



دراسة حول تطوير تحضير سبيكة الالمنيوم (8009) وتحسين كفاءة أدائها باضافة الزركونيوم والمعاملة السطحية.

د.جميل حبيب غازي العمار

أ.م.د.حيدر العذاري

أ.د.عبدالواحد كاظم راجح

جامعة بابل/ كلية هندسة المواد

جامعة بابل/ كلية هندسة المواد

قسم هندسة المعادن

قسم هندسة المعادن

قسم هندسة المعادن

الخلاصة:

تهدف الدراسة الى تقليل الكلفة التصنيعية وإطالة عمر الكلال والارتقاء بالاستقرارية الحرارية لسبيكة الالمنيوم (8009) بتحضيرها بمرحلة تصنيعية واحدة سباكةً بقوالب معدنية مبردة سريعاً (بدلاً عن مراحل التشكيل الاعتيادية الخمسة) مع إضافة كميات قليلة (Microalloying) من عنصر الزركونيوم (Zr). اعتمدت الدراسة تقنيات عدة في تحسين أداء السبيكة الاساس شملت المتغيرات الميتالورجية والمعاملات السطحية الميكانيكية (Mechanical Surface Treatments). أجريت عدة اختبارات لتقييم أداء السبائك المستخدمة في البحث شملت الاستقرارية الحرارية (Thermal Stability) و مقاومة الكلال (Fatigue Strength) قبل وبعد المعاملة السطحية الميكانيكية والتي تضمنت القذف بالكريات السيراميكية (Ceramic Shot Peening)، قياس الكثافة (Density) ودراسة بنية السبائك باستخدام المجهر الضوئي (Optical Microscope).

أظهرت النتائج إن إضافة (0.2% Zr) للسبيكة الأساس (Al-8.57% Fe – 1.29 %V- 1.71%Si) قد رافقها زيادة في مقاومة الكلال بنسبة (147%) عند الاجهادات الواطئة (140 MPa) وحوالي (93%) عند الاجهادات العالية (300 MPa)، وبشكل عام استقرت السبائك حرارياً، كما أظهرت إن المعاملة السطحية الميكانيكية بالقذف بالكريات السيراميكية لفترة (180) ثانية اطالت عمر كلال السبائك مقارنة مع أعمارها قبل المعاملة، إذ بلغت نسب التحسن (150%) و(124%) في أعمار كلال السبائك (Al-Fe-V-Si-Zr) و (Al-Fe-V-Si) على التوالي عند الاجهادات الواطئة (140 MPa)، أما عند الاجهادات العالية (300 MPa) فبلغت نسب التحسن (139%) و (118%) في أعمار كلال السبائك على التوالي.

STUDY ON DEVELOPMENT OF PREPARATION OF AL-ALLOY (8009) AND INHANCING ITS PERFORMANCE BY ADDING ZERCONIUM AND SURFACE TREATMENT.

Abstract

This work represents an attempt to decrease manufacturing cost and to increase thermal stability and fatigue life of (8009) aluminum base alloy. The alloys were prepared by a single step die casting followed by rapid cooling (instead of the usual five stages forming). A microalloying element (Zr) was added. The study adopted several techniques to improve properties including certain metallurgical variables and mechanical treatments of surfaces. Several tests were carried out to evaluate the performance of alloys, such as thermal stability, and fatigue strength tests before and after surface mechanical treatments (shot peening by ceramic balls), density measurement and metallographic examination.

Results showed that the prepared alloys are thermally stable. The addition of (0.2% Zr) was associated with an increase in fatigue strength by (147%) corresponding to the base alloy at low stress cycles (140 MPa) and (93%) at high stress cycles (300 MPa). Results also showed that a period of (180) seconds for shot peening by ceramic balls gives the best surface mechanical treatments. An improvement of (150%) and (124%) in fatigue life of (Al-Fe-V-Si-Zr) and (Al-Fe-V-Si) alloys was observed after the surface treatment, when, subjected to low stresses (140 MPa). At high stresses (300 MPa), however, the improvement was (139%) and (118%) in fatigue life of the alloys respectively.

Key Words: Al-Alloy (8009), Rapid cooling, Thermal stability, Shot peening

المقدمة:

احتلت سبائك (ألنيوم - حديد) التي تنتمي للسلسلة (8000) مكانة متميزة في التطبيقات الفضائية، ولعل السبيكة (8009) واحدة من أهمها، لذلك مازالت الأوساط العلمية والتكنولوجية تجري دراسات وبحوث لتطويرها والارتقاء بأدائها. تعاني السبيكة (8009) قصوراً في الأداء لبعض من خواصها في أثناء تعرضها لأوساط الاستخدام مما يجعل عمرها الفعال (Effective Life) محدوداً، كما ان إنتاجها يتضمن أكثر من خمس مراحل تصنيعية ذات كلفة اقتصادية عالية جداً ومحدودة الانتاج الكمي وذلك بسبب ان تلك التقنية تتضمن عمليات ومتغيرات تصنيعية كثيرة [1,2].

طورت سبائك (Al-Fe-V-Si) باستخدام الدمج بين تقنيتين تصنيعيتين هما الانجماد السريع وميتالورجيا المساحيق (Rapid Solidification and Powder Metallurgy)، اذ نحصل على اشربة (Ribbons) من الانجماد السريع ومن ثم تسحق هذه الاشربة لتتحول الى مساحيق وبعدها تجري العمليات

التصنيعية اللاحقة. انتجت هذه السبائك اولا باستخدام تقنية متطورة مسجلة لشركة (Allied Signal) والتي تبنى على اساس الانجماد السريع لجريان المنصهر على سطح مستوي [Planar flow casting] [3]، وتم لاحقا احراز نتائج مماثلة باستعمال التذرية بالغاز (Gas atomization) لانتاج دقائق (Particulate) متجمدة بسرعة [4,5,6].

الفائدة المنجزة من الانجماد السريع تكمن في انه لا يوجد وقت كافي للمادة ان تتشكل الى تركيب خشن او منعزل، والنتيجة المنطقية الاكثر اهمية تبرز في الحصول على بنية مجهرية دقيقة بسبب معدلات التبريد العالية جدا. الانجماد السريع للسبيكة (Al-Fe-V-Si) يقدم معاملات مرونة وكذلك استقرارية حرارية عالية عند الدرجات الحرارية العالية وعليه فانها اصبحت بديلا ناجحا عن سبائك التيتانيوم المستخدمة في تطبيقات الفضاء وذلك للخدمة في مديات درجات حرارية بين (150-340°C). ان المقاومة العالية (High strength) لسبائك الالمنيوم الحاوية على الحديد والفناديوم والسيلكون بدرجات الحرارة العالية ناتجة عن التقوية بالمتشنتات (Dispersoids strengthening) الغنية بالعناصر ذات الذوبانية والانتشارية الواطئة في ارضية الالمنيوم Al- α matrix) [7,8]، اذ تمتلك كسرا حجميا (Volume fraction) عاليا لمتشنتات كروية دقيقة تدعى (Silicides) تزود السبيكة بمقاومة عالية جدا ضد التخشين (Coarsening) بدرجات الحرارة العالية اذ ان المقاومة والاستقرارية بدرجات الحرارة العالية لتلك السبائك تعتمد على المعدلات الواطئة لتخشين (Silicides) والتي بدورها تحدد تطبيقاتها [9,10].

ان تقوية سبائك الالمنيوم بالاصلاذ بالتشنتات اكثر الطرائق فعالة للتطبيقات في درجات الحرارة العالية بشرط ان يكون الطور المتشنتت نسبيا غير قابل الذوبان في الارضية عند الدرجات الحرارية العالية، والانتشار للعناصر المعدنية البينية (Intermetallic elements) يكون تماما بطيء ليمنع تخشن المتشنتات عند تلك الدرجات. واستجابة لمتطلبات تحسين الخواص الميكانيكية طور الباحثون هذه السبائك باضافة عناصر سبك متمثلة بالمعادن الانتقالية [11,12]، وقد تم التركيز على العناصر التي تبدي محدودية للذوبانية الجامدة (Solid solubility) وانتشارية (Diffusivity) واطئة في الالمنيوم. ان تاثيرات العناصر الانتقالية ذات قابلية الذوبان والانتشارية الواطئة في المحلول الجامد للالمنيوم بحثت كثيرا في السبائك الثنائية والثلاثية وحتى السبائك الاكثر تعقيدا [13,14,15,16]، في حالات متعددة اضيف عنصران او اكثر من عناصر السبك لسبائك تجريبية وذلك لان بعضها سبب في رفع درجة حرارة السيولة بسرعة مع زيادة محتوى المذاب، لذلك يكون من

العسير اضافة عنصرا وحيدا الى المنصهر لكي يحدث الكسر الحجمي العالي المطلوب للاطوار المتشتتة المستقرة حراريا [17].

تلقت سبائك (Al-Fe-V-Si) اهتماما كثيرا بسبب استقراريتها الحرارية العالية الناجمة عن احتوائها على الالومينايدات (Aluminides) و (Silicides). البنية المجهرية لهذه السبائك تتالف تقريبا من جسيمات كروية دقيقة جدا هي $[Al_{13}(Fe,V)_3Si]$ المتوزعة بشكل متجانس في حبيبات الارضية ($\alpha - Al$) وحدودها البلورية. الاستقرار الحراري الفائقة لتلك السبائك تنسب الى استقرارية جسيماتها الدقيقة [7,18].

استقرار البنية المجهرية للمواد بدرجات الحرارة المرتفعة يكون غالبا مسيطر عليه بمقاومتها للتخشين، وتتوقف الخواص الميكانيكية لسبائك (Al-Fe-V-Si) بشدة على توزيع وحجم متشتتاتها $[Al_{13}(Fe,V)_3Si]$ [7,9,10]، كما ان شكل (Silicide) يلعب دورا مهما للتاثير في هذه الخواص، ولان هذه المتشتتات يمكن ان تتخشن خلال التعريض لدرجة الحرارة العالية لذا يكون الشان الهام القدرة على التنبؤ بمعدل التخشين والتحولت اللاحقة في المتشتتات (Silicide). التشويه بدرجات الحرارة العالية للسبيكة المنجمدة سريعا (Al- FVS 1212 (Si) $11.7 Fe - 1.15 V - 2.4 Si$) تم التحرى عنها بمدى درجة حرارة من $237^{\circ}C$ الى $479^{\circ}C$ وتم الوصف بان تطبيق الاجهاد و درجة الحرارة يعمل زيادة هامة في معدلات التخشين بالمقارنة مع معدلات التخشين بثابت درجة الحرارة الخالية من الاجهاد عند درجات حرارة مماثلة [19]. التغيرات الرئيسية الملاحظة في الاستقرار لسبائك المتجمدة سريعا (Al-Fe-Cr-Zr-V-Si) هي شكل وتوزيع جسيمات المتشتتات وان الجسيمات ميالة الى التراكم على الحدود الحبيبية ومتغيرة في الشكل الى شكل متعدد الاضلاع (Polygonal shaped)، الطور الثانوي $[Silicide Al_{13}(Fe,Cr,V)_3Si]$ يكون شبه مستقر الذي يحتفظ بتركيبه الاولي (bcc) وشكل كروي عند درجة حرارة اقل من $550^{\circ}C$ ويتحول نحو التوازن $[Al_8(Fe,Cr,V)_2Si]$ and $[Al_{13}(Fe,Cr,V)_4]$ فقط عند $(500^{\circ}C \text{ to } 550^{\circ}C)$ [20].

مما تقدم وبالرغم من الجوانب الايجابية المتعددة لطريقة إنتاج السبيكة (8009) المتضمنة الدمج بين تقنيتي الانجماد السريع (Rapid Solidification) وميتالورجيا المساحيق (Powder Metallurgy) إلا إنها تتضمن عدة مراحل تصنيعية مما جعلتها ذات كلف اقتصادية عالية جدا، محدودة الإنتاج الكمي ومتعددة المتغيرات التصنيعية وبسبب ظروف الاستخدام في التطبيقات الفضائية وصعوبة السيطرة على متغيرات العملية التصنيعية فان السبيكة (8009) تعاني من الانخفاض في مقاومة الكلال (Fatigue Strength) بهدف البحث الحالي الى دراسة امكانية تحضير السبيكة (8009) بمرحلة تصنيعية واحدة ذات كلف اقتصادية واطئة ومناسبة للإنتاج

الكمي وتحسين مقاومة الكلال من خلال إضافة الزركونيوم (Zr) كعنصر سبك والقذف بالكريات السيراميكية (Ceramic shot peening) مع المحافظة على كثافة منخفضة لسبائك البحث.

الجزء العملي:

يتضمن الجانب العملي ما يلي:

- عمليات الصهر والصب لتحضير سبيكتين هما السبيكة (Al-Fe-V-Si) وتعطى الرمز A في البحث والسبيكة الحاوية على نسبة قليلة من الزركونيوم وتعطى الرمز B في البحث.
- الاختبارات الميكانيكية والفيزيائية وتشمل: اختبارات الاستقرار الحرارية لمعاملات متعددة، واختبار لمقاومة الكلال بدون معالجة سطحية واختبارات أخرى لمقاومة الكلال بعد معالجة سطحية بالقذف بالكريات السيراميكية وكذلك قياس كثافة السبائك المحضرة وفحص بنيتها المجهرية.

عمليات الصهر والنمذجة :Melting and Sampling Processes

نفذت عملية صهر مكونات السبائك المستخدمة في البحث بفرن غازي اذ تم التسخين الاولي لبودقة خزفية بحدود (500⁰C) لمدة (25) دقيقة وصهر قطع صغيرة من المعدن الاساس (الالمنيوم)، وينصف الكمية الوزنية المقررة ثم اضيف عنصر الحديد بشكل قطع صغيرة (Chips) مع تحريك المنصهر بواسطة قضيب خزفي ليذوب في المنصهر ويتجانس بعدها اضيفت للمنصهر قطع العناصر الفناديوم والسليكون والزركونيوم تباعا مع استمرار تحريك المنصهر لضمان حصول التجانس، ثم اضيفت الكمية المتبقية من قطع الالمنيوم. غلفت العناصر المضافة للمنصهر برقائق الالمنيوم (Aluminium foils) قبل اضافتها ضمنا لدخولها المنصهر وانغمارها قبل ملامستها للاوكسجين. استغرق الوقت الكلي لعملية الصهر بحدود ساعة واحدة. تمت عملية الصب بصورة سريعة جدا بقالب معدني موضحة صورته في الشكل (1a)، وقد سخن مسبقا لتلافي انجماد المنصهر المعدني بصورة سريعة عند ملامسته جدار القالب، اما الاخاماد الفوري فقد تم حال امتلاء القالب بالمنصهر بمساعدة مزيج ذي درجة حرارة (-5⁰C) مؤلف من الماء والتلج وملح (NaCl) ، ويتم ذلك من خلال رفع السدادة المطاطية الموجودة بين الحوض (x) والذي يتصرف كخزان لوسط التبريد (الماء البارد) والحوض (y) الذي فيه القالب، أما فتحة خروج الماء (Water outlet) فهي لضمان استمرارية تدفق واستبدال

الماء بعد ملامسته جدران القالب وكما موضح بالشكل (2). اما الشكل (1b) فيوضح بعضاً من السبائك المستخدمة في البحث بعد عملية الصب.

جونست السبائك (A,B) حرارياً بدرجة حرارة (500°C) بزمن مكوث ثلاث ساعات للتخلص من الأطوار التكوينية (Constitutional phases) المحتمل وجودها الشبه ذائبة والغنية بالشوائب المترسبة على الحدود البلورية.

أظهر التحليل الكيماوي لنماذج البحث باستخدام جهاز الامتصاص الذري (Atomic absorption) نوع (Shimadzo) التركيب الكيماوي للسبيكة A (Al-8.57% Fe – 1.29 %V- 1.71%Si) و التركيب الكيماوي للسبيكة B (Al-8.55% Fe -1.28 % V-1.72% Si -0.22% Zr).

يبين التحليل الكيماوي ان السبيكة الاساس (A) واقعة ضمن حدود التكوين الكيماوي للسبيكة [Al- AA 8009 (Aluminium ;wt%) (8.4-8.9)Fe-(1.1-1.5)V-(1.7-1.9)Si] (المعرف من قبل جميعه الالمنيوم Association) [21].

Thermal Stability Tests اختبارات الاستقرار الحرارية

جرى تقطيع عينات على شكل اقراص بقطر (14) ملمتر وبسمك (6) ملمترات، ثم اجريت عملية التنعيم (Grinding) باستخدام ورق تنعيم من كاربيد السيلكون ذي درجات نعومة بالتدرج (220,320,400,600,800,1000,2000)، اما عملية الصقل (Polishing) فاجريت باستخدام معجون الالومينا (Alumina paste) بحجم حبيبي (0.25 Micron)، وبعد انتهاء كل مرحلة تنعيم او صقل تغسل النماذج بالماء المقطر والكحول وتجفف بهواء ساخن. نفذت المعاملات الحرارية كافة في البحث بفرن كهربائي نوع (LINDBERG) يعمل في مجال درجات حرارة من (100-1200°C)، واستخدم معه جهاز معايرة درجة الحرارة (Thermocouple Thermometer) نوع (OMEGA – Model 115KC)، اما قياسات الصلادة فانجزت بطريقة فيكرز بجهاز نوع (Microhardness tester HV 1000) وكان الحمل المسلط في اثناء القياسات (100) غرام بزمن تحميل (20) ثانية، وقد اجريت المعاملات الحرارية للعينات بدرجات حرارية وفقاً للحالات المبينة في الجدول (1). ولغرض تقييم الاستقرار الحرارية للسبائك يتم رسم العلاقة بين الصلادة الفيكريزية وزمن التعرض لدرجات حرارية مختلفة.

Fatigue Strength Tests اختبارات مقاومة الكلال

اجريت عمليات التشغيل لعينات اختبار الكلال الموضحة بالشكل (3) باستخدام ماكينة خراطة نوع (CNC Takisawa TC-2)، واجريت عليها عمليات تعميم وصقل كاملة، اذ تم استخدام ورق كارييد السيلكون بدرجات نعومة (400,600,800,1000,1200,2000)، اما الصقل فتم باستخدام قماش يشبع باستمرار بمعجون الالومنيا (Al_2O_3)، استخدم جهاز نوع (HI-TECH Scientific Model HSM 19) يعمل بطريقة الانحناء الدوار (Rotating bending)، وتمت الاختبارات في درجة حرارة المختبر.

تأثير القذف بالكريات السيراميكية في مقاومة الكلال

نفذت عملية القذف بالكريات السيراميكية على وفق المتغيرات الموضحة في الجدول (2) باستعمال منظومة خاصة اعدت لهذا الغرض مبنية صورتها في الشكل (4). تألفت المنظومة من ماكينة خراطة نوع (Myford SKL 1448041) ثبتت سرعة دورانها على (27rpm)، وربط احد طرفي عينة الكلال على فكوك الغراب الثابت والطرف الاخر تم تثبيته بواسطة محورالغراب المتحرك، واستخدم جهاز ضغط هواء Air Compressor نوع (BEBICON) وثبت ضغط الهواء على (14 kg/cm^2)، وربط جهاز ضغط الهواء مع مسدس الرمي (Shot Gun) الحاوي على الكريات السيراميكية بواسطة انبوب مطاطي يتحمل ضغطا عاليا، حيث تم استخدام مسدس الرمي (Professional Spray Gun W-775) ذي فتحة خارجية (Nozzle) قطرها (4mm)، ويتحمل ضغطا بحدود (20 kg/cm^2)، اما سعته فكانت (2000 cm^3)، و يوضح الشكل (5) مجموعة من عينات الكلال بعد الرمي بالكريات السيراميكية.

Density Test Of Alloys اختبار كثافة السبائك

جرى حساب الكثافة بصورة عملية لغرض تقييم السبائك المستخدمة، اذ تم استخدام ميزان الكتروني (Sartorius Bp 301S) حساس يعمل بدقة ($\pm 1 \text{ mg}$) واستخدم الماء المقطر كوسط سائل داخل اسطوانة زجاجية مدرجة ذات سعة (100) مليلتر، وحسبت الكثافة عمليا بالاستناد الى قاعدة أرخميدس.

Metallographic Examination الفحص المجهرى

جرى الفحص المجهرى لعينات السبائك المستخدمة في البحث باستعمال المجهر الضوئى نوع (Union ME-3154) لغرض دراسة البنية المجهرية. اجريت مراحل التتعيم والصقل على عينات السبائك المعدة للفحص المجهرى، اما محلول الاظهار فاستخدم المحلول (Keller's Reagent) ذي التركيب (95 cm^3 H_2O & $2.5 \text{ cm}^3 \text{HNO}_3$, $1.5 \text{ cm}^3 \text{HCl}$, $1 \text{ cm}^3 \text{HF}$) ويزمن اظهار يتراوح بين (10-15) ثانية.

النتائج والمناقشة Results and Discussion

اختبارات الصلادة Hardness Tests

امتلكت عينات السبائك (A,B) المسبوكة بالقوالب المعدنية المبردة سريعا بدرجة حرارة (-5°C) بعد معاملة المجانسة صلادات وافية، اذ بلغت صلادة السبيكة A (90HV) و بلغت صلادة السبيكة B (101HV)، ويعزى السبب في ذلك الى ان تلك السبائك تضمن تكوينها الكيماوي اكثر من عنصر سبك تسبب في تكوين مركبات كيماوية لمتشكلات معدنية بينية (Intermetallic dispersoids) امثال الاطوار $[\text{Al}_{13}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}]$ و (Al_3Fe) و (Al_3Zr) في ارضية الالمنيوم ($\alpha - \text{Al}$) والتي اليها يرجع الارتفاع في الصلادة، اذ انها تعمل على اعاقه حركة الانخلاعات، بالاضافة الى ان تلك السبائك بردت سريعا بعد سباكتها بالقوالب المعدنية مما تسبب في صغر الحجم الحبيبي للمتشكلات ضمن ارضية الالمنيوم. تفوقت صلادة السبيكة (B) بنسبة (12%) عن صلادة السبيكة الاساس (A)، وهذا الاستنتاج يتشابه مع ما توصل اليه باحثون اخرون [2,22]، ويعود هذا التفوق الى ان عنصر الزركونيوم (Zr) صغر الحجم الحبيبي لارضية الالمنيوم وللمتشكلات الموجودة ضمنها بالاضافة الى ان (Zr) كون المركب (Al_3Zr) المتطابق مع الارضية والذي سبب في توليد مجالات انفعال تعيق حركة الانخلاعات.

اختبارات الاستقرار الحرارية Thermal Stability Tests

يعد ثبوت الصلادة او التغير الطفيف فيها عند درجات حرارية مختلفة مع الزمن مؤشرا جيدا على الاستقرار الحرارية بتلك الدرجات. يبين الشكل (6) علاقة الصلادة مع زمن التعرض لدرجات الحرارة المعتمدة في البحث، ومنه يلاحظ استقرارية حرارية عالية جدا طيلة ازمان تعرض السبيكتين (A,B) لدرجة حرارة (150°C) كما ان للسبيكتين سلوك متشابه في استقراريتهما الحرارية بعد التعرض لدرجات الحرارة (200, 250,)

$(300, 350^{\circ}\text{C})$ ، وامتلكت السبيكة (B) الحاوية عنصر الزركونيوم (Zr) أعلى استقرارية في ذلك . يرجع سبب الاستقرار الحرارية للسبائك الى انها بنيت على اساس التحكم بحركية التخشين (Kinetic of Coarsening) من خلال اختيار عناصر السبك الواطئة الذوبانية والانتشارية في الألمنيوم والتي كونت متشكلات مستقرة، وربما شكل وحجم وتوزيع جسيمات تلك المتشكلات بقيت دون تغيير، والسبب الاخر الجوهرى لامتلاك الاستقرار العالية يكمن في ان السبكتين (A,B) حضرت بالية تضمن انجمادها السريع التي لم تعطي السبائك وقتا كافيا لتشكيل الاطوار الخشنة او المنعزله المسببة لتخفيض الاستقرار الحرارية بالاضافة الى تقديمها مشكلات دقيقة.

ونتفق مع ما اشار اليه باحثون اخرون [13, 15,16] في ان الاطوار الثانوية (Second phases) تكون بالمقام الاول مسؤولة عن التقوية لسبائك الألمنيوم ذات الاساس (Al-Fe)، وربما جزء قليل من البنية المجهرية حاويا على الاطوار الوسطية الخشنة التي تتكون في مناطق بطيئة الانجماد. اما الحجم والمسافة بين جسيمات الاطوار فانها دالة لمعدل التبريد للانجماد الموضعي، اذ بزيادة معدل التبريد يصبح الطور الثانوي ناعما (دقيقا) بينما الطور الخشن مستبعد حدوثه وبالتالي تحسن الخواص الميكانيكية.

اما الاستقرار الحرارية للسبكتين (A,B) عند التعرض لدرجات حرارة (400°C) و (450°C) فيبدو من الشكل بان الاستقرارية شرعت بالانخفاض، حيث يلاحظ ان اقصى انخفاض في الاستقرارية حدث بعد مرور (25) ساعة تعرض لدرجة (400°C) ، اذ بلغت نسبة الانخفاض (22%) للسبيكة (A₆) عن السبيكة (A) وبلغ الانخفاض نسبة (10%) للسبيكة (B₆) عن السبيكة (B)، كما ان هناك انخفاضا واضحا للاستقرارية عند درجة حرارة (450°C) وخصوصا بعد زمن تعرض (25) ساعة، اذ بلغت نسبة الانخفاض (34%) للسبيكة (A₇) عن السبيكة (A) وانخفضت الاستقرارية للسبيكة (B₇) بنسبة (18%) عن السبيكة (B)، ويعزى ذلك الانخفاض الى ان الاطوار المتشكلة للسبائك اخذت بالتخشين والانحلال التدريجي، وخصوصا السبيكة (A₇) التي ابدت انخفاضا اكثر من نظيرتها السبيكة (B₇) ويعتقد ان سبب ذلك يعود الى ان الطور المتشكك المقوي للسبيكة (A₇) هو [Silicide $\text{Al}_{13}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$] ذات الشكل الكروي اخذ بالنمو (Growth) او التخشين والتحول الى طور $(\text{Al}_{13}\text{Fe}_4)$ الابري الشكل الذي يخفض الخواص الميكانيكية. ومرة اخرى ابدت السبيكة (B₇) تفوقا واضحا بالاستقرارية على نظيرتها السبيكة (A₇) وذلك لاحتوائها على اطوار متشكلة اكثر استقرارا.

اختبارات مقاومة الكلال Fatigue Strength Tests

يبين الشكل (7) العلاقة بين سعة الاجهاد (Stress amplitude) وعدد الدورات لحين الفشل (Number of cycles to failure). يظهر من الشكل أنه: بسعة اجهاد (140 MPa) فشلت السبيكة الاساس (A) بعدد دورات (872313)، وبعدد دورات (2156760) فشلت السبيكة (B)، اما بسعة اجهاد (300 MPa) فشلت السبيكة (A) بعدد دورات (5092)، وبعدد دورات (9843) فشلت السبيكة (B)، وعند مقارنة القيم مع بعضها يتضح بان اضافة عنصر السبك (Zr) أطال عمر الكلال بنسبة (147%) عن عمره للسبيكة (A) عند سعة اجهاد منخفضة (140MPa) و بنسبة (93%) عند سعة اجهاد مرتفعة (300 MPa).

ان التحسن في مقاومة الكلال يرجع الى ان هذه السبائك صلدت بالتشيت بعملية الانجماد السريع التي جهزت السبائك بمتشيتات دقيقة بارضية مطيلية من الالمنيوم والتي سببت في اعاقه حركة الانخلاعات وبالمحصلة تاخير الية الانزلاق الدقيق المسببة لتكوين مواقع تنوية الشق المسبب للفشل. ان سلوك السبيكة الاساس (A) ذات التكوين الكيماوي (Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si) يكون متقاربا مع نتائج الباحث (Kennedy) [23].

تأثير القذف بالكريات السيراميكية في إطالة عمر الكلال:

العلاقة بين سعة الاجهاد وعدد الدورات لحين الفشل بعد تنفيذ عملية القذف بالكريات السيراميكية بالفترات الزمنية المعتمدة في الدراسة الحالية بينها الشكل (8)، اذ يظهر تحسنا تدريجيا بعمر كلال السبائك (A,B) مع زيادة زمن القذف بالكريات السيراميكية، ويظهر من الشكل تحسنا واضحا لعمر الكلال بعد القذف لفترة (180) ثانية مقارنة مع الاختبار الاساس المبين بالشكل (7) للسبيكتين بدون المعالجة السطحية اذ انه بسعة اجهاد مرتفعة (300 MPa)، تحسن عمر الكلال للسبيكة الاساس (A) بنسبة (118%)، اما السبيكة (B) فتحسن عمرها بنسبة (139%)، وبسعة اجهاد منخفضة (140 MPa)، تحسن عمر الكلال للسبيكة الاساس (A) بنسبة (124%) وبنسبة (150%) تحسن عمر الكلال للسبيكة (B).

ان مقادير التحسن هذه في عمر الكلال تعود الى ان الفترة الزمنية للقذف (180) ثانية هي الفترة المناسبة في تزويد سطحي السبيكتين باجهادات ضغطية متبقية سببت في تاخير الية نمو الشق من جانب وعملت على غلق شق الكلال ان تواجد من جانب اخر، ويبدو ان هذه الفترة كانت كافية لاكساب سطح السبائك

كله القيمة المطلوبة من الاجهادات الضغطية. اما تخطي هذه العتبة (Threshold) فالظاهر انه يمكن ان تسبب في تخليق شقوق مجهرية تسهل عملية فشل الكلال. اما التراجع في مقادير تحسن عمر الكلال لكلا الاجهادات العالية والواطئة للسبيكتين وخصوصا لفترة قذف (210) ثانية فيرجح الى ان فترة القذف هذه سببت فقدان الموازنة بين الاجهادات الضغطية والشدية ويمكن ان تسبب ذلك في سهولة تخليق الشقوق الدقيقة.

وابدت السبيكة (B) تفوقا واضحا بعمر الكلال على نظيرتها السبيكة (A) لفترة قذف (180) ثانية، اذ عند الاجهادات العالية (300MPa) بلغت نسبة التفوق (112%) بعمر الكلال على عمره للسبيكة (A) بينما عند الاجهادات الواطئة (140MPa) بلغت (175%) ، وربما هذا التفوق ناجم عن التأثير المشترك لعنصر السبك (Zr) والقذف بالكريات السيراميكية.

وقد توصل باحثون [24] الى استنتاجات مشابهة في انظمة سبكية مغايرة برغم وجود الاختلافات في متغيرات عملية للقذف بالكريات السيراميكية، وان الباحثين ركزوا على المتغيرات التي تعطي التوافق الامثل بين اقتصادية العملية وخشونة السطح الاقل ومقاومة الكلال الافضل وانهم رجحوا استخدام الكريات السيراميكية على كريات من مواد اخرى كالكريات الفولاذية وذلك لعدم تلوينها سطح السبائك المسبب للتاكل. وتشابهت الاستنتاجات ايضا مع ماذهب اليه باحثون اخرون [25]، الذين درسوا تأثير القذف بانواع متعددة من الكريات في اداء الكلال لسبائك الالمنيوم اوالمغنيسيوم العالية المقاومة.

قياس كثافة السبائك:

بلغت كثافة السبيكتين (A,B) المقاسة عمليا (2.94gr/cm^3) مما يشير الى وجود اختلافات طفيفة في كثافة السبائك المستخدمة في البحث، والسبب في ذلك يعود الى ان اساس السبائك هو عنصر الالمنيوم الذي يشكل حوالي (88.5 % wt) من التكوين الكيماوي الكلي للسبائك وهو يمتلك كثافة (2.7g/cm^3)، لذلك هذه الميزة اهلت سبائك الالمنيوم ذات الاساس (Al-Fe-V-Si) للاستخدام الواسع في صناعات الفضاء و لاجل الاحتفاظ بكثافة منخفضة لهذه السبائك مع تطوير اداءها تم اضافة عنصر (Zr) بنسبة قليلة جدا (0.2 % wt).

الفحص بالمجهر الضوئي:

يوضح الشكل (9) صورة بالمجهر الضوئي لبنية السبيكة A (Al-Fe-V-Si) بحالتها المسبوكة و البنية المجهرية للسبيكة B (Al-Fe-V-Si-Zr)، ويبدو من الشكل التركيب الشجري (Dendrite) للجسيمات المؤلفة للسبيكتين والجسيمات المترسبة.

الاستنتاجات CONCLUSIONS

1. ثبتت بشكل أولي إمكانية تحضير السبيكة (8009) بمرحلة تصنيعية واحدة بمسلك تكنولوجي بسيط واقتصادي.

2. إضافة عنصر (Zr) إلى السبيكة الأساس A (8009) بنسبة وزنية (0.2%) لتكوين السبيكة (B) سببت زيادة في مقاومة الكلال بنسبة (147%) عند الاجهادات الواطئة (140MPa) وبنسبة (93%) عند الاجهادات العالية (300 MPa).

3- القذف بالكريات السيراميكية لفترة (180) ثانية أطال عمر الكلال للسبائك عند مقارنة أعمارها مع عمرها الأساس، إذ بلغت نسب الارتفاع (150%) و(124%) للسبائك (B) و (A) على التوالي عند الاجهادات الواطئة (140 MPa) أما عند الاجهادات العالية (300 MPa) فبلغت النسب للسبائك (B) و(139%) و (A) و(118%) على التوالي.

4 - استقرارية حرارية عالية لغاية درجة حرارة (350⁰C) لفترة تعرض (25) ساعة.

المصادر REFERENCES

- 1- Zhu, A., Poon, S. J. and Shiflet, G. J. , Scripta Mater., 50, 1451-1455,(2004).
- 2- Belov, N.A. Aksenov, A.A.and Eskin ,D.G., Iron in Aluminium Alloys Impurity and Alloying Element ,Taylor and Francis Group, London and New York,(2002).
- 3- Das, S. K. and Davis, L. A., Mater. Sci. Eng. A, 98, 1-12, (1988).
- 4- Tongsri, R., Minay, E. J., Thackray, R. P., Dashwood, R. J. and McShane, H. B. , J. Mater. Sci., 36, 1845-1856,(2001).
- 5- Lu, B., Yi, D. and Li, W. , Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 12, 273-276,(2002).
- 6- Kalkanli, A. and Oren, E. E. , Powder Metall., 46, 324-328,(2003).

- 7- Skinner, D. J., Bye, R. L., Raybould, D., Brown, A. M. and Zedalis, M. S. , In Processing of Structural Materials by Rapid Solidification(Eds, Froes, F. H. and Savage, S. J.) ASM, Metals Park, Ohio, pp. 291-295,(1987).
- 8- Das, S. K., In Intermetallic Compounds Principles and Practice, Vol. 2 (Eds, Westbrook, J. H. and Fleischer, R. L.) John Wiley & Sons Ltd., USA, pp. 175-198, (1995).
- 9- Gilman, P. S. and Das, S. K., MPR, 44, 616 - 620, (1989).
- 10- Zedalis, M. S., Raybould, D., Skinner, D. J. and Das, S. K. , In Processing of Structural Materials by Rapid Solidification(Eds, Froes, F. H. and Savage, S. J.) ASM, Metals Park, Ohio, pp. 347-354,(1987).
- 11- Kiv, A. E., Ezersky, V. I. and Talianker, M. M. , Mater. Sci. Eng. A, 352, 100-104,(2003).
- 12- Grushko, B. and Velikanova, T. Y., J. Alloys Compd., 367, 58-63, (2004).
- 13- Macedo, M. C. S. and Michot, G. , J. Mater. Sci., 38, 3143-3153,(2003).
- 14- Galano, M., Audebert, F., Cantor, B. and Stone, I. , Mater. Sci. Eng. A, 375-377, 1206-1211,(2004).
- 15- Yaneva, S., Kalkanli, A. and Petrov, K. , Mater. Sci. Eng. A, 373, 90-98,(2004).
- 16- Prima, F., Tomut, M., Stone, I., Cantor, B., Janickovic, D., Vlasak, G. and Svec, P. , Mater. Sci. Eng. A, 375-377, 772-775,(2004).
- 17- Kimura, H. M., Sasamori, K. and Inoue, A. , Mater. Sci. Eng. A, 294-296, 168-172,(2000).
- 18- Skinner, D. J., Bye, R. L., Raybould, D. and Brown, A. M. , Scripta Metall., 20, 867-872,(1986).
- 19- Pharr, G. M., Zedalis, M. S., Skinner, D. J. and Gilman, P. S. , In Dispersion Strengthened Aluminium Alloys(Eds, Kim, Y. W. and Griffith, W. M.) TMS, Warrendale, PA., pp. 309-322,(1988).
- 20- Xiao, Y., Li, S., Li, W., Zeng, Z. and Ma, Z. Y. , J. Cent. South Univ. Technol., 5, 23-26,(1998).
- 21- The Aluminium Association, International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminium and Wrought Aluminium Alloys ,Washington ,pp.19-20, (2004).
- 22- Li, P. Y., Yu, H. J., Chai, S. C. and Li, Y. R. , Scripta Mater., 49, 819-824,(2003).
- 23- Kennedy, J.R., Effect of Thermal Exposure ,Forming , And Welding on High Temperature , Dispersion-Strengthened Aluminium Alloy: Al-8Fe- 1V- 2 Si, NASA Contractor Report 187575,Gruman Corporate Research Center, Bethpage, New York, (1999).

- 24- Brazoukas ,H.and Jauffert, J. ,The Fourth International Conference On Shot Peening (ICSP-4) , PP.47-56, (1990).
- 25- Dorr, T., Hilpert, M., Beckmerhagan ,Kiefer, A.and Wagner, L.,ICSP -7 ,PP.153-160,(1999).

جدول (1) يوضح ظروف المعاملات الخاصة بالاستقرارية الحرارية.

Alloy code	Condition
A ₁ ,B ₁	Exposure temperature at 150 ⁰ C for 5,10,15,20& 25 hours.
A ₂ ,B ₂	Exposure temperature at 200 ⁰ C for 5,10,15,20& 25 hours.
A ₃ ,B ₃	Exposure temperature at 250 ⁰ C for 5,10,15,20& 25 hours.
A ₄ ,B ₄	Exposure temperature at 300 ⁰ C for 5,10,15,20& 25 hours.
A ₅ ,B ₅	Exposure temperature at 350 ⁰ C for 5,10,15,20& 25 hours.
A ₆ ,B ₆	Exposure temperature at 400 ⁰ C for 5,10,15,20& 25 hours.
A ₇ ,B ₇	Exposure temperature at 450 ⁰ C for 5,10,15,20& 25 hours.

جدول (2) يوضح متغيرات عملية القذف بالكريات السيراميكية.

Shot type	Ceramic (67% ZrO ₂ , 30% SiO ₂ & 3% others)
Shot size	0.4 mm
Diameter of nozzle	4.0 mm
Working distance	150.0 mm
Peening angle	90 deg.
Peening time	60 , 90 , 120 , 150 , 180 & 210 seconds
Air Pressure	14.0 kg / cm ²
Turning machine speed	27 rpm. (revolution per minute)

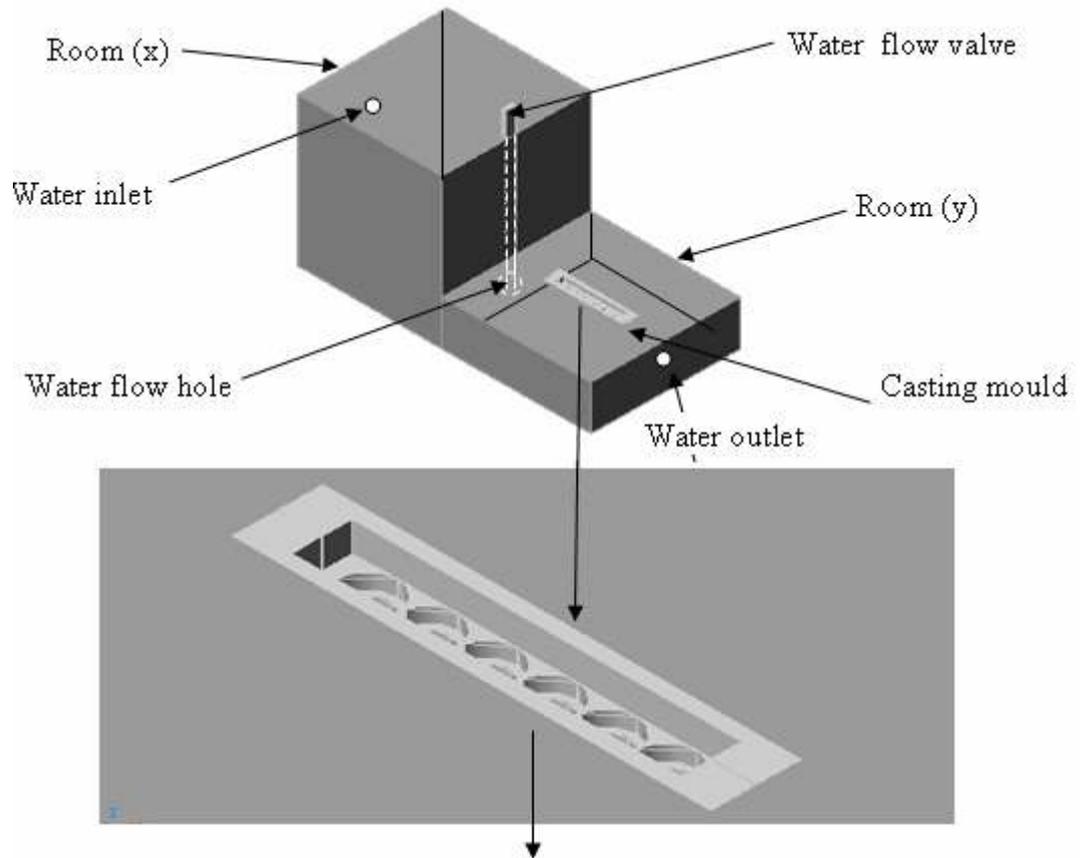


(ب)

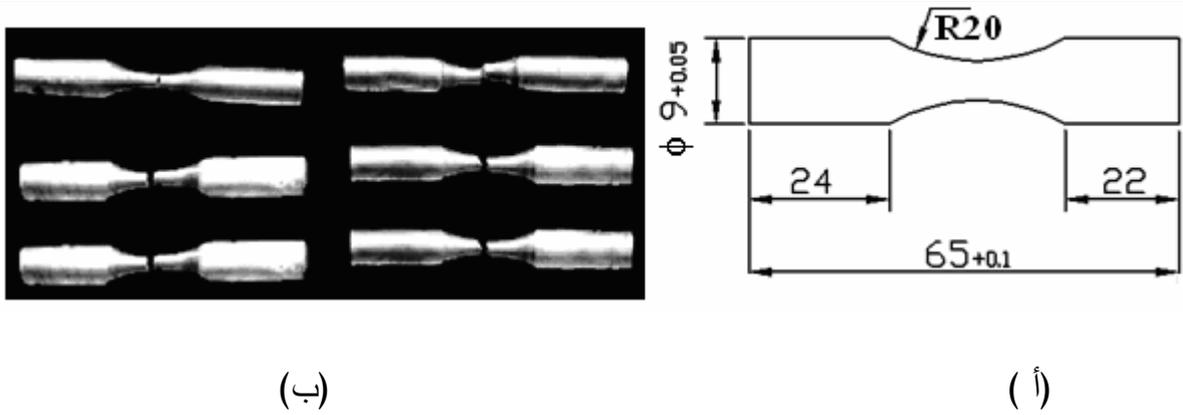


(أ)

الشكل (1): أ- صورة لقالب الصب، ب- صورة للسبيكة A بعد الصب



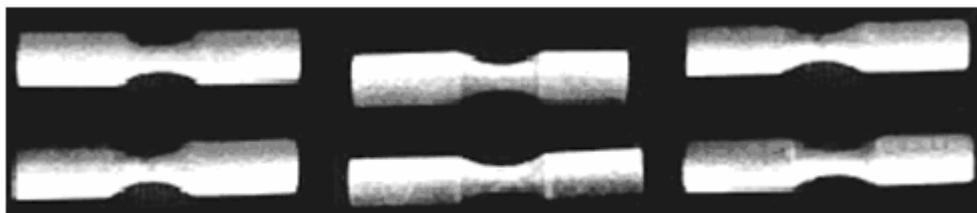
الشكل (2): يوضح اسلوب الصب.



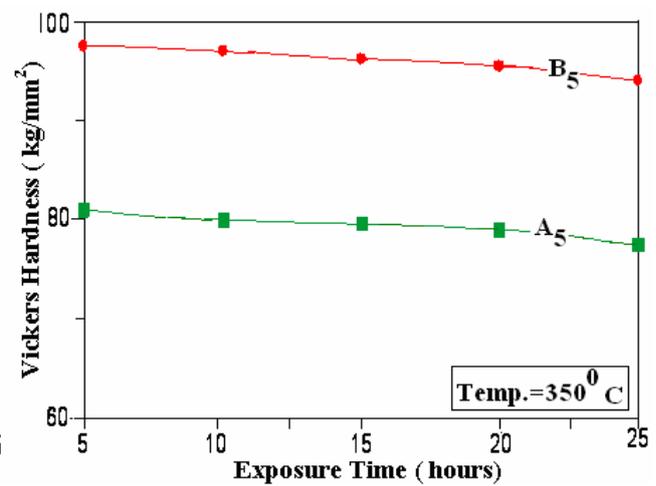
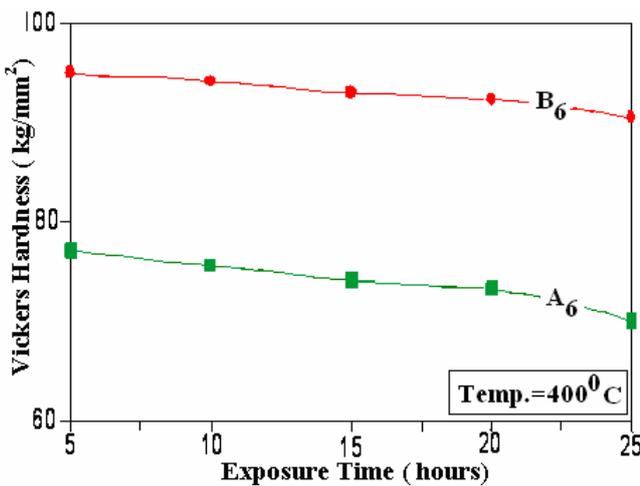
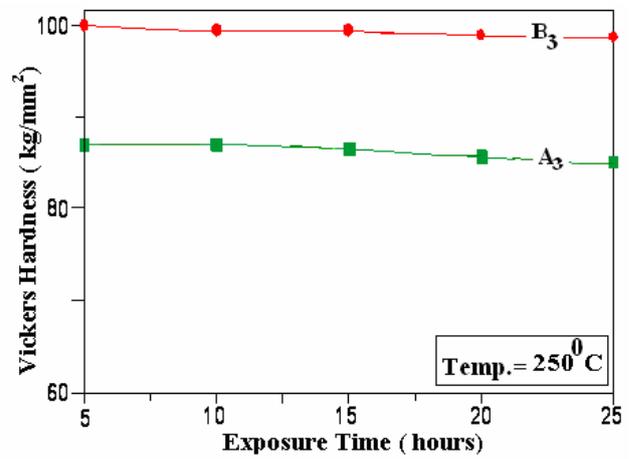
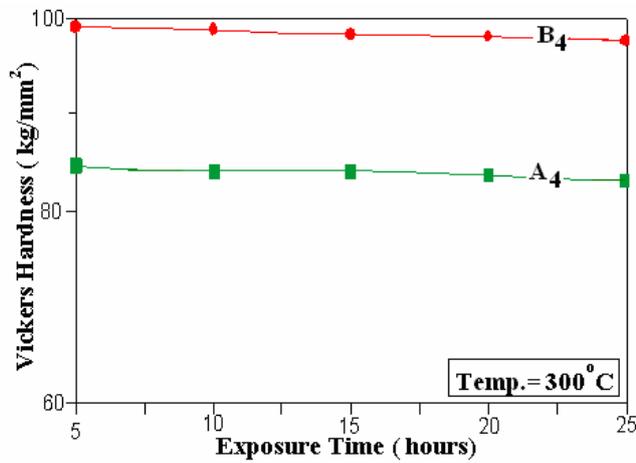
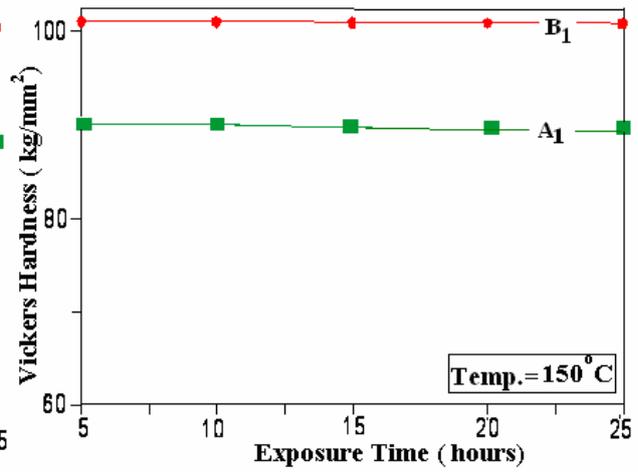
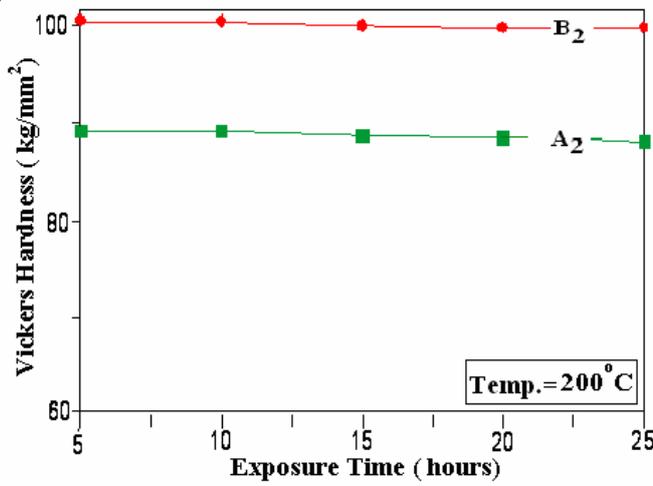
شكل (3): أ- عينة اختبار الكلال، ب- مجموعة من العينات بعد الاختبار

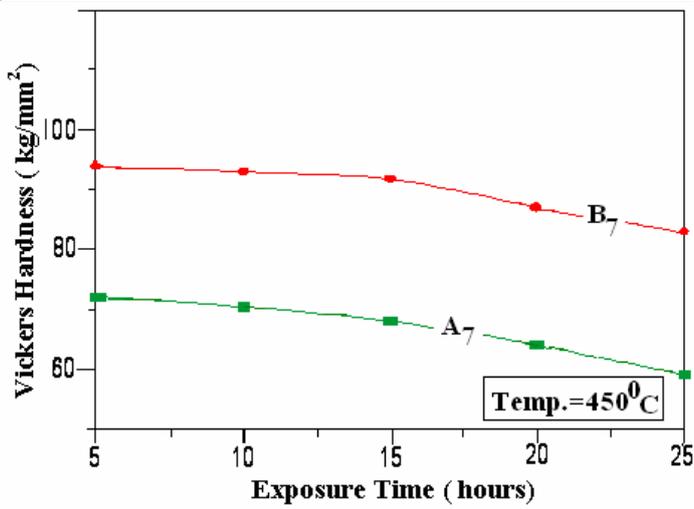


الشكل (4): معدات عملية القذف بالكريات

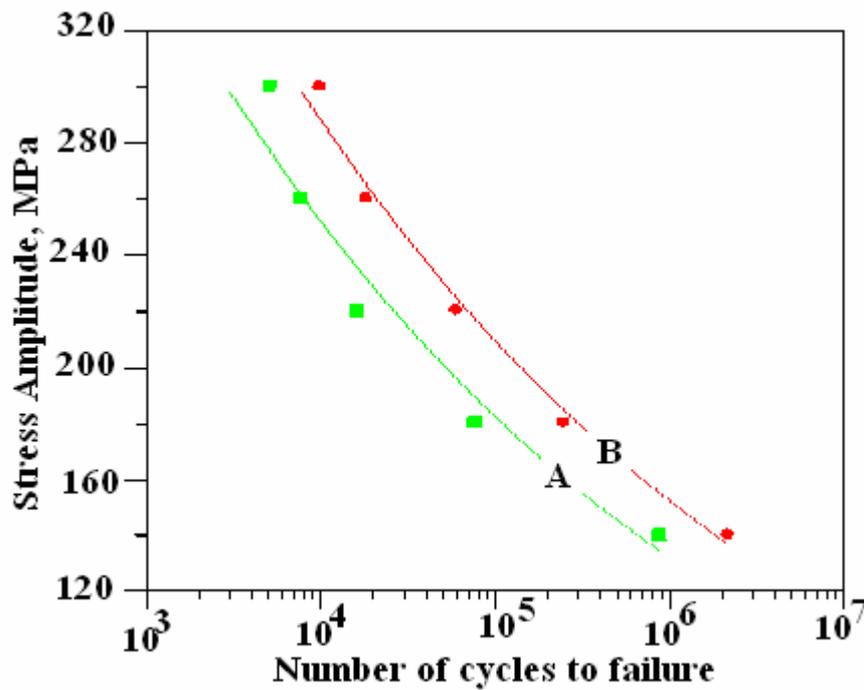


الشكل (5): يوضح مجموعة من عينات الكلال المقذوفة بالكريات السيراميكية.

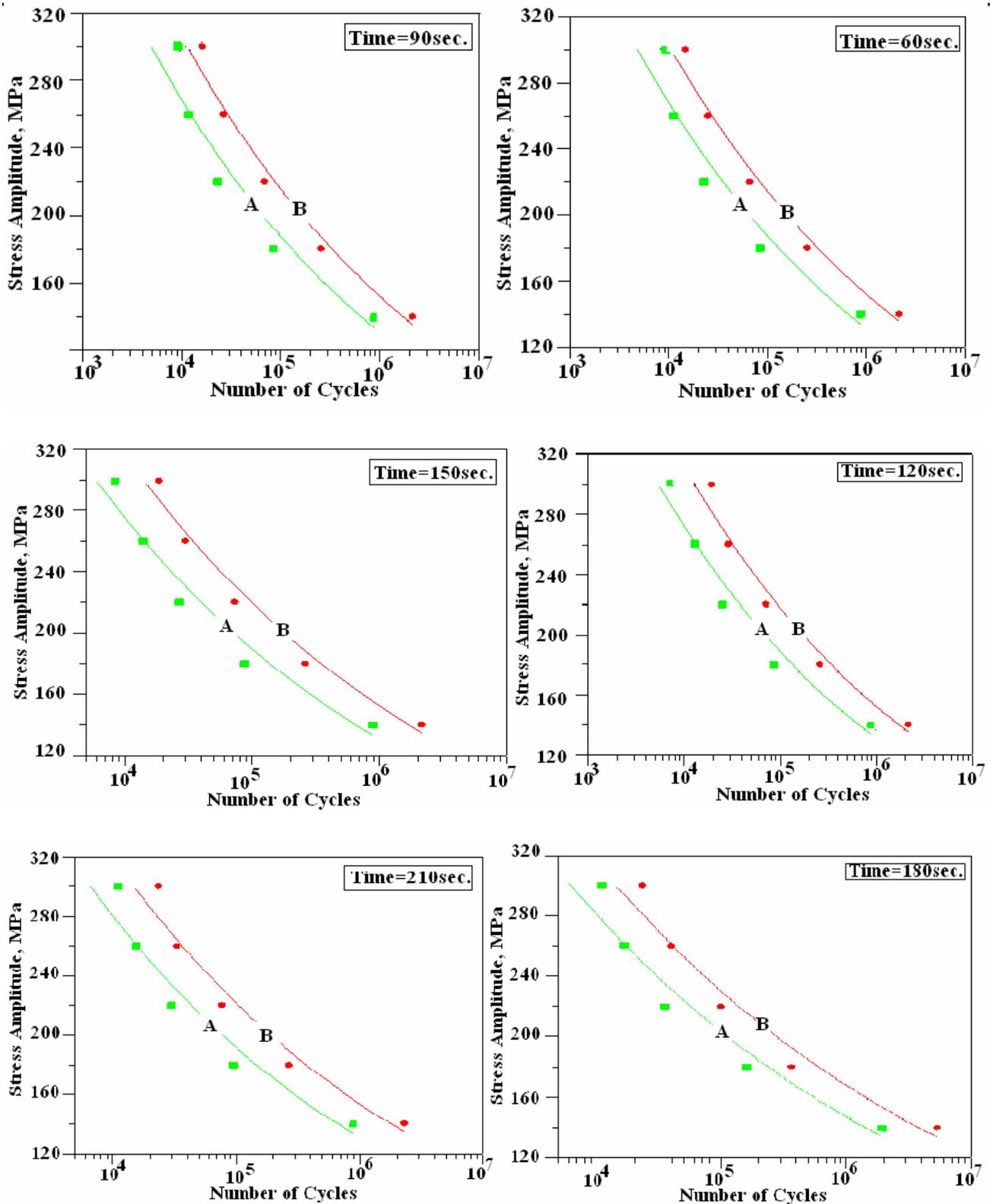




شكل (6): الاستقرار الحراري بدرجات حرارة وازمان مختلفة



الشكل (7): العلاقة بين سعة الاجهاد وعدد الدورات لحين الفشل للسبيكتين قبل المعالجة الميكانيكية.



الشكل (8): العلاقة بين سعة الاجهاد وعدد الدورات لحين الفشل بعد القذف بالكريات السيراميكية.



(ب)



(أ)

شكل (9) صورة بالمجهر الضوئي لبنية:

(أ) السبيكة (Al-Fe-V-Si) بحالتها المسبوكة (قوة تكبير X150)

(ب) السبيكة (Al-Fe-V-Si-Zr) بحالتها المسبوكة (قوة تكبير X150)