

## تأثير التجمعات الأيونية على عملية إعادة التبلور The effect of Ionic Accumulation on the Recrystallization Process

أ.م.د. صاحب مهدي الصقار  
قسم هندسة المواد  
الجامعة التكنولوجية، بغداد،  
العراق

### الخلاصة

أستخدم في هذا البحث نموذجان من الألمنيوم النقي المشكل بنسبة ٤% والمقطوعان على شكل شبه منحرف. سخن النموذج الأول بالتيار الكهربائي المستمر D.C. ذي كثافة ٤٥٠٠ أمبير/سم<sup>٢</sup> ولمدة ثمان ساعات، فارتفعت درجة الحرارة في القمة إلى ٥٩٠ م° وفي الطرفين المتناظرين إلى ٤٥٠ م°، فحدثت عملية إعادة التبلور بمقياس حبيبي مختلف من منطقة إلى أخرى، ففي القمة كان معدل قطر الحبيبات ٢,٥ مم، وفي الطرف السالب ١,٥ مم أما في الطرف الموجب فكان ١,٣ مم. أو عز سبب النقصان الحاصل في الطرف الموجب (على الرغم من تساوي درجة الحرارة وكثافة التيار) إلى ظهور تجمعات أيونية على الحدود الحبيبية لهذا الطرف. وعند إعادة التجربة على النموذج الثاني، وذلك بتسخينه في أفران اعتيادية في درجة حرارة ٤٥٠ م° (درجة حرارة الطرفين) ولمدة ثمان ساعات، حدثت عملية إعادة التبلور بمقياس حبيبي متساوي في الطرفين، ولم يظهر أي اثر للتجمعات الأيونية، مما يدل على إن المجال الكهربائي كان السبب في ظهور هذه التجمعات وهي المسؤولة عن الاختلاف في المقاس الحبيبي النهائي.

### Abstract

Two specimens of pure aluminum, deformed by 4% were cut in "Trapezoidal Strip" shapes. The first specimen was heated by D.C current with current density up to 4500 Amp/cm<sup>2</sup> and for a duration of 8 hours, whereby the temperature had risen up to 590°C at the top of the specimen, and up to 450°C at the regions near the two terminals of the specimen, the recrystallization process appeared with different grain sizes (g.s), which was 2.5mm on the top region of specimen, and 1.5mm, 1.3 mm on the Cathode and anode terminal respectively. This difference in g.s was due to the appearance of ionic accumulation on the grain boundaries (g.b) only at the anode terminal.

The second specimen was also heated in normal furnace at 450 °C for 8 hours, then the recrystallization process was seen with the same (g.s) on both terminals of the specimen, and there was no ionic accumulation found in any part of this specimen.

This study indicated that the effect of D.C caused the presence of ionic accumulation which took place on the (g.b) as half spherical caps at regions near the anodic terminal of the first specimen. This caused the difference in (g.s) at both terminals in the first specimen.

١. المقدمة

تطرقنا عدة بحوث وتطبيقات إلى تأثير المجال الكهربائي في المعادن والسبائك المشكلة بنسب مختلفة [1,2] في عمليات الاستعادة، وإعادة التبلور، والنمو الحبيبي [3,4] وتناولت معظم هذه الأبحاث تأثير القوى الناتجة عن المجال الكهربائي على هذه العمليات، وسنتناول في هذه الدراسة تأثير التيار الكهربائي المستمر D.C. ذي كثافة عالية على المقاس الحبيبي للحبيبات المعادة التبلور في المناطق التي تكون فيها درجات الحرارة منخفضة نسبياً. من المعروف إن عملية إعادة التبلور تعتمد على عدة عوامل أهمها درجة الحرارة ونسب التشكيل، ونوع ونسبة الشوائب وشكل النموذج بالإضافة إلى الزمن، إلا إن للتيار الكهربائي المستمر تأثير إضافي كبير على هذه العمليات فهو يلعب دوراً مهماً في عملية تكوين مراكز التبلور ونموها [5,6]. فعند مرور التيار الكهربائي تتعرض أيونات المعدن إلى محصلة ضغطيين أساسيين [6,7]، الأول ناتج عن المجال الكهربائي المباشر  $P_f$  واتجاهه باتجاه القطب الموجب والذي يمكن التعبير عنه بالعلاقة:

$$P_f = K_1 y \int J \dots\dots\dots (1)$$

والضغط الثاني  $P_d$  ناتج عن تصادم الإلكترونات مع أيونات المعدن واتجاهه باتجاه القطب السالب، ويمكن التعبير عنه بالعلاقة:

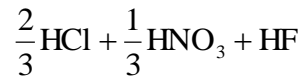
$$P_d = K_2 y^n b^m J \dots\dots\dots (2)$$

فإذا كانت محصلة الضغطين موجبة، فهذا يعني إن الأيونات ستتحرك باتجاه القطب الموجب والعكس صحيح. أما التأثير الحراري الناتج عن مرور التيار الكهربائي فتأثيره مختلف، فعند الوصول إلى درجة مساوية أو أعلى من درجة حرارة إعادة التبلور، تأخذ الحدود الحبيبية بالحركة بواسطة قوى مسلطة عمودياً على مستوى ذلك الحد. ولكي يتحرك الحد الحبيبي بسرعة ثابتة، لا بد لهذه القوى أن تعادل جميع القوى المعرقلية، مثل القوى الحجمية المتمثلة بوجود الشوائب والفراغات، وقوى سطحية مثل طبقة الاوكسيد والأخاديد (grooves)، إذ إن الأخدود يتكون عند تصادم الحد الحبيبي المتحرك والسطح الخارجي للحبيبية، فقد وجد إن الحد الحبيبي لا يتأثر بالأخاديد في بداية حركته، ولكن بعد انقضاء فترة زمنية معينة تبدأ هذه الحركة بالتأثر بوجود الأخدود حيث يتبع حجم الحيز الذي يتحركه الحد الحبيبي وحسب العلاقة التالية:

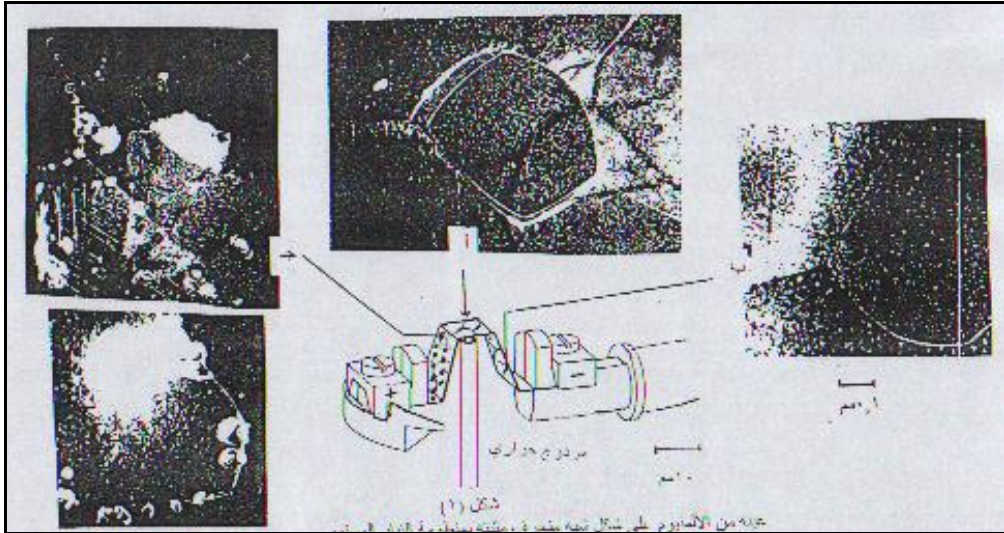
$$V = \alpha p t^{1/4} = S d \dots\dots\dots (3)$$

## ٢. الجزء العملي

صفيحة من الألمنيوم النقي ٩٩,٩٩ %، شكلت بالسحب بنسبة ٤% ثم قطعت إلى نموذجين، إبعاد كل نموذج ٠,٥×١٠×٥٠ مم، صممت على شكل شبه منحرف كما في الشكل (١)، يساهم هذا التصميم في تلافي التمدد السطحي أثناء التسخين، وكذلك يضمن التوزيع المتجانس لدرجات الحرارة فضلاً عن التوزيع المنتظم للمجال الكهربائي على طول العينة، سخن النموذج الأول بواسطة التيار المستمر بصورة مباشرة (النموذج عبارة عن مقاومة كهربائية) كثافته ٤٥٠٠ أمبير/سم<sup>٢</sup>، فارتفعت درجة الحرارة في الجزء العلوي (أ) إلى ٥٩٠ م° وفي الطرفين المتناظرين (ب،ج) إلى ٤٥٠ م°، وبعد ثمان ساعات حصلت عملية إعادة التبلور في جميع المناطق وبمقاس حبيبي مختلف حيث استخدمت الطريقة الخطية في حساب معدل أقطار هذه الحبيبات وباستخدام المجاهر الضوئية الاعتيادية، أما الإظهار فقد تم بمحلول متكون من:



أما درجات الحرارة فقد قيست بواسطة المزدوج الحراري على عينات مماثلة لتلك التي هي قيد الدرس. أما الأجهزة والمعدات المستخدمة في البحث فهي أجهزة مشابهة لتلك الأجهزة المستخدمة في تجارب الهجرة الكهربائية [2,6]، أما النموذج الثاني فقد سخن بالأفران الاعتيادية بدرجة ٤٥٠ م° ولمدة ثمان ساعات.



شكل رقم (١) عينة من الألمنيوم على شكل شبه منحرف مثبتة بمنظومة التيار المستمر مع البنية المجهرية في القمة أ وفي الطرفين ب، ج

### ٣. النتائج

في النموذج الأول ومن جراء مرور التيار كهربائي حصلت عملية إعادة التبلور كاملة وكان معدل قطر الحبيبات ٢,٥ مم في القمة المنطقة (أ)، بينما في الطرف القريب من القطب السالب (ب) كان معدل قطر الحبيبات ١,٥ مم وعددها ١٢ حبيبة **جدول (١)**، أما في الطرف القريب من القطب الموجب (ج) كان معدل قطر الحبيبات ١,٣ مم وعددها ١٥ حبيبة، إلا إن كل حبيبة على الطرف الموجب كانت تحتوي على عدد من التجمعات الأيونية على شكل أنصاف أقطار كرات **شكل (١)** حيث كان عددها ٤,٨، ومعدل نصف قطرها ٠,١٦ مم.

إن هذه التجمعات لا تظهر في الطرف السالب نهائياً ولا تظهر كذلك في حالة التسخين بالأفران الاعتيادية. كما هو الحال في النموذج الثاني المسخن لمدة ثمان ساعات في الأفران الاعتيادية بدرجة حرارة ٤٥٠°م وهي نفس درجة حرارة الأطراف للنموذج الأول، ومما يجدر الإشارة إليه إن المقاس الحبيبي في طرفي مناطق النموذج الثاني كان أكبر بـ ١٠% تقريباً عما هو عليه في النموذج الأول، كما لوحظ إن هذه التجمعات لا تظهر في بداية مرور التيار الكهربائي بل تظهر بعد مرور فترة زمنية تقدر بـ ٣٠ دقيقة أما خواص هذه الكتل والية تكوينها فقد نشرت في بحث سابق [٨] وقد تم فحص هذه التجمعات بالمجهر الإلكتروني والتحليل النقطي تبين إنها تحتوي على الألمنيوم وقليل من الأوكسجين.

ومن حساب حجم الحبيبات المتحققة بفعل المجال الكهربائي في الطرف السالب (ب) باعتبارها أشكال اسطوانية الشكل تقريباً ارتفاعها سمك النموذج (٠,٥) وعليه يصبح الحجم الكلي المتحقق (١٠,٦ مم<sup>٣</sup>) بينما الحجم الكلي المتحقق في الطرف الموجب (ج) هو (٩,٩٥ مم<sup>٣</sup>) ويكون الفرق بين الحجمين هو (٠,٦٥ مم<sup>٣</sup>). ومن حساب حجوم التجمعات الكتلية المتحققة على الطرف الموجب للنموذج وهي على شكل أنصاف كرات كان (٠,٤٢ مم<sup>٣</sup>).

جدول رقم (١)

سمك النموذج (مم)	قطر الحبيبة في الطرف السالب (مم)	عدد الحبيبات المعادة التبلور في الطرف السالب	الحجم الكلي للحبيبات المعادة التبلور في الطرف السالب (مم <sup>٣</sup> )	قطر الحبيبة في الطرف الموجب (مم)	عدد الحبيبات المعادة التبلور من الطرف الموجب	الحجم الكلي للحبيبات المعادة التبلور في الطرف الموجب (مم <sup>٣</sup> )	الفرق بين الحجمين في الطرف السالب والموجب (مم <sup>٣</sup> )	عدد التجمعات الكتلية على شكل أنصاف كرات	معدل نصف قطر التجمعات (مم)	الحجم الكلي لهذه التجمعات (مم <sup>٣</sup> )
٠,٥	١,٥	١٢	١٠,٦	١,٣	١٥	٩,٩٥	٠,٦٤	٤٨	٠,١٦	٠,٤٢

#### ٤. المناقشة

أدى مرور التيار الكهربائي المستمر بكثافة ٤٥٠٠ أمبير / سم<sup>٢</sup> إلى ارتفاع درجة الحرارة في القمة (أ) من النموذج إلى ٥٩٠ م°، فحدثت عملية إعادة تبلور كاملة وبمقاس حبيبي كبير نسبياً (٢,٥ مم) وبما إن الفترة الزمنية كانت ثمان ساعات وهي فترة كافية لحصول عملية النمو الحبيبي كذلك لهذه الحبيبات، وهذه الحالة قد حدثت فعلاً وموضحة في الشكل (١)، وهذه الحالة معروفة التعليل إذ تعتمد عملياً إعادة التبلور والنمو الحبيبي على عدة عوامل أهمها درجة الحرارة والزمن ونسبة التشكيل الحرج [9,10].

ألا أن درجة الحرارة في الطرفين ب، ج كانت ٤٥٠ م° وهذه الدرجة أعلى من درجة حرارة إعادة التبلور للألمنيوم النقي لذا يتوقع إن تكون عملية إعادة التبلور بعد ثمان ساعات كاملة ومتساوية المقياس في الطرفين. لأن هذين الطرفين متناظران في قيم درجات الحرارة، وكثافة التيار، ونسب التشكيل. ألا أن الواقع عكس ذلك حيث ظهرت مقاسات حبيبية مختلفة في الطرفين، وهذا يعني إن هناك تأثير لاتجاهيه التيار المستمر.

يتوقع إن يكون المجال الكهربائي والمجال الحراري هما المسؤولان عن بداية إعادة التبلور في الطرفين بحيث يكون تأثيرهما متساوي على المقاس الحبيبي على الأقل في بداية مرور التيار الكهربائي حيث لم تظهر الأخاديد ولم تستطع محصلة الضغط الكهربائي على تجميع الأيونات على شكل مجاميع أيونية وإظهارها على الحدود الحبيبية إلا بعد فترة ٣٠ دقيقة وهي بمثابة فترة حضانه وعلى وجهي النموذج للطرف الموجب (ج) شكل (١)، حيث تظهر هذه التجمعات بحجوم صغيرة على الحدود الحبيبية ثم يزداد عددها وحجمها بعد ذلك فتعمل على عرقلة عملية إعادة التبلور للحبيبات على القطب الموجب [11-14] لذا من المنطقي إن تكون حجوم الحبيبات المعادة التبلور المتحققة بفعل المجال الكهربائي على الطرف السالب مساوية إلى حجوم الحبيبات المعادة التبلور على الطرف الموجب مضاف إليها حجوم التجمعات الأيونية المتكونة على الطرف الموجب كذلك، وبعبارة أخرى يجب أن يكون الفرق الحاصل بحجوم الحبيبات المعادة التبلور بين الطرف السالب والطرف الموجب مساوٍ إلى حجوم التجمعات الأيونية، وهذا ما تم استنتاجه من نتائج هذه الدراسة، حيث كان الفرق بحجوم الحبيبات ٠,٦٥ مم<sup>٣</sup> وهو مساوٍ تقريباً لحجوم التجمعات الأيونية والمساوي إلى ٠,٤٢ مم<sup>٣</sup> والفرق بين الرقمين يعود إلى القيم التقريبية لقياس أقطار كل من الحبيبات والتجمعات الأيونية جدول رقم (١).

إن ظهور هذه التجمعات في الطرف الموجب سيؤدي مع الزمن إلى زيادة مساحة مقطع الطرف الموجب بالمقارنة مع مساحة مقطع الطرف السالب، وهذه الزيادة تؤدي إلى زيادة في حجم النموذج في هذه المنطقة وبالتالي تقليل من كثافة التيار يرافقه تقليل في درجات الحرارة عن ٤٥٠ م° وهذان العاملان يلعبان دوراً مهماً في عملية إعادة التبلور خاصة في الساعات الأخيرة من التجربة [14,15] كما يلعبان دوراً مهماً في تكوين الأخاديد الحرارية المرافقة عادة لحركة الحدود الحبيبية [16] وكذلك في تكوين طبقتي ألا وكسيد البلورية واللابلورية [17] اللتان تتكونان عادة على سطح الألمنيوم علماً بان النموذج الثاني الذي سخن في درجة ٤٥٠ م° (وهي نفس الدرجة في الأطراف للنموذج الأول) والذي لم تظهر فيه أي تجمعات أيونية، كانت حجوم الحبيبات في الطرفين متساوية حتى بعد انقضاء ثمان ساعات إلا إن المقاس الحبيبي كان أكبر بـ ١٠% عما هو عليه في النموذج الأول، والسبب يعود إلى إن التيار الكهربائي يعمل على زيادة عدد الأيونات في عملية إعادة التبلور، وبالتالي يساهم في تقليل المقاس الحبيبي بالمقارنة مع النموذج الذي يسخن بالأفران الاعتيادية هذه الظاهرة شرحت بالتفصيل في بحث مستقل [5]. ومما يجدر الإشارة إليه انه قد لوحظ في معدن الذهب [18] أن حركة الحدود الحبيبية نحو القطب السالب كانت أكبر مما هي عليه نحو القطب الموجب الأمر الذي أعطى مقاس حبيبي صغير على القطب الموجب ولكنه لم يلاحظ ظهور مثل هذه التجمعات.

## ٥. الاستنتاجات

١. يؤثر التيار الكهربائي المستمر على عملية إعادة التبلور في المعادن.
٢. المقاس الحبيبي على الطرف السالب اكبر من المقاس الحبيبي على الطرف الموجب.
٣. ظهور التجمعات الأيونية على الحدود الموجبة يقلل من المقاس الحبيبي.
٤. ظهور التجمعات على الطرف الموجب لا يؤثر على المقاس الحبيبي إلا بعد مرور التيار الكهربائي لمدة ٣٠ دقيقة.

## ٦. المصادر

1. A. Seeger, E. Schottks, Acta. Met. 7, 1959, pp.495.
2. G. Lormand, J. C. Pieri, C. R. Acad, Sc. Parist. 274, 1972, pp.940.
3. A. Tachibana, AIP. Conf. Proc. 612(1), 2002, pp.105.
4. J. P. Dekker, A. Lodder, J. Appl. Phys 84(4), 1998, pp.1958.
5. S. M. Al-Saffar, E. M. (U.O.T) Baghdad, 23(8), 2004, pp.386.
6. C. Pai, CAN. J. Phys. 55, 1977, pp.101.
7. D. J. Srolovitz, M. P. Anderson, Scripta Metallurgica, 17, 1983, pp.241.
8. S. M. Al-Saffar, E. M. (U.O.T) Baghdad, 10(3), 1991, pp.113.
9. H. Toyoda, T. Kawanouse, AIP. Conf. Proc., 373(1), 1996, pp.169.
10. B. Glowacki, M. Vickers, E. Maher, World 6(11), 1998, pp.683 .
11. H. Conrad, N. Karam, Scripta Meatallurgica, 17, 1983, pp.411.
12. S. M. Al-Saffar, E. M. (U.O.T) Baghdad, 10(3), 1999, pp.22.
13. S. H. Lin, P. C. Chinh Chen, J. Appl. Phys., 95(12), 2004, pp.7742.
14. A. Gladkikh, Y. Lereah, Appl. Phys Lett, 66(10), 1995, pp.1214.
15. Z. S. Hu, Z. H. Lai, Scripta Meatallurgica, 22, 1988, pp.187.
16. W. W. Mullins, J. Appl. Phys., 28, 1957, pp.333.
17. A. J. Brock, M. J. Pryor, J. Corrosion Sci., 13, 1973, pp.199.
18. F. Haessner, S. Hofmann, H. Seekel, Scripta Meatallurgica, 8, 1974, pp.299.

## قائمة بالرموز والمصطلحات المستخدمة في البحث

K <sub>1</sub>	: ثابت قيمته 0.322 M.K.S.A.
K <sub>2</sub>	: ثابت قيمته 3.68 × 10 <sup>-24</sup> M.K.S.A.
γ	: طاقة الشد السطحي للحدود الحبيبية=المقاومة النوعية أوم/سم
J	: كثافة التيار أمبير /سم <sup>2</sup>
n	: ثابت قيمته 2.1

:m	ثابت قيمته -1.63
:b	سمك الحد الحبيبي
:s	مساحة مقطع العينه مم <sup>٢</sup>
:P	القوة الدافعة الكهربائية
:v	حجم الحبيبية مم <sup>٣</sup>
:t	الزمن الساعة
:d	سمك النموذج مم
: $\alpha$	ثابت