

اختبارات الزحف في سبيكة الايوتكتك Pb-Sn ذات اللدونة الفائقة عند درجات الحرارة العالية

علي النخلاني⁽¹⁾ و محمد عبد الحفيظ⁽¹⁾ و خليل عزيمة⁽²⁾

⁽¹⁾ قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة دمشق – سورية

⁽²⁾ قسم هندسة التصميم الميكانيكي – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق – سورية

تاريخ الإيداع 2011/02/16

قبل للنشر في 2011/08/22

الملخص

دُرِسَ في هذا البحث سلوك الزحف في سبيكة الايوتكتك Pb-Sn، تحت إجهاد شد ثابت. وأجريت تجارب الزحف ضمن مجال من درجات الحرارة 363-433 كلفن. تحت إجهادات شد ثابتة 4.1، 5.3 و 6.279 ميغا باسكال. دُرِسَتْ معطيات خصائص الزحف وحُلَّتْ بطريقة التحليل التقليدي (زحف الحالة الثابتة). كذلك دُرِسَ تأثير درجات الحرارة في منحنيات الزحف ومعامل حساسية الإجهاد و طاقة التنشيط للزحف وحُدِّدَتْ كل من طاقة التنشيط Q وأس الإجهاد n وتساوي 60 كيلو جول/مول و 4 على الترتيب. إذ حُدِّدَتْ كل من طاقة التنشيط وأس الإجهاد آلية تشوه الزحف. وصُوِّرَتْ العينات قبل الزحف وبعده باستخدام المجهر الضوئي؛ وذلك لمعرفة آلية تشوه الزحف في السبيكة.

الكلمات المفتاح: الزحف، الإجهاد، حساسية الإجهاد، سبيكة الايوتكتك Pb-61.9wt%S، اللدونة الفائقة، التحول، طاقة التنشيط.

Creep Testing Of Superplastic Lead–Tin Eutectic Alloy At High Temperature

A. Alnakhlani⁽¹⁾; M. Abdulhafiz⁽¹⁾
and Kh. Azimah⁽²⁾

⁽¹⁾Department of Physics-Faculty of Sciences-Damascus University-Syria.

⁽²⁾Mechanical design Engineering Department -Faculty of Mechanical Engineering and Electrical - Damascus University-Syria

Received 16/02/2011

Accepted 22/08/2011

ABSTRACT

The creep behavior of Pb–Sn eutectic alloy has been investigated. Constant tensile stress creep experiments were carried out in the temperature range from 323 to 433 K and under constant stresses 4.1, 5.3, and 6.3 MPa. The creep data obtained are examined by the conventional analysis of steady-state creep. Attention has been paid to the influence of temperature on creep curves, the stress sensitivity parameter and apparent activation energy of creep. The apparent activation energy and stress exponent for creep were determined as approximately 60 kJ/mol and 4, respectively. The values of n and Q are sensitive to the processes controlling creep deformation. Optical microscope was used to examine the microstructure of the samples before and after creep deformation to determine the mechanisms of creep deformation.

Key words: Creep, Stress sensitivity, Superplasticity, Pb-61.9wt%Sn eutectic alloy, Tress, Transformations, Activation energy.

المقدمة

تتميز سبائك Pb-Sn بعدة صفات: منها ثمنها المنخفض، ودرجة حرارة الايونكتيك المنخفضة (183 درجة مئوية)، وكذلك تتميز بليونية جيدة مقارنة بكثير من المعادن الشائعة، ووقوعها بين درجة التجمد عند نقطة الايونكتك أو مدى التجمد العريض الذي ينتج خلطات (عجينية) صلبة سائلة. وتستخدم كذلك هذه السبائك في كثير من التطبيقات مثل لحام ألواح جسم السيارات وفي وصل الروابط الالكترونية والميكانيكية [1]. إن العديد من الآلات تقتضي ظروف استعمالها أن تعمل عند درجات حرارة مرتفعة وبشكل مستمر. وفي ظروف كهذه تبيّن أن الكسر الحاصل في بعض هذه القطع لا تنطبق عليه العلاقات والقوانين المتعلقة بالخواص الميكانيكية في الظروف الطبيعية العادية. يسبب تطبيق الإجهاد الثابت مع درجات الحرارة المرتفعة انفعالا مستمرا في المادة وفقاً لقيمة الإجهاد ودرجة الحرارة، وقد تتصدع المادة بعد مدة من الزمن. وتسمى ظاهرة الانفعال المستمر تحت تأثير الإجهاد الثابت بالزحف. يتعلق الزحف بعدة عوامل هي: الإجهاد ودرجة الحرارة والبنية المجهرية للمادة وعامل الزمن الذي كان في الخواص الميكانيكية الأخرى عديم التأثير. لذلك فإن أي تغيير في أحد هذه العوامل الأربعة سوف يؤدي إلى تغيير في نتائج الزحف. تستعمل في تحديد خواص الزحف المقادير القياسية الآتية: انفعال الزحف ومقاومته وهي الإجهاد الذي يؤدي إلى كسر العينة بعد مدة محددة من الزمن، حد الزحف المقبول وهو الإجهاد الذي يسبب انفعالا قدره 1% بعد نهاية مدة خدمة العينة. كذلك يؤدي الزحف الناتج عن التشوه المستمر لمادة ما مع الزمن عند إخضاعها لحمل ثابت دورا مهما في السلوك الميكانيكي للمواد، وفي مجموعة واسعة من أنظمة السبيكة لوحظ وجود تشوه واسع تحت إجهادات ثابتة ودون حدوث تكسر [2].

وتشير اللدونة الفائقة للحبيبة المجهرية إلى قدرة المادة المتعددة البلورات لتظهر بشكل عام سلوك متمائل المناحي، وعند درجة حرارة $(T > 0.5 T_m)$ تحدث استطالة شد كبيرة قبل حدوث التكسر (الفسل) [3]. وبالنسبة إلى مادة اللدن الفائق فإن اعتماد الإجهاد على معدل زحف الحالة الثابتة يتبع قانون القوى:

$$\dot{\epsilon}_{st} = A\sigma^n \exp \left[-\frac{Q_c}{RT} \right] \quad (1)$$

إذ: A ثابت، σ الإجهاد المطبق، n أس الإجهاد، Q_c طاقة تنشيط الزحف، R ثابت الغاز، T درجة الحرارة المطلقة بالكلفن [4]. وتحدد قيم n و Q_c آلية التشوه المسيطرة في الزحف، فعندما تكون قيمة أس الإجهاد في المجال (n=1-2) يكون انزلاق حدود الحبيبات هو آلية الزحف المسيطرة، في حين تشير قيم أس الإجهاد (n=4-7) إلى أن تسلق الانخلاع هو آلية الزحف المسيطرة [5]. وتكون قيم n في أغلب تجارب المواد ذات

اللدونة الفائقة (n=1-3) [3]. وتظهر البنية الدقيقة للمواد ذات اللدونة الفائقة بشكل عام حساسية معدل انفعال m عال خلال تشوه الشد إذ m هي مقلوب أس الإجهاد n (m=1/n)، وتكون قيمة m بشكل عام أكبر من 0.3، لذا تكون قيمة n أصغر من 3، وتحدث أكبر استطالة عندما تكون قيمة (n ~ 2) m ~ 0.5.

الشروط الضرورية لتشكل اللدونة الفائقة هي:

أولاً: وجود درجات حرارة اختبار عالية $T_m \geq 0.5 T_m$ إذ T_m درجة حرارة الانصهار المطلقة للمادة.

ثانياً: توافر بنية حبيبية مستقرة ومنتظمة مع أبعاد حبيبات دقيقة أصغر من $10 \mu m$. وتحقق سبائك الايوتكتك هذا الشرط حيث بنية الطورين يمنع نمو الحبيبات المتزايد. وتحدث عادة اللدونة الفائقة في المواد التقليدية عند معدل انفعال منخفض يقع في المجال $10^{-5} s^{-1}$ - $10^{-3} s^{-1}$. مع أنه ذكر أن هناك استطالات عالية تحدث في المواد المختارة عند معدلات انفعال عالية $10^{-2} s^{-1}$ [3, 6, 7, 8]. تركز هذه الدراسة على اختبارات الشد على سبيكة الايوتكتك Pb-61.9 wt%Sn عند إجهادات مختلفة 4.1، 5.3، 6.279 ميغا باسكال، وعند مجال من درجات الحرارة في المجال 323-433 كلفن، وذلك لدراسة تأثير درجات الحرارة والإجهاد في الخواص الميكانيكية للسبيكة وإعطاء معلومات إضافية لسلوك زحف الحالة الثابتة للسبيكة عند مجال من درجات الحرارة المعطاة.

مواد البحث وطرقه

1- تحضير العينات

حضرت العينات بنقاوة عالية 99.99%، وخطت أوزان مناسبة من عناصر السبيكة الثنائية وصهر الخليط مع $CaCl_2$ لمنع التأكسد في بوتقة من الجرافيت، ومن ثم صب المصهور في قالب مصنوع من الفولاذ على شكل قضيب طوله 15cm وقطره 1cm، بعد ذلك عولجت السبيكة المصبوبة عند درجة حرارة 438 كلفن مدة 50 ساعة، ثم بردت السبيكة فجأة إلى درجة حرارة الغرفة من أجل الحصول على حبيبات دقيقة. سُحبت السبيكة إلى أسلاك بقطر 1mm ومن ثم قصت عينات من السلك بطول 50mm لإجراء اختبارات الشد عليها، وعُولجت هذه العينات المسحوبة عند 443 كلفن مدة 4 ساعات وبردت العينات ببطء إلى درجة حرارة الغرفة وبمعدل تبريد 2×10^{-2} كلفن/ثانية؛ وذلك للسماح باستقرار الحبيبات، ثم تركت العينات مدة أسبوع قبل إجراء الاختبارات عليها حتى تكون الحبيبات أكثر استقراراً.

2- الاختبارات الميكانيكية

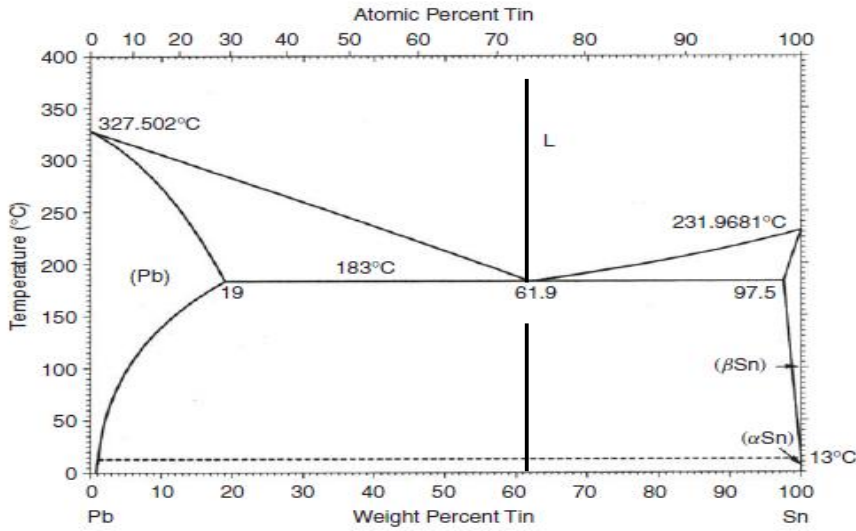
يُختبر الزحف باستخدام أجهزة خاصة، إذ يجري تحميل إحدى نهايتي العينة بأثقال محددة لتوليد إجهادات شد ثابتة فيها، وذلك بعد تحميل العينة على الجهاز، وتوضع العينة داخل فرن كهربائي ذي مزدوجة حرارية للتحكم في درجتها حيث ترتفع درجة حرارته إلى الدرجة المطلوبة قبل البدء بالتحميل. وتثبت العينة تثبيتاً جيداً إلى فكين أحدهما ثابت والآخر متحرك، ثم نطبق الحمولة ببطء بدءاً من الصفر حتى الإجهاد المحدد. ويوضح الشكل (1) صورة توضيحية لمنظومة الشد المستخدمة. وتختبر مجموعة من العينات مع تغيير الإجهاد أو الحرارة لكل عينة. ويقاس في هذا الاختبار الانفعال بتابعية الزمن. ثم ترسم مجموعة من المنحنيات من أجل درجات حرارة مختلفة وإجهاد ثابت. وأجريت تجارب الانفعال - الزمن الأيزوثرمية (متساوي الحرارة) تحت إجهادات مطبقة ثابتة مقدارها 4.1، 5.3، 6.279 ميغا باسكال عند درجات حرارة مختلفة تقع في المجال من 363 إلى 433 كلفن بمقدار تغيير 10 كلفن. وقيست استطالة عينات الأسلاك باستخدام مقياس استطالة دائري (dial gauge) مقدار حساسيته 10^{-5} متر. ويقع الخطأ التجريبي للقياس ضمن المجال $\pm 0.5\%$. وجرى التحكم بدرجة الحرارة بدقة من رتبة $\pm 1K$ باستخدام جهاز ثرموكمبيوتر من نوع KELVIN THERMO-COMPUTER MOD:TOUCH (K) متصل بحساس حراري من نوع (K) قريب من مركز العينة المدروسة.



الشكل (1) صورة توضيحية لمنظومة الشد المستخدمة في البحث

النتائج والمناقشة

نلاحظ من منحنى توازن الأطوار (شكل 2) للسبيكة الثنائية Pb-Sn أن نقطة الايوتكتك (eutectic point) تقع عند أقل درجة حرارة انصهار في منحنى التوازن الحراري، وعندها تسلك السبيكة سلوكاً مركباً وحيداً من ناحية درجة حرارة الانصهار، وكذلك في طبيعة التركيب البنائي الداخلي، حيث تتكون سبائك اللدونة الفائقة عند نقطة الايوتكتك وتتحقق شروط اللدونة الفائقة المشار إليها في المقدمة وفقاً للأدبيات العلمية [10]. يتكون اتران البيئة المجهرية لسبيكة الايوتكتك Pb-61.9-wt%Sn من خليط الايوتكتك الطور الغني بالرصاص Pb (قريب من Pb النقي) والطور الغني بالقصدير Sn. يعتمد الانفعال المستمر عند مستوى إجهاد معين خلال عملية الزحف اعتماداً أساسياً على كل من: أبعاد حبيبات عينة الاختبار، ودرجة حرارة التشكل (التشوه)، وتفاعل الانخلاعات، وعيوب الشبكية مع الذرات المذابة.



الشكل (2) منحنى توازن الأطوار للسبيكة الثنائية Pb-Sn، حيث تتكون سبائك اللدن الفائقة عند نقطة الايوتكتك حيث الخط العمودي [10].

تتشكل في المواد المعدنية عيوب بنيوية مع زيادة الانفعال، ويؤدي ذلك إلى كبح انزلاق حدود الحبيبات وتسلقها. وبالعكس يظهر معدل التشوه اللدن عند تطبيق إجهاد على المادة بدرجات حرارة منخفضة أو مرتفعة، ويمكن أخذ معدل التشوه اللدن كقريئة لقياس قوة إجهاد الشد للمواد. لذا خلال اختبار الزحف تشارك حدود الحبيبات بتقوية المادة أو إضعافها، ويعتمد ذلك على قيمة درجة حرارة التشوه والإجهاد المطبق وتركيز الشوائب. ومع أن كلا من هذه العوامل تعمل بشكل منفرد فإن السلوك النهائي ينتج عن هذه العوامل [9].

1- خصائص منحنيات الزحف:

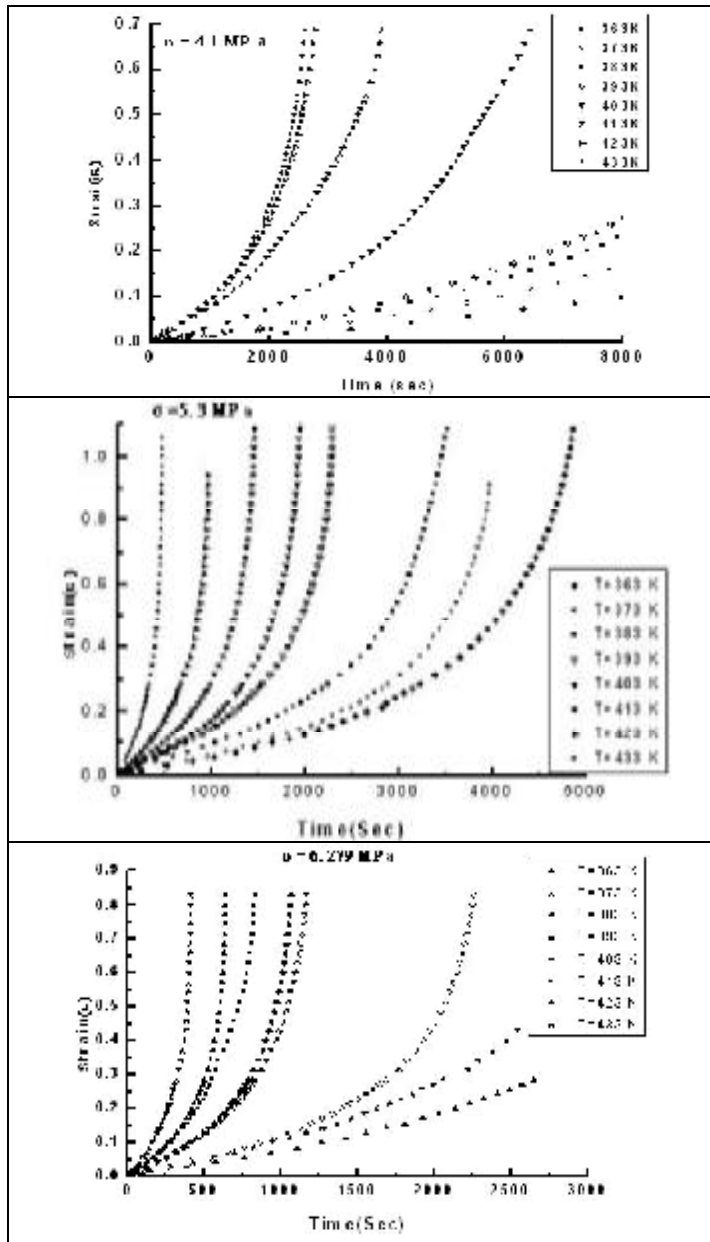
يوضح الشكل (3) منحنيات الزحف للسيبكية Pb-61.9-wt%Sn عند درجات حرارة تشوه مختلفة وتحت إجهادات مطبقة مختلفة ويتضح أيضا من هذا الشكل الخصائص المادية للزحف الثانوي بعد الحمل مع زحف ابتدائي قليل جدا. ويمكن ملاحظة الزحف الثلاثي بشكل واضح، وهذا يوضح أن قساوة السبكية تستعاد مباشرة وتتنز عند معدل التشوه الثانوي. ومع ذلك اختلاف معدلات الزحف ($\dot{\epsilon}$) يظهر أن سلوك الزحف للسيبكية Pb-61.9 wt%Sn (الأبوتكتك) يتأثر بدرجة حرارة التشوه T بشكل قوي وسريع وبالإجهاد المطبق σ ، ويظهر انتقال بطيء باتجاه الانفعالات العالية بزيادة واحد أو أكثر من شروط اختبار الزحف σ و T. حيث يزداد الزحف بزيادة مستوى الإجهاد المطبق ودرجة الحرارة المطبقة. ويحدد معدل انفعال الزحف عند أي زمن معطى بتفاضل انفعال الزحف بالنسبة إلى الزمن. وتؤخذ القيمة الدنيا للمعدل $\partial\epsilon/\partial t$ كمعدل انفعال زحف لمرحلة الحالة الثابتة $\dot{\epsilon}'_{st}$. ويوضح الشكل (4) العلاقة بين القيم المحسوبة لـ $\dot{\epsilon}'_{st}$ بتابعية درجة حرارة الزحف عند الإجهادات المطبقة الثابتة. إذ نجد زيادة في $\dot{\epsilon}'_{st}$ بتأثير كل من درجة حرارة الزحف والإجهادات المطبقة الثابتة ضمن المراحل الثلاث لدرجات الحرارة.

2- اعتماد معدل زحف الحالة الثابتة على الإجهاد:

يمكن الحصول على معدل انفعال زحف الحالة الثابتة $\dot{\epsilon}'_{st}$ عند ثبات درجة الحرارة والإجهاد المطبق σ بناءً على قانون قوى الإجهاد الآتي:

$$\dot{\epsilon}'_{st} = B \sigma^n \quad (2)$$

إذ B ثابت و n أس الإجهاد ($n = \partial \ln \dot{\epsilon}'_{st} / \partial \ln \sigma$). بناءً على منحنى الزحف المبيّن في الشكل (3) نحصل على معدل انفعال زحف الحالة الثابتة ($\dot{\epsilon}'_{st} = -\partial \epsilon / \partial t$) من ميل الجزء الخطي لمنحنيات الانفعال مع الزمن. ونحصل على أس الإجهاد n كما هو مبيّن بالشكل (5a) باستخدام طريقة المربعات وأخذ أفضل خط للنقاط المناسبة كدالة في درجات الحرارة كما هو موضح بالشكل (5b)، نجد أن قيمة (n) تعتمد على درجة حرارة التشوه T ومن هذا الشكل نجد أن قيمة n تقل بزيادة درجة حرارة التشوه، ويتضح من هذه الدراسة أنه خلال تطبيق إجهاد عند درجات حرارة مختلفة، أن زيادة معدل انفعال الحالة الثابتة $\dot{\epsilon}'_{st}$ بزيادة الإجهاد المطبق يعتمد اعتمادا رئيسيا على التفاعل بين الانخلاعات الناشئة عن التشوه المستمر وظهور مراكز تعيق حركة الانخلاعات في عينات المحلول الصلب. ويلاحظ في الشكل (5b) أن نقصان n مع درجات الحرارة (زيادة حساسية معدل الانفعال m)، يشير أيضا الشكل (5b) إلى إمكانية حصول بعض الترتيب بسبب الإثارة الحرارية عند درجات الحرارة العالية. ولذا ستكون حركة الانخلاعات أسهل عند درجات الحرارة الأعلى، والقيم المنخفضة لأس الإجهاد n كما هو متوقع عند مثل هذا المدى من درجات الحرارة [9,11]. ولما كانت قيم أس الإجهاد تحدد آلية تشوه الزحف، فإن قيم n الواقعة في المجال من 3-8 تمثل نوع الانخلاع لآلية الزحف [12]. وتوحي القيم العالية نسبيا لمعدل زحف الحالة الثابتة وقيم n من 2.8 إلى 4.3، بأن تسلق الانخلاع هو الآلية المتحكممة في تشوه الزحف.



الشكل (3) منحنيات انفعال-زمن لعينات السبيكة Pb-61.9-wt% Sn عند درجات حرارة مختلفة وتحت تأثير إجهادات مطبقة مختلفة.

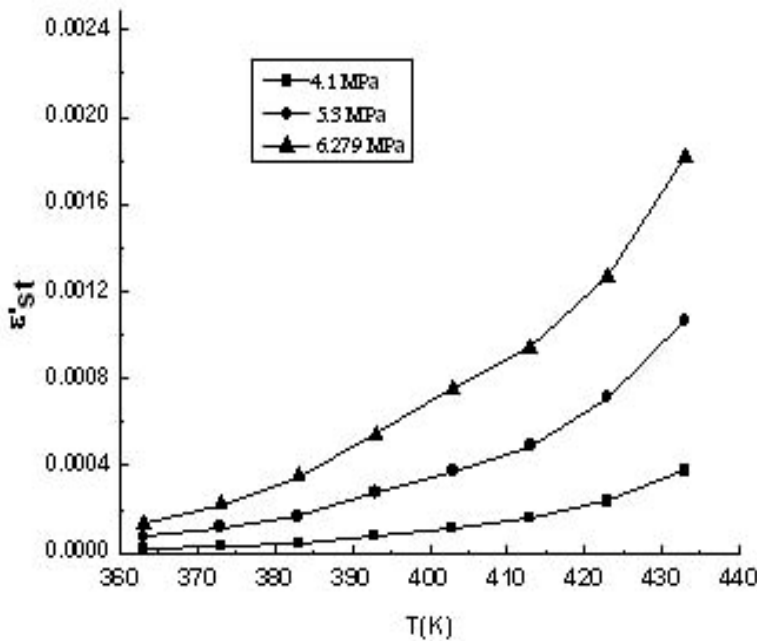
بشكل عام، تلاحظ اللدونة الفائقة عندما تكون m مساوية أو أكبر من 0.3. إذ m تحسب من العلاقة:

$$\sigma = C \epsilon_{st}^m \quad (3)$$

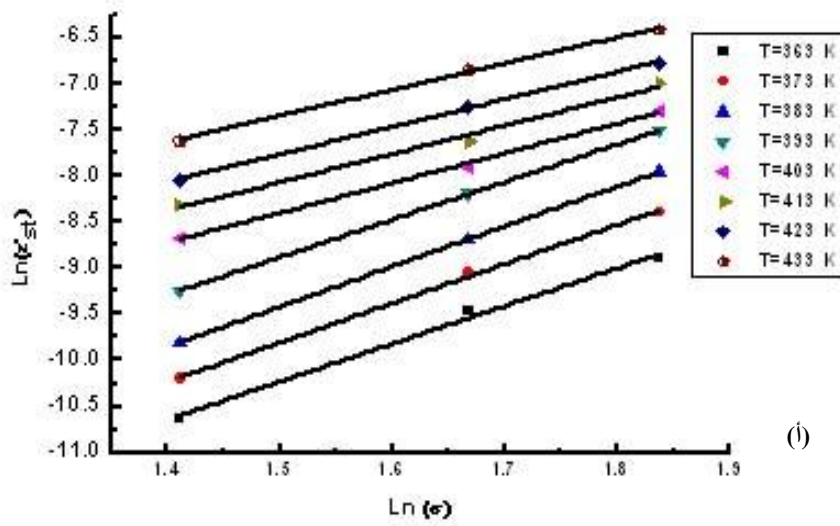
إذ C ثابت، m حساسية معدل الانفعال.

وتكون قيم m للسبيكة Pb-61.9-wt%Sn أقل من 0.3 عند درجات الحرارة المنخفضة في المجال 363 - 393K كلفن. لذا لا يحدث سلوك اللدونة الفائقة في هذا المجال. وبشكل آخر، فإن قيم m للسبيكة Pb-61.9-wt%Sn تزيد على 0.3 عند درجات الحرارة المرتفعة في المجال 403 - 433K كلفن، - إذ m تقع في المجال (0.3-0.35)- وهذا يدل على حدوث سلوك اللدونة الفائقة في هذا المجال من درجة الحرارة لهذه السبيكة.

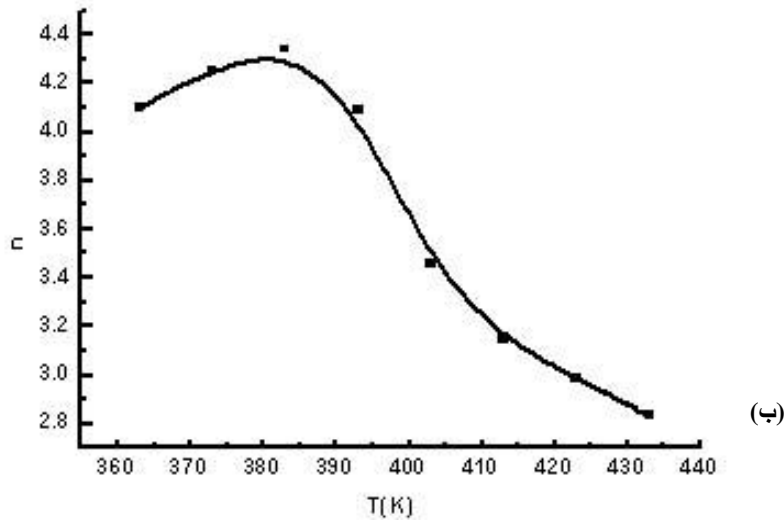
وتزداد قيم m لهذه السبيكة بشكل واضح مع درجة الحرارة المتجانسة (homogeneous). وهذا بدوره يشير إلى أن مقاومة التخصر للسبيكة Pb-61.9-wt%Sn تزداد بزيادة درجة الحرارة.



الشكل (4) العلاقة بين معدل الانفعال ϵ'_{st} كتابع لدرجات الحرارة



(أ)



(ب)

الشكل (5)

(أ) العلاقة بين $\ln \dot{\epsilon}_{st}$ و $\ln \sigma$ للسبيكة Pb-61.9-wt% Sn عند درجات حرارة اختبار مختلفة كما هو مشار إليه بالشكل
 (ب) تابعة أس الإجهاد n لدرجة الحرارة T .

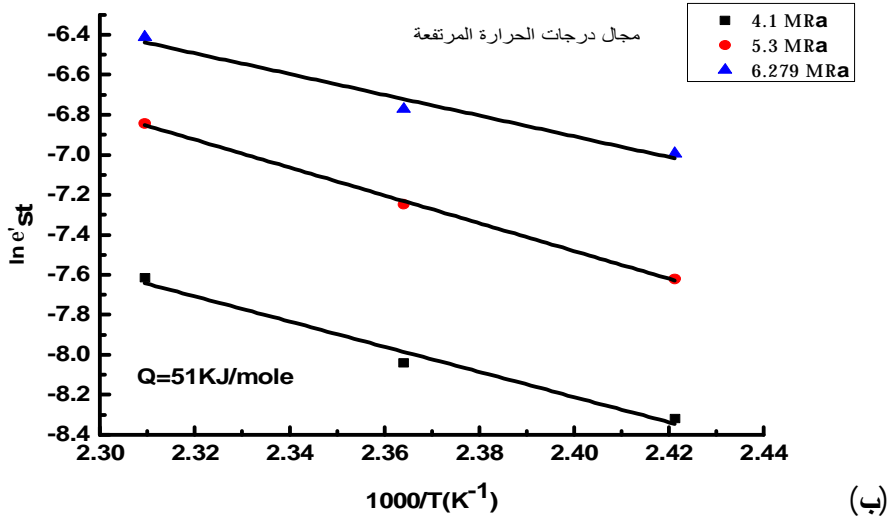
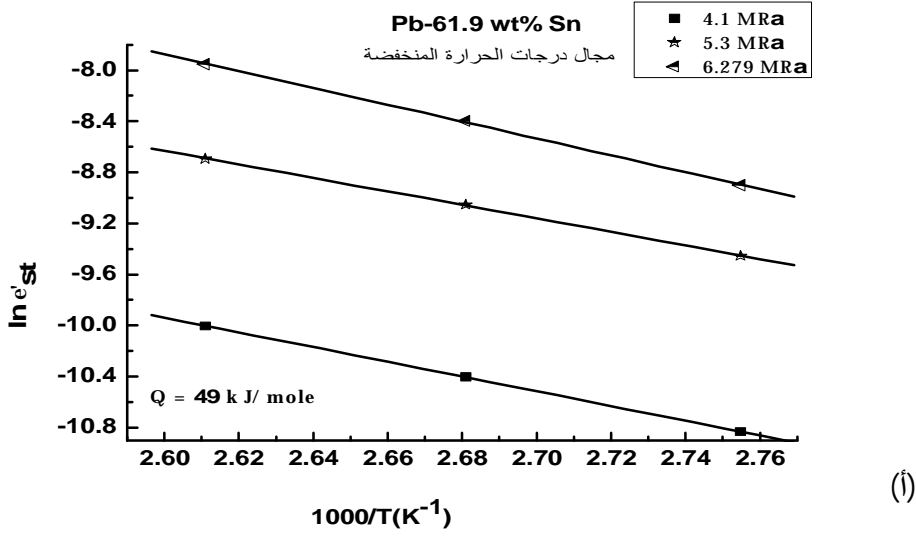
3- تحديد طاقة تنشيط الزحف:

تحدد طاقة تنشيط Q_c عملية الزحف من معادلة ارينوس ($\log \epsilon'_{st}$ بدلالة $1/T$) كما هو مبين بالشكل (6) إذ تعطي خطوطاً مستقيمة من أجل الإجهادات المطبقة المختلفة عند درجات حرارة اختبار مختلفة. وقد وجد أن طاقة التنشيط المحسوبة لزحف الحالة الثابتة تعتمد على الإجهاد المطبق. كثيراً ما تستخدم قيم كل من طاقة التنشيط التجريبية وأس الإجهاد لتحديد الآلية المسيطرة في عملية التشوه [13]. وبالحقيقة يحدث تشوه المواد المتعددة البلورات عند درجة حرارة أكبر من $0.5T_m$ بالآليات تشوه مختلفة ترتبط بقيم كل من أس الإجهاد وطاقت التنشيط. ويلاحظ أن انزلاق الانخلاع اللزج يتميز بأس إجهاد مقداره 3 عند درجات الحرارة المرتفعة، وبقيمة 5 عند درجات الحرارة المنخفضة، وكذلك يفيد بأن طاقت التنشيط الموافقة تكون متساوية لكل من الانتشار البيني للمذاب وانتشار الانخلاع. حيث يصبح تسلق الانخلاعات هو الآلية المسيطرة في المعادن النقية عند درجات الحرارة العالية، مع قيم n تقع في المدى 4-6 وطاقة تنشيط مساوية لطاقة تنشيط الانتشار الذاتي ضمن الشبكة [14].

توجد في السبائك الحالية آليات زحف مختلفة تظهر عند مجال من درجات الحرارة المنخفضة والمرتفعة. ويكون متوسط طاقة تنشيط زحف الحالة الثابتة عند درجات الحرارة المنخفضة في المجال 363-393 كلفن (أقل من درجة حرارة 393) مقداره 49 kJ/mole، في حين يكون متوسط طاقة تنشيط زحف الحالة الثابتة عند درجات الحرارة المرتفعة في المجال 403-433 كلفن (فوق درجة حرارة 393) مقداره 51 kJ/mol، وهذا يتفق مع طاقة التنشيط لسبائك أخرى الجدول (1) [15]. وهكذا يؤدي التركيز الوزني دوراً يكون له عامل مهم في نمو الحبيبات. ويكون هذا الأثر هو المسؤول عن الاختلاف الكبير في تلك السبائك. ويمكن أن تعزى هذه الاختلافات إلى اختلاف طرائق الاختبار والبنية المجهرية، وطرائق تحضير العينات وأخطاء القياس، وطرائق معالجة المعطيات.

الجدول (1) مقارنة خصائص زحف الحالة الثابتة للسبائك مع سبائك مختلفة

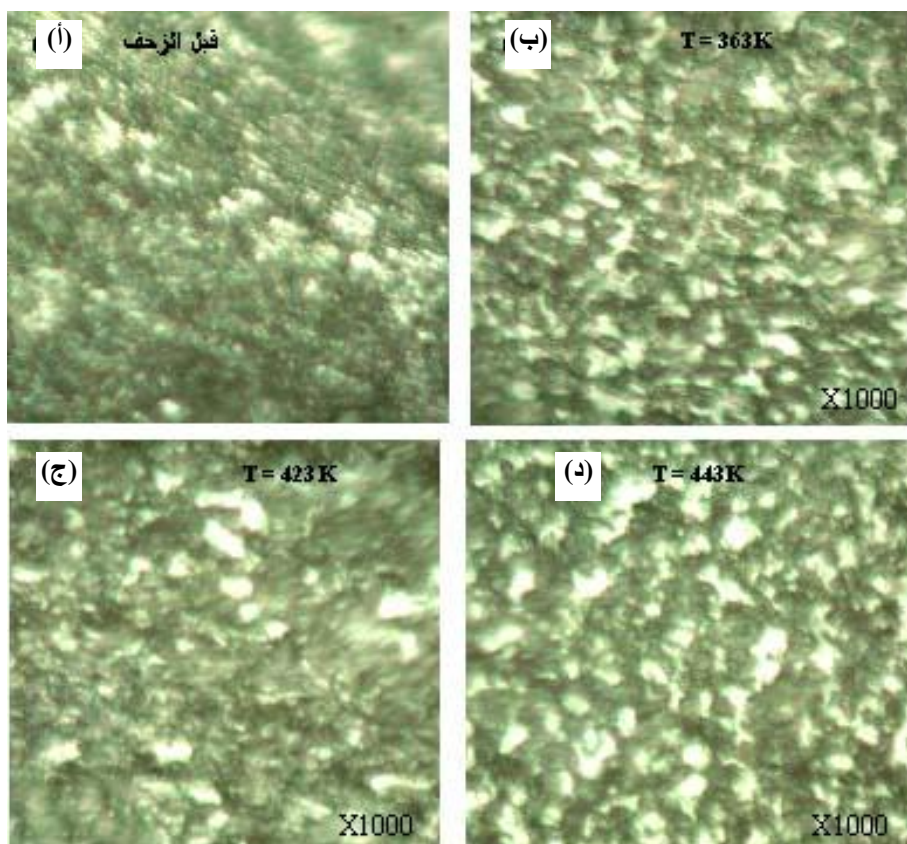
المرجع	متوسط البعد الحبيبي (μm)	طاقة التنشيط Q (kJ mol^{-1})	معدل الحساسية	الاستطالة (%)	الإجهاد المطبق (MPa)	درجة حرارة الانصهار (K)	السبيكة
[15]	3-5	49-56	0.24-0.35	180	4.1 – 6.3	455	Pb-61.9 wt%Sn (eutectic)
	70	46.2-88.2	0.17-0.43	17	12.73-22.91	588	Pb-10Sn (binary)
	5-9	42-63	0.54-0.88	70	7.63-12.73	456	Pb-Sn (eutectic)



الشكل (6) العلاقة بين $\ln e'_{st}$ ومقلوب درجة الحرارة ($1000/T$) عند إجهادات مطبقة مختلفة للسبيكة Pb-61.9 wt% Sn (أ) عند درجات الحرارة المنخفضة، (ب) عند درجات الحرارة المرتفعة.

4- البنية المجهرية (الميكروسكوبية)

يمكن ملاحظة البنية المجهرية لزحف العينات عند درجات حرارة مختلفة وإجهادات مطبقة مختلفة باستخدام المجهر الضوئي. ويوضح الشكل (7) البنية المجهرية للعينات المدروسة عند إجهاد ثابت 6.279MPa وعند درجات حرارة 363 ، 423 ، 433 كلفن على الترتيب. ويبيّن الشكل (7) أن نشوء البنية المجهرية تتغير مع تغير درجة الحرارة.



الشكل (7) البنية المجهرية لعينات السبيكة Pb-61.9wt\%Sn عند تليدين 438K مدة 4 h (أ) قبل الزحف، (ب، ج، د) بعد الزحف عند إجهاد ثابت 6.279MPa وعند درجات حرارة 363 ، 423 ، 443 K على الترتيب.

الاستنتاجات

يمكن تلخيص الاستنتاجات المهمة بما يأتي:

1. يزداد كل من حساسية معدل انفعال الحالة الثابتة m وطاقة التنشيط Q بزيادة درجة حرارة التشوه في حين تقل قيمة أس الإجهاد n .
2. يتغير متغير حساسية معدل انفعال الحالة الثابتة من 0.23 إلى 0.27 في مجال من درجات حرارة الاختبار، وتصف بآلية تسلق الانخلاعات.
3. يكون مقدار طاقة التنشيط زحف الحالة الثابتة فوق درجة حرارة التحول 56 kJ/mol .
4. وجد أن قيم n تتفق اتفاقاً جيداً مع قيم اختبارات الزحف للسبائك نفسها. وتدلُّ قيم أس الإجهاد من 4.6 إلى 3.7 للسبيكة Pb-61.9wt%Sn أن تسلق الانخلاع هي آلية تشوه الزحف.

REFERENCES

- [1] Russell, A. M. and Lee, K. L. 2005. "STRUCTURE-PROPERTY RELATIONS. IN NONFERROUS METALS". JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION. Canada.
- [2] Abd El-Khalek A.M., 2009. Steady state creep and creep recovery behaviours of pre-aging Al-Si alloys. *Materials Science and Engineering A* 500, pp.176-181.
- [3] Perez- Prado, M.-T. and Kassner, M. E. 2009. "Fundamentals of Creep in Metals and Alloys", 2nd Ed. .
- [4] Schoeller, H. Bansal, S. Knobloch, A. Shaddock, D. and Junghyun, C. 2011. Effect of alloying elements on the creep behavior of high Pb-based solders. *Materials Science and Engineering A* 528, pp. 1063-1070.
- [5] El-Daly A. A., Mohamad A. Z., Fawzy A, El-Taher A. M. 2011. Creep behavior of near-peritectic Sn-5Sb solders containing small amount of Ag and Cu. *Materials Science and Engineering A* 528, pp.1055-1062.
- [6] Soliman, M. S and Al-Seif. K. A. 2005. COMPRESSION TESTING OF SUPERPLASTIC LEAD-TIN EUTECTIC ALLOY AT ROOM TEMPERATURE. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 30, Number 2B.
- [7] Radhakrishna Panicker M R. 2007. Superplastic deformation behaviour of AZ31 magnesium alloy, Ph. D. Thesis, Indian Institute of Science Bangalore - 560 012, India.
- [8] Giuliano. G. 2006. Failure analysis in superplastic materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, pp.1604-1609.
- [9] Fawzy. A. 2009. Creep properties of Ag-2 wt% Cu alloy in the solid solution region. *Journal of Alloys and Compounds* 486, pp. 768-773.
- [10] Frederick E. Wang. 2005. *Bonding Theory for Metals and Alloys*, Elsevier.
- [11] Ganainya. G. S. Al, Fawzy. A, Abd El-Salam. F. 2004. Transient and steady-state creep characteristics of Cu-2wt% Sn alloy in the solid solution region. *Physica B*, pp.344-443.
- [12] Chiu, Y. T. Lin, C-K and wu, J-C. 2011. High-temperature tensile and creep properties of a ferritic stainless steel for interconnect in solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources* 196, pp. 2005-2012.
- [13] Chen, L. 2010. Tensile creep behavior and strain-rate sensitivity of superalloy GH4049 at elevated temperatures_files. *Materials Science and Engineering A* 527, pp. 1120-1125.
- [14] Nayyeri. G, Mahmudi. R. 2010. Effects of Sb additions on the microstructure and impression creep behavior of a cast Mg-5Sn alloy. *Materials Science and Engineering A* 527, pp. 669-678.
- [15] El-Daly, A. A. Abdel-Daiem, A. M. Abdel-Rahman, A. N. Mohammed, S. M. 2004. Effect of Zn-addition and structural transformation on the creep behaviour of Pb-10 wt.% Sn alloy. *Materials Chemistry and Physics* 85, pp.163-170.