد المعاملة الحرارية ، صاحـــب ذلك أيضا تغـّير ملحـوظ فـــي قـــيم الصلادة حيث إزدادت القيمة من (47.48 HvT) الـى(56.22 HvT) ، الـشكل (3) يوضح البنية المجهرية لمادة الطلاء السيرمتي وبسمك (1.45mm) قبل إجراء المعاملـة الحرارية ، حيث يلحظ التجانس الواضح في مادة الطلاء فتظهر الألومينا بشكل متناسـق مع المادة الرابطة (Ni-Al) وإن هناك حالة إنتشار وترابط تسبيكي بين مكونات المؤلفات السيرمتية المخلوطة .

اما بعد اجراء المعاملة الحرارية في فرن حراري نـوع (Carbolite) وفـي أجواء إعتيادية عند (1000°C) ولمدة (1.5hr) ، فقد لوحظ (الشكل 4) بأن حجـوم الحبيبات تبدو صغيرة ومنتظمة دلالة على أن جميع الإجهادات المتولدة خـلال تـصلب القطرات قد تم إزالتها وأن هناك حالة تسابك وترابط قوي بين طبقات الطلاء مـع قلـة الدقائق المتأكسدة كما يلحظ من الشكل (4) أيضا بأن الطلاء السيرمتي الـــــذي نـسبة إضافـة المـــادة الرابطة فيه(50%) تمتلك حجوم حبيبات بمدى يقارب (25 μ m) ، مما يحسن من كثافة الطلاء السيرمتي وتجانسه بصورة أفضل من الطلاء الذي نـسبة الاضافة فيه (35%) والتي ينخفض عندها الحجم الحبيبي الـــى (20µm) . إن ذلك يتفق مـع ما أجراه الباحث (Ghosh) وآخرون (10) والذي درس علاقة الحجم الحبيبي

مع المسامية للمادة المركبة المتكونة من (Al_2O_3) المضافة الى المادة الرابطة (Al-4%Mg) وأثرها على خاصية مقاومة الشد القصوى .

لقد لوحظ بان نقصان الحجوم الحبيبية يؤدي الى زيادة نسبة المسامية وإضعاف مقاومة الشد القصوى مع قيم الصلادة المجهرية بعد تثبيت الخواص القياسية للطلاء السرمتي والموضحة في جدول (2) . أخذ البحث الجانب التطبيقي ، حيث تم تعريض عينات الريش التوربينية التي تم حمايتها بالطلاء السيرمتي الى دورات حرارية مختلفة (Thermal cycling) وذلك لغرض بيان مدى مقاومة الطلاء للظروف الحرارية العالية وبدون أية عيوب سطحية ظاهرة . لقد عوملت النماذج عند درجات حرارية مختلفة (800، 950 ، 1050 ، 1150) $^{\circ}C$ وبمعدل تسخين (100 درجة مئوية / ساعة) تحت أجواء اعتيادية وخلال فترة زمنية ثابتة لمدة (10 ساعات) مع الإبقاء على العينات داخل الفرن لغرض التبريد البطيءوتكرار نفس الدورة الحرارية لعدة مرات .

أوضحت نتائج البنية المجهرية عن وجود تجانس سطحي للطلاء الغطائي السيرمتي (Top Coating) تحت درجة (1050$^{\circ}C$) وأن هناك تداخلا (Interfacc) بين مادة الطلاء السيرمتي والقاعدة وذلك عند تكرار الدورة الحرارية لمرتين كما تم ملاحظة قيم الحجم الحبيبي عند مديات درجات الحرارة ، فقد كان بحدود (21 µm) عند (800،950) $^{\circ}C$ مع إنعدام المسامات ، ما لبث أن إنخفض الحجم الحبيبي الى (13 µm) عند (1050 $^{\circ}C$) مقرونا بزيادة المسامات ، أما عند زيادة درجة الحرارة الى (1150 $^{\circ}C$) فقد لوحظ إنخفاض الحجم الحبيبي (9 µm) وإزدياد نسبة المسامية الى (26%)وكما يلحظ من الجدول (3) . إن النتائج المستحصلة تنطبق على ما وجده العالمان (Miller & Zhu) (11) ، عند دراستهما العلاقة بين الحجم الحبيبي والصلادة الميكانيكية لطبقات الطلاء السيرمتية المتكونة من ($ZeO_2 + 5Y_2O_3 + Ni - Cr - Al$) والمحضّرة بطريقة الرّش الحراري بالبلازما (Plasma Spray). لقد لاحظا بأن الدورة الحرارية عند (1300$^{\circ}C$) خلال (8hr) وبتكرار (3) مرات يصاحبها إنخفاض الحجم الحبيبي في البنية المجهرية، ويقل مع زيادة إرتفاع درجات الدورة الحرارية ، مع بدايات ظهور إنتشار المسامات وعدم تجانس بين

مكونات طبقات الطلاء ، لقد تمّ تفسير هذه الظاهرة بأنها تعود الى حالة التأكسد (Oxidation) لطبقات الطلاء نتيجة تعرضها لدرجات حرارة عالية ، حيث تؤدي الأكسدة المتواجدة على الحدود البلورية الى تركيز الإجهادات (Stress Concentration) ومن ثم ذلك يؤدي الى إنخفاض قيم الحجم الحبيبي مع نشوء التشققات على طبقات الطلاء ، لذلك فان عملية الأكسدة هي ذات تأثير سلبي على عمل الأجهزة التي تتعرض الى درجات حرارية عالية بسبب تعجيلها من حدوث العيوب السطحية لطبقات الطلاء .

لقد أثبتت النتائج التجريبية بأن تعريض نماذج قطع الريش التوربينية ذات الطلاء السيرمتي الى درجة حرارة ($^{\circ}C$ 1150) ولمدة (10hr) ولعدة دورات حرارية ، يؤدي الى حدوث إنتشار التشققات السطحية (Crack propagation) مع إنتشار المسامات والإنفصال (Segregation) كما يلحظ في الشكل (5) قد إزداد مع زيادة عدد الدورات الحرارية . أن السبب ربما يعود الى التشوهات المرنة (Plastic Deformation) لطبقات الطلاء السيرمتية حيث أصبحت بحالة مرنة (Ductility) ومهيئة للانخلاع والتشقق (12) .كما يلاحظ من الشكل (5) أيضا عدم تجانس البنية المجهرية عند جميع الدورات الحرارية ، ويعتقد إنها بدايات الى إنصهار الألمنيوم والإنتشار ضمن عناصر طبقات الطلاء السيرمتي . كما لوحظ أيضا بأن هناك زيادة في الوزن أصبحت واضحة عند إرتفاع درجات الدورات الحرارية (جدول 3) ، حيث يعتقد بأن عملية الأكسدة وإرتفاع نسب المسامية والعيوب السطحية لها دور في هذه الزيادة الحاصلة.

من النتائج الموضحة أعلاه نستطيع أن نوجز بأن الطلاء السيرمتي المستخدم له قابلية الصمود الحراري عند ($1000^{\circ}C$) وبدون أية عيوب سطحية ظاهرة مما يؤهل هذا الطلاء للإستخدام كعازل حراري (Thermal Barrier) لكثير من الريش التوربينية وبعض الأجزاء الحرارية التي يتطلب عملها تحمل درجات حرارية عالية .

الإستنتاجات

يمكننا تلخيص الاستنتاجات التي تمّ التوصل اليها بما يأتي :

1- تتأثر مسامية طبقة الطلاء السيرمتية الناتجة بتغير نسبة المادة الأساس ، وكانت أفضل النسب (50%) حيث حصلنا عندها على أقل قيمة للمسامية وهي (10.52%).

2- تبعا لتغّير المسامية مع نسبة المادة الأساس تتغّير أيضا صلادة طبقة الطلاء السيرمتية وكانت أفضل قيمة للصلادة (47.48 HvT).

3- كان للمعاملة الحرارية للعينات الأثر الكبير في تغير كل من قيم المسامية والصلادة حيث أن المعاملة الحرارية بأجواء اعتيادية وعند درجة ($1000^{\circ}C$) ولمدة (1.5hr) أدى الى انخفاض قيمة المسامية الى (5.44%) وإزدياد قيمة الصلادة الى (56.22 HvT).

4- تغير قيمة الحجم الحبيبي لمادة الطلاء السيرمتي مع نسبة المادة المضافة أيضا . فكان أفضل حجم حبيبي عند النسبة (50%) حيث كان بمقدار يقارب (m 25μ).

5- صمود طبقات الطلاء السيرمتية عند تعريضها لدورات حرارية عند درجة حرارة ($1000^{\circ}C$) ولعدة مرات وبدون أية عيوب سطحية ظاهرة مما يؤهل هذا الطلاء للإستخدام كعازل حراري (Thermal Barrier) لكثير من الريش التوربينية وبعض الأجزاء الحرارية التي يتطلب عملها تحمل درجات حرارية عالية .

References

1-Meethaen, G.W. (2000) Materials for High Temperature Engineering Application.

2- Martengo, P.C. and Caruchi, C.,(1989) Materials and Coating to resist high temperature corrosion, P.293.

3- Viswanathan, R. and Dolbec, A.C., (1987) Jor of "Engineering for turbine and power 109:115.

4- Erickson J.S. and Versnyder F.L., (1999) proc.conf, "on High temperature materials in gas turbines ", Switzerland, P.315.

5- Fawley R.W.,(2000) The superalloys, John Wiley and Sons, 5th ed, New York.

6-.Michael , F. and David, R.H., (1995) Eng Materials An introduction to their properties and application, Oxford.
7- Schwartz, M.M., (1989) Composite material, Hand Book, Mc-Graw Hill, New York.
8- Witt, M. De. and Stubbe, J., (1986), proc. Conf. on "High Temperature alloys for gas turbines and other applications ", Belgium, P.1571.
9- Vinson ,J.R. and Chou ,T.W., (1999), Composite Materials and their use in structure, London.
10- Ghosh , P.K. and Ray ,S. (1986) , Material Science , 22 :421
11 – Zhu, D. and Miller, R.A., (2000), Thermo physical and thermo mechanical properties of thermal barrier coating ZrO_2 + $5Y_2$ O_3 System , Ceram. Dci.Proc, 21:623
12- Jassim, I.K. and Agool, I.R., (2005), Physics Journal, University of Baghdad, to be published.

جدول (1) التحليل الكيميائي لكل من المادة الرابطة والأساس مع القاعدة

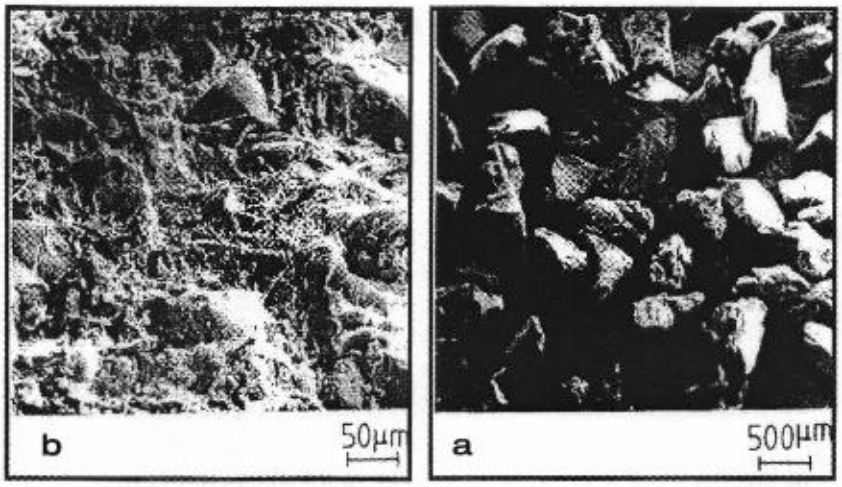
Materials	Standard Analysis Wt (%)	Element Analysis Wt(%)	Company Type	Powder particle size (μm)
Bond Coating	Ni:80 Al:20	Ni:80 Al:20	Amdry Type (997)	30-50
Matrix	Al_2O_3 : 99 Other : $Na_2O \subseteq 0.4\%$ $SiO_2 \subseteq 0.2\%$ $FeO \subseteq 0.05\%$	Al_2O_3 : 98.7	Metco Type (110)	20-45
Substrate IN-738	C:0.17 Mo:2.6 Cr:16.0 W:2.7 Co:8.5 Al:3.4 Ti:3.4 Ni:Bal	C:0.17 Mo:1.58 Cr:15.51 W:2.67 Co:8.36 Al:3.14 Ti:3.69 Ni:Bal	Air Force (Aero engines Dep.)	Inconel Alloy (Turbine Blades)

جدول (2) معلمات الرش المثالية قبل اجراء المعاملة الحرارية

معلمات الرش المثالية	القيم
نسبة الاضافة للمادة الرابطة (Ni-Al) مع المادة الاساس (Al_2O_3)	(50% + 50%)
مسافة الرش	12cm
السمك	1.45mm ±0.003
المسامية	10.52%
الصلادة	47.48 H_VT

جدول (3) نتائج الدورة الحرارية للطلاء السيرمتي (**50% Ni-Al + 50%AL_2O_3**)

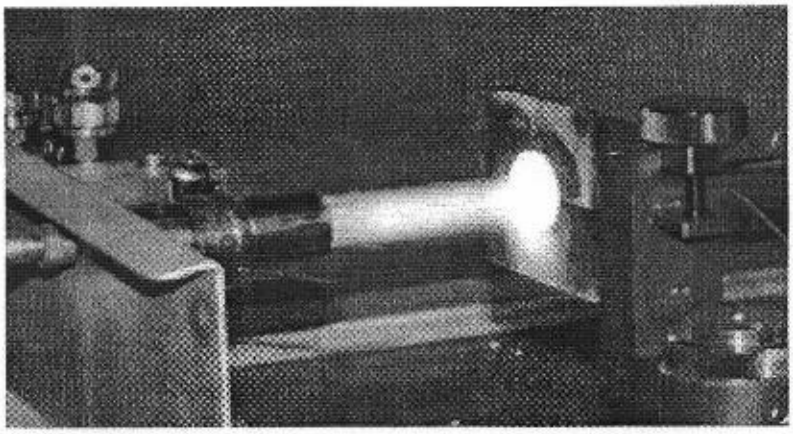
عدد الدورات	الدرجة الحرارية °C	الحجم الحبيبي µm	الفترة الزمنية hr	الملاحظات	المسامات %	الوزن Weight gain gm
2	800	21	8	تماسك جيد	---	---
2	950	21	8	تماسك جيد	---	---
2	1050	13	10	عدم تماسك وظهور مسامات وعيوب سطحية	17%	0.112
3	1150	9	10	عدم تماسك وظهور مسامات وعيوب سطحية	26%	0.271



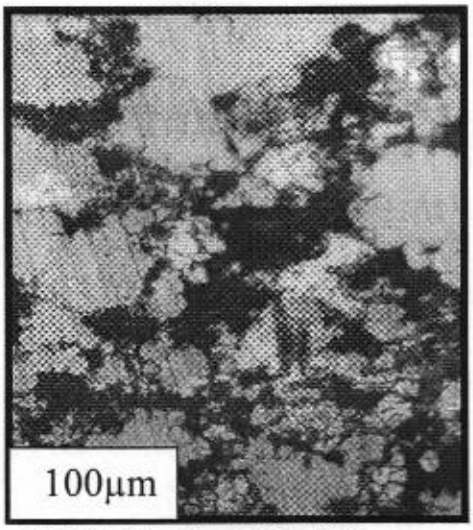
شكل (1) يوضح

a – البنية المجهرية لمسحوق (SiC) المستخدم في عملية القصف عند تخشين السطح المراد طلاؤه.

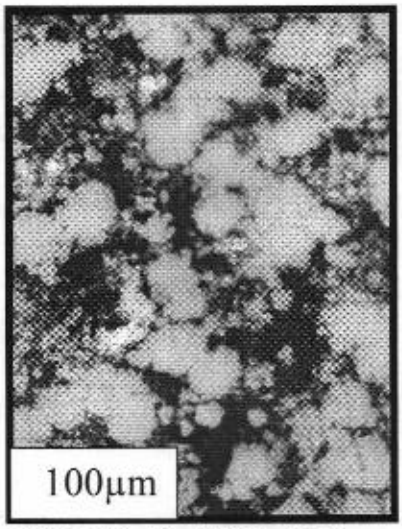
b– البنية المجهرية لسطح طبقة الأنكونيل بعد تخشينها بالقصف بمسحوق كاربيد السليكون.



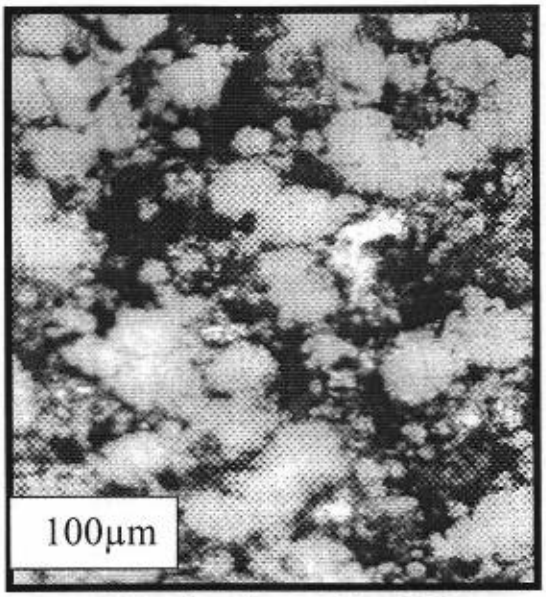
شكل (2) مسدس الرش الحراري



35 %(Ni-Al) +65% Al_2O_3

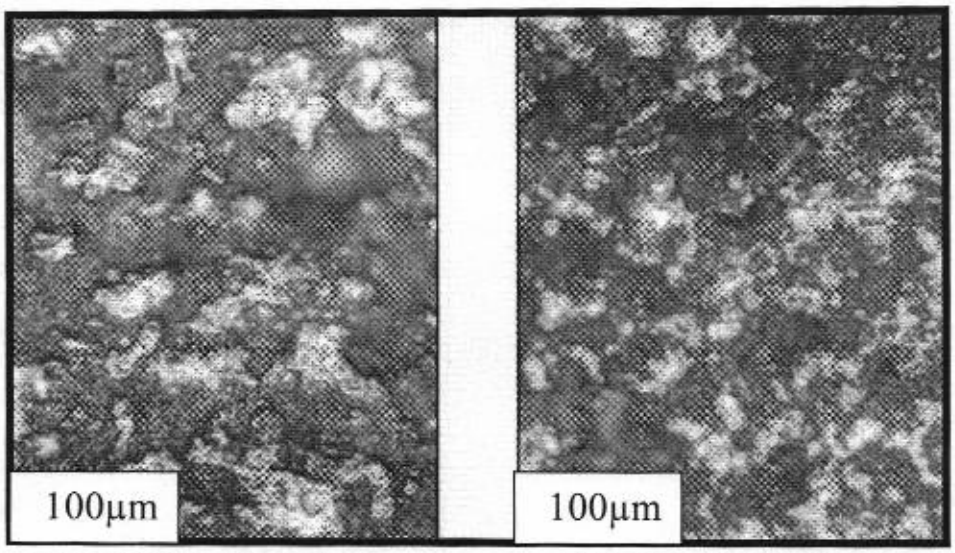


50 %(Ni-Al) +50% Al_2O_3



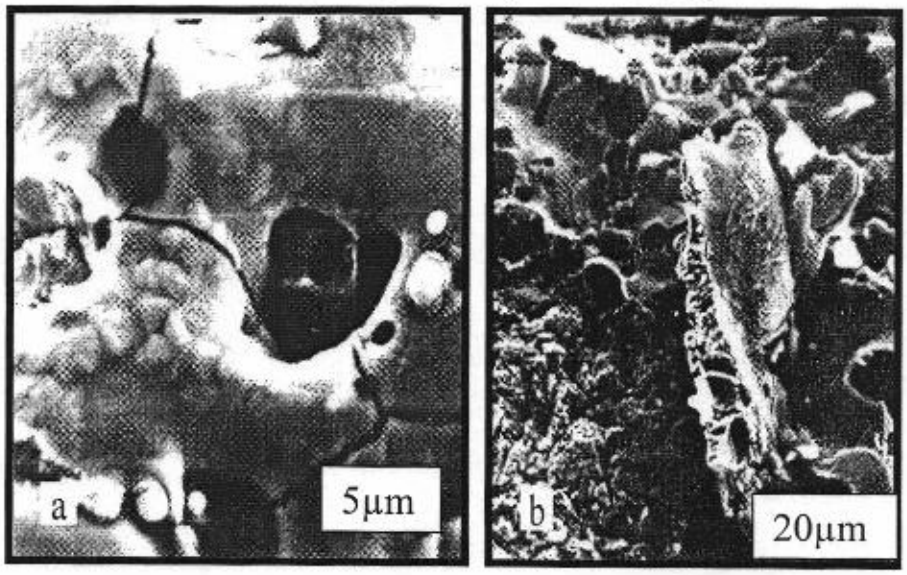
75 %(Ni-Al) +25% Al_2O_3

شكل (3) التركيب المجهري للعينات بعد الرش وقبل المعاملة الحرارية



35 %(Ni-Al) +65% Al_2O_3 50 %(Ni-Al) +50 % Al_2O_3

شكل (4) التركيب المجهري للعينات بعد اجراء المعاملة الحرارية
على درجة(1000°C) ولمدة (1.5hr)



شكل (5) البنية المجهرية للمادة السيرمتية ذات النسبة 50 %(Ni-Al) +50 % Al_2O_3
عند اجراء الدورة الحرارية عند (1150°C) خلال (1.5hr) في حالة
a: دورة واحدة b: دورتين c: ثلاث دورات

IBN AL- HAITHAM J. FOR PURE & APPL. SCI. VOL.19 (4) 2006

Study Some Parameters That Effecting On The Coating Efficiency Of Turbine Blades Produced By Thermal Spraying

I.K.Jassim, A.Kh. Farman
Ministry of Science and Technology,
Department of Material
Department of Physics, College of Education, Ibn-Al-Haitham, University of Baghdad

Abstract

Flame thermal spray technique has been used to produce a cermets composite coating based on powders of ceramic oxides (Al_2O_3) reinforced by mineral powders as bonding material (Ni – Al) at different rates on Inconel substrates , after preparing it by grit blasting .

After completing the best parameters of coating such as distance of spraying , surface roughness and angle of spraying , the tests of porosity , hardness , microstructure and thermal cycling have been made .

The experimental results show that all properties of coating were effected after heat treatment. The best value of heat treatment is at (1000^0C) for (1.5hr) in which the results show a good interface between layers with very small pores.

Also we studied the effect of thermal cycling at high temperature for several times to see the effect of heating on the top surface of layer coating.