



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة بابل – كلية الهندسة
قسم هندسة المواد

دراسة تحضير وتحسين الخواص الميكانيكية للمادة
المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$)

رسالة تقدم بها
المهندس

أحمد مظف هاشم الإبراهيم

إلى قسم هندسة المواد في جامعة بابل
وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير علوم في هندسة المواد

بإشراف

الدكتور

حيدر عبد الحسن العذاري

الأستاذ الدكتور

قحطان خلف الخزرجي

أيلول ٢٠٠٥ م

شعبان ١٤٢٦ هـ

Ministry of Higher Education
and Scientific Research
University of Babylon
Department of Materials Engineering



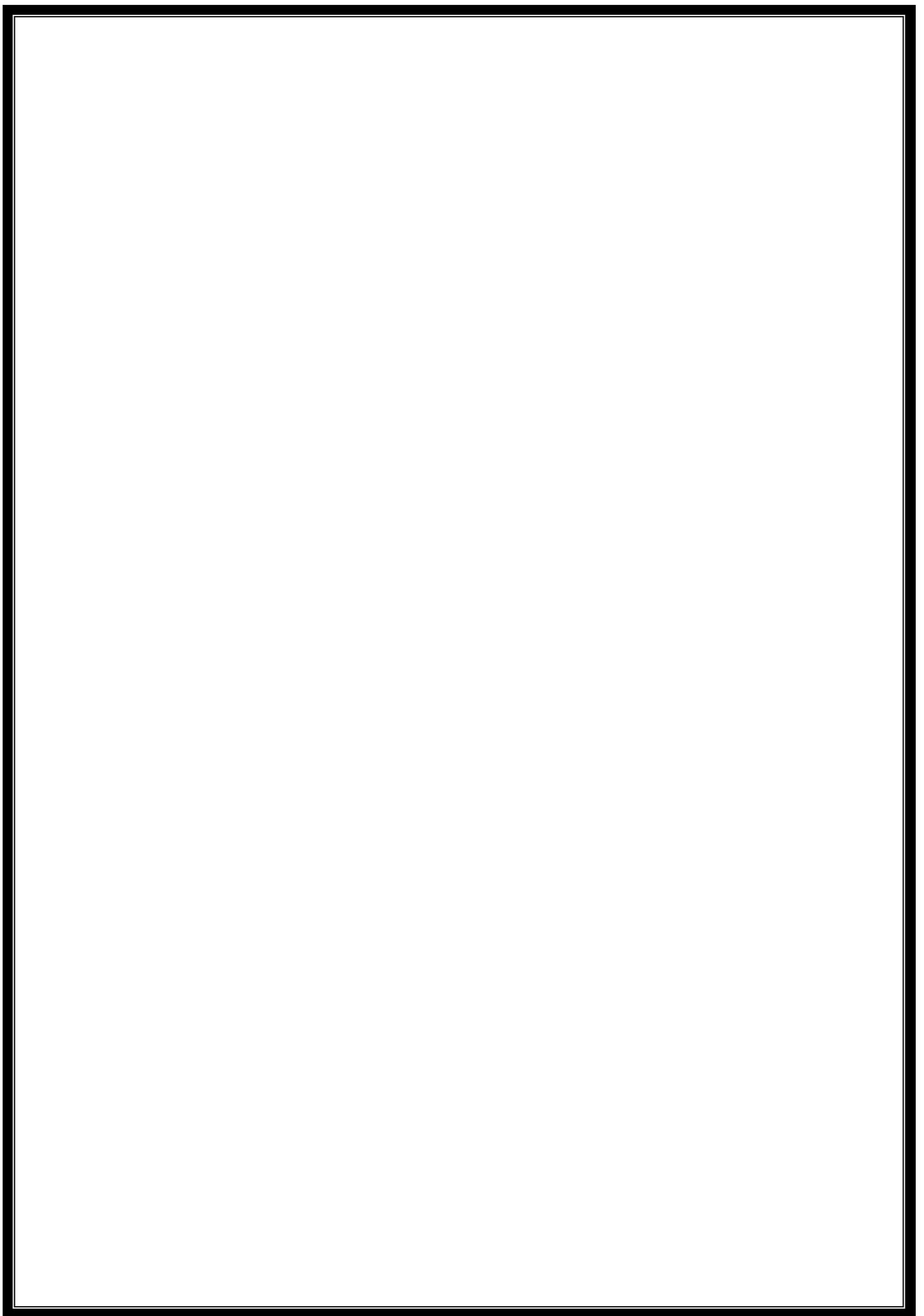
*Study of Preparation and Improvement of
The Mechanical Properties of
(NiAl-Al₂O₃) IMCs*

By
Ahmed Mudhaffer Hashim

Disstertation submitted to the department of Materials Engineering in
Babylon University in partial fulfillment of the requirements for the
degree of
MASTER OF SCIENCE
In
Materials Engineering Science

Supervised By
Dr. Kahtan Al-Khazraji Dr. Haydar A.Hussain

September ۲۰۰۵



Abstract

The great development in many major sectors of industry, particularly in the aerospace industry and the need for the development of new and improved materials for potential high temperature structural applications as alternatives to Ni-based superalloys, has led to work this search. In this present study, the NiAl-based composites containing a dispersion of Al_2O_3 particales are prepared by sintering technique at $1300^\circ C$ for 90 min. in an argon atmosphere. Intermetallic compound NiAl was prepared from a mixture of nickel and aluminum powders by using reaction sintering technique at $700^\circ C$ for 12 Hrs. In an argon atmosphere. Both NiAl and Al_2O_3 are brittle at room temperature; nevertheless, they are potential high temperature materials.

The ductility of NiAl can be improved by adding a small amount of boron and chromium. In this study three weight percents of B and Cr added to NiAl for each one and together. The relationships between the microstructue and mechanical properties of the (NiAl- Al_2O_3) composites at room temperature are investigated. Al_2O_3 reinforced NiAl composites show better mechanical properties than monolithic NiAl. The grain growth of NiAl and Al_2O_3 in the composites is constrained by each component. The increase in strength and toughness in thus partly attributed to microstructural refinement.

The bonding between NiAl and Al_2O_3 is weak, the crack in thus deflected by the weak interfaces. The strength and toughness of NiAl is enhanced significantly by adding boron and chromium to NiAl. The bonding strength of NiAl and Al_2O_3 is also increased by addition of them.

The addition of (10 wt% Al_2O_3) into NiAl led to obtain the maximum compressive strain of (11.93 %) for the composite (90NiAl-10 Al_2O_3). While the addition of B into NiAl greatly increases the ductility of this compound. The maximum compressive strain of (33.9 %) in the composite containing (10 Al_2O_3) and (0.5 wt% B). Also, the ductility of NiAl is increased by the addition of Cr. The maximum compressive strain of (29.10 %) was obtained in the composite containing (10 wt% Al_2O_3) and (5.0 wt% Cr).

The compressive strength of NiAl is greatly increased by the addition of Cr. The maximum compressive strain of (480.6 MPa) was obtained in the composite containing (10 Al_2O_3) and (5.0 wt% Cr) as compared with compressive strain of (382.2 MPa) for the composite (60NiAl-40 Al_2O_3). Also, the compressive strength of NiAl is increased by the addition of B. The maximum compressive strength of (479.21 MPa) was obtained in the composite containing (5 Al_2O_3) and (0.5 wt% B).

The (NiAl-Al₂O₃) composites containing B and Cr together have mechanical properties intermediate between the (NiAl-Al₂O₃) composites properties without any additon and the (NiAl-Al₂O₃) composites properties containing B and Cr for each one. The additon of (1.1 wt% B, 3.0 wt% Cr) increased the compressive strength and compressive strain of NiAl. The maximum compressive strength and compressive strain of (428. 88 MPa) and (12.43 %) was obtained in the composite (6.NiAl-4.Al₂O₃) and (9.NiAl-1.Al₂O₃) respectively.

الإهداء

إلى.....

أول من تكحلت عيناى برؤيتهما..... أبى وأمى

إلى.....

الشهيدة المحاضرة الغائبة..... عمى منى

إلى.....

من سىواصلون طريق العلم من بعدى..... أخوتى هند وعلى ونرىاد

إلى.....

الوردة التى مرزقنى بها الله لأكل معها مشوار حىاتى..... خطىبتى أسىل

إلى.....

من أنامر بصىرتى بنور العلم والمعرفة..... أساتذتى الأفاضل

أحمد

شكر وتقدير Acknowledgements

بعد الانتهاء من متطلبات هذا البحث أشكر الله عز وجل على توفيقه لي في إنجازه ، كذلك أتقدم بجزيل الشكر وفائق التقدير إلى أستاذي الفاضلين الدكتور قحطان الخرجي والدكتور حيدر عبد الحسن العذاري على إشرافهما على بحثي وما أبدياه من جهود متميزة ومتواصلة وبشكل فعال في إغناء هذا البحث وإخراجه إلى حيز الوجود ، سائلاً المولى تبارك وتعالى أن يوفقهما في خدمة البحث العلمي في قطرنا العزيز.

وأشكر كل من رئاسة جامعة بابل وعمادة كلية الهندسة ورئاسة قسمي هندسة المواد ومنتسبيه والهندسة الميكانيكية ومنتسبيه ومنتسبي الورش الهندسية ، ورئاسة قسمي هندسة المواد ومنتسبيه وهندسة الإنتاج والمعادن ومنتسبيه ومنتسبي المكتبة المركزية – الجامعة التكنولوجية لما قدموه من عون كبير ولإتاحتهم الفرصة في استخدام المختبرات المتوفرة لديهم. كما وأقدم شكري إلى الزميل المهندس حسام غانم حميد من مركز بحوث البناء والزجاج فضلاً عن الإخوة منتسبي الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين وشركة ابن سينا العامة وشركة ديالى للصناعات الكهربائية المحدودة.

وأود أن أعبر عن شكري وامتناني الكبيرين على الدور المتميز الذي وقفته معي خطيبيتي الهندسة أسيل محمود عبد الله ، كذلك الأستاذ أحمد عودة جاسم والزميل العزيز باسم محمد محيسن. ولا أنسى أن أقدم شكري إلى كل من سار معي في سبيل إنجاز كافة متطلبات هذا البحث.

الباحث

ملخص البحث Abstract

لغرض مواكبة التطور الحاصل للصناعات التكنولوجية المتقدمة وتحديدًا في ما يخص مجال الفضاء ، والحاجة المتزايدة إلى ظهور مواد جديدة ذات كفاءة عالية في التطبيقات التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية والأوساط القاسية كبدايل عن السبائك الفائقة ذات الأساس نيكل وكوبالت (Ni, Co) Superalloys ، برزت الحاجة إلى إجراء مثل هذا البحث.

في الدراسة الحالية تم تحضير المادة المركبة ذات الأساس من ألومينايد النيكل NiAl والمقواة بدقائق أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 بواسطة تقنية التلييد عند درجة حرارة $1350^{\circ}C$ لمدة ساعة ونصف تحت جو من غاز الأركون. لقد تم تحضير المركب شبه المعدني NiAl بواسطة التلييد التفاعلي لمسحوق السبك الرئيسيين النيكل والألمنيوم عند حرارة $600^{\circ}C$ لمدة ١٢ ساعة تحت جو من غاز الأركون. إن كلاً من ألومينايد النيكل NiAl وأكسيد الألمنيوم Al_2O_3 تعدان مادتان هشتان عند درجة حرارة الغرفة ، مع أنهما يمتلكان درجات انصهار عالية تستخدم في التطبيقات التي تتطلب مقاومة لدرجات حرارة عالية.

إن مطيلية المركب NiAl بالإمكان تحسينها عن طريق إضافة البورون والكروم. لذا فقد تم في هذه الدراسة إضافة ثلاث نسب وزنية من كل عنصر على حدة وإضافة نسب وزنية من العنصرين (البورون والكروم) معاً إلى المركب NiAl. إن العلاقات ما بين البنية المجهرية والخواص الميكانيكية للمادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) عند درجة حرارة الغرفة تم بحثها في هذه الدراسة ، حيث تبدي خواص ميكانيكية أفضل من المركب NiAl لوحده. إن النمو الحبيبي لطوري NiAl و Al_2O_3 قد أعيق وقيد عن طريق تأثير كل طور على الآخر ، ومن ثم فإن زيادة مقاومة ومتانة المادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) يعزى بصورة جزئية إلى تنعيم البنية المجهرية.

إن قوة الربط بين دقائق ألومينايد النيكل NiAl والألومينا ضعيفة. إن مقاومة ومتانة المركب NiAl تزداد وتتعزيز عن طريق إضافة البورون والكروم إلى ألومينايد النيكل NiAl. كذلك شدة الترابط ما بين المركب NiAl والألومينا تزداد بإضافة البورون والكروم إلى المركب NiAl. إضافة (١٠ wt%) Al_2O_3 إلى ألومينايد النيكل NiAl أدت إلى الحصول على أقصى انفعال انضغاط للمادة المركبة (٩٠ NiAl-١٠ Al_2O_3) مقداره (١١.٩٣ %). بينما أدت إضافة البورون إلى حدوث زيادة كبيرة جداً في مطيلية NiAl ، حيث تم الحصول على أقصى انفعال انضغاط (٣٣.٩ %) للمادة المركبة ذات الأساس من هذا المركب والمحتوية على (٠.٥ wt% B) و (١٠ wt% Al_2O_3). كذلك بالنسبة للكروم فإضافته أدت إلى حدوث زيادة كبيرة في مطيلية المركب NiAl ولكن بنسبة أقل ، حيث تم الحصول على أقصى انفعال انضغاط (٢٩.١٥ %) للمادة المركبة ذات الأساس من هذا المركب والمحتوية على (٤.٥ wt% Cr) و (١٠ wt% Al_2O_3).

أما بالنسبة لمقاومة الانضغاط فقد أدت إضافة الكروم إلى حدوث زيادة كبيرة جداً في مقاومة انضغاط المركب شبه المعدني NiAl ، حيث تم الحصول على أقصى مقاومة انضغاط (٤٨٥.٦ MPa) للمادة المركبة ذات الأساس من هذا المركب و المحتوية على (٤.٥ wt% Cr) و (٤٠ wt%) Al_2O_3 مقارنة مع تلك التي تم الحصول عليها للمادة المركبة (٦٠ NiAl-٤٠ Al_2O_3) والتي مقدارها (٣٨٢.٢ MPa). كذلك أدت إضافة البورون إلى حدوث زيادة في مقاومة انضغاط المركب NiAl ، حيث تم الحصول على أقصى مقاومة انضغاط (٤٧٩.٢١ MPa) للمادة المركبة ذات الأساس من هذا المركب و المحتوية على (٠.٥ wt% B) و (٤٠ wt% Al_2O_3).

أما المادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) المحتوية على البورون والكروم معاً ، فقد بينت النتائج أن خواصها تتوسط بين خواص المادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) من دون أية إضافات وخواص المادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) المحتوية على البورون والكروم كلاً على حدة. إضافة (٠.١ wt%) Cr ، ٣.٥ wt% ، أدت إلى الحصول على أقصى مقاومة انضغاط (٤٢٨.٨١ MPa) للمادة

المركبة ($60\text{NiAl}-40\text{Al}_2\text{O}_3$) وكذلك الحصول على أقصى انفعال انضغاط (12.43%) للمادة
المركبة ($90\text{NiAl}-10\text{Al}_2\text{O}_3$).

إقرار لجنة المناقشة

نشهد نحن أعضاء لجنة المناقشة ، بأننا قد اطلعنا على رسالة الماجستير الموسومة
(دراسة تحضير وتحسين الخواص الميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس شبيه
المعدني ($NiAl / Al_2O_3$)) التي تقدم بها الطالب (أحمد مظفر هاشم) وقد ناقشناه في
محتوياتها وفيما له علاقة بها ونرى أنها جديرة بالقبول لنيل درجة الماجستير علوم في تخصص
هندسة المواد.

التوقيع :

الاسم : د. فاضل محمد حسون / رئيس اللجنة

المرتبة العلمية : أستاذ مساعد

التاريخ : ٣/٢٠٠٦

التوقيع :

الاسم : د. ماجد محي شكر / عضواً

المرتبة العلمية : أستاذ مساعد

التاريخ : ٣/٢٠٠٦

التوقيع :

الاسم : د. علي حسين عتيوي / عضواً

المرتبة العلمية : أستاذ مساعد

التاريخ : ٣/٢٠٠٦

التوقيع :

الاسم : د. حيدر عبد الحسن العذاري / مشرفاً

المرتبة العلمية : مدرس

التاريخ : ٣/٢٠٠٦

التوقيع :

الاسم : د. قحطان خلف الخزرجي / مشرفاً

المرتبة العلمية : أستاذ

التاريخ : ٣/٢٠٠٦

صدق من قبل مجلس كلية الهندسة / جامعة بابل

التوقيع :

الاسم : د. عبد الواحد كاظم راجح

العميد

المرتبة العلمية : أستاذ

التاريخ : ٥/٢٠٠٦

توصية الأساتذة المشرفين

نشهد بأن إعداد هذه الرسالة الموسومة (دراسة تحضير وتحسين الخواص الميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl / Al_2O_3$)) جرى تحت إشرافنا في قسم هندسة المواد / كلية الهندسة / جامعة بابل وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير (للطالب أحمد مظفر هاشم) في تخصص هندسة المواد.

التوقيع :	التوقيع :
الاسم : د. حيدر عبد الحسن العذاري	الاسم : د. قحطان خلف الخزرجي
المرتبة العلمية : أستاذ مساعد	المرتبة العلمية : أستاذ
التاريخ : ٣/٢٠٠٦	التاريخ : ٣/٢٠٠٦

توصية رئيس القسم

إشارة إلى التوصية المقدمة من قبل الأستاذ الدكتور قحطان خلف الخزرجي والأستاذ المساعد الدكتور حيدر عبد الحسن العذاري أحيل هذه الرسالة إلى لجنة المناقشة لدراستها وبيان الرأي فيها.

التوقيع : الاسم : د. عبد الواحد كاظم راجح || | المرتبة العلمية : أستاذ |
| | التاريخ : ٣/٢٠٠٦ |

المحتويات

Contents

ملخص البحث

شكر وتقدير

١	١ المقدمة والدراسات السابقة.....
١	١-١ المقدمة.....
٣	٢-١ مواد درجات الحرارة العالية.....
٥	٣-١ المركبات شبه المعدنية.....
٧	٤-١ المواد المركبة لدرجات الحرارة العالية.....
٩	١-٤-١ المواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني (IMCs).....
١٠	٥-١ أكسيد الألمنيوم Al_2O_3
١١	٦-١ تطبيقات ألومينايد النيكل $NiAl$
١٣	٧-١ البحوث السابقة.....
١٦	٨-١ الهدف من البحث.....
١٧	٢ الجزء النظري.....
١٧	١-٢ المقدمة.....
١٧	٢-٢ التركيب البلوري للمركبات شبه المعدنية.....
٢٠	٣-٢ ألومينايدات المعادن ذات البنية المجهرية B_2
٢٣	١-٣-٢ الكسر في الألومينايدات ذات البنية المجهرية B_2
٢٤	٢-٣-٢ تأثيرات الوسط.....
٢٥	٤-٢ ألومينايدات النيكل.....
٢٥	١-٤-٢ ألومينايد النيكل $NiAl$
٢٧	١-١-٤-٢ الإستقرارية والخواص الفيزيائية والميكانيكية لطور $NiAl$
٢٩	٢-١-٤-٢ التعتيق الانفعالي لألومينايد النيكل $NiAl$
٣٠	٣-١-٤-٢ تأثير عناصر السبك.....
٣١	٢-٤-٢ ألومينايد النيكل Ni_3Al
٣٢	٥-٢ طرق تصنيع المادة المركبة ($NiAl-Al_2O_3$).....
٣٢	١-٥-٢ إنتاج ألومينايد النيكل $NiAl$
٣٢	٢-١-٥-٢ تقنية المساحيق.....
٣٩	٢-٥-٢ تصنيع المادة المركبة ($NiAl-Al_2O_3$).....
٤١	٦-٢ بلى المواد.....
٤٤	٣ الجزء العملي.....
٤٤	١-٣ المقدمة.....
٤٤	٢-٣ المواد والأجهزة المستخدمة.....
٤٦	٣-٣ البرنامج العملي للدراسة الحالية.....
٤٨	٤-٣ مرحلة تحضير ألومينايد النيكل $NiAl$
٥٠	٥-٣ مرحلة تحضير المادة المركبة ($NiAl-Al_2O_3$).....
٥٢	٦-٣ الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية.....

٥٢	١-٦-٣	فحوصات المواد الداخلة في تحضير المركب NiAl
٥٣	٢-٦-٣	الاختبارات الفيزيائية للنماذج المصنعة
٥٤	٣-٦-٣	الاختبارات الميكانيكية للنماذج المصنعة
٥٥	٧-٣	الفحص المجهرى
٥٦	٤	النتائج والمناقشة
٥٦	١-٤	المقدمة
٥٦	٢-٤	نتائج الاختبارات الفيزيائية
٥٦	١-٢-٤	نتائج فحص حيود الأشعة السينية (XRD)
٦٣	٢-٢-٤	نتائج اختباري الكثافة والمسامية الخضراء والنهائيتين
٦٣	١-٢-٢-٤	تأثير إضافة الألومينا على الكثافة والمسامية الخضراء
		لألومينايد النيكل NiAl.
٦٤	٢-٢-٢-٤	تأثير إضافة البورون والكروم على الكثافة والمسامية
		النهائيتين للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al ₂ O ₃).
٦٨	٣-٢-٢-٤	تأثير إضافة الألومينا على الكثافة والمسامية النهائيتين
		لألومينايد النيكل NiAl.
٦٨	٤-٢-٢-٤	تأثير إضافة البورون والكروم على الكثافة والمسامية
		النهائيتين للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al ₂ O ₃).
٧٤	٣-٤	نتائج الاختبارات الميكانيكية
٧٤	١-٣-٤	نتائج اختبار مقاومة الانضغاط
٧٤	١-١-٣-٤	تأثير إضافة الألومينا على مطيلية ومقاومة ألومينايد النيكل NiAl ..
٧٦	٢-١-٣-٤	تأثير إضافة البورون على مطيلية ومقاومة المادة المركبة
		ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al ₂ O ₃).
٧٧	٣-١-٣-٤	تأثير إضافة الكروم على مطيلية ومقاومة المادة المركبة
		ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al ₂ O ₃).
٨٠	٤-١-٤-٤	تأثير إضافة البورون والكروم على مطيلية ومقاومة المادة
		المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al ₂ O ₃).
٨٢	٢-٣-٤	نتائج اختبار الصلادة
٨٢	١-٢-٣-٤	تأثير إضافة الألومينا على صلادة ألومينايد النيكل NiAl
٨٢	٢-٢-٣-٤	تأثير إضافة البورون والكروم على صلادة المادة المركبة
		ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al ₂ O ₃).
٨٥	٣-٣-٤	نتائج اختبار مقاومة البلى الالتصاقى
٨٥	١-٣-٣-٤	تأثير إضافة الألومينا على معدل البلى الالتصاقى لألومينايد
		النيكل NiAl.
٨٥	٢-٣-٣-٤	تأثير إضافة البورون والكروم على معدل البلى الالتصاقى
		للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al ₂ O ₃).
٨٨	٤-٤	الفحص المجهرى
٩٠	٥	الاستنتاجات والتوصيات
٩٢		المصادر
٩٧		الملاحق
٩٧		الملحق A
٩٧	١-A	التسيك الميكانيكي (MA)
٩٩	٢-A	تقنية الدرجات الحرارية العالية المحفزة ذاتياً (SHS)
١٠٠	٣-A	تقنية الانصهار الباعث للحرارة

١٠١
١٠٢

.....A-٤ تقنية السبك التفاعلي

..... الملحق B

الاستنتاجات Conclusions

٥- ١

- ١- يمكن تحضير المركب شبه المعدني ألومينايد النيكل NiAl بتقنية التلييد التفاعلي لمسحوق النيكل والألمنيوم عند درجة حرارة 600°C لمدة ١٢ ساعة وتحت جو من غاز الأركون. حيث أن زيادة زمن التلييد التفاعلي عن ١٠ ساعات ، تؤدي إلى زيادة إمكانية الحصول على طور NiAl لوحده.
- ٢- إن إضافة الألومينا أدت إلى تحسين الخواص الميكانيكية لألومينايد النيكل NiAl.
- ٣- كلما زادت نسبة البورون المضاف كلما اقتربت قيم الكثافة النهائية للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) من قيم الكثافة النظرية ، حيث تم الحصول على كثافة نهائية عالية حوالي (٩٨.١ %) من الكثافة النظرية وذلك للمادة المركبة ذات الأساس من ألومينايد النيكل NiAl والمقواة بـ (٠.٥ wt% B) و (١٠ wt% Al₂O₃).
- ٤- إن إضافة البورون أدت إلى حدوث زيادة كبيرة جداً في مطيلية المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃) ، في حين أن إضافته ليس لها تأثير كبير على الصلادة.
- ٥- إن إضافة الكروم أدت إلى حدوث زيادة كبيرة في مقاومة إنضغاط المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃).
- ٦- إن إضافة البورون والكروم أدت إلى تحسين مقاومة البلى الالتصاق للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃).
- ٧- إن الخواص الميكانيكية للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) المحتوية على البورون والكروم معاً تتوسط خواصها بدون أية إضافات وخواصها عند احتوائها على البورون والكروم كلاً على حدة.
- ٨- إن أفضل النتائج التي تم الحصول عليها كانت لنماذج المادة المركبة ذات الأساس من ألومينايد النيكل NiAl المحتوية على (٠.٥ wt% B) والمقواة بـ (١٠ wt% Al₂O₃).

التوصيات

Recommendations

٥- ٢

- ١- إنتاج ألومينايد النيكل NiAl بتقنيات الإسحاق الأخرى ، كحفية السبيك الميكانيكي (MA) وتقنية السبك التفاعلي ... إلخ.
- ٢- إجراء تقنية الكبس على البارد للحصول على نماذج ذات كثافة خضراء متجانسة.
- ٣- دراسة الخواص الميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃) عند درجات الحرارة العالية.
- ٤- دراسة مقاومة التآكل والتأكسد للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃) في الأوساط القاسية.

- ٥- إنتاج المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($Ni_3Al-Al_2O_3$) ودراسة خواصها الميكانيكية ، ومقارنتها بتلك التي للمادة المركبة ($NiAl-Al_2O_3$).
- ٦- دراسة تأثير إضافة البورون والكروم على مقاومة الانحناء ومتانة الكسر (K_{IC}) ودرجة حرارة التحول من السلوك المطيلي إلى الهش ($BDTT$) ($NiAl-Al_2O_3$).
- ٧- إضافة البورون والكروم بنسب إضافة أكثر للتعرف على تأثير هذه النسب على البنية الداخلية والخواص الميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$).
- ٨- دراسة تأثير إضافة عناصر السبك الأخرى كالزركونيوم والموليبدينوم والحديد... إلخ على البنية المجهرية والخواص الميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$).

المقدمة

Introduction

١-١

عن السبائك الفائقة ذات الأساس نيكل Ni-Superalloys. فطائرات المستقبل سوف تتطلب : نسبة قوة الدفع إلى الوزن عالية وزيادة كفاءة الوقود وإنخفاض الكلفة وعمر خدمة طويل. ولأجل تحقيق هذه المتطلبات فإن المواد المطلوبة يجب أن تكون قوية وجاسئة وخفيفة ولديها القدرة على الإحتفاظ بهذه الخواص عند درجات الحرارة العالية والأوساط القاسية عند إستخدامها في الهيكل الإنشائي Structural Framework أو في المحركات ، حيث أن الخاصية الأكثر أهمية هنا هي إختزال الوزن. أما صناعة السيارات فهي تواجه تحديات تكنولوجية بسبب الحاجة إلى تحسين كفاءة الوقود وإختزال الإنبعاث وزيادة الأمان وتعزيز الأداء بالإضافة إلى إختيار أساليب أفضل وتحسين الجودة. هذه الصفات بالإمكان الوصول إليها جزئياً بواسطة إختزال وزن المحرك خصوصاً الأجزاء الترددية (Reciprocating parts) منه. جميع تلك المتطلبات وغيرها يمكن الحصول عليها من المركبات شبه المعدنية Intermetallic Compounds وخصوصاً ألومينايدات المعادن الإنتقالية Transition-Metal Aluminides ذات البنية المجهرية B₂ التي تتصف بالمقاومة العالية وبالكثافة الواطئة وبمقاومة فائقة جداً للتأكسد والتآكل.

إن المركبات شبه المعدنية من المواد الهندسية المتقدمة التي يمكن تعريفها بأنها طور سبيكي منظم تكوّن من إتحاد عنصرين معدنيين مختلفين كيميائياً أو أكثر لينتج طور جديد ذي تركيب وبنية بلورية وخواص جديدة. هذه المركبات تتميز بإمتلاكها صفات كل من المعادن والمواد السيراميكية وخواصها تتوسط خواص المعادن (التي عموماً ما تكون لينة Soft وأكثر مطيلية Ductile) وخواص المواد السيراميكية (التي عموماً ما تكون صلدة Hard وأكثر هشاشة Brittle) ، كما يمكن تصنيفها على صنفين : أولهما يشمل المركبات شبه المعدنية ذات التركيب الثابت مثل المركب MoSi₂ ، أما الثاني فيشمل المركبات شبه المعدنية ذات التركيب المتغير مثل المركب NiAl [١].

تعتبر ألومينايدات المعادن الإنتقالية ذات البنية المجهرية B₂ أحد أهم مجاميع المركبات شبه المعدنية ، حيث تتضمن ثلاث مركبات هي ألومينايد النيكل NiAl وألومينايد الحديد FeAl وألومينايد الكوبالت CoAl. هذه الألومينايدات الثلاث هي من ضمن مجموعة المركبات ذات البنية المجهرية B₂ التي يتم بحثها في الوقت الحاضر بشكل موسع لكي يتم استخدامها في التطبيقات الهيكلية التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية والأوساط القاسية [١]. وألومينايد النيكل NiAl يعد أبرز هذه الألومينايدات الثلاث والطور الأكثر أهمية في نظام النيكل - ألومنيوم حيث تتراوح نسبة النيكل فيه ما بين (٦٠-٤٥) (Ni at حوالي (٦٣-٧٦ wt Ni) . ولقد أجريت العديد من البحوث على ألومينايد النيكل NiAl ، إلا أن البحوث التي أجريت حول هذه المادة شبه المعدنية منذ عام ١٩٩٠م أدت إلى بروزه كمادة هيكلية للتطبيقات التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية والأوساط القاسية ، وذلك بسبب الخواص الميكانيكية والفيزيائية الفريدة التي يمتلكها والتي جعلته يصبح منافساً وبديلاً للسبائك التقليدية ذات الأساس نيكل المستعملة حالياً في تلك الأوساط ، حيث يمتلك درجة انصهار عالية أكثر بحوالي ٢٠٠°C من درجة إنصهار تلك السبائك وكثافة منخفضة تساوي تقريباً ٢/٣ من كثافتها ومقاومة تأكسد وتآكل فائقتين جداً بسبب كمية الألومنيوم العالية التي يحتويها ، بالإضافة إلى امتلاكه موصلية حرارية عالية أكثر بحوالي (٤-٨) مرات لتلك التي تمتلكها السبائك المذكورة.

وعلى الرغم من كل تلك الميزات إلا أن هنالك مشكلتين رئيسيتين تحدان من تطبيقات ألومينايد النيكل NiAl. المشكلة الأولى هي مطيلته 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 عند تلك الدرجة الحرارية. ولمعالجة هذه العيوب يتم إضافة أكسيد الألومنيوم إلى أرضية المركب NiAl لتكوين المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl- Al₂O₃) [٢].

إن الدراسة الحالية سنتناول تقنية تصنيع المادة المركبة ذات الأساس من المركب شبه المعدني NiAl المقواة بدقائق الألومينا Al_2O_3 بنسب وزنية مختلفة ودراسة خواصها الميكانيكية ، فضلاً عن دراسة تأثير إضافة عنصر البورون والكروم بنسب وزنية مختلفة على الخواص الميكانيكية لتلك المادة المركبة.

إن عملية إنتاج المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl- Al_2O_3) في الدراسة الحالية تتضمن مرحلتين. المرحلة الأولى هي مرحلة تحضير المركب شبه المعدني NiAl بتقنية التليد التفاعلي بالحالة الصلبة بعد المرور بكافة خطوات تقنية المساحيق. وتعرف تقنية التليد التفاعلي على أنها عملية الحصول على أجزاء ذات خواص عالية من خلال تفاعل مادتين أو أكثر لتكوين مركب جديد خلال عملية التسخين (التليد). أما المرحلة الثانية فهي مرحلة إنتاج المادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) بتقنية التليد بالحالة الصلبة عند درجة حرارة $1350^{\circ}C$ ولمدة ساعة ونصف تحت جو من غاز الأركون. تتميز المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl- Al_2O_3) بإمتلاكها خواص ميكانيكية أفضل بكثير من تلك التي للمركب شبه المعدني NiAl ، حيث تستعمل بصورة رئيسية للتغطيات ضد البلى Wear coatings وخاصة في تغطية ريش التوربين الغازية Gas turbine blades.

مواد درجات الحرارة العالية High Temperature Materials

٢-١

يعود استعمال مواد درجات الحرارة العالية إلى عصور ما قبل التاريخ كما في معدات الطبخ ومواد تطيين مواقد الطبخ (التتور) وأفران صهر المعادن البدائية... الخ. لكن الحاجة إلى مواد ذات كفاءة عالية على العمل في أوساط درجات الحرارة العالية كانت قد بدأت بشكل متزايد بعد الثورة الصناعية في أوروبا. فالتشغيل عند درجات الحرارة العالية يعد ذا شأن جوهري للعديد من قطاعات الصناعة الرئيسية التي تتضمن إعداد وتصنيع المواد و الهندسة الكيماوية ، ومحطات توليد القدرة ، و التوربينات البخارية والغازية ، و محركات الاحتراق الداخلي ، والفضاء الخارجي. في كل هذه القطاعات فإن الكفاءة تزداد مع زيادة درجة حرارة التشغيل ومن ثم فإن المقدرة للعمل عند درجات الحرارة العالية عامل حاسم لأجل التنافس الصناعي.

إن درجات حرارة التشغيل القصوى عالية جداً ، وكذلك الأعمار المطلوبة عالية جداً أيضاً تتراوح من عدة دقائق في بعض تطبيقات الصواريخ إلى ١٠٠ ٠٠٠ ساعة في محطات توليد القدرة. إن كل الأنظمة التي تعمل في درجات الحرارة العالية تقاوم الظروف الميكانيكية وظروف التآكل التي تتعرض لها عن طريق بيئة الوسط الذي تعمل به [٣].

وعليه يمكن تعريف مواد درجات الحرارة العالية بعدة طرق ، لكن التعريف الأكثر شمولاً هو إنها المواد الهندسية التي تمتاز بمقدرتها العالية على العمل في أوساط درجات الحرارة العالية والتي تعتمد على درجة حرارة التشغيل القصوى التي تتناسب مع درجة الانصهار لهذه المواد بحيث يمكنها من الاحتفاظ بخواص ميكانيكية جيدة عند تلك الدرجات الحرارية [٣].

وبصورة عامة يمكن تقسيم مواد درجات الحرارة العالية على ستة أنواع رئيسية كالآتي [٤] :

١- الفولاذ الأوستنايتي Austenitic steels ويشمل :

* الفولاذ الأوستنايتي المقاوم للتآكل Corrosion resistance austenitic steel.

* الفولاذ الأوستنايتي العالي المقاومة High strength austenitic steel.

٢- سبائك التيتانيوم Titanium alloys وتشمل :

* سبائك (α -Ti).

* سبائك (γ -Ti).

* سبائك (α, γ -Ti).

٣- السبائك الفائقة Superalloys وتشمل :

* السبائك ذات الأساس نيكل Ni-base superalloys.

* السبائك ذات الأساس كوبالت Co-base superalloys.

* السبائك ذات الأساس نيكل - حديد Ni, Fe -base superalloys.

٤- المواد المركبة ذات الأساس المعدني MMCs وتشمل :

* المواد المركبة ذات الأساس ألومنيوم AlMCs.

* المواد المركبة ذات الأساس نحاس CuMCs.

* المواد المركبة ذات الأساس مغنيسيوم MgMCs.

* المواد المركبة ذات الأساس تيتانيوم TiMCs.

٥- المواد المركبة ذات الأساس السيراميكي CMMCs وتشمل :

* المواد المركبة ذات الأساس ألومينا Al_2O_3 MCs.

* المواد المركبة ذات الأساس كربيد السليكون SiCMCs.

* المواد المركبة ذات الأساس نتريد السليكون Si_3N_4 MCs.

* المواد المركبة ذات الأساس أكسيد الزركونيوم ZrO_2 MCs.

٦- المركبات شبه المعدنية Intermetallic compounds :

المركبات شبه المعدنية والمواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني IMCs هي نوع جديد من مواد

درجات الحرارة المتقدمة وتشمل :

* المركبات شبه المعدنية ذات الأساس من الألومينايدات وتتضمن :

- ألومينايدات النيكل Nickel aluminides.

- ألومينايدات التيتانيوم Titanium aluminides.

- ألومينايدات الكوبالت Cobalt aluminides.

- ألومينايدات الحديد Iron aluminides.

* المركبات شبه المعدنية ذات الأساس من السليسايدات وتتضمن :

- سليسايدات النيكل Nickel silicides.

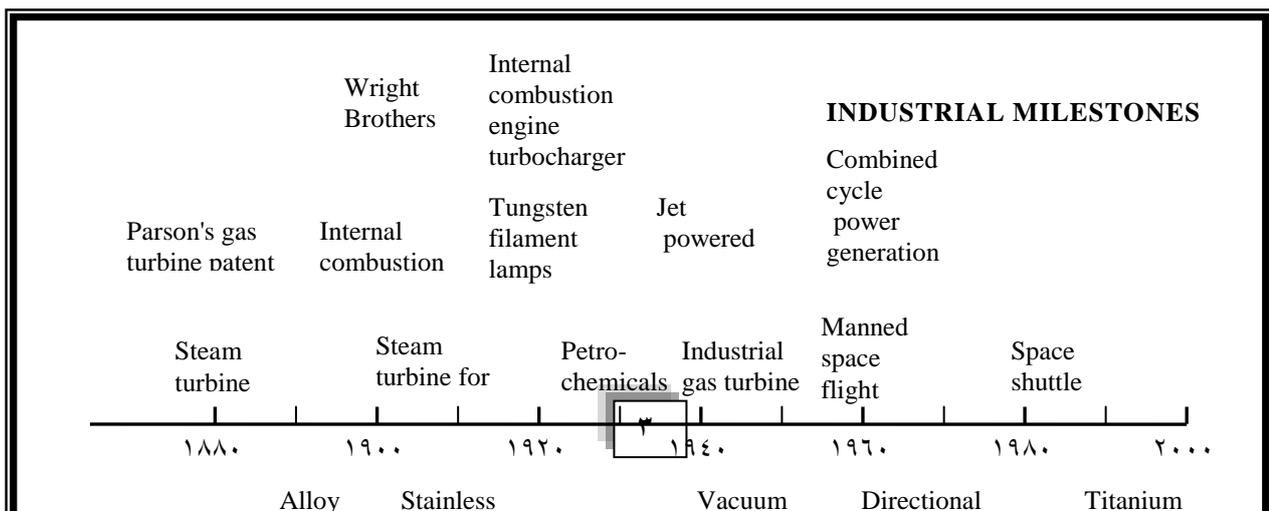
- سليسايدات الحديد Iron silicides.

- سليسايدات التيتانيوم Titanium silicides.

- سليسايدات الكروم Chromium silicides.

والشكل رقم (١-١) يبين التطبيقات الرئيسية المهمة لمواد درجات الحرارة العالية منذ عام ١٨٨٠م

وحتى عام ٢٠٠٠م [٣].



شكل (١-١) التطبيقات الرئيسية لمواد درجات الحرارة العالية [٣].

المركبات شبه المعدنية Intermetallic Compounds

٣-١

المركبات شبه المعدنية Intermetallic Compounds صنف فريد من المواد الهندسية المتقدمة التي يمكن تعريفها بأنها طور سبيكي منتظم تكون من اتحاد عنصرين معدنيين مختلفين كيميائياً أو أكثر لينتج طور جديد ذي تركيب وبنية بلورية وخواص جديدة [١,٥]. هذه المواد هي ليست مركبات بالمعنى الكيميائي الصحيح لكنها مركبات تمتلك بنى بلورية منتظمة تختلف عن البنى البلورية للعناصر التي تكونت منها [٦]. إن البنية الشبكية المنتظمة أو المثالية Superlattice هي نوع خاص من المحلول الجامد الإستبدالي Substitutional Solid Solution إذ تتعرض بعض هذه المحاليل الجامدة العشوائية عند التبريد البطيء إلى عملية إعادة تنظيم للذرات حيث تتحرك ذرات المذاب إلى مواقع محددة في الشبكة الحيزية , تعرف هذه العملية بالتنظيم بالترتيب Ordering [٧,٨].

وهكذا على الرغم من إن قوانين التكافؤ الكيميائي غير مسموحة الاستخدام عادةً فإن المركبات شبه المعدنية غالباً ما تمتلك أسماء بسيطة نسبياً مثل $CuZn$, Mg_2Sn , $CaSe$, Nb_5Si_3 . المركبات شبه المعدنية تمتلك صفات كل من المعادن والمواد السيراميكية وخواصها تتوسط خواص المعادن (التي عموماً ما تكون لينة Soft وأكثر مطيلية Ductile) وخواص المواد السيراميكية (التي عموماً ما تكون صلبة Hard وأكثر هشاشة Brittle) [٩]. وبسبب الاختلاف الكبير في السالبية الكهربائية Electronegativity بين العناصر المكونة للمركبات شبه المعدنية ، فإن الأواصر السائدة في المركبات شبه المعدنية عبارة عن خليط (اتحاد) من الأصرتين المعدنية والتساهمية أو من الأصرتين المعدنية والأيونية ، وكلما كان الاختلاف في السالبية الكهربائية كبيراً كلما كانت الأواصر السائدة عبارة عن خليط من الأصرتين المعدنية والأيونية [٥]. وهذا ما يجعل خواصها بصورة رئيسية لا معدنية إذ أنها تمتلك نقاط انصهار عالية ، وجساءة عالية ، ومقاومة تأكسد وتآكل عاليتين ، وتوصيلية كهربائية منخفضة بالإضافة إلى امتلاكها كثافات واطنة نسبياً ومطيلية منخفضة ، وهذا ما يفسر بقاء تأثيرات السبائك شبه المعدنية ذات البنية البلورية المنتظمة غير جديرة بالملاحظة لمدة طويلة وذلك لمطيليتها المنخفضة جداً عند درجة حرارة الغرفة والصعوبة الكبيرة في صنع أي شيء مفيد من هذه المواد [١٠]. ولذلك فإن

الجزء الكبير من العمل كان قد بدأ في السنوات (١٥-١٠) الأخيرة لتحسين وتمييز المركبات الشبه معدنية ولتطوير تكنولوجيا تصنيع هذه المواد في جهود لموازنة المطيلية والمتانة والمقاومة ومقاومة الصدمة ومقاومة الكلال . ولغرض توفير الطلبات المتزايدة إلى سبائك منخفضة الكثافة وذات أداء عالٍ في أجزاء الطائرات ومحركات التوربين ، فإن الترشيح الرئيسي لهذه الوظيفة هي باستعمال ألومينايدات المعادن الانتقالية Transition –Metal Aluminides مثل ألومينايدات الحديد والنيكل والتيتانيوم والكوبلت التي تحتفظ بخواص ميكانيكية جيدة عند درجات الحرارة العالية . ألومينايدات النيكل تمتلك نقاط انصهار عالية ومقاومة تأكسد عالية مع مقاومة منخفضة مقارنة بألومينايدات التيتانيوم لكنها تبدي هشاشة أكثر عند درجات الحرارة المنخفضة . أما ألومينايدات الحديد فأنها أثقل من ألومينايدات التيتانيوم لكنها أكثر مطيلية عند درجات الحرارة المنخفضة [١,٩].

إن المركبات شبه المعدنية المنتظمة ذات الأساس من الألومينايدات تصنف ضمن المواد المعدنية التي تستعمل في درجات الحرارة العالية والأوساط القاسية. الخواص الفيزيائية والميكانيكية وسلوك التآكسد للصف الأول لألومينايدات المعادن الانتقالية التي تمتلك البنية البلورية B_2 و γ -TiAl بينت امتلاكها مدى واسع من السلوكيات . معظم هذه الخواص مسيطر عليها بسبب غياب العيوب البنوية Constitutional defect. إن سلوك الانتشار في هذه المركبات واضح الإدراك لكن تأثيرات العوامل الخارجية مثل بيئة الوسط واللائنظامية في العوامل الذاتية مثل أنظمة الانزلاق وتأثيرات الحجم الحبيبي المختلفة والتأثيرات المختلفة للحرارة على مقاومة الخضوع لا تزال غير مفهومة . إن عملاً أكثر يتطلب في هذا المجال لإعطاء نتائج منسقة وإمكانية وسهولة الإعداد (أثناء التصنيع) قبل إمكانية تطبيق تلك المركبات بكفاءة عالية.

هذه الألومينايدات تظهر ست فوائد مهمة جداً للتطبيقات الهيكلية التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية أكثر مما تعطيه السبائك الفائقة ذات الأساس نيكل Superalloys المستعملة اليوم , فهي تمتلك كثافات واطئة ودرجات انصهار عالية ، كما مبين في الجدول (١-١) [١١]. إن درجات الانصهار تحدد الحد الأعلى لدرجة الحرارة المستعملة وتبين مدى درجة الحرارة التي تبدأ عندها عملية الانتشار تسود. مثال ذلك إن درجة انصهار NiAl أكثر بـ ٢٠٠ مرة من السبائك الفائقة ذات الأساس نيكل . بالإضافة إلى امتلاكها موصالية حرارية عالية و مقاومة تأكسد أفضل ودرجة حرارة تحول منخفضة من السلوك المطيلي إلى الهش (Brittle-to-Ductile Transition Temperature) (BDTT , بالمقارنة مع تلك للسبائك الفائقة. وبالمقارنة بالسبائك الفائقة فإن هذه الألومينايدات لا تمتلك فقط فوائد الكثافة ومقاومة التآكسد والموصالية الحرارية ودرجة حرارة التحول من المطيلي إلى الهش ودرجة حرارة الانصهار لكنها تعتبر قليلة الكلفة نسبياً [١].

ويمكن تقسيم المركبات شبه المعدنية على نوعين رئيسيين هما [٥] :

١- المركبات شبه المعدنية ذات التركيب الثابت :

Stoichiometric Intermetallic Compounds

وهي المركبات التي تمتلك تركيباً كيميائياً ثابتاً والتي يتم تمثيلها في مخططات الأطوار على شكل خط عمودي. ومن الأمثلة على هذا النوع هو المركب شبه المعدني ثاني سيليسايد الموليبدنوم $MoSi_2$ الذي يمتلك نسبة ثابتة ، وهي نسبة ذرتي سليكون إلى ذرة موليبدنوم واحدة ويستخدم كعناصر تسخين Heating elements لأفران درجات الحرارة العالية.

٢- المركبات شبه المعدنية ذات التركيب المتغير :

Nonstoichiometric Intermetallic Compounds

وهي المركبات التي تمتلك مدى من التراكيب الكيميائية المختلفة يطلق عليها في بعض الأحيان بالمحاليل الجامدة الوسطية Intermediate solid solution. فمثلاً في نظام النيكل – ألومنيوم يعتبر طور NiAl طوراً شبه معدني ذا تركيب متغير على أساس أن النسبة الذرية بين النيكل والألمنيوم غير ثابتة (متغيرة) ، إذ يمتد طور NiAl من حوالي (٦٦% wt Ni) إلى حوالي (٧٢% wt Ni) عند درجة حرارة $1600^{\circ}C$.

جدول (١ - ١) الخواص الفيزيائية والميكانيكية للألومينايدات [١١] .

Compound	Crystal structure	Critical ordering temperature (T _c)	Melting point (°C)	Material density (g/cm ³)	Young's modulus (GPa)	Fracture mode	Ductility (%) RT
Ni ₃ Al	L1 ₂	1390	1390	7.50	179	IG	
NiAl	B2	1638	1640	5.86	294	IG	0-2
Fe ₃ Al	D0 ₃	540	1040	6.72	141	C	4-8
FeAl	B2	760	1040				
FeAl	B2	1250	1250	5.56	261	IG + / C	2.5-8
CoAl	B2	1648	1648	6.08			
Ti ₃ Al	D0 ₁₉	1460	1460	4.2	145		2-5
TiAl	L1 ₀	1100	1180	3.91	176		1-3
TiAl ₃	D0 ₂₂	1350	1350	3.4			

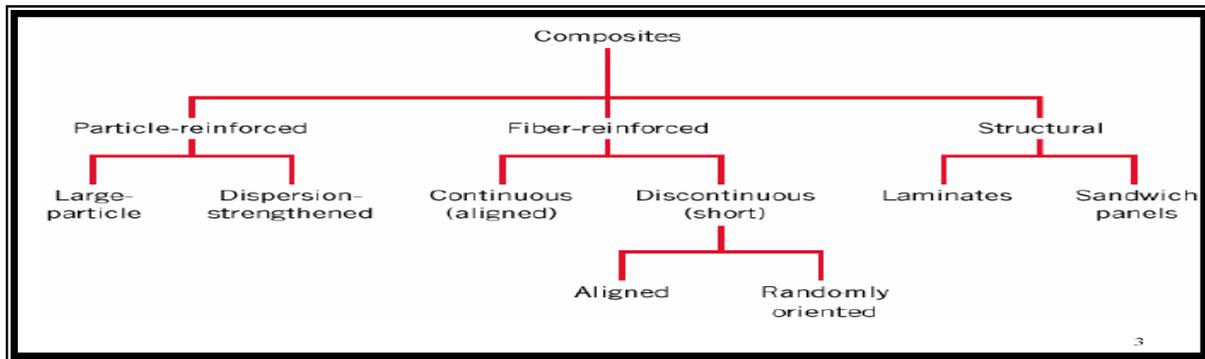
المواد المركبة لدرجات الحرارة العالية High Temperature Composite Materials

٤- ١

التي تكونت منها. مثل هذه المادة تعرف بالمادة المركبة Composite material [١٢]. فالمادة المركبة تتألف من طورين مميزين هما طور مادة التقوية Reinforcing Material (ألياف ، شعيرات ، جسيمات) محاطاً بطور مادة الأساس Matrix Material (مادة بوليمرية ، سيراميكية ، معدنية ، شبه معدنية). ويعد الخشب Wood أحد الأمثلة لمادة مركبة طبيعية إذ يتألف من ألياف سليولوز طويلة مربوطة معاً بواسطة الخلايا اللغينية. الشكل (٢-١) يبين تصنيف المواد المركبة [١٣] ، إذ تصنف حسب طور التقوية إلى ثلاثة أنواع رئيسية هي : [١٤]

١- المواد المركبة المقواة بالألياف (Fiber Reinforced Materials) : في هذه المواد تغمر الألياف أو الشعيرات في الأرضية بصورة مستمرة أو غير مستمرة والتي لا يزيد كسرها الحجمي عن ٧٠٪. من أمثلة هذه المواد البوليمرات المقواة بألياف الزجاج أو ألياف الكربون والمعادن المقواة بألياف البورون.

شكل (٢-١) يبين تصنيف المواد المركبة حسب طور التقوية [١٣].



٢- المواد المركبة الصفائحية (Laminated Composites) : هذه المواد تتكون من طبقات من

مواد متنوعة مثل صفائح معدنية مختلفة ، زجاج صفائحي ، المواد المركبة الليفية الصفائحية.

٣- المواد المركبة المقواة بالجسيمات (Partical Reinforced Materials) : تحتوي الأرضية على أكثر من ٢٠٪ من الجسيمات التي تمتلك حجماً حبيبياً أكبر من (١ μm). مثل الكونكريت والمواد

المركبة ذات الأساس المعدني المقواة بالدقائق السيراميكية وبعض أنواع وقود الصواريخ (دقائق عضوية في أرضية من المطاط).

إن الجسيمات في هذا النوع من المواد المركبة تؤدي أحد الغرضين الآتيين: [١٥]

- للأرضية المطيلية فإن الجسيمات تعمل على إعاقة حركة الانخلاعات وبالتالي تحد من التشوه اللدن (Plastic deformation).

- للأرضية الهشة فإن الجسيمات تحد من حجم الشقوق الأولية وقابليتها للتقدم وبالتالي السيطرة على مقاومة المادة المركبة.

إن المواد المركبة التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية يمكن تقسيمها على خمسة أنواع

رئيسية هي: [١]

١- المواد المركبة ذات الأساس المعدني (MMCs).

٢- المواد المركبة ذات الأساس تيتانيوم (TiMMCs).

٣- المواد المركبة كربون - كربون (C-C) Composites .

٤- المواد المركبة ذات الأساس السيراميكي (CMCs).

٥- المواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني (IMCs).

إن أهم ما تتميز به هذه المواد هي المقاومة النوعية العالية ولهذا فأنها تستخدم في صناعة بعض أجزاء المركبات الفضائية والتوربينات الغازية والمحركات الحرارية وتساهم درجة حرارة الانصهار العالية لهذه العناصر في توفير إمكانية تحمل بعض المواد المركبة للدرجات العالية نسبياً والتي قد تفوق كفاءة السبائك الفائقة.

المواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني (IMCs)

Intermetallic Matrix Composites (IMCs)

١- ٤- ١

معدنية لتكوين المواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني (IMCs) التي تعتبر أحدث أنواع المواد المركبة التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية.

إن المواد ذات الأساس تيتانيوم (TiMMCs) تستعمل في أوساط درجات الحرارة التي لا تزيد عن 600°C . فوق تلك الدرجة الحرارية فمن الضروري استعمال المواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني (IMCs) ، والعمل في هذا المجال تم إنجازه عن طريق تقوية الأرضيات شبه المعدنية ذات الأساس ألومينايدات التيتانيوم TiAl و Ti_2Al . إن ألومينايد التيتانيوم TiAl على الأخص يمتلك قابلية تحمل للعمل في أوساط درجات الحرارة العالية أفضل من تلك التي للمواد المركبة ذات الأساس تيتانيوم (TiMMCs) [٣].

للتطبيقات التي تعمل فوق درجة حرارة 1000°C فإن الأرضيات الممكنة للعمل في تلك الأوساط تشمل الألومينايدات مثل ألومينايد النيكل NiAl وألومينايد النياييوم NbAl_3 والسليسايدات مثل سليسايد الموليبيدوم MoSi_2 . أما الألياف والدقائق المرشحة لهذه الوظيفة فتتضمن ألياف ودقائق الألومينا وكاربيد السليكون وألياف سبائك التنتكستن [٣].

لقد استخدمت تقنيات عديدة لتصنيع المواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني (IMCs) ابتداءً من طريقة الرش بالبلازما (Plasma Spraying) انتهاءً بطريقة التجمد الاتجاهي. إن مفهوم إنتاج المواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني (IMCs) بواسطة التجمد الاتجاهي تم بحثه منذ أوائل عام ١٩٧٠م. حديثاً تم تطوير المركبات شبه المعدنية التي تستخدم كماد هيكلية للأوساط ذات درجات الحرارة العالية نسبياً خصوصاً المواد المركبة ذات الأساس ألومينايد النيكل NiAl [٣].

أوكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) Aluminium Oxide (Al_2O_3)

٥- ١

من المحتمل أن يكون أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 المادة السيراميكية الهندسية الأكثر استخداماً. ففي العام ١٩٩٥م أنتج حوالي خمسة ملايين طن متري من هذه المادة للتطبيقات الهيكلية ، الكيميائية ، الطبية ، الكهربائية وتطبيقات البلى وغيرها من التطبيقات [١٥]. إن أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 يستخلص غالباً من خام البوكسيت Bauxite ore بعملية باير (Bayer process). إذ يتم استخلاص وتنقية البوكسيت باستعمال هيدروكسيد الصوديوم NaOH. الشوائب تنفصل خارجاً بواسطة الترشيح. إن بلورات ناعمة جداً تدعى بالجبسيت Gibbsite يتم إضافتها في هذه العملية لجعل عملية التنوية غير متجانسة وذلك لترسيب الألمنيوم كجبسيت. بعد ذلك يتم غسل الجبسيت المترسب لإزالة الصوديوم ومن ثم كلسنته عند درجات الحرارة العالية مابين ($1100-1200^{\circ}C$) لتكوين أكسيد الألمنيوم (الألومينا) [٥] ، حيث هنالك عدة أنواع من أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 لكن أغلب الأجزاء الهيكلية تصنع من أكسيد الألمنيوم نوع ألفا ($\alpha-Al_2O_3$) الذي يمتلك البنية البلورية السداسية المكتظة (CPH) أو من أكسيد الألمنيوم نوع دلتا ($\delta-Al_2O_3$) الذي يمتلك البنية المجهرية نوع B٢ [١٦]. الأجزاء الهيكلية المصنوعة من أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 تنتج بواسطة كبس مسحوق أكسيد الألمنيوم داخل قالب ومن ثم حرق المسحوق عند درجات الحرارة العالية لتحويله إلى كتلة متماسكة ذات كثافة عالية نسبياً ، والجدول (١-٢) يبين الخواص الميكانيكية والفيزيائية النموذجية لأوكسيد الألمنيوم Al_2O_3 حيث يمتلك مقاومة بلى عالية ومقاومة إنضغاط عالية ومقاومة كيميائية جيدة وصلادة عالية تجعله صعب التشغيل بالإضافة إلى امتلاك سطحه نعومة عالية [١٦]. ومما تجدر الإشارة إليه أن أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 يعد أقدم المواد السيراميكية المتقدمة هندسياً والأنواع الحديثة منه أصبحت تمتلك خواص شد ومتانة عاليتين ، كما في المادة المركبة (Al_2O_3 / ZrO_2) والمادة المركبة (Al_2O_3 / SiC) والمادة المركبة (NiAl).

جدول (١-٢) الخواص الفيزيائية والميكانيكية لأوكسيد الألمنيوم Al_2O_3 [١٦].

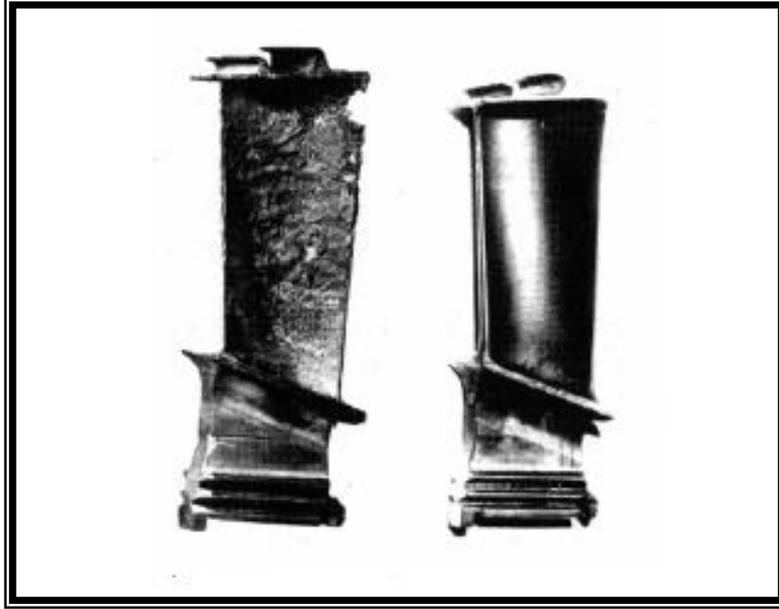
Property	Aluminum Oxide Al_2O_3
Room temperature modulus of rupture , MPa	٣٨٠
Typical Weibull modulus	١٠
Room temperature tensile strength , MPa	٢١٠
Room temperature compressive strength , MPa	٢٧٥٠
Room temperature Young's modulus , MPa	3.6×10^5
Room temperature hardness , kg/mm ^٢	١٦٠٠
Fracture toughness (KIC) , MPa.√m	١.٧٥
Poisson's ratio	٠.٢٧
Density , kg/m ^٣	٣٩٨٠
Thermal expansion coefficient , m/m.K ($0-1000^{\circ}C$)	9×10^{-6}
Specific heat , J/kg/K	١٠٤٠
Room temperature thermal conductivity , W/m/K	٨.٤
Thermal shock resistance , ΔTK	٢٠٠

تطبيقات ألومينايد النيكل NiAl Applications of NiAl

٦-١

ألومينايد النيكل NiAl هو السيراميكية التي يتم تصنيعها من النيكل والأكسجين. في أوساط درجات الحرارة العالية والأوساط القاسية (المسببة للتآكل) وذلك بسبب قابليته على الاحتفاظ بخواص ميكانيكية جيدة عند تلك الأوساط. التطبيق الرئيسي لألومينايد النيكل NiAl هو في الإكساء (Coatings) [١٦، ١٧] للأجزاء التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية والأوساط العنيفة (التوربينات البخارية Steam turbines ،

المبادلات الحرارية Heat exchangers ، المراجل تحت الدرجة Supercritical boilers ، التوربينات الغازية-الهوائية Aero-gas turbines ومحركات الديزل Diesel engines) وذلك للحد من انحلال سطوح تلك الأجزاء أو لعزلها حرارياً ضد الأوساط الحارة. إن انحلال السطح يحدث من خلال التآكل والأكسدة والتعرية بالجسيمات الصلبة (Solid particles Erosion). مثال ذلك حصول التآكل النقري Pitting corrosion لأسطح تلك الأجزاء الذي ربما يؤدي إلى خلق شقوق الكلال الابتدائية (Fatigue Crack Initiation) وبالتالي فشل تلك الأجزاء. إن أحد أمثلة التآكل موضح في الشكل (٣-١) الذي يبين مقارنة بين ريشة توربين غازي غير مغطاة وريشة توربين غازي مغطى سطحها بطبقة من ألومينايد النيكل NiAl. إن كلتا الريشتين قد تم فحصها بعد ٢٥٠٠ ساعة من الطيران البحري (Sea flight service) عند علو منخفض [١٧].



يوضح تأثير التآكل
الغازي غير مغطاة
مغطى سطحها

شكل (٣-١)
على ريشة التوربين
اليسار) وأخرى

بألومينايد النيكل NiAl (اليمين) بعد ٢٥٠٠ ساعة من الطيران البحري عند علو منخفض [١٧].

التطبيقات الأخرى لألومينايد النيكل NiAl هي استخدامه كمادة هيكلية في الطائرات التي تفوق سرعتها سرعة الصوت Supersonic aircraft والمحركات النفاثة Jet engines والطائرات التجارية ذات السرعة العالية High-speed commercial aircraft وفي صناعة أحواض المعاملة الحرارية Heat-treating trays وأدوات لتعليق الأنابيب لأفران درجات الحرارة العالية Tube hangers ودرافيل لأفران تصليد الفولاذ Steel hardening furnaces والتطبيق الجديد لألومينايد النيكل NiAl هو استخدامه في صناعة أنابيب المشاعل الإشعاعية Radiant burner tubes لأفران المعالجة الحرارية [١٨].

ليس كل تطبيقات ألومينايد النيكل NiAl هيكلية ، ففي السنوات القليلة الماضية بدأ يستخدم في صناعة الإلكترونيات (الأجزاء الفائقة التوصيل Superconductors ، التلامسات الأومية لدوائر التكامل الكهربائية Integrated circuits ، كاشف للأشعة تحت الحمراء Infrared detectors وكمتحسسات Sensors) [١٩]. ويعود السبب في استخدام ألومينايد النيكل NiAl في صناعة هذه الأجزاء لتكوينه طبقة ألومينا عازلة عن طريق أكسده في الهواء عند درجات الحرارة ما بين (٩٠٠- ١٢٠٠°C). هذه الأجزاء تباع الآن في اليابان والولايات المتحدة الأمريكية بسبب امتلاكها خواص ميكانيكية محسنة وتوصلية حرارية عالية [٢٠].

تعد البحوث والدراسات المجراة في مجال إنتاج المركب شبه المعدني ألومينايد النيكل NiAl ودراسة خواصه الميكانيكية وتحسينها كثيرة بدأت تقريباً منذ سبعينيات القرن الماضي ، إلا أن البحوث والدراسات التي تطرقت إلى إنتاج المادة المركبة ذات الأساس من هذا المركب (NiAl-Al₂O₃) يمكن اعتبارها قليلة وحديثة العهد.

لقد تناولت تلك البحوث طرق تصنيع المركب شبه المعدني NiAl ومن ثم تصنيع أجزاء من المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) ودراسة الخصائص التركيبية وقوة الربط والخصائص الميكانيكية لهذه الأجزاء وسبل تحسينها وتطوير أداءها عن طريق إضافة عناصر السبك إلى هذه الأجزاء.

ويمكن القول بأن عام ١٩٩٧م كان بداية ولادة تلك البحوث وأولها كان من قبل الباحثان اليابانيان (Kiyotaka Matsuura و Masayuki Kudoh) [٢١] لغرض تصغير الحجم الحبيبي لدقائق المركب NiAl ، إذ تناول ذلك البحث تأثير إضافة دقائق الألومينا على الحجم الحبيبي والخواص الميكانيكية لألومينايد النيكل NiAl. تم حساب قيم الكثافة والصلادة للنماذج النهائية عند درجة حرارة الغرفة باستخدام نظرية أرخميدس واختبار صلادة فيكرز بالإضافة إلى حساب معدل الحجم الحبيبي لألومينايد النيكل NiAl. أما مقاومة التأكسد للنماذج النهائية فقد تم حسابها من الوزن الحبيبي بعد تعرضها للهواء عند درجة حرارة ١٥٠٠K.

ومن الاستنتاجات التي توصل إليها الباحثان :

- إن إضافة دقائق الألومينا أدت إلى تصغير الحجم الحبيبي لألومينايد النيكل NiAl.
- إن كثافة المركب NiAl تنخفض بإضافة دقائق الألومينا ، في حين أن إضافتها ليس لها تأثير على صلابته ، أما المسامية فقد وجد أنه أقل من ٥٪.
- إن إضافة دقائق الألومينا لها تأثير على مقاومة التأكسد للمركب NiAl.

في العام ذاته درس الباحث (Hahn Choo) وآخرون [٢٢] الخواص الميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس من ألومينايد النيكل NiAl والمحتوية على دقائق مشتتة من مركب نتريد الألمنيوم AlN وألياف مشتتة من الألومينا ، إذ تم تحضير المركب NiAl المحتوي على ٥Vol% من مركب نتريد الألمنيوم AlN بواسطة تقنية التسبيك الميكانيكي (MA) لمسحوق السبك الرئيسي النيكل والألمنيوم تحت جو من غاز النتروجين ، ومن ثم تصنيع المادة المركبة (NiAl-AiN-Al₂O₃) بواسطة تقنية الكبس الساخن الفراغي (VHP) تحت جو من غاز الأركون. استخدم الباحثون المجهر الضوئي (Optical Microscopy, OM) والمجهر الإلكتروني النافذ (Transmission Electron Microscopy, TEM) لدراسة البنية المجهرية للمادة المركبة المكبوسة على الساخن (NiAl-AiN-Al₂O₃). كما أجريت عدة فحوصات ميكانيكية عند درجة حرارة ١٣٠٠K لتقييم النماذج النهائية هي اختبار الإنضغاط (Compression test). أما أهم ما توصل إليه الباحثون أن البنية المجهرية للمادة المركبة

(NiAl-AiN-Al₂O₃) أظهرت إمتلاكها كثافة قريبة جداً من الكثافة النظرية لتلك المادة المركبة وقوة ربط جيدة بين طور الأرضية NiAl وألياف الألومينا.

عام ١٩٩٧م درس الباحث (V.M.Sglavo) وآخرون [٢٣] تحضير المادة المركبة ذات الأساس من الألومينا Al₂O₃ المقواة بالمركب شبه المعدني Ni₂Al والتعرف على خصائصها ومميزاتها. إن المادة المركبة ذات الأساس السيراميكي المحتوية (١٠Vol%) من مسحوق المركب Ni₂Al تم تحضيرها بواسطة تقنية الكبس الساخن تحت جو من غاز الهيدروجين لمكبوسات خضراء ناتجة من خلط مسحوق المادة شبه المعدنية ذات التركيب الكيميائي (٧٣.١٢Ni , ١٨.٨٢Al , ٨.٠٦Cr , ٠.٠١٩Mo , ٠.١B at%) ، كما أن المركب Ni₂Al تم تحضيره أولاً بتقنية التسبيك الميكانيكي (MA) باستخدام طاحونة الكرات الكوكبية. أجرى الباحثون ثلاثة فحوصات ميكانيكية للنماذج النهائية من المادة المركبة (Al₂O₃-Ni₂Al) عند درجة حرارة الغرفة هي اختبار الإنحناء ذي الأربع نقاط (Four-point bending test) لحساب معامل المرونة ، اختبار الإنحناء ذي الثلاث نقاط (Three-point bending test) لحساب مقاومة الإنحناء للمادة المركبة واختبار صلادة فيكرز لحساب متانة الكسر (K_{IC}) للمادة. أما عند درجة حرارة (١٠٠٠°C) فقد تم حساب معامل المرونة (E) ومقاومة

الإنحاء (σ_f) بواسطة جهاز الاختبارات العام المربوط بفرن درجات حرارة عالية باستعمال مقاومات حرارية مصنوعة من كاربيد السليكون SiC وبمعدل تسخين 160 min^{-1} .
لقد استنتج الباحثون النتائج الآتية :

- إن مقاومة الإنحاء للمادة المركبة ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ni}_3\text{Al}$) تتأثر بصورة طفيفة لغاية درجة حرارة 600°C نتيجة لامتلاك الجسيمات شبه المعدنية بمتانة عالية بفعل إضافة البورون.
- أدت إضافة الكروم إلى زيادة مقاومة انحاء المادة المركبة ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ni}_3\text{Al}$) عند درجات الحرارة الأقل من 600°C .

- عند درجات الحرارة العالية يحدث التلدين للمركب شبه المعدني Ni_3Al وبالتالي حدوث انخفاض في مقاومة التماسك بين الأرضية السيراميكية والجسيمات شبه المعدنية.

- حدوث انخفاض في متانة الكسر عند درجة حرارة 600°C وارتفاعها بعد ذلك عند درجة حرارة 800°C . وعلى الرغم من ذلك فإن (K_{IC}) تبقى عند قيم عالية مقارنة مع تلك التي للألومينا النقية.

عام 1997م أيضاً تم بحث تأثير الحديد على الخواص الميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($\text{NiAl-Al}_2\text{O}_3$) من قبل الباحث (W.H.Tuan) وآخرون [24]. حيث تم أولاً تحضير المركب NiAl والمضاف إليه حوالي ($0.25\% \text{ at Fe}$) ومن ثم تحضير المادة المركبة ($\text{NiAl-Al}_2\text{O}_3$) التي تتراوح نسبة NiAl ما بين ($0-100\%$) بتقنية الكبس الساخن.

وقد تم دراسة البنية المجهرية للمادة على الساخن باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (Scanning Electron Microscopy, SEM) والمجهر الإلكتروني النافذ (TEM) وجهاز فحص حيود الأشعة السينية (XRD). أما الفحوصات الميكانيكية فهي اختبار الإنحاء للمادة المركبة وفحص الصلادة المايكروية.

ومن الاستنتاجات المهمة التي توصل إليها الباحثون هي أن إضافة كميات صغيرة من الحديد ($0.25\% \text{ at}$) تؤدي إلى تحسين مطيلية المادة المركبة ($\text{NiAl-Al}_2\text{O}_3$) وزيادة في متانة الكسر لهذه المادة ، كما أنه بسبب كون الحجم الحبيبي لجسيمات الألومينا أصغر من الحجم الحبيبي لجسيمات المركب NiAl فإن جسيمات الألومينا تميل إلى الالتصاق بسطح جسيمات المركب NiAl .

عام 2000م قام الباحث (W. Hu) وآخرون [25] بتحسين خواص الربط للمادة المركبة ذات أساس من ألومينايد النيكل NiAl والمقواة بألياف الألومينا عن طريق طلاء أسطح ألياف الألومينا بترييد البورون (BN). تم تحضير النماذج بتقنية الربط الانتشاري ($10 \text{ MPa} / 7 - 1400^\circ\text{C} / 2 \text{ h}$). إن البنية الفاصلة (الوسطية) والاستقرارية الكيميائية بين الأرضية والليف وطبقة ترييد البورون تم دراستها بواسطة تقنية المجهر الإلكتروني النافذ (TEM). ومن أهم ما استنتجه الباحثون إن طبقة ترييد البورون التي تم طلاءها على أسطح ألياف الألومينا قد حسنت بصورة كبيرة خواص الربط وبالتالي الخواص الميكانيكية للمادة المركبة ($\text{NiAl-Al}_2\text{O}_3$).

عام 2001م قام الباحث (D.Oleszak) [26] بإنتاج مسحوق المادة المركبة ذات الأساس من المركب شبه المعدني $\text{NiAl-Al}_2\text{O}_3$ بتقنية التسيبك الميكانيكي (MA) لمسحوق أوكسيد النيكل (NiO) والألمنيوم بنقاوة (99.8) وبحجم حبيبي ($40 \mu\text{m}$) بإستخدام طاحونة الكرات الكوكبية وكرات طحن مصنوعة من الفولاذ المصلد بحيث كانت النسبة ما بين وزن الكرة إلى وزن المسحوق (10:1). أما زمن الطحن فلقد تراوح ما بين نصف ساعة إلى أربعين ساعة.

عام 2003م قام الباحثان (Chin Shyang Hwang) و (Dong Lin Coo) [2] بتحضير ودراسة الخواص الميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($\text{NiAl-Al}_2\text{O}_3$) عن طريق أكسدة مسحوق ألومينايد النيكل NiAl نسبة النيكل فيه ($50\% \text{ at}$) أي حوالي ($68\% \text{ wt}$) في الهواء لمدة ساعتين عند درجة حرارة 600°C أو 650°C أو 700°C لتكوين أوكسيد الألمنيوم Al_2O_3 ضمن الأرضية ذات الأساس NiAl ، إذ تم بعدها استخدام تقنية الطحن بالكرات لمدة تتراوح ما بين (5 - 216 Hrs) باستعمال كرات طحن من الألومينا. ثم كبس المادة المركبة ($\text{NiAl-Al}_2\text{O}_3$) على الساخن لمدة ساعة ونصف عند درجة حرارة 1400°C تحت جو مفرغ من الهواء (10^{-1} Pa). أجريت اختبارات لتحديد مقاومة الإنحاء بواسطة اختبار الإنحاء ذي الأربع نقاط ومتانة الكسر بواسطة تقنية

العتبة ذات حافة الحز المفردة (Single-Edge Notched Beam, SENB). أما البنية المجهرية فقد تم ملاحظتها عن طريق المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) والمجهر الإلكتروني النافذ (TEM). وقد توصل الباحثان إلى أن أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 يحد من النمو الحبيبي لدقائق المركب NiAl خلال عملية الكبس الساخن ، إن المادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) المحضرة من أكسدة المركب NiAl في الهواء عند درجة حرارة $700^{\circ}C$ لمدة أربع ساعات تمتلك أقصى مقاومة إنحناء ($1020 MPa$) ومتانة كسر ($10.4 MPa\sqrt{m}$).

الهدف من هذا البحث

Objective of This Search

١-١

بتقنية التليد التفاعلي لمسحوقي النيكل والألمنيوم ، ومن ثم إنتاج المادة المركبة ذات الأساس من هذا المركب والمقواة بدقائق الألومينا (NiAl- Al_2O_3) ودراسة تأثير إضافة الألومينا على الخواص الميكانيكية لها. أما الهدف الثاني فيهدف إلى تحسين الخواص الميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl- Al_2O_3) بإضافة عنصري البورون والكروم كل على حدة إلى هذا المركب شبه المعدني وبإضافتهما معاً ، نظراً لأن الأدبيات المتوفرة لم تدرس تأثير إضافة عنصري البورون والكروم بنسب وزنية مختلفة على الخواص الميكانيكية للمادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) عند درجة حرارة الغرفة بالإضافة إلى عدم دراستها تأثير إضافة هذين العنصرين معاً على تلك الخواص. ولهذا فقد تم تقسيم الدراسة الحالية على خمسة أجزاء أساسية هي :

- ١- تقييم مسحوق ألومينايد النيكل NiAl المحضر بتقنية التليد التفاعلي لمسحوقي النيكل والألمنيوم من خلال تحديد الخواص الأساسية والثانوية له.
- ٢- دراسة تأثير إضافة الألومينا على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl- Al_2O_3).
- ٣- دراسة تأثير إضافة عنصري البورون والكروم كل على حدة على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl- Al_2O_3).
- ٤- دراسة تأثير إضافة عنصري البورون والكروم معاً على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl- Al_2O_3).
- ٥- التقييم النهائي لأفضل النتائج المستحصلة.

المقدمة Introduction

١- ٢

نظراً لحدائثة المواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني (IMCs) التي لا يتجاوز عمرها الثماني سنوات وبسبب الخواص الفريدة من نوعها للمواد الأساس التي تتألف منها وهي المركبات شبه المعدنية والتي جعلتها في الوقت الحاضر أكثر حقول علم وهندسة المواد إثارة ، فمن الضروري الخوض في حقول معرفة متعددة لفهم وإدراك هذه المواد ولتمييزها عن المواد الهندسية الأخرى والتي تتضمن التعريف بالمركبات شبه المعدنية ، ودراسة بنيتها البلورية وتوضيح بعض مجاميعها وبالأخص المركبات المسماة بالأمينايدات المعادن الانتقالية ، وبالتحديد ألومينايدات النيكل موضوع هذا البحث والتي تشتمل على دراسة خواصها الميكانيكية ومعرفة أهم مجالات تطبيقاتها وطرق إنتاجها.

التركيب البلوري للمركبات شبه المعدنية Crystal Structures of Intermetallics

٢- ٢

لقد أثار البحث عن مواد هيكلية جديدة للتطبيقات التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية والأوساط القاسية إهتمام متزايد بالمركبات شبه المعدنية المنتظمة. هذه المركبات لها ميزة فريدة وهي إنها تكون مدى طويلاً من التركيب البلوري المنتظم أسفل درجة الحرارة الحرجة التي عموماً ما يعبر عنها بأنها درجة حرارة التنظيم الحرجة (Tc) للمركبات شبه المعدنية التي عند تجاوزها يصبح التركيب البلوري لهذه المركبات غير منتظم (عشوائياً) [٣]. إن درجة حرارة التنظيم الحرجة لمعظم ألومينايدات المعادن الانتقالية (كالنيكل والحديد والتيتانيوم) عادةً ما تكون قريبة من درجات انصهار تلك الألومينايدات ، يستثنى من ذلك المركب شبه المعدني ألومينايد التيتانيوم TiAl الذي يمتلك تركيب بلوري غير منتظم عند درجة حرارة ١١٠٠°C لكنه يمتلك نقطة انصهار حوالي ١١٨٠°C. ألومينايد الحديد Fe₃Al يمر خلال تركيبين بلوريين منتظمين هما : البنيتين المجهريتين B₂ و D₀₃ قبل أن يصبح تركيبه البلوري غير منتظم [٢٧].

بالإمكان إضافة عناصر سبك إلى المركبات شبه المعدنية من دون حصول أي فقدان بالتركيب البلورية المنتظمة. إن الغرض من إضافة عناصر السبك إلى المركبات شبه المعدنية ذات الأساس من سبائك درجات الحرارة العالية هو لتحسين خواصها لبعض التطبيقات الخاصة التي تعمل في الأوساط العنيفة.

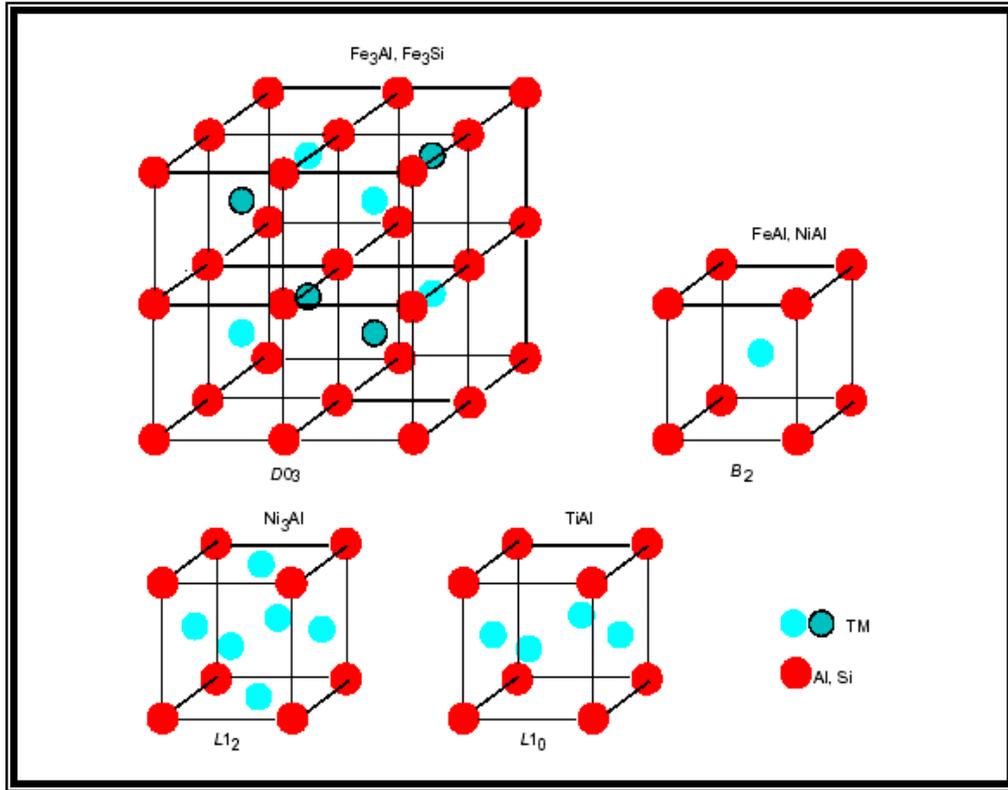
الشكل (١-٢) يبين التراكيب البلورية المكعبة العامة Generic Cubic Crystal Structures للألومينايدات. إن مصطلح (Generic) أي العام يعني أن تلك التراكيب البلورية تحدث في الألومينايدات طبيعياً . مثال ذلك انه عند حصول التجمد الملائم من المنصهر لا يحدث أي تغيير في التركيب [٢٧].

المركبات شبه المعدنية مثل ألومينايد النيكل Ni₃Al وألومينايد الزركونيوم Zr₃Al تمتلك الشبكة البلورية المسماة ببنية L₁₂ أو ما يطلق عليها بنية (cP₈) الموضحة في الشكل (١-٢). هذه البنية مشتقة من البنية البلورية المكعبة المتمركزة الوجه (fcc) . إن وحدة الخلية هذه تحتوي على أربع ذرات وهو العدد نفسه الموجود في بنية (fcc) . إن ذرات النيكل في المركب Ni₃Al أو ذرات الزركونيوم في المركب Zr₃Al تحتل مركز كل وجه من أوجه المكعب الستة بينما ذرة الألمنيوم تحتل زواياها [٢٧, ٢٨]. النوع الثاني من البنى البلورية المكعبة للألومينايدات هي البنية البلورية المسماة ببنية B₂ أو ما يطلق عليها بنية (cP₂) أو (CsCl) نسبةً إلى المركب كلوريد السيزيوم ، وهي للمركبات شبه المعدنية ألومينايد النيكل NiAl ، ألومينايد الكوبالت CoAl وألومينايد الحديد FeAl موضحة في الشكلين (١-

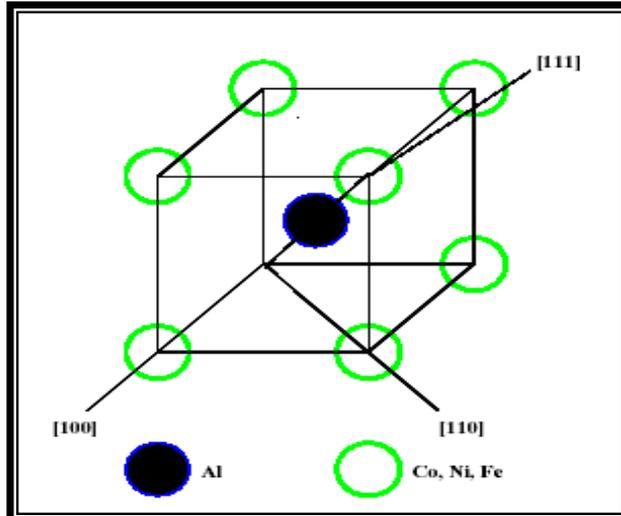
الفصل الثاني الجزء النظري

(٢) و (٢-٢). هذه البنية مشتقة من البنية البلورية المكعبة المتمركزة الجسم (bcc). إن وحدة الخلية لهذه البنية تحتوي على ذرتين وهو العدد نفسه الموجود في بنية (bcc). إنها في الواقع تتألف من خليتين مكعبتين أوليتين متداخلتين كما مبين في الشكل (٢-٣) ، إذ تحتل ذرات الألمنيوم إحدى زوايا وحدتي الخليتين المتداخلتين ، بينما تحتل ذرات النيكل أو الكوبالت أو الحديد زوايا المكعب لوحدة الخلية الثانية [١]. وبالعودة إلى الشكل (١-٢) نرى أن كل ذرة من ذرات هذا المكعب تمتلك عدداً تناسقياً (Coordination Number) مساوياً لثمانية (يعرف العدد التناسقي بأنه عدد الذرات المجاورة الأقرب لكل ذرة داخل الشبكة الحيزية ويرمز له بالرمز (CN)) [٢٩,٣٠]. ويمكن توضيح العدد التناسقي بما يأتي :

إن ذرة الألمنيوم الموجودة في مركز المكعب تكون محاطة بثمان ذرات من ذرات المعدن الانتقالي (النيكل أو الكوبالت أو الحديد). هذه الذرات الثمان هي الذرات المجاورة لذرة الألمنيوم والأقرب إليها. كذلك فإن كل ذرة من ذرات المعدن الانتقالي هي الأخرى تكون محاطة بثمان ذرات هي الذرات المجاورة الأقرب إليها ولذلك فإن العدد التناسقي للبنية البلورية B٢ يساوي ثمانية. ومما تجدر الإشارة إليه أن هذه البنية أي بنية B٢ تعتبر البنية الأكثر شيوعاً بين البنى البلورية المنتظمة للمركبات شبه المعدنية. المركب شبه المعدني TiAl يمتلك النوع الثالث من البنى البلورية المنتظمة للألومينايدات وهي البنية المسماة L١. إذ تقع ذرات التيتانيوم عند الزوايا وعند الوجهين العلوي والسفلي لوحدة الخلية بينما ذرات الألمنيوم تقع فقط عند الأوجه الأربعة الأخرى لوحدة الخلية كما هو مبين في الشكل (١-٢).



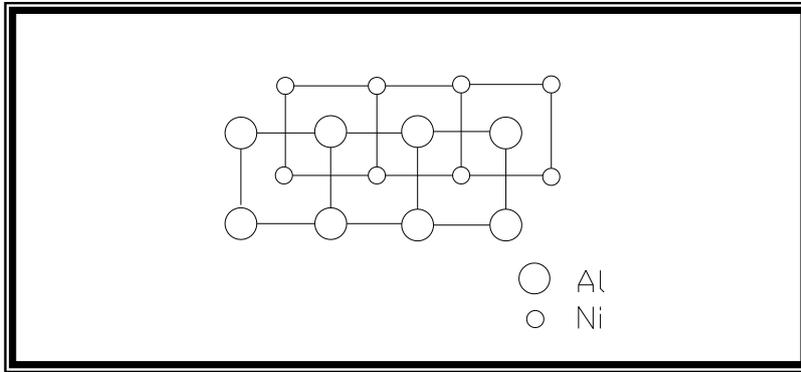
المكعبة المنتظمة للألومينايدات



شكل (١-٢) البنى البلورية

[٣١].

شكل (٢-٢) البنية البلورية المنتظمة B₂ [١].



شكل (٢-٣) خليتين مكعبتين بسيطتين متداخلتين [٢٨].

أما النوع الرابع والأخير من هذه البنى فهي البنية البلورية المكعبة المنتظمة D₀₃ أو ما يطلق عليها بنية (cF16) التي يمتلكها ألومينايد الحديد Fe₃Al والموضحة في الشكل (٢-١). إن وحدة الخلية لهذه البنية تحتوي على ثمان خلايا ثانوية (Subcells) مكعبة متمركزة الجسم (bcc) تشكل أربع شبكات حيزية متداخلة مكعبة متمركزة الوجه (fcc). في كل خلية ثانوية تحتل ذرات الحديد زواياها ، وكل واحدة من هذه الذرات تشترك مع ثمان خلايا ثانوية مجاورة ، أي ذرة حديد واحدة لكل خلية ثانوية. وبما إن هنالك ثمان خلايا ثانوية فان الذرات الواقعة في زوايا هذه الخلايا تعطي ثمان ذرات حديد لكل وحدة خلية ، يضاف إليها أربع ذرات حديد تحتل زوايا أربع خلايا ثانوية. أي أن هنالك اثنتي عشرة ذرة حديد في وحدة خلية البنية البلورية D₀₃ إضافة لأربع ذرات ألومنيوم تحتل أيضاً زوايا أربع ثانوية ، ولذلك فان العدد الكلي للذرات لكل وحدة خلية يصبح مساوياً إلى ستة عشر [٢٧].

ومما تجدر الإشارة إليه أن المركب شبه المعدني Fe₃Al يعاني تحولاً في البنية البلورية من البنية البلورية D₀₃ إلى البنية البلورية B₂ فوق درجة حرارة التنظيم الحرجة الخاصة بهذا المركب وهي ٥٤١°C.

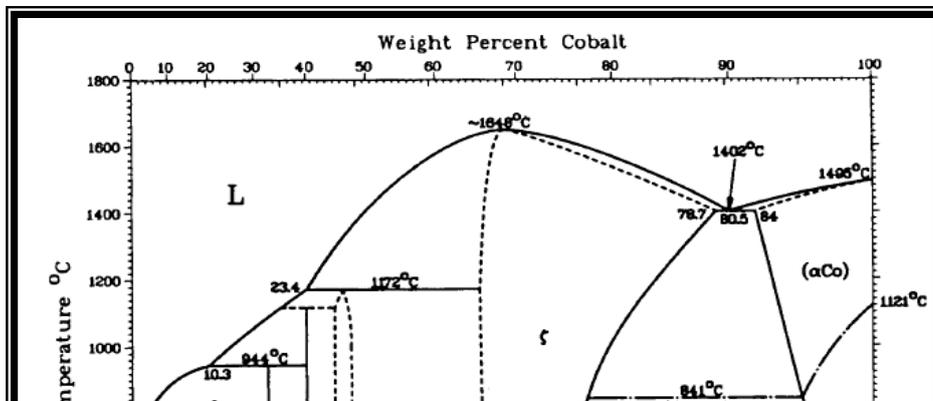
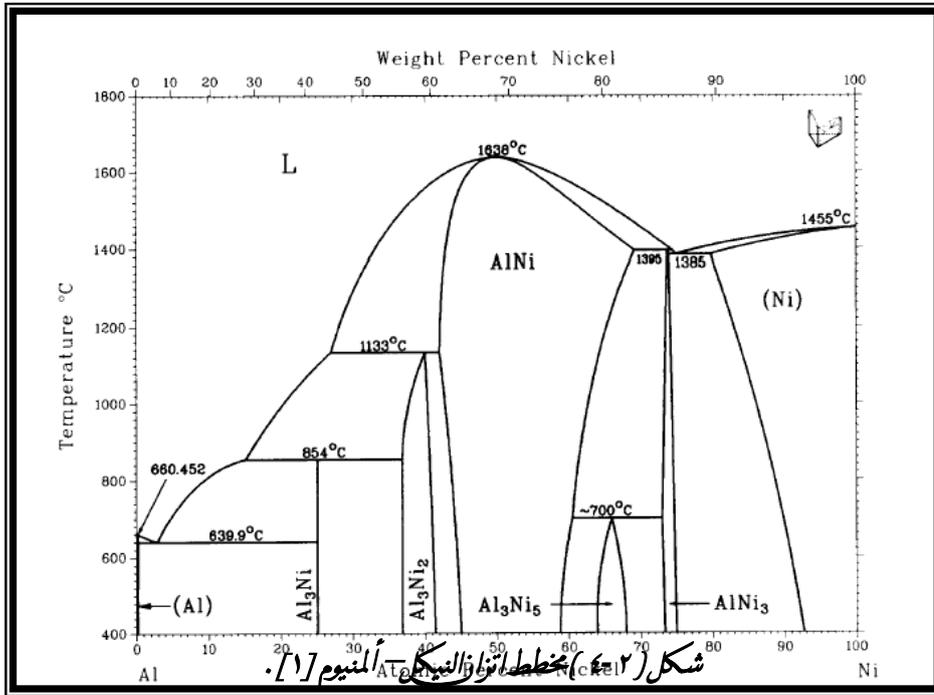
ألومينايدات المعادن ذات البنية المجهرية B₂ B₂ Aluminides

٣- ٢

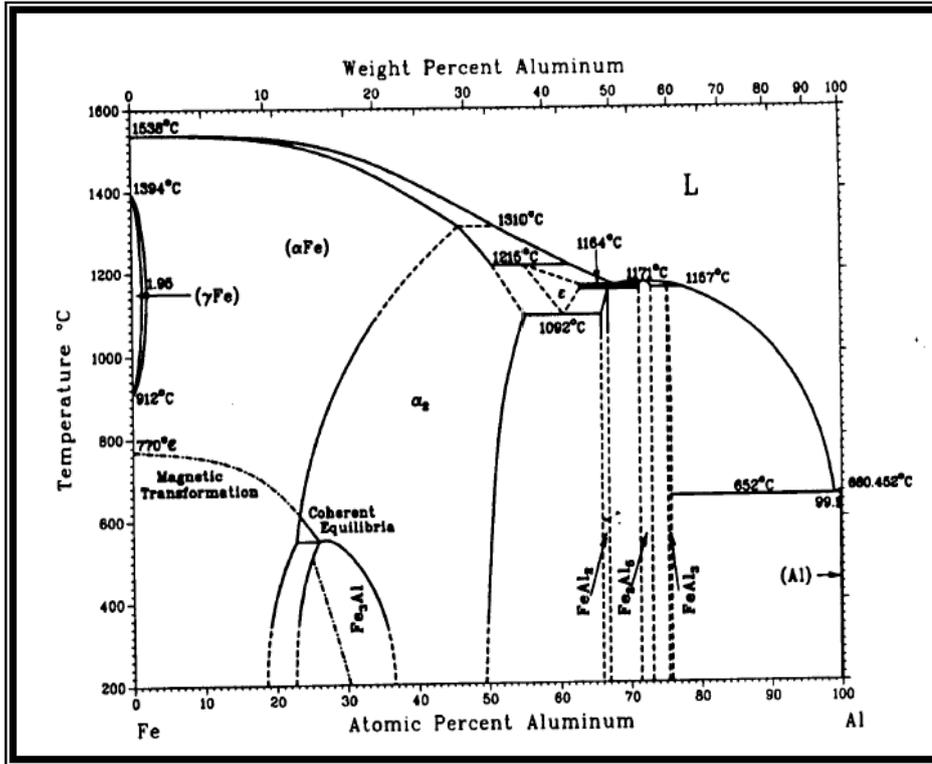
الدوري ذات البنية المجهرية B₂ ثلاث هي ألومينايدات الكوبالت CoAl وألومينايد النيكل NiAl وألومينايد الحديد FeAl. هذه الألومينايدات الثلاث هي من ضمن مجموعة المركبات شبه المعدنية ذات البنية

الفصل الثاني الجزء النظري

المجهرية B2 المستمر بحثها في الوقت الحاضر بشكل موسع لكي يتم استخدامها في التطبيقات الهيكلية التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية والأوساط القاسية. مخططات الاتزان الحراري لهذه الألومينايدات لاتزال تحت الدراسة وهي مبينة في الأشكال (٢-٤) و (٢-٥) و (٢-٦). فمن حقول الطور المفرد الموجودة في مخططات الاتزان الحراري هذه يمكن ملاحظة أن هذه الألومينايدات تمتلك مدىً واسعاً من التراكيب ، حيث إن الطور المفرد NiAl يمتد من (٤٥.٩% at Ni) إلى (٦٠% at Ni) ، و طور FeAl يمتد من حوالي (٣٥% at Al) إلى (٥٢% at Al). وتجدر الملاحظة أن هذه الألومينايدات الثلاث تبدي نقصاناً في طاقة التنظيم (Ordering Energy) وزيادة في المطيلية ابتداءً من ألومينايد الكوبالت CoAl ، وانتهاءً بألومينايد الحديد FeAl ، و تمتلك كثافات واطئة ودرجات انصهار أعلى من تلك التي تمتلكها السبائك ذات الأساس نيكل ، إذ ينصهر ألومينايد النيكل NiAl عند 1638°C وألومينايد الكوبالت عند 1648°C بينما يمتلك ألومينايد الحديد FeAl درجة انصهار تقل مع زيادة محتوى الألمنيوم لتصل إلى حوالي 1250°C عند (٥٢% at Al). بالإضافة إلى امتلاكها درجة حرارة تحول من السلوك المطيلي إلى الهش أعلى من تلك التي تمتلكها المعادن ذات البنية المكعبة المتمركزة الجسم (bcc) حيث أن الكسر الهش يحصل بشكل كبير لألومينايدات المعادن ذات البنية المجهرية B2 عند درجة حرارة الغرفة [١].



شكل (٢-٥) مخطط اتزان الكوبالت-المنيوم [١].



شكل (٢-٦) مخطط اتزان الحديد-المنيوم [١].

الكسر في الألومينايدات ذات البنية المجهرية B₂ Fracture in B₂ Aluminides

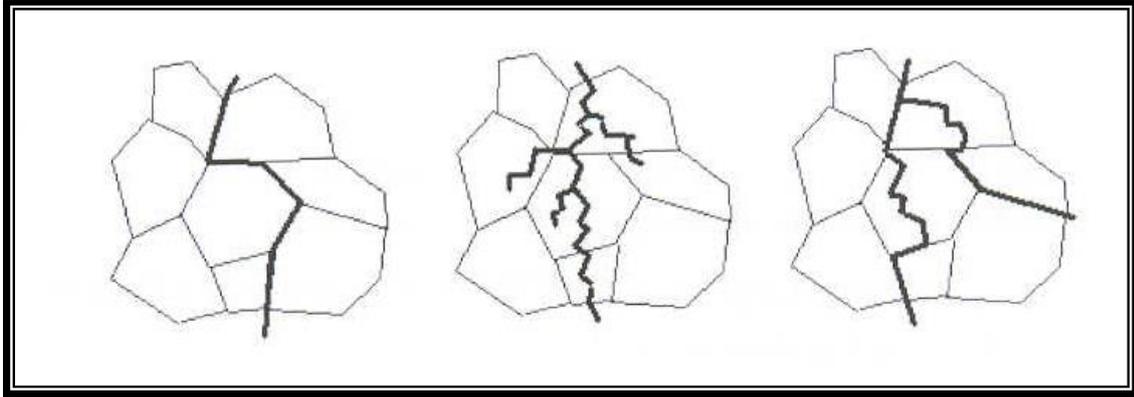
٢-٣-١

المركبات ذات البنية المجهرية B₂ تمتلك ذرتين مختلفتين تقعان عند الأماكن المخصصة لها في الشبكة الحيزية ، حيث تمتلك أصرة معدنية بين الذرات المتشابهة وأصرة تساهمية قوية بين الذرات غير

المتشابهة التي هي السبب في إمتلاكها صلادة عالية مما يجعلها أكثر عرضةً للتشقق عند المستويات المفضلة للكسر (Preferred planes). إن الألومينايدات ذات البنية المجهرية B₂ تمتلك ثلاثة أشكال للكسر هي : الكسر ما بين البلورات (Intergranular Fracture) ، والكسر عبر البلورات (Transgranular Fracture) والكسر المزدوج (الخليط من النوعين الأوليين) كما هو مبين في الشكل (٧-٢). إن هذه الألومينايدات تمتلك مقاومة كسر (Fracture Resistance) مختلفة عند درجة حرارة الغرفة وقد وجد أن ألومينايد الحديد FeAl يمتلك مقاومة الكسر الأعلى وألومينايد الكوبالت CoAl الأدنى [٣٢, ٣٣].

يعزى سبب مقاومة الكسر العالية لألومينايد الحديد FeAl عند درجة حرارة الغرفة إلى امتلاكه طاقة تنظيم منخفضة مما يؤدي إلى تعرضه للتشقق على المستوى (١٠٠) ، كما في المعادن ذات البنية المجهرية المكعبة المتمركزة الجسم (bcc) ، بينما يمتلك ألومينايد الكوبالت CoAl طاقة تنظيم عالية تجعل مقاومته للكسر منخفضة.

أما ألومينايد النيكل NiAl فإنه يمتلك النوعين الأوليين من الكسر ، فعند درجة حرارة الغرفة فإن الكسر السائد فيه هو الكسر ما بين الحبيبات ثم يتغير إلى الكسر عبر الحبيبات عند حوالي (٤٠٠- ٥٠٠°C) [١, ٣٤, ٣٥].



شكل (٧-٢) أشكال الكسر في الألومينايدات ذات البنية المجهرية B₂: الكسر ما بين البلورات (اليسار)، الكسر عبر البلورات (الوسط)، الكسر المزدوج (اليمن) [٣٣].

تأثيرات الوسط

Environmental Effect

٢-٣-٢

التي تتطلب أوساط قاسية ومقاومة جداً للتآكل والأملاح (Salts) والتآكل الجوي (Air corrosion) عند درجات الحرارة العالية من دون تعرضها لأية تغييرات في بنيتها المجهرية. لكن تقصف الوسط (Environmental Embrittlement) يعتبر السبب الرئيسي لانخفاض مطيلية معظم المركبات شبه المعدنية ذات البنية المجهرية B₂ عند درجة حرارة الغرفة.

لقد وجد بأن ألومينايدات المعادن ذات البنية المجهرية B₂ تبدي انفعالات متزايدة عندما يتم اختبارها في جو من الهيدروجين أو الأوكسجين أو في جو مفرغ من الهواء ، لكنها تظهر استجابة منخفضة (مطيلية أقل) عندما يتم اختبارها في الهواء بسبب وجود الهيدروجين الذي يؤدي إلى حصول التقصف خاصة في ألومينايد الحديد FeAl. حيث أظهرت الدراسات بأن ألومينايد الحديد FeAl يمتلك مطيلية منخفضة جداً بسبب حصول تقصف الهيدروجين عن طريق الرطوبة الموجودة في الهواء ، إذ بينت تلك الدراسات بأن ألومينايد الحديد FeAl ذي نسبة ألمنيوم (٣٦.٥% at) يمتلك مطيلية بحدود

(٢.٢%) في الهواء و (٥.٤%) في الجو المفرغ من الهواء و (١٧.٦%) في جو من الأوكسجين الجاف (Dry oxygen) [٣٦].

إن تقصف الوسط يحدث بواسطة التفاعل الكيميائي الآتي [٢١] :



حيث أن تفاعل بخار الماء الموجود في الهواء مع ذرات الألمنيوم عند رؤوس الشقوق Crack tips يؤدي إلى حصول التقصف بسبب تكوين الهيدروجين الذري الذي يتغلغل داخل رؤوس الشقوق . كما أظهرت تلك الدراسات أيضاً بأن الهيدروجين الجزئي لا يؤدي إلى حصول تقصف شديد وذلك بسبب نشاطيته المنخفضة مقارنةً بالهيدروجين الذري الناتج من التفاعل مع بخار الماء [١,٣٦].

لقد تم استخدام طرق عديدة لغرض تحسين مطيلية ألومينايدات المعادن ذات البنية المجهرية B٢ عند درجة حرارة الغرفة. ومن هذه الطرق هي طريقة تكوين طبقات أوكسيدية واقية على سطوح تلك الألومينايدات بواسطة إضافة الكروم أو بالتأكسد المسبق (Preoxidizing) في الهواء. كذلك طريقة تنعيم البنية الحبيبية (Refinement of Grain Structure) أما بواسطة المعاملة الحرارية – الميكانيكية (Thermo – mechanical treatment) أو التقوية بجزئيات الطور الثاني (Second phase particals –) كإضافة الزركونيوم Zr واليورون B والكربون C لتكوين كاربيدات وبوريدات الزركونيوم [٣٦].

ألومينايدات النيكل Nickel Aluminides

٤- ٢

مع الألمنيوم بسبب مختلفه ليحونا خمسة مركبات سبه معدنيه هي Ni_2Al_3 ، Ni_3Al ، $NiAl$ ، Ni_5Al_8 و $NiAl_3$ يطلق عليها جميعاً ألومينايدات النيكل (Nickel Aluminides) كما هو مبين في الشكل (٤-٢) . إن ألومينايدات النيكل تمتاز بعدة ميزات تجعلها واسعة الاستخدام كمواد هيكلية للتطبيقات التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية والأوساط القاسية ، فهي تمتلك كثافة منخفضة ، جساءة ومقاومة جيدتين في درجات الحرارة العالية ومقاومة تأكسد وتآكل فائقتين. لكن على الرغم من كل هذه الميزات فإن التطبيق العملي لهذه المواد شبه المعدنية ما يزال محدوداً وذلك بسبب هشاشيتها العالية وممانتها ومطيليتها المنخفضتين عند درجات الحرارة الواطئة وبالتحديد عند درجة حرارة الغرفة [٣٧,٣٨]. ولقد أجريت العديد من الدراسات في السنوات القليلة الماضية لغرض تحسين متانة ومطيلية هذه المواد. الجدول (١-٢) يبين النسب الوزنية المئوية (Weight Percentage) للنيكل في تلك المركبات شبه المعدنية ، حيث يعد طور $NiAl$ و Ni_3Al هما الطوران الرئيسيان في نظام النيكل – ألمنيوم الأكثر أهمية من حيث الاستخدامات الهندسية [٣].

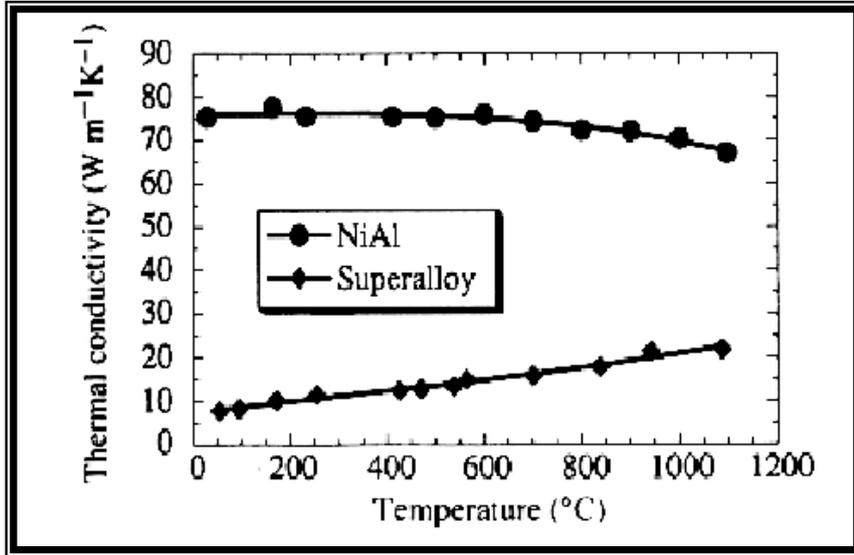
جدول (١-٢) النسب الوزنية المئوية للنيكل في ألومينايدات النيكل شبه المعدنية .

Compound	Wt% Ni
$NiAl_3$	٢٥
Ni_2Al_3	٥٦ - ٦٠
$NiAl$	٦٣ - ٧٦
Ni_5Al_8	٧٩ - ٨٣
Ni_3Al	٨٠ - ٨٨

ألومينايد النيكل (NiAl) Nickel Aluminide (NiAl)

١- ٤- ٢

ألومينايد النيكل NiAl هو أحد ألومينايدات المعادن الانتقالية شبه المعدنية الثلاث ذات البنية المجرية B2 والطور الأكثر أهمية في نظام النيكل - ألومنيوم ، حيث تتراوح نسبة النيكل فيه ما بين (٤٥-٦٠% at Ni) أي حوالي (٦٣-٧٦%wt Ni). ولقد أجريت العديد من البحوث على ألومينايد النيكل NiAl ، إلا أن البحوث التي أجريت حول هذه المادة شبه المعدنية منذ عام ١٩٩٠م أدت إلى بروزه كمادة هيكلياً للتطبيقات التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية والأوساط العنيفة وذلك بسبب الخواص الميكانيكية والفيزيائية الفريدة التي يمتلكها والتي جعلته يصبح منافساً وبديلاً للسبائك التقليدية ذات الأساس نيكل المستعملة حالياً في تلك الأوساط [٣٩,٤٠,٤١,٤٢] ، حيث يمتلك درجة انصهار عالية (١٦٣٨°C) أكثر بحوالي ٢٠٠°C من تلك التي للسبائك الفائقة ذات الأساس نيكل وكثافة منخفضة (٥.٩g/cm³) تساوي تقريباً ٢/٣ من تلك التي للسبائك الفائقة ذات الأساس نيكل [٣٩,٤٠,٤١,٤٢,٤٣] ، ومقاومة تأكسد وتآكل فائقتين جداً بسبب كمية الألومنيوم العالية التي يحتويها [٤١] ، بالإضافة إلى امتلاكه موصلية حرارية عالية (٤٠-٨٠WmK⁻¹) أكثر بحوالي (٤-٨) مرات لتلك التي تمتلكها السبائك الفائقة ذات الأساس نيكل والتي تعتمد على درجة الحرارة والتركيب الكيميائي . الشكل (٨-٢) يبين هذه المقارنة للموصلية الحرارية لبورة NiAl مفردة مع السبائك الفائقة ذات الأساس نيكل [١].



مقارنة (٢)

شكل (٨)

الموصلية الحرارية كدالة لدرجة الحرارة بين بلورة NiAl مفردة والسبائك الفائقة ذات الأساس نيكل [١].

وعلى الرغم من كل تلك الفوائد إلا أن هنالك مشكلتان رئيسيتان تحدان من تطبيقات ألومينايد النيكل NiAl. المشكلة الأولى هي مطيلته المنخفضة وهشاشيته العالية عند درجة حرارة الغرفة وذلك بسبب سلوك الفشل بالكسر الهش ما بين البلورات ومقاومة الكسر الضعيفة للتشقق ومتانة كسره المنخفضة عند تلك الدرجة الحرارية. إن هشاشية الحدود البلورية ظاهرة طبيعية من المحتمل إرتباطها بمقاومة التماسك للحدود البلورية. أما المشكلة الثانية فهي مقاومته المنخفضة للزحف (Creep) عند درجات حرارة الخدمة (١٠٢٧-١١٢٧°C) [٢٤,٢٥,٢٧]. حيث يعاني ألومينايد النيكل NiAl من ضعف متانة الكسر (Fracture Toughness) عند درجة حرارة الغرفة التي تبلغ قيمتها المثالية بحدود (٥MPa√m) ، بالإضافة لذلك فإن نسبة الإستطالة له عند درجة حرارة الغرفة بحدود (١-٢%) [٤١].

لقد تم إجراء محاولات عديدة لتخفيف مشكلة الهشاشية في درجة حرارة الغرفة لألومينايد النيكل NiAl باستعمال بلورات مفردة من هذا المركب شبه المعدني وبالتسبيك المجهري (Microalloying)

مع البورون. إن مشكلة المطيلية المنخفضة لألومينايد النيكل NiAl عند درجة حرارة الغرفة تم دراستها حيث بينت الدراسات الحديثة إن هذا المركب شبه المعدني يبدي مطيلية عالية عند احتواءه على الشوائب (Impurity) وعند إجراء المعاملة الحرارية (Heat Treatment) له وعن طريق تصغير الحجم الحبيبي للبلورات (Grain Refinement) وكذلك بإضافة عناصر سبك إليه مثل البورون والكروم والحديد والموليبدنوم إلى ألومينايد النيكل NiAl [٤٢،٤٤]. أما مقاومة الزحف فقد تم تحسينها عن طريق دمج طور ثاني في أرضية ألومينايد النيكل NiAl وهو طور Ni_2AlTi حيث أدت تلك العملية إلى تحسين مقاومة الزحف لتصبح مقاربة لمقاومة زحف سبيكة MarM٢٠٠ وهي إحدى أنواع السبائك الفائقة ذات الأساس نيكل كما هو مبين في الجدول (٢-٢) [٣].

جدول (٢-٢) مقاومة الزحف لألومينايدات النيكل (درجة الحرارة لزحف الحالة المستقرة $10^{-5} s^{-1}$ تحت إجهاد $100 MPa$) [٣].

Material	Temperature (°C)
NiAl	٦٠٠
Ni_2AlTi	١٠٥٠
Mar M٢٠٠	١١٠٠

الإستقرارية والخواص الفيزيائية والميكانيكية لطور NiAl The Stability, Phys. and Mech. Prop. of NiAl

٢ - ٤ - ١ - ١

المهم التأكد من درجة التنظيم (Tc) عند درجات الحرارة العالية بسبب أن معظم الخواص الميكانيكية والفيزيائية يتم اعتمادها بواسطة درجة التنظيم لهذا المركب.

يعتبر ألومينايد النيكل NiAl واحداً من أكثر المركبات شبه المعدنية ذات البنية المجهريية B٢ الأعلى سالبية من حيث حرارة التكوين (Heat of Formation) [٤٥]. ولقد وجد بأن حرارة التكوين لهذا المركب تعتمد على التركيب الكيميائي وإن القيمة العظمى لحرارة التكوين هذه يمكن بلوغها للتركيب النقي (Stoichiometric Composition) الذي يتضمن استقرارية فائقة جداً لهذا المركب شبه المعدني. إن التنظيم موجود في ألومينايد النيكل NiAl لغاية درجة حرارة انصهار هذا المركب ولا يوجد أي دليل أو برهان لحد الآن يقترح حصول تحول في بنية هذا المركب من البنية البلورية المنتظمة إلى البنية البلورية غير المنتظمة [٤٦].

إن العامل الرئيسي المستخدم في تحديد درجة التنظيم لألومينايد النيكل NiAl هو عامل درجة اللانظامية الذاتية (Degree of intrinsic disorder) الذي يرمز له بالرمز (α) والذي يمكن تعريفه بأنه النسبة بين عدد الذرات غير المنتظمة لنوع واحد إلى العدد الكلي للذرات داخل الشبكة الحيزية لبلورة نقية [٣٠]. وقد تم حساب قيمة هذا العامل لألومينايد النيكل NiAl عند درجة حرارة (١٢٧٣K) باستخدام نظرية شتوتكي - واغنر (Wanger - Schootky Theory) ووجد بأنها صغيرة جداً تتراوح ما بين (9×10^{-6} - 4×10^{-4}) [٤٦].

يتميز ألومينايد النيكل NiAl بأن هنالك صعوبة كبيرة جداً لتحويل بنيته البلورية المنتظمة إلى بنية بلورية غير منتظمة ، وذلك بسبب مدى التركيب الكيميائي الكبير الذي يمتلكه كما هو مبين في الشكل (٤-٢) والذي يفوق كافة المركبات شبه المعدنية الأخرى ذات البنية المجهريية B٢ وهو ما يجعل بنية ألومينايد النيكل NiAl مستقرة جداً ، حيث وجد انه من غير الممكن إيقاف أو منع حصول التنظيم في ألومينايد النيكل NiAl تحت ظروف التبريد السريع ($10^4 K/sec$) كذلك فإنه من غير الممكن أيضاً تحويل بنيته البلورية المنتظمة إلى بنية بلورية غير منتظمة حتى بواسطة القصف الأيوني الثقيل (Heavy Ion Bombardment) عند درجات الحرارة المنخفضة (١٥K). إن هذا الاستقرار

الإشعاعي (Radiation Stability) لهذا المركب شبه المعدني يرشحه للعمل في التطبيقات النووية (Nuclear Applications) [٤٥].

لقد وجد أن خواص المرونة لبلورات مفردة من ألومينايد النيكل NiAl مقارنة للبلورات المتعددة (Polycrystals) من هذا المركب ، إذ لوحظ بأن معامل المرونة لهذا المركب شبه المعدني حساس جداً للمعاملة الحرارية لكن ليس للتركيب الكيميائي. إن معامل المرونة لهذا المركب عند درجة حرارة الغرفة هو (١٩٣MPa) وقد وجد بأن معامل المرونة هذا يتناقص تقريباً بشكل خطي مع زيادة درجة الحرارة [٤٥].

الخواص الأخرى لهذا المركب مثل معامل التمدد الحراري والمقاومية الكهربائية والحرارية تم تحديدها كدالة لدرجة الحرارة ، حيث وجد بأن سلوك التمدد الحراري لألومينايد النيكل NiAl يعتمد بقوة على درجة الحرارة. إن مقاومة هذا المركب عند درجات الحرارة المنخفضة تم تحديدها في مدى درجات الحرارة ما بين (٢٩٨-٤.٢ K). الجدول (٢-٣) يبين بعض الخواص الميكانيكية والفيزيائية لألومينايد النيكل NiAl [٤٥].

جدول (٢-٣) يوضح بعض الخواص الفيزيائية والميكانيكية لألومينايد النيكل NiAl [٤٥].

Property	NiAl
Ductility (%)	٠ - ٢
Intergranular fracture (%)	٧٠
Microhardness HV (kg/mm ^٢)	٣٧٩.٣
Transition temperature (°C)	٧٠٠
Electrical resistivity (١٠ ^{-٨} Ωm)	٨ - ١٠
Thermal conductivity (W/m.K)	٧٦
Thermal expansion coeff.(١٠ ^{-٦} /K ^{-١})	١٣.٢
Lattice parameter (nm)	٠.٢٨٨٧
Specific heat (j/g.K)	٠.٦٤
Bonding	Covalent/metallic

التعتيق الانفعالي لألومينايد النيكل NiAl Strain Aging of NiAl

٢-١-٤-٢

ألومينايد النيكل NiAl في الاتجاه < ١١٠ > بالإمكان تحسينها بواسطة المعاملات الحرارية المسيطر عليها. هذه الدراسات اقترحت أن سبب انخفاض المطيلية والمتانة عند درجة حرارة الغرفة لهذه البلورات يعزى إلى تقصف التعتيق الانفعالي (Strain-aging Embrittlement) [١]. إن تقصف التعتيق الانفعالي لألومينايد النيكل NiAl يحدث بسبب ذوبان الكربون والنتروجين وإنتشارهما إلى داخل البنية البلورية وبالتالي إنتاج دقائق غير مترسبة بشكل نهائي خلال التبريد البطيء تؤدي إلى حصول التقصف بسبب تقييدها لحركة الإنخلاعات. وبالاعتماد على ميكانيكية هذا التقصف فإنه بالإمكان تحسين مقاومة الكسر لبلورات ألومينايد النيكل NiAl أما بواسطة اختزال محتوى الشوائب البينية (الكربون و النتروجين) أو عن طريق إضافة عناصر سبك إلى ألومينايد النيكل NiAl مثل البورون والتيتانيوم والفناديوم التي تتفاعل بدورها مع ذرات الكربون والنتروجين المذابة وتكون كاربيدات ونتريدات مستقرة.

تأثير عناصر السبك Effect of Alloying Elements

٣-٤-٢

تضاف عناصر السبك إلى ألومينايد النيكل NiAl بشكل رئيسي لغرض تحسين مئانه الكسر والمطيلية عند درجة حرارة الغرفة وكذلك لزيادة مقاومة التآكل ومقاومة التآكل عن طريق تكوين طبقة حامية من أوكسيد الألمنيوم Al_2O_3 على سطحه. وتشمل عناصر السبك هذه:

البورون (B) : يعد البورون من أهم عناصر السبك التي تضاف إلى ألومينايد النيكل NiAl إذ يعمل على زيادة مطيئته عند درجة حرارة الغرفة وذلك بواسطة انزاله على طول الحدود البلورية لهذا المركب ، بالإضافة لذلك فإنه يزيد من تماسكه ويعمل على تصغير الحجم الحبيبي ويخفض من امتداد الكسر ما بين الحبيبات من حوالي ٧٠% إلى حوالي ٥% [٢٣,٤٤].

الكروم (Cr) : وجود الكروم في ألومينايد النيكل NiAl على الأغلب هو لزيادة المقاومة بسبب تكوينه يوتكتك مع ألومينايد النيكل NiAl شكل (٩-٢) وكذلك لخفض نسبة الألمنيوم الحرجة لتكوين أوكسيد الألمنيوم Al_2O_3 [١٧,٢٣,٤٤,٤٧].

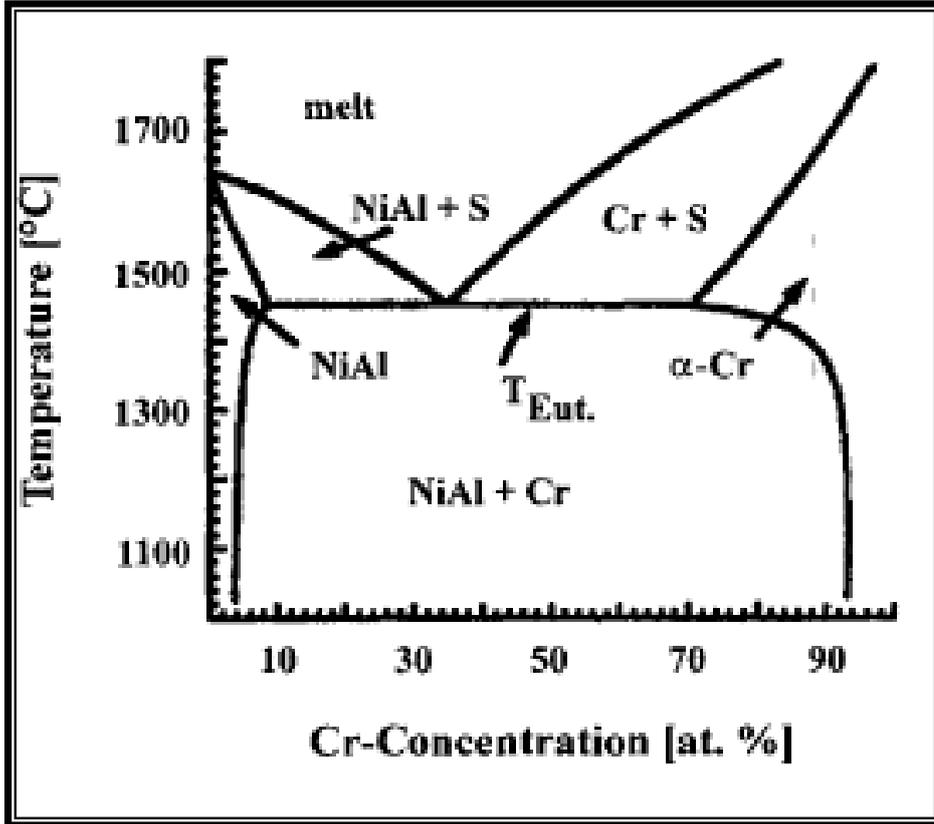
الحديد (Fe) : يعمل الحديد على تحسين مطيلية ألومينايد النيكل NiAl عند درجة حرارة الغرفة وكذلك يعمل على تصغير الحجم الحبيبي [٢٤,٤٤].

الموليبدينوم (Mo) : يؤدي الموليبدينوم إلى زيادة متانة الكسر لألومينايد النيكل NiAl عند درجة حرارة الغرفة من حوالي ($٥MPa\sqrt{m}$) إلى حوالي ($١٦.٧MPa\sqrt{m}$) ، بالإضافة إلى زيادته لمقاومة الكلال وتصغير الحجم الحبيبي [٤١,٤٤].

السليكون (Si) : للسليكون تأثير فعال ضد التآكل الحار وكذلك فإنه يشجع على تكوين أوكسيد الألمنيوم Al_2O_3 [١٧].

البلاتين (Pt) : يعمل البلاتين على تأخير آلية تحول ألومينايد النيكل NiAl إلى ألومينايد النيكل Ni_3Al وبذلك يحسن من مقاومة التآكل عند درجات الحرارة العالية [١٧,٤٨].

اللانثانوم (La) : تؤدي إضافة اللانثانوم إلى زيادة مطيلية ألومينايد النيكل NiAl عند درجة حرارة الغرفة وتصغير الحجم الحبيبي ، وكذلك فإنه يخفض من امتداد الكسر ما بين الحبيبات من حوالي ٧٠% إلى حوالي ٣% ويقلل من درجة حرارة التحول من السلوك المطيلي إلى الهش (DBTT) من حوالي $٧٠٠^{\circ}C$ إلى حوالي $٤٠٠^{\circ}C$ [٤٤].



(١-٢)

اتزان

النیکل

شكل

مخطط

ألومينايد

NiAl - الكروم [٤٧].

ألومينايد النيكل (Ni_3Al) Nickel Aluminide (Ni_3Al)

٢-٤-٢

ألومينايد النيكل Ni_3Al هو الشكل السائد من حيث الأهمية بعد ألومينايد النيكل $NiAl$ في نظام النيكل-ألومنيوم الذي يمتلك البنية البلورية المنتظمة L_{12} وتتراوح نسبة النيكل فيه ما بين (٧٤-٧٦%at) (Ni_{80-88} wt) أي حوالي (٨٠-٨٨%wt Ni). الصفة الفريدة التي يمتلكها هذا المركب شبه المعدني هو أن مقاومته للخضوع لتضاعف إلى حوالي (٩٠٠MPa) عند ارتفاع درجة الحرارة إلى حوالي (٨٠٠°C ، كذلك فإن درجة انصهاره عالية (١٣٨٥°C) وله معامل مرونة بمقدار (١٧٨GPa) وكثافة بمقدار (٧.٥g/cm³) ومقاومة تأكسد أقل من تلك التي لألومينايد النيكل $NiAl$ [٣, ٢٧]. كل هذه الصفات جعلت ألومينايد النيكل Ni_3Al يبرز أيضاً كمادة هيكليّة للتطبيقات التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية والأوساط العنيفة المشابهة لتطبيقات ألومينايد النيكل $NiAl$. لكن المشكلة الرئيسية التي تحد من تطبيقاته هي هشاشيته العالية عند درجة حرارة الغرفة للمركب المتعدد البلورات والتي يمكن التغلب عليها بإضافة كميات صغيرة من البورون لانتاج (٠.٠٢%wt) على عكس بلورات Ni_3Al المفردة التي تمتلك مطيلية عالية جداً [٣٧].

طرق تصنيع المادة المركبة ($NiAl / Al_2O_3$) Fabrication Methods of ($NiAl / Al_2O_3$)

٥-٢

تتطلب عملية تصنيع المادة المركبة ذات الأساس من ألومينايد النيكل (NiAl / Al₂O₃) مرحلتين. المرحلة الأولى مرحلة إنتاج المركب شبه المعدني NiAl ، أما الثانية فيتم خلالها تصنيع المادة المركبة (NiAl / Al₂O₃).

إنتاج ألومينايد النيكل NiAl Production of NiAl

١-٥-٢

الألمنيوم العالي التي تمتلكها وبسبب الاختلاف الكبير بين درجتي إنصهار المعدنين الرئيسيين المكونين للسبيكة (النيكل والألمنيوم) ، حيث من الصعوبة تجنب فقدان الألمنيوم عند درجات الحرارة المطلوبة لصهر النيكل ، ولذا فإن طرق التصنيع التالية هي الطرق المناسبة والناجحة لإنتاج المركب شبه المعدني NiAl [٩] :

- ١- تقنية المساحيق Powder Technique.
- ٢- تقنية التسبيك الميكانيكي (Mechanical Alloying (MA).
- ٣- تقنية الدرجات الحرارية العالية المحفزة ذاتياً Self-Propagating High Temp. Synthesis.
- ٤- تقنية الانصهار الباعث للحرارة (Exo-melt) Exothermic Melting Process.
- ٥- تقنية السبك التفاعلي Reaction Casting Process.

تقنية المساحيق

Powder Technique

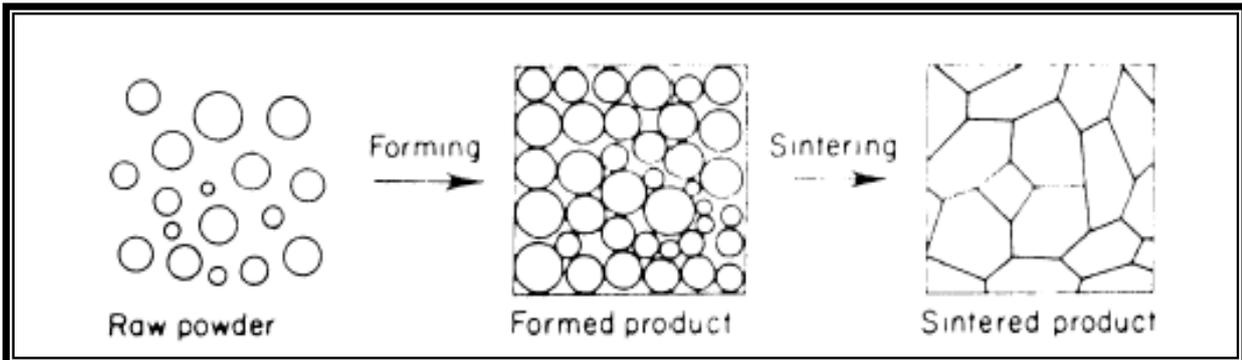
٢-١-٥-٢

المواد الأولية من دون عمليات صهر مباشرة وإندماجها معاً وتقويتها بواسطة التسخين (التليد). أستعملت هذه التقنية بصورة خاصة لإنتاج المواد السيراميكية والمركبات شبه المعدنية وبصورة جزئية في إنتاج المواد المعدنية (ميتالورجيا المساحيق Powder metallurgy) [٤٩].

إن تقنية المساحيق تتضمن أربعة مراحل رئيسية : [٥٠]

- ١- مرحلة تحضير المساحيق.
 - ٢- مرحلة مزج وإعداد المساحيق للعملية.
 - ٣- مرحلة كبس المسحوق إلى الشكل النهائي للمنتج.
 - ٤- مرحلة تسخين أو تليد الشكل الناتج من عملية الكبس في درجة حرارة عالية.
- إن التغييرات التي تحصل في البنية والتي تترافق خلال تقنية المساحيق مبينة في الشكل (١٠-٢).

شكل (١٠-٢) التغييرات التي تحصل في البنية خلال تقنية المساحيق [٤٩].



إن من أهم مميزات تقنية المساحيق هي إمكانية إنتاج بنى مجهرية متنوعة ، التي تتضمن السيطرة على الحجم الحبيبي وعلى التركيب الكيماوي للحدود البلورية وعلى حجم وشكل المسامات وعلى اندماج المساحيق غير المعدنية المشتته ضمن الأرضية المعدنية.... إلخ. وتعد هذه التقنية في وقتنا الحاضر من عمليات التصنيع الواسعة الانتشار والتي أصبحت من أكثر حقول علم المواد أهمية وإثارة. ولقد أدى الفهم والإدراك الجيد للعلاقات ما بين الإعداد والبنية والأداء العالي إلى نتائج جوهريه كتطوير المواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني (IMCs).

أما محددات هذه التقنية فهي أن عملية إنتاج قطع معدنية كبيرة تعتبر أقل كلفة بواسطة عمليات التصنيع الأخرى مقارنةً بتقنية المساحيق ، كذلك فإن لواحق عملية التشكيل (المكبس والقالب) تعد باهضة الثمن. لذلك فإن الفائدة الاقتصادية من تقنية المساحيق يمكن استثمارها فقط في حالة إنتاج كميات كبيرة من المنتجات

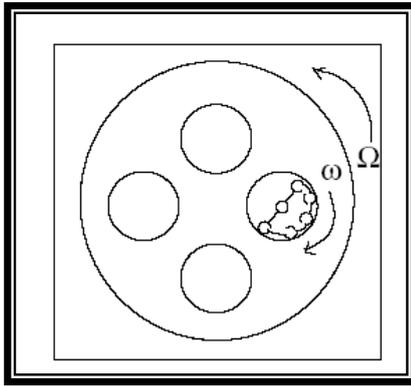
أولاً - مرحلة تحضير المساحيق (Preparation of Powders) :

لطريقة تحضير المساحيق تأثير بالغ في صفاته فهي تؤثر في : الصفات الكيماوية ومحتوى الشوائب ، شكل وحجم الجسيمات ، التوزيع الحجمي والأطوار البلورية للجسيمات كذلك في كثافة المسحوق وإنسيابيته. والطرق المعتمدة في تحضير المساحيق طرق ميكانيكية وفيزيائية وكيماوية [٤٩].

١- الطرق الميكانيكية (Mechanical Methods) :

تعتبر تقنية الطحن Milling التقنية الأقدم والأكثر إستعمالاً في تحضير المساحيق. وهي تقنية بسيطة يمكن تطبيقها لأنواع عديدة من المواد حيث أستعملت بصورة ناجحة في إنتاج المركبات شبه المعدنية. إن اختزال الحجم مهم يمكن إنجازه بالطحن ، وفي بعض الأحيان يعتبر زمن الطحن الطويل (١٠٠ ساعة أو أكثر) ضروري ومهم (إنتاج المركب NiAl بتقنية التسييك الميكانيكي (MA)).
هنالك أنواع عديدة من الطواحين أستعملت في تحضير مساحيق المركبات شبه المعدنية. والطواحين الأكثر شيوعاً تشمل [٤٩] : الطواحين الإهتزازية (Vibratory mills) ، طاحونة الكرات التدرجية (Tumbler ball mill) ، طاحونة الكرات الأتريتورية (البلى بالإحتكاك) (Attritor) ball mill) وطاحونة الكرات الكوكبية (Planetary ball mill).

تتألف طاحونة الكرات الكوكبية شكل (٢-١١) من قرص ساند وأربع حاويات توضع فيها المساحيق وكرات الطحن. إذ يحصل الطحن بفعل حركة الكرات على طول الطريق المتشابك بسبب دوران الحاويات والقرص الساند (Ω و ω) تتناظران سرع الدوران [٤٩]. تستخدم طاحونة الكرات الكوكبية بصورة خاصة لطحن وهي سبب إختيارنا لها في بحثنا الحالي.



الكوكبية [٤٩].

شكل (١١-٢) طاحونة الكرات

٢- الطرق الكيماوية (Chemical Methods) :

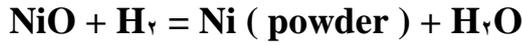
تستعمل الطرق الكيماوية في أغلب الأحيان لتحضير المساحيق المعدنية والمساحيق السيراميكية. ولهذه الطرق فوائد عدة منها التجانس كيميائي والإنتظام في الحجم الحبيبي وإختزال التلوث وإمكانية إنتاج مركبات.... إلخ. تتضمن الطرق الكيماوية أساليب عدة منها : الترسيب (Precipitation) ، التحلل الكيماوي (Chemical Decomposition) ، أسلوب الكربونيل (Carbonyl Methode) وإختزال الأكاسيد (Oxide Reduction).

أما بالنسبة للمركب شبه العدني NiAl فإنه يتم إنتاج مسحوقي العنصرين الرئيسيين المكونين له (النيكل والألمنيوم) بالأساليب الآتية [٤٩] :

أسلوب الكربونيل (Carbonyl Method) : يستعمل هذا الأسلوب لإنتاج مسحوق النيكل بواسطة الإنحلال الحراري لكربونيل النيكل؛ Ni(COO) كما يأتي [٤٩,٥٠] :



إختزال الأكاسيد (Oxide Reduction) : إن هذا الأسلوب يعتبر من أهم الطرق الكيماوية لإنتاج مسحوق النيكل ، إذ يتم تجليخ أكسيد النيكل إلى جسيمات ناعمة نسبياً ثم تخلط مع عامل مختزل مثل غاز الهيدروجين حيث يحدث التفاعل الآتي [٤٩,٥٠] :



التحليل الكهربائي لأوكسيد الألمنيوم (Electrolysis of Al₂O₃) : يستخلص الألمنيوم عن طريق التحليل الكهربائي لأوكسيد الألمنيوم Al₂O₃ المستخلص بطريقة باير التي سيتم ذكرها لاحقاً. يتم التحليل الكهربائي بخلط أو إذابة (١٥ %) من أوكسيد الألمنيوم مع (٨٥ %) من الكريولايت Na₂AlF₆ حيث يتكون إلكتروليت ذو درجة حرارة دون ٩٥٠°C. فعند اختراق التيار الكهربائي لمنصهر (الكريولايت وأوكسيد الألمنيوم) يترسب الألمنيوم الخام النقي [٥١].

٣- الطرق الفيزيائية (Physical Methods) :

تستعمل الطرق الفيزيائية بصورة خاصة في إنتاج مساحيق المعادن حيث تتضمن أساليب عدة منها : البرادة ، التذرية (Atomizing) ، القذف ، الرش (Shotting). تتميز المساحيق المصنعة بهذه الطرق بالخشونة العالية نسبياً ونادراً ماتستعمل في إنتاج القطع بطريقة تشكيل المساحيق بالضغط والحرارة [٤٩].

ثانياً – مرحلة المزج (Mixing) :

قبل كبس المساحيق وتلييدها لتصنيع المنتجات النهائية منها ، لابد من مزجها للحصول على المادة المطلوبة اعتماداً على النسب الوزنية التي تشتمل على المساحيق المعدنية أو السيراميكية أو شبه المعدنية والمواد الرابطة.

إن الهدف الأساس من هذه العملية هو الحصول على توزيع منتظم للحجوم المختلفة من المسحوق بسبب إختلاف شكل وحجم الدقائق المستخدمة في الخليط ، بالإضافة إلى إمكانية الوصول إلى قيم عالية للخواص الميكانيكية للجزء النهائي من خلال إختيار التقنية والنسب الملائمة للمزج [٥٠].

في حالة إنتاج المركب شبه المعدني NiAl يتم استخدام إحدى أنواع طواحين الكرات السالفة الذكر لغرض إجراء عملية المزج الرطب لمسحوقي النيكل والألمنيوم بعد تحضيرهما ولمدة تتراوح ما بين (٣- ١٢) ساعة وبنسب نيكل تتراوح ما بين (٦٣-٧٦ % wt Ni).

إن الغرض من استخدام المزج الرطب هو لمنع حصول عملية أكسدة لمسحوقي النيكل والألمنيوم بفعل الحرارة المتولدة من إحتكاك هذين المسحوقين. وتعتبر المحاليل العضوية (مثل كحول الأثيل والإيثانول والأسيتون والهكسان) الأكثر استخداماً في هذا المجال.

ثالثاً – مرحلة التشكيل (Forming) :

الخطوة التالية في تقنية المساحيق هي مرحلة كبس المساحيق التي يطلق عليها في أكثر الأحيان بمرحلة تشكيل المساحيق ، والتي تعتبر واحدة من أهم المراحل الأساسية والحاكمة ، لأنها تؤثر على كثافة الجزء الناتج وانتظامية التركيب الداخلي وإنعكاسها على الخواص النهائية بعد عملية التلييد.

إن الهدف من تشكيل المساحيق هو لإنتاج أجزاء نصف مصنعة تتميز بمتانة خضراء مناسبة وبما يسهل من عملية إخراج الجزء من القالب بعد عملية التشكيل ومناقلته من دون حدوث أي كسر أو تشققات ناتجة من الظروف غير الملائمة أثناء مرحلة التشكيل. عموماً يتم تلييد المنتج لينال شكله النهائي بعد

عملية التشكيل. في حالات خاصة يتم إجراء عمليتي التشكيل والتلييد في خطوة واحدة بإستخدام ضغط عالٍ وحرارة عالية في آن واحد (الكبس الساخن والكبس المتوازن على الساخن).

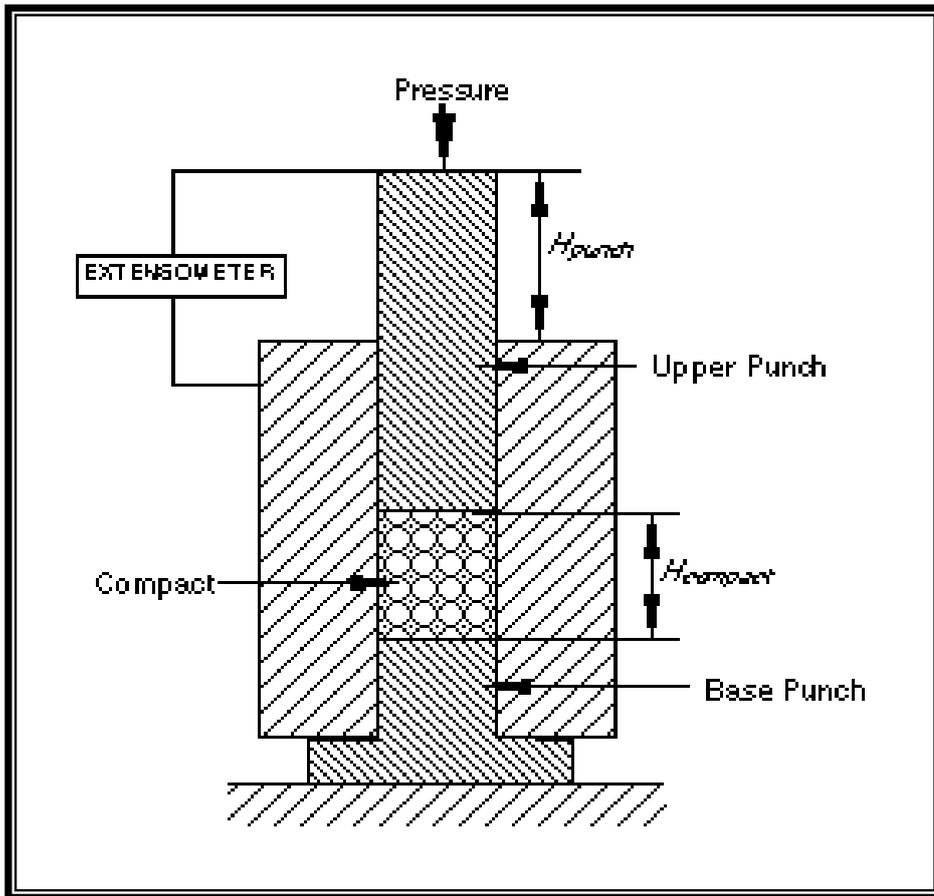
إن أهم التقنيات المستخدمة في تشكيل مزيج مسحوقي النيكل والألمنيوم على البارد تشمل [٤٩]:

- **الكبس بالقوالب (Die pressing)** : تعد هذه التقنية الأكثر إستعمالاً في تشكيل المساحيق المعدنية والسيراميكية على البارد. هذا الإسلوب من الكبس عبارة عن ملء فراغ قالب معدني معين بكمية محددة من المسحوق ثم تسليط الضغط عليه ومن ثم إخراج الجسم المكبوس من القالب.

ويمكن تقسيم هذه التقنية على نوعين ، النوع الأول هو أسلوب الكبس ذو الفعل المنفرد ، الشكل (٢-١٢) ، الذي يتصف بإمكانية تصنيع أجزاء ذات سمك قليل وشكل غير معقد حيث أن قوى الإحتكاك بين الجسيمات نفسها وبينها وبين جدران القالب قد تؤدي إلى قوة كبس غير متجانسة داخل القالب. وبذلك فإن المسحوق سوف لن يكبس إلى جسم متجانس الكثافة ، إذ إنه عالي الكثافة في الجزء العلوي من القالب بفعل وجود المكبس ، في حين إن كثافته تنخفض بالتدرج بإتجاه قاعدة القالب الثابتة.

لمعالجة هذه المشكلة صمم الأسلوب الثاني من الكبس ، وهو الكبس ذو الفعل المزدوج الذي يتم فيه كبس المسحوق بمكبسين علوي وسفلي في الوقت نفسه ، مما يقلل من تدرج الضغط في القالب وينتج مكبوساً أكثر تجانساً في الكثافة والخواص الأخرى.

إن تقنية الكبس بالقوالب تعتبر طريقة تشكيل إقتصادية ، لكن المحدد الرئيسي لها هو الكلفة العالية اللازمة لتصنيع القوالب. وعادةً ما يتم إستخدام مكابس ميكانيكية وهيدروليكية [٤٩].



(٢-١٢)

ذو الفعل

[٥٢].

مرحلة

شكل

الكبس

المنفرد

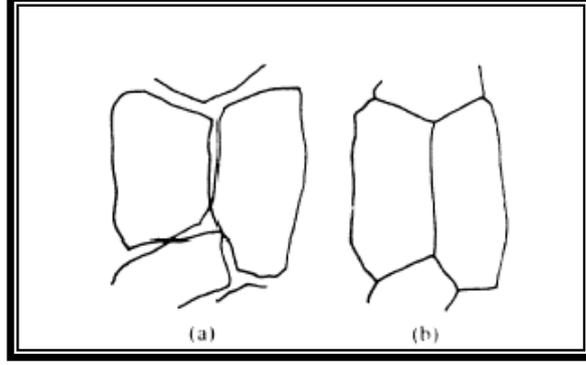
رابعاً-

التلييد (Sintering) :

المكبوسة الخضراء يتم تسخينها إلى درجات حرارة عالية عادةً ما بين (٠.٦-٠.٧) من درجة حرارة إنصهارها بالمطلق وتحت أجواء معينة (غازات خاملة أو تفريغ) ، هذه العملية تدعى بالتلييد حيث تتحول خلالها المكبوسة الخضراء إلى كتلة متماسكة ذات كثافة عالية نسبياً نتيجة الترابط الحاصل ما بين دقائق المسحوق. إن أهم التغييرات التي تحدث في المكبوسة الخضراء خلال مرحلة التلييد تتضمن

إختزال المسامية وبالتالي حدوث زيادة في قيمة الكثافة وتكوين بنية بلورية نهائية والشكل (٢-١٣) يبين تلك التغييرات.

إن الزيادة الحاصلة في قيمة الكثافة تحدث بسبب نقصان الحاصل في المساحة السطحية وبالتالي حدوث إنخفاض في الطاقة الحرة للنظام. أما الحجم الحبيبي للمنتوج النهائي فإنه يتأثر بقوة بظروف التلييد. فعادةً ما يكون الحجم الحبيبي للمنتوج الملبد أكبر من الحجم الجزيئي للمسحوق الأولي ، كذلك تؤدي الحرارة العالية وزمن التلييد الطويل إلى تكوين حبيبات خشنة (حبيبة بالغة النمو). جميع هذه الأمثلة تبين مدى تأثير عملية التلييد على تكوين البنية المجهرية وعلى خواص المنتج الملبد.



الحدود البلورية خلال عملية

بعد التلييد [٤٩].

شكل (٢-١٣) تكوين

التلييد (a) قبل التلييد (b)

تقنية التلييد التفاعلي Reaction sintering : تعد تقنية التلييد هذه الطريقة الأكثر شيوعاً التي يمكن بها الحصول على المركب شبه المعدني ألومينايد النيكل NiAl بالإضافة إلى ألومينايدات المعادن الإنتقالية الأخرى مثل Ni₂Al و TiAl و Ti₃Al و CoAl.... إلخ.

إن تقنية التلييد التفاعلي يمكن تعريفها بأنها تقنية تلييد خاصة تتم خلالها عملية تفاعل عنصرين (مركبين) أو أكثر أثناء مرحلة التسخين (التلييد) للحصول على مركب جديد ، وتمتاز الأجزاء المصنعة بكثافة نهائية عالية ونسبة مسامية واطئة [٤٩].

يتكون المركب الجديد (الناتج من تفاعل عنصرين أو مركبين) من خلال أحد التفاعلات الرئيسية الآتية [٥٤] :

١- تفاعل صلب - صلب (Solid - Solid Reaction) .

٢- تفاعل صلب - سائل (Liquid - Solid Reaction) .

٣- تفاعل صلب - غاز (Gas - Solid Reaction) .

وكمثال على النوع الأول من التفاعلات هو التفاعل الحاصل بين النيكل والألمنيوم والذي يمثل موضوع البحث الحالي ، إذ يتم تسخين المكبوسة الخضراء (التي تتكون من مزيج مسحوق النيكل والألمنيوم) إلى درجة حرارة ٦٠٠ لمدة تتراوح ما بين ساعة واحدة إلى عشرة ساعات تحت جو من غاز الأركون. خلال تلك الفترة الزمنية يتفاعل النيكل مع الألمنيوم ليكونا المركب شبه المعدني NiAl والذي يختلف تماماً عن عنصري النيكل والألمنيوم من حيث البنية المجهرية والخواص [٣٨].

أما التفاعل الثاني فهو التفاعل الذي يحدث ما بين منصهر السليكون والكربون لتكوين مركب كربيد السليكون SiC. وينتج عن التفاعل الثالث مركب نتريد السليكون Si₃N₄ من تفاعل مسحوق السليكون مع غاز النتروجين وكذلك مركب نتريد الألمنيوم AlN من تفاعل مسحوق الألمنيوم مع غاز النتروجين [٦].

تصنيع المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃)
Fabrication of (NiAl-Al₂O₃) IMCs

٢-٥-٢

يتم تصنيع المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃) باعتماد تقنية المساحيق بعد مرحلة تحضير المركب شبه المعدني NiAl حيث تتضمن أربع مراحل هي :

أولاً : مرحلة تحضير المساحيق Preparation of powders :

تستعمل الطرق الميكانيكية لتحضير مسحوق المركب NiAl عن طريق طحنه بإحدى أنواع طواحين الكرات. أما مسحوق الألومينا Al₂O₃ فيتم تحضيره بطريقة باير الكيمياوية.

ثانياً : مرحلة المزج Mixing :

تجري عملية المزج بإحدى أنواع طواحين الكرات عن طريق خلط مسحوق ألومينايد النيكل NiAl والألومينا Al₂O₃ بالنسب الوزنية المطلوبة ولفترات زمنية تتراوح ما بين (٢١٦-٥) ساعة.

ثالثاً : مرحلة التشكيل Forming :

بعد الإنتهاء من مرحلة المزج يتم كبس مزيج مسحوقي ألومينايد النيكل NiAl ومسحوق الألومينا Al₂O₃ أما بتقنية الكبس بالقوالب بنوعها الكبس ذو الفعل المفرد والكبس ذو الفعل المزدوج أو بتقنية الكبس المتوازن على البارد (CIP).

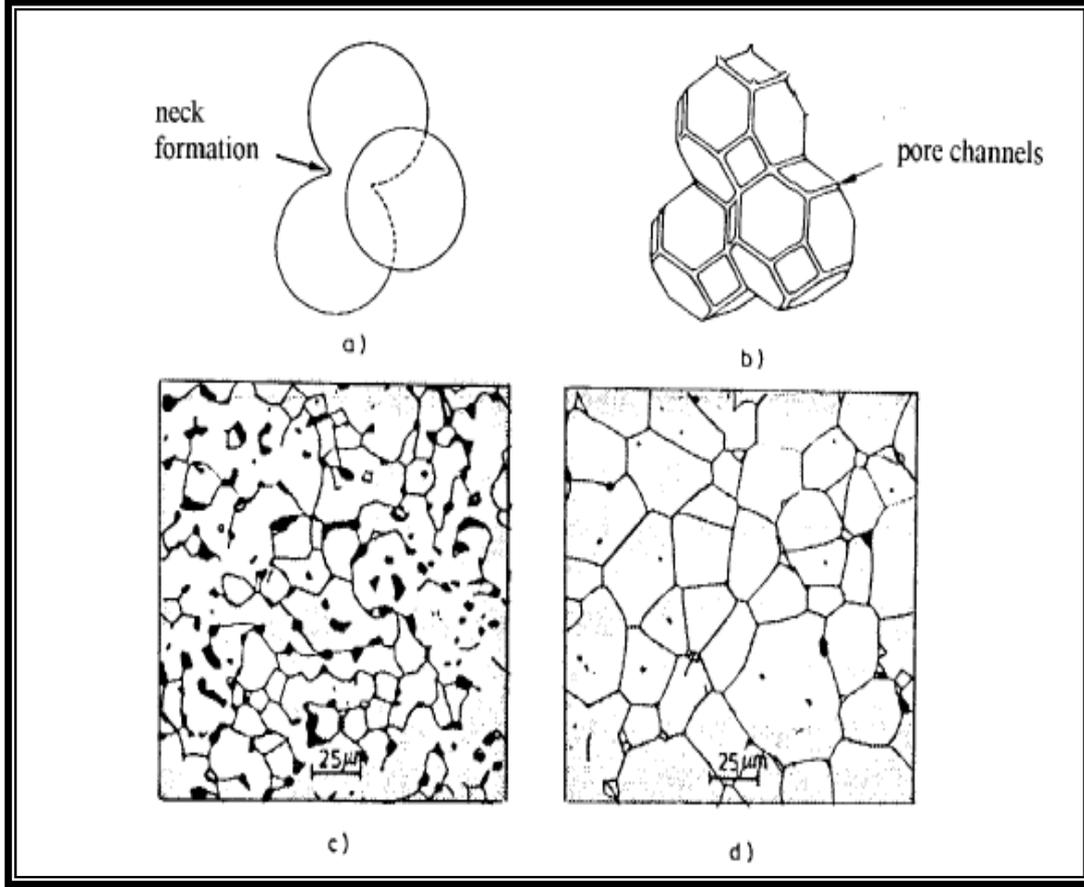
رابعاً : مرحلة التليد Sintering :

هنالك ثلاث تقنيات للتليد لإنتاج المواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني IMCs هي تقنية تليد الحالة الصلبة وتقنية الكبس الساخن الفراغي (Vacuum Hot Pressing, VHP) وتقنية الكبس المتوازن على الساخن (Hot Isostatic Pressing, HIP)

- **تليد الحالة الصلبة Solid state sintering** : في هذه التقنية لايتكون أي سائل خلال عملية التليد. إن الزيادة الحاصلة في قيمة الكثافة تحدث بفعل الإنتشار الذري Atomic diffusion في الحالة الصلبة. إن إختزال المسامية يتطلب إستعمال مساحيق ناعمة جداً ودرجات حرارة عالية.

إن درجات حرارة التليد المثالية لألومينايد النيكل NiAl تتراوح ما بين (٩٥٠-٨٥٠ °C) وللمادة المركبة (NiAl- Al₂O₃) ما بين (١٤٥٠-١٢٠٠ °C) [٤٤]. ومما تجدر الإشارة إلى أن تقنية التليد بالحالة الصلبة يتم تطبيقها بصورة خاصة لتصنيع المواد السيراميكية المتقدمة ، والمركبات شبه المعدنية والمواد المركبة ذات الأساس السيراميكي (CMCs) ، والمواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني (IMCs) المستعملة اليوم في التطبيقات التي تعمل في أوساط درجات الحرارة العالية [٤٩].

أما مراحل تليد الحالة الصلبة فهي ثلاث مراحل [٤٩]: في المرحلة الأولى تتكون تخرصات (تقعرات) عند نقاط الإتصال ما بين الجسيمات ، بينما تتكون في المرحلة الوسطية شبكة قنوات ثلاثية الأبعاد من المسامات متصلة مع بعضها البعض بالإضافة إلى تكوّن هيكل للجسيمات الصلبة. إن الإنكماش يحصل بصورة رئيسية في هذه المرحلة. وتؤدي المرحلة الثالثة إلى تكسر شبكة القنوات المسامية إلى مسامات فردية تقع عند الحدود البلورية ، والشكل (٢-١٤) يوضح هذه المراحل الثلاث.



شكل (٢-١٤) مراحل التلييد (a) تكوين التخصصات (b) القنوات المسامية (c) البنية المجهرية للجسم الملبد (d) المرحلة

التهاتية [٤٩].

إن تكوين بنية مجهرية جديدة يحصل من خلال الحركات الذرية المتعددة التي تتضمن حدوث إنتشار في الكتلة وانتشار في الحدود البلورية ، وانتشار عند أسطح الجسيمات. طرق الإنتشار هذه تعتمد على بعضها البعض ويحدث بعضها في وقت واحد. إن الاختلافات الكبيرة هي في حركية تلك العمليات ومثال ذلك أن إنتشار الحدود البلورية أسرع من حيث المقدار بعدة مرات من ذلك الذي للإنتشار الكتلي. إن تعقد ميكانيكية الإنتشار تجعل الموديلات الرياضية لإنتقال الكتلة صعبة جداً. هنالك موديلات رياضية عديدة وضحت المرحلة الأولى من تلييد الحالة الصلبة ، لكن الموديلات الرياضية تلك تصبح أكثر صعوبة بالنسبة للمرحلتين الوسطية والنهائية بسبب التنوع الكبير في الشكل البيئي (Interface Morphology). ففي المرحلة الأولى فإن معدل التلييد ($\Delta V/V_0$) يمكن توضيحه بالمعادلة الآتية [٤٩] :

$$(\Delta V/V_0) = (3 \cdot \Delta L/L_0) = (20 \cdot \gamma \cdot a^3 \cdot D^* / \sqrt{2} \cdot K \cdot T)^{2/5} \cdot r^{1/5} \cdot t^{2/5} \quad (2-1)$$

حيث إن :

($\Delta L/L_0$) التغييرات النسبية في الطول ، (γ) الطاقة السطحية لكل وحدة مساحة ، (r) نصف قطر الحبيبة ، (a^3) الحجم الذري للفراغ الناشر ، (D^*) معامل الانتشار الذاتي ، (K) ثابت بولتزمان Boltzmann constant ، (T) درجة الحرارة المئوية و (t) زمن التلييد. إن المعادلة أعلاه تبين تأثير عوامل العملية المتغيرة ، حيث أن معدل التلييد يتناسب عكسياً مع قطر الحبيبة وهذا هو أحد أسباب إستعمال مساحيق ناعمة جداً ، كذلك فإن معدل التلييد يتناقص مع الزمن. أما

الطاقة السطحية (γ) فإنه بالإمكان تحسينها بصورة كبيرة بواسطة إضافة الشوائب وهذا يبين أهمية التركيب الكيميائي. إن سرعة المعادلة أعلاه تم تثبيتها وتأكيد لها للمركبات شبه المعدنية والمواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني بكافة أنواعها (الألومينايدات والسليسايدات.... إلخ) [٤٩].

بلى المواد Wear of Materials

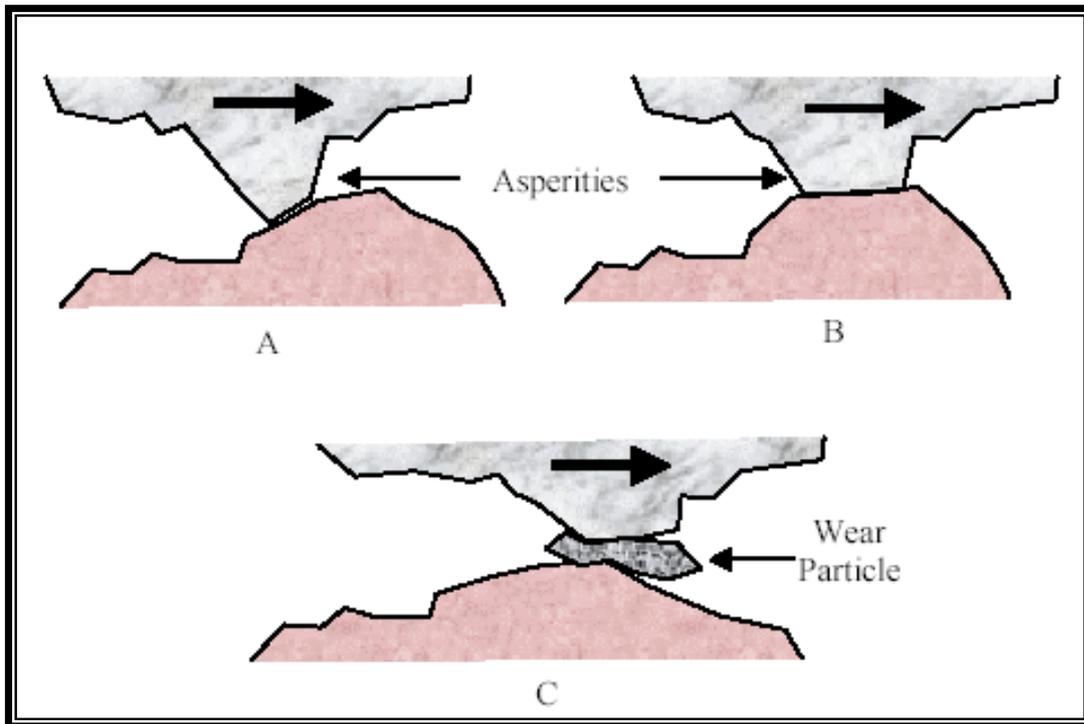
٦- ٢

[٥]. التآكل والفسل الميكانيكي يساهمان أيضاً في هذا النوع من الهجوم. وعرف البلى أيضاً بأنه التغيير الحاد في مظهر السطح وإزالة المادة منه. ويعود السبب لحصول البلى بالمعادن والسبائك إلى عمليات متنوعة مثل الانتقال الالتصاقى والانفصال وتكوّن الأوكسيد وإزالته وتشوهه لدن شديد وتكسر في الطبقات تحت السطحية [٥٣].

ويتعرض المركب شبه المعدني NiAl إلى نوعين من البلى هما البلى الالتصاقى والبلى الحكي [١٧]:

١- البلى الالتصاقى (Adhesive Wear) :

يحصل هذا النوع من البلى الذي يعرف أيضاً بالبلى الحزى أو الخدشي (Scoring) عندما ينزلق سطحان صلبان فوق بعضهما البعض تحت الضغط [٥]. إن بروزات السطح تتشوه بصورة لدنة وتلتحم معاً بصورة نهائية بواسطة الضغوط الموضعية العالية كما في الشكل (١٥-٢). وكلما استمر الانزلاق فأن هذه الروابط تتكسر لتنتج فجوات على أحد السطحين وبروزات على السطح الأخر.



شكل (١٥-٢) البلى الالتصاقى [٥٤].

هنالك عوامل عديدة تم اعتبارها في محاولة لتحسين مقاومة المعادن لهذا النوع من البلى. فلقد وجد أن تخفيض الحمل المسلط على السطوح وجعلها ناعمة بالإضافة الى التزييت المستمر ممكن أن يساعد في منع حصول الالتصاق الذي يسبب خسارة في المعدن [٥,٥٥].

إن الخواص والبنية المجهرية للمادة مهمة أيضاً. فإذا كان كلا السطحين يمتلكان صلادة عالية فإن معدل البلى يكون منخفضاً ، كذلك فإن المقاومة العالية والمتانة والمطيلية الجيدتين ربما تمنع حصول تشققات من السطح. الصلادة العالية للمواد السيراميكية تجعلها تمتلك مقاومة جيدة للبلى الالتصاقى.

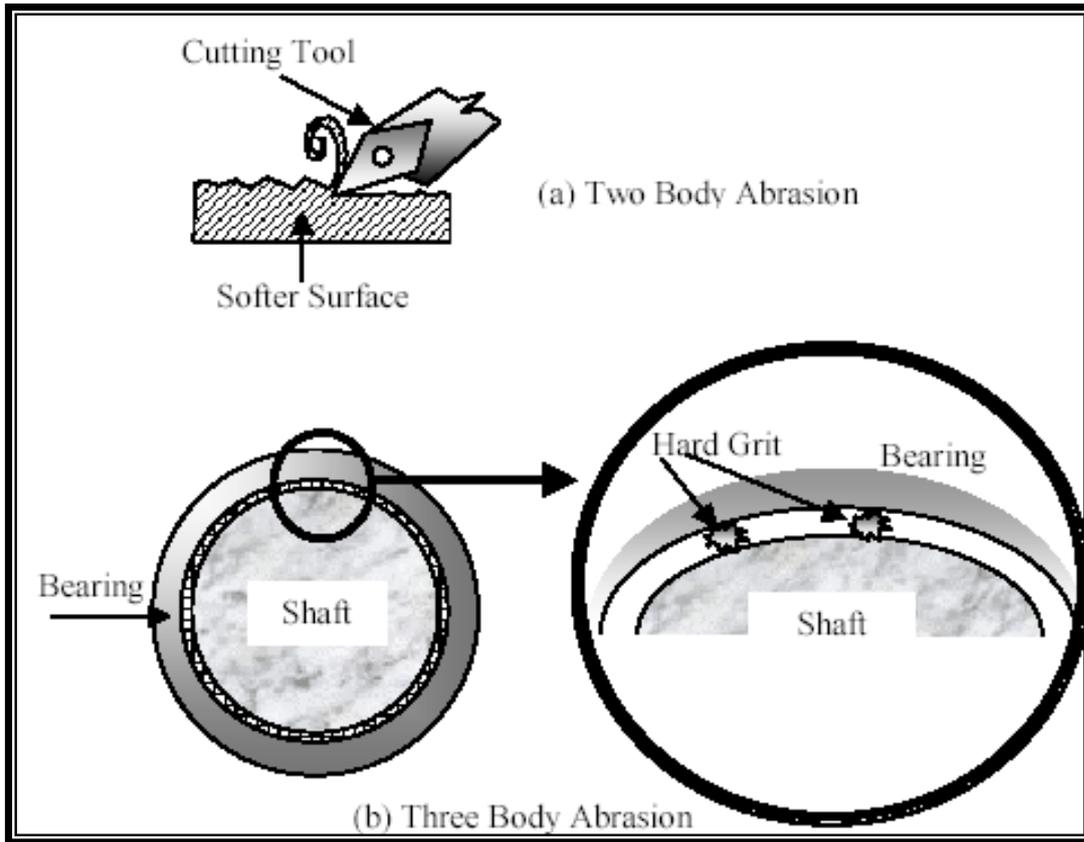
٢- البلى الحكي (Abrasive Wear) :

يحصل هذا النوع من البلى بإحدى الحالتين الآتيتين [٥٤] :

- من إحتكاك جسمين ، في هذه الحالة يكون أحد سطحي هذين الجسمين أصلد من السطح اللين الآخر كما هو مبين في الشكل (١٦a-٢). من أمثلة هذه الحالة هو البلى الحكي الحاصل في عمليات التشغيل التقليدية (كالتجليخ ، التفريز ، ... إلخ).

- من إحتكاك ثلاثة أجسام ، في هذه الحالة فإن الجسم الثالث عادةً ما يكون عبارة عن جسيمة صلدة صغيرة (حصى أو حبة رمل صغيرة ... إلخ) تستقر ما بين سطحي الجسمين اللينين الآخرين بحيث تتسبب بكشط أو حك أحد أو كلا هذين السطحين ، كما هو مبين في الشكل (١٦a-٢).

المواد التي تمتلك صلادة عالية ومتانة جيدة ومقاومة عالية للأوساط ذات درجات الحرارة العالية تعتبر الأكثر مقاومة للبلى الحكي. المواد المثالية المستعملة لتطبيقات البلى الحكي تتضمن الفولاذ المخمد والمرجع ، الفولاذ المكربن ، سبائك الكوبالت مثل الستلايت (Stellite) ، المواد المركبة بكافة أنواعها ، كاربيد التنكستن والحديد الزهر الأبيض. كذلك فإن معظم المواد السيراميكية مقاومة أيضاً لتأثيرات البلى الحكي بسبب صلادتها العالية [٥].



شكل (١٦٢) البلى الحكي [٥٤].

المقدمة Introduction

١- ٣

يتناول هذا الفصل المواد والأجهزة المستخدمة في الدراسة الحالية وكذلك الأسلوب العملي الذي أتبع لتصنيع نماذج أولية من المادة شبه المعدنية (ألومينايد النيكل NiAl) والنماذج النهائية للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) باستخدام المكونات الرئيسية (مسحوق النيكل ومسحوق الألمنيوم ومسحوق الألومينا ومساحيق عناصر السبك المضافة) باعتماد المراحل الأساسية لتقنية المساحيق ، بالإضافة إلى العمليات الثانوية المختلفة لتهيئة النماذج للفحوصات المجهرية والاختبارات الميكانيكية لغرض تقييم النماذج النهائية.

المواد والأجهزة المستخدمة Apparatus and Materials Used

٢- ٣

الجدول (١-٣) يبين المساحيق الأساسية المعتمدة في تصنيع النماذج المستخدمة في الدراسة الحالية ومتوسط حجمها الحبيبي والشركة المصنعة لها.

جدول (١-٣) يوضح المساحيق الأساسية المعتمدة في الدراسة الحالية.

Powder	Average partical size (μm)	Origin
Nickel powder	٥٠	Buchs Fluka AG co.-GERMANY
Aluminum powder	٦٤	Benda-Lutzwerke co.-AUSTRIA
Boron powder	٢٢	Indian Product
Chromium powder	٣٠	Merck co.-GERMANY
Alumina powder	(٣٥-٤٠)	Merck co.-GERMANY

٢- الأجهزة المستخدمة :

لقد تطلبت عملية تهيئة وتصنيع النماذج الأولية للمركب شبه المعدني NiAl والنماذج النهائية للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) وكذلك الاختبارات الميكانيكية والفحوصات المجهرية استخدام الأجهزة والمعدات الآتية :

- ١- ميزان حساس نوع (L٢٢٠S-**D) بدقة (± ٠.٠٠١) ، مصنع من قبل (Sartorius GMBH Göttingen-GERMANY) .
- ٢- طاحونة الكرات الكوكبية نوع (O٥.١٠٢) مع كرات طحن مصنوعة من الألومينا بوزن (٣٨ gr.) ، مصنعة من قبل (FRITSCH Pulaeriste-GERMANY) كما في الشكل (١-٣) .

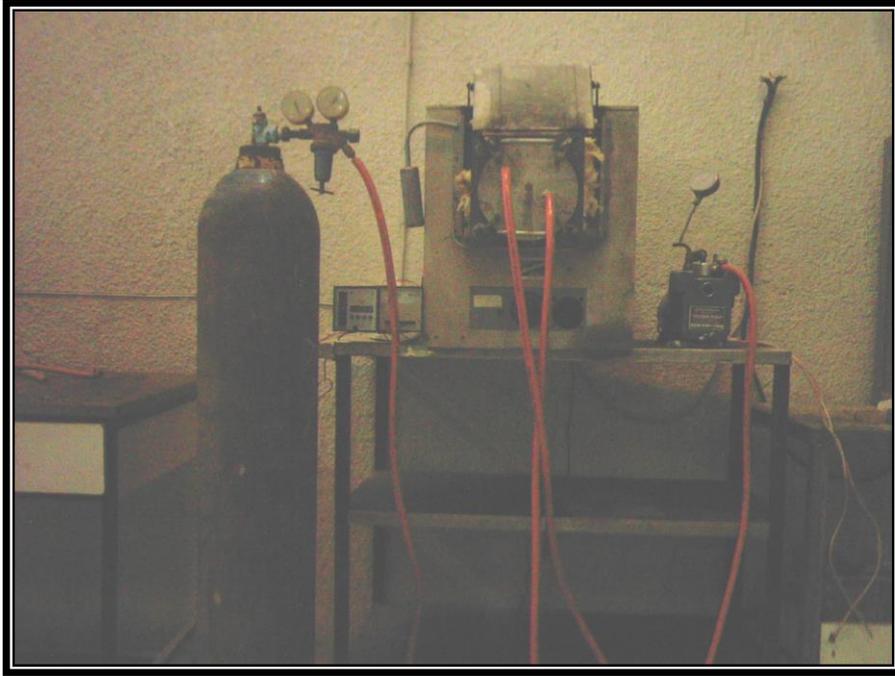
- ١- فرن تجفيف كهربائي نوع (Prodit) ، مصنع من قبل (Prodit s.a.s. Torino-ITALY) ، درجة الحرارة القصوى (250°C).
- ٤- جهاز كبس هيدروليكي كهربائي نوع (Soil Test , Inc.-USA) ذي سعة (١٢٠) طن.
- ٥- قالب كبس فولاذي أحادي التأثير (Single action die).
- ٦- منظومة تسخين لإنتاج المركب شبه المعدني ألومينايد النيكل NiAl الشكل (٢-٣) ، تتألف من :
 - a- فرن كهربائي نوع (Qallenkamk) ، مصنع من قبل (REGD Co. Ltd., ENGLAND) درجة الحرارة القصوى (1200°C) ، b- مزدوج حراري (Thermocouple) و c- صندوق فولاذي لغرض تفرغ غاز الأوكسجين.
 - ٧- فرن كهربائي أنبوبي نوع (D-٢٨٠٤) ، مصنع من قبل (Nabertherm, Lilienthal Bremen-GERMANY) درجة الحرارة القصوى (1700°C).
 - ٨- اسطوانات غاز الأركون.
 - ٩- قواعد من الطابوق الحراري.
 - ١٠- جهاز تنعيم وصلقل العينات نوع (Hergon mp ٢٠٠٧) ، مصنع من قبل (Prodit s.a.s. Torino-ITALY).
 - ١١- مجهر ضوئي (OM) نوع (٢٠٠٣) (rmm-٧t) هندي الصنع.
 - ١٢- جهاز حيود الأشعة السينية (XRD) نوع (Philips).
 - ١٣- جهاز فحص الصلادة المايكروية الرقمي نوع (BROOKS MAJ٢٤ ERBV) ، مصنع من قبل (BROOKS Inspection Equipment Ltd., Colchester-ENGLAND).
 - ١٤- جهاز مقاومة الانضغاط نوع (١٩٨١ - $I_c - I_c$) مصنع من قبل (Tonirindustrie Prüftechnik GMBH Berlin - GERMANY) أقصى حمل مسلط (٧٠) KN.
 - ١٥- جهاز اختبار البلى الانزلاقي (Pin - on - Disk).



الشكل (١-٣) طاحونة

الكورات الكوكبية

المعتمدة في الدراسة الحالية.

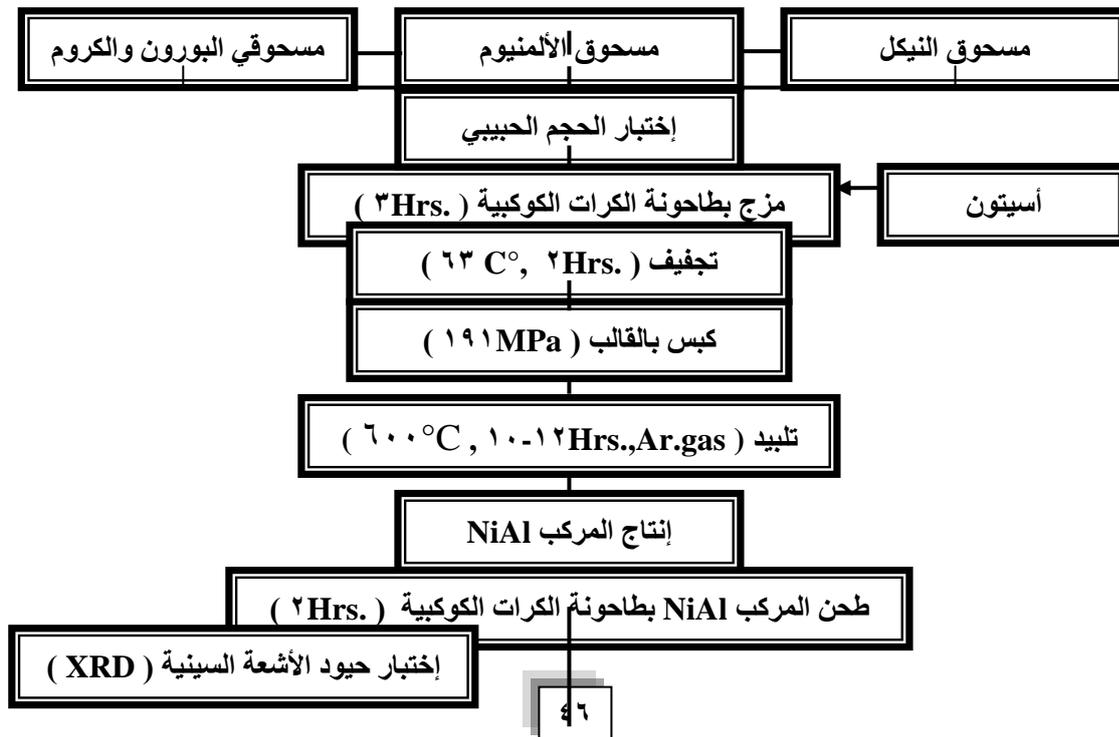


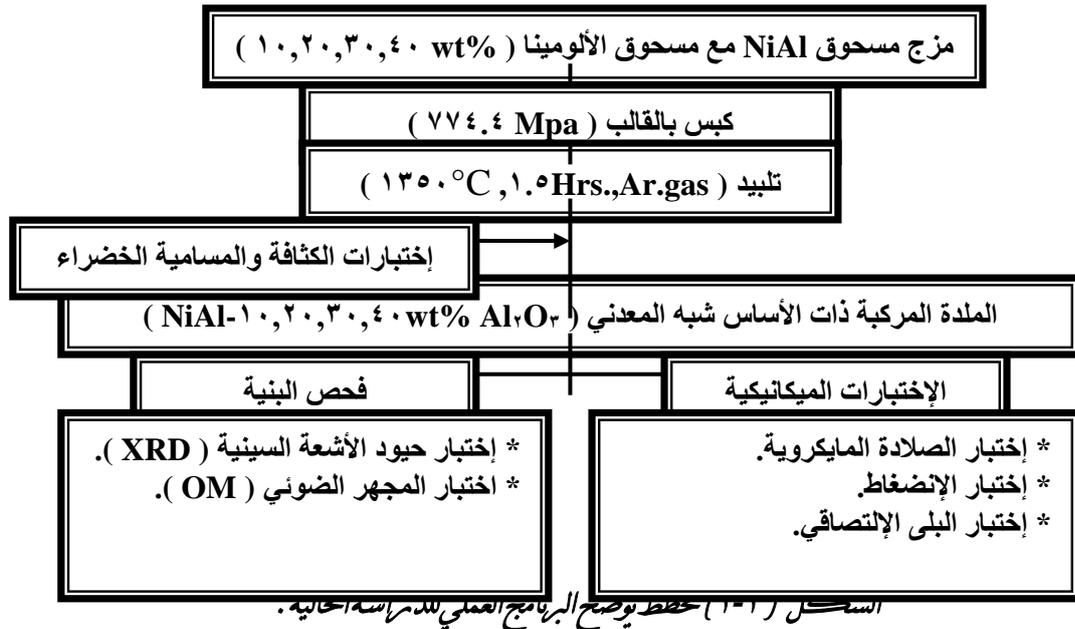
الشكل (٣-٢) منظومة التسخين المستخدمة في الدراسة الحالية.

البرنامج العملي للدراسة الحالية Practical Program of Present Study

٣-٣

يوضح الشكل (٣-٣) المراحل التصنيعية للنماذج الأولية لمادة ألو مينايد النيكل NiAl شبه المعدنية المضاف إليه عنصري البورون والكروم ، والنماذج النهائية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃) بالإضافة إلى الفحوصات المجهرية والإختبارات الميكانيكية التي أجريت لتقييم هذه المادة المركبة التي تم دراستها :





مرحلة تحضير أومينايد النيكل NiAl Preparation of Nickel Aluminide NiAl

٣-٤

إنتا

١- مرحلة تهيئة المزيج (Preparation of Mixture) :

تتضمن هذه المرحلة تهيئة المكونات من خلال تحديد النسب الوزنية لمسحوق النيكل والألمنيوم الداخلة في تكوين المركب شبه المعدني NiAl. ولدراسة تأثير النسبة المئوية لعنصري البورون والكروم على الخواص الميكانيكية للمركب شبه المعدني NiAl وبالتالي على المادة المركبة النهائية (NiAl- Al₂O₃) تم إضافة نسب وزنية من كل عنصر على حدة وإضافة نسب إضافية وزنية من العنصرين (البورون والكروم) معاً. والجدول (٣-٢) يوضح النماذج الأساسية من أومينايد النيكل NiAl ونسب المساحيق الداخلة في تركيبها.

جدول (٣-٢) يوضح المساحيق الداخلة في تركيب النماذج الأساسية من أومينايد النيكل NiAl ونسب الإضافة منها.

Alloy No.	Weight percent of Powder (wt%)
I	٦٨Ni - ٣٢Al
II	٦٨Ni - ٣١.٩Al - ٠.١B
III	٦٨Ni - ٣١.٧Al - ٠.٣B
IV	٦٨Ni - ٣١.٥Al - ٠.٥B
V	٦٨Ni - ٢٨.٥Al - ٣.٥Cr
VI	٦٨Ni - ٢٨Al - ٤Cr
VII	٦٨Ni - ٢٧.٥Al - ٤.٥ Cr
VIII	٦٨Ni - ٢٨.٤Al - ٠.١B - ٣.٥Cr

٢- مرحلة المزج (Mixing) :

تم إجراء عملية المزج الرطب لمكونات المزيج بواسطة طاحونة الكرات الكوكبية الموضحة في الشكل (١-٣) باستخدام كرات من الألومينا ، حيث تم استعمال الأسيتون وذلك لمنع حصول أكسدة لمكونات المزيج بفعل الحرارة المتولدة من احتكاك المساحيق وقد استمرت عملية المزج لمدة ثلاث ساعات للحصول على توزيع منتظم ومتجانس للمكونات ومن ثم التجفيف في مجفف مختبري عند درجة حرارة (٦٣°C) للتخلص من الأسيتون المضاف ولمنع حصول عملية تأكسد للمزيج. بعدها تجري عملية تفتيت المزيج الناتج وتهيئته لمرحلة التشكيل.

٣- مرحلة التشكيل (Forming) :

في هذه المرحلة تم استخدام تقنية الكبس الجاف بالقوالب وبضغط كبس ثابت مقداره ٣ طن أي حوالي (١٩١MPa) باستخدام قالب كبس فولاذي ثنائي التأثير مثبت على المكبس الهيدروليكي الكهربائي للحصول على نماذج خضراء بشكل أقراص بقطر (١٤ mm) وسمك (٨ mm). وتتلخص عملية التشكيل للمزيج بالخطوات الآتية :

١- ملء القالب بالمزيج الأساسي.
٢- كبس المزيج بالضغط المطلوب من خلال تحريك الكابس العلوي لحين الوصول إلى ضغط الكبس المطلوب.

٤ - بقاء الضغط مسلطاً لمدة (١٥) ثانية.

٣- إخراج النماذج بواسطة تحريك الكابس السفلي إلى الأعلى.

لقد تم إجراء العديد من التجارب الأولية لتثبيت ظروف التشكيل واختيار الضغط المناسب ومدة التثبيت للضغط المسلط من خلال الفحص البصري والمجهري للنماذج بعد عملية الكبس مباشرة للتأكد من عدم وجود أية تشققات أو تشوهات.

٤- مرحلة التليد (Sintering) :

هي المرحلة التي تم فيها وضع النماذج الخضراء فوق قواعد من الطابوق الحراري داخل صندوق التفريغ الموجود داخل الفرن الكهربائي وغلقت الأبواب بإحكام. يحتوي صندوق التفريغ على ثلاث فتحات. الأولى هي فتحة دخول الأركون إلى داخل الصندوق والثانية هي فتحة خروج غاز الأركون وهذه الفتحة مرتبطة بوعاء يحتوي على الماء وذلك لغرض التقليل من إستهلاك غاز الأركون إلى أقل كمية ممكنة. أما الفتحة الثالثة فتمثل المزودج الحراري (Thermocouple) لمعرفة درجة الحرارة الحقيقية داخل الفرن.

يتم ضخ غاز الأركون من أسطوانة غاز الأركون قبل تشغيل الفرن وبضغط (٣bar) لمدة نصف دقيقة لإخراج الهواء الموجود داخل الفرن ، بعدها يتم تشغيل الفرن وخفض ضغط غاز الأركون إلى (٢bar). ولقد تم إجراء عملية تليد النماذج الخضراء عند درجة حرارة (٦٠٠°C) لمدة تتراوح ما بين

(١٢-١٠) ساعة ، حيث يحدث خلال هذه الفترة الزمنية تفاعل تكوين المركب شبه المعدني NiAl. بعدها يتم التبريد البطيء إلى درجة حرارة الغرفة.

٥- مرحلة الطحن (Milling) :

بعد الإنتهاء من عملية التليد التفاعلي وإخراج العينات من صندوق التفريغ ، تم طحن النماذج بطاحونة الكرات الكوكبية لمدة ساعتين وذلك لغرض تهيئة مسحوق المركب NiAl الناتج من عملية التليد. وللتأكد من مكونات مسحوق المركب الناتج أخذت عدة نماذج من المسحوق لغرض إجراء فحص حيود الأشعة السينية (XRD) وفحص الحجم الحبيبي لها.

مرحلة تحضير المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) Preparation of (NiAl-Al₂O₃) IMCs

٥-٣

التالية :

١- مرحلة تهيئة المزيج (Preparation of Mixture) :

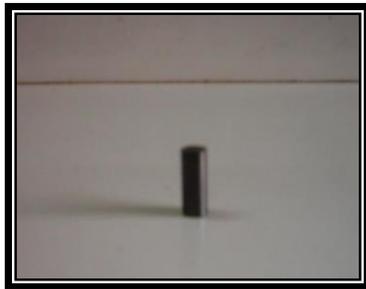
تتضمن هذه المرحلة تهيئة المكونات من خلال تحديد النسب الوزنية المئوية لمسحوق المادة شبه المعدنية NiAl ومسحوق الألومينا للحصول على المزيج النهائي لإنتاج المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃). ولدراسة تأثير النسبة المئوية للألومينا على الخواص الميكانيكية للمركب NiAl تم إختيار أربع نسب إضافة مختلفة للألومينا هي (١٠, ٢٠, ٣٠, ٤٠wt%) لجميع النماذج كما هو موضح في الجدول (٣-٣).

٢- مرحلة المزج (Mixing) :

أجريت عملية المزج الرطب لمكونات المزيج بالاستعانة بطاحونة الكرات الكوكبية وبإضافة الأسيتون ، حيث استمرت عملية المزج لمدة خمس ساعات. بعد ذلك تم تجفيف المزيج ومن ثم تفتيته وتهيئته لمرحلة التشكيل.

٣- مرحلة التشكيل (Forming) :

في هذه المرحلة تم استخدام تقنية الكبس الجاف بالقالب ثنائي التأثير وبضغط كبس ثابت مقداره ٧ طن (٧٧٤.٤ MPa) للحصول على نماذج خضراء أسطوانية الشكل بقطر (١٠ mm) وإرتفاع (٢٠ mm) لغرض إجراء اختباري الإنضغاط والبلي الالتصاق. والشكل (٤-٣) يبين صورة لبعض النماذج المستخدمة في اختبار الصلادة المايكروية (اليمين) وصورة لإحدى النماذج المستخدمة في اختبار مقاومة الانضغاط (اليسار).



٣) صورة لبعض

اختبار الصلادة



٤)

الشكل

عينات

(اليمين) وعينات اختبار مقاومة الانضغاط (اليسار) من المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃) التي تم

اعتمادها في البحث الحالي.

جدول (٣-٣) يوضح المساحيق الداخلة في تركيب النماذج الأساسية من المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني

(NiAl - Al₂O₃) ونسب الإضافة منها .

Group No.	Sample No.	Composition	Weight percent of Powder (wt%)
I	١	NiAl - Al ₂ O ₃	٩٠ NiAl - ١٠ Al ₂ O ₃
	٢	NiAl - Al ₂ O ₃	٨٠ NiAl - ٢٠ Al ₂ O ₃
	٣	NiAl - Al ₂ O ₃	٧٠ NiAl - ٣٠ Al ₂ O ₃
	٤	NiAl - Al ₂ O ₃	٦٠ NiAl - ٤٠ Al ₂ O ₃
II	٥	(NiAl - ٠.١B) - Al ₂ O ₃	٩٠ (NiAl - ٠.١B) - ١٠ Al ₂ O ₃
	٦	(NiAl - ٠.١B) - Al ₂ O ₃	٨٠ (NiAl - ٠.١B) - ٢٠ Al ₂ O ₃
	٧	(NiAl - ٠.١B) - Al ₂ O ₃	٧٠ (NiAl - ٠.١B) - ٣٠ Al ₂ O ₃
	٨	(NiAl - ٠.١B) - Al ₂ O ₃	٦٠ (NiAl - ٠.١B) - ٤٠ Al ₂ O ₃
III	٩	(NiAl - ٠.٣B) - Al ₂ O ₃	٩٠ (NiAl - ٠.٣B) - ١٠ Al ₂ O ₃
	١٠	(NiAl - ٠.٣B) - Al ₂ O ₃	٨٠ (NiAl - ٠.٣B) - ٢٠ Al ₂ O ₃
	١١	(NiAl - ٠.٣B) - Al ₂ O ₃	٧٠ (NiAl - ٠.٣B) - ٣٠ Al ₂ O ₃
	١٢	(NiAl - ٠.٣B) - Al ₂ O ₃	٦٠ (NiAl - ٠.٣B) - ٤٠ Al ₂ O ₃
IV	١٣	(NiAl - ٠.٥B) - Al ₂ O ₃	٩٠ (NiAl - ٠.٥B) - ١٠ Al ₂ O ₃
	١٤	(NiAl - ٠.٥B) - Al ₂ O ₃	٨٠ (NiAl - ٠.٥B) - ٢٠ Al ₂ O ₃
	١٥	(NiAl - ٠.٥B) - Al ₂ O ₃	٧٠ (NiAl - ٠.٥B) - ٣٠ Al ₂ O ₃
	١٦	(NiAl - ٠.٥B) - Al ₂ O ₃	٦٠ (NiAl - ٠.٥B) - ٤٠ Al ₂ O ₃
V	١٧	(NiAl - ٣.٥Cr) - Al ₂ O ₃	٩٠ (NiAl - ٣.٥Cr) - ١٠ Al ₂ O ₃
	١٨	(NiAl - ٣.٥Cr) - Al ₂ O ₃	٨٠ (NiAl - ٣.٥Cr) - ٢٠ Al ₂ O ₃
	١٩	(NiAl - ٣.٥Cr) - Al ₂ O ₃	٧٠ (NiAl - ٣.٥Cr) - ٣٠ Al ₂ O ₃
	٢٠	(NiAl - ٣.٥Cr) - Al ₂ O ₃	٦٠ (NiAl - ٣.٥Cr) - ٤٠ Al ₂ O ₃
VI	٢١	(NiAl - ٤Cr) - Al ₂ O ₃	٩٠ (NiAl - ٤Cr) - ١٠ Al ₂ O ₃
	٢٢	(NiAl - ٤Cr) - Al ₂ O ₃	٨٠ (NiAl - ٤Cr) - ٢٠ Al ₂ O ₃
	٢٣	(NiAl - ٤Cr) - Al ₂ O ₃	٧٠ (NiAl - ٤Cr) - ٣٠ Al ₂ O ₃
	٢٤	(NiAl - ٤Cr) - Al ₂ O ₃	٦٠ (NiAl - ٤Cr) - ٤٠ Al ₂ O ₃
VII	٢٥	(NiAl - ٤.٥Cr) - Al ₂ O ₃	٩٠ (NiAl - ٤.٥Cr) - ١٠ Al ₂ O ₃
	٢٦	(NiAl - ٤.٥Cr) - Al ₂ O ₃	٨٠ (NiAl - ٤.٥Cr) - ٢٠ Al ₂ O ₃
	٢٧	(NiAl - ٤.٥Cr) - Al ₂ O ₃	٧٠ (NiAl - ٤.٥Cr) - ٣٠ Al ₂ O ₃
	٢٨	(NiAl - ٤.٥Cr) - Al ₂ O ₃	٦٠ (NiAl - ٤.٥Cr) - ٤٠ Al ₂ O ₃
VIII	٢٩	(NiAl - ٠.١B - ٣.٥Cr) - Al ₂ O ₃	٩٠ (NiAl - ٠.١B - ٣.٥Cr) - ١٠ Al ₂ O ₃
	٣٠	(NiAl - ٠.١B - ٣.٥Cr) - Al ₂ O ₃	٨٠ (NiAl - ٠.١B - ٣.٥Cr) - ٢٠ Al ₂ O ₃
	٣١	(NiAl - ٠.١B - ٣.٥Cr) - Al ₂ O ₃	٧٠ (NiAl - ٠.١B - ٣.٥Cr) - ٣٠ Al ₂ O ₃
	٣٢	(NiAl - ٠.١B - ٣.٥Cr) - Al ₂ O ₃	٦٠ (NiAl - ٠.١B - ٣.٥Cr) - ٤٠ Al ₂ O ₃

غلق
جو
٢٥٠

لغايه درجة حرارة ٨٠٠°C و (٢٥°C /min.) من درجة حرارة ٨٠٠°C لغايه درجة حرارة ١٣٥٠°C وذلك بسبب الاختلاف الكبير بين معاملي التمدد الحراري للمركب NiAl والألومينا Al₂O₃ .[٢]

الإختبارات الفيزيائية و الميكانيكية Mechanical and Physical Testing

٦٠٣

أجريت العديد من الفحوصات للمواد الأولية الداخلة في تحضير المركب شبه المعدني NiAl بالإضافة إلى النماذج النهائية من هذا المركب وذات الأساس شبه المعدني لتقييم خواص تلك النماذج.

فحوصات المساحيق الداخلة في تحضير المركب NiAl Testing of Raw Materials

١- ٦- ٣

١. تم قياس الحجم الحبيبي لمساحيق الألمنيوم والبورون والكروم باستخدام جهاز (Laser Analsette ٢٢). ويتم القياس بطريقتين أما بشكل عالق في خلية القياس أو تغذيته جافاً من خلال محجم. ويمكن قياس حجم الدقائق بمدى يتراوح ما بين $(0.16-1160) \mu m$. ويتلخص مبدأ عمل الجهاز بتسليط أشعة الليزر ذات القوة الواطئة جداً على النموذج ومن خلال حصول نموذج حيود لضوء أشعة الليزر المشتتة وبزاوية مختلفة بالإعتماد على حجم الدقائق المختلفة. تسجل زاوية وشدة الضوء لأشعة الليزر باستخدام متحسس خاص للقياس مرتبط بجهاز كمبيوتر يعمل على قياس متوسط حجم الدقائق.

٢- فحص حيود الأشعة السينية (X-Ray Diffraction, XRD) :

أجري فحص حيود الأشعة السينية لنماذج تهيأ على شكل مسحوق ناعم يثبت على شريحة زجاجية بإستعمال شريط لاصق لغرض التأكد من أن المركب شبه المعدني NiAl قد تكوّن فعلاً خلال عملية التبليد وكذلك لمعرفة الأطوار للنماذج النهائية. ولقد أستعمل جهاز فحص حيود الأشعة السينية (XRD) طراز (Philips) ، أما معدن الهدف (Target) المستخدم في أنبوبة الأشعة السينية هو النحاس ذو طول موجي ($Cu \text{ } \alpha = 1.54 \text{ \AA}$). إن الفولتية والتيار المستخدم في الجهاز مساوية إلى (٤٠KV) و (٢٠mA) على التوالي ، وكانت سرعة المسح وسرعة التسجيل وثابت الزمن هي ($2\theta/\text{min.}$) و (1 cm/min.) و (1 sec.) على التوالي ، أما مدى الزاوية (2θ) المستخدمة في الفحص فقد تراوحت بين (10°) إلى (90°).

الإختبارات الفيزيائية للنماذج المصنعة Physical Testing

٢- ٦- ٣

١. تم حساب قيمة الكثافة الخضراء من خلال معرفة أبعاد النموذج بعد الإنتهاء من مرحلة التشكيل (الكبس) ، ووزن النموذج وباستخدام العلاقة الآتية [٥٦] :

$$\rho_g = \frac{M_g}{V_g} \quad (1-3)$$

حيث أن : (ρ_g) الكثافة الخضراء للنموذج (g/cm^3) ، (M_g) كتلة النموذج (g) و (V_g) حجم النموذج (cm^3).

أما حساب المسامية الخضراء للنماذج فقد تمت من خلال معرفة قيمة الكثافة النظرية للمزيج (مسحوق ألومينايد النيكل NiAl المضاف إليه عنصري السبك البورون والكروم ومسحوق الألومينا) وبالإستفادة من قيمة الكثافة الخضراء ، وكما يأتي [٥٦] :

$$P_g = 1 - \left(\frac{\rho_g}{\rho_{th}} \right) \times 100 \quad (2-3)$$

حيث أن : (P_g) المسامية الخضراء (%) ، (ρ_g) الكثافة الخضراء للنموذج (g/cm^3) و (ρ_{th}) الكثافة النظرية للمزيج (g/cm^3).
إن إيجاد قيمة الكثافة النظرية لمزيج مسحوق NiAl ومسحوق الألومينا يتم من خلال معرفة النسب الوزنية المئوية لكل منهما ، وحسب العلاقة الآتية [٥٦] :

$$\rho_{th} = \frac{100 \rho_1 \rho_2}{X_1 \rho_2 + X_2 \rho_1} \quad (٣-٣)$$

حيث أن : (ρ_{th}) الكثافة النظرية للمزيج (g/cm^3) ، (ρ_1, ρ_2) الكثافة النظرية لألومينايد النيكل NiAl (g/cm^3) والكثافة النظرية للألومينا (g/cm^3) على التوالي [٢٤] و (X_1, X_2) النسب الوزنية لمسحوق NiAl ومسحوق الألومينا.

٢- الكثافة والمسامية النهائية (Final density and porosity) :

تم تحديد قيمة الكثافة والمسامية النهائية للنماذج من خلال استخدام قاعدة أرخميدس Archimedes' method. حيث تم وزن النماذج في ميزان حساس بعد تجفيفها في مجفف ومن ثم حساب حجم النماذج باستخدام مبدأ أرخميدس. وبالرجوع إلى العلاقات السابقة المشار إليها في الفقرة السابقة تم حساب الكثافة والمسامية النهائية مع الأخذ بنظر الاعتبار قيم المتغيرات للحالة النهائية.

الإختبارات الميكانيكية للنماذج المصنعة Mechanical Testing

٣-٦-٣

مغنا

يعد اختبار الإنضغاط أحد أهم الإختبارات الميكانيكية والذي يستخدم لتحديد خواص السد للمواد الهشة (كالمواد السيراميكية والمركبات شبه المعدنية والمواد المركبة ذات الأساس السيراميكي وذات الأساس شبه المعدني ... إلخ) ، حيث يتطلب هذا الإختبار إستعمال عينات أسطوانية صغيرة بحيث لا تتجاوز النسبة بين طول العينة إلى القطر (Length to Diameter Ratio) (٣ : ١) [٦].
لقد تم إجراء إختبار الإنضغاط باستخدام عينات أسطوانية الشكل من المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃) بقطر (١٠ mm) وطول (٢٠ mm) وذلك لغرض حساب مقاومة الإنضغاط اعتماداً على العلاقة الآتية وحسب المواصفة (ASTM) C٧٧٣ :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (٤-٣)$$

حيث أن : (σ) مقاومة الإنضغاط (MPa) ، (P) الحمل المسلط (N) و (A) مساحة التحميل (mm²).
فضلاً عن حساب انفعال الإنضغاط Compressive Strain لتلك العينات باستخدام العلاقة التالية [٥,٦,١٤] :

$$\varepsilon(\%) = \left(\frac{L_f - L_o}{L_o} \right) \quad (٥-٣)$$

حيث أن : (ε_c) انفعال الإنضغاط و (L_o) الطول الأصلي (mm) و (L_f) الطول النهائي (mm). كذلك أستخدم هذا الإختبار لحساب معامل المرونة (E) لتلك العينات بواسطة جهاز الإختبارات العام.

٢- إختبار الصلادة (Hardness Test) :

لغرض قياس الصلادة المايكروية بطريقة فيكرز Vickers' microhardness تم استخدام نماذج بشكل أقراص ذات قطر 14 mm وسمك 5 mm بعد صقل سطوحها باستخدام معجون ماسي ذي حجم 1 μm ومن ثم تسليط حمل مقداره (9.8N) باستخدام جهاز قياس الصلادة المايكروية الذي يستخدم باعج هرمي ماسي ذي زاوية 136° ، حيث يبقى الحمل مسلطاً على العينة لفترة 30 ثانية ثم يتم رفعه. بعد ذلك يتم أخذ قيمة الصلادة بوحدات (MPa) من الشاشة الرقمية المثبتة على الجهاز.

٣- اختبار البلى الإلتصاقى (Adhesive Wear Test) :

تم استخدام جهاز المسمار على القرص (Pin-on-Disk) والمصمم طبقاً لمواصفات (ASTM) والذي يتكون من محرك كهربائي بسرعة دورانية ثابتة مقدارها (490 rpm) وبكرات ناقلة للحركة حيث استخدمت في هذا الإختبار عينات أسطوانية بطول (20 mm) وقطر (10 mm). وقد تم تسليط حمل ثابت عليها مقداره (10 N) لمدة نصف ساعة. أما معدل البلى الوزني لهذه العينات فقد تم حسابه من العلاقة التالية [٥٧] :

$$WR = \frac{\Delta W}{SD} \quad (٦-٣)$$

حيث أن : (WR) معدل البلى الوزني (g/cm) و (ΔW) التغير في وزن العينات بعد التجربة ، و (SD) مسافة الإنزلاق (cm) ، وتحسب على أساس (SD = SS × t) حيث أن : (SS) سرعة الإنزلاق (m/sec) و (t) زمن التشغيل (min).

الفحص المجهرى Metallography

٧-٣

جهاز الصقل ومعجون الصقل الماسي ذي الحجم (1 μm) و (3 μm) وعلى مرحلتين متعاقبتين للحصول على سطح صقيل وخال من الخدوش ومن ثم إجراء عملية الإظهار. إن محلول الإظهار المستخدم لإظهار معالم البنية المجهرية NiAl للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl - Al₂O₃) كان (33HNO₃ - 33CH₃COOH - 33H₂O) (1HF) [٢]. ولقد تم الفحص المجهرى باستخدام المجهر الضوئي (OM) لغرض دراسة البنية المجهرية وملاحظة البنى المجهرية الناتجة للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃).

المقدمة
Introduction

٤- ١

يتناول هذا الفصل النتائج العملية للاختبارات الفيزيائية والميكانيكية لكافة النماذج المعتمدة في الدراسة الحالية.

نتائج الاختبارات الفيزيائية
Results of Physical Testing

٤- ٢

نتائج فحص حيود الأشعة السينية (XDR)
Results of X-Ray Diffraction

٤- ٢- ١

المخطط يضم خمسة مركبات من ألومينايدات النيكل شبه المعدنية تتداخل مع بعضها البعض هي (NiAl, Ni₂Al, Ni₃Al, NiAl₂, Ni₂Al₃) وعليه فقد أجريت العديد من التجارب الأولية وذلك لمعرفة أفضل الظروف التي تؤدي بدورها إلى الحصول على المركب شبه المعدني ألومينايد النيكل NiAl لوحده وبنسبة عالية.

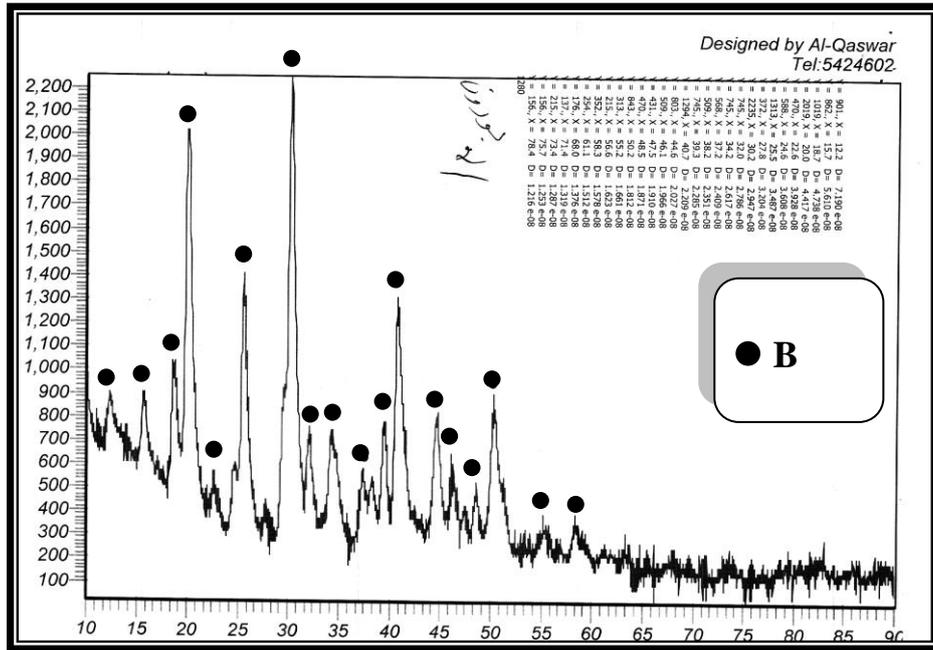
الأشكال (٤-١) و (٤-٢) و (٤-٣) عبارة عن مخططات حيود الأشعة السينية (XRD) لمساحيق البورون والكروم والألومينا التي تم اعتمدت في الدراسة الحالية. حيث تبين هذه الأشكال وجود قمم ذروة رئيسية واضحة متطابقة وبصورة كبيرة مع الجداول القياسية الخاصة بفحص حيود الأشعة السينية (Joint Committee on Powder Diffraction Standards, JCPDS)

أما الأشكال (٤-٤) و (٤-٥) و (٤-٦) فهي عبارة عن مخططات حيود الأشعة السينية (XRD) لألومينايد النيكل NiAl الناتج من عملية التلييد التفاعلي لمسحوق العنصرين الرئيسيين المكونان له (النيكل والألمنيوم) عند درجة حرارة ٦٠٠°C بزمن مكوث متغير وتحت جو من غاز الأركون. فالشكل (٤-٤) يبين مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) لألومينايد النيكل NiAl الناتج من التلييد التفاعلي لمسحوق النيكل والألمنيوم عند درجة حرارة ٦٠٠°C لمدة ٦ ساعات. حيث يتضح من هذا المخطط تكوّن ثلاثة مركبات من ألومينايدات النيكل شبه المعدنية هي NiAl و Ni₂Al و Ni₃Al.

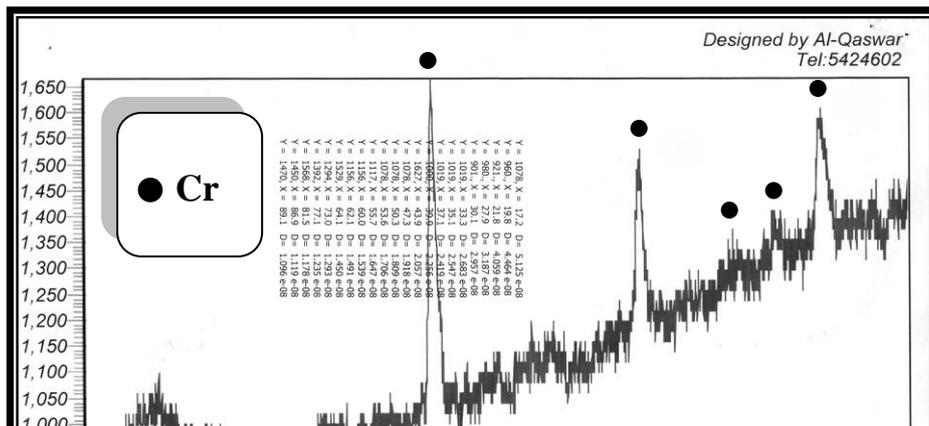
أما الشكل (٤-٥) فيبين مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) لألومينايد النيكل NiAl الناتج من التلييد التفاعلي لمسحوق النيكل والألمنيوم عند درجة حرارة ٦٠٠°C وبزمن مكوث ١٠ ساعات. حيث لوحظ وجود طور NiAl بنسبة عالية مع نسبة قليلة من طور Ni₃Al واختفاء طور Ni₂Al.

أخيراً وبزيادة زمن التلييد إلى ١٢ ساعة فقد تم الحصول على طور NiAl لوحده ، كما يتضح من الشكل (٤-٦). أي أن معظم طور Ni₃Al قد تحول إلى طور NiAl ، وهذا يؤدي إلى الاستنتاج أنه كلما زاد زمن التلييد كلما تم الحصول على طور NiAl لوحده. إن زيادة زمن التلييد (أي زيادة فترة الانتشار) هي التي أدت إلى تحول معظم ألومينايد النيكل Ni₃Al إلى ألومينايد النيكل NiAl وذلك بإعطاء الوقت الكافي لذرات النيكل الموجودة

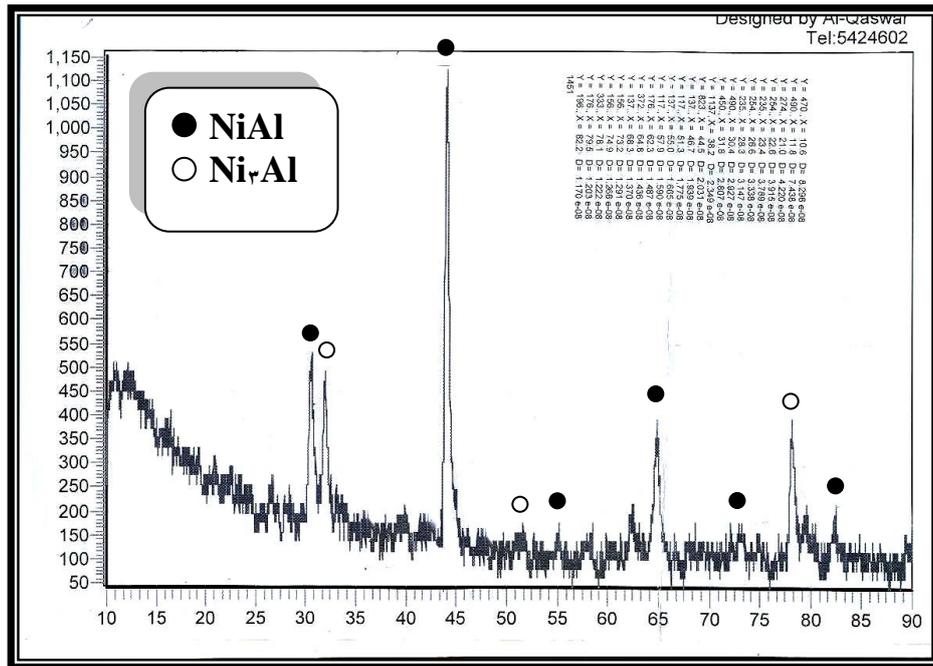
في المركب Ni_3Al لكي تنتشر وبالتالي تفاعل كل ذرة منها مع ذرة ألومنيوم واحدة لتكوين ألومينايد النيكل $NiAl$ ، بدلاً من تفاعل ثلاث ذرات منها مع ذرة ألومنيوم واحدة [٤٠]. وبمقارنة مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) الشكل (٤-٦) مع مخطط حيود الأشعة السينية القياسي لألومينايد النيكل $NiAl$ شكل (٤-٧) [٥٨] ، وكذلك مع مخطط حيود الأشعة السينية لألومينايد النيكل الناتج بتقنية التليد التفاعلي وتقنية التسبيك الميكانيكي (MA) شكل (٤-٨) [٥٩] ، وتقنية الدرجات الحرارية العالية المحفزة ذاتياً (SHS) شكل (٤-٩) [٦٠] نجد أننا قد حققنا كافة القمم الخاصة بألومينايد النيكل $NiAl$ (المسافة بين مستويين d) وهي $d = 2.91$ عند $(2\theta = 30.5^\circ)$ و $d = 2.02$ عند $(2\theta = 44.6^\circ)$ و $d = 1.66$ عند $(2\theta = 55.2^\circ)$ و $d = 1.44$ عند $(2\theta = 64.5^\circ)$ و $d = 1.28$ عند $(2\theta = 72.3^\circ)$ و $d = 1.17$ عند $(2\theta = 83.1^\circ)$. أما بالنسبة للبورون والكروم فلم تظهر القمم الخاصة بهذين العنصرين في مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) ، لأن فحص حيود الأشعة السينية (XRD) لا يظهر الأطوار التي نسبتها أقل من (٥ %). ومما تجدر الإشارة إليه أن نتائج فحص حيود الأشعة السينية (XRD) المبينة في الجدول (٤-١) والعائدة للشكل (٤-٦) هي التي تم اعتمادها في تحضير النماذج النهائية من المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$). والشكل (٤-١٠) عبارة عن مخطط حيود الأشعة السينية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$) المنتجة بتقنية التليد عند درجة حرارة $1350^\circ C$ لمدة ساعة ونصف.



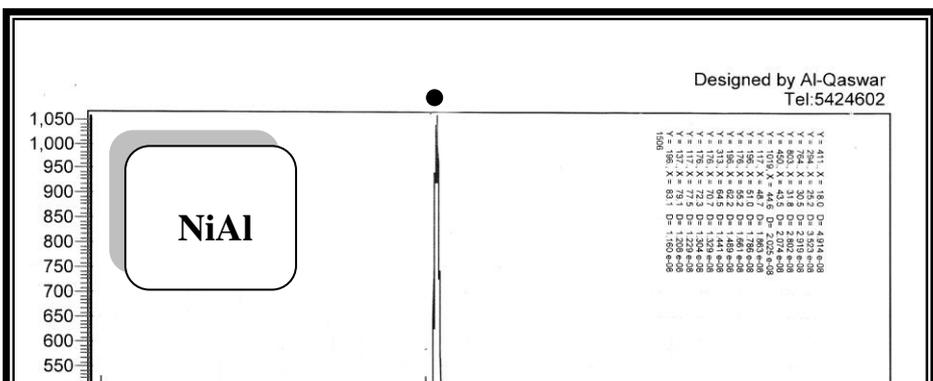
شكل (٤-١٠) مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) للبورون المستخدم في البحث الحالي.

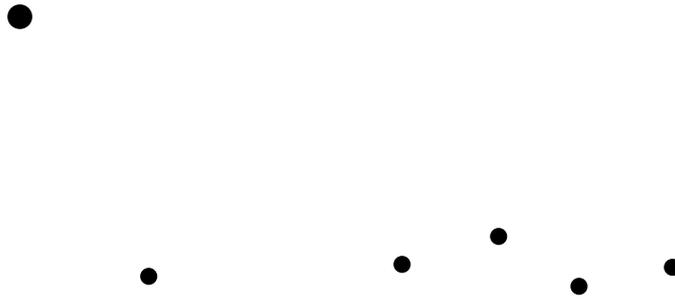


شكل (٤-٤) مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) للألومينايد النيكل المنتج بتقنية التلييد التفاعلي عند درجة حرارة 600°C لمدة 6 ساعات.



شكل (٤-٥) مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) للألومينايد النيكل المنتج بتقنية التلييد التفاعلي عند درجة حرارة 600°C لمدة 10 ساعات.



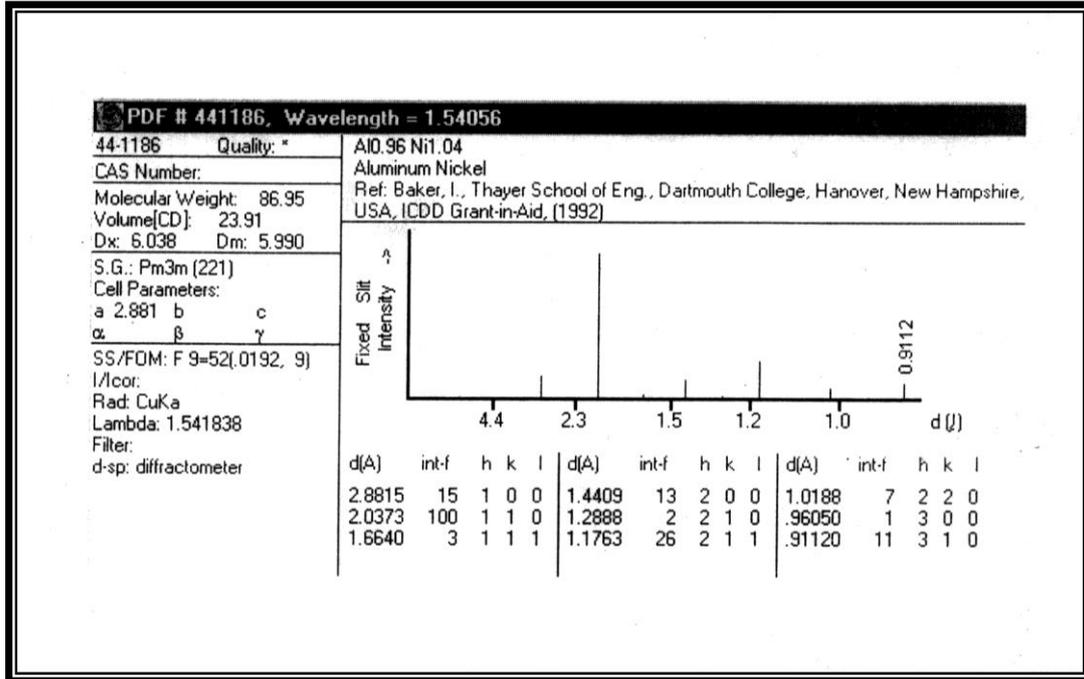


شكل (٦-٤) مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) لألومينايد النيكل المنتج بتقنية التليد التفاعلي عند درجة

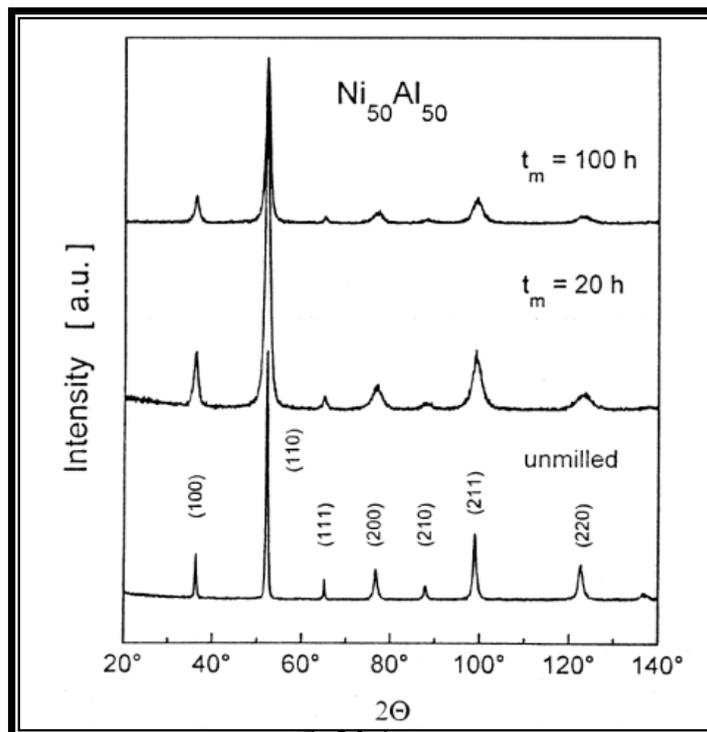
حرارة 600°C لمدة ١٢ ساعة.

جدول (١-٤) يبين نتائج فحص حيود الأشعة السينية (XRD) العائدة للشكل (٦-٤).

2θ	d
٣٠.٥	٢.٩١
٤٤.٦	٢.٠٢
٥٥.٢	١.٦٦
٦٤.٥	١.٤٤
٧٢.٣	١.٢٨
٨٣.١	١.١٧



شكل (٧٤) مخطط حيود الأشعة السينية القياسي (XRD) لألومينايد النيكل $NiAl$ [٥٨].



شكل (٤-١٠) مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl- Al_2O_3) المتوجة بتقنية التليد عند درجة حرارة $1350^{\circ}C$ لمدة ساعة ونصف.

نتائج اختباري الكثافة والمسامية الخضراء والنهائيتين

٤-٢-٢

Results of Final and Green Density and Porosity

لألومينايد النيكل NiAl :

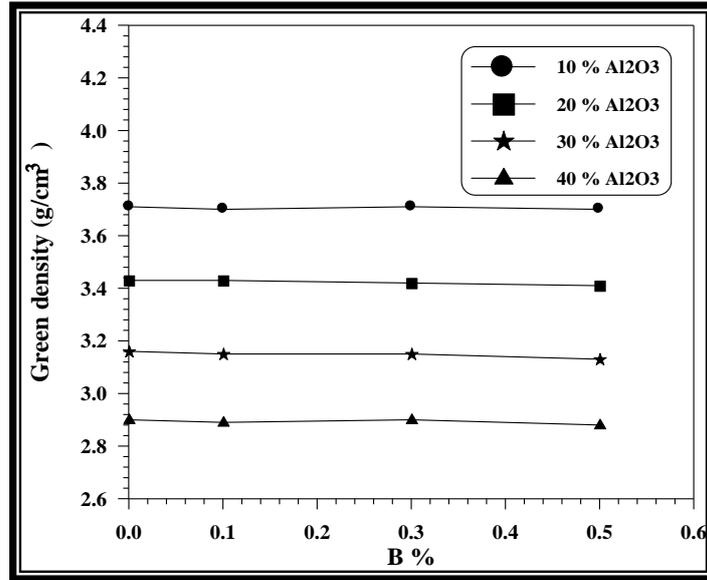
تبين الأشكال (٤-١١) و (٤-١٢) و (٤-١٣) تأثير النسبة الوزنية المئوية للألومينا المضافة على الكثافة الخضراء للمركب شبه المعدني NiAl ، فبالنسبة للكثافة الخضراء فنلاحظ أنها تتناقص مع زيادة النسبة الوزنية المئوية للألومينا المضافة. إن سبب هذا النقصان في الكثافة الخضراء لألومينايد النيكل NiAl يعزى إلى الكثافة المنخفضة للألومينا (3.99 g/cm^3) مقارنةً بكثافة المركب NiAl (5.86 g/cm^3) ، حيث يلاحظ أن النماذج المحتوية على ($10 \text{ wt } Al_2O_3$) تمتلك كثافة خضراء مقدارها (3.71 g/cm^3) والمحتوية على ($20 \text{ wt } Al_2O_3$) و ($30 \text{ wt } Al_2O_3$) تمتلك كثافة خضراء مقدارها (3.43 g/cm^3) و (3.16 g/cm^3) على التوالي ، بينما المحتوية على ($40 \text{ wt } Al_2O_3$) فتمتلك كثافة خضراء مقدارها (2.90 g/cm^3).

أما تأثير النسبة الوزنية المئوية للألومينا المضافة على المسامية الخضراء لألومينايد النيكل NiAl فإنها تكون مغايرة لعلاقتها مع الكثافة الخضراء. حيث لوحظ بأن مسامية المركب NiAl تزداد مع زيادة النسبة الوزنية المئوية للألومينا المضافة ، وهذا ما توضحه الأشكال (٤-١٤) و (٤-١٥) و (٤-١٦) حيث تزداد المسامية الخضراء من (33.63%) للنماذج المحتوية على ($10 \text{ wt } Al_2O_3$) لتصل مع زيادة النسبة الوزنية المئوية للألومينا المضافة إلى ($40 \text{ wt } Al_2O_3$) إلى حوالي (41.17%).

٤-٢-٢-٢-٤- تأثير إضافة البورون والكروم على الكثافة والمسامية الخضراء للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl- Al_2O_3) :

أظهرت النتائج الموضحة في الشكلين (٤-١١) و (٤-١٤) أن زيادة نسبة البورون المضافة ليس لها تأثير على الكثافة والمسامية الخضراء للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl- Al_2O_3). حيث تبقى الكثافة والمسامية الخضراء للمادة المركبة (NiAl- $90Al_2O_3$) بحدود (3.70 g/cm^3) و (33%) على التوالي وللمادة المركبة (NiAl- $80Al_2O_3$) بحدود (3.4 g/cm^3) و (35%) على التوالي وللمادة المركبة (NiAl- $70Al_2O_3$) بحدود (3.1 g/cm^3) و (40%) على التوالي وللمادة المركبة (NiAl- $60Al_2O_3$) بحدود (2.8 g/cm^3) و (42%) على التوالي. والسبب في بقاء الكثافة الخضراء على حالها يعزى إلى الكثافة الواطئة جداً للبورون المضاف (2.3 g/cm^3). أما بالنسبة للكروم المضاف فقد بينت النتائج الموضحة في الشكلين (٤-١٢) و (٤-١٦) أن زيادة نسبة الكروم المضاف تؤدي إلى زيادة في قيمة الكثافة الخضراء يقابلها زيادة في قيمة المسامية الخضراء للمادة المركبة (NiAl- Al_2O_3). إن سبب الزيادة الحاصلة في قيمة الكثافة الخضراء يعزى إلى الكثافة العالية للكروم المضاف (7.19 g/cm^3) ، أما النقصان الحاصل

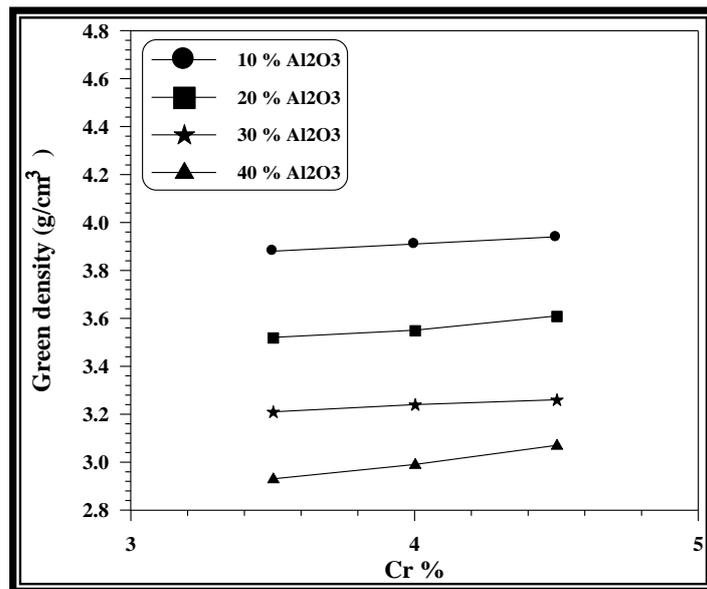
في قيم المسامية الخضراء فيعزى إلى إشغال دقائق الكروم للفراغات الموجودة في المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) وبالتالي زيادة كثافة التراص. أخيراً فإن إضافة البورون والكروم معاً تؤدي إلى زيادة الكثافة الخضراء للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) كما هو مبين في الشكل (١٣-٤) حيث تؤدي إضافة (٠.١ wt% B, ٣.٥ wt% Cr) إلى زيادة قيمة الكثافة الخضراء للمادة المركبة (٩٠NiAl-١٠Al₂O₃) من (٣.٧١ g/cm³) إلى (٣.٨٨ g/cm³). بينما تؤدي إلى حدوث نقصان في قيم المسامية الخضراء كما مبين في الشكل (٤-١٦)، حيث تؤدي إضافة (٠.١ wt% B, ٣.٥ wt% Cr) إلى حدوث نقصان في قيمة المسامية الخضراء للمادة المركبة (٩٠NiAl-١٠Al₂O₃) من (٣٣.٦٣ %) إلى (٣٠.٨٣ %)، وهكذا بالنسبة لبقية النماذج.



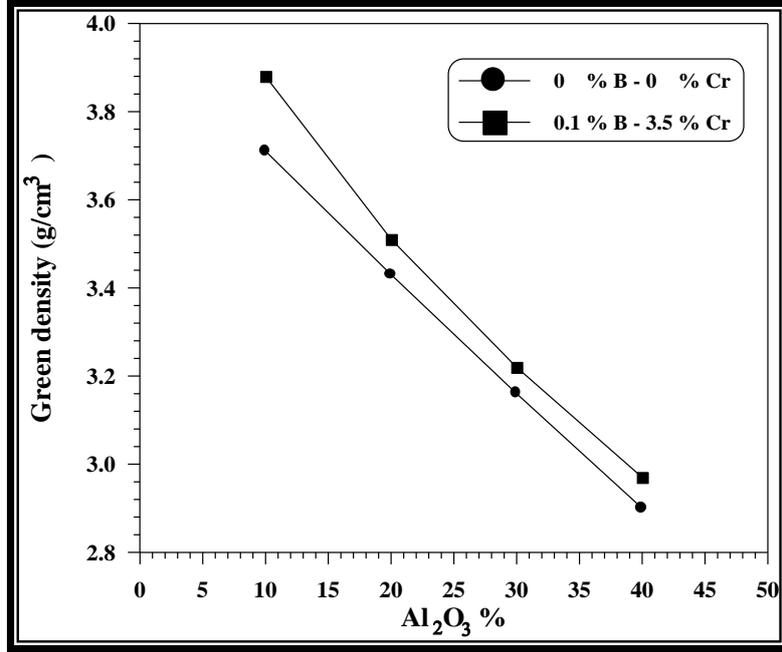
٤) تأثير إضافة
الكثافة
المركبة ذات

شكل (١١-)
البورون على
الخضراء للمادة

الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃).



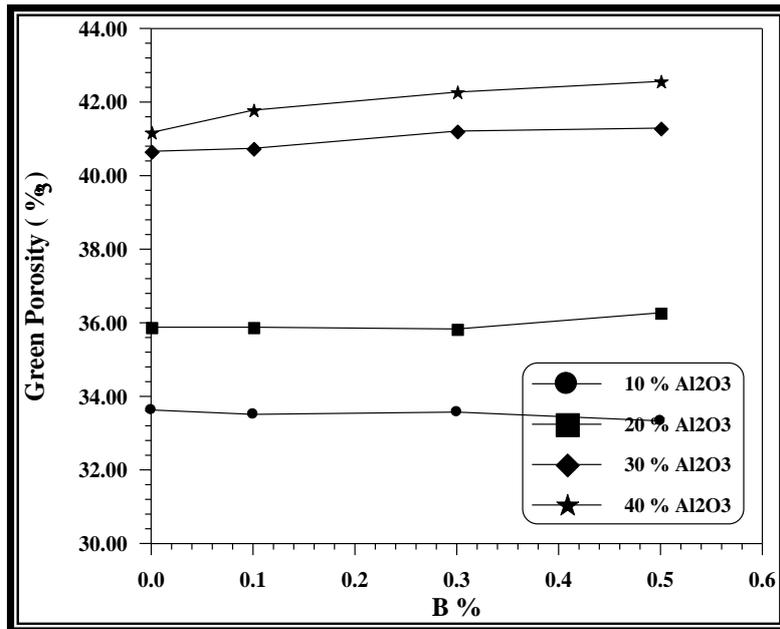
شكل (١٢-٤) تأثير إضافة الكروم على الكثافة الخضراء للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني
 . ($NiAl-Al_2O_3$)



تأثير (١٣-٤)

شكل)

إضافة الألومينا على الكثافة الخضراء للأومينايد النيكل $NiAl$
 (العينات المحتوية على البورون والكروم معاً) .



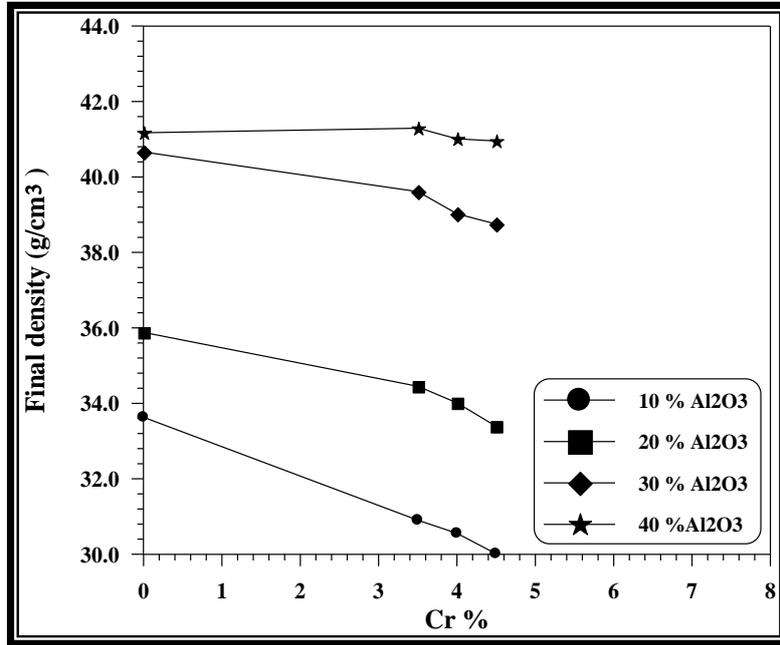
تأثير (١٤-٤)

البورون على
 الخضراء للمادة

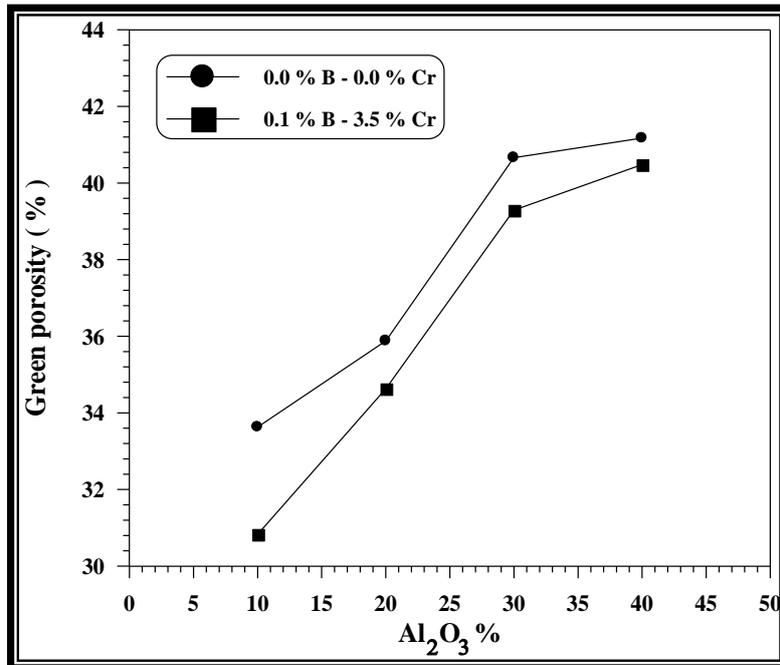
شكل)

إضافة
 المسامية

المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$).



شكل (٤-١٥) تأثير إضافة الكروم على المسامية الخضراء للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$)



شكل (٤-١٦) تأثير الألومينا على الخضراء

شكل (٤-١٥) إضافة المسامية

لألومينايد النيكل NiAl

(العينات المحتوية على البورون والكروم معاً) .

٤-٢-٣ - تأثير إضافة الألومينا على الكثافة والمسامية النهائية لألومينايد النيكل NiAl :

يتضح من الأشكال (١٧-٤) و (١٩-٤) و (٢٠-٤) و (٢٢-٤) و (٢٣-٤) و (٢٤-٤) أن الكثافة النهائية لألومينايد النيكل NiAl تتناقص مع زيادة نسبة الألومينا المضافة بنفس السبب السابق وهو كثافة الألومينا الواطئة مقارنةً بكثافة ألومينايد النيكل NiAl والتي يقابلها زيادة في قيمة المسامية النهائية للنماذج كافة.

وهذا ما يتوافق مع النتائج التي حصل عليها الباحثان اليابانيان (Kiyotaka Matsuura و Masayuki Kudoh) [٢٤] الذين توصلوا إلى أن كثافة المركب NiAl تنخفض بزيادة الكسر الحجمي للألومينا المضافة لنفس السبب السابق والحصول على مسامية نهائية أقل من (٥ %) .

٤-٢-٤ - تأثير إضافة البورون والكروم على الكثافة والمسامية النهائيتين للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني NiAl- (Al₂O₃) :

يتضح من الشكل (١٧-٤) أن هنالك علاقة وثيقة ما بين النسبة الوزنية المئوية للبورون المضاف إلى المركب NiAl والكثافة النهائية للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) ، فكلما زادت نسبة البورون المضاف مع استخدام ضغط كبس عالٍ ثابت (٧٧٤.٤ MPa) كلما اقتربت كثافة المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) من كثافتها النظرية وهو ما يبينه الشكل (١٨-٤) الذي يوضح العلاقة ما بين الكثافة النظرية والنهائية لكافة النماذج المحتوية على البورون. فمثلاً يلاحظ بأن الكثافة النهائية للمادة المركبة (٩٠NiAl-١٠Al₂O₃) هي (٥.١٢ g/cm^٣) أي حوالي (٩١.٥ %) من كثافتها النظرية ، لكن بإضافة (٠.١ wt% B) لها ترتفع قيمة الكثافة النهائية إلى (٥.١٨ g/cm^٣) أي حوالي (٩٢.٨ %) من كثافتها النظرية ، وبزيادة نسبة البورون إلى (٠.٣ wt% B) ترتفع لتصل إلى (٥.٢٩ g/cm^٣) أي حوالي (٩٤.٩ %) من كثافتها النظرية. أما بزيادة نسبة البورون إلى (٠.٥ wt% B) فإن الكثافة النهائية تقترب بصورة كبيرة من الكثافة النظرية لتصل إلى (٥.٤٤ g/cm^٣) أي حوالي (٩٨.١ %) من كثافتها النظرية وهكذا بالنسبة لبقية النماذج.

كذلك تؤدي زيادة نسبة البورون المضاف إلى ألومينايد النيكل NiAl إلى حدوث نقصان في قيم المسامية النهائية للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) وهو ما يوضحه الشكل (١٩-٤) الذي يبين أن بإضافة (٠.١ wt% B) تنخفض قيمة المسامية النهائية للمادة المركبة (٩٠NiAl-١٠Al₂O₃) من حوالي (٨.٤ %) إلى حوالي (٧.١ %) وبزيادة نسبة البورون المضاف إلى (٠.٣ wt% B) تنخفض إلى حوالي (٥.٠٢ %) . وتستمر المسامية النهائية بالنقصان لتصل إلى أدنى قيمة لها وهي (١.٩٨ %) بإضافة (٠.٥ wt% B) وهكذا بالنسبة لبقية النماذج.

والحال نفسه ينطبق على الكروم المضاف فالشكل (٢٠-٤) يبين أن له تأثيراً أقل مما للبورون على الكثافة النهائية للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) والتي تقترب كثافتها النظرية بزيادة نسبة الكروم ، حيث تبلغ (٥.١٣ g/cm^٣) أي حوالي (٩١.٢ %) من الكثافة النظرية للمادة المركبة (٩٠NiAl-١٠Al₂O₃) بإضافة (٣.٥ wt% Cr) وبزيادة نسبة الكروم إلى (٤ wt% Cr) تزداد لتصل إلى (٥.١٩ g/cm^٣) أي حوالي (٩٢.١ %) من كثافتها النظرية. ومن ثم تزداد إلى حوالي (٥.٢٩ g/cm^٣) أي حوالي (٩٣.٩ %) من كثافتها

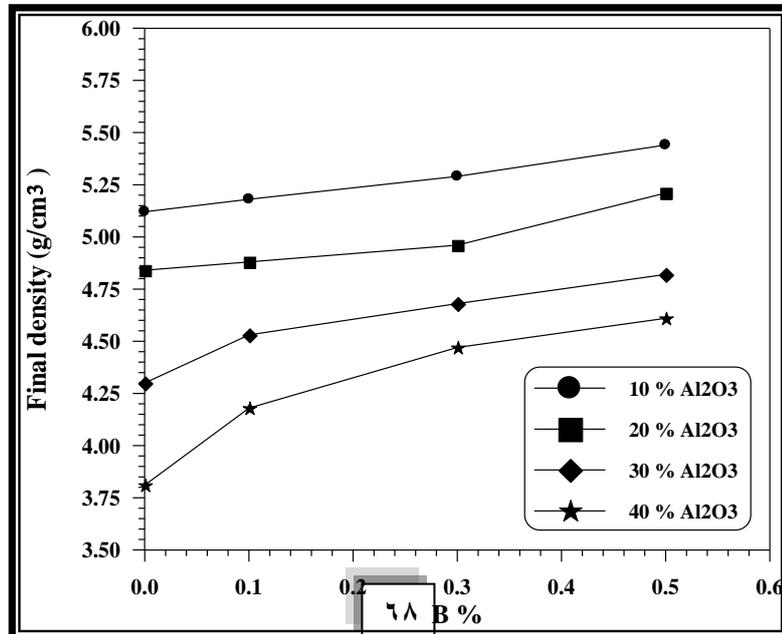
النظرية عند زيادة نسبة الكروم المضاف إلى (٤.٥ wt% Cr) وهكذا بالنسبة لبقية النماذج وكما هو موضح في الشكل (٢١-٤).

أما بالنسبة للمسامية النهائية فإن إضافة الكروم تعمل على حدوث انخفاض طفيف في قيم المسامية النهائية للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) ، حيث تنخفض من حوالي (٨.٤ %) إلى حوالي (٨.٢٤ %) للمادة المركبة (٩٠NiAl-١٠Al₂O₃) بإضافة (٣.٥ wt% Cr) وإلى (٧.٨١ %) بإضافة (٤ wt% Cr) ، ومن ثم تنخفض إلى حوالي (٦.٠٣ %) بإضافة (٤.٥ wt% Cr) وهكذا بالنسبة لبقية النماذج وكما هو موضح في الشكل (٢٢-٤).

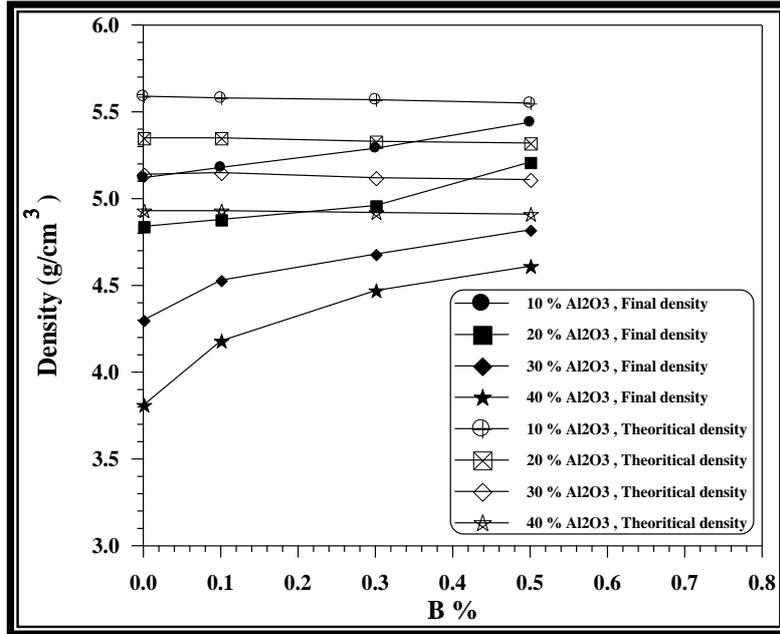
أخيراً فإن إضافة البورون والكروم معاً تؤدي إلى زيادة كثافة المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) كما هو مبين في الشكل (٢٣-٤). حيث تؤدي إضافة (٣.٥ wt% B, ٠.١ wt% Cr) إلى زيادة قيمة الكثافة النهائية للمادة المركبة (٩٠NiAl-١٠Al₂O₃) من (٥.١٢ g/cm³) إلى (٥.١٥ g/cm³) أي حوالي (٩٢.٣ %) من قيمة كثافتها النظرية. ومن (٤.٨٤ g/cm³) إلى (٤.٨٥ g/cm³) بالنسبة للمادة المركبة (٨٠NiAl-٢٠Al₂O₃) أي حوالي (٩٠.٣ %) من قيمة كثافتها النظرية وكذلك من (٤.٣ g/cm³) إلى (٤.٥١ g/cm³) بالنسبة للمادة المركبة (٧٠NiAl-٣٠Al₂O₃) أي حوالي (٨٧.٧ %) من قيمة كثافتها النظرية. بينما تزداد الكثافة النهائية من (٣.٨١ g/cm³) إلى (٤.١٤ g/cm³) وذلك بالنسبة للمادة المركبة (٦٠NiAl-٤٠Al₂O₃) أي حوالي (٨٣.٨ %) من قيمة كثافتها النظرية.

أما بالنسبة للمسامية النهائية فإن إضافة البورون والكروم معاً تؤدي إلى حدوث نقصان فيها كما هو موضح في الشكل (٢٤-٤). فإضافة (٣.٥ wt% Cr, ٠.١ wt% B) يحدث نقصان في قيمة المسامية النهائية للمادة المركبة (٩٠NiAl-١٠Al₂O₃) من (٨.٤ %) إلى (٧.٦٦ %) ومن (٩.٥٣ %) إلى (٩.١٢ %) بالنسبة للمادة المركبة (٨٠NiAl-٢٠Al₂O₃) وكذلك من (١٦.٣٤ %) إلى (١٢.٢٥ %) بالنسبة للمادة المركبة (٧٠NiAl-٣٠Al₂O₃). بينما تستمر المسامية النهائية بالنقصان لتصل إلى (١٦.١٩ %) وذلك بالنسبة للمادة المركبة (٦٠NiAl-٤٠Al₂O₃).

إن من أهم النتائج التي يمكن مقارنة تأثير إضافة البورون هي ما توصل إليه الباحث (C. W. Won [٣٧]) والذي أوضح أن زيادة نسبة البورون يؤدي إلى حدوث تكثيف Densification وبالتالي الحصول على كثافة نهائية قريبة جداً من الكثافة النظرية مع بلوغ المسامية النهائية إلى أدنى قيم لها.



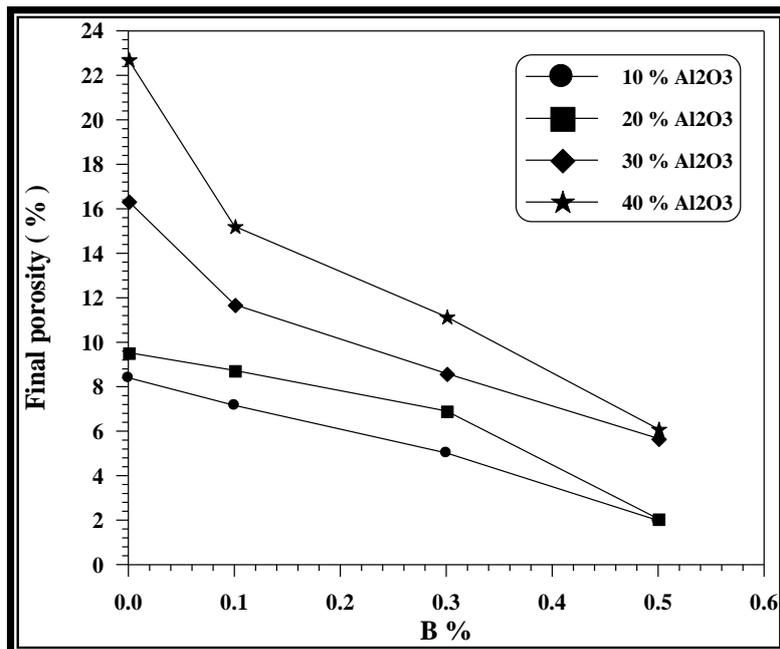
شكل (١٧-٤) تأثير إضافة البورون على الكثافة النهائية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$) .



(١٧-٤)
النسبة الموزنية
والكثافة

شكل
العلاقة بين
المئوية للبورون

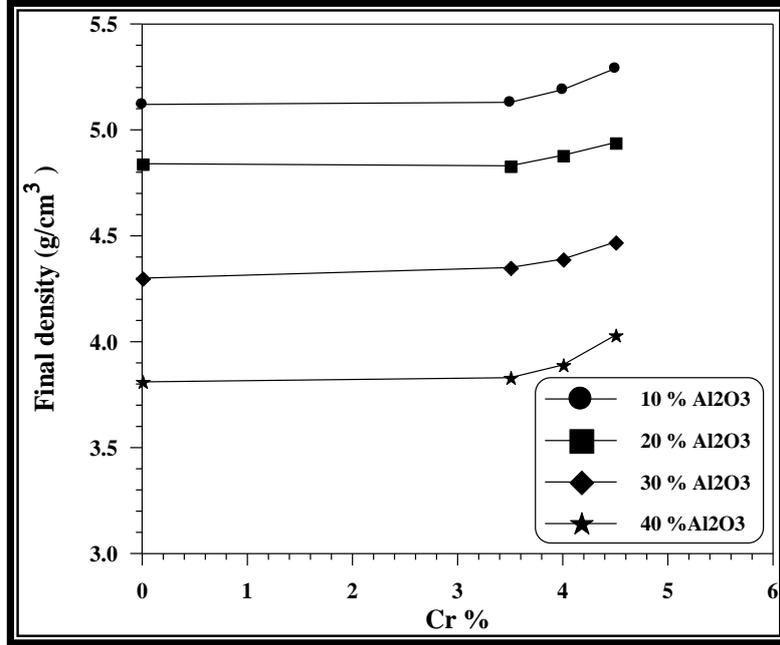
التحقيقية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$) عملياً ونظرياً .



(١٧-٤) تأثير
البورون على

شكل)
إضافة

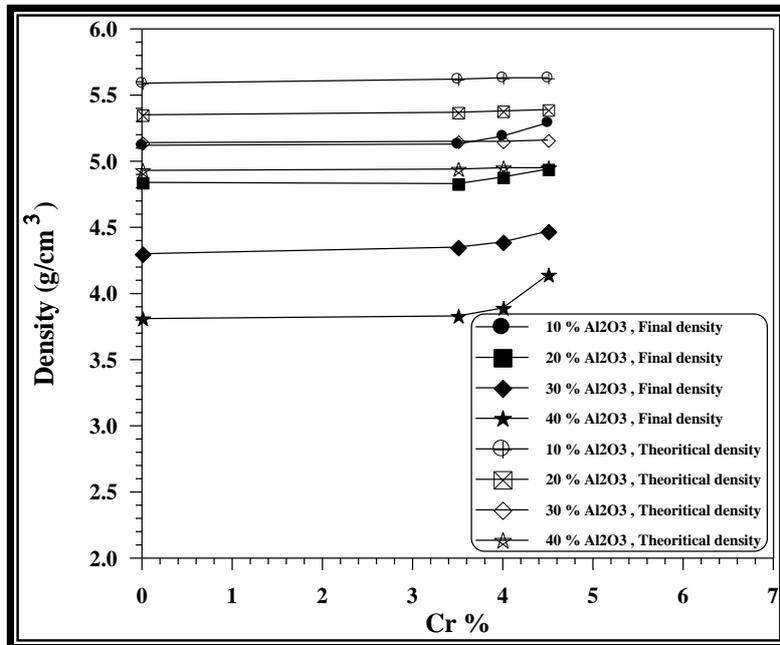
المسامية النهائية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني
 ($NiAl-Al_2O_3$) .



٢٠-٤) تأثير
الكروم
النهائية للمادة

شكل)
إضافة
على الكثافة

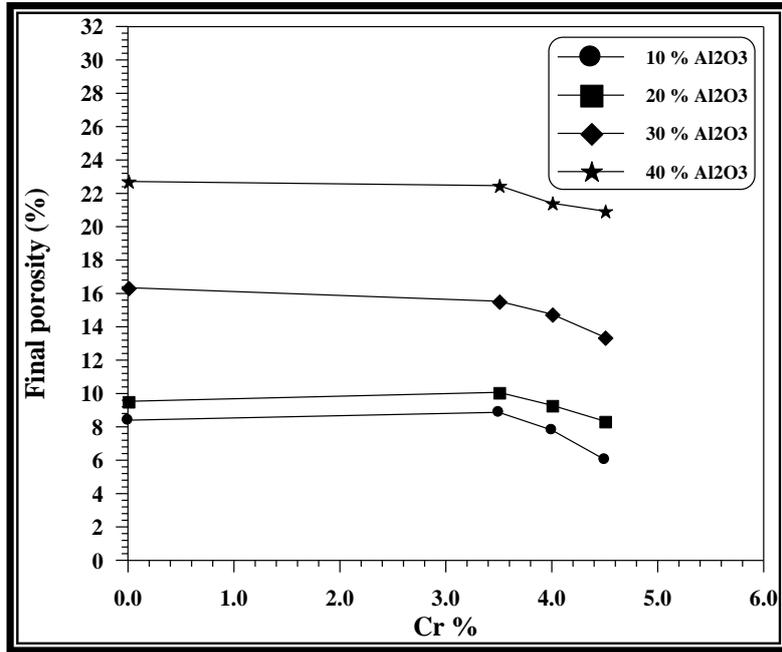
المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$) .



(٢١-٤)
النسبة الوزنية
للكروم

شكل
العلاقة بين
النسبة

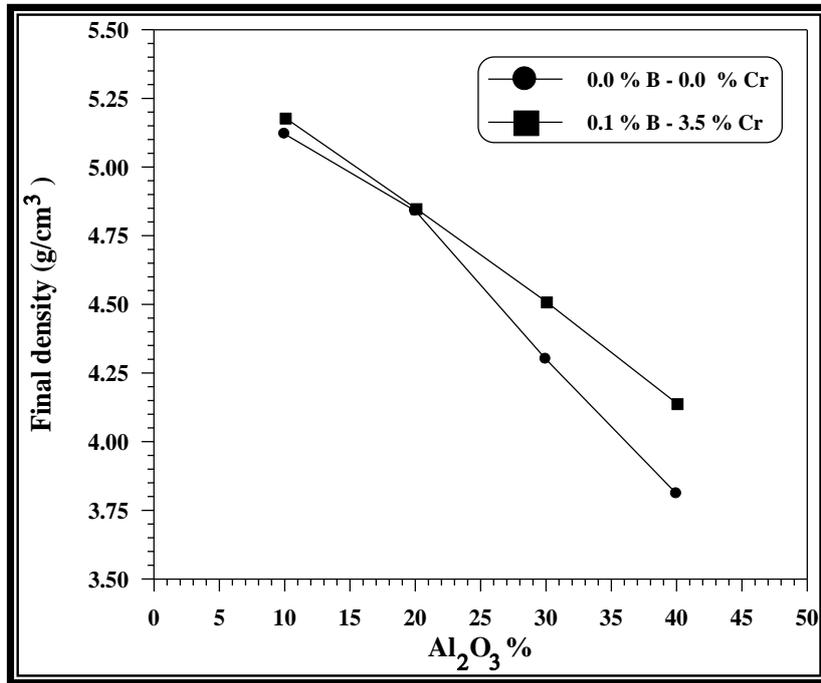
والكثافة الحقيقية للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$) عملياً ونظرياً .



تأثير
الكروم
النهائية للمادة

شكل)
إضافة
على المسامية

المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$).

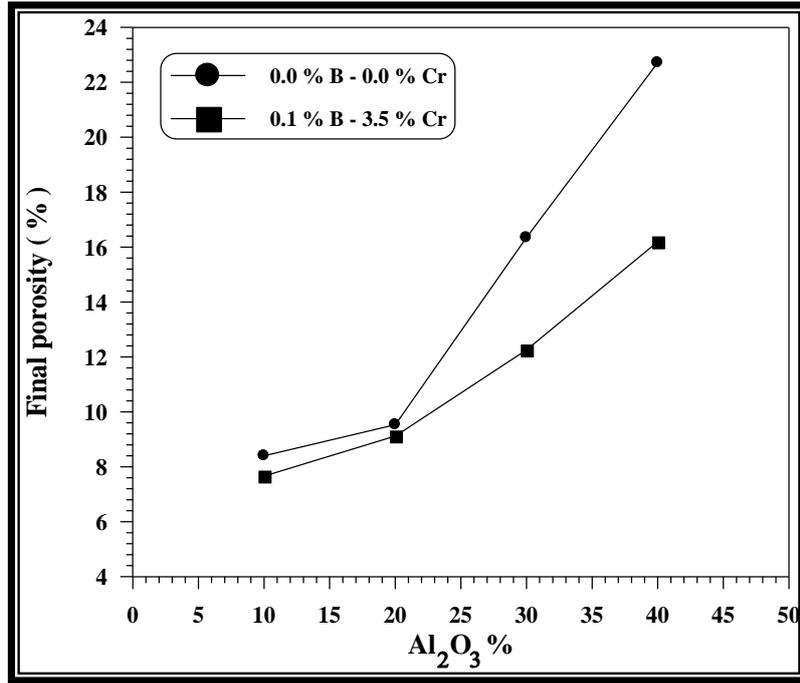


تأثير
الألمينا
الكثافة

شكل)
إضافة
على

النهائية لألمينايد النيكل $NiAl$

(العينات المحتوية على البورون والكروم معاً).



شكل (٤-٢٤) تأثير النسبة الوزنية المئوية للألومينا على المسامية النهائية لألومينايد النيكل NiAl (العينات المحتوية على البورون والكروم معاً) .

نتائج الاختبارات الميكانيكية Results of Mechanical Testing

٣-٤

نتائج اختبار مقاومة الإنضغاط Results of Compression Test

١-٣-٤

١-١-٣-٤ - تأثير إضافة الألومينا على مطيلية ومقاومة ألومينايد النيكل : NiAl

تبين الأشكال (٢٦-٤) و (٢٧-٤) و (٢٩-٤) تأثير النسبة الوزنية المئوية للألومينا على مقاومة الإنضغاط لألومينايد النيكل NiAl ، حيث نلاحظ من هذه الأشكال أنه كلما زادت نسبة الألومينا المضافة كلما زادت مقاومة الإنضغاط للمركب NiAl. فالمادة المركبة ذات الأساس من هذا المركب والمحتوية على (١٠ wt% Al₂O₃) تمتلك مقاومة إنضغاط (٣١٨.٧٥ MPa) والمحتوية على (٢٠ wt% Al₂O₃) و (٣٠ wt% Al₂O₃) تمتلك مقاومة إنضغاط (٣٣١.٥٢ MPa) و (٣٥٣.١٣ MPa) على التوالي. بينما تزداد مقاومة الإنضغاط بزيادة نسبة الألومينا إلى (٤٠ wt% Al₂O₃) لتصبح حوالي (٣٨٢.٢ MPa) .

أما الأشكال (٢٥-٤) و (٢٨-٤) و (٣٠-٤) فتبين تأثير النسبة الوزنية المئوية للألومينا على انفعال الانضغاط لألومينايد النيكل NiAl. فهذا المركب يمتلك مطيلية (٢ %) عند درجة حرارة الغرفة كما هو مبين في الجدول (١-٢). وعليه فإن الشكل (٤-٣٦) يبين أن إضافة الألومينا تؤدي إلى تحسين مطيلية المركب NiAl ، إضافة (١٠ wt% Al₂O₃) تؤدي إلى زيادة انفعال انضغاط المركب NiAl بشكل كبير لتصل إلى حوالي (١١.٩٣ %) وتتناقص انفعال الانضغاط لهذا المركب شبه المعدني بزيادة نسبة الألومينا المضافة إلى (٢٠ wt%) (Al₂O₃) لتصبح (٧.٨١ %) ومن ثم إلى (٦.٤٢ %) بإضافة (٣٠ wt% Al₂O₃) ، وتستمر بالتناقص لتصبح (٥.٩٥ %) بإضافة (٤٠ wt% Al₂O₃). أي أن زيادة نسبة الألومينا المضافة تؤدي إلى نقصان انفعال انضغاط ألومينايد النيكل NiAl والتي هي في كل الأحوال أعلى من مطيلية المركب NiAl لوحده. والسبب الرئيسي في زيادة مقاومة ومطيلية المركب NiAl يعزى إلى التصاق دقائق الألومينا بسطح دقائق ألومينايد النيكل NiAl بعد عملية المزج بطاحونة الكرات ، ومن ثم تشتتها على الحدود البلورية للمادة المركبة (NiAl-) (Al₂O₃) كما هو مبين في الشكل (٤-٣٧) ، أي أن دقائق الألومينا قد حدثت من النمو الحبيبي لدقائق المركب NiAl وهو ما ذكره الباحث (C. W. Hwang) [٢] والذي أوضح أن آلية التنعيم هذه هي السبب في امتلاك المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) بنية ناعمة جداً.

كذلك أوضح الباحث أن إضافة (١٠ wt% Al₂O₃) تؤدي إلى الحصول على أعلى انفعال انضغاط للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) بسبب آلية التنعيم تلك وكذلك بسبب قوة الربط الجيدة للألومينا بذرات النيكل وهو ما يجعل المنطقة الفاصلة (Interface Region) بين ألومينايد النيكل NiAl والألومينا صعبة الظهور بواسطة محلول الإظهار كما هو موضح في الشكل (٤-٣٧ a). ولكن مع زيادة نسبة الألومينا المضافة تقل مطيلية المادة المركبة (NiAl-) (Al₂O₃) بسبب زيادة مقاومة وصلادة هذه المادة وبسبب الاجهادات الحرارية المتبقية والمتولدة أثناء عملية التلييد والناجمة من الاختلاف الكبير في معاملي التمدد الحراري لألومينايد النيكل NiAl (١٢.٧ * ١٠^{-٦} / K) والألومينا (٧.٢ * ١٠^{-٦} / K) والتي تؤدي إلى نشوء عيوب كبيرة في الحدود البلورية للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) ، وهو ما يجعل المنطقة الفاصلة بين المركب NiAl والألومينا سهلة الظهور بواسطة محلول الإظهار كما هو مبين في الشكل (٤-٣٧ b).

٤-٣-١-٢ - تأثير إضافة البورون على مطيلية ومقاومة المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) :

يبين الشكل (٤-٢٥) تأثير إضافة البورون على الاستطالة في درجة حرارة الغرفة للمادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) ، حيث يلاحظ من هذا الشكل أن للبورون تأثير فعال جداً حيث كلما زادت نسبة البورون المضاف كلما زادت قيمة انفعال الانضغاط للمادة المركبة (NiAl-) (Al₂O₃) بشكل كبير جداً ، حيث تؤدي إضافة (٠.١ wt% B) إلى زيادة في قيمة انفعال انضغاط المادة المركبة (NiAl-١٠Al₂O₃) من (١١.٩٣ %) إلى (١٩.٢ %) ، وبزيادة نسبة البورون إلى (٠.٣ wt% B) تحدث زيادة كبيرة في انفعال الانضغاط لتبلغ حوالي (٢٧.٨١ %). بينما تؤدي زيادة نسبة البورون إلى (٠.٥ wt% B) على الحصول على أقصى انفعال انضغاط (٣٣.٩ %) وهذا الحال ينطبق مع بقية النماذج الأخرى. فبالنسبة للمادة المركبة (NiAl-٢٠Al₂O₃) (٨٠) نلاحظ حدوث زيادة في انفعال انضغاط درجة حرارة الغرفة من حوالي (٧.٨١ %) إلى حوالي (٢٩.٣٥ %) بإضافة (٠.٥ wt% B) وكذلك بالنسبة للمادة المركبة (NiAl-٣٠Al₂O₃) (٧٠) التي تزداد نسبة انفعال الانضغاط فيها من حوالي (٦.٤٢ %) إلى حوالي (٢٥.٠٥ %) بإضافة (٠.٥ wt% B). أما المادة المركبة (NiAl-٤٠Al₂O₃) (٦٠) فإن إضافة (٠.٥ wt% B) تؤدي إلى زيادة نسبة انفعال الانضغاط فيها من حوالي (٥.٩٥ %) إلى حوالي (٢٠.٤ %).

كذلك تعمل إضافة البورون على زيادة مقاومة الانضغاط للمادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) فالشكل (٤-٢٦) يبين أن إضافة (٠.١ wt% B) تؤدي إلى زيادة مقاومة الانضغاط من (٣٨٢.٢ MPa) إلى (٤٢٠.٧٢ MPa) وذلك بالنسبة للمادة المركبة (٦٠NiAl-٤٠ Al_2O_3) وإلى (٤٤٢.٠٦ MPa) بإضافة (٠.٣ wt% B). ثم تستمر بالزيادة لتصل إلى (٤٧٩.٢١ MPa) بإضافة (٠.٥ wt% B) ، وهكذا بالنسبة لبقية النماذج. إن التسيب المجهري (Microalloying) يعد من التقنيات التي استخدمت حديثاً في محاولة لتحسين مطيلية المركبين NiAl و Ni_2Al عند درجة حرارة الغرفة والذي يتضمن إضافة كميات صغيرة من عناصر السبك (عادةً في مجال ppm) وذلك لتغيير والسيطرة على كيميائية وتماسك الحدود البلورية لهذين المركبين [٦١].

ولقد أضيفت عناصر سبك كثيرة على المركب NiAl وأكثرها شيوعاً البورون والكربون والتيتانيوم والمغنيسيوم والمنغنيز والسليكون. وقد وجد أن إضافة البورون هي الأكثر فعالية لتحسين مطيلية ألومينايد النيكل الغني بالنيكل (NiAl-Rich Ni) نسبة النيكل (أكثر من ٦٠ wt% Ni) عند درجة حرارة الغرفة. علماً أن نسبة البورون المضاف تتراوح ما بين ٠.١-١ (wt% B) وإن أقصى انفعال انضغاط عند درجة حرارة الغرفة هي بحدود (٥٢ %) [٦١,٦٢].

وبالعودة إلى الشكل (٤-٢٥) ، نلاحظ بأن التأثير الفعال للبورون يعزى إلى انزاله على طول الحدود البلورية لألومينايد النيكل NiAl والذي يعمل على إعاقة نمو حبيباته وزيادة شدة الترابط ما بين هذا المركب شبه المعدني والألومينا وجذب ذرات النيكل إلى الحدود البلورية ، مما يخلق نوعاً من عدم الانتظام الكيميائي (Chemical Disorder) في منطقة الحدود البلورية. وهو ما يؤدي إلى تنوية أقل للشقوق ويحسن من قابلية حركة الانخلاعات في الاتجاه المجاور للحدود البلورية ، أي تغيير شكل الكسر من الكسر عبر الحدود البلورية إلى الكسر عبر البلورات والذي يعطى تقوية وتعزيز الخواص الميكانيكية للمادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) [٦١,٦٢].

٤-٣-١-٣ - تأثير إضافة الكروم على مطيلية ومقاومة المادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) :

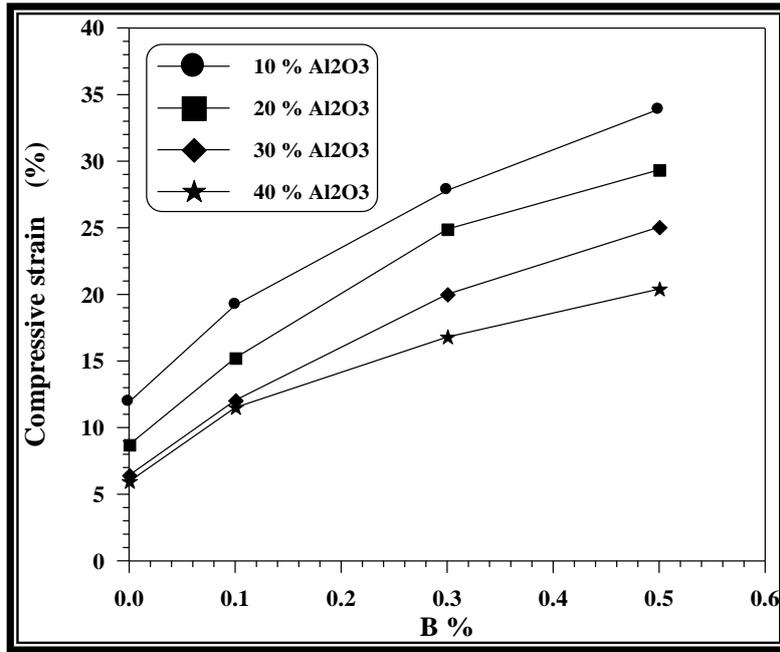
يبين الشكل (٤-٢٧) أن للكروم تأثير كبير على مقاومة ألومينايد النيكل NiAl. حيث إن إضافة (٣.٥ wt% Cr) إلى المركب NiAl تؤدي إلى حدوث زيادة كبيرة في مقاومة المادة المركبة (٩٠NiAl-١٠ Al_2O_3) من (٣١٨.٧٥ MPa) إلى (٣٧١.٢٦ MPa) ، وإلى (٣٧٥.٦ MPa) عند إضافة (٤ wt% Cr) ومن ثم تزداد إلى (٣٩٦.٦١ MPa) عند إضافة (٤.٥ wt% Cr) ، وهكذا بالنسبة لبقية النماذج. أما بالنسبة للمادة المركبة (٨٠NiAl-٢٠ Al_2O_3) والمادة المركبة (٧٠NiAl-٣٠ Al_2O_3) فإن إضافة (٤.٥ wt% Cr) تؤدي إلى زيادة مقاومة الانضغاط من (٣٣١.٥٢ MPa) إلى (٤٠٨.٧١ MPa) ، ومن (٣٥٣.١٣ MPa) إلى (٤٥٤.٤٧ MPa) على التوالي. بينما تؤدي إضافة (٤.٥ wt% Cr) إلى المادة المركبة (٦٠NiAl-٤٠ Al_2O_3) إلى الحصول على أقصى مقاومة انضغاط (٤٨٥.٦ MPa).

إن سبب الزيادة الكبيرة الحاصلة في المقاومة نتيجة إضافة الكروم يعزى إلى الاصلاح بالمحلول الجامد عن طريق تكوينه يوتكتك مع ألومينايد النيكل NiAl شكل (٢-٩). حيث تعتبر قابلية ذوبان الكروم بألومينايد النيكل NiAl منخفضة عند درجة حرارة الغرفة (١.٥ wt% Cr) [٤٥, ٤٨, ٤٥, ٢٣, ١٧]. والسبب الآخر هو بسبب تنعيم البنية المجهريّة [٤٥].

أما بالنسبة لانفعال الانضغاط ، فقد بينت النتائج أن للكروم تأثيراً أقل مما للبورون على انفعال انضغاط المادة المركبة (NiAl- Al_2O_3). حيث نلاحظ من الشكل (٤-٢٨) أن إضافة (٣.٥ wt% Cr) تؤدي إلى زيادة انفعال انضغاط المادة المركبة (٩٠NiAl-١٠ Al_2O_3)

Al_2O_3 من ١٠ (١١.٩٣ %) إلى (١٤.١ %) ، ومن ثم تزداد إلى (٢١.٣٥ %) عند إضافة (٤ wt% Cr). وتستمر بالزيادة لتصبح (٢٩.١٥ %) عند إضافة (٤.٥ wt% Cr).

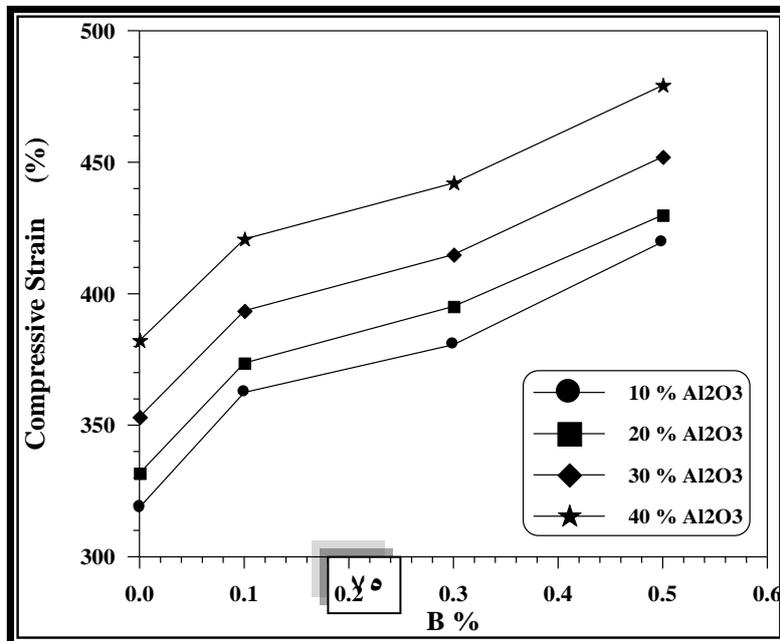
لقد بين الباحث (James E. Reynolds) [٦٣] ، أن إضافة الكروم إلى ألومينايد النيكل NiAl تعمل على زيادة قوة التماسك ما بين البلورات (الحدود البلورية) . بالإضافة إلى ذلك فإن إضافة الكروم تؤدي إلى زيادة الانفعال اللدن وبالتالي زيادة المطيلية بشكل كبير.



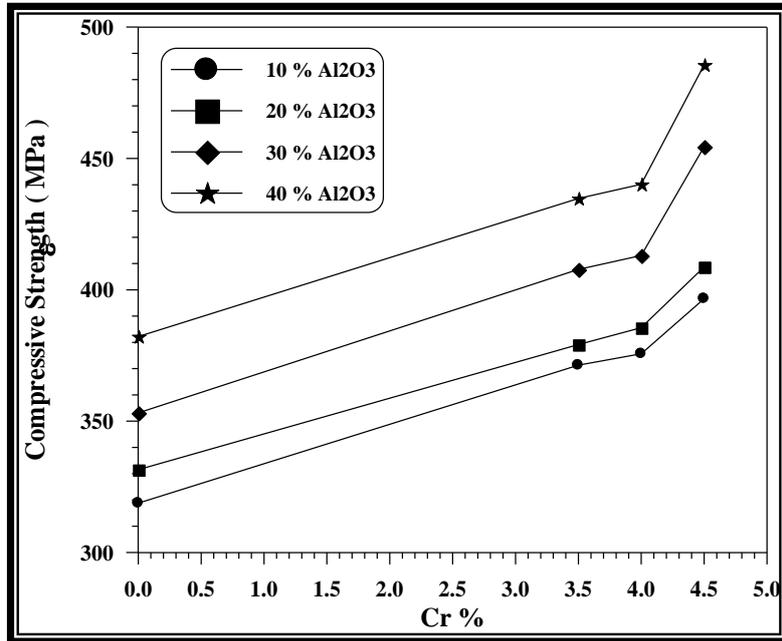
(٢٥-٤)
البورون على
المادة

شكل
تأثير إضافة
انفعال انضغاط

المركبة (NiAl-Al₂O₃) .



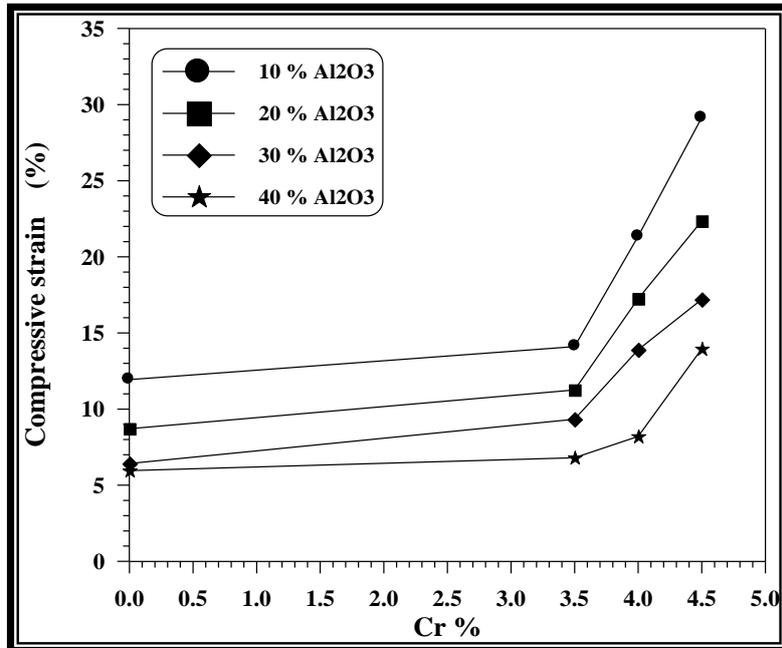
شكل (٤-٢٥) تأثير إضافة البورون على مقاومة انضغاط المادة المركبة ($NiAl-Al_2O_3$).



(٤-٢٦)
الكروم
انضغاط المادة

شكل
تأثير إضافة
على مقاومة

المركبة ($NiAl-Al_2O_3$).



(٤-٢٨)
الكروم
انضغاط المادة

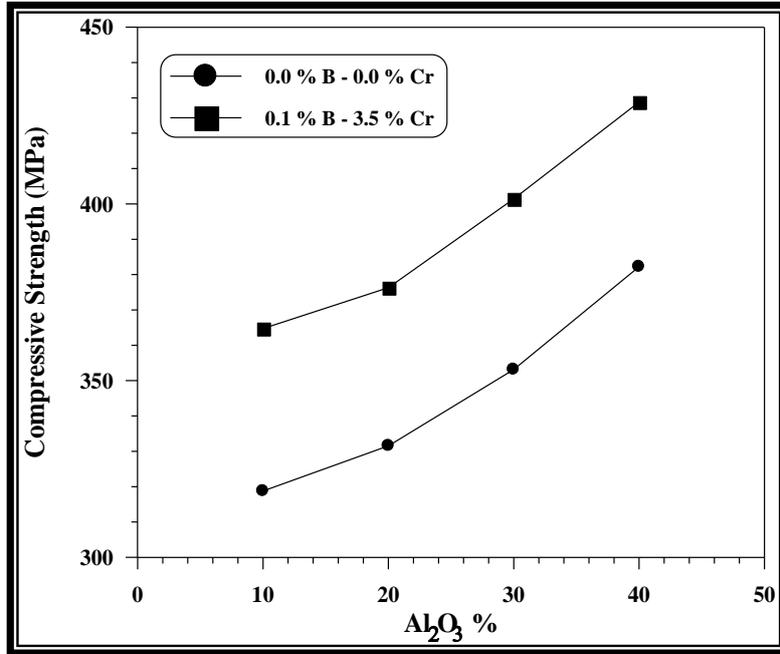
شكل
تأثير إضافة
على انفعال

المركبة ($NiAl-Al_2O_3$).

٤-١-٣-٤ - تأثير إضافة البورون والكروم معاً على مطيلية ومقاومة المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) :

بينت النتائج أن إضافة البورون والكروم معاً إلى ألومينايد النيكل NiAl تؤدي إلى زيادة مقاومة ومطيلية المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) على نحو يتوسط قيم المقاومة والمطيلية لهذه المادة من دون أية إضافات وتلك المحتوية على البورون والكروم كلاً على حدة.

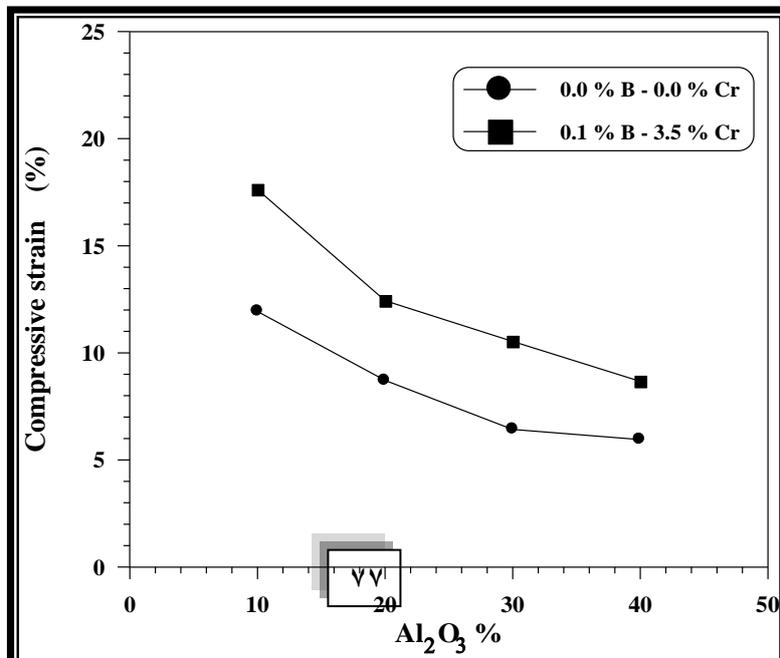
حيث يلاحظ من الشكلين (٤-٢٩) و (٤-٣٠) أن إضافة ٣.٥ wt% B , ٠.١ wt% Cr ، تؤدي إلى زيادة مقاومة انضغاط ومطيلية المادة المركبة (NiAl-٩٠ Al₂O₃ ١٠) من (٣١٨.٧٥ MPa) إلى (٣٦٤.٧٣ MPa) ، ومن (١١.٩٣ %) إلى (١٧.٢ %) على التوالي. ومن (٣٣١.٥٢ MPa) إلى (٣٧٦.٢٨ MPa) ومن (٨.٧١ %) إلى (١٢.٤٣ %) على التوالي بالنسبة للمادة المركبة (NiAl-٨٠ Al₂O₃ ٢٠) ، ومن (٣٥٣.١٣ MPa) إلى (٤٠١.٣٩ MPa) ومن (٦.٤٢ %) إلى (١٠.٥٣ %) بالنسبة للمادة المركبة (NiAl-٧٠ Al₂O₃ ٣٠). بينما تؤدي نفس الإضافة إلى زيادة مقاومة ومطيلية المادة المركبة (NiAl-٦٠ Al₂O₃ ٤٠) من (٣٨٢.٢ MPa) إلى (٤٢٨.٨١ MPa) ومن (٥.٩٥ %) إلى (٨.٦٧ %) على التوالي.



(٤-٢٩)
الألمينا على
الانضغاط

شكل
تأثير إضافة
مقاومة

النيكل
المحتوية على
والكروم

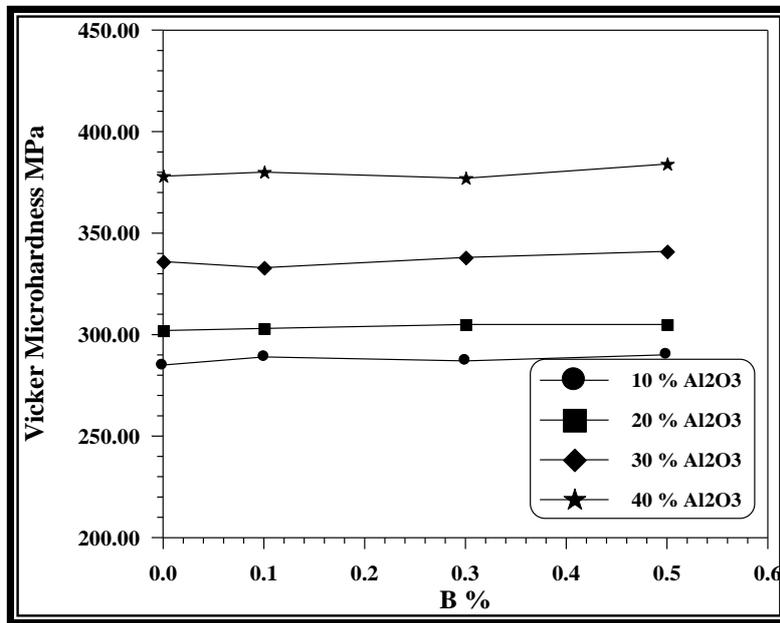


الألمينا
NiAl
(العينات)
البورون
معاً .

(W. Won [٣٧] والذي أوضح أن إضافة البورون ليس لها تأثير على صلادة ألومينايد النيكل NiAl.

أما بالنسبة للكروم فإضافته تؤدي إلى حدوث زيادة ليست بالكبيرة في صلادة المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃) كما هو مبين في الشكل (٤-٣٢). فمثلاً تؤدي إضافة (٣.٥ wt% Cr) إلى المركب NiAl إلى زيادة صلادة المادة المركبة (٩٠NiAl-١٠Al₂O₃) (٢٩٧ إلى ٣٠٢ MPa) ومن ثم تزداد إلى (٣٠٢ MPa) بإضافة (٤ wt% Cr) ، وتستمر بالزيادة لتبلغ (٣١٠ MPa) بإضافة (٤.٥ wt% Cr) ، وهكذا بالنسبة لبقية النماذج. 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 جداً التي تمتلكها النماذج النهائية.

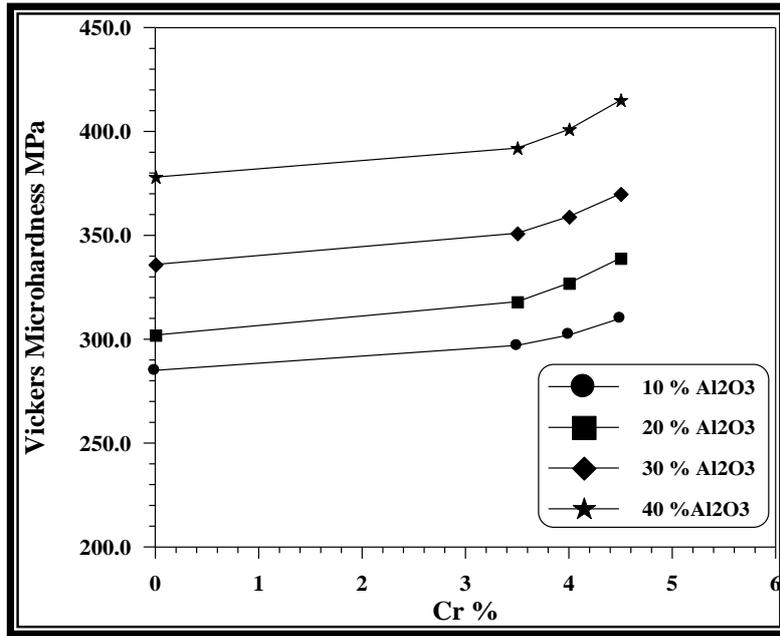
بينما تؤدي إضافة البورون والكروم معاً إلى حدوث زيادة طفيفة في صلادة المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃) كما هو موضح في الشكل (٤-٣٣). حيث تؤدي إضافة (٣.٥ wt% Cr - ٠.١ wt% B) إلى زيادة صلادة المادة المركبة (٩٠NiAl-١٠Al₂O₃) من (٢٨٥ MPa) إلى (٢٩١ MPa) ، ومن (٣٠٢ MPa) إلى (٣١٠ MPa) بالنسبة للمادة المركبة (٨٠NiAl-٢٠Al₂O₃) ومن (٣٣٦ MPa) إلى (٣٤٣ MPa) بالنسبة للمادة المركبة (٧٠NiAl-٣٠Al₂O₃) ، ومن (٣٧٨ MPa) إلى (٣٨٥ MPa) بالنسبة للمادة المركبة (٦٠NiAl-٤٠Al₂O₃).



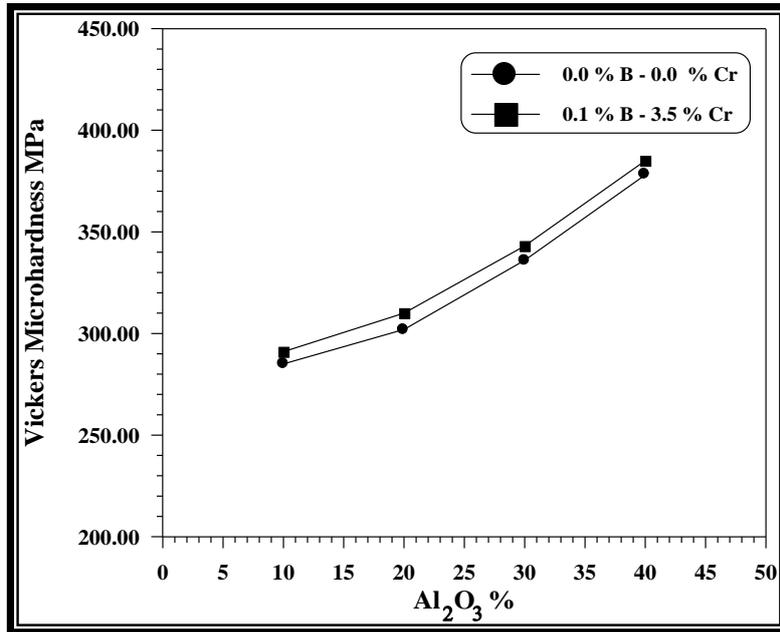
(٤-٣١)

شكل

تأثير إضافة البورون على صلادة المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃).



شكل (٤-٣٢) تأثير إضافة الكروم على صلادة المادة المركبة (NiAl-Al₂O₃).



(٤-٣٣)
الآلومينا على
ألومينايد

شكل
تأثير إضافة
صلادة

النيكال NiAl

(النماذج المحتوية على البورون والكروم معاً) .

نتائج اختبار البلى الالتصاقى Results of Adhesive Wear Test

٤-٣-٣

٤-٣-٣-١ - تأثير إضافة الألومينا على مقاومة البلى الالتصاقى لألومينايد النيكل NiAl :

تبين الأشكال (٤-٣٤) و (٤-٣٥) و (٤-٣٦) أن إضافة الألومينا تؤدي إلى انخفاض معدل البلى الالتصاقى لألومينايد النيكل NiAl. حيث نلاحظ من هذه الأشكال أن معدل البلى الالتصاقى للمادة المركبة ذات الأساس من هذا المركب شبه المعدني المضاف له (١٠ wt% Al_2O_3) هو (9.127×10^{-7} g/cm) وبزيادة نسبة الإضافة إلى (٢٠ wt% Al_2O_3) فإن معدل البلى الالتصاقى ينخفض إلى (5.138×10^{-7} g/cm) ، ومن ثم ينخفض إلى (1.292×10^{-7} g/cm) بإضافة (٣٠ wt% Al_2O_3). ويستمر معدل البلى الالتصاقى بالانخفاض إلى (1.299×10^{-7} g/cm) بإضافة (٤٠ wt% Al_2O_3) ، وهكذا بالنسبة لبقية النماذج. ويمكن أن يعزى السبب في ذلك إلى زيادة صلادة ألومينايد النيكل NiAl نتيجة إضافة الألومينا ، حيث أنه من المعروف أن زيادة الصلادة تؤدي إلى حدوث نقصان في معدل البلى [٦٤].

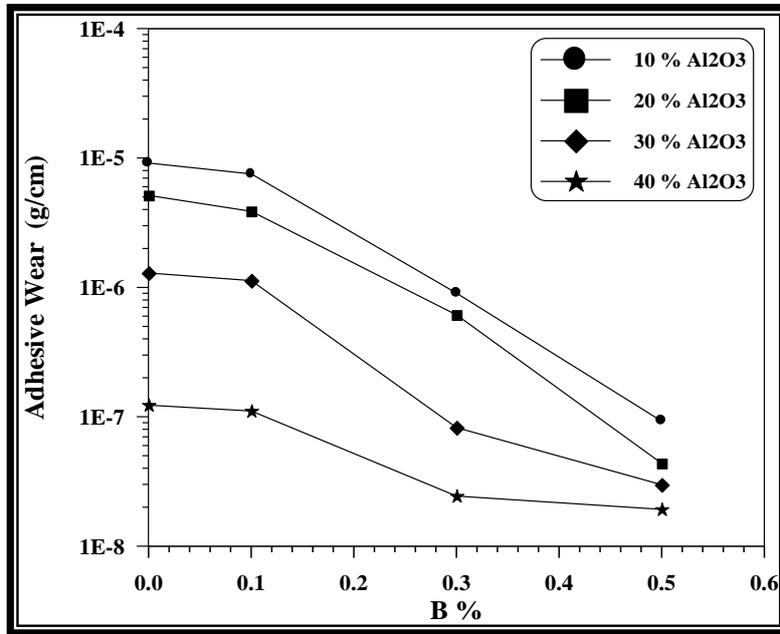
٤-٣-٣-٢ - تأثير إضافة البورون والكروم على معدل البلى الالتصاقى للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني (NiAl- Al_2O_3) :

بينت النتائج المبينة في الشكلين (٤-٣٤) و (٤-٣٥) أن إضافة البورون والكروم تؤدي إلى حدوث انخفاض في معدل البلى الالتصاقى للمادة المركبة (NiAl- Al_2O_3). فالشكل (٤-٣٤) يبين تأثير إضافة البورون على معدل البلى الالتصاقى للمادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) (٠.١ wt% B) إلى المادة المركبة (٩٠NiAl-١٠ Al_2O_3) يؤدي إلى انخفاض معدل البلى الالتصاقى من (9.127×10^{-7} g/cm) إلى (7.534×10^{-7} g/cm) ، وإلى (9.005×10^{-7} g/cm) بإضافة (٠.٣ wt% B). ويستمر معدل البلى الالتصاقى بالانخفاض إلى (9.236×10^{-8} g/cm) بإضافة (٠.٥ wt% B) وهكذا بالنسبة لبقية النماذج.

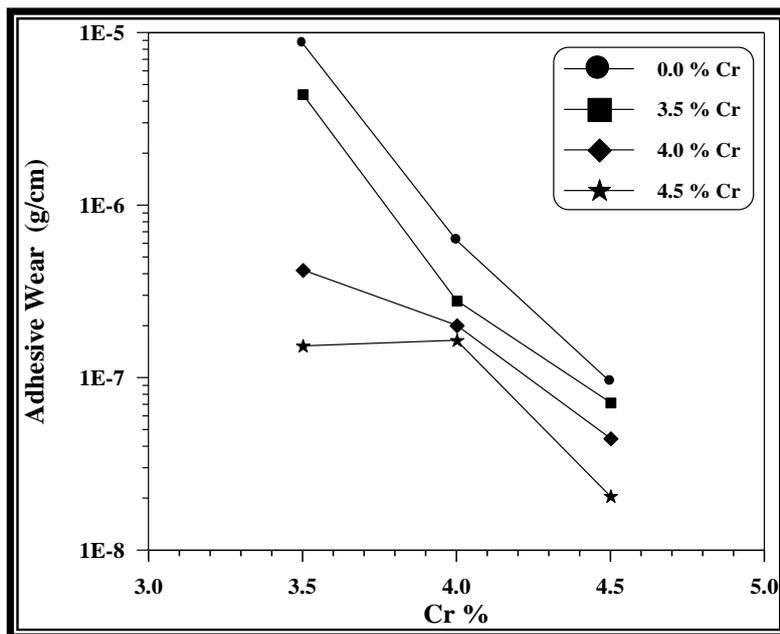
أما بالنسبة للكروم فإضافة (٣.٥ wt% Cr) إلى المادة المركبة (٩٠NiAl-١٠ Al_2O_3) تؤدي إلى حدوث انخفاض في معدل البلى الالتصاقى من (9.127×10^{-7} g/cm) إلى (8.655×10^{-7} g/cm) ، وإلى (9.445×10^{-8} g/m) بإضافة (٤.٥ wt% Cr) وهكذا بالنسبة لبقية النماذج.

بينما تؤدي إضافة البورون والكروم معاً إلى حدوث انخفاض كبير في معدل البلى الالتصاقى للمادة المركبة (NiAl- Al_2O_3) كما هو مبين في الشكل (٤-٣٦). فمعدل البلى الالتصاقى للمادة المركبة (٩٠NiAl-١٠ Al_2O_3) ينخفض من (9.127×10^{-7} g/cm) إلى (5.083×10^{-7} g/cm) بإضافة (٣.٥ wt% Cr - ٠.١ wt% B) ، ومن (5.138×10^{-7} g/cm) إلى (1.856×10^{-7} g/cm) للمادة المركبة (٨٠NiAl-٢٠ Al_2O_3) ومن (1.292×10^{-7} g/cm) إلى (5.119×10^{-7} g/cm) للمادة المركبة (٧٠NiAl-٣٠ Al_2O_3). وأخيراً من (1.299×10^{-7} g/cm) إلى (1.773×10^{-7} g/cm) للمادة المركبة (٦٠NiAl-٤٠ Al_2O_3). ويمكن أن يعزى سبب انخفاض معدل البلى الالتصاقى

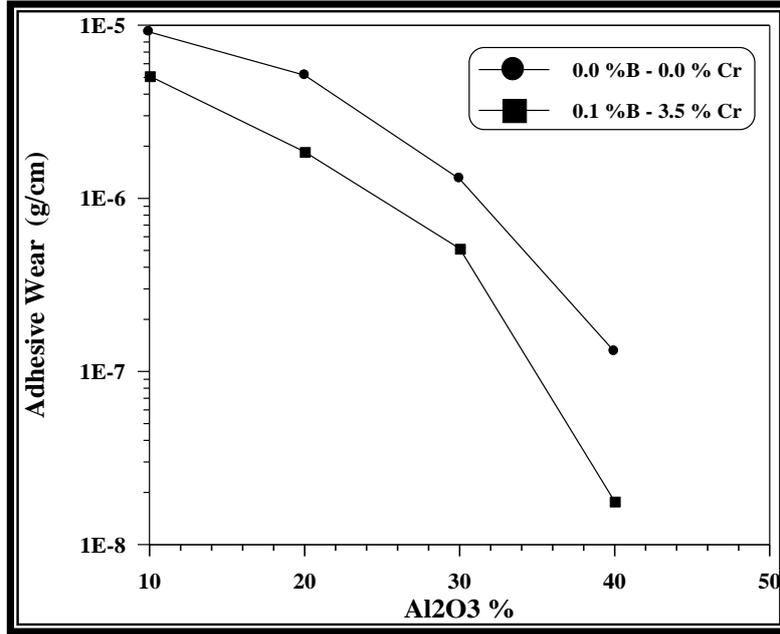
نتيجةً لزيادة مقاومة انضغاط المادة المركبة ($NiAl-Al_2O_3$) وبالتالي زيادة الصلادة بسبب آلية الإصلاذ بالمحلول الجامد بفعل إضافة الكروم [١٧].
 أخيراً يبين الجدول (٤-٢) نتائج الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية الكاملة لكافة النماذج للمادة المركبة ذات الساس شبه المعدني ($NiAl / Al_2O_3$).



شكل (٤-٣) تأثير إضافة البورون على معدل البلى الالتصقي للمادة المركبة ($NiAl-Al_2O_3$).



شكل (٤-٣٥) تأثير إضافة الكروم على معدل البلى الالتصاقى للمادة المركبة ($NiAl-Al_2O_3$).

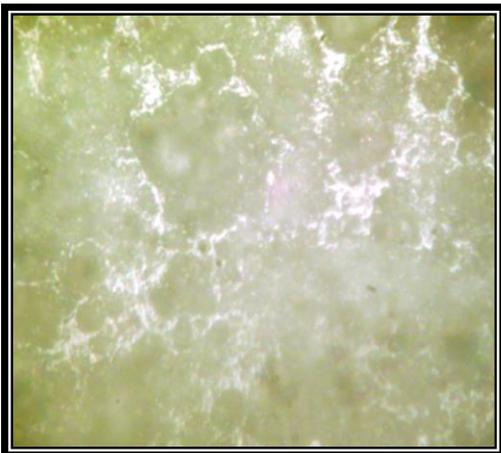


شكل (٤-٣٦) تأثير إضافة الألومينا على معدل البلى الالتصاقى لألومينايد النيكل $NiAl$ (النماذج المحتوية على البورون والكروم معاً).

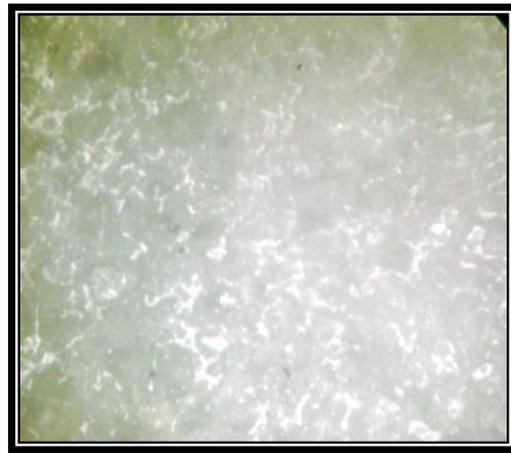
نتائج الفحص المجهرى Results of Metallography

٤-٤

نلاحظ من هذا الشكل ، أن دقائق الألومينا تتواجد فقط على الحدود البلورية لألومينايد النيكل $NiAl$. وهو يتوافق مع ما ذكره الباحث (C. S. Hwang) و (D. L. Coo) [٢].

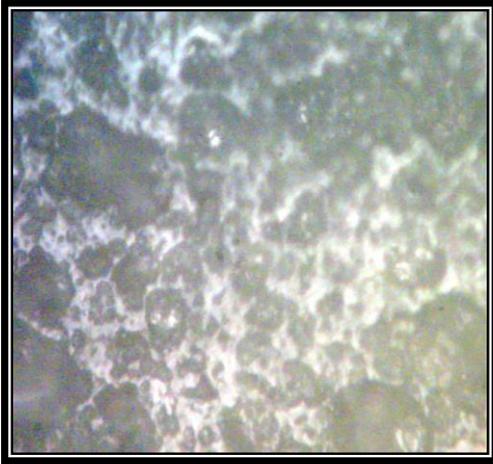


(a)



(b)

المادة المركبة (٨٠ NiAl-٢٠ Al₂O₃)



المادة المركبة (٩٠ NiAl-١٠ Al₂O₃)



Al₂O₃

O₃

NiAl

(c)

المادة المركبة (٧٠ NiAl-٣٠ Al₂O₃)

(d)

المادة المركبة (٦٠ NiAl-٤٠ Al₂O₃)

شكل (٤-٣٧) البنى المجهرية لبعض العينات المستخدمة في الدراسة الحالية.

المصادر References

- [١] Batsirai M. Mutasa, *Defect Structures in Ordered Intermetallics; Grain Boundaries and Surfaces*, PhD Thesis, May, (١٩٩٧), Blacksburg, Virginia.
- [٢] Chii Shyang Hwang and Dong Lin Coo, *Fabrication and Mechanical Properties of Al₂O₃ Reinforced NiAl Composites*, Engineering Materials Vol. ٢٤٩ (٢٠٠٣) pp. ٢٢٣-٢٢٦.
- [٣] G. W. Meetham and M. H. Van de Voorde, *Materials for High Temperature Engineering Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (٢٠٠٠).
- [٤] Changhai Li, Textbook : *High Temperature Materials*, (١٩٩٩).
- [٥] Donald R. Askeland, *The Science and Engineering of Materials*, ٤th Edition, Thomson learningTM, (٢٠٠٣).
- [٦] V. B. John, *Introduction to Engineering Materials*, ٢nd Edition, Macmillan Publishers Ltd., (١٩٨٥).
- [٧] د. قحطان الخزرجي، *مخططات التوازن الحراري*، الجامعة التكنولوجية، بغداد، (٢٠٠٣).
- [٨] د. قحطان الخزرجي، د. شاكر السامرائي، *أسس هندسة المعادن*، مطبعة جامعة الموصل، (١٩٨٤).
- [٩] Oak Ridge National Laboratory Intermetallics Program, The National Academy of Science, (٢٠٠٠).
- [١٠] P. Threadgill, *The Remarkable Properties of Intermetallic Alloys*, Materials World, Vol. ٣, (١٩٩٥), pp. ١٨٧-١٨٨.
- [١١] J. R. Davis, *Metals Handbook*, Desk Edition, ٢nd Edition, ASM International, (١٩٩٨).
- [١٢] R. S. Khurmi and R. S. Sedha, *Materials Science*, ٣rd Edition, (١٩٩٥).
- [١٣] William D. Callister, *Science and Engineering An Introduction*, ٥th Edition, John Wiley and Sons, Inc., (٢٠٠٠).
- [١٤] David K. Felbeck and Anthony G. Atkins, *Strength and Fracture of Engineering Solids*, ٢nd Edition, Prentice-Hall, Inc., (١٩٩٦).
- [١٥] Irving Granet, *Modern Materials Science*, Reston Publishing Company, Inc., (١٩٨٠).
- [١٦] Kenneth G. Budinski, *Engineering Materials Properties and Selection*, ٥th Edition, Prentice-Hall Inc., (١٩٩٦).
- [١٧] Mats Eskner, *Mechanical Behavior of Gas Turbine Coating, Doctoral Thesis*, Royal Institute of Technology, Stockholm, (٢٠٠٤).
- [١٨] V. K. Sikka, M. L. Santella and J.E. Orth, *Processing and Operating Experience of Ni₃Al-Based Intermetallic Alloy IC-٢٢١M*, Materials Science and Engineering A ٢٣٩-٢٤٠ (١٩٩٧) ٥٦٤-٥٦٩.
- [١٩] N. S. Stoloff, C. T. Liu and S. C. Deevi, *Emerging Application of Intermetallics*, Intermetallics ٨ (٢٠٠٠) ١٣١٣-١٣٢٠.

- [٢٠] Deevi S. C. And Sikka V. K., US Patent No. ٥,٩٦٥,٢٧٤, ١٢ October (١٩٩٩).
- [٢١] Kiyotaka Matsuura and Masayuki Kudoh, *Grain Refinement of Combustion-Synthesized NiAl by Addition of Ceramic Particles*, Materials Science and Engineering A ٢٣٩-٢٤٠ (١٩٩٧) ٦٢٥-٦٣٢.
- [٢٢] Hahn Choo, Philip Nash and Marek Dollar, *Mechanical Properties of NiAl-AlN-Al₂O₃ Composites*, Materials Science and Engineering A ٢٣٩-٢٤٠ (١٩٩٧) ٤٦٤-٤٧١.
- [٢٣] V. M. Sglavo, F. Marino, B. R. Zhang and S. Gialanella, *NiAl Intermetallic Compound as A second Phase in Al₂O₃ Ceramic Composites*, Materials Science and Engineering A ٢٣٩-٢٤٠ (١٩٩٧) ٦٦٥-٦٧١.
- [٢٤] W. H. Tuan, S. T. Chang, W. B. Chou, H. C. You, Y. P. Pay and I. C. Lin, *Effect of Iron Addition on the Mechanical Properties of Al₂O₃-NiAl CMMCs*, Engineering Materials Vols. ١٢٧-١٣١ (١٩٩٧) pp. ٤٤٧-٤٥٤.
- [٢٥] W. Hu, K. Wen, J Mayer and G. Gottstein, *Investigation on Interface Structure and Chemical Stability in a Composite of NiAl/Al₂O₃-Fiber coated with BN*, Nanobereichs analytic mittels EELS und EF TEM, ١٨.bis.٢٠. September (٢٠٠٠), Graz, Austria.
- [٢٦] D. Olszak, *Mechanically Alloyed Nanocrystalline NiAl-Al₂O₃ Composite Powders*, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark (٢٠٠١).
- [٢٧] R. A. Varin, *Intermetallics : Crystal Structures*, Elsevier Science Ltd., (٢٠٠٠).
- [٢٨] Yucong Huang, *Comparison of Mechanical Properties of NiAl Thin Films in Disordered FCC and Ordered L₁ Phases*, PhD Thesis, May, (٢٠٠١), Cambridge, Massachusetts.
- [٢٩] Peter A. Thornton and Vito J. Colangelo, *Fundamental of Engineering Materials*, Prentice Hall Inc., (١٩٨٥).
- [٣٠] Michel W. Barsoum, *Fundamentals of Ceramics*, International Edition, McGraw Hall Book Co., (١٩٩٧).
- [٣١] Markus A. Müller, *Aktivierungsvolumen und chemische Umgebung von thermischen Leerstellen in intermetallischen Verbindungen*, Diploma Thesis, Universität Stuttgart, (٢٠٠٠).
- [٣٢] K. Change, R. Darolia and H. Lipsitt, Acta Metallurgica et Materialia ١٠, ٢٧٢٧ (١٩٩٢).
- [٣٣] Sauthoff G., *Intermetallics*, VCH (١٩٩٥).
- [٣٤] K. Change, R. Darolia and H. Lipsitt, *Fracture of B₂ Aluminide Single Crystals, in Materials Research Society Symposium Proceedings*, Volume ٢١٣, pp. ٥٩٧-٦٠٢, Materials Research Society (١٩٩١).
- [٣٥] K. Hahn and K. Vendula, Scripta Metallurgica ٢٣, ٧ (١٩٨٩).
- [٣٦] K. Vedula and P. Khadkikar, *Environmental embrittlement-a major cause for low ductility of ordered Intermetallics, in High Temperature*

- Aluminides and Intermetallics*, Edited by C. T. Liu and C. G. McKamey, Page ١٣٣, TMS, Warrendale, PA ١٥٠٨٦, (١٩٩٠).
- [٣٧] C. W. Won, H.R. Lee, S. S. Cho and B. S. Chun, *Effect of Boron on the densification of Al-Ni Intermetallics Compounds by HPCS*, High Temperature Capillarity ٢٩ June (١٩٩٧).
- [٣٨] Tatsuhiko Aizawa and Junji Kihara, *Fabrication of Ni-Sheated Nickel Aluminide Wires From Mechanically Alloyed Precursors*, Materials Science and Engineering A ٢٣٩-٢٤٠ (١٩٩٧) ٥٢٢-٥٣١.
- [٣٩] Pada Ramasundaram, Randy Bowman and Wolè, *An Investigation of Fatigue and Fracture in NiAl-Mo Composites*, Materials Science and Engineering A ٢٤٨ (١٩٩٨) ١٣٢-١٤٦.
- [٤٠] L. Z. Zhou, J. T. Guo and G. J. Fan, *Synthesis of NiAl-TiC Nanocomposite by Mechanical Alloying Elemental Powders*, Materials Science and Engineering A ٢٤٩ (١٩٩٨) ١٠٣-١٠٨.
- [٤١] H. Choo, P. Nash and M.A. M. Bourke, *Relaxation of Thermal Residual Stresses in NiAl-AlN-Al₂O₃ Composites During Heating*, LANSCE. Activity Report, (١٩٩٨).
- [٤٢] A. I. Kovalev and D. L. Wainstein, *Effect of Alloying on Electronic Structure, Strength and Ductility Characteristics of Nickel Aluminide*, Surface Phenomena Researches Group, Moscow, Russia, (٢٠٠٤).
- [٤٣] G. K. Dey, *Physical Metallurgy of Nickel Aluminides*, Sâdhanâ Vol. ٢٨, Parts ١ & ٢, February/April (٢٠٠٣), pp. ٢٤٧-٢٦٢.
- [٤٤] Noebe R. D., Bowman R. R. and Nathal M. V. (١٩٩٧), *Physical and Metallurgy of NiAl*, pp ٢١٢-٢٩٦.
- [٤٥] W. S. Walston, R. Darolia and D. A. Demania, *Impact Resistance of NiAl Alloys*, Materials Science and Engineering A ٢٣٩-٢٤٠ (١٩٩٧) ٣٥٣-٣٦١.
- [٤٦] C. T. Liu and Lee M. Pike, *Advanced Intermetallics/Metals and Ceramics Composites*, FY (١٩٩٨), Materials Capability Development, Oak Ridge National Laboratory.
- [٤٧] G. Fromeyer and C. Derder, *Microstructure and Mechanical Properties of NiAl-(Cr) and TiAl-(Cr) Intermetallic Alloyes*, J Phys., III France (١٩٩٧) ٢٣٩٣-٢٤٠٣.
- [٤٨] Johan Angenete, *Aluminide Diffusion for Ni Based Superalloys Coating and Oxide Microstructure*, Thesis of Doctor, Göteborg University, Göteborg, Sweden (٢٠٠٢).
- [٤٩] V. Seetharaman and S. L. Semiatin, *Intermetallic Compound-Principles and Practice*, Chapter ٣٠: Powder Metallurgy, pp. ٦٤٣-٦٦٢, John Wiley and Sons, Ltd, (٢٠٠٢).
- [٥٠] د. قحطان الخزرجي، *ميتالورجيا المساحيق*، جامعة بابل، (١٩٩٧).
- [٥١] د. قحطان الخزرجي، *الألمنيوم وسبائكها*، جامعة بابل، (١٩٩٢).
- [٥٢] Huang C. Y and Daehn G. S., *Densification of Al-Al₂O₃ Powder Composite by Pressure Cycling*, Acta Mater., ٤٥(١٠), (٢٠٠٥), ٤٢٨٣-٤٢٩٦.

- [٥٣] www.dcu.ie/~stokesjt/ThermalSpraying/Book/Chapter٥.pdf.
- [٥٤] www.dcu.ie/~stokesjt/ThermalSpraying/Book/Chapter١.pdf
- [٥٥] م. ف. أشبي و د. ر. ه. جونس، *المواد الهندسية مدخل لخواصها وتطبيقاتها*، ترجمة د جعفر طاهر الحيدري، الجامعة التكنولوجية، بغداد، (١٩٩٠).
- [٥٦] يرماكوف فيازنيكوف، *استعمال منتجات ميتالورجيا المساحيق في الصناعة*، دار مير للطباعة والنشر، روسيا، (١٩٨٨).
- [٥٧] فادية محمد جاسم الجنابي، *بناء برنامج تعليمي لدراسة ظاهرة البلى في المعادن*، أطروحة ماجستير، الجامعة التكنولوجية، بغداد، (١٩٩٩).
- [٥٨] Baker, I., Thayer School of Eng., Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, USA, ICDD Grant-in-Aid, (١٩٩٢).
- [٥٩] J. Eckert and I. Börner, *Nanostructure Formation and Properties of ball-milled NiAl Intermetallic Compound*, Materials Science and Engineering A٢٣٩-٢٤٠ (١٩٩٧) ٦١٩-٦٢٤.
- [٦٠] M. Lucaci, S. Gavrilu, M. Lungu, I. Vida Simiti and I. Roman, *A New Family of Nickel Powder for Electrical Engineering Application*, Journal of Optoelectronics and Materials Vol. ٦, No. ٣, September (٢٠٠٤), pp. ٩٤٧-٩٥٠.
- [٦١] S. S. Brenner and Hua Ming Jian, *Grain Boundary Segregation of Carbon and Boron in NiAl+B/C*, Scripta METALLURGICA et MATERIALIA, Vol. ٢٤, pp. ٦٦٧-٦٧٠, (١٩٩٠).
- [٦٢] S. S. Brenner and Hua Ming Jian, *On Grain Boundary Phases in Boron-Doped NiAl*, Scripta METALLURGICA et MATERIALIA, Vol. ٢٤, pp. ٦٧١-٦٧٦, (١٩٩٠).
- [٦٣] James E. Reynolds, John R. Smith, G. L. Zhao and David J. Srolovitz, *Adhesion in NiAl-Cr From First Principles*, Physical Review B, Vol. ٣٣, No. ٢٠, ١٥ May (١٩٩٦)-II.
- [٦٤] Myer Kutz, *Handbook of Materials Selection*, Chapter ١٤, Materials Selection for Wear Resistance, pp. ١٢٧٥-١٢٨٦, John Wiley and Sons, (٢٠٠٢).
- [٦٥] S. K. Pabi and B. S. Murty, *Synthesis of Nanocrystalline Alloys and Intermetallics by Mechanical Alloying*, Bull. Mater. Sci., Vol. ١٩, No. ٦, December (١٩٩٦), pp. ٩٣٩-٩٥٦.
- [٦٦] Zbiral J., Jangg G. and Korb G., (١٩٩٢), Mater. Sci. Forum ٨٨-٩٠, ١٩.
- [٦٧] Academician A. G. Merzhanov, A. S. Rogachev and A. E. Sychev, *Self-Propagating High-Temperature Synthesis: First Space Experiments*, Doklady Physical Chemistry, Vol. ٣٦٢, Nos. ١-٣, (١٩٩٨), pp. ٢٩٩-٣٠٣.
- [٦٨] Merzhanov A. G. and Sharikcer S. Yu, *SHS-Produced Powder and Their Processing*, Borovinskaya L. P., Ed, Chernogolovka: Izd., ISMAN, (٢٠٠٠).
- [٦٩] K. Ohsasa, K. Matsuura, H. Jinmon, M. Kudoh and T. Narita, Int. J. Cast. Met. Res., (٢٠٠٠), ١٣, No. ٤, ٢٢٣.
- [٧٠] Kiyotaka Matsuura and Masayuki Kudoh, *Joining Between NiAl and Heat Resistant Alloys by Reactive Casting*, Advanced Engineering Materials (٢٠٠١), ٣, No.٥.

تقنيات إنتاج المركب NiAl الأخرى Other Techniques for Prod. NiAl

التسبيك الميكانيكي (MA) Mechanical Alloying

الملاحق A

1-A

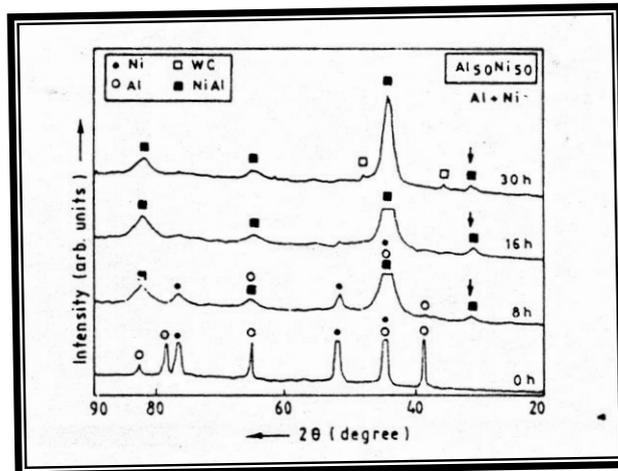
حديثاً في أنواع عديدة من المركبات شبه المعدنية. والطريقة نسبياً تعتبر بسيطة إذ يتم استخدام الطحن للجسيمات ، حيث تلتحم بصورة متكررة على البارد لتنتج أو تكوّن سبيكة أو خليط متجانس من المركبات. هذه التقنية تعرف بالتسبيك الميكانيكي (Mechanical alloying) (MA) أو الطحن بالكرات العالي الطاقة (High – energy Ball Milling) التي مهد الطريق إليها لأول مرة بواسطة Benjamin عام ١٩٧٠ [٦٥]. وهي تقنية تمتلك الأسس القادرة على إنتاج وتصنيع مواد جديدة من الحالة الصلبة ، وتعد طريقة اقتصادية لإنتاج كميات كبيرة من المواد الجديدة مع سيطرة جيدة من حيث التركيب والتجانس.

التسبيك الميكانيكي (MA) ينجز بواسطة أنواع مختلفة من طواحين الكرات عالية الطاقة. ففي البحوث أستعملت الطواحين الكوكبية والإهترازية ، وفي التصنيع استعملت الطواحين الأتريتورية أكثر الأحيان. إن العوامل الأكثر أهمية التي تعتمد عليها تقنية التسبيك الميكانيكي (MA) هي نسبة كتلة الكرة إلى كتلة المسحوق (عادةً ما بين ٥:١ و ٥٠:١) ودرجة الحرارة وزمن الطحن والمادة التي تصنع منها كرات الطحن [٤٩]. إن هذه التقنية تبشر بإنتاج مركبات شبه معدنية عالية الأداء بسبب مقدرتها على تحسين مطيلية درجة حرارة الغرفة لهذه المركبات الهشة.

ويتم إنتاج المركب شبه المعدني NiAl بتقنية التسبيك الميكانيكي (MA) عن طريق خلط مسحوقي النيكل والألمنيوم بالنسب الوزنية الآتية [٦٥] :



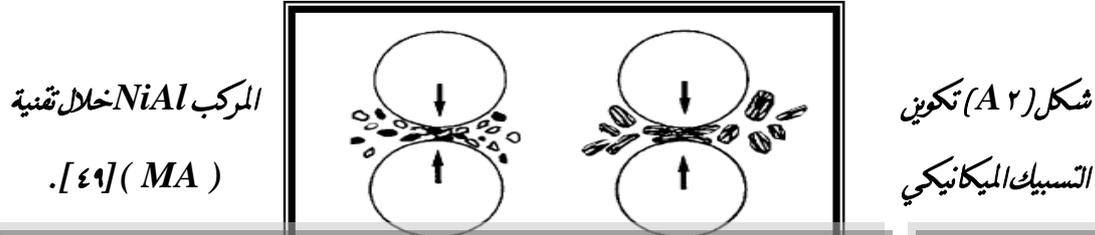
ومن ثم إجراء التسبيك الميكانيكي (MA) لهما داخل إحدى أنواع طواحين الكرات باستخدام وعاء أسطواني مصنوع من مادة صلدة جداً مثل كاربيد التنكستن WC وكرات من الفولاذ أو الألومينا أو الزركونيا وبسرع طحن تتراوح ما بين (٣٠٠-٢٠٠ rpm) ، والشكل (A١) يوضح نشوء المركب NiAl خلال عملية التسبيك الميكانيكي (MA) لمسحوق النيكل والألمنيوم. فمن هذا الشكل يمكن ملاحظة أن المركب NiAl يبدأ بالتكون بعد ثماني ساعات من إجراء عملية الطحن والمزج ، وتؤدي زيادة زمن الطحن والمزج إلى إختفاء قمم حيود الأشعة السينية للألمنيوم بعد مرور ١٦ ساعة ، بينما قمم حيود الأشعة السينية للنيكل تختفي بعد مرور ٢٠ ساعة. ويبين الشكل أيضاً إن المركب NiAl يمكن إنتاجه بالكامل وببنية منتظمة بعد مرور ٣٠ ساعة من عملية التسبيك الميكانيكي (MA) [٦٥]. أما آلية التسبيك الميكانيكي (MA) فقد نوقشت من قبل (Zibiral) [٦٦] على أساس إنتشار أحد عنصري السبك بالآخر في الحالة الصلبة اعتماداً على مخطط التوازن الحراري بينهما.



شكل (A1) مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) يوضح نشوء المركب NiAl عند أنحرمان

طحن مختلفة [٦٥].

إن الخطوة الأكثر أهمية في التسبيك الميكانيكي (MA) هي تصادم كرات الطحن بالمسحوق Ball – powder collision. في المساحيق المطيلية (مثل النيكل والألمنيوم والحديد والتيتانيوم... إلخ) يؤدي التشوه اللدن إلى حصول تفلطح (Flattening) لجسيمات المسحوق شكل (A2) عن طريق تكسر الجسيمات وإلتحامها على البارد بصورة متكررة. إن التكسر وإعادة الإلتحام في تقنية الطحن بالكرات العالي الطاقة يكونان في حالة توازن وإن معدل حجم جسيمات المسحوق يبقى خشن نسبياً وأكثر الأحيان يتراوح ما بين (٥٠-١٠٠ μm) [٤٩].

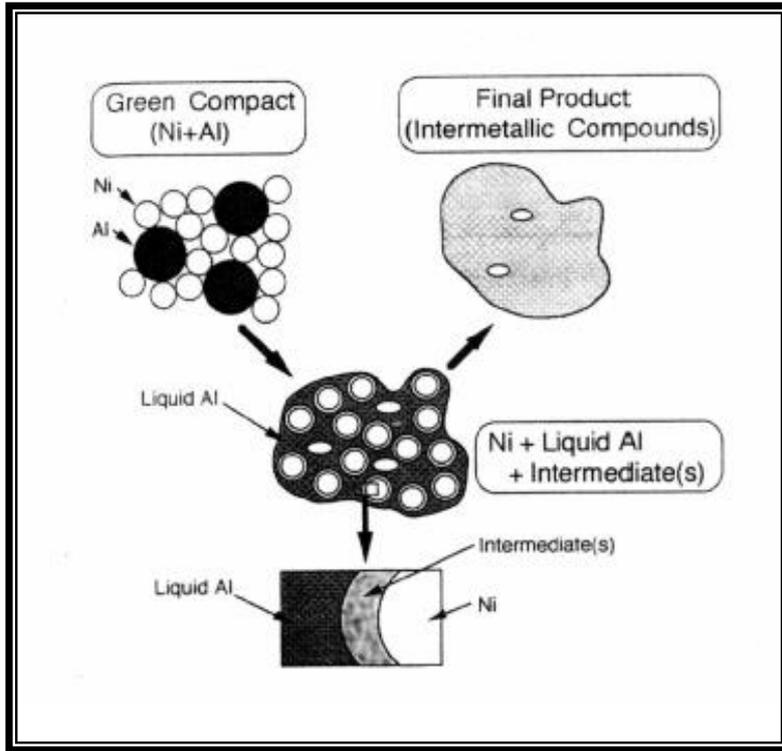


تقنية الدرجات الحرارية العالية المحفزة ذاتياً (SHS)
Self – Propagating High Temp. Synthesis

٢-A

العامين في محطة الفضاء الروسية التابعة مير (Mir Orbital Space Station) ، وذلك لتصنيع أجزاء من المركبات شبه المعدنية خصوصاً المركبين NiAl و Ni₃Al ، إذ أن من مزايا هذه التقنية عدم الحاجة إلى الأفران لإجراء هذه العملية لأنها تعتبر من العمليات الباعثة للحرارة (المتولدة ذاتياً) ، بالإضافة إلى قصر فترة إنجاز هذه العملية والتي تبلغ عدة دقائق بالمقارنة مع التقنيات الأخرى (التليد أو التسبيك الميكانيكي MA) [٦٧,٦٨].

وتتلخص العملية في خلط مسحوقي النيكل والألمنيوم ومن ثم تجري عملية الإيقاد لبدء تفاعل تكوين ألومينايد النيكل NiAl الباعث للحرارة ، حيث ينصهر مسحوق الألمنيوم الذي يتفاعل مع جسيمات النيكل الصلبة ليكون المركب NiAl كما هو مبين في الشكل (A3) [٦٠].



تقنية (A ٣)
الحسامرية
ذاتياً

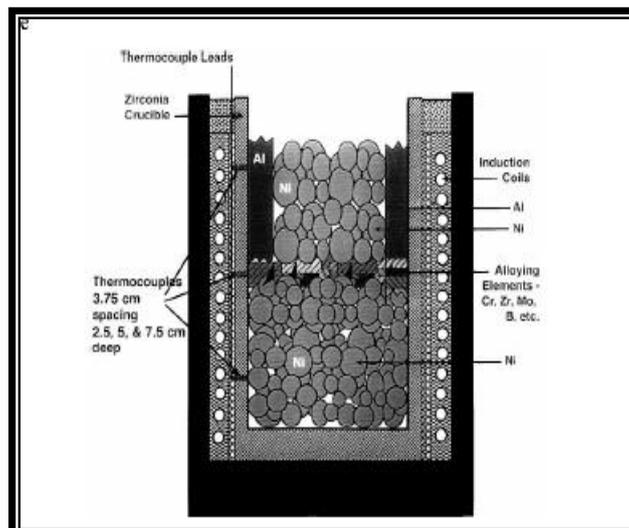
شكل
الدرجات
العالية المحفزة

(SHS) [٦٠].

تقنية الإنصهار الباعث للحرارة Exothermic Melting Process

٣-A

(National Laboratory , ORNL) عام ١٩٩٥ [٩]. إن عملية الإنصهار الباعث للحرارة (Exothermic Melting Process) الموضحة في الشكل (A ٤) تستخدم أفران الحمل المتعاقب وذلك لإستعمال حرارة تكوين فعالة في عملية الإنصهار ، حيث تستغل هذه التقنية الحرارة المتولدة في تفاعل المركب NiAl الباعث للحرارة لصهر عنصر السبك الرئيسين المكونين للسبيكة (النيكل والألمنيوم) وكذلك عناصر السبك الأخرى ولإنجاز عملية مزج جيدة للمركبات خلال فترة قصيرة جداً [٩,٣٢]. إن التفاعل الباعث للحرارة بين النيكل الصلب ومنصهر الألمنيوم يستعمل بصورة فعالة لإنتاج ألومينايد النيكل NiAl بمواصفات محددة [١٨].



شكل (A ٤) تقنية الانصهار الباعث للحرارة Exothermic Melting

Process [١٩].

- ويمكن تلخيص مميزات هذه التقنية كالاتي [١٨] :
- إنها تنتج سبيكة NiAl يمكن إعادة تصنيعها بالتقنية نفسها حتى الوصول إلى الخواص المطلوبة.
 - إن الحرارة الأولية المتولدة بهذه التقنية توفر حوالي % ٥٠ من الطاقة والوقت على عكس عمليات الإنصهار التقليدية.
 - إن الطاقة والوقت التي يتم توفيرهما بهذه التقنية بالإضافة إلى إطالة عمر البودقة المستعملة تؤدي إلى إختزال الكلفة بنحو % ٥٠ من الكلفة التي تتطلبها عمليات الصهر التقليدية.
 - يمكن بهذه التقنية إنتاج كميات كبيرة من ألومينايد النيكل NiAl (أكثر من ٥٠٠٠٠ كيلو غرام).

تقنية السبك التفاعلي

Reaction Casting Process

٤-A

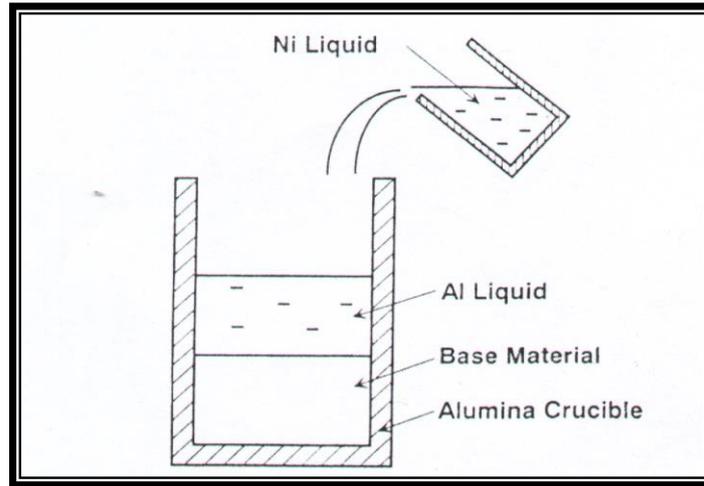
تعد هذه التقنية أحدث التقنيات المستخدمة في مجال إنتاج المركب NiAl والتي تم إبتكارها عام ٢٠٠٠ عن طريق الباحثين في قسم علم وهندسة المواد بجامعة هوكايدو اليابانية والتي أطلق عليها بالسبك التفاعلي (Reaction casting) [٦٩,٧٠]. هذه التقنية تختلف تماماً عن التقنيات السابقة ذلك أن تلك التقنيات تتضمن إنتاج المركب من مسحوق النيكل والألمنيوم ، بينما هذه التقنية تتضمن إنتاج هذا المركب شبه المعدني من منصهري النيكل والألمنيوم.

إن تقنية السبك التفاعلي تتضمن صهر عنصري النيكل والألمنيوم عاليي النقاوة تحت جو من غاز الأركون ومن ثم سكب منصهر الألمنيوم داخل بودقة مصنوعة من الألومينا ، بعدها يتم صب منصهر النيكل فوق منصهر الألمنيوم مباشرة بحيث تكون النسبة المولارية لمنصهري النيكل والألمنيوم (Ni:Al = ١:١). يحدث خلال عملية الصب هذه تفاعل تكوين ألومينايد النيكل NiAl الباعث للحرارة :



إذ تسبب الحرارة المنبعثة من هذا التفاعل في إرتفاع درجة الحرارة بصورة موضعية بحيث تصل درجة حرارة NiAl القصوى إلى حوالي 2603°C بسبب حرارته العالية ($\Delta H_f = -118 \text{ kJ/mol}$) التي هي أعلى من درجة إنصهاره ، وهذا يعني أن ألومينايد النيكل NiAl ينتج بهذه التقنية من دون الحاجة إلى تسخين داخلي والشكل (A٥) يبين مبدأ هذه التقنية.

إن من أهم مميزات تقنية السبك التفاعلي هي إختزال كمية الأوكسيد المتكون خلال عملية إنتاج المركب NiAl وزيادة مقاومته. ومن ناحية ثانية فإن إستعمال السوائل يخفض من قيمة المواد الأولية بسبب أن كلفة إنتاج سبيكتي نيكل وألمنيوم أقل من كلفة تصنيع مسحوقيهما [٧٠].



السبك التفاعلي

. [٧٠] NiAl

شكل (A٥)

لا إنتاج المركب

درجات حرارة الخدمة القصوى لألومينايدات المعادن
الانتقالية شبه المعدنية

*Attributes and Upper Temp. Limits
of Transition Metal Aluminides*

الملاحق B

الجدول (B١) درجات حرارة الخدمة القصوى لألومينايدات المعادن الانتقالية شبه المعدنية [١١].

Compound	Attributes	Max. use temperature, °C	
		Strength limit	Corrosion limit
Ni ₃ Al	High temperature strength; oxidation, carburization and nitridation resistance	١٠٠٠	١١٥٠
NiAl	High melting point; high thermal conductivity; oxidation, carburization, and nitridation resistance	١٢٠٠	١٤٠٠
Fe ₃ Al	Oxidation and sulfidation resistance	٦٠٠	١١٠٠
FeAl	Oxidation, sulfidation, molten salt, and carburization resistance	٨٠٠	١٢٠٠
Ti ₃ Al	Low density; good specific strength	٧٦٠	٦٥٠
TiAl	Low density; good specific strength; wear resistance	١٠٠٠	٩٠٠

قائمة الأشكال

List of Figures

٥	التطبيقات الرئيسية لمواد درجات الحرارة العالية	١-١
٨	تصنيف المواد المركبة حسب طور التقوية	٢-١
١٢	تأثير التآكل على ريشة توربين غازي غير مغطاة وأخرى مغطى سطحها بالأومينايد النيكل NiAl بعد ٢٥٠٠ ساعة من الطيران البحري عند علو منخفض.	٣-١
١٩	البنى البلورية المكعبة المنتظمة للأومينايدات	١-٢
١٩	البنية البلورية المنتظمة B٢	٢-٢
٢٠	خليتين مكعبتين بسيطتين متداخلتين	٣-٢
٢١	مخطط اوزان النيكل - ألمنيوم	٤-٢
٢٢	مخطط اوزان الكوبالت - ألمنيوم	٥-٢
٢٢	مخطط اوزان الحديد - ألمنيوم	٦-٢
٢٣	أشكال الكسر في الأومينايدات ذات البنية المجهرية B٢	٧-٢
٢٦	مقارنة الموصلية الحرارية كدالة لدرجة الحرارة بين بلورة NiAl مفردة والسبائك الفائقة ذات الأساس نيكل.	٨-٢
٣١	مخطط اوزان أومينايد النيكل NiAl - الكروم	٩-٢
٣٣	التغيرات التي تحدث في البنية المجهرية خلال تقنية المساحيق	١٠-٢
٣٤	طاحونة الكرات الكوكبية	١١-٢
٣٧	الكبس ذو الفعل المنفرد	١٢-٢
٣٨	تكوين الحدود البلورية خلال عملية التلييد	١٣-٢
٤٠	مراحل التلييد	١٤-٢
٤٢	البلى الالتصاقى	١٥-٢
٤٣	البلى الحكي	١٦-٢
٤٦	طاحونة الكرات الكوكبية المعتمدة في البحث الحالي	١-٣
٤٦	منظومة التسخين المستخدمة في الدراسة الحالية	٢-٣
٤٧	مخطط يوضح البرنامج العملي للدراسة الحالية	٣-٣
٥٠	صورة لبعض عينات اختباري الصلادة ومقاومة الانضغاط..... من المادة المركبة (NiAl-Al ₂ O ₃) التي تم اعتمادها في البحث الحالي.	٤-٣
٥٨	مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) للبورن المستخدم في البحث الحالي	١-٤
٥٨	مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) للكروم المستخدم في البحث الحالي	٢-٤
٥٩	مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) للأومينا المستخدمة في البحث الحالي ...	٣-٤
٥٩	مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) لأومينايد النيكل NiAl المنتج بتقنية..... التلييد التفاعلي عند درجة حرارة ٦٠٠°C لمدة ٦ ساعات.	٤-٤
٦٠	مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) لأومينايد النيكل NiAl المنتج بتقنية التلييد التفاعلي عند درجة حرارة ٦٠٠°C لمدة ١٠ ساعات.	٥-٤
٦٠	مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) لأومينايد النيكل NiAl المنتج بتقنية التلييد التفاعلي عند درجة حرارة ٦٠٠°C لمدة ١٢ ساعة.	٦-٤
٦١	مخطط حيود الأشعة السينية القياسي (XRD) لأومينايد النيكل NiAl التلييد التفاعلي عند درجة حرارة ٦٠٠°C لمدة ١٢ ساعة.	٧-٤

- ٦٢ ٨-٤ مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) لألومينايد النيكل NiAl المنتج بتقنية ...
بتقنية التلبيد التفاعلي وبتقنية التسيك الميكانيكي (MA).
- ٦٢ ٩-٤ مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) لألومينايد النيكل NiAl المنتج بتقنية.....
المنتج بتقنية الدرجات الحرارية العالية المحفزة ذاتياً (SHS).
- ٦٣ ١٠-٤ مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) للمادة المركبة ذات الأساس شبه
المعدني (NiAl-Al₂O₃) المنتجة بتقنية التلبيد عند درجة حرارة ١٣٥٠°C لمدة
ساعة ونصف.
- ٦٥ ١١-٤ تأثير إضافة البورون على الكثافة الخضراء للمادة المركبة ذات الأساس شبه
المعدني (NiAl-Al₂O₃).
- ٦٥ ١٢-٤ تأثير إضافة الكروم على الكثافة الخضراء للمادة المركبة ذات الأساس شبه.....
المعدني (NiAl-Al₂O₃).
- ٦٦ ١٣-٤ تأثير إضافة الألومينا على الكثافة الخضراء لألومينايد النيكل NiAl
(النماذج المحتوية على البورون والكروم معاً).
- ٦٦ ١٤-٤ تأثير إضافة البورون على المسامية الخضراء للمادة المركبة ذات الأساس
شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃).
- ٦٧ ١٥-٤ تأثير إضافة الكروم على المسامية الخضراء للمادة المركبة ذات الأساس
شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃).
- ٦٧ ١٦-٤ تأثير إضافة الألومينا على المسامية الخضراء لألومينايد النيكل NiAl
(النماذج المحتوية على البورون والكروم معاً).
- ٧٠ ١٧-٤ تأثير إضافة البورون على الكثافة النهائية للمادة المركبة ذات الأساس شبه
المعدني (NiAl-Al₂O₃).
- ٧١ ١٨-٤ العلاقة بين النسبة الوزنية المئوية للبورون والكثافة الحقيقية للمادة المركبة
ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃) عملياً ونظرياً.
- ٧١ ١٩-٤ تأثير إضافة البورون على المسامية النهائية للمادة المركبة ذات الأساس
شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃).
- ٧٢ ٢٠-٤ تأثير إضافة الكروم على الكثافة النهائية للمادة المركبة ذات الأساس شبه
المعدني (NiAl-Al₂O₃).
- ٧٢ ٢١-٤ العلاقة بين النسبة الوزنية المئوية للكروم والكثافة الحقيقية للمادة المركبة
ذات الأساس شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃) عملياً ونظرياً.
- ٧٣ ٢٢-٤ تأثير إضافة الكروم على المسامية النهائية للمادة المركبة ذات الأساس
شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃).
- ٧٣ ٢٣-٤ تأثير إضافة الألومينا على الكثافة النهائية لألومينايد النيكل NiAl
(النماذج المحتوية على البورون والكروم معاً).
- ٧٤ ٢٤-٤ تأثير إضافة الألومينا على المسامية النهائية لألومينايد النيكل NiAl
(النماذج المحتوية على البورون والكروم معاً).
- ٧٨ ٢٥-٤ تأثير إضافة البورون على استتالة المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني
(NiAl-Al₂O₃).
- ٧٩ ٢٦-٤ تأثير إضافة البورون على مقاومة إنضغاط المادة المركبة ذات الأساس
شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃).
- ٧٩ ٢٧-٤ تأثير إضافة الكروم على مقاومة إنضغاط المادة المركبة ذات الأساس
شبه المعدني (NiAl-Al₂O₃).
- ٨٠ ٢٨-٤ تأثير إضافة الكروم على استتالة المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني
(NiAl-Al₂O₃).

٢٩-٤	تأثير إضافة الألومينا على مقاومة إنضغاط ألومينايد النيكل NiAl	٨١
	(النماذج المحتوية على البورون والكروم معاً)	
٣٠-٤	تأثير إضافة الألومينا على استطالة ألومينايد النيكل NiAl	٨١
	(النماذج المحتوية على البورون والكروم معاً)	
٣١-٤	تأثير إضافة البورون على صلادة المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني	٨٣
	(NiAl-Al ₂ O ₃)	
٣٢-٤	تأثير إضافة الكروم على صلادة المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني	٨٤
	(NiAl-Al ₂ O ₃)	
٣٣-٤	تأثير إضافة الألومينا على صلادة ألومينايد النيكل NiAl	٨٤
	(النماذج المحتوية على البورون والكروم معاً)	
٣٤-٤	تأثير إضافة البورون على مقاومة البلى الالتصاقى للمادة المركبة ذات	٨٦
	الأساس شبه المعدني (NiAl-Al ₂ O ₃)	
٣٥-٤	تأثير إضافة الكروم على مقاومة البلى الالتصاقى للمادة المركبة ذات	٨٧
	الأساس شبه المعدني (NiAl-Al ₂ O ₃)	
٣٦-٤	تأثير إضافة الألومينا على مقاومة البلى الالتصاقى لألومينايد النيكل NiAl	٨٧
	(النماذج المحتوية على البورون والكروم معاً)	
٣٧-٤	البنى المجهرية لبعض العينات المستخدمة في البحث الحالي	٨٨
A١	مخطط حيود الأشعة السينية (XRD) يوضح نشوء المركب NiAl عند	٩٨
	أزمان طحن مختلفة.	
A٢	تكوين المركب NiAl خلال تقنية التسيبك الميكانيكي (MA)	٩٨
A٣	تقنية الدرجات الحرارية العالية المحفزة ذاتياً (SHS)	٩٩
A٤	تقنية الانصهار الباعث للحرارة (Exothermic Melting Process)	١٠٠
A٥	السبك التفاعلي لإنتاج المركب NiAl	١٠١

قائمة الجداول List of Tables

٨	١-١	الخواص الفيزيائية والميكانيكية للألومينايدات
١١	٢-١	الخواص الفيزيائية والميكانيكية لأوكسيد الألمنيوم Al_2O_3
٢٥	١-٢	النسب الوزنية المئوية للنيكل في ألومينايدات النيكل شبه المعدنية
٢٧	٢-٢	مقاومة الزحف للألومينايدات النيكل (درجة الحرارة لزحف الحالة المستقرة $s^{-1} 10^{-7}$ تحت إجهاد $100 MPa$.
٢٩	٣-٢	الخواص الفيزيائية والميكانيكية لألومينايد النيكل $NiAl$
٤٤	١-٣	المساحيق الأساسية المعتمدة في الدراسة الحالية
٤٨	٢-٣	المساحيق الداخلة في تركيب النماذج الأساسية من ألومينايد النيكل $NiAl$
		ونسب الإضافة منها.
٥١	٣-٣	المساحيق الداخلة في تركيب النماذج الأساسية من المادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$) ونسب الإضافة منها.
٦١	١-٤	نتائج فحص حيود الأشعة السينية (XRD) العائدة للشكل (٦-٤)
٨٩	٢-٤	نتائج الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية الكاملة لكافة النماذج للمادة المركبة ذات الأساس شبه المعدني ($NiAl-Al_2O_3$).
١٠٢		الملحق (B) جدول يبين درجات حرارة الخدمة القصوى لألومينايدات المعادن شبه المعدنية.

قائمة الرموز
List of Symbols

الرمز	معنى الرمز
A	مساحة التحميل.
a	الحجم الذري للفراغ الناشر.
B^2	البنية البلورية المنتظمة B^2 .
BDTT	درجة التحول من السلوك المطيبي إلى الهش.
bcc	البنية البلورية المكعبة المتمركزة الجسم bcc.
CN	العدد التناسقي.
cph	البنية البلورية السداسية المكتظة cph.
D	الحجم الحبيبي.
D^*	معامل الانتشار الذاتي.
$D_{0.1}$	البنية البلورية المنتظمة $D_{0.1}$.
$D_{0.3}$	البنية البلورية المنتظمة $D_{0.3}$.
E	معامل المرونة.
Fcc	البنية البلورية المكعبة المتمركزة الجسم fcc.
K	ثابت بولتزمان.
$L_{0.1}$	البنية البلورية المنتظمة $L_{0.1}$.
$L_{0.2}$	البنية البلورية المنتظمة $L_{0.2}$.
L_0	الطول الأصلي.
L_f	الطول النهائي.
M_g	كتلة النموذج.
P	الحمل المسلط.
P_g	المسامية الخضراء للنموذج.
r	نصف قطر الحبيبية.
SD	مسافة الانزلاق.
SS	سرعة الانزلاق.
Tc	درجة حرارة التنظيم الحرجة.
t	زمن التلييد.
V_g	حجم النموذج.
WR	معدل البلى الوزني.

قائمة الرموز اليونانية
List of Greek Symbols

الرمز	معنى الرمز
$\Delta L/L_0$	التغيرات النسبية في الطول.
$\Delta V/V_0$	معدل التلييد.
ΔW	التغير في الوزن.
$-\alpha$	عامل درجة اللانتظامية الذاتية.
σ_c	مقاومة الانضغاط.
θ	زاوية الحيود.
λ	الطول الموجي.
ρ_g	الكثافة الخضراء للنموذج.
ρ_{th}	الكثافة النظرية للنموذج.
ϵ_c	انفعال الانضغاط.

قائمة المصطلحات List of Nomenclature

الرمز	معنى الرمز
Al-Metal Matrix Composites, AlMCs	المواد المركبة ذات الأساس ألمنيوم.
Al ₂ O ₃ -Ceramic Matrix Composites, Al ₂ O ₃ MCs	المواد المركبة ذات الأساس من الألومينا.
Atomic Diffusion	الانتشار الذري.
Brittle	هش.
Coating	التغطية (الأكساء).
Cold Isostatic Pressing, CIP	الكبس المتوازن على البارد.
Composite Materials	المواد المركبة.
Chemical Disintegration	التحليل الكيميائي.
Chemical Vapor Deposition, CVD	الترسيب البخاري الكيميائي.

Chemical Vapor Infiltration, CVI	الترشيح البخاري الكيميائي.
Ceramic Matrix Composites, CMMCs	المواد المركبة ذات الأساس السيراميكي.
Creep	الزحف.
Cu-Metal Matrix Composites, CuMCs	المواد المركبة ذات الأساس من النحاس.
Directional Solidification	التجمد الاتجاهي.
Dispersion Strengthened	التقوية بالتشتيت.
Ductile	مطلي.
Exothermic	باعث للحرارة.
Fatigue	كلال.
Fracture Toughness	متانة الكسر.
Generic	عام.
Grain Refinement	تنعيم الحبيبات.
Hard	صلد.
Heat of Formation	حرارة التكوين.
Heat Ion Bombardment	القصف الأيوني الثقيل.
Heat Treatment	المعاملة الحرارية.
High Alloy Steel	الفولاذ عالي السبك.
Hot Isostatic Pressure, HIP	الكبس المتوازن على الساخن.
Intermetallic Matrix Composites, IMCs	المواد المركبة ذات الأساس شبه المعدني.
Impurity	الشوائب.
Impact Resistance	مقاومة الصدمة.
Intermediate Solid Solution	المحلول الجامد الوسيط.
Interface	السطح البيني.
Intermetallic Compound	المركبات شبه المعدنية.
Intergranular Fracture	الكسر ما بين البلورات.
Laminated Composites	المواد المركبة الصفائحية.
Matrix Material	مادة الأساس.
Mechanical Alloying, MA	التسبيك الميكانيكي.
Mg-Metal Matrix Composites, MgMCs	المواد المركبة ذات الأساس من المغنيسيوم.
Metal Matrix Composites, MMCs	المواد المركبة ذات الأساس المعدني.
Optical Microscopy.	المجهر الضوئي.
Ordering	التنظيم.
Ordering Energy	طاقة التنظيم.
Pitting Corrosion	التآكل النقري.
Polysrystals	متعدد البلورات.
Powder Metallurgy	ميتالورجيا المساحيق.
Powder Processing	تقنية المساحيق.
Precipitation	الترسيب.

Pyrophoric	قابل للاشتعال.
Radiation Stability	الاستقرار الإشعاعي.
Randomly Oriented	عشوائي الاتجاه.
Reduction	الاختزال
Refractory Metals	المعادن الحرارية.
Sandwich Panels	تركيب طبقي مزدوج.
Scanning Electron Microscopy, SEM	المجهر الإلكتروني الماسح.
Single-Edge Notched Beam, SENB	تقنية العتبة ذات حافة الحز المفردة.
Sintering	التلييد.
Si _r N _z -Ceramic Matrix Composites, Si _r N _z MCs	المواد المركبة ذات الأساس من نتريد السليكون.
SiC-Ceramic Matrix Composites, SiCMCs	المواد المركبة ذات الأساس من كاربيد السليكون.
Soft	لين.
Subcell	خلايا ثانوية.
Substitutional Solid Solution	المحلول الجامد الاستبدالي.
Superalloys	السبائك الفائقة.
Superconductivity	فائق التوصيل.
Transmission Electron Microscopy, TEM	المجهر الإلكتروني النافذ.
Ti-Metal Matrix Composites, TiMCs	المواد المركبة ذات الأساس من التيتانيوم.
Transgranular Fracture	الكسر عبر البلورات.
Vacuum Hot Pressing, VHP	الكبس الفراغي الساخن.
Wagner-Schoottky Theory	نظرية شتوتكي – واغنر.
Zr _r O _r -Ceramic Matrix Composites, Zr _r O _r MCs	المواد المركبة ذات الأساس من أكسيد الزركونيوم.