

## دراسة خواص الزحف للمواد المترابطة ذات أساس (Al-Mg-Si) مقواة بدقائق من كربيد السليكون

د. نوال عزت\* م.م. ايمان عدنان\* عمار جبار\*

تاريخ التسلم: ٢٠٠٥/٥/٣٠

تاريخ القبول: ٢٠٠٦/١١/٢٦

### الخلاصة

يهدف البحث إلى دراسة سلوك الزحف عند درجات الحرارة المرتفعة للمواد المترابطة ذات أساس من سبيكة الألمنيوم المقواة بدقائق كربيد السليكون. تم تحضير كل من سبيكة الأساس والمادة المترابطة أساس من سبيكة (المنيوم-مغنسيوم-سليكون) المقواة بدقائق كربيد السليكون، باستخدام طريقة السباكة بالمزج (Stir-Casting) تم إجراء عملية التشكيل بالدرفلة ثم المعاملة الحرارية على العينات المنتجة، أجري اختبار الزحف عند درجات حرارية (١١٠، ٢٤٠، ٣٢٠) °C وباستخدام إجهاد (١٩,٤, ٩,٧ MPa) للسبيكة الأساس وإجهاد (٥٧,٧, ٣٨,٤ MPa) للمادة المترابطة. الزحف للسبيكة الأساس خاصة عند الدرجات الحرارية الواطئة. لذا يمكن الاستنتاج إن للمواد المترابطة مقاومة زحف أفضل من السبيكة الأساس. بالقرب من دقائق (SiC) والطور الثاني مما يدل على إن الفشل يبدأ بتكوين الفجوات التي ترتبط مع بعضها لتكوين الشق ومن ثم الفشل.

### Abstract

The aim of this work is to study the deformation behavior of (Al-Mg-Si) alloy reinforced with silicon carbide at elevated temperature under creep.

In this research both matrix-alloy and composite material were prepared using stir-cast technique. The cast specimens were deformed using rolling process and then heat treatment was done for both matrix alloy and composite material. Creep test were done at (110, 240, 320) °C used stresses (9.7, 19.4) MPa for master alloy and stresses (38.4, 57.7) MPa for composite material.

The composite material reveals lower steady state creep rate than matrix alloy especial at low temperature so it is possible to conclude that composite material has better creep resistance than matrix alloy.

Scanning electron microscope result of fracture section showed that void are formed near silicon carbide and near second phase which indicates that the failure in composite material began by forming voids which connect together to form cracks which expended leading to failure.

### المقدمة:

فيها ما بين المقاومة العالية والجساءة مع الكثافة الواطئة ومقاومة البلى (١). أوضحت بعض الدراسات إن إضافة نسب قليلة من دقائق التقوية قد يؤدي إلى زيادة في مقاومة الزحف (٢). كما يمكن تحسين مقاومة الزحف في المعادن بصورة مميزة من

أدى التقدم في إنتاج المواد المترابطة ذات الأساس المعدني والتقوية غير المستمرة إلى العديد من الاستخدامات في التطبيقات الصناعية كصناعة السيارات والأجزاء الخارجية للمكائن، إذ يمكن الدمج

\* قسم هندسة الانتاج والمعادن / الجامعة التكنولوجية

°C) ثم أجريت عمليات الصب في قوالب معدنية.

بعد تقطيع المصبوبات تم تسخينها إلى درجة حرارة (°C ٤٢٠) حيث ثبتت العينات داخل الفرن عند هذه الدرجة الحرارية لمدة ساعة وذلك لضمان حصول التجانس الحراري للمادة تلك الدرجة الحرارية، بعدها أجريت عملية الدرفلة وبتخصر مقدارها (mm ٠,١) لكل تمريرة، وبعد ثمان تمريرات تم إعادة العينات إلى الفرن لغرض إعادة التسخين ولمدة (١٥) دقيقة ثم إجراء عملية الدرفلة مرة أخرى إلى أن يتم الحصول على نسبة التخصر المطلوبة وبحدود (٥٠%) أي الحصول على سمك (mm ٤).

#### **اختبار الزحف Creep Test:**

تم استخدام جهاز الزحف من نوع (Mayes) موديل (MKTC/٢٠) مصنع من قبل شركة (W. H. Mayes and Sons LTD. (Nindsor))، يحتوي الجهاز على فرن أنبوبي ذو مناطق ثلاث يمكن التحكم بكل منطقة على حدة لتحديد معدل التسخين وسرعة الحصول على درجة الحرارة المطلوبة فيها.

تتراوح درجة حرارة الفرن بين °C (١٠٠٠-٢٠) يمكن التحكم بها عن طريق المسيطر الحراري الموجود في الجزء السفلي من الجهاز، يحتوي الجهاز على عتلة موازنة أفقية تقع أعلى الجهاز تحافظ على نسبة عتلة (١:١٠)، وترتبط هذه العتلة الأفقية بقضيب التحميل (Loading Bar) الخلفي وذراع التحميل العلوي (Upper Loading Bar) المرتبط بالعيانة، تعمل هذه العتلة على جعل تأثير الحمل المسلط بنسبة (١:١٠) على العينة وتحافظ على اتزانها بحيث يبقى الحمل المسلط بنفس التأثير على العينة طيلة فترة الاختبار باستخدام جهاز تحكم أوتوماتيكي يقع في أعلى الجهاز يحافظ على موازنتها حال حصول تمدد في العينة أو ذراع التحميل بواسطة محرك كهربائي يقع في الجزء السفلي من الجهاز.

خلال التثبيت المتجانس لدقائق الطور الثاني، وذلك بتقليل معدل الزحف في مادة الأساس عن طريق إعاقه حركة الانخلاعات وإعادة توزيع الاجهادات (٣)، ونظراً لأهمية دراسة سلوك الزحف (Creep) للمواد مترابكة المستخدمة في التطبيقات الهندسية، فقد أجريت العديد من التجارب والاختبارات لمعرفة خواص الدرجات الحرارية المرتفعة وبشكل خاص على المواد المترابكة ذات الأساس من الألمنيوم وسبائكهم ومقارنة سلوك هذه المواد مع المعادن النقية وسبائك المحلول الجامد (٤-٧).

أتجه مجموعه من الباحثين إلى دراسة سلوك الزحف للسبائك المقواة بكربيد السليكون وقد استنتج الباحثون إن معدل الزحف الأدنى يسيطر عليه من خلال الانتشار بداخل الحبيبة لمادة الأساس، وزحف المادة المترابكة يتضمن تسلق الانخلاعات، وإن سلوك الزحف يكون مرتبطاً مع الإجهاد الحرج الذي يتناقص مع ارتفاع درجة الحرارة بصورة خطية (٨-١١).

#### **الجزء العملي:**

تحضير المادة المترابكة:

تم صهر (٤٥٠ gm) من سبيكة الأساس باستخدام فرن الصهر، إذ تم استخدام بودقة من الألومينا لغرض الصهر وتم رفع درجة الحرارة بحدود (°C ٧٥٠) وبعد اكتمال الانصهار تم إجراء الخلط عند سرعة (٦٤٨ r.p.m) لمنصهر السبيكة مع خفض درجة الحرارة إلى أن تصل إلى (°C ٦٥٠) والتي تكون فيها السبيكة بالحالة شبه الصلبة (Mushy State)، بعدها تم إضافة دقائق كاربيد السليكون بقطر أقل من (٩,٨٦ μm) بصورة تدريجية إلى مركز الدوامة بعد أن سخنت الدقائق السيراميكية إلى درجة حرارة (°C ٢٥٠)، واستمرت عملية الخلط بعد الانتهاء من الإضافة داخل الفرن لمدة (١٠ min). بعدها تم إعادة التسخين للخليط إلى درجة حرارة (٧٠٠ °C).

دراسة خواص الزحف للمواد المترابكة ذات أساس (Al-Mg-Si) مقواة بدقائق من كربيد السليكون

Q: طاقة التنشيط للزحف  
(Activation Energy for Creep) وتقاس بـ (J/mol.)  
R: ثابت الغازات العام، ( ٨,٣١ J/mol.°K)

T: درجة الحرارة (°K).  
كما يمكن تغيير معادلة الزحف في حدود فاعلية أكثر للإجهاد المسلط، العلاقة الآتية (١٢،١٣):

$$\dot{\epsilon} = A'(s - s_0)^n \exp(-Q'/RT) \quad (2)$$

حيث إن

ε: الإجهاد المسلط.

ε<sub>0</sub>: الإجهاد الحرج.

n: الأس الإجهادي.

A': ثابت.

لغرض إيجاد قيمة الأس الإجهادي ثم أستخدم علاقة الزحف العامة للمواد المترابكة (١٤):

$$\frac{de}{dt} = AS^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (3)$$

حيث إن Q: طاقة تنشيط الزحف.

R: ثابت الغازات.

T: درجة الحرارة.

n: الأس الإجهادي.

ε: الإجهاد المسلط.

ثم رسم علاقة بين لوغاريتم معدل الزحف مع لوغاريتم الإجهاد عند درجة حرارة ثابتة ثم تم استخراج الميل الذي يكون مساوياً لقيمة الأس الإجهادي. أما طاقة التنشيط للزحف فقد تم استخراجها من ميل المنحني للعلاقة بين لوغاريتم Gss مع مقلوب درجة الحرارة.

#### النتائج والمناقشة:

عند استخراج أو حساب قيم معدل الزحف في كل اختبار لكل من السبيكة الأساس والمادة المترابكة لوحظ إن زيادة الإجهاد أو زيادة درجة الحرارة لكل من سبيكة الأساس والمادة المترابكة يؤدي إلى زيادة في كمية الانفعال الناتج وهذا

يتم تحميل الجهاز عن طريق وضع الأحمال على كفة التحميل (Weight Pan)، وعند وضع الحمل مباشرة تبدأ عتلة الموازنة بالاتزان إلى أن تصبح بصورة أفقية.

يحتوي الجهاز على عدّاد (Counter) للزمن يمكن من خلاله حساب زمن التمزق الذي تستغرقه العينة، فعند حصول الكسر في العينة يسقط الحمل على عتلة خاصة تعمل بدورها على إيقاف العدّاد عن العمل ويستمر ذراع التحميل السفلي (Lower Loading) بالنزول إلى أن يضغط على زر يعمل بدوره على إيقاف المحرك الكهربائي عن العمل.

يتم ربط مقياس الانفعال مع جهاز قراءة الانفعال باستخدام قنطرة كاملة (Full Bridge)، بعدها يتم ربط العينة على جهاز الفحص باستخدام مسامير ربط، ثم يتم تشغيل الجهاز عند درجة حرارة الغرفة يتم الاتزان الأوتوماتيكي لعتلة الاختبار، بعدها يتم تصفير جهاز قراءة الانفعالات (Strain Indicator)، ثم يتم تحديد درجة حرارة الاختبار وعند تشغيل الجهاز تبدأ درجة الحرارة بالارتفاع ويتم مراقبتها باستمرار عن طريق استخدام مقياس لدرجة الحرارة من نوع (Thermocouple Type-K) خارجي، وعند بلوغ درجة الحرارة الدرجة المطلوبة يتم تسليط الحمل المحدد على كفة التحميل ويؤخذ مقدار الانفعال الناتج لحظة تسليط الحمل والذي يمثل الانفعال الأنسي (ε<sub>0</sub>)، ثم يتم أخذ القراءات وبفترات متقاربة جداً وذلك لغرض تحديد منطقة الزحف الابتدائي، وبالتالي تحديد المرحلة المستقرة للزحف التي يتم حساب معدل الانفعال فيها. وعند حدوث الزحف الثانوي

يتغير معدل انفعال الزحف (dε/dt) مع درجة الحرارة اعتماداً على قانون أرهينوس (Arrhenius Law) وحسب العلاقة الآتية:

$$Creep Rate = \frac{de}{dt} = A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (1)$$

حيث إن A: ثابت.

الأساس فإنها تشير إلى حدوث الزحف بنفس الآلية والذي هو الزحف الأنخلاعي (Creep Dislocation)، أما عند مقارنة طاقة التنشيط للمادة الأساس والتي يكون مقدارها (K cal/mole) ٢٤-١٨ عند درجة حرارة (°C) ٣٢٠-٢٤٠ مع طاقة تنشيط للانتشار عبر الحدود البلورية التي يكون مقدارها (K cal/mole) ٢٣ نلاحظ إن هذه القيم تكون متقاربة مما يدل على حدوث الزحف عبر الحدود البلورية أي حدوث زحف كوبل (Coble) (٩).

كما ان ارتفاع قيمة طاقة التنشيط مقارنة مع انثالي الانتشار عبر الحدود البلورية والذي يكون مقداره (k) ٢٣ cal/mole تشير إلى إمكانية حدوث زحف كوبل (Coble)، حيث تشير هذه الآلية إلى حدوث الانتشار عبر الحدود البلورية وبما ان بنية المادة المترابكة كانت أعم من سبيكة الأساس، لذلك فإن التشوه من خلال هذه الآلية سيكون أكثر نشاطاً بسبب زيادة مساحة الحدود البلورية نتيجة نقصان الحجم الحبيبي (١٠).

عند حساب الأس الإجهادي للمادة المترابكة وسبيكة الأساس لغرض التعرف على الآلية المسيطرة على تشوه الزحف وكما موضح يلاحظ ارتفاع قيم الأس الإجهادي للمادة المترابكة مقارنة بالسبيكة الأساس. وكما موضح في الجدول (٢).

ومن ملاحظة قيم الأس الإجهادي لكل من سبيكة الأساس والمادة المترابكة عند درجة حرارة (°C) ١١٠ يتبين ان هذه القيم تشير إلى حدوث تشوه الزحف نتيجة الانزلاق للانخلاعة، أما عند درجة حرارة (°C) ٢٤٠ فنلاحظ ارتفاع في قيمة الأس الإجهادي بالنسبة للمادة المترابكة، حيث انه يقترب إلى (٤)، مما يشير إلى ان الآلية المسيطرة على تشوه الزحف تكون نتيجة تسلق الانخلاعة، أما عند درجة حرارة (°C) ٣٢٠ فيلاحظ ارتفاع قيمة الأس الإجهادي لكل من المادة المترابكة وسبيكة الأساس، إذ تكون قيمة الأس الإجهادي للمادة المترابكة تقريبا مساوية إلى (٥) مما

يؤدي إلى ازدياد معدل زحف الحالة المستقرة، والنتائج موضحة في الجدول رقم (١).

وعند مقارنة معدل زحف المرحلة المستقرة الانفعال لوحظ إن المادة المترابكة لها معدلات زحف واطئة مقارنة مع سبيكة الأساس عند درجات حرارة (°C) ١١٠، ٢٤٠ °C ويرجع السبب في ذلك إلى دور الدقائق في إعاقة حركة الانخلاعة ومقاومة المادة للزحف ولكن هذه المقاومة تتخفف بشكل واضح عند درجة حرارة (°C) ٣٢٠ وذلك بسبب احتمالية ازدياد عدد الفجوات المتكونة عند السطح البيني ما بين السبيكة الأساس ودقائق النقوية إضافة إلى زيادة قابلية الانخلاعة على الحركة مع زيادة درجة الحرارة.

للحصول على طاقة التنشيط تم رسم العلاقة ما بين اللوغاريتم الطبيعي لمعدل زحف المرحلة المستقرة ( $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$ ) ومقلوب درجات الحرارة (1/T) لاختبارات الزحف لكل من المادة المترابكة والسبيكة الأساس عند إجهاد ثابت، والنتائج موضحة في الشكلين (١) و (٢) على التوالي.

ومن مقارنة قيمة طاقة التنشيط للمادة المترابكة والتي مقدارها (K) ٣٨-٣٥ cal/mole عند درجة حرارة (°C) ٣٢٠-٢٤٠ مع طاقة الانتشار الذاتي للألمنيوم النقي والذي يكون مقداره (K) ٣٥ cal/mole نلاحظ ارتفاع قيمة طاقة التنشيط أو تساويهما، مما يشير إلى إمكانية حدوث آلية زحف نابارو (Nabarro) عند الدرجات الحرارية المرتفعة، حيث تشير هذه الآلية إلى حدوث الانتشار داخل الحبيبة، وذلك من خلال انتقال الفراغات من المناطق العمودية أو تقريبا العمودية على اتجاه الشد إلى المناطق الجانبية، مما يسبب استئالة الحبيبة وحدث الزحف (٨).

أما طاقة التنشيط للمادة المترابكة عند مدى حراري (°C) ٢٤٠-١١٠ يكون مقدارها (K cal/mole) ١٤-١٣ والتي تكون تقريبا مساوية إلى طاقة تنشيط مادة

°C (١١٠)، ويرجع السبب في ذلك إلى دور الدقائق في إعاقه حركة الانخلاع ومقاومة المادة للزحف، ولكن هذه المقاومة تنخفض بشكل واضح عند درجة حرارة (°C ٣٢٠) بسبب احتمالية ازدياد عدد الفجوات المتكونة عند السطح البيني ما بين السبيكة الأساس ودقائق التقوية، إضافة إلى زيادة قابلية الانخلاع على الحركة مع زيادة درجة الحرارة.

٢. عند مقارنة قيم طاقة التنشيط لوحظ ارتفاع قيم طاقة التنشيط للمادة المترابكة مقارنة بالسبيكة الأساس وبالأخص عند درجات الحرارة العالية، مما يشير إلى حدوث آلية زحف تختلف عن سبيكة الأساس.

٣. من مقارنة الأسس الإجهادي للمادة المترابكة وسبيكة الأساس عند درجات الحرارة المرتفعة نلاحظ أن آلية تسلق الانخلاع هي المسيطرة على تشوه الزحف في المادة المترابكة، أما الآلية المسيطرة على تشوه الزحف في المادة الأساس فهي الانزلاق اللزج.

٤. من نتائج الفحص بالمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لمقاطع الكسر بعد إجراء اختبار الزحف لوحظ إن مقاطع الكسر للسبيكة تظهر انسياباً لزجاً واضحاً عند درجات الحرارة المرتفعة، أما المادة المترابكة فقد لوحظ وجود فجوات ميكروية فيها تلتمح هذه الفجوات مع بعضها لتكون الشق.

#### المصادر:

1. Tanya M. T. Godfrey, Paul S. Good win and C. Malcolm ward-close, J. Advanced Engineering Materials, Vol. ٢, No. ٣, P. ٨٥. ٢٠٠٠
2. Venkatesan Sundrarajan, Aluminum Alloy Composite, paper, [http:// www.alsic.com](http://www.alsic.com), ١٩٩ .

يشير إلى كون آلية تسلق الانخلاع مسيطرة على تشوه الزحف عند تلك الدرجة الحرارية، كما يلاحظ ارتفاع في قيمة الأسس الإجهادي بالنسبة للمادة المترابكة، حيث انه يقترب إلى (٤)، مما يشير إلى ان الآلية المسيطرة على تشوه الزحف تكون نتيجة تسلق الانخلاع، أما عند درجة حرارة (°C ٣٢٠) فيلاحظ ارتفاع قيمة الأسس الإجهادي لكل من المادة المترابكة وسبيكة الأساس، إذ تكون قيمة الأسس الإجهادي للمادة المترابكة تقريباً مساوية إلى (٥) مما يشير إلى كون آلية تسلق الانخلاع مسيطرة على تشوه الزحف عند تلك الدرجة الحرارية، كما يلاحظ ارتفاع في قيمة طاقة التنشيط عند تلك الدرجة الحرارية وهذا يشير إلى حصول الانتشار داخل البلورة، والذي بدوره سيساهم بمعدلات زحف سريعة، وبالتالي انخفاض في مقاومة المادة المترابكة.

أظهرت نتائج اختبارات المجهر الإلكتروني الماسح لعينات الزحف كما ملاحظ في الشكل (٣) حدوث الكسر المطيلي للمادة المترابكة، إذ تم ملاحظة البنية الشبكية من النقر، كما لوحظ حدوث الاختلاف في مقاطع الكسر مع ارتفاع درجة الحرارة، إذ تبدي مقاطع كسر السبيكة الأساس انسياباً لزجاً واضحاً عند درجات الحرارة المرتفعة.

ويمكن القول إن الآلية المسؤولة عن نشوء الفجوات في المادة المترابكة تكون نتيجة إرخاء الإجهاد الناتج من انتقال الحمل إلى التقوية، فعندما تكون هنالك إجهادات عالية في الدقائق، فإن إجهادات هيدروستاتيكية موقعية عالية ستتولد في الأرضية القريبة من التقوية تؤدي لضرر مايكروني، كالفجوة (١١) .

#### الاستنتاجات:

١. عند مقارنة معدل زحف المرحلة المستقرة لوحظ ان المادة المترابكة لها معدلات زحف واطئة مقارنة مع السبيكة الأساس خاصة عند درجة حرارة (٢٤٠)

دراسة خواص الزحف للمواد المترابكة ذات  
أساس (Al-Mg-Si) مقواة بدقائق من  
كربيد السليكون

مجلة الهندسة والتكنولوجيا، المجلد ٢٥، العدد ٧، ٢٠٠٧

- Mechanics of Engineering Materials”, John Wiley and Sons, Inc. Fourth Edition, P. ١٥٨. ١٩٩٦
١١. Whitehouse A.F., Winand H. M. A. and Clyne T. W., J. Mat. Sci. and Eng., A٢٤٢, PP. ٥٧-٦٩. ١٩٩٨
  ١٢. Haasen P., Kostorz G., V. Gerold “Strength of Metals and Alloys”, Pergamon Press, Vol. ١, New York, PP. ٢٥١-٢٥٥. ١٩٧٩
  ١٣. M. Mclean, J. of Composite Sci. and Tech., Vol. ٢٣, PP. ٣٧-٥٢. ١٩٨٥
  ١٤. Michael. F. Ashby, David, R. H. Jones, “Engineering Materials”, An Introduction to their properties and Applications, Printed in Great Britain, ١٩٨٠.
  ٣. Zhu Z. G., Weng G. J., J. of Eng. Mat. and Tech., Vol. ١١١, P. ٩٩. ١٩٨٩
  ٤. OH S. Y., Cornie J. A., and Russell K. C., J. of Metall. Trans. A., Vol. ٢٠A, P. ٥٣٣. ١٩٨٩
  ٥. Cadek J., Zhu S. J., Milicka K., J. Mat. Sci. and Eng., A٢٤٨, , PP. ٦٥-٧٢. ١٩٩٨
  ٦. Cadek J., Pahutova M., Sustek V., J. Mat. Sci. and Eng., A٢٤٦, PP. ٢٥٢-٢٦٤. ١٩٩٨
  ٧. Yong Li, Terence G. Langdon, J. Mat. Sci. and Eng., A٢٤٥, PP. ١-٩. ١٩٩٨
  ٨. Dutta, D. L. Bourell, J. Mat. Sci. and Eng., A١١٢, PP. ٦٧-٧٧. ١٩٨٩
  ٩. H. Lilholt, J. Composite Sci. and Tech., Vol. ٢٢, PP. ٢٧٧-٢٩٤. ١٩٨٥
  ١٠. Richard, W. Hertz berg “Deformation and Fracture

الجدول (١) معدلات زحف المرحلة المستقرة ( $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$ )

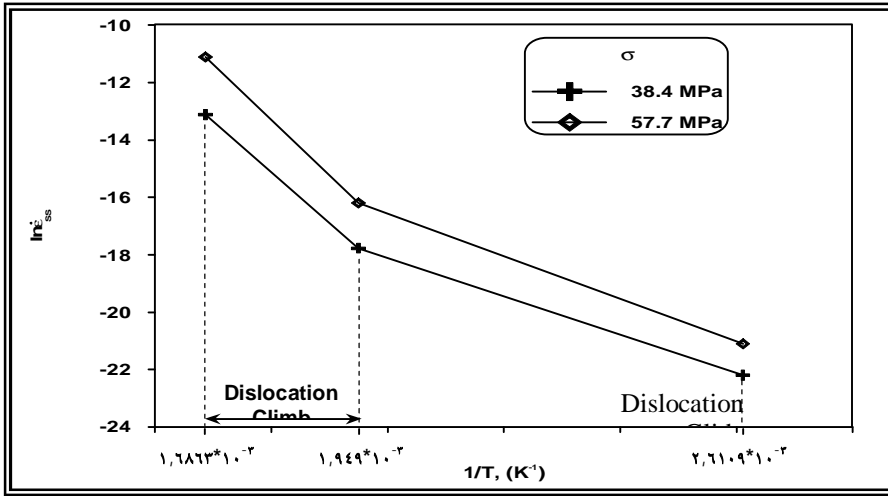
معدل الزحف (S-1)			قيمة الإجهاد (MPa)	المادة
٣٢٠.°	٢٤٠.°	١١٠.°		
$٢ \times ٦ \cdot ١٠^{-١٠}$	$١,٩٢ \times ١٠^{-٨}$	$٢,٣ \times ١٠^{-١٠}$	٣٨,٤	المادة المترابكة
$١,٤٩٥٧ \times ١٠^{-٥}$	$٩,٢٧ \times ١٠^{-٨}$	$٦,٨ \times ١٠^{-١٠}$	٥٧,٧	
$١,٩٤٤٤ \times ١٠^{-٦}$	$١,٦٤ \times ١٠^{-٧}$	$١,٩٥ \times ١٠^{-٩}$	٩,٧	سبيكة الأساس
$٢ \times ١٠^{-٥}$	$٧,٧٩ \times ١٠^{-٧}$	$٦,٤ \times ١٠^{-٩}$	١٩,٤	

الجدول (٢) نتائج حساب الأس الإجهادي.

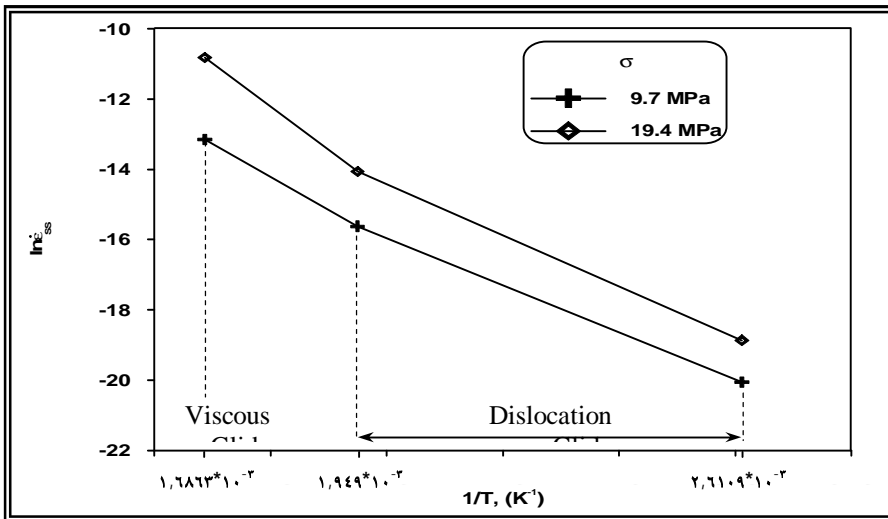
درجة الحرارة (°C)			المادة
٣٢٠.	٢٤٠.	١١٠.	
٤,٩	٣,٨٨	٢,٦٧	قيمة الأس الإجهادي (n) للمادة المترابكة
٦	٣,٣	١,٧١٤	قيمة الأس الإجهادي (n) للسبيكة الأساس

الجدول (٣) نتائج تحليل حيود الأشعة السينية للمادة المترابكة بعد إجراء اختبار الزحف عند درجة حرارة ٣٢٠ °C وإجهاد ٣٨,٤ MPa.

٢	dm (Å)	ds (Å)	Phase	I/Io
٣٤,٢	٢,٦٢١	٢,٦١	$\alpha$ -Sic	٧٠
٣٥,٧	٢,٥١٤	٢,٥١	$\alpha$ -Sic	١٠
٣٨,٥	٢,٣٣٨	٢,٣٣٨	Al	١٠
٤٠,٣٥	٢,٢٣٥	٢,٢٥	Mg <sub>2</sub> Si	١٠
٤٢,٣	٢,١٣٧	٢,١٣	Al <sup>3</sup> Mg	٢٠
٤٣,٦	٢,٠٧٥	٢,٠٨	Al <sup>3</sup> Mg	٢
٤٥,٠	٢,٠١٤	٢,٠٢	Al	٢
٤٦,٠	١,٩٧٢	١,٩٨	$\alpha$ -Sic	١٠
٤٧,١	١,٩٢٩	١,٩٢	Mg <sub>2</sub> Si	١٥
٤٩,٧	١,٨٣٤	١,٨٤	Mg <sub>2</sub> Si	٢

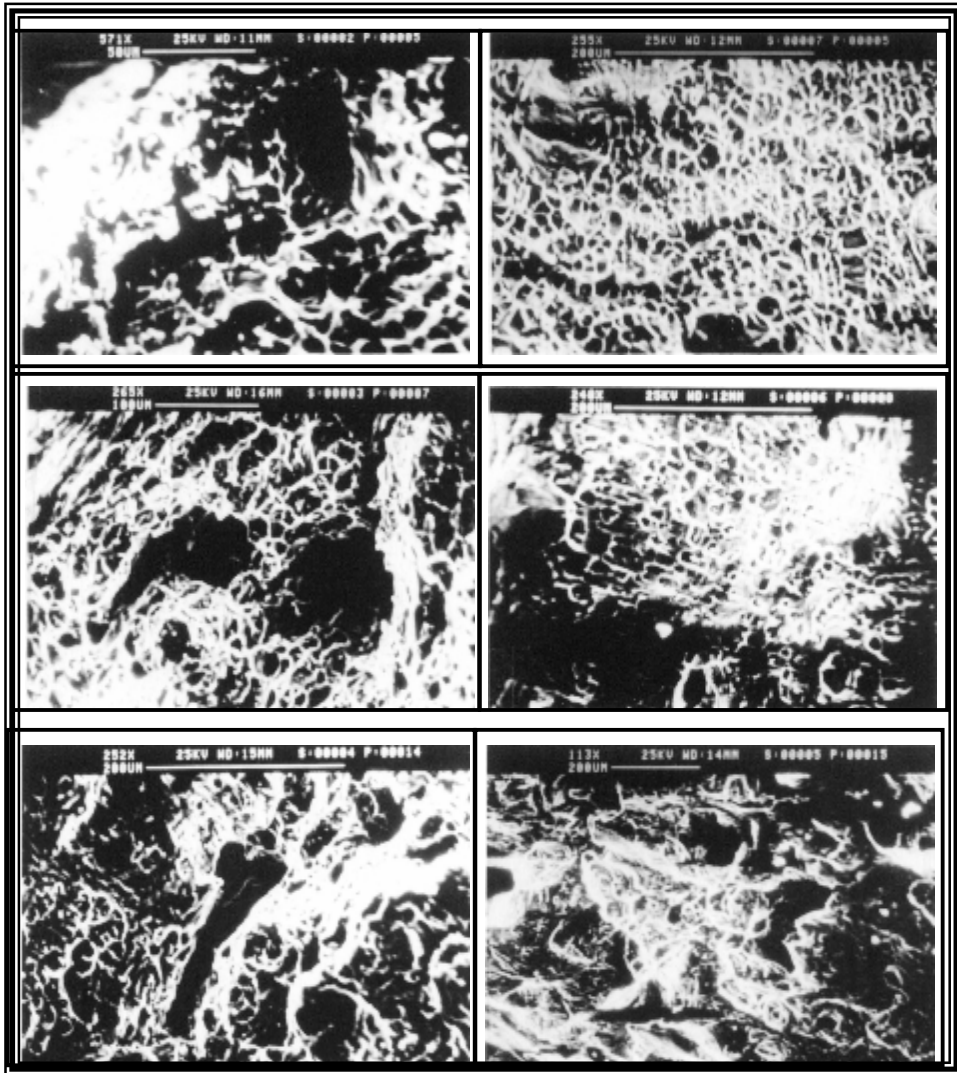


شكل (١) العلاقة بين لوغاريتم معدل الزحف ومقلوب درجة الحرارة للمادة المترابكة.



شكل (٢) العلاقة بين لوغاريتم معدل الزحف ومقلوب درجة الحرارة للسبيكة الأساس.





شكل (٣) صور المجهر الالكتروني لاختبار الزحف المنجز على المادة المركبة