

## تأثير سرعة التجميد والسّمك على المسافة بين صفائح اليوتكتك The Effect of Solidification Velocity and Thickness on Lamellar Eutectic Spacing

م.م. أحمد محمد حسن  
قسم هندسة المواد  
الجامعة التكنولوجية، بغداد،  
العراق

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

### الخلاصة

تم تحضير اربع نماذج مصبوبة من سبيكة الخارصين اليوتكتك (95 % Zn + 5 %AL). برّد النموذج الأول بالهواء والثاني بالماء البارد ولم يتم الحصول على صفائح يوتكتيكية منتظمة . اما النموذج الثالث فقطع الى عدة عينات بسّمك ثابت وبسرعات تجميد اتجاهي متغيرة وذلك باستخدام فرن متحرك فحصلنا بذلك على صفائح منتظمة، ومن رسم العلاقة  $\lambda^n V=K$  وجد أن قيمة  $(n=2.2)$  وليس 2 كما وجدته **Tiller** ، وإذا ما استخدمنا التحوير الذي أجراه **Lesoult** على هذه العلاقة لوجدناه مطابق للقيم العملية حيث تم الحصول على العلاقة:

$$\lambda^2 V = 18.6 + \frac{25.216}{\lambda}$$

اما النموذج الرابع فقد قطع الى عدة عينات بسّمك مختلف ولكن بسرعة تجميد اتجاهي ثابتة ، فقد وجد ان العلاقة بين المسافة ما بين الصفائح اليوتكتيكية المنتظمة ( $\lambda$ ) وسّمك العينة ( $\varepsilon$ ) تتبع علاقة مشابهة لعلاقة (جونسون-ميهيل-افرامي) حيث تم الحصول على العلاقة التالية :

$$\lambda = \lambda_0 (1 - \text{Exp}(-1.1 \varepsilon^{0.454}))$$

### Abstract

Four specimens of the zinc eutectic Composition (95% Zn + 5% AL) were prepared by casting method, the first specimen was air cooled and the second was water cooled. They revealed irregular Lamellar-eutectic microstructures (L.E.M.).

The third specimen was sliced into many Samples with constant thickness but with variable solidification velocity by using movable tube furnace, they resulted in a regular (L.E.M), this process revealed that: (n) in the equation ( $\lambda^n V=K$ ) was equal to (2.2). However, our finding was different from those obtained by TILLER, which stated that (n=2) But this result falls into agreement with the modification of LESOULT, the result was in good agreement with the experimental data which governed by relationship:

$$\lambda^2 V = 18.6 + \frac{25.216}{\lambda}$$

The fourth specimen was sliced into several samples with variable thickness but at constant solidification velocity which gives a regular (L.E.M) , this resulted in the relationship between the average lamellar spacing  $\lambda$  and thickness of samples ( $\varepsilon$ ) which is similar to that found by (Johnson-Mehl-Avrami)

$$\lambda = \lambda_0 [1 - \text{EXP}(-1.1 \varepsilon^{0.454})]$$

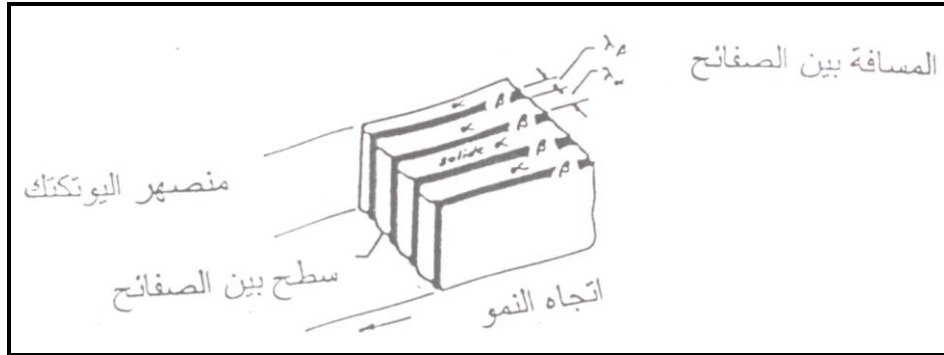
## ١. المقدمة

تعتبر سبائك اليوتكتك من السبائك المهمة في المجال الصناعي لما تمتاز به من خواص فيزيائية فريدة ، الامر الذي ادى الى دراسة الظروف والتأثيرات التي تحيط بهذه السبائك من شوائب، و معدل التبريد، وسرعة الاتجاهي، ودرجات الحرارة [1-3] وقد تم في السنوات الاخيرة دراسة خواص سبائك اليوتكتك تحت تأثير التبريد المفاجئ بشكل مكثف [4,5].

فمن المعروف ان ما يحدث اثناء تجمد سبائك اليوتكتك، ان ينمو الطوران  $\beta, \alpha$  بمعدل متساوي تقريباً، ويكونان متماسكين للمنصهر مما يؤدي الى تكون صفائح نظامية، خاصة عندما تجرى عليها عملية التجميد الاتجاهي (Directional Solidification) ان تكون صفائح اليوتكتك مرهون بعدة عوامل منها التأثير الجانبي ل قالب الصب حيث يتوجب ان تكون الجبهة بين الجزء المتجمد والجزء المنصهر على شكل مقعر وليس مستوي كما في الشكل (١) الامر الذي يساهم في دفع الشوائب الى مركز القالب، والعامل الاخر هو الفرق بدرجات الحرارة بين سطح الجزء المتجمد والجزء المنصهر من جهة ودرجة الحرارة التي يتكون عندها اليوتكتك، حسب مايشير اليه مخطط الاتزان الحراري لتلك السبيكة، من جهة اخرى، والفرق بينهما يرمز له  $\Delta T$  الذي يتناسب طردياً مع الجذر التربيعي لسرعة التجميد (V) وحسب العلاقة التالية [6,7]:

$$\Delta T = B \sqrt{V} \dots\dots\dots (1)$$

حيث B ثابت، وقد حسبت قيمة  $\Delta T$  لبعض السبائك مثل Pb-Sn وكانت بحدود (٥, ٠) م<sup>٥</sup> عندما كانت سرعة التجميد ١سم/دقيقة.



شكل رقم (١) تكون طور  $\beta, \alpha$  في سبيكة اليوتكتك

أما العامل المهم الاخر فهو سرعة التجميد الاتجاهي، حيث تطرقت عدة بحوث لدراستها [8-12] وتوصلت الى عدة معادلات تربط بين سرعة التجميد V والمسافة بين الصفائح  $\lambda$  بالعلاقة التالية:

$$\lambda^n V = K \dots\dots\dots (2)$$

حيث K ثابت، وقد وجد Tiller أن قيمة n = 2 حيث اعتبر ان  $\Delta T$  قريبة من الصفر وان المسافة بين الصفائح  $\lambda$  تبقى متساوية اثناء التجميد الاتجاهي اما [13] Lesoult فقد اجرى تعديل على هذه المعادلة ماخذ بنظر الاعتبار مبادئ الترموديناميك فأصبحت العلاقة:

$$\lambda^2 V = a + b/\lambda \dots\dots\dots (3)$$

حيث تمثل  $b, a$  ثابتان يعتمدان على خواص السبيكة. وبغية الحصول على صفائح نظامية من اليوتكتك يستخدم عادة التجميد الاتجاهي بواسطة فرن أنبوبي متحرك بسرعات بطيئة [14]، وتعتبر هذه الطريقة هي المفضلة والأسهل بالمقارنة مع الطرق الأخرى مثل استخدام أفران الحث الكهربائي ذي التردد العالي. وفي هذه الدراسة تم تحضير سبيكة (95%Zn+5%AL) اليوتكتيكية حيث تمت دراسة تأثير كل من سرعة التجميد وسمك العينه على المسافة بين الصفائح، فضلاً عن إيجاد علاقة رياضية تتماشى مع القيم تجريبية المستحصلة.

## ٢. الجانب العملي

استخدم في هذه الدراسة عنصرا الخارصين والألمنيوم النقيين ٩٩,٩٩% وبنسبه ٩٥% خارصين و ٥% ألومنيوم، وتمت عملية الصهر في درجة ٧٨٠م° داخل بودقة من الكرافيت النقي مغمورة في فرن مغلق يسخن بالمقاومة الكهربائية، وهذه الدرجة اعلى من درجة حرارة انصهار الألمنيوم النقي، ثم اجريت عملية التجانس لمكونات السبيكة بشكل مستمر بغية الحصول على خليط متجانس [15,16]، اما طبقة الاوكسيد الرقيقة المتكونة على سطح السبيكة فقد عولجت برفق وذلك بتجميعها على سطح السبيكة عند احد الاطراف، ثم سكب المنصهر في قالب مصنوع من الكرافيت النقي بابعاد ١٥×١٠×٨٠مم.

تم تصنيع اربعة نماذج A, B, C, D فنموذج A يبرد بالهواء بعد عملية السباكة وقطع طولياً الى شرائح ثم، اجريت على كل شريحة عملية صقل ومهاجمة كيميائية بمحلول ناتال  $3\text{Hf} + \text{H}_2\text{O} + 4\% \text{HNO}_3 + 50\% \text{HCl}$ ، وقد تم الفحص المجهرى بالمجاهر الضوئية الاعتيادية. بينما النموذج B يبرد بالماء البارد من درجة حرارة ٥٣٠م° ثم تمت بعد ذلك عملية التقطيع والمهاجمة والفحص بنفس الطريقة السابقة.

أما النموذج C فقد قطع إلى سبعة عينات بسمك ٠,٨ مم بغية إجراء عملية التجميد الاتجاهي بعد ذلك للحصول على صفائح منتظمة من الطورين [3,14] وقد استخدمت سرعة تجميد متغيرة من ٠,٣٣٣ الى ١٠,٥٥٥ ما يكرون/ثانية وبمعدل انحدار ٤٠ درجة/سم ثم تمت عملية الإظهار والفحص المجهرى بعد ذلك.

أما النموذج D فقد قطع إلى سبعة عينات مختلفة السمك من (٠,٢ - ٧مم) وجرى عليهم التجميد الاتجاهي وبسرعة تجميد ثابتة هي ٠,٥٥٥ ما يكرون/ثانية ومعدل انحدار درجة حرارة ٤٠ درجة/سم.

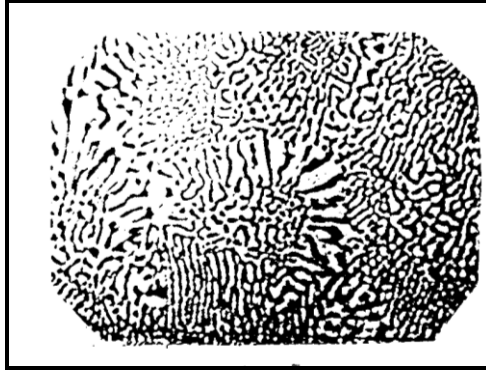
ولغرض تحقيق التجميد الاتجاهي، استخدم فرن أنبوبي أفقي يسخن بالمقاومة الكهربائية، له قابلية تسخين لغاية ١١٠٠م° حاوي على مزودج حراري نيكول-كروم، وفي داخله أنبوب من الكوارتز، كما يحتوي الفرن على مجرى للماء لأغراض السيطرة على معدل انحدار درجة الحرارة، وان مجموعة الفرن محمولة على عربة تسمح لحركة الفرن أفقياً بسرعات مختلفة، وبشكل عام ولغرض الحصول على بنيه يوتكتك متجانسة للطورين  $\beta, \alpha$  يجب ان تتوفر الشروط التالية:

- ١- يجب أن يكون التباين الحراري باتجاه واحد وبمعدلات عالية.
- ٢- سرعة التجميد بطيئة وغير متغيرة (ثابته).
- ٣- السيطرة على الشوائب بحيث يمنع تكون المستعمرات (Colonies).
- ٤- يجب تلافي كل التغيرات الحرارية المفاجئة وذلك بالسيطرة على مصادر الحرارة والبرودة.
- ٥- تلافي جميع أنواع الاهتزازات الميكانيكية أثناء عملية التجميد الاتجاهي.

## ٣. النتائج

## ١-٣ النموذج A

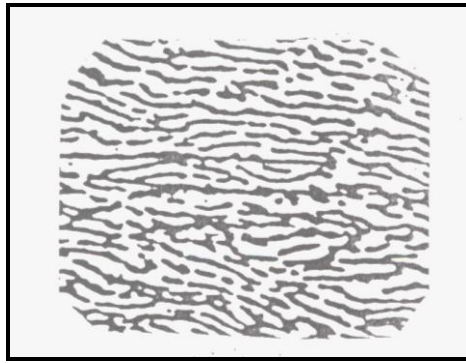
من خلال دراسة البنى المجهرية لعينات النموذج A المبردة بالهواء والمقطوعة طولياً يلاحظ وجود صفائح قصيرة ورقيقة جداً وغير منتظمة للطورين  $\beta, \alpha$  وموزعين بشكل غير منتظم كما في الشكل (٢) ويلاحظ كذلك وجود مناطق ذات تركيب شجري ووجود مستعمرات.



شكل رقم (٢) عينة مصبوبة من Zn-Al بتركيز اليوتكتك مبردة بالهواء ومقطوعة طولياً للنموذج A

## ٢-٣ النموذج B

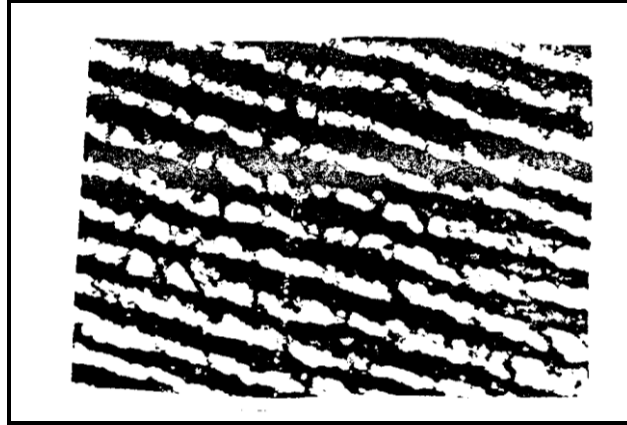
تبين البنية المجهرية لعينات النموذج B والمبردة بالماء البارد من درجة  $530^{\circ}\text{C}$  والمقطوعة طولياً بنيه أكثر تناسقاً وترتيباً، وان الصفائح أصبحت كبيرة نسبياً ومسافات متباعدة بشكل ملحوظ واصبحت البنية أكثر تناسقاً كما في الشكل (٣)، ويلاحظ ظهور المستعمرات بشكل أكثر وضوحاً وفي داخل هذه المستعمرات يلاحظ ان الصفائح أكثر انتظاماً.



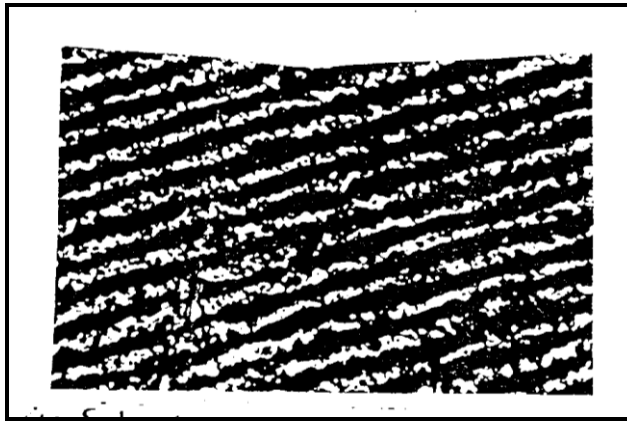
شكل رقم (٣) عينة مصبوبة من Zn-Al بتركيز اليوتكتك مبردة بالماء البارد بدرجة حرارة  $500^{\circ}\text{C}$  ومقطوعة طولياً للنموذج B

## ٣-٣ النموذج C

بينت العينات السبعة المقطوعة من هذا النموذج بسمك ٠,٨ مم والتي اجري عليها التجميد الاتجاهي بسرعات تجميد من ٠,٣٣٣ الى ١٠,٥٥٥ مايكرون / ثانية ، ان المسافة بين الصفائح  $\lambda$  تتغير عكسياً مع سرعة التجميد وكما موضح في الشكل (٤) وجدول (١) ومن رسم المعادلة (٢) بين  $\ln V$  و  $\ln \lambda$  كما في الشكل (٥) وجد ان قيمة  $n=2.2$  وان الثابت K مساوي الى ٣٢,٩٧٦ مايكرون<sup>٣</sup> / ثانية.



$$V = 0.639 \text{ مايكرون/ثا } \lambda = 6 \text{ مايكرون}$$



$$V = 4.5 \text{ مايكرون/ثا } \lambda = 4.5 \text{ مايكرون}$$



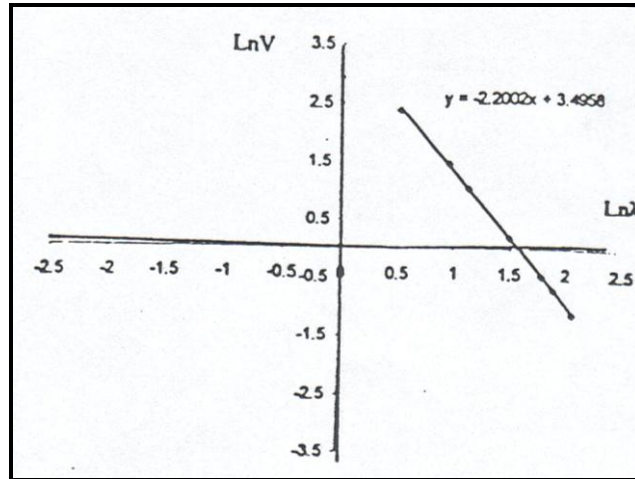
$$V = 4.166 \text{ مايكرون/ثا } \lambda = 2.6 \text{ مايكرون}$$

شكل رقم (٤) بعض عينات النموذج C والمقطوعة طولياً والتي أجريت عليها التجميد الاتجاهي يلاحظ العلاقة العكسية بين سرعة التجميد والمسافات بين صفائح اليوتكتك

15  $\mu\text{m}$

جدول رقم (١) تغير سرعة التجميد الأتجاهي  $v$  والمسافة  $\lambda$  للمقاطع الطولية بتركيز اليوتكتك للنموذج C سمك العينة ٠,٨ مم، ومعدل الأنحدار ودرجة الحرارة ٤٠ درجة/سم

سرعة التجميد $V$ مايكرون/ثا	المسافة بين الصفائح $\lambda$ مايكرون
٠,٣٣٣	٨
٠,٥	٦,٧
٠,٦٣٩	٦
١,٢٢	٤,٥
٢,٧٧	٣,١
٤,١٦٦	٢,٦
١٠,٥٥٥	١,٦٥



شكل رقم (٥) العلاقة بين  $\text{Ln } \lambda - \text{Ln } V$ ،  $n = 2.20$ ،  $K = 3.4958$  للنموذج C

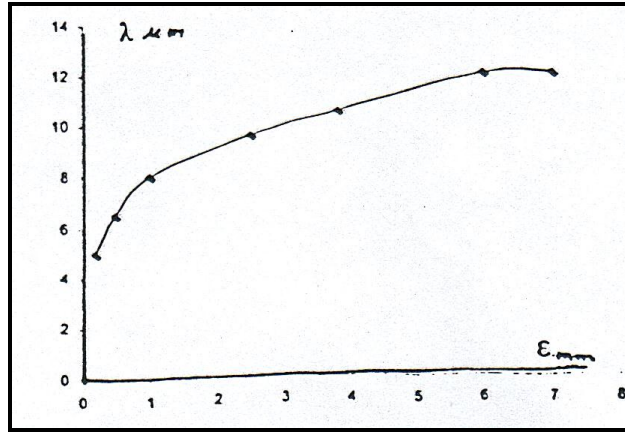
### ٤-٣ النموذج D

ان العينات المقطوعة من النموذج D، بسمك مختلف من (٢,٠ مم الى ٧ مم)، اجريت عليها عمليات التجميد الاتجاهي بسرعة ٠,٥٥٥ مايكرون/ثانية بينت ان صفائح اليوتكتك تتسع مع زيادة سمك العينة كما في جدول (٢)، واذا رسمت العلاقة بين المسافة بين الصفائح  $\lambda$  وسمك النموذج (٤) وكما في الشكل (٦) نستنتج ان هناك علاقة رياضية بينهما سنأتي الى افتراضها في المناقشة، ومن جدول (٢) وجدنا ان افضل سمك للعينات للحصول على صفائح يوتكتيكية منتظمة كان بين (٠,٥ الى ١ مم)، وان السمك (اقل من ٠,٥ واكثر من ٢,٥ مم) يولد صفائح ذات اشكال غير متناسقة.

جدول رقم (٢) يمثل تغير سمك العينة  $\epsilon$  والمسافة  $\lambda$  للمقاطع الطولية بتركيز اليوتكتك للنموذج D سرعة التجميد الأتجاهي ٠,٥٥٥ مايكرون/ثا، ومعدل الأنحدار ودرجة الحرارة ٤٠ درجة/سم

سمك العينة $\epsilon$ مم	المسافة بين الصفائح $\lambda$ مايكرون
٠,٣٣٣	٨

٠,٥	٦,٧
٠,٦٣٩	٦
١,٢٢	٤,٥
٢,٧٧	٣,١
٤,١٦٦	٢,٦
١٠,٥٥٥	١,٦٥



شكل رقم (٦) العلاقة بين المسافة بين الصفائح  $\lambda$  وسمك العينة  $\epsilon$  للنموذج D

#### ٤. المناقشة

في العينات الخاصة بالنموذجين B, A كما في الشكلين (٣, ٢) لم تعطي اشكال متناسقة لصفائح اليوتكتك بالمقارنة مع عينات النموذجين D, C والتي استخدم فيها مبدأ التجميد الاتجاهي . حيث يلاحظ ان هذه الصفائح رقيقة جداً ولا يمكن اعتبارها نسيج يوتكتك في كثير من الاحيان ، وسببه يرجع بالدرجة الاساس الى عدم وجود تجانس في التراكيب وتوزيع غير منتظم للتراكيز داخل البنية، وذلك بسبب التبريد المباشر من الحالة المنصهرة.

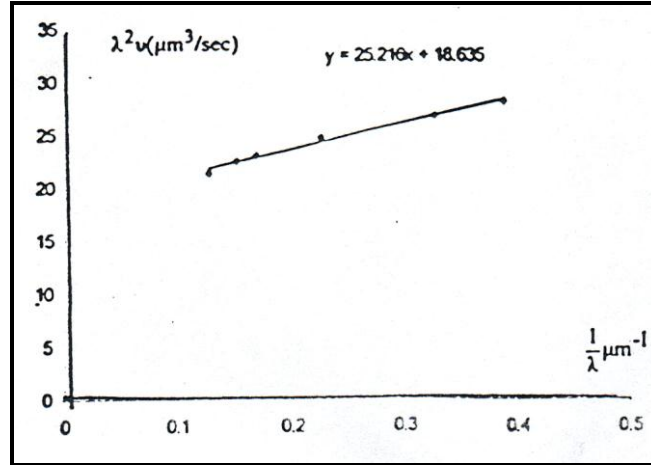
اما في العينات الخاصة بالنموذج ( C ) والموضحة في الشكل ( ٤ ) فقد رسمت العلاقة بين  $L V$  ،  $\lambda$  للمعادلة (٢) كما في الشكل (٥) فاصبحت هذه المعادلة بالشكل التالي  $[V = 32.976 \lambda^{2.2}]$  يتضح لنا ان قيمة n مساوية الى

(٢, ٢) وليس ٢ كما وجدها Tiller، بينما اذا استخدمنا معادلة Lesoult العلاقة (٣) وذلك برسم  $V \lambda^2$  كدالة الى  $\frac{1}{\lambda}$

كما في الشكل (٧) فاصبحت هذه العلاقة بالشكل التالي:

$$\lambda^2 V = 18.6 + \frac{25.216}{\lambda} \dots\dots\dots (3)$$

وعليه نستنتج ان العلاقة Lesoult كانت مطابقة للحسابات العملية اكثر من علاقة Tiller.



شكل رقم (٧) العلاقة بين  $\lambda^2 v$  و  $\frac{1}{\lambda}$  للنموذج C

اما عينات النموذج (D) فقد بين كل من الجدول (٢) والشكل (٦) ان قيم  $\lambda$  تزداد طردياً وبشكل حاد مع زيادة سمك العينة ولغاية ١,٥ مم ثم تأخذ هذه الزيادة بالنقصان التدريجي ولغاية سمك ٤ مم ثم تتوقف هذه الزيادة عند ٦ مم، ولهذا نستنتج انه كلما كان الفرق الحراري بين قلب العينة وسطحها الخارجي كبيراً [السمك اكثر من ١,٥ مم] كلما زادت المسافة بين الصفائح  $\lambda$  وأصبحت كبيرة الحجم وغير منتظمة [4,5] عليه نستنتج ان احسن سمك للحصول على بنية متجانسة من الصفائح هو بين (٥,٥ الى ١ مم).

ان الشكل (٦) المرسوم بين  $\lambda$  والسمك  $\varepsilon$  يعطى الفرصة لاستنتاج علاقة رياضية بينهما على غرار علاقة (جونسون-ميهيل-افرامي) (J.M.A) [17] والمستخدم عادة في عمليات اعادة التبلور وبالشكل التالي:

$$\lambda = \lambda_0 [(1 - \text{Exp}(-P \varepsilon^m))] \dots\dots\dots (4)$$

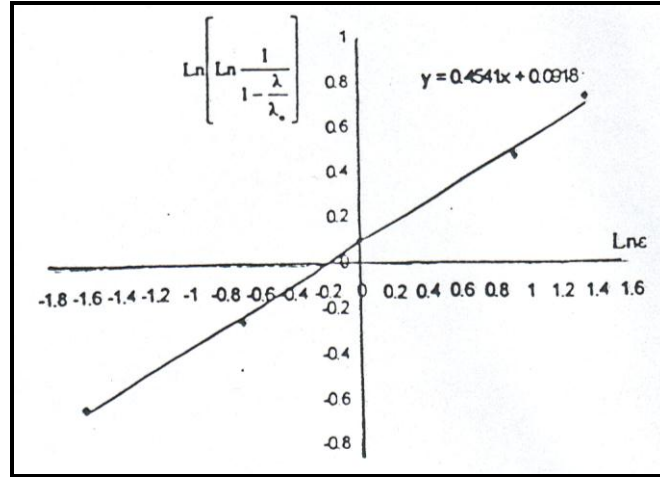
$$\text{حيث } P, m \text{ ثابتان، وتمثل } \lambda_0 \text{ اكبر مسافة بين الصفائح، وعند رسم العلاقة بين } \ln \left[ \ln \frac{1}{1 - \frac{\lambda}{\lambda_0}} \right]$$

وبين  $\ln \varepsilon$  الذي يمثل سمك النموذج كما في الشكل (٨) فنحصل بذلك على خط مستقيم ميله مساوي إلى  $m$  وقدره (٠,٤٥٤) ونقطة التقاطع مساوية إلى  $\ln A$  المساوية الى ٠,٠٩١٨ وعليه نحصل على قيمة  $A$  والمساوية الى (١,١) تصبح العلاقة (٤):

$$\lambda = \lambda_0 (1 - \text{Exp}(-1.1 \varepsilon^{0.454})) \dots\dots\dots (5)$$

وهذه العلاقة تتغير تبعاً لتغير سرعة التجميد الاتجاهي ومعدل انحدار درجة الحرارة .





شكل رقم (٨) العلاقة بين  $\text{Ln} \left[ \frac{\text{Ln} \frac{1}{\lambda}}{1 - \frac{\lambda}{\lambda_0}} \right]$  و  $\text{Ln} \varepsilon$  للنموذج D

## ٥. الاستنتاجات

- ١- تكون صفائح اليوتكتك منتظمة عند استخدام مبدأ التجميد الاتجاهي للمصبوبة.
- ٢- في سبائك اليوتكتك (Zn- Al) تكون علاقة Lesout هي المطابقة للنتائج العملية - وفي حالة تطبيق المعادلة Tiller يجب إن تكون n مساوية إلى ٢,٢ وحسب العلاقة  $V = K \lambda^{2.2}$ .
- ٣- هناك علاقة رياضية بين  $\lambda$  والسمك ( $\varepsilon$ ) تشبه علاقة (جونسون - ميهيل - افرامي) والمطبقة في حسابات اعادة التبلور حيث كانت قيمتا الثابتان  $m, P$  في المعادلة (٤) مساويان الى (٠,٤٥٤)، (١,١) على التوالي .
- ٤- احسن سمك للحصول على بنية يوتكتيكية منتظمة كان بين (٠,٥ - ١م).
- ٥- احسن سرعة للتجميد للحصول على بنية متجانسة هو ٠,٥٥٥ مايكرون/ ثانية عندما يكون معدل انحدار درجة الحرارة ٤٠ درجة /سم.

## ٦. المصادر

1. Akamatsu, S., and Faivre, G., Journal of Phys, I., France, Vol. 6, 1996, 503 pp.
2. Karma, S. A., and Sarkissian, A., Metall Mater. Trans., 27 A., 1996, 635 pp.
3. Akamatsu, S., Plapp, M., Faivre, G., and Karma, A., "**Over Stability of Lamellar Eutectic Growth Below the Minimum-Under Cooling Spacing**", Metall Mater. Trans. 35A, 2004, 1815 pp.
4. Lee, S. M., Hong, C. P., Scr. Mater, 37, 1997, 165 pp.
5. Akamatsu, S., Faivre, G., Phys. Rev., E.61, 2000, 3757 pp.
6. Hunt, J. D., "**The Solidification of Metals**", Iron and Steel Inst., 1968, 125 pp.
7. Moore, A., Elliot, R., "**Solidification of Metals**", Proc., Conf, Brighton 1967, 167 pp.
8. LemKey, F. D., Herizberg, R. W., and Ford, J. A., Trans. AIME 233, 1965, 334 pp.
9. Hunt, J. D., Jackson, K. A., "**Binary Eutectic Solidification**", Trans. Met. Soc., AIME 236, 1966, 843 pp.
10. Tiller, W. A., "**Liquid Metals and Solidification**", American Society for Metals, Cleveland, Ohio, 1958.
11. Tiller, W. A., Journal of Applied Phys.34, 1963, 2757 pp.
12. Chadwick, G. A., "**Interlamellar-Spacing Measurements in Certain Binary Eutectic System**", J. Inst. Met.92, 1963, 18 pp.
13. Lesoult, G., Turpin, M., Mem. Scient. Rev. Met, 66, 1969, 619 pp.
14. Carlberg, T., and Fredviksson, H., "**On the Mechanism of Lamellar Spacing Adjustment in Eutectic Alloys**", J. Cryst. Growth 42, 1977, 526 pp.
15. Boswell, P. G., and Chadwick, G. A., "**Eutectoid Decomposition on Zn-AL Splat-Quenched and Bulk Specimens**", Acta. Metall 25, 1977, 779 pp.
16. Ciach, R., Dukiet-Zawadzka, B., "**A Study of the Homogenization Process of AL-Zn Alloys**", J. Mater. Sc.13, 1978, 2676 pp.
17. Johnson, W. A., and Mehl, R. F., Trans. AIME 135, 1939, 416 pp.