

## خصائص زحف السبيكة الثلاثية (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn

علي النخلاني<sup>(1)</sup> و محمد عبد الحفيظ<sup>(1)</sup> و خليل عزيمة<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة دمشق – سورية

<sup>(2)</sup> قسم هندسة التصميم الميكانيكي – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق – سورية

تاريخ الإيداع 2011/05/15

قبل للنشر في 2011/12/05

### الملخص

جرى في هذا البحث دراسة سلوك الزحف في السبيكة الثلاثية (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn، تحت إجهادات شد ثابتة 5.25، 6.554، 7.802 ميغا باسكال وعند درجات الحرارة في المجال 363-433 كلفن. كما درست خصائص الزحف بطريقة الزحف التقليدية (زحف الحالة الثابتة). أظهرت نتائج خصائص الزحف منطقتي تشوه (فوق الدرجة 393 كلفن وتحتها). يزيد معدل انفعال الزحف ويقل عمر الزحف بزيادة كل من الإجهاد المطبق ودرجة الحرارة. حُدَّت كل من طاقة التنشيط Q وأس الإجهاد n، حيث حُدَّت كل من طاقة التنشيط وأس الإجهاد آلية تشوه الزحف. وقد دلت النتائج أن انزلاق الحدود الحبيبية هي الآلية المحتملة للزحف في السبيكة عند الإجهاد المطبق ودرجة الحرارة المعتبرة. كما دُرست البنية المجهرية للعينات المحضرة فوق درجة حرارة التحول وتحتها باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) المزود بمطيافية التبدد الطاقوي للأشعة السينية (EDX).

الكلمات المفتاحية: سلوك الزحف، سبيكة (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn، زحف الحالة الثابتة، التشوه، طاقة التنشيط، انزلاق حدود الحبيبية، البنية المجهرية.

## Creep properties of (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn ternary alloy

A. Alnakhani<sup>(1)</sup>; M. Abdulhafiz<sup>(1)</sup>  
and Kh. Azimah<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Department of Physics-Faculty of Sciences-Damascus University-Syria.

<sup>(2)</sup> Mechanical design Engineering Department -Faculty of Mechanical Engineering and Electrical - Damascus University-Syria

Received 15/05/2011

Accepted 05/12/2011

### ABSTRACT

This study examines the creep behavior of (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn ternary alloy. The steady state creep for ternary alloy was investigated under different applied stresses of 5.25, 6.554 and 7.802 MPa at temperatures ranging from 363 to 433K. The results of creep characteristics show two deformation regions (below and above 393 K). The creep strain rate increases and creep lifetime decreases as the applied stress level and temperature increase. Both the stress exponent(n) and activation energy (Q) were measured to identify the controlling mechanism for creep deformation. Grain boundary sliding is the possible creep mechanism within the given stress level and temperature. Microstructure examination of the deformed samples below and above the transition temperatures was performed by scanning electron microscope (SEM) with energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX).

**Key words:** Creep behavior, (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn alloy, Steady state creep, Deformation, Activation energy, Grain boundary sliding, Microstructure.

## المقدمة

نتيجة للتطور الصناعي الكبير الذي يشهده العالم في المجالات كلها، سعى العلماء والباحثون إلى إيجاد بدائل مختلفة للمواد ذات الاستخدامات الصناعية المتعددة، حيث تحتاج العديد من التطبيقات الصناعية إلى مزيج من الخواص الملائمة التي لا يمكن الحصول عليها من المواد النقية. ومن أهم هذه الخواص هي اللدونة والمقاومة النوعية العالية والمتانة. وتعدُّ سبائك الرصاص - قصدير - زنك من السبائك المستخدمة في التطبيقات التكنولوجية والصناعية حيث تمتلك هذه السبائك خصائص ميكانيكية مهمة تتضمن اللدونة والقدرة على التشكل ومقاومة عالية للتآكل، وسيولة عالية عند الانصهار، كما تمتاز بلدونة عالية جداً. وتستخدم العديد من سبائك الرصاص قصدير في التطبيقات الصناعية عندما تكون مقاومة الزحف خاصة مهمة في هذه الحالة. ومن أهم الطرائق المعتمدة لتحسين اللدونة وقابلية الطرائق والسحب هي إضافة عناصر سبائكية، وقد أجريت العديد من الدراسات في هذا المجال للحصول على تحسن مستمر لسبائك الرصاص قصدير [1]. أُضيف الزنك إلى سبيكة الرصاص قصدير الأيونتكتيكية حيث يعمل طور Zn على زيادة الاستطالة ويقل الإجهاد، وتقل درجة حرارة انصهار السبيكة. ويعمل على تقليل حجم الحبيبة مما يؤدي إلى نقص أو تقليل مقاومة الانتقالات عن طريق الانزلاق عبر حدود الحبيبات التي تقلل الإجهاد وتزيد من استطالة السبيكة. وحيث يزيد نمو الحبيبات خلال عملية الزحف تعمل إضافة الزنك على تقليل هذا الأثر بسبب الإعاقة النسبية لحدود مناطق الانتقال [2].

يعرف الزحف بأنه التشوه اللدن الذي يحدث في المواد الصلبة تحت إجهاد ثابت وعند درجات الحرارة العالية عادة فوق  $0.5 T_m$ ، إذ  $T_m$  نقطة الانصهار المطلقة للمادة [3]. ويمكن تقسيم منحنى الزحف المثالي إلى ثلاث مراحل:

تعرف المرحلة الأولى بالزحف الابتدائي أو الزحف العابر، وتتميز بمعدل انفعال يبدأ بقيمة عالية نسبياً، لكنه يتناقص إلى قيمة منخفضة جداً وقيمة ثابتة تقريباً. تكون هذه النقطة هي نهاية الزحف الابتدائي وبداية الزحف الثانوي، أو زحف الحالة الثابتة، وفيها يكون معدل الزحف مستقراً تقريباً مع الزمن ليعطي خطاً مستقيماً. وتتميز نهاية المرحلة الثانية ببدء التزايد الخطي لمعدل الانفعال. وتشير المرحلة الثالثة إلى الزحف الثلاثي، أو الزحف المتسارع، وفيه يزيد معدل الزحف بسرعة مع مرور الزمن وصولاً إلى نقطة الانهيار.

بالنسبة إلى منحنيات الزحف تعدُّ المرحلة الثانية أو مرحلة زحف الحالة الثابتة أهم مرحلة للتحليل والتنبؤ بالعمر الفعلي للمواد [4]. ومن المعروف أن خصائص الزحف تعتمد على الإجهاد المطبق ودرجة الحرارة والبنية الدقيقة للعينة [5]، إذ تلعب دوراً مهماً

في السلوك الميكانيكي للمواد. لوحظ تشوه واسع بتأثير الإجهادات الثابتة ودون حدوث التكسر في نطاق واسع من هذه السبائك [6]. كما لوحظت بعض التغيرات التجريبية في الخواص الميكانيكية للمواد عندما تمر بمرحلة التحول [7]. ويؤدي الزحف دوراً مهماً في تشوه المعادن عند تجاوزها درجة حرارة  $0.5T_m$ ، كما في معظم السبائك [8]. تتميز المادة بتشوه متغير بتأثير الإجهاد المطبق والظروف الحرارية. واستمرار التشوه تحت الإجهاد يُصلب أو يُفسي المواد البلورية ويسمح لها بالاستعادة أو التطرية (recovery) [9].

يقدر في هذه الدراسات متغيراً الزحف (أس الإجهاد  $n$  وطاقة تنشيط الزحف  $Q$ ). يلاحظ وجود فرق كبير في قيم  $n$  و  $Q$  بالقرب من  $(0.8T_m)$ . يشير الفرق الكبير في طاقة تنشيط الزحف في هذه الدراسات إلى أن الآلية المسيطرة في عملية الزحف تختلف عند درجة حرارة التحول. يمكن دراسة خصائص السبائك بتقنيات تجريبية مختلفة، مثل: زحف الشد التقليدي [5، 10]. إذ إن الزحف هو واحد من أهم سلوك التشوه الأكثر شيوعاً وأهمية في السبائك، فمن الضروري معرفة سلوك متغيرات الزحف مع التحولات الطورية والإجهادات المطبقة.

في هذا العمل سوف نقوم بدراسة سلوك زحف الشد في السبيكة الثلاثية (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn في مجال درجات الحرارة وعند إجهادات مختلفة. ومقارنة النتائج التجريبية بدراسات سابقة على سبائك مشابهة، واقتراح آلية لوصف تشوه الزحف عند درجات الحرارة المرتفعة وشرح آلية تشوه الزحف الممكنة.

## مواد البحث وطرقه

### 1- تحضير العينات:

حُضرت السبيكة (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn بنقاوة عالية 99.99%، وذلك بصهر عناصر السبيكة في بوتقة من الجرافيت وصهر الخليط بوجود  $CaCl_2$  لمنع حصول التأكسد، 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 لمدة 50 ساعة، ثم بردت السبيكة فجائياً إلى درجة حرارة الغرفة من أجل الحصول على حبيبات دقيقة. جرى سحب السبيكة إلى أسلاك بقطر 1mm، ومن ثم قصت عينات من السلك بطول 50mm لإجراء اختبارات الشد عليها، وعولجت هذه العينات المسحوبة عند 443 كلفن لمدة 4 ساعات، وُبردت إلى درجة حرارة الغرفة بمعدل تبريد  $2 \times 10^{-2}$  كلفن/ثانية. بعد هذه المعالجة الحرارية للعينات تركت العينات الملدنة عند درجة حرارة الغرفة مدة أسبوع قبل إجراء الاختبارات، وهذا الإجراء يعمل على استرخاء الحبيبات البلورية واستقرارها [11].

## 2- الاختبارات الميكانيكية

يُختبر الزحف باستخدام أجهزة خاصة (آلات الشد الميكانيكية) إذ يجري تحميل إحدى نهايتي العينة بأثقال محددة لتولد فيها إجهادات شد ثابتة، استخدمت أوزان مختلفة كمصدر حمل لاختبار الزحف مباشرة وجرى ضبط قيمة الإجهاد المطبق عن طريق ضبط الأوزان المستخدمة؛ وذلك بعد تحميل العينة على الجهاز. توضع العينة داخل فرن كهربائي ذي مزدوجة حرارية للتحكم في درجات الحرارة إذ ترفع درجة الحرارة إلى الدرجة المطلوبة قبل البدء بالتحميل. تثبت العينة تثبيتاً جيداً إلى فكين، أحدهما ثابت والآخر متحرك، ثم نطبق الحمولة ببطء بدءاً من الصفر وحتى تحطم العينة. وتختبر مجموعة من العينات مع تغيير الإجهاد أو الحرارة لكل عينة. ويوضح الشكل (1) صورة توضيحية لمنظومة الشد المستخدمة. يقاس في هذا الاختبار الانفعال بتابعية الزمن. ثم ترسم مجموعة من المنحنيات من أجل درجات حرارة مختلفة وإجهاد ثابت. وأجريت اختبارات زحف الشد عند إجهادات ثابتة هي: (5.25, 6.554, 7.802MPa)، عند مجال درجات الحرارة بين 363K-433K بمعدل تغير 10 كلفن باستخدام تقنية اختبار زحف الحمل الثابت التقليدية [12]، وأخطاء تجريبية أقل من  $\pm 2\%$  في الإجهاد المطبق. وكانت الحساسية في قياسات الانفعال من مرتبة  $10^{-2}mm$ ، والدقة في قياسات درجة الحرارة تكون  $\pm 1K$ ؛ وذلك باستخدام مزدوجة كهروحرارية من نوع (K) قريب من مركز العينة المدروسة موصولة بجهاز حاسوب من نوع KELVIN THERMO-COMPUTER MOD: TOUCH(K). امتدت اختبارات الزحف لتشمل المراحل الثلاث، ورُوِّقبت اختبارات الزحف واستطالة العينات باستخدام مقياس استطالة دائري (dial gauge) مقدار حساسيته  $10^{-5}$  متر. جرى بعد الاختبار تحديد طول السلك وحساب الطول النهائي للعينة وتحديد الاستطالة الكلية. وقد جرى التحقق من التغيرات البنيوية باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) والتحليل العنصري باستخدام مطيافية التبدد الطاقى للأشعة السينية (EDX). حُدِّد متوسط البعد الحبيبي لبعض العينات في السبائك المدروسة باستخدام تقنية التقاطع الخطي.

## النتائج والمناقشة

يعتمد الانفعال المستمر الناشئ خلال عملية الزحف عند إجهاد معين بشكل أساسي على:

- (1) الحجم الحبيبي لعينة الاختبار.
- (2) درجة الحرارة.
- (3) تفاعل الانخلاعات وعيوب الشبكة مع ذرات المذاب [13].



الشكل (1) صورة توضيحية لمنظومة الشد المستخدمة في البحث

### 1- خصائص منحنيات الزحف:

يبين الشكل (2) منحنيات الزحف للسبيكة (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn عند درجات حرارة مختلفة وإجهادات مختلفة. ويلاحظ حدوث انفعال ( $\epsilon$ ) عابر للسبيكة عند تطبيق إجهاد عند درجات الحرارة المرتفعة إذ  $\epsilon = l - l_0 / l_0$ ، حيث يقل معدل الانفعال للسبيكة بزيادة الزحف (مرحلة الزحف العابر). ويمكن أن يعزى ذلك إلى حدوث أثر تصلد أو تقسية انفعالية مع عمليات الاستعادة، وزيادة في انفعال الزحف بمعدل ثابت بعد مدة وجيزة من تطبيق الإجهاد (مرحلة الزحف الثانوي).

وكما هو مبين في الشكل (2) أيضا يعمل الإجهاد المطبق وبقيمة عالية على تقصير الزمن اللازم لانهياب السبيكة عند درجات الحرارة المعطاة، وتلاحظ زيادة انفعال الزحف بزيادة كل من مستوى الإجهاد المطبق ودرجات الحرارة المثبتة. ويمكن الحصول على معدل انفعال الزحف عند أي زمن معطى عن طريق تفاضل انفعال الزحف  $d\epsilon/dt$  كتابع للزمن. ويؤخذ معدل الحد الأدنى كمعدل انفعال زحف مرحلة الحالة الثابتة. ويعرف الزمن الكلي من بداية مرحلة الزحف الابتدائية حتى نهاية المرحلة الثالثة بعمر الزحف.

2-3 تابعة معدل زحف الحالة الثابتة  $\dot{\epsilon}$  للإجهاد المطبق:

يعدُّ معدل زحف الحالة الثابتة ( $\dot{\epsilon}$ ) من أهم متغيرات الزحف. ومن الخصائص المهمة في تحديد آلية التحكم في سلوك الزحف اختلاف معدل انفعال الحالة الثابتة مع الإجهاد، ويمكن التعبير عن العلاقة بين الإجهاد المطبق ( $\sigma$ ) ومعدل زحف الحالة الثابتة كالآتي:

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \quad (1)$$

كذلك يمكن وصف معدل زحف الحالة الثابتة عند درجات الحرارة المرتفعة بالمعادلة الآتية:

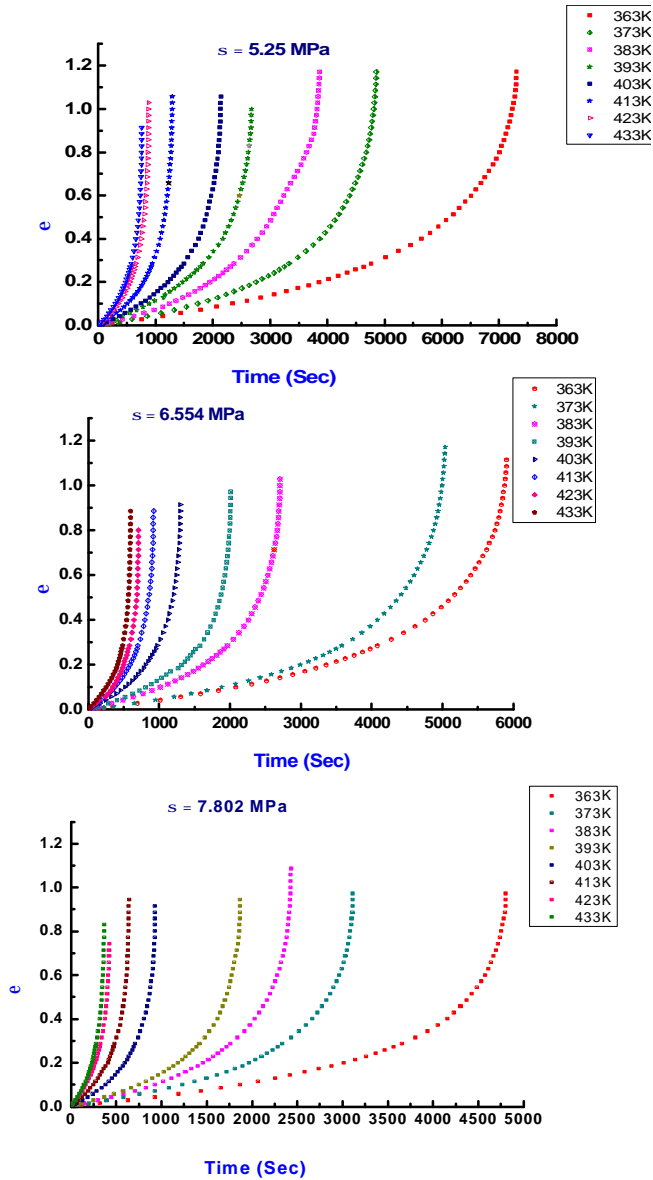
$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

إذ  $\sigma$  الإجهاد المطبق،  $A$  ثابت يعتمد بشكل أساسي على المادة والإجهاد. وتشير  $n$  إلى أس الإجهاد،  $Q$  طاقة التنشيط الدالة على آلية الانتشار المتحكممة،  $T$  درجة الحرارة المطلقة،  $R$  ثابت الغاز ويساوي  $(8.314 \text{ J/mol.k})$  [14].

وبناء على بيانات منحنيات الزحف في مدى درجات الحرارة والإجهادات المطبقة، وباعتبار العامل ( $A$ ) ثابتاً في المعادلة (2)، يمكن تحديد أس الإجهاد ( $n$ ) للسبيكة كالآتي:

$$n = \left[ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} \right] \quad (3)$$

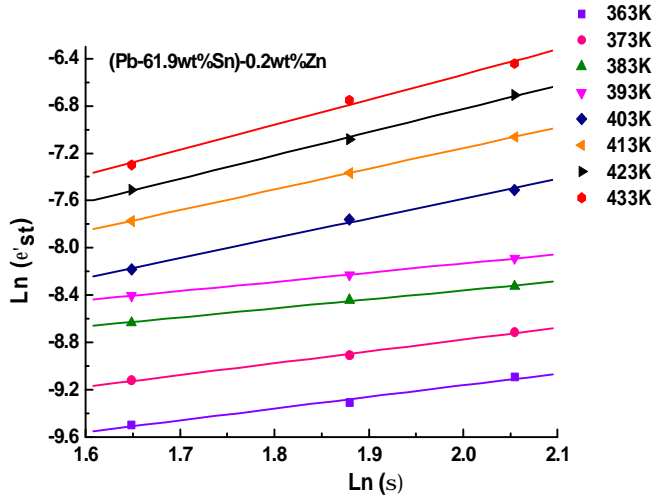
ترتبط قيم أس الإجهاد للزحف مع آلية التشوه وطاقة التنشيط للزحف التي ترتبط بطاقة تنشيط الانتشار. وباستخدام المعادلة (2) يمكن تحديد قيم أس الإجهاد وطاقة تنشيط الزحف تجريبياً. يعتمد معدل زحف الحالة الثابتة اعتماداً أساسياً على بنية عينة الاختبار ودرجة حرارة التشوه [15]. ويمكن الحصول على معدل زحف الحالة الثابتة  $\dot{\epsilon} = \partial \epsilon / \partial t$  في مجال درجة الحرارة نفسه (373–433 K) من الجزء الخطي في الشكل (2). يمكن رسم معدل زحف الحالة الثابتة  $\dot{\epsilon}_{st}$  كما في الشكل (3) كتابع للإجهاد المطبق  $\sigma$  باستخدام مقياس لوغاريتمي لقيم الإجهادات الثلاث المطبقة. ويشق أس الإجهاد  $n$  في المعادلة (3) من ميل الخط المستقيم بالنسبة إلى  $\ln \dot{\epsilon}_{st}$  مع  $\ln \sigma$ . ويبيّن الشكل (4a) قيم  $n$  التي تم الحصول عليها من بيانات الشكل (3). ورُسّم معدل انفعال الحالة الثابتة  $\dot{\epsilon}_{st}$  كتابع لدرجة الحرارة كما في الشكل (4b)، للإجهادات الثلاثة المطبقة (5.25, 6.554, 7.802 MPa). عند درجات حرارة منخفضة يتناقص أس الإجهاد مع الزيادة في درجات الحرارة حتى يصل إلى قيمة منخفضة 0.74، بعد ذلك يتزايد أس الإجهاد بزيادة درجة حرارة التشوه، من 0.74 إلى 2.12 كما هو مبين في الشكل (4a). يشير ذلك إلى أن آلية التحكم ترجع إلى آلية الزحف الانخلاعي (dislocation creep) التي تعتمد على الانزلاق والتسلق [3].



الشكل (2) منحنيات الزحف عند الاجهادات المطبقة المختلفة ودرجات الحرارة المختلفة للسبيكة (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn



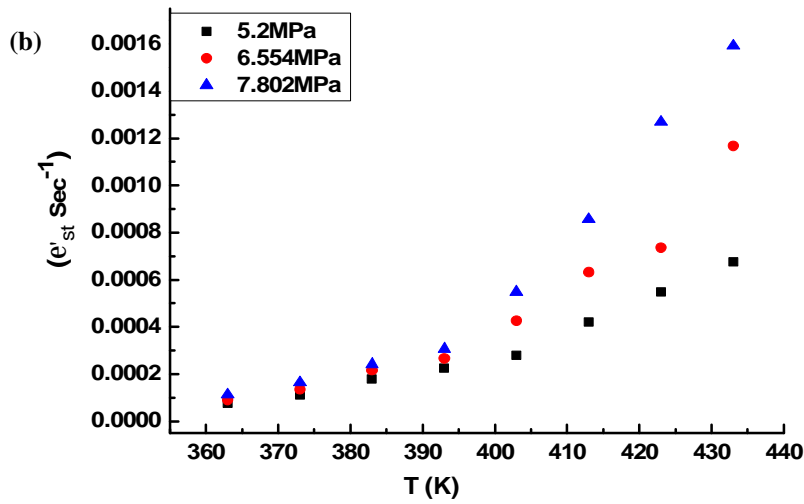
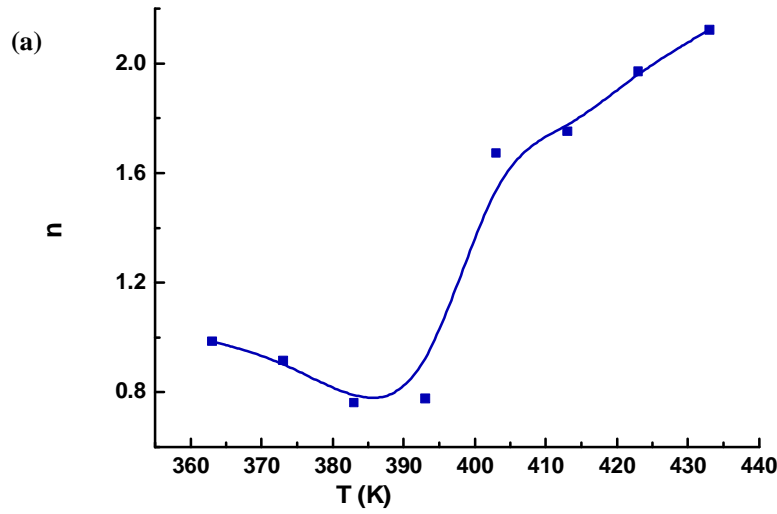
تساعد قيمة أس إجهاد الزحف في تحديد آلية زحف التشوه المسيطرة. وهذا يدل على أن التغير في الإجهاد المطبق ودرجة الحرارة لا يغير في آلية التحكم في معدل الزحف. في الأعمال والدراسات السابقة لاختبارات الزحف عند درجات الحرارة المرتفعة وجد أن أس الإجهاد،  $n$ ، يكون من مرتبة 3 وأن آلية التحكم في الزحف هي الحركة للزجة للانخلاعات [16].



الشكل (3) العلاقة بين  $\ln \sigma_{st}$  و  $\ln t$  عند درجات الحرارة المختلفة للسبيكة (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn

كثيراً ما تستخدم قيم أس الإجهاد في تحديد آليات التحكم في عمليات التشوه، ومع ذلك يجب التنبيه على أن إجراء مقارنة بين أس الإجهاد دون إضافة معلومات إضافية إلى طاقات التنشيط لا تعطي معلومات كافية لإجراء مقارنات مقنعة على آليات زحف المادة. وفي أحسن الأحوال فإن قيم أس إجهاد الزحف تساعد فقط في تصنيف المجال بين العديد من الاحتمالات النظرية. في الواقع، يحدث التشوه في المواد متعددة البلورات عند درجات الحرارة فوق  $0.5T_m$  بآليات تشوه مختلفة، وترتبط مع قيم أس الإجهاد المختلفة. ويذكر أن آلية الزحف الانتثاري ترتبط مع قيم  $n$  حول 1، ويؤدي انزلاق حدود الحبيبات إلى قيم  $n$  قريبة من 2 [17,18]. ويكون تسلق الانخلاع مسؤولاً عن قيم  $n$  في المجال (4-6)، في حين يكون زحف الانخلاع آلية التحكم عند قيم  $n$  في المجال (8-10) [17].

وجد في هذا العمل، عند دراسة الزحف عند درجات الحرارة العالية، أن قيمة أس الإجهاد  $n$  مساوية إلى 2، ومن ثم فإن آلية التحكم في الزحف يمكن أن تعزى إلى انزلاق حدود الحبيبات، في حين يكون الزحف الانتثاري آلية التحكم عند قيم  $n$  عند مجال درجات الحرارة المنخفضة.



(4) الشكل

(a) تابعة أس الإجهاد n لدرجة الحرارة

(b) معدل انفعال الحالة الثابتة كتابع لدرجة حرارة الزحف للسبيكة المحضرة

(Pb-61.9wt%Sn)-2wt% Zn

## 3- تحديد طاقة تنشيط الزحف:

يمكن تحديد طاقة تنشيط زحف الحالة الثابتة في المعادلة (2) من ميل الخط المستقيم للعلاقة بين  $\ln \dot{\epsilon}$  مع مقلوب درجة الحرارة  $1000/T$  للإجهادات المطبقة كما في الشكل (5).

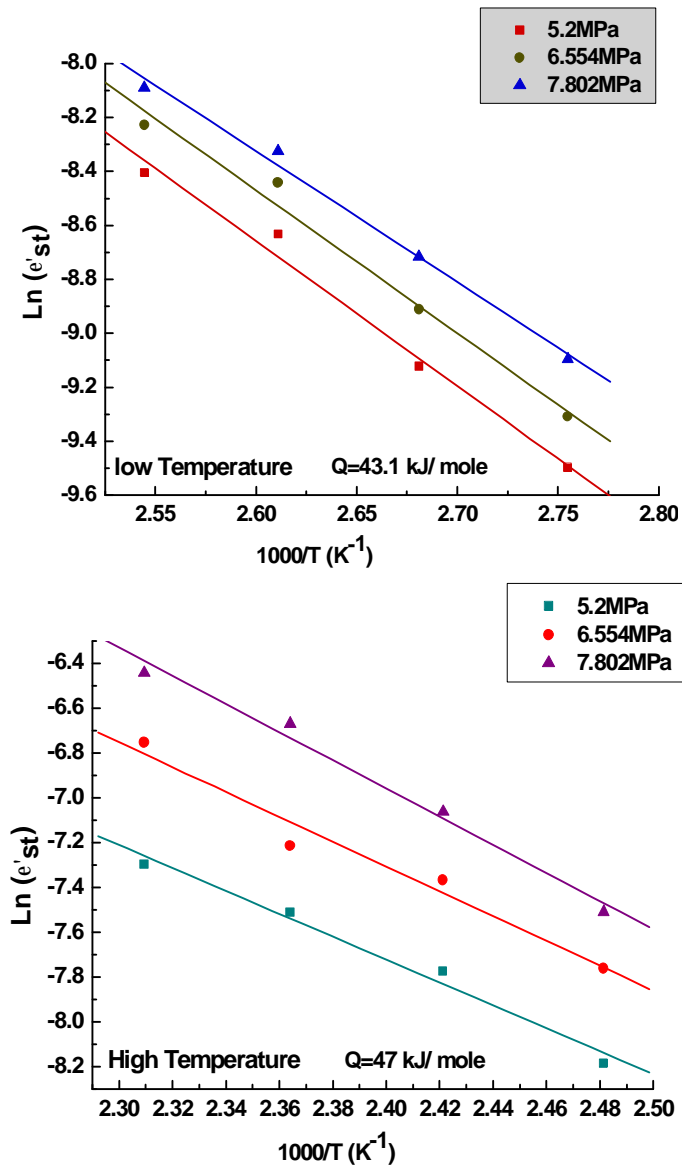
$$Q = R \left( \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \left( \frac{1}{T} \right)} \right) \quad (4)$$

ومن ثم فإن النتائج الحالية تعطي متوسطاً لطاقة التنشيط مقداره 43.1 kJ/mol عند مجال درجات الحرارة 393 K إلى 404 K و 363 to 393 K و 47 kJ/mol في مجال درجات الحرارة من 404 إلى 433 K. ويرجع متوسط طاقة تنشيط زحف الحالة الثابتة (43.1) kJ/mol عند درجات الحرارة المنخفضة (تحت درجة حرارة 393 K) إلى انتشار ذرات الزنك Zn في الرصاص Pb. وتتفق قيم متوسط طاقة التنشيط التي تم الحصول عليها عند مجال درجات الحرارة المرتفعة 47 kJ/mol (فوق درجة حرارة 393 K) مع طاقة تنشيط انتشار حدود الحبيبات لذرات الرصاص Pb [20]. وتتفق طاقة التنشيط التي تم الحصول عليها هنا بشكل جيد مع طاقة تنشيط الزحف التقليدي لسبائك [12]Pb-Sn-Zn.

## 4- البنية المجهرية والتحليل الطيفي للأشعة السينية:

جرت دراسة البنية المجهرية للعينات التي اختبر الزحف عليها عند درجات حرارة مختلفة وإجهادات مطبقة مختلفة بالمجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، وبالتحليل الطيفي لطاقة الأشعة السينية المتبددة (EDX). يوضح الشكل (6) البنية المجهرية للعينات المدروسة عند الإجهاد المطبق 7.802 MPa عند درجات حرارة 423K, 403K, 373K على الترتيب، ويلاحظ التشوه في التركيب الدقيق مع التغير في درجة الحرارة. يتضح من البنية المجهرية ظهور طور B (الطور الغني بالقصدير Sn) - أبيض مضيئاً - حول الحبيبات المتعامدة مع الطور المظلم (الطور الغني بالرصاص Pb) ومن ثم فإن عدد نقاط الانخلاع داخل الحبيبات تقل ويزداد معدل الزحف.

ويمكن تحديد متوسط البعد الحبيبي في السبائك المدروسة باستخدام تقنية التقاطع الخطي حيث يكون متوسط أبعاد الحبيبة  $3.2 \pm 0.2 \mu\text{m}$ . ويمكن وصف البنية المجهرية للعينات باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) المزود بمطيافية طاقة الأشعة السينية المتبددة (EDX). وتبين صور SEM الموضحة بالشكل (6) أن بنية العينات متجانسة ولا تحتوي على مسامات أو شقوق. فضلاً عن ذلك جرى التحليل الطيفي (EDX) المرافق للماسح الإلكتروني (SEM) للعينات. وتبين نتائج تحليل EDX لعينة ظهور قمم تشير بوضوح إلى وجود Zn, Sn, Pb الرصاص والقصدير والزنك.



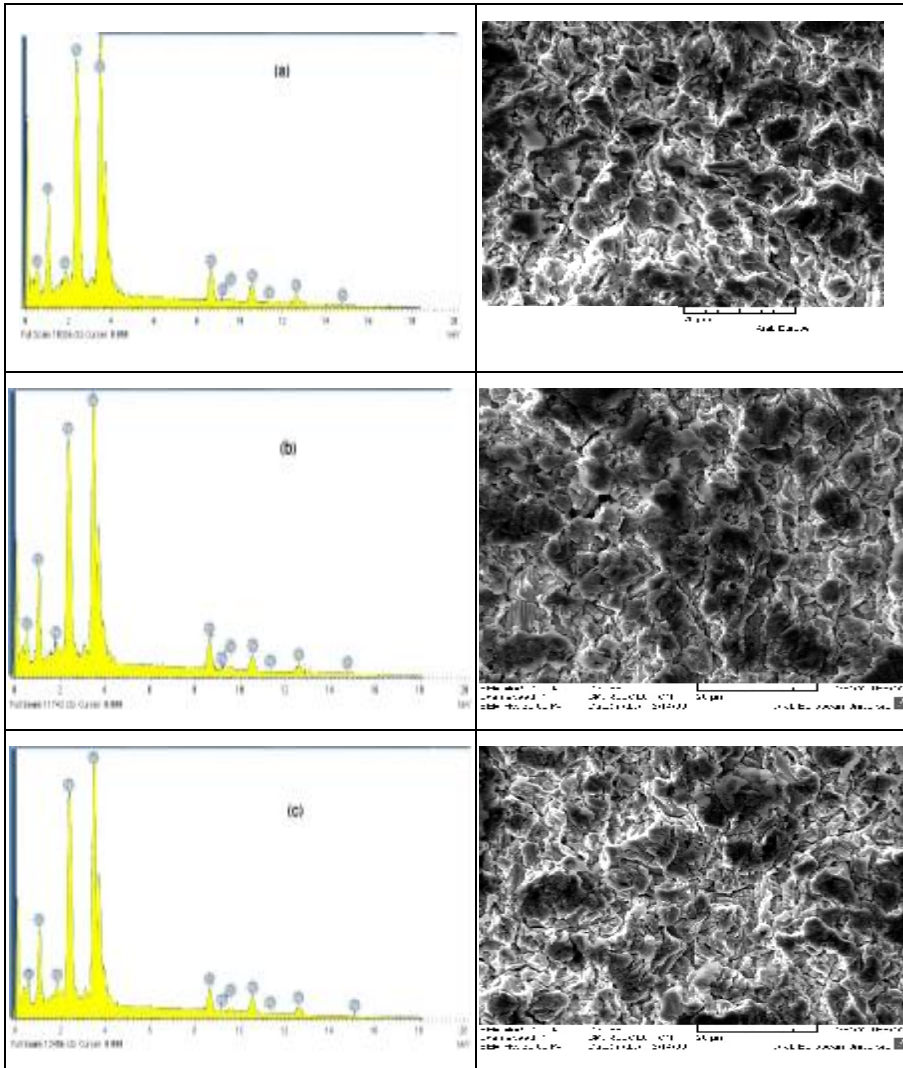
الشكل (5) معدل زحف الحالة الثابتة  $\dot{\epsilon}$  كتابع لمقلوب درجة الحرارة عند إجهادات مختلفة ومدى من درجات الحرارة المنخفضة والمرتفعة للسبيكة (Pb-61.9wt%Sn)-2wt% Zn

## 5- مقارنة سلوك الزحف للسبيكة المدروسة بسبائك مختلفة:

يبين الجدول (1) مقارنة نتائج اختبارات الزحف لسبائك مختلفة من الرصاص قصدير زنك. حيث تتفق قيم طاقات التنشيط التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة مع طاقة تنشيط الزحف التقليدي لسبائك Pb-Sn-Zn. فضلاً عن ذلك ومن خلال مقارنة البعد الحبيبي نجد أن البعد الحبيبي للسبيكة الأيونتكتك الثلاثية Pb-Sn-Zn أقل من البعد الحبيبي للسبائك الأخرى. وهذه النتائج تؤدي إلى استنتاج أن هذه السبائك تملك لدونة عالية عند معدلات انفعال عالية نسبياً عندما يكون البعد الحبيبي صغيراً جداً (أقل من  $10\mu\text{m}$ ) [20]. ويبقى البعد الحبيبي صغيراً خلال اختبارات الزحف. كذلك يعمل البعد الحبيبي الصغير على تقليل المقاومة للانتقال الانسيابي عبر حدود الحبيبات، التي يمكن أن تقلل الإجهاد الانسيابي ( $\sigma$ ) وزيادة لدونة السبيكة [12]. ولذلك فإن الدور المهم وأثره في نمو الحبيبات، هو المسؤول عن الاختلاف الكبير في تلك السبائك. ويمكن تفسير الاختلافات باختلاف كل من طرائق الاختبار، والبنية المجهرية، وتحضير العينات، والأخطاء في القياس، وأسلوب معالجة البيانات.

الجدول (1) مقارنة خصائص زحف الحالة الثابتة للسبيكة (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn بسبائك مختلفة

السبيكة	درجة حرارة الانصهار (K)	الإجهاد المطبق (MPa)	الاستطالة (%)	معدل الحساسية	طاقة التنشيط $Q$ ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )	متوسط البعد الحبيبي ( $\mu\text{m}$ )	المرجع
(Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn	448.2	5.3 – 7.802	180	0.47-0.60	43.1–47	$3.2\pm 0.2$	العمل الحالي
Pb-Sn (eutectic)	456	7.63–12.73	70	0.54–0.88	42–63	5-9	[2]
Pb-10 wt% Sn-1.5 wt.% Zn	555	8.34–11.46	28	0.31–0.58	51.5–62	20	[2]
Pb-65 wt% Sn-1 wt% Zn	455	5.86–6.25	140	0.3–0.64	40–58	$3.05 \pm 0.25$	[12]
(Pb-61.9wt%Sn)-3.4wt%Zn (eutectic)	447.9	4.88–6.25	150	0.34–0.64	40–58	$3.05 \pm 0.15$	



الشكل (6) تحليل EDX و SEM للسبيكة الثلاثية (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn عند الإجهاد المطبق 7.802 MPa وعند درجات حرارة (a) 373K (b) 403K (c) 423K

### الاستنتاجات

- دُرست العلاقة بين سلوك الزحف والبنية المجهرية للسبيكة (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn وقورنت نتائجها بغيرها من السبائك. وأظهرت تحليلات البيانات أن النظرية البسيطة تعتمد على معادلة معدل زحف الحالة الثابتة لوصف سلوك الزحف بشكل مرض. ويمكن تلخيص الاستنتاجات الرئيسية لهذه الدراسة على النحو الآتي:
1. تظهر السبيكة (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn خصائص الزحف النموذجية حيث يزيد انفعال الزحف ويقل عمر الزحف بزيادة الإجهاد المطبق ودرجة الحرارة وهذا ما يتفق مع المرجع [21].
  2. تقل قوة الزحف للسبيكة (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn بإضافة نسبة قليلة من الزنك (2wt%Zn) التي تجعل هذه السبائك أكثر أهمية في التطبيقات التقنية.
  3. وجود (2wt%Zn) في السبيكة (Pb-61.9wt%Sn) يؤدي دوراً مهماً في تقليل درجة حرارة انصهار السبيكة.
  4. تملك السبيكة الثلاثية (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn استطالة أكبر من السبيكة الثنائية (Pb-61.9wt%Sn)؛ وهذا نتيجة لدرجة الانصهار المنخفضة والتركيب البنوي الدقيق للسبيكة الثلاثية (الجدول 1).
  5. تزيد قيم  $n$  و  $Q$  بزيادة درجة الحرارة.
  6. تشير قيمة أس الإجهاد للسبيكة (Pb-61.9wt%Sn)-2wt%Zn الواقعة بين 0.89 و 2.12 إلى أن انزلاق حدود الحبيبات هي آلية التحكم أو الآلية المسيطرة في سلوك الزحف.
  7. بلغت قيمة طاقة التنشيط لزحف الحالة الثابتة فوق درجة حرارة 393K 47 kJ/mol.
  8. وجد أن طاقة التنشيط 47 kJ/mol قريبة جداً من طاقة انتشار حدود الحبيبات.
  9. وجد أن متوسط البعد الحبيبي لبنية السبيكة من رتبة  $0.2 \pm 3.2 \mu\text{m}$ .

## المراجع REFERENCES

- [1]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.
- [2]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.
- [3]Nieh, T. G., Wadsworth, J. and Sherby, O. D. 1997. *Superplasticity in metals and ceramics*, Cambridge university press.
- [4]Russell, A. M. and Lee, K. L. 2005. *Structure-property relations in nonferrous metals*. by John Wiley & Sons, Inc.
- [5]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.
- [6]Al-Ganainy, G. S. 2002. Creep Characteristics of a New Pb-Free Soldering Sn–In Pewter. *Phys. Stat. Sol. (a)* 193 (2), pp. 226.
- [7]Abd El-Salam, F. Mostafa, M. T. Nada, R. H. and Abd El-Khalek, A. M. 2001. Aging Characteristics of Rapidly Solidified Al- 20wt.%Zn Alloy. *Phys. Stat. Sol. (a)* 185, pp. 331-340.
- [8]Wcc, C. M. L. Huang, M. L. 2002. The effect of precipitation on the steady creep characteristics. *Electron. Mater.* 31 (5) ,pp. 442.
- [9]Mostafa, M. M. 2004. Steady state creep characteristics of the eutectic Pb–Sn alloy. *Physica B* 349, pp. 56–61.
- [10]Zhang, G.S. et al., 2009. Creep behavior of eutectic 80Au/20Sn solder alloy *Journal of Alloys and Compounds* 476 ,pp.138–141.
- [11]Saker, M. S. Mohamed, A. Z. El-Daly, A. A. Abdel-Daiem, A. M. and Bassyouni, A. H. 1990. Transient Creep Characteristics in Pb-Sn-Zn Ternary Alloys. *Egypt. J. Solids B2* ,pp. 34.
- [12]El-Daly, A. A., Abdel-Daiem, A. M., Yousf, M. 2002. Creep deformation of Pb–Sn–Zn ternary alloys *Mater. Chem Phys.* 74, pp. 43-51.
- [13]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.
- [14]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.
- [15]Saad, G. et al., 2009. Effect of Ag addition on the creep characteristics of Sn–8.8 wt%Zn solder alloy *Journal of Alloys and Compounds* 479 ,pp. 844–850.
- [16]Al-Ganainy, G. S. et al., 2004. Transient and steady-state creep characteristics of Cu–2wt% Sn alloy in the solid solution region. *Physica B* 344, pp.443– 450.



- [17]Mahmudi, R., Geranmayeh, A. R., Khanbareh, and Jahangiri, H. N. 2009. Indentation creep of lead-free Sn-9Zn and Sn-8Zn-3Bi solder alloys Materials and Design .30 ,pp. 574- 580.
- [18]Zhang G. S. et al. 2009. Creep behavior of eutectic 80Au/20Sn solder alloy. Journal of Alloys and Compounds. 476 ,pp.38-141.
- [19]Mahmudi, R. Geranmayeh, A. R. and Rezaee-Bazzaz, A. 2007. Impression creep behavior of lead-free Sn-5Sb solder alloy. Materials Science and Engineering A 448 ,pp. 287-293.
- [20]Frederick E. Wang. 2005. Bonding Theoryfor MetalsandAlloys. Elsevier.
- [21]Abdel Maksoud, I. Ahmed, H. and Rodel, J. 2009. Investigation of the effect of strain rate and temperature on the deformability and microstructure evolution of AZ31 magnesium alloy. Materials Science and Engineering A 504, pp. 40-48.