The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, Vol.8, No.2, 2008

تأثير اضافة الكروم على الصفات الميكانيكية للمادة المركبة ذات الاساس شبه المعدني (NiAl-Al2O3)

Dr.Kahtan AL-Khazraji* **Dr.Haydar A.Hussain ** **Ahmed Mudhaffer Hashim****
*University of Technology, Materials Eng. Dept.
** Babylon University, Materials Eng. Dept. , College of Eng.

ABSTRACT

In this investigation NiAl-based composites containing a dispersion of Al_2O_3 particles are prepared by sintering technique at 1350°C for 90 min. in an argon atmosphere. Intermetallic compound NiAl was prepared from a mixture of nickel and aluminum powders by using reactive sintering technique at 600°C for 12 Hrs. in an argon atmosphere. To improve the ductility of NiAl three weight percents of Cr (3.5, 4, 4.5 wt %) were added to the composite (NiAl-Al_2O_3). Series of experiments showed that:

- adding of (Al_2O_3) to (NiAl) leads to increase its compressive strength and its hardness but with a decrease in its ductility;
- adding Cr to the intrmetallic composite (NiAl-Al_2O_3) leads to increase its compressive strength and its hardness with an ability to improve its ductility. An addition of (4.5 wt% Cr) to the composite containing (10wt%Al_2O_3) led to improve the compressive strength by (25%), hardness by (9%) and ductility by (94%) in comparison with that containing no Cr.

Key words: Composite Material, Mechanical Properties, Chrome

الخلاصة:

في البحث الحالي تم تحضير المادة المركبة ذات الأساس من ألومينايد النيكل NiAl والمقواة بدقائق أوكسيد الألمنيوم Al2O3 بواسطة تقنية التلبيد عند درجة حرارة 1350°C لمدة ساعة ونصف تحت جو من غاز الأركون وقد حضر المركب شبه المعدني NiAl بواسطة التلبيد التفاعلي لمسحوقي السبك الرئيسيين النيكل والألمنيوم عند درجة حرارة 600°C لمدة 12 ساعة. اضيفت ثلاث نسب وزنية من الكروم هي (3.5,4,4.5wt%) إلى المركب (NiAl).اظهرت الاختبارات بان إضافة نسب من اوكسيد الالمنيوم إلى ألومينايد النيكل NiAl تؤدي إلى زيادة مقاومة الانضغاط والصلادة ولكن مع انخفاض في المطيلية، وان إضافة الكروم إلى المادة المركبة (NiAl-Al2O3) تؤثر باتجاه زيادة مقاومتها للانضغاط وزيادة صلادتها مع امكانية الحصول على مطيلية اعلى.ان افضل النتائج التي تم الحصول عليها كانت عند اضافة كروم نسبة (4.5wt%) الى المادة المركبة(90NiAl-10Al2O3) حيث ازدادت مقاومة الانضغاط بنسبة(25%) والصلادة بنسبة (9%) والمطيلية بنسبة (94%) بالمقارنة مع قيمها للمادة الخالية من الكروم.

المقدمة:

لقد أدت متطلبات الصناعة الحديثة إلى الحاجة لمواد جديدة تتصف بالجساءة العالية وبخفة الوزن وإنخفاض الكلفة وعمر الخدمة الطويل والإحتفاظ بالخواص عند درجات الحرارة العالية والأوساط القاسية.مثل هذه المتطلبات وغيرها يمكن الحصول عليها من المركبات شبه المعدنية.

تعتبر ألومينايدات المعادن الإنتقالية ذات البنية البلورية B2 أحد أهم مجاميع المركبات شبه المعدنية وهي تشمل: الومينايد الكوبالت والومينايد النيكل والومينايد الحديد، وهذه البنية مشتقة من البنية البلورية المكعبة المتمركزة الجسم (bcc) اذ ان وحدة الخلية لهذه البنية تحتوي على ذرتين وهو العدد نفسه الموجود في بنية (bcc)، وهي تتألف من خليتين مكعبتين أوليتين متداخلتين إذ تحتل ذرات الألمنيوم إحدى زوايا وحدتي الخليتين المتداخلتين ، بينما تحتل ذرات النيكل أو الكوبالت أو الحديد زوايا المكعب لوحدة الخلية الثانية. ويعد ألومينايد النيكل NiAl أبرز هذه الألومينايدات والطور الأكثر أهمية في نظام النيكل – ألمنيوم (الشكل 1) وذلك بسبب الخواص الميكانيكية والفيزياوية الفريدة التي يمتلكها والتي جعلته يصبح منافساً وبديلاً للسبائك التقليدية ذات الأساس نيكل المستعملة في أوساط درجات الحرارة العالية والأوساط القاسية، وعلى الرغم من ذلك إلا أن هنالك محددات في تطبيقات ألومينايد النيكل NiAl وهي مطيليته المنخفضة وهشاشيته العالية عند درجة حرارة الغرفة وذلك بسبب سلوك الفشل بالكسر الهش ما بين البلورات (Intergranular Fracture)

ومقاومة الكسر الضعيفة للتشقق ومتانة كسره المنخفضة. لمعالجة هذه العيوب يتم إضافة أوكسيد الألمنيوم إلى أرضية المركب NiAl لتكوين المادة المركبة ذات الأســـاس شبه المعدني (NiAl-Al2O3)[1] . ان الدراسات التي تطرقت إلى إنتاج المادة المركبة (NiAl-Al2O3) تعد قليلة وحديثة العهد ففي عام 1997م تمت دراسة تأثير إضافة دقائق الألومينا على الحجم الحبيبي لدقائق ألومينايد النيكل NiAl وعلى خواصه الميكانيكية [2]، كذلك درست الخواص الميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس من ألومينايد النيكل NiAl والمحتوية على دقائق مشتتة من نتريد الألمنيوم AlN وأليـاف مشتتة من الألومينا [3]. عام 2000م درست امكانية تحسين خواص الربط للمادة المركبة ذات أساس من ألومينايد النيكل NiAl والمقواة بأليـاف الألومينا عن طريق طلاء أسطح أليـاف الألومينا بنتريد البورون [4]. عام 2001م بحث انتاج مسحوق المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al2O3) بتقنية التسبيك الميكانيكي لمسحوقي أوكسيد النيكل (NiO) والألمنيوم [5]. عام 2003م تم تحضير ودراسة الخواص الميكانيكية للمادة المركبة (NiAl-Al2O3) عن طريق أكسدة مسحوق ألومينايد النيكل NiAl في الهواء لمدة ساعتين عند درجات حرارة مختلفة لتكوين أوكسيد الألمنيوم Al2O3 ضمن الأرضية ذات الأساس NiAl [1] حيث تم التوصل إلى أن Al2O3 يحد من النمو الحبيبي لدقائق المركب NiAl.

يتضمن البحث الحالي تحضير المركب شبه المعدني ألومينايد النيكل NiAl بتقنية التلبيد التفاعلي لمسحوقي النيكل والألمنيوم ، ومن ثم إنتاج المادة المركبة ذات الأساس من هذا المركب والمقواة بدقائق الألومينا -NiAl (Al2O3 ودراسة تحسين الخواص الميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al2O3) بإضافة الكروم بنسب وزنية مختلفة إلى هذا المركب شبه المعدني.

الجانب العملي:

إنتاج المركب شبه المعدني ألومينايد النيكل NiAl:

لتصنيع النماذج المستخدمة في البحث استخدمت المساحيق المبينة في جدول (1). اما النماذج الأساسية من ألومينايد النيكل NiAl فقد تشكلت من(Ni 68wt%) لجميع النماذج والباقي من الالمنيوم و نسب اضافة (Cr 3.5,4,4.5wt%). تم وزن النماذج باستخدام ميزان نوع (L220S-**D) بدقة ($\pm$ 0.001) ، مصنع من قبل:

(Sartorius GMBH Göttigen-GERMANY).

تم إجراء المزج الرطب للمساحيق المكونة لخلطة كل نموذج (بعد اضافة الاسيتون) لمدة ثلاث ساعات و بواسطة طاحونة الكرات الكوكبية نوع (O5.102) مع كرات طحن مصنوعة من الألومينا بعدها تم التجفيف عند درجة حرارة (63°C) في فرن تجفيف كهربائي نوع (Prodit) ، مصنع من قبل .Prodit s.a.s (Torino-ITALY. اجريت عملية تفتيت للمزيج وتشكيله بضغط كبس ثابت مقداره 3 طن (191MPa) باستخدام قالب كبس فولاذي ثنائي التأثير مع بقاء الضغط مسلطاً لمدة (15) ثانية للحصول على نماذج خضراء بقطر (14 mm) وسمك (8 mm). لقد تم إجراء العديد من التجارب الأولية لتثبيت ظروف التشكيل وإختيار الضغط المناسب ومدة التثبيت للضغط المسلط من خلال الفحص البصري والمجهري للنماذج بعد عملية الكبس مباشرةً للتأكد من عدم وجود أية تشققات أو تشوهات.

اجريت عملية تلبيد للنماذج الخضراء عند درجة حرارة (600°C) لمدة تتراوح مابين (12-10) ساعة في جو من غاز الآركون ، حيث يحدث تفاعل تكوين المركب شبه المعدني NiAl. بعدها تم التبريد البطيء إلى درجة حرارة الغرفة. بعد عملية التلبيد التفاعلي وإخراج العينات ، تم طحن النماذج بطاحونة الكرات الكوكبية لمدة ساعتين للحصول على مسحوق المركب. وللتأكد من مكونات مسحوق المركب الناتج اجري فحص حيود الأشعة السينية (X-Ray Diffraction, XRD).

تحضير المادة المركبة (NiAl-Al2O3):

أختيرت أربع نسب إضافة من الألومينا هي (10,20,30,40wt%) لجميع النماذج كما في الجدول (2). أجريت عملية المزج الرطب لمكونات المزيج باضافة الاسيتون وبالاستعانة بطاحونة الكرات الكوكبية ولمدة خمس ساعات. بعد تجفيف المزيج و تفتيته تم تشكيله في قالب ثنائي التأثير بضغط كبس ثابت مقداره 7 طن (774.4 MPa) للحصول على نماذج خضراء أسطوانية الشكل بقطر (10 mm) وإرتفاع (20 mm) لغرض إجراء اختبار الإنضغاط ونماذج اخرى بشكل اقراص بقطر (14 mm) وسمك (5 mm) لاختبار الصلادة المايكروية . بعدها تم إجراء التلبيد للنماذج عند درجة حرارة 1350°C لمدة ساعة ونصف وتحت جو من غاز الآركون. اعتمد معدل تسخين (6°C /min.) من درجة حرارة 25°C لغاية درجة حرارة 800°C و (25°C /min.) من درجة حرارة 800°C لغاية درجة حرارة 1350°C [1].

اختبارات النماذج المشكلة:

- الكثافة والمسامية الخضراء (Green porosity and density) :

تم حساب قيمة الكثافة الخضراء (ρg g/cm3) باعتماد أبعاد النماذج المشكلة واوزانها ، أما حساب المسامية الخضراء للنماذج فقد تمت بالاستعانة بالمعادلة((Pg = 1-(ρg / ρth) حيث أن : (Pg) المسامية الخضراء و (ρth) الكثافة النظرية للمزيج (g/cm3) أي مسحوق ألومينايد النيكل NiAl المضاف إليه الكروم بالاضافة الى مسحوق الألومينا. إن إيجاد قيمة الكثافة النظرية لمزيج مسحوق NiAl ومسحوق الألومينا يتم من خلال معرفة النسب الوزنية المئوية لكل منهما وكما يلي [6]:

$$\rho_{th} = \frac{100\,\rho_1 \rho_2}{X_1 \rho_2 + X_2 \rho_1}$$

حيث أن : (ρ1, ρ2) الكثافة النظرية لألومينايد النيكل NiAl (5.86 g/cm3) والكثافة النظرية للألومينا (3.99 g/cm3 على التوالي [7] و (X1,X2) النسب الوزنية لهما.

- الكثافة والمسامية النهائيتين (Final density and porosity) :

تم تحديد قيمة الكثافة والمسامية النهائية للنماذج باستخدام قاعدة آرخميدس وباعتماد ما تم الاشارة اليه مع الأخذ بنظر الإعتبار قيم المتغيرات للحالة النهائية.

-الاختبارات الميكانيكية للنماذج المصنعة:

1- اختبار الإنضغاط (Compression Test) : تم إجراء إختبار الإنضغاط للعينات الأسطوانية المحضرة بموجب المواصفة (ASTM C773) من المادة المركبة (NiAl-Al2O3) لحساب مقاومة الانضغاط (σ) وانفعال الإنضغاط (εc). تم الاختبار بالاستعانة بجهاز الإختبارات العام وكان نوع (15Ic – Ic – 1981) مصنع من قبل Tonirdustrie Prüftechnik) . GMBH Berlin – GERMANY)

2- اختبار الصلادة (Hardness Test) : تم قياس الصلادة المايكروية بطريقة فيكرز Vickers بالاستعانة بالجهاز نوع (BROOKS MAJ24 ERBV) ، مصنع من (BROOKS Inspection Equipment Ltd., Colchester-ENGLAND).

النتائج والمناقشة:

نتائج فحص حيود الأشعة السينية :

يلاحظ من مخطط الإتزان الحراري للنيكل والألمنيوم الشكل(1) بأنه يضم خمسة مركبات من ألومينايدات النيكل تتداخل مع بعضها البعض هي (NiAl, Ni3Al, Ni2Al3, NiAl3, Ni3Al5) وعليه فلقد أجريت العديد من التجارب الأولية لمعرفة أفضل الظروف التي تؤدي إلى الحصول على المركب NiAl لوحده وبنسبة عالية.بينت التجارب بانه بزيادة زمن التلبيد إلى 12 ساعة يتم الحصول على طور NiAl لوحده حيث ان زيادة زمن التلبيد تعطي الوقت الكافي لذرات النيكل لكي تنتشر وبالتالي تتفاعل كل ذرة منها مع ذرة ألمنيوم واحدة لتكوين ألومينايد النيكل NiAl [8]. بمقارنة مخطط حيود الأشعة السينية الشكل (2) مع مخطط حيود الأشعة السينية القياسي لألومينايد النيكل NiAl [9] ، وكذلك مع مخطط حيود الأشعة السينية لألومينايد النيكل NiAl الناتج بتقنية التلبيد التفاعلي وبتقنية التسبيك الميكانيكي [10] ، وبتقنية الدرجات الحرارية العالية المحفزة ذاتياً [11] نجد أننا قد حققنا كافة القمم الخاصة بألومينايد النيكل NiAl (المسافة بين مستويين (d)) وكما مبينة في جدول (3). هذه النتائج تم اعتمادها في تحضير النماذج النهائية من المادة (NiAl- Al2O3).

تأثير إضافة الكروم على الكثافة والمسامية الخضراء للمادة المركبة (NiAl-Al2O3) :

بينت النتائج الموضحة في الشكلين (3) و (4) أن زيادة نسبة الكروم المضاف تؤدي إلى زيادة قيمة الكثافة الخضراء وانخفاض قيمة المسامية الخضراء للمادة المركبة (NiAl-Al2O3). إن سبب الزيادة الحاصلة في قيمة الكثافة الخضراء يعزى إلى الكثافة العالية للكروم المضاف والبالغة (7.19 g/cm3) أما انخفاض قيم المسامية الخضراء فيعزى إلى إشغال دقائق الكروم للفراغات الموجودة في المادة المركبة (NiAl-Al2O3) وبالتالي زيادة كثافة التراص.

تأثير إضافة الكروم على الكثافة والمسامية النهائيتين للمادة المركبة (NiAl-Al2O3) :

الشكل (5) يبين أن للكروم المضاف تأثيراً قليلا على الكثافة النهائية للمادة (NiAl-Al2O3) والتي تقترب من كثافتها النظرية بزيادة نسبة الكروم حيث تبلغ (5.13 g/cm3) أي (% 91.2) من الكثافة النظرية للمادة المركبة (90NiAl-10Al2O3) بإضافة (3.5 wt% Cr) و تزداد إلى (5.29 g/cm3) أي (% 93.9) من كثافتها النظرية عند زيادة نسبة الكروم المضاف إلى (4.5 wt% Cr). أما بالنسبة للمسامية النهائية فأن إضافة الكروم تؤدي الى انخفاض طفيف في قيم المسامية النهائية للمادة NiAl-Al2O3) (، حيث تنخفض من (% 8.4) إلى (% 8.24) للمادة المركبة (90NiAl-10Al2O3) بإضافة 3.5) (wt% Cr وتنخفض إلى (% 6.03) بإضافة (4.5 wt% Cr) وكما هو موضح في الشكل (6).

تأثير إضافة الكروم على مطيلية ومقاومة المادة المركبة (NiAl-Al2O3) :

يبين الشكل (7) أن للكروم تأثير كبير على مقاومة NiAl حيث إن إضافة (3.5 wt% Cr) تؤدي إلى زيادة في مقاومة المادة المركبة (90NiAl-10Al2O3) من (318.75 MPa) إلى (371.26 MPa) و تزداد إلى (396.61 MPa) عند إضافة (4.5 wt% Cr) بينما تؤدي إضافة (4.5 wt% Cr) إلى المادة المركبة (60NiAl-40Al2O3) إلى الحصول على أقصى مقاومة إنضغاط (485.6 MPa). إن سبب الزيادة الكبيرة في المقاومة نتيجة إضافة الكروم يعزى إلى الاصلاد بالمحلول الجامد عن طريق تكوينه يوتكتك مع ألومينايد النيكل NiAl حيث تعتبر قابلية ذوبان الكروم بألومينايد النيكل NiAl منخفضة عند درجة حرارة الغرفة (1.5 wt% Cr) [12,11]. والسبب الآخر هو بسبب تنعيم البنية المجهرية [11]. أما بالنسبة لانفعال الانضغاط فيلاحظ من الشكل (8) أن إضافة (3.5 wt% Cr) تؤدي إلى زيادة انفعال انضغاط المادة المركبة (90NiAl-10Al2O3) من (% 11.93) إلى (% 14.1) وتصبح (% 29.15) عند إضافة ((4.5 wt% Cr. أن إضافة الكروم إلى ألومينايد النيكل NiAl تعمل على زيادة قوة التماسك ما بين البلورات (الحدود البلوريه) وزيادة الانفعال اللدن وبالتالي زيادة المطيلية [13].

تأثير إضافة الكروم على صلادة المادة (NiAl-Al2O3) :

أن إضافة الكروم تؤدي إلى زيادة ليست بالكبيرة في صلادة المادة المركبة (NiAl-Al2O3) كما هو مبين في الشكل (9). ويعزى السبب في زيادة الصلادة إلى زيادة مقاومة المادة المركبة (NiAl-Al2O3) بشكل كبير عند إضافة الكروم بفعل آلية الاصلاد بالمحلول الجامد ، وكذلك بسبب الكثافة النهائية العالية والمسامية الواطئة التي تمتلكها النماذج النهائية.

الاستنتاجات:

1- يمكن تحضير المركب شبه المعدني ألومينايد النيكل NiAl بتقنية التلبيد التفاعلي لمسحوقي النيكل والألمنيوم عند درجة حرارة 600°C لمدة 12 ساعة وتحت جو من غاز الآركون. حيث أن زيادة زمن التلبيد التفاعلي عن 10 ساعات ، تؤدي إلى زيادة إمكانية الحصول على طور NiAl لوحده.

2- تؤثر زيادة نسبة الالومينا المضافة لوحدها باتجاه زيادة مقاومة الانضغاط وكذلك صلادة المادة المركبة ولكن على حساب مطيليتها، فعند زيادة نسبة اضافة الالومينا من (10wt%) الى (40wt%) فان مقاومة انضغاط المادة المركبة تزداد بنسبة (20%) وتزداد صلادتها بنسبة (33%) اما انفعال الانضغاط فيقل بنسبة (50%).

3- ان إضافة الكروم إلى المادة المركبة (NiAl-Al2O3) تؤثر باتجاه زيادة مقاومتها للانضغاط وزيادة صلادتها وكذلك مطيليتها وتختلف مقادير هذه الزيادات باختلاف نسبة الالومينا الداخلة في تكوين المادة المركبة.ان افضل النتائج باتجاه زيادة مقاومة الانضغاط والصلادة والمطيلية معا تم الحصول عليها عند اضافة كروم نسبة (4.5wt%) الى المادة المركبة(90NiAl-10Al2O3) حيث ازدادت مقاومة الانضغاط بنسبة(25%) والصلادة بنسبة (9%) والمطيلية بنسبة (94%) بالمقارنة مع قيمها للمادة الخالية من الكروم.

المصادر:

1- Chii Shyang Hwang and Dong Lin Coo, Fabrication and Mechanical Properties of Al2O3 Reinforced NiAl Composites, Engineering Materials Vol.249 (2003) pp. 223-226.

2- Kiyotaka Matsuura and Masayuki Kudoh, Grain Refinement of Combustion-Synthesized NiAl by Addition of Ceramic Particles, Materials Science and Engineering A 239-240 (1997) 625-632.

3- Hahn Choo, Philip Nash and Marek Dollar, Mechanical Properties of NiAl-AlN-Al2O3 Composites, Materials Science and Engineering A239-240 (1997) 464-471.

4-. Hu W, and others, Investigation on Interface Structure and Chemical Stability in a Composite of NiAl/Al2O3-Fiber coated with BN, Nanobereichs analytic mittels EELS und EF TEM, 18.bis.20. September (2000), Graz, Austria.

5-Olszak D., Mechanically Alloyed Nanocrystalline NiAl-Al2O3 Composite Powders, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark (2001).

6- يرماكوف فيازنيكوف ، استعمال منتجات ميتالورجيا المساحيق في الصناعة ، دار مير للطباعة والنشر ، روسيا ، (1988).

7- Tuan W. H., Chang S. T.and others, Effect of Iron Addition on the Mechanical Properties of Al2O3-NiAl CMMCs, Engineering Materials Vols. 127-131 (1997) pp. 447-454.

8- Zhou L. Z., Guo J. T. and Fan G. J., Synthesis of NiAl-TiC Nanocomposite by Mechanical Alloying Elemental Powders, Materials Science and Engineering A249 (1998) 103-108.

9- Baker, I., Thayer School of Eng., Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1992).

10- Eckert J. and Börner I., Nanostructure Formation and Properties of ball-milled NiAl Intermetallic Compound, Materials Science and Engineering A239-240 (1997) 619-624.

11- Walston W. S., Darolia R. and Demania D. A., Impact Resistance of NiAl Alloys, Materials Science and Engineering 239-240 (1997) 353-361.

12- Johan Angenete, Aluminide Diffusion for Ni Based Superalloys Coating and Oxide Microstructure, Thesis of Doctor, Göteborg University, Göteborg, Sweden (2002).

13- Jarnes E. Reynolds, John R. Smith, G. L. Zhao and David J. Srolovitz, Adhesion in NiAl-Cr From First Principles, Physical Review B, Vol. 33, No. 20, 15 May (1996)-II.

جدول (1) يوضح المساحيق الأساسية المعتمدة في الدراسة الحالية

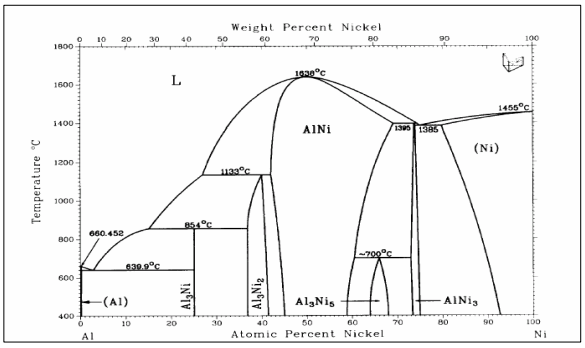
powder	Average particle size μm	Origin
Nickel powder	50	Buchs Fluka AG co.-GERMANY
Aluminum powder	64	Benda-Lutzwerke co.-AUSTERIA
Chromium powder	30	Merck co.-GERMANY
Alumina powder	(35-40)	Merck co.-GERMANY

جدول (2) يوضح المساحيق الداخلة في تركيب النماذج الأساسية للمادة المركبة
(NiAl – Al2O3) ونسب الإضافة منها.

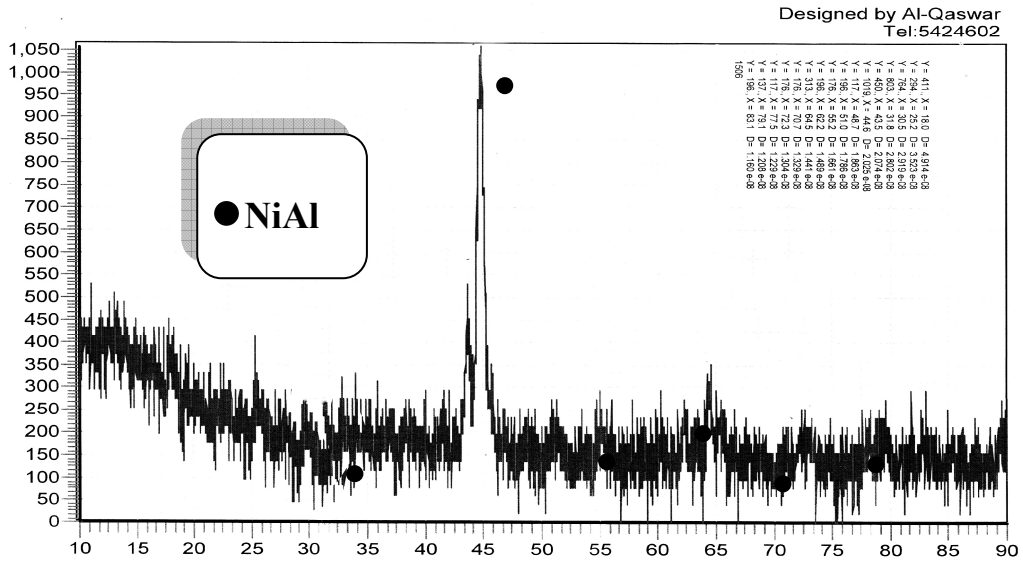
Group	Sample	Composition	Weight Percentage (wt%)
1st	1	NiAl – Al2O3	90NiAl - 10Al2O3
	2	NiAl – Al2O3	80NiAl - 20Al2O3
	3	NiAl – Al2O3	70NiAl - 30Al2O3
	4	NiAl – Al2O3	60NiAl - 40Al2O3
2nd	5	(NiAl – 3.5Cr) – Al2O3	90(NiAl – 3.5Cr) – 10Al2O3
	6	(NiAl – 3.5Cr) – Al2O3	80(NiAl – 3.5Cr) – 20Al2O3
	7	(NiAl – 3.5Cr) – Al2O3	70(NiAl – 3.5Cr) – 30Al2O3
	8	(NiAl – 3.5Cr) – Al2O3	60(NiAl – 3.5Cr) – 40Al2O3
3rd	9	(NiAl – 4Cr) – Al2O3	90(NiAl – 4Cr) – 10Al2O3
	10	(NiAl – 4Cr) – Al2O3	80(NiAl – 4Cr) – 20Al2O3
	11	(NiAl – 4Cr) – Al2O3	70(NiAl – 4Cr) – 30Al2O3
	12	(NiAl – 4Cr) – Al2O3	60(NiAl – 4Cr) – 40Al2O3
4th	13	(NiAl – 4.5Cr) – Al2O3	90(NiAl – 4.5Cr) – 10Al2O3
	14	(NiAl – 4.5Cr) – Al2O3	80(NiAl – 4.5Cr) – 20Al2O3
	15	(NiAl – 4.5Cr) – Al2O3	70(NiAl – 4.5Cr) – 30Al2O3
	16	(NiAl – 4.5Cr) – Al2O3	60(NiAl – 4.5Cr) – 40Al2O3

جدول (3) يبين نتائج فحص حيود الأشعة السينية (XRD) العائدة للشكل (2)

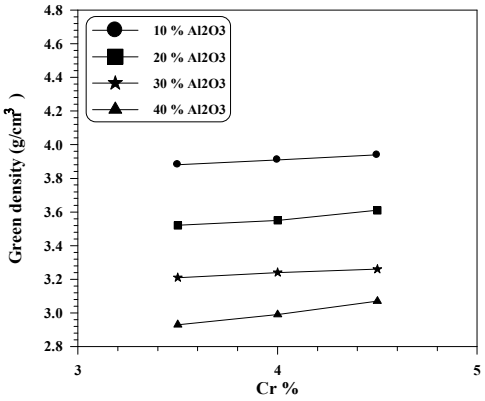
2θ	d
30.5	2.91
44.6	2.02
55.2	1.66
64.5	1.44
72.3	1.28
83.1	1.17



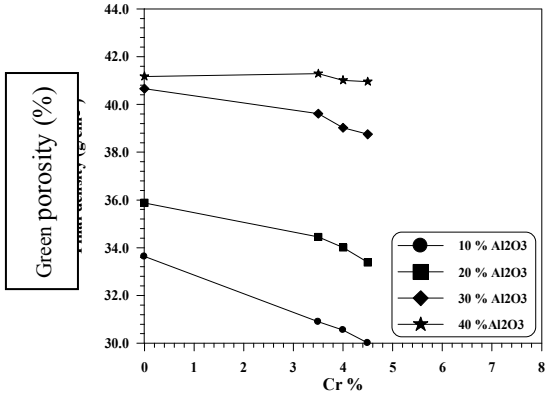
شكل(1) مخطط اتزان النيكل– ألمنيوم [1].



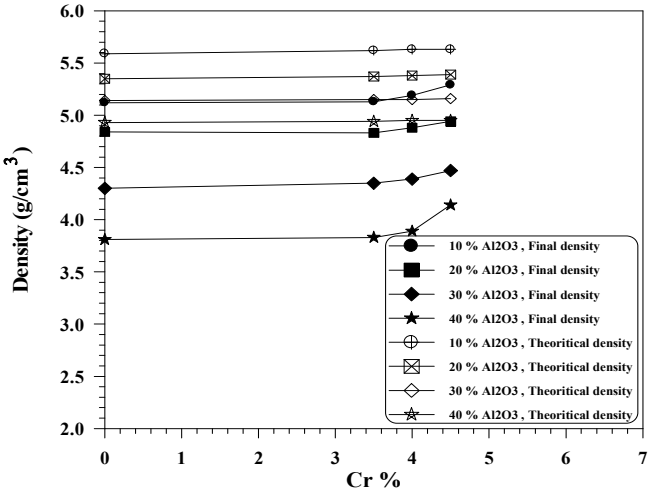
شكل (2) مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) لألومينايد النيكل المنتج بتقنية التلبيد التفاعلي عند درجة حرارة 600°C لمدة 12 ساعة



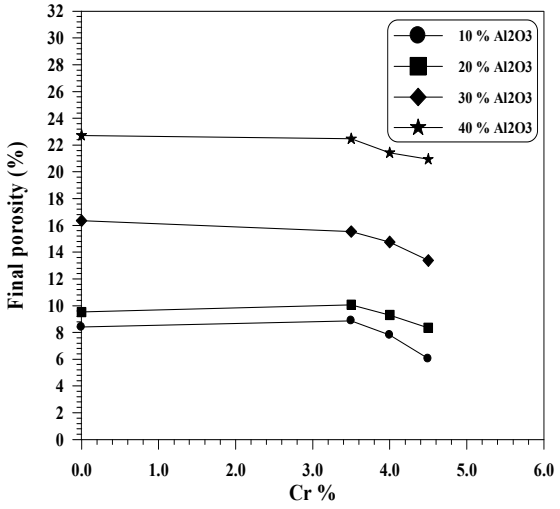
شكل (3) تأثير اضافة الكروم على الكثافة الخضراء للمادة (NiAl-Al2O3)



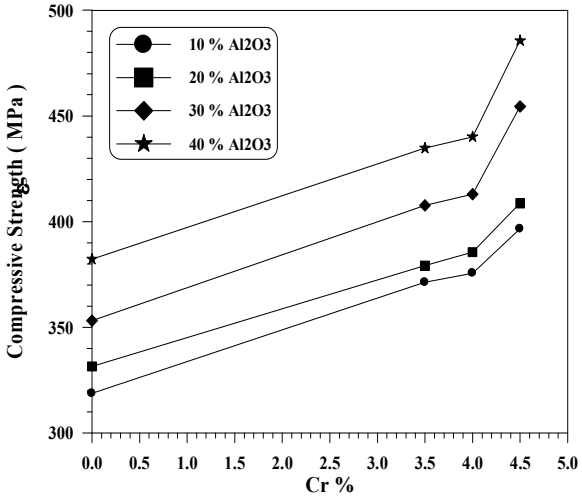
شكل (4) تأثير اضافة الكروم على المسامية الخضراء للمادة (NiAl-Al2O3)



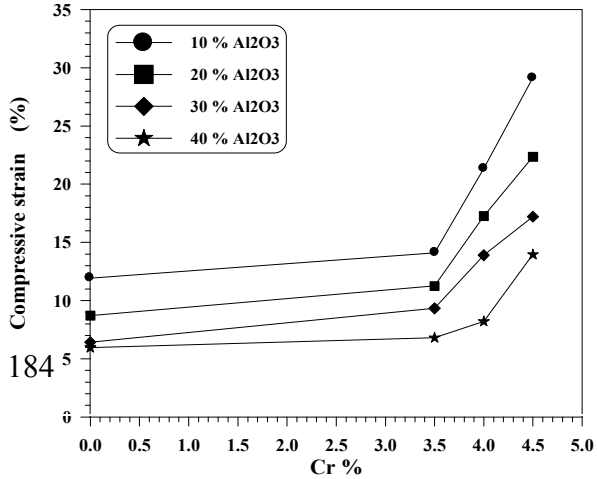
شكل (5) العلاقة بين النسبة الوزنية المئوية
للكروم والكثافة الحقيقية للمادة المركبة (NiAl-Al2O3) عملياً ونظرياً.

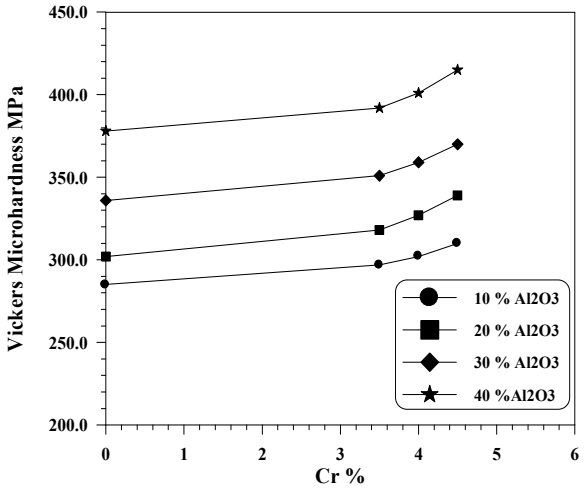


شكل(6) تأثير إضافة الكروم على المسامية
النهائية للمادة المركبة (NiAl-Al2O3)



شكل (7) تأثير إضافة الكروم على مقاومة
إنضغاط المادة المركبة (NiAl-Al2O3).





شكل (8) تأثير اضافة الكروم على مقاومة
شكل (9) تأثير اضافة الكروم على صلادة
انضغاط المادة المركبة (NiAl-Al2O3)
المادة المركبة (NiAl-Al2O3)