


Laser Treatment of Plasma Spraying Alloyed Coatings

Dr. Mohammed Jasim Kadhim 

Production Engineering and Metallurgy Department, University of Technology/ Baghdad

Dr. Sami Ibrahim Jaffar

Production Engineering and Metallurgy Department, University of Technology/ Baghdad

Eman Adnan Anon

Production Engineering and Metallurgy Department, University of Technology/ Baghdad

Email: eman-adnanz&n@yahoo.com

Received on: 24/11/2011 & Accepted on: 5/4/2012

ABSTRACT

Ni23Cr6Al0.4Y plasma sprayed coating on nimonic75 substrate was remelted using a 1 kW continues CO₂ laser. The topography, microstructure, phases and chemical analysis of plasma sprayed and laser melted regions were examined using various techniques including scanning electron microscope (SEM), electron probe microanalysis (EPMA), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD). The plasma sprayed coatings consisted heterogeneous microstructure of lamella with unmelted particles, voids, porosity and cracks. It was found that the depth of melting increased with increasing the specific energy. Homogenous and shiny melted regions were achieved without voids, porosity and cracks after laser melting. Thin upper surface layers with shallow cracks were observed due to the rich layer of α -Al₂O₃ and YAIO₃. No phases changed were found before and after laser melting of plasma sprayed layers. The phases formed are mixtures of γ' , β , YAIO₃ in the matrix γ . The microstructure formed after laser melting is fine cells.

Keywords: Plasma sprayed coating; Laser melting, Ni solid solution; YAIO₃; α -Al₂O₃

المعاملة الحرارية بالليزر لطبقات الرش بالبلازما السبائكية

الخلاصة

تم صهر طبقة الرش بالبلازما نوع Ni23Cr6Al0.4Y المطلوبة على سطح النايمونك 75 باستخدام الليزر المستمر نوع ثاني اوكسيد الكربون وعند قدرة 1 كيلو واط. الطوبوغرافية والبنية المجهرية و الاطوار و التحليل الكيماوي لمناطق الرش بالبلازما ومناطق الانصهار بالليزر تم فحصها باستخدام تقنيات مختلفة تضمنت المجهر الالكتروني الماسح (SEM) والمجس الالكتروني للتحليل الدقيق (EPMA) ومطياف مفرق الاشعة السينية (EDS) وحيود الاشعة السينية (XRD). لقد وجد بان طبقات الرش بالبلازما تتكون من بنية مجهرية غير متجانسة من طبقات تحتوى على دقائق غير منصهرة و فجوات و مسامية وشقوق. يزداد عمق طبقة الانصهار مع زيادة الطاقة النوعية لليزر. تم الحصول على مناطق منصهرة براقية بدون فجوات و مسامية و شقوق بعد الانصهار بالليزر. تم تكوين طبقة رقيقة غنية بالالومينا و YAIO₃ وذات شقوق ناعمة بعد المعاملة بالليزر وبالاخص عند الطاقة النوعية

العالية. لم يتم ملاحظة اي تغير بالاطوار الناتجة قبل وبعد الانصهار بالليزر لطبقات الرش بالبلازما. تتكون الاطوار من مزيج من المحلول الجامد للنكل (γ) كارتزية مع الاطوار الوسطية Ni_3Al (γ') و $NiAl$ (β). البنية المجهرية الناتجة بعد المعاملة بالليزر تتكون من حبيبات ناعمة.

المقدمة

تعتبر الطلاءات الهندسية من اهم الطرق التصنيعية الاساسية للحاجة الماسة لها للمحافظة على الاستخدام الامثل للعناصر المعدنية الاستراتيجية وبنفس الوقت الحماية للاسطح الهندسية لزيادة مقاومة التاكل الكيماوى عند درجات الحرارة الواطئة والعالية ومقاومة الاكسدة [1]. ويعود استخدام الطلاءات للتوربينات الغازية الى اكثر من 70 سنة سابقة وبالاخص استخدام الالمنة [2]. ادى استخدام الطلاءات الهندسية بالطرق المختلفة الى زيادة واضحة فى زيادة المقاومة الكيماوية والحرارية وبالنتيجة زيادة فى درجة حرارة الاستخدام وبوجود الاوساط العدائية مما يودى الى زيادة الكفاءة والاداء للعديد من التطبيقات الهندسية المهمة. والانجاز الواضح للطلاءات لهذه التطبيقات تم فى عام 1960 وبعدها تم استخدام نظام الطلاء $MCrAlY$ (حيث M يمثل الكوبلت او النيكل او الحديد او مزيجهما) للتوربينات الغازية [3]. لقد وجد ان هذه الانظمة تعمل بصورة فعالة عند درجات الحرارة التى تتجاوز $900^\circ C$ من خلال تكوين طبقة اوكسيدية $\alpha-Al_2O_3$ والتى تمتاز بسرعة نموها البطيئة [4]. يتم الحصول على انظمة الطلاءات ذات الاساس $MCrAlY$ بطرق عديدة واهما طرق التبخير الفيزيائى والايونى وطرق الرش المختلفة [5]. لكن تبقى عملية الطلاء بالرش بالبلازما من اهم الطرق المستخدمة بسبب امكانية الحصول منها على سمك عالى وبخواص مقبولة وبكلفة مناسبة. وتستخدم طريقة الرش بالبلازما بصورة كاملة لانتاج الحواجز الحرارية (Thermal Barrier Coatings, TBCs).

تعتبر الحواجز الحرارية من اهم التطبيقات المتقدمة للمواد الهندسية والتى تحتاج الى تصميم دقيق واستخدام طرق تصنيعية متخصصة والتى تعتمد بدرجة كبيرة على تقنيات الرش الحرارى بالبلازما [6]. الحواجز الحرارية بصورة عامة عبارة عن نظام هندسى متكامل ويتكون على الاقل من ثلاثة طبقات هى المواد الهندسية الفائقة والطبقة الوسطية ذات الاساس من النيكل او الكوبلت وبدرجة اقل من الحديد او مزيجهما والطبقة السيراميكية والتى تكون عادة ذات اساس من الزركونيا المثبتة بالياتريا [7]. ويعتمد نجاح الحاجز الحرارى عند التطبيق على الاختيار الامثل للمواد الهندسية والطرق التصنيعية لها وبالاخص للطبقة الوسطية والتى تلعب دور كبير بالتوافق بين سطح المواد الهندسية الفائقة والطبقة الخارجية للمادة السيراميكية [8]. ولذلك عادة الطبقات الوسطية تصنع من تراكيب كيميائية خاصة وبطريقة الرش الحرارى بالبلازما ومن مزيج من مساحيق الحديد او النيكل او الكوبلت مع الكروم والالمنيوم والياتريوم وبعض العناصر ذات الالفة العالية مع الاوكسجين [9]. ان السمك الامثل لهذه الطبقة بحدود 100 مايكرون وتمتاز بمقاومة عالية للاكسدة وتمتاز بمعامل تمدد ذات توافق بين السطح المعدنى والطبقة السيراميكية وكذلك تمتاز بتوافق بالخواص الحرارية-الميكانيكية [10]. تلعب هذه الطبقة الوسطية دور اساسى ومباشر لتحسين خواص الاكسدة والتاكل الكيماوى اثناء الاستخدام بدرجات الحرارة العالية وكذلك تحسين الربط بين السطح المعدنى والطبقة السيراميكية وبالنتيجة تحسين الاداء للحواجز الحرارية.

ان من اهم العيوب الملازمة لتصنيع الطبقة الوسطية باستخدام الرش بالبلازما هو وجود العيوب المصاحبة والتى اهمها المسامية والفجوات والتى تلعب دور مباشر لانتشار الاوكسجين والشوائب الموجودة بالوقود خلالها والتى تصل الى السطح المعدنى [11]. ان انتشار الاوكسجين خلال الطبقة الوسطية ونتيجة لوجود الالمنيوم والكروم يودى الى تكوين الالومينا بالدرجة الاساس وكذلك الكروميا وبعض الاكاسيد الاخرى والتى تسمى اكاسيد النمو الحرارى (TGO) والتى تعتبر من اهم عوامل تحديد فشل وعمر الحواجز الحرارية [10]. ان عملية السيطرة على نمو هذه الاكاسيد وبالاخص الالومينا بين الطبقة الوسطية والطبقة السيراميكية مهم جدا والتى تتطلب الحصول على سمك اوكسيد قليل وانتشارية للاوكسجين قليلة وربط عالى مع الطبقة السيراميكية [12]. لهذا فان اى طريقة فعالة تستخدم للحد والتخلص من

المسامية والفجوات لجزء من الطبقة الوسطية وبدون التأثير على السطح المعدني سوف تلعب دور كبير بتحسين اداء الحواجز الحرارية. ويتم ذلك من خلال السيطرة على انتشارية الاوكسجين وتكوين الالومينا. ومن اهم الطرق التي من الممكن استخدامها الليزر المستمر ذو القدرة العالية لصهر جزء من طبقة الرش بالبلازما.

تم خلال السنوات الماضية استخدام الليزر المستمر بصورة فعالة وكفوة جدا بعمليات الليزر لتعديل الاسطح للمواد الهندسية وبالاخص المواد السبائكية [13,14]. وبالرغم من البحوث العديدة والمختلفة للعمليات السطحية بالليزر والتي اهمها التسخين والتحول الطوري والانصهار والتسيك والاكساء للاسطح المعدنية فانه بنفس الوقت هنالك حاجة كبيرة لدراسة الانصهار بالليزر لطبقات الاسطح المعدنية المنتجة بالرش الحرارى بالبلازما [15]. أن هذه العملية والتي تستخدم للمعاملة الحرارية لاسطح الرش بالبلازما للمواد السيراميكية تسمى عادة بالختم (Sealing) وقد تم دراستها لحد ما بصورة اكبر مقارنة مع طبقات الرش المعدنية [16]. الادبيات المتوفرة حول الانصهار السطحي بالليزر لطبقات الرش بالبلازما اوضحت امكانية استخدام متغيرات الليزر بصورة فعالة للحصول على طبقات انصهار بدون عيوب [17-20].

الجزء العملي

تم استخدام سبيكة فائقة نوع نايمونك 75 ذات اساس من النيكل و 20% كروم وذات سمك 3 ملم. قبل اجراء الرش بالبلازما تم تحضير سطح السبيكة بواسطة العصف بالالومينا. ان المسحوق المستخدم لانتاج الطبقة الوسطية بالرش بالبلازما هو (wt%) Ni23Cr6Al0.4Y والمجهز من شركة Metco وذات متوسط حجم حبيبي بحدود 150 مايكرون والمنتج بطريقة التذرية. طبقات الرش المنتجة ذات سمك بحدود 2 ملم وتم انتاجها باستخدام المتغيرات الموضحة بالجدول 1.

تمت معاملة طبقات الرش بالبلازما باستخدام ليزر ثاني اوكسيد الكربون ذو الطول الموجي 10.6 مايكرون وذى القدرة 2 كيلو واط والمتغيرات الموضحة بالجدول 2. أن حزمة الليزر الخارجة من الليزر هي 22 ملم والتي تم انعكاسها الى منظومة الليزر باستخدام مرآيا مبردة من النحاس المطلية بالذهب. وتم تركيز حزمة الليزر باستخدام عدسة من كلوريد البوتاسيوم ذات البعد البؤري 150 ملم للحصول على قطر حزمة ليزر 1 ملم على اسطح طبقة الرش بالبلازما.

لقد تم قياس الخشونة لطبقة الطلاء والمناطق المعاملة بالليزر وتم وصف القيم بطريقة Centre Line Average (CLA). وتم استخدام المجهر الالكتروني الماسح المربوط مع مطياف مفرق الاشعة السينية لدراسة طوبوغرافية الاسطح والبنية المجهرية والتركيب الكيماوي. اما المسامية والفجوات والعيوب الاخرى فلقد تم تحديدها من السطح الخارجى وبدون اى تحضير للسطح. اما البنية المجهرية فتم دراستها من خلال تحضير العينات بواسطة القطع بصورة عمودية على مناطق الليزر ومن ثم الاسناد والتنعيم والصقل بالطرق التقليدية لتحضير العينات للفحص المجهرى. تم استخدام محلول اظهار من مزيج من حامض الهيدروكلوريك والنريك والماء وبنسب حجمية 1/1/3 على التوالي. الاطوار المتكونة لطبقة الرش بالبلازما والمناطق المعاملة بالليزر والمتداخلة بنسبة بحدود 50% تم تحديدها باستخدام حيود الاشعة السينية وباستخدام النحاس كهدف وبالطول الموجي $K\alpha$ 0.15405 nm. اما الصلادة الدقيقة فتم قياسها بطريقة فيكرز وباستخدام حمل مقداره 1 كغم.

النتائج والمناقشة

اوضح الفحص المجهرى باستخدام المجهر الالكتروني الماسح للسطح العلوى لطبقة الرش بالبلازما وبدون اى تحضير الطوبوغرافية للسطح والتي تحتوى على فجوات خارجية ومسامية وكذلك وجود كمية من اوكسيد الالمنيوم (المناطق البيضاء) (شكل 1). كذلك يوضح الشكل السابق وباستخدام الفحص المجهرى الماسح بتقنية الطوبوغرافية (YMD mode) الخشونة العالية للسطح والتي تتجاوز اكثر من 15 مايكرون كمتوسط للخشونة. بينما يوضح الشكل 2 المقطع العمودى لطبقة الرش بالبلازما لمسحوق

NiCrAlY. تبدأ البنية المجهرية لطبقة الرش باللازما على هيئة رقائق متتابعة ناتجة من طبيعة عملية الرش والتجمد بمعدلات تبريد عالية وكما موضح بالفحص بالمجهر الإلكتروني الماسح (شكل 2). كذلك أوضح الفحص المجهرى باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح وباستخدام تقنية Backscattered Image وجود الأطوار المختلفة وكما تم التأكد منها أيضا باستخدام حيود الأشعة السينية وهى الأرضية (Matrix) وهو محلول جامد من النيكل والكروم (الأرضية البيضاء). ويلاحظ من الشكل 2 وجود بعض الاشرطه الغامقه وهى اكاسيد وبدرجة كبيرة من اوكسيد الالمنيوم. أن المناطق الرمادية فى الشكل 2 عبارة عن المركب الوسطى Ni_3Al (γ'). أما المركب $YAlO_3$ والذى يكون على هيئة مناطق رمادية غامقة فانه تم التأكد منه من نتائج التحليل باستخدام مطياف مفرق الأشعة السينية (جدول 3). الكمية العالية لليتريوم فى هذه المناطق الرمادية والتي تم التأكد منها باستخدام مطياف مفرق الأشعة السينية موضحة بالشكل 3. كذلك بين الفحص المجهرى وجود اطوار سوداء وهى عبارة عن المركب الوسطى $NiAl$ (β) (شكل 2 و جدول 3).

يوضح الفحص المجهرى للمقطع العمودى وجود العيوب المصاحبة لعملية الرش وهى الفجوات والاكاسيد وبعض الدقائق الغير منصهرة والمسامية والتي تقل بالعمق مقارنة مع الطبقة الخارجية. يوضح الشكل 4 ازالة كافة هذه العيوب بعد المعاملة بالليزر ولعمق يعتمد على متغيرات الليزر المستخدمة. ويبين الشكل 5 ازالة كافة عيوب الرش بعد المعاملة بالليزر وكما موضح من خلال الفحص للطبقة السطحية قبل وبعد المعاملة بالليزر من خلال السطح العلوى وبدون اى تحضير. الفحص بمجهر القوى الذرية للطبقات السطحية لكلا من طبقات الرش باللازما وبعد معاملتها بالليزر النقصان الواضح بالخشونة والمصاحب لازالة عيوب الرش بصورة كبيرة (شكل 6). يلاحظ بانه عند زيادة الطاقة النوعية والمصاحبة الى زمن الانصهار العالى يتم الحصول على تغلغل كبير لمنطقة الانصهار بالليزر والتي تعزى الى الامتصاصية العالية لطبقات الرش لحزمة الليزر المستمر مقارنة مع الاسطح المعدنية المصبوبة والمشكلة (شكل 7). تودى الامتصاصية العالية لطبقة الرش باللازما وزمن التجمد الطويل نسبيا عند الطاقة النوعية العالية الى تكوين طبقة سطحية غنية باوكسيد الالمنيوم وبكمية قليلة من $YAlO_3$ والتي يعزى تكوينها الى الكثافة الواطنة لكلا من الالمنيوم واليتريوم والتي تودى الى صعودها الى السطح وتفاعلها مع الاوكسجين مكونة طبقة رقيقة من الاكاسيد وكما تم التأكد منه بفحص مطياف مفرق الأشعة السينية (EDS) (شكل 8). ان تكون طبقة رقيقة من القشور الغير مرتبطه بصورة كبيرة مع المنطقة المنصهرة والحاوية على شقوق هو بسبب هذه الاكاسيد. الفحص الدقيق بالمجهر الضوئى للمقاطع العمودية اوضح عمق المنطقة المنصهرة والخالية من كافة العيوب المصاحبة لعملية الرش. ان الشقوق الناتجة من الانصهار بالليزر والتي تم ملاحظتها فى الطبقة السطحية عند قيم كثافة القدرة العالية لم يتم تغلغلها فى عمق المنطقة المنصهرة (شكل 8). هذا يشير الى فعالية عملية اعادة الانصهار بالليزر لطبقات الرش المعدنية. علما انه يمكن التحكم بعمق طبقة الانصهار بواسطة السيطرة على متغيرات الليزر واهما الطاقة النوعية ومن خلال السيطرة على كلا من كثافة القدرة وسرعة حركة اسطح الرش باللازما نسبة الى قطر حزمة الليزر المسلطة. لم تضح نتائج حيود الأشعة السينية اختلاف كبير بالأطوار الناتجة قبل وبعد المعاملة بالليزر. حيث ان الأطوار السائدة هى المحلول الجامد للنيكل والمركب الوسطى Ni_3Al وكمية قليلة من المركب الوسطى $NiAl$ و كمية صغيرة جدا من الالومينا و المركب $YAlO_3$ والذى يزداد بعد المعاملة بالليزر وبالاخص عند زمن المعاملة الطويل. ويعزى ذلك الى تفاعل الالمنيوم واليتريوم المتواجد بطبقة الطلاء عند الانصهار مع الاوكسجين. ان كمية هذه الاكاسيد تكون بصورة قليلة فى عمق طبقة الطلاء قبل وبعد المعاملة بالليزر.

الاستنتاجات

1- تمتاز طبقات الرش بالبلازما بوجود الفجوات والمسامية وبعض الدقائق غير المنصهرة مع كمية من اوكسيد الالمنيوم متوزعة بصورة غير منتظمة و تتركز بصورة كبيرة بالسطح الخارجى.

- 2- ادت المعاملة بالليزر لطبقات الرش بالبلازما $Ni_{23}Cr_6Al_{10.4}Y$ الى تحسن واضح بازالة العيوب السطحية من الفجوات والمسامية وعند قيم من الطاقة النوعية بحدود 250 جول/ملم².
- 3- لم تؤدي المعاملة بالليزر على تغير بالاطوار لطبقات الرش بالبلازما حيث تتكون من حبيبات من المحلول الجامد للنكل (γ) مع كمية من الاطوار الوسطية $NiAl$ (β) و Ni_3Al (γ') و $YAlO_3$ مع كمية قليلة من اوكسيد الالمنيوم ($\gamma-Al_2O_3$).
- 4- ادت المعاملة بالليزر الى تحسن واضح فى الصلادة مقارنة مع طبقات الرش بالبلازما.

المصادر

- [1]. Goward, G.W., *Protective coatings - purpose, role, and design*, Materials Science and Technology, 2(1986)194-198.
- [2]. Goward, G.W., *Progress in coatings for gas turbine airfoils*, Surface and Coatings Technology, 108-109(1998)73-79.
- [3]. Stringer, J., *Role of coatings in energy production systems: An overview*, Materials Science and Engineering, 87(1987)1-10.
- [4]. Giggins, C.S. and F.S. Pettit, *Oxidation of Ni-Cr-Al alloys between 1000 degrees and 1200 degrees °C*, Journal of the Electrochemical Society, 117(1970)C254.
- [5]. Nicholls, J.R., *Designing oxidation-resistant coatings*, Journal of Materials, 52(2000)28-35.
- [6]. Pint, B.A., I.G. Wright, W.Y. Lee, Y. Zhang, K. Prübner, and K.B. Alexander, *Substrate and bond coat compositions: factors affecting alumina scale adhesion*, Materials Science and Engineering A, 245(1998)201-211.
- [7]. Nijdam, T.J. and W.G. Sloof, *Combined pre-annealing and pre-oxidation treatment for the processing of thermal barrier coatings on NiCoCrAlY bond coatings*, Surface and Coatings Technology, 201(2006)3894-3900.
- [8]. Karlsson, A.M., J.W. Hutchinson, and A.G. Evans, *The displacement of the thermally grown oxide in thermal barrier systems upon temperature cycling*, Materials Science and Engineering A, 351(2003)244-257.
- [9]. Pint, B. and K. More, *Characterization of alumina interfaces in TBC systems*, Journal of Materials Science, 44(2009)1676-1686.
- [10]. Jackson, R.D., *The effect of bond coat oxidation on the microstructure and endurance of two thermal barrier coating systems*, PhD Thesis, University of Birmingham, 2009.
- [11]. Chegroune, R., E. Salhi, A. Crisci, Y. Wouters, and A. Galerie, *On the competitive growth of alpha and transient aluminas during the first stages of thermal oxidation of FeCrAl alloys at intermediate temperatures*, Oxidation of Metals, 70(2008)331-337.
- [12]. Naumenko, D., B. Gleeson, E. Wessel, L. Singheiser, and W.J. Quadackers, *Correlation between the microstructure, growth mechanism, and growth kinetics of alumina scales on 171 FeCrAlY alloy*, Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science, 38A(2007)2974-2983.
- [13] Dutta Marjumdar, J. and I. Manna, *Laser processing of materials*, *Sadhana*, 28(2003)495-562.
- [14]. Steen, W.M. and J. Mazumder, *Laser materials processing*, Fourth Edition, 2010, Springer.

- [15]. G Zhang, Wu, Y.N., Z.C Feng, B.C Zhang, Y Liang, and F.J Liu, Oxidation behavior of laser remelted plasma sprayed NiCrAlY and NiCrAlY-Al₂O₃ coatings, Surface and Coating Technology, 38(2001)56-60.
- [16]. Mohammed Jasim, K., Characterization of laser sealed coatings of yttria partially stabilized zirconia, Optics and Lasers in Engineering, 49(2011)785-792.
- [17]. Zhang, Wu, Y., G. B. Zhang, Z. Feng, and Y. Liang, Laser remelting of plasma sprayed NiCrAlY and NiCrAlY-Al₂O₃ coatings, J. Materials Science and Technology, 17(2001)525-528.
- [18]. Sivakumar, R. and B.L. Mordike, Laser melting of plasma sprayed NiCoCrAlY coatings, Surface Engineering, 3(1987)299-308.
- [19]. Smeggil, J., A.W. Funkenbusch, and N.S. Bornstein, The effects of laser surface processing on the thermally grown oxide scale formed on an Ni-Cr-Al-Y composition, Thin Solid Films, 119(1984)327-332.
- [20]. Zhang, Y.P., Z.R. Zhou, J.M. Cheng, Y.L. Ge, and H. Ma, Laser remelting of NiCoCrAlY clad coating on superalloy, Surface and Coatings Technology, 79(1996)131-134.

جدول (1) متغيرات الرش بالبلازما المستخدمة لإنتاج الطبقة الوسطية

	Bond layer
Feed stroke	Ni23Cr6AlY0.4Y (AMDRY 935)
Current, A	550
Voltage, V	55
Primary argon flow rate, SLPM	50
Secondary hydrogen flow rate, SLPM	4
Carrier argon flow rate, SLPM	4
Powder feed rate, g/min	50
Spray distance, mm	120

جدول (2) متغيرات الليزر المستخدمه لعمليات الانصهار لطبقات الرش بالبلازما للطبقة الوسطية

Parameter	Value
TEM mode	near 01
Raw laser beam diameter, D	22 mm
Focal length, f	150 mm
Shrouding gas, F	argon, 4 SLPM
Laser power, P	1 kW
Traverse speed, V	1-32 mm/s
Laser beam diameter, d	1 mm
Interaction time, t	31-1000 ms
Power density, P_A ($4P/\pi d^2$)	1270 W/mm ²
Specific energy, S (P/dV)	31-1000 J/mm ²

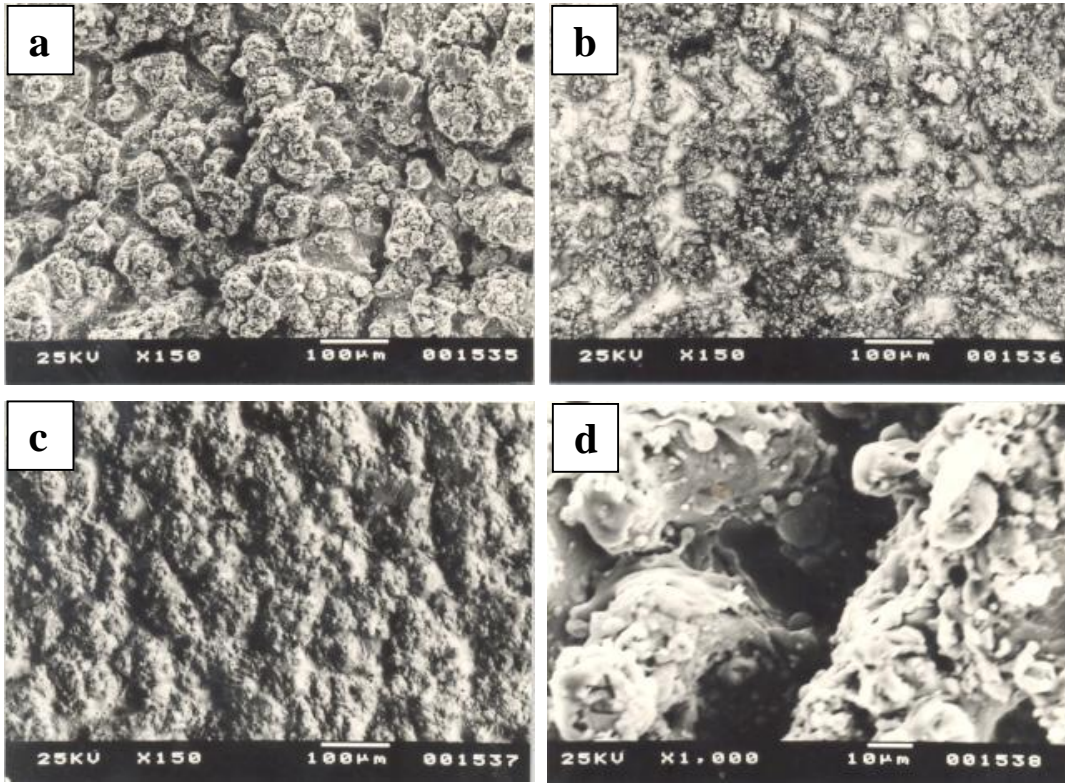
جدول (3) التحليل الكيماوي باستخدام مطياف مفرق الاشعة السينية للمناطق المختلفة لطبقات الرش بالبلازما للطبقة الوسطية Ni₂₃Cr₆Al_{10.4}Y (wt%).

Region	Phase(s)	Ni	Cr	Al	Y
Average plasma sprayed Ni ₂₃ Cr ₆ Al _{10.4} Y	γ , γ' and β	69.5	24.2	6	0.3
Matrix (white phase), see figure	γ	76.1	23	0.8	0.1
Grey phase, see figure *	β/γ or γ'/γ or YAlO ₃	23	33	37	7
Black phase, see figure *	β/γ or γ'/γ	40	16	35	2.2

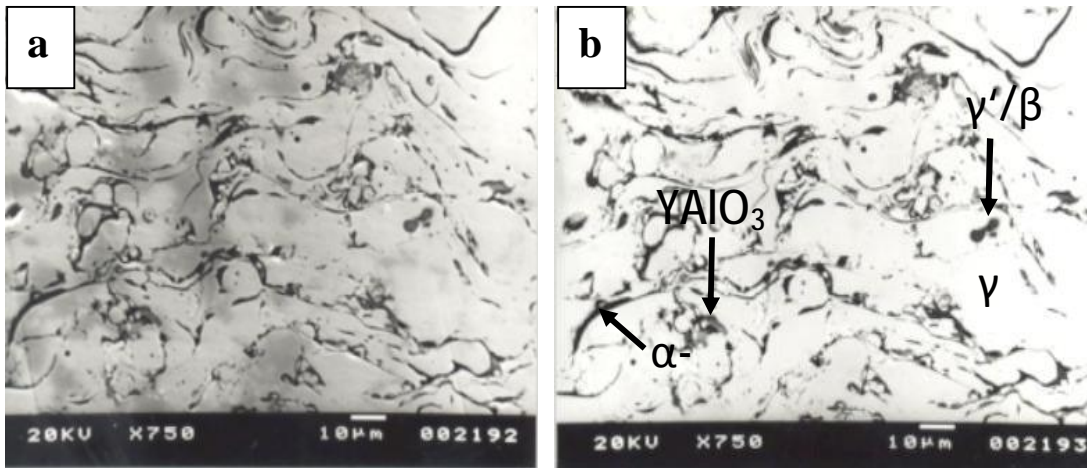
* Not very accurate due to the small size of phases, generally smaller than the electron probe.

جدول (4) نتائج تحليل حيود الاشعة السينية للاطوار المختلفة لطبقات الرش بالبلازما قبل وبعد المعاملة بالليزر لطبقات الرش الوسطية.

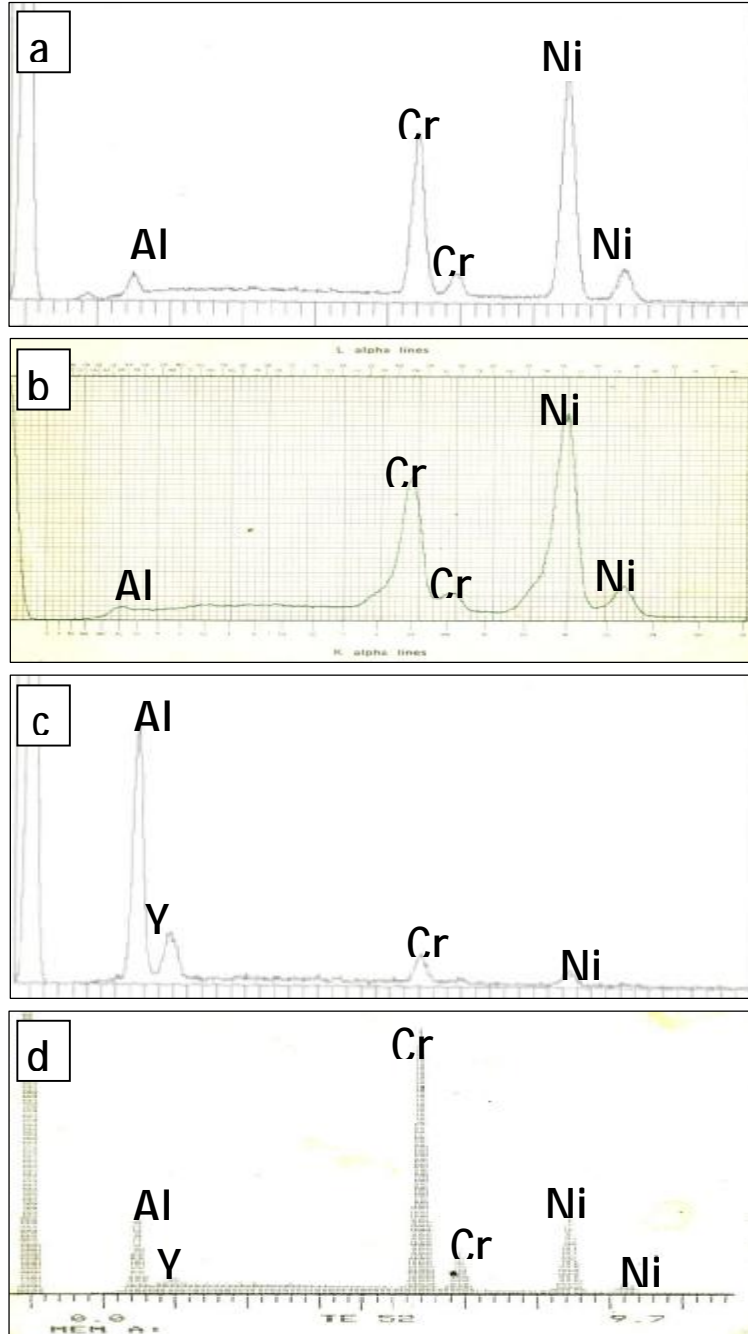
2 θ	d, nm (Plasma sprayed layer)	d, nm (Sealed layer)	Phase(s)	Hkl
25.685	0.34654	0.34651	α -Al ₂ O ₃ , γ'	012, 111
29.171	0.30587	0.30588	γ'	210
43.715	0.20689	0.20691	α -Al ₂ O ₃ , γ'	113, 131
44.443	0.20367	0.20366	γ , YAlO ₃ , β	111, 113, 110
50.132	0.18181	0.18184	YAlO ₃	004
50.950	0.17908	0.17903	YAlO ₃	221
51.746	0.17651	0.17650	γ , γ'	200, 321
62.968	0.14748	0.14746	YAlO ₃	223
74.890	0.12669	0.12667	γ , YAlO ₃	220, 233
90.918	0.10807	0.10804	γ	311



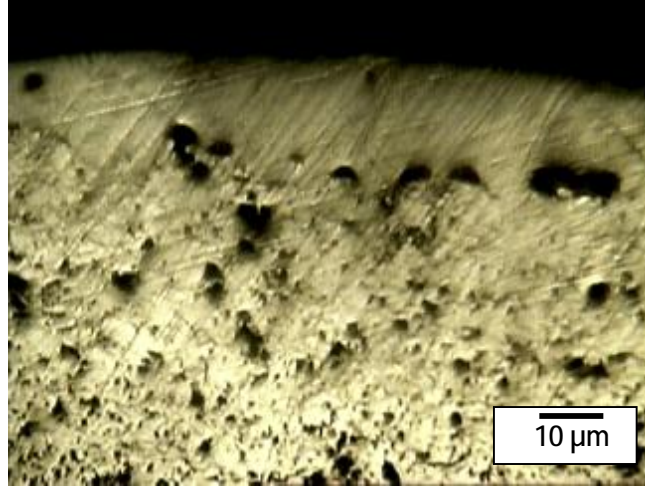
شكل (1) طوبوغرافية السطح الخارجى لطبقة الرش بالبلازما (a) عند قوى التكبير الواطنة توضح العيوب المصاحبة للرش بالبلازما و (b) تقنية back scattered توضح الاكاسيد السطحية و (c) تقنية MD توضح خشونة السطح و (d) السطح الخارجى عند قوى التكبير العالية يوضح الفجوات والدقائق غير المنصهرة.



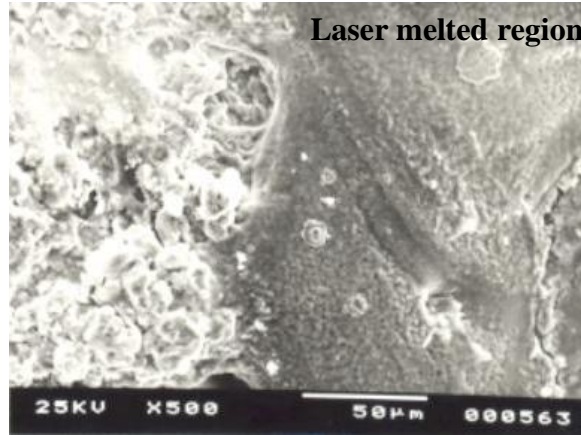
شكل (2) المقطع العمودى لمنطقة الرش بالبلازما يوضح البنية المجهرية (a) secondary electron image و (b) back scattered image.



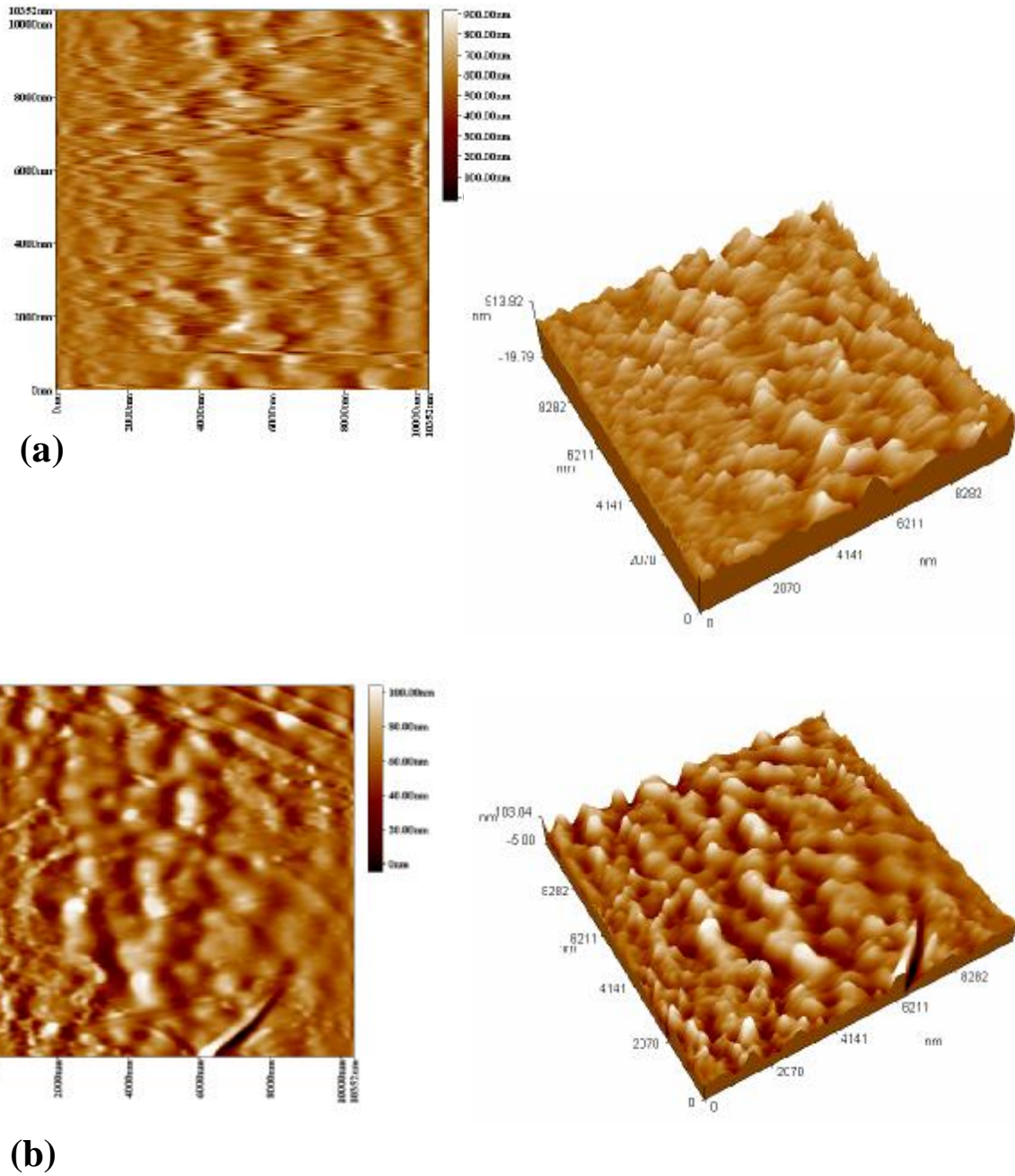
شكل (3) مطياف مفرق الاشعة السينية لطبقة الرش بالبلازما يوضح (a) متوسط التحليل الكيماوي و (b) الارضية و (c) الطور α -Al₂O₃ و (d) الطور γ -Al₂O₃.



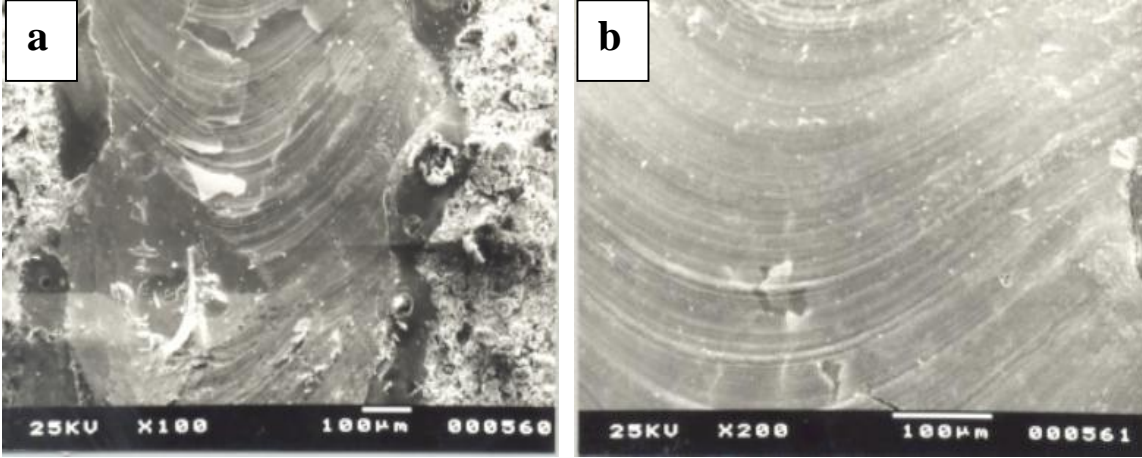
شكل (4) المقطع العمودي لطبقة الرش بالبلازما يوضح منطقة الانصهار بالليزر.



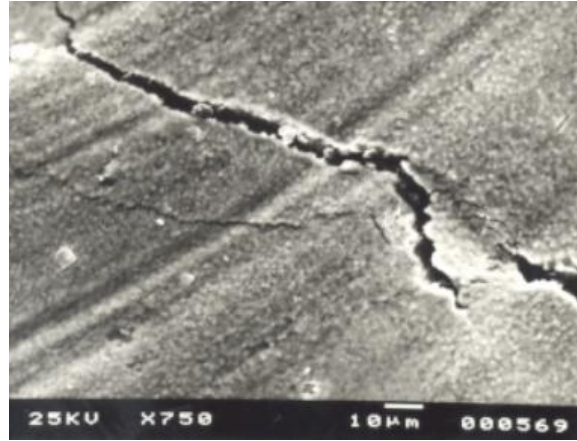
شكل (5) الحد الفاصل لمنطقة الرش بالبلازما والمنطقة المعاملة بالليزر يوضح انعدام العيوب السطحية بعد المعاملة بالليزر.



شكل (6) الخشونة السطحية بواسطة مجهر القوى النافذه (a) منطقة الرش بالبلازما و (b) المنطقة المعاملة بالليزر.



شكل (7) السطح العلوي للمناطق المعاملة بالليزر يوضح تكوين طبقة رقيقة من الاكاسيد تتركز بصورة كبيرة بالمنطقة الخارجية عند قيم مختلفة من الطاقة النوعية (a) 1000 جول/ملم² و (b) 250 جول/ملم².



شكل (8) السطح العلوي للمنطقة المعاملة بالليزر توضح الشقوق المتكونة بطبقة الاوكسيد عند طاقة نوعية 333 جول/ملم².